

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
PIHII (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2019 Issue: 11 Volume: 79

Published: 18.11.2019 <http://T-Science.org>

QR – Issue



QR – Article



Umarali Abduvaxobovich Nazarov

Samarkand state architectural and civil engineering institute
Candidate of Physical and Mathematical Sciences,
Docent to department of information technology, Uzbekistan
umaralin@rambler.ru

INFLUENCE OF DETERMINING PARAMETERS ON INTERRUPTION OF THE DISTRIBUTION OF DETONATION WAVES IN GAS- SUSPENSIONS OF UNIT FUEL WITH A LAYER OF INHOMOGENEOUS INERTIES

Abstract: In the framework of the model of two-dimensional axisymmetric unsteady motion of a dispersed three-phase reacting mixture of a two-component gas, particles of unitary fuel and inert particles, mathematical modeling of the process of interrupting the propagation of a wave of heterogeneous detonation in a gas suspension of a unitary fuel containing a layer of inhomogeneous chemically inert particles is performed. The influence of the main determining parameters (mass content and size of chemically inert particles) on the interruption of the propagation of a wave of heterogeneous detonation in gas suspensions of a unitary fuel is studied.

Key words: burning, detonation, shock wave, detonation wave, mathematical model, unitary fuel, inert particles, mass content of particles.

Language: Russian

Citation: Nazarov, U. A. (2019). Influence of determining parameters on interruption of the distribution of detonation waves in gas-suspensions of unit fuel with a layer of inhomogeneous inerties. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 11 (79), 84-89.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-11-79-21> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2019.11.79.21>

Scopus ASCC: 2604.

ВЛИЯНИЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРЕРЫВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ГАЗОВЗВЕСЯХ УНИТАРНОГО ТОПЛИВА СЛОЕМ НЕОДНОРОДНЫХ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ

Аннотация: В рамках модели двухмерного осесимметричного нестационарного движения дисперсной трёхфазной реагирующей смеси двухкомпонентного газа, частиц унитарного топлива и инертных частиц выполнено математическое моделирование процесса прерывания распространения волны гетерогенной детонации в газовзвеси унитарного топлива, содержащей слой неоднородной химически-инертных частиц. Исследовано влияния основных определяющих параметров (массового содержания и размера химически инертных частиц) на прерывание распространения волны гетерогенной детонации в газовзвесах унитарного топлива.

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

Введение

УДК 532.529: 518.5

Проблема прерывания распространения детонационных волн в газовзвесах унитарного топлива слоем инертных частиц была изучена

численно в работах [4–10]. В настоящей работе, являющейся продолжением [4–6] численно исследуется процесс прерывания распространения волны гетерогенной детонации в газовзвеси унитарного топлива, содержащей слой неоднородных инертных частиц. Изучено влияние

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
 ISI (Dubai, UAE) = 0.829
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИИЦ (Russia) = 0.126
 ESJI (KZ) = 8.716
 SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

массового содержания и размера инертных частиц на прерывание распространения волны гетерогенной детонации в газозвесах унитарного топлива.

Основные уравнения.

Пусть имеется трехфазная смесь газа, частиц унитарного топлива и инертных твердых частиц. Используя обычные для механики гетерогенных

дисперсных сред допущения [1,2], систему дифференциальных уравнений двухмерного осесимметричного нестационарного движения дисперсной трёхфазной реагирующей смеси двухкомпонентного газа, частиц унитарного топлива и инертных частиц, можно записать в следующем виде [1,2]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_{1k}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{1k} v_{ir} r}{r \partial r} + \frac{\partial \rho_{1k} v_{iz}}{\partial z} &= (k-1)J \quad (k=1,2), \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 v_{2r} r}{r \partial r} + \frac{\partial \rho_2 v_{2z}}{\partial z} = -J, \\ \frac{\partial \rho_3}{\partial t} + \frac{\partial \rho_3 v_{3r} r}{r \partial r} + \frac{\partial \rho_3 v_{3z}}{\partial z} &= 0, \quad \frac{\partial n_2}{\partial t} + \frac{\partial n_2 v_{2r} r}{r \partial r} + \frac{\partial n_2 v_{2z}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial \rho_i v_{ir}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i v_{ir} v_{ir} r}{r \partial r} + \frac{\partial \rho_i v_{ir} v_{iz}}{\partial z} + (2-j) \frac{\partial p}{\partial r} &= (-1)^j S, \\ \frac{\partial \rho_i v_{iz}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_i v_{ir} v_{iz} r}{r \partial r} + \frac{\partial \rho_i v_{iz} v_{iz}}{\partial z} + (2-j) \frac{\partial p}{\partial z} &= (-1)^j S, \\ \frac{\partial \rho_2 e_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 e_2 v_{2r} r}{r \partial r} + \frac{\partial \rho_2 e_2 v_{2z}}{\partial z} &= Q_{12} \eta(-J) - J e_2, \\ \frac{\partial \rho_3 e_3}{\partial t} + \frac{\partial \rho_3 e_3 v_{3r} r}{r \partial r} + \frac{\partial \rho_3 e_3 v_{3z}}{\partial z} &= Q_{13}, \\ \sum_{i=1}^3 \left[\frac{\partial \rho_i E_i}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_i E_i + \alpha_i p) v_{ir} r}{r \partial r} + \frac{\partial (\rho_i E_i + \alpha_i p) v_{iz}}{\partial z} \right] &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho_{11} &= \rho_{11}^0 \alpha_{11}, \quad \rho_{12} = \rho_{12}^0 \alpha_{11}, \quad \rho_1 = \rho_1^0 \alpha_1, \quad \rho_1 = \rho_{11} + \rho_{12}, \\ \rho_2 &= \rho_2^0 \alpha_2, \quad \rho_3 = \rho_3^0 \alpha_3, \quad v_i^2 = v_{2ir}^2 + v_{2iz}^2 \quad (i, k = 1, 2), \\ \alpha_2 &= \frac{1}{6} \pi d_2^3 n_2, \quad \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1, \quad E_i = e_i + 0.5 v_i^2 \quad (i = 1 \div 3) \\ j &= \begin{cases} 1, & \text{если } i = 1 \\ 2, & \text{если } i = 2, 3 \end{cases}, \\ S &= \begin{cases} F_{2n} + F_{3n} - J v_{2n}, & \text{если } i = 1, \\ F_{2n} - J v_{2n}, & \text{если } i = 2, \\ F_{3n}, & \text{если } i = 3. \end{cases} \quad n = r, z. \end{aligned}$$

Здесь представлены уравнения сохранения масс инертного газа ($k=1$), газообразных продуктов горения ($k=2$), частиц унитарного топлива и инертных частиц; 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 дисперсной фазы; ρ_{1k} и ρ_{1k}^0 – приведенная и истинная плотности k -й 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 ($i = 1, 3$); v_{ir} и v_{iz} – компоненты скорости v_i ; n_2 – число частиц унитарного топлива в единице объема смеси; d_2 – диаметры частиц унитарного топлива и d_3 – диаметр инертных частиц; p – давление газовой смеси; F_r и F_z – составляющие

силы межфазного трения; Q_{1j} ($j=2,3$) – интенсивность теплообмена между газовой и дисперсными фазами; J – интенсивность межфазного массообмена; η – единичная функция Хевисайда.

Замыкающие соотношения в форме уравнений состояний газовой смеси в целом, а также несжимаемых дисперсных частиц, законы силового и теплового взаимодействия фаз задаются аналогично [1,2].

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 неоднородных 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,

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
 ISI (Dubai, UAE) = 0.829
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИНЦ (Russia) = 0.126
 ESJI (KZ) = 8.716
 SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

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, распространяться как в режиме усиления, так и в режиме затухания.

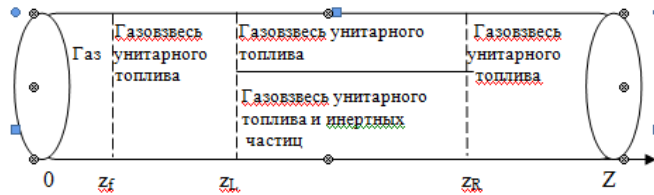


Рис. 1. Схематическое представление задачи о прерывании распространения волны гетерогенной детонации слоем инертных частиц.

Начальные условия задачи формулируются аналогично работе [2] следующим образом:

$$\begin{aligned}
 v_{1z} &= v_{1f} \frac{z}{z_f}, v_{1r} = 0, p = p_f \sigma^{\gamma_{11}}; \rho_1^0 = \rho_{1f}^0 \sigma, \rho_{11}^0 = \rho_1^0, \rho_{12} = 0, \\
 \alpha_1 &= 1, \alpha_{1f}^2 = \gamma_{11} \frac{p_f}{\rho_{1f}^0 R_{11}}, T_1 = \frac{p}{\rho_{1f}^0 R_{11}}, \frac{v_{1f}}{a_{110}} = \frac{2}{(\gamma_{11} + 1) \sigma} \left(M_0 - \frac{1}{M_0} \right), \\
 \sigma &= \left[1 - \left(\frac{\gamma_{11} - 1}{2} \right) \frac{v_{1f}}{a_{1f}} \left(\sigma - 1 - \frac{z}{z_f} \right) \right]^{2\sigma / (\gamma_{11} - 1)}, \frac{\rho_{1f}^0}{\rho_{10}^0} = \frac{(\gamma_{11} + 1) M_0^2}{2 + (\gamma_{11} - 1) M_0^2}, \\
 \frac{p_f}{p_0} &= 1 + \frac{2\gamma_{11}}{\gamma_{11} + 1} (M_0^2 - 1), \frac{T_f}{T_0} = \left(\frac{p_f}{p_0} \right) \left(\frac{\rho_{1f}^0}{\rho_{10}^0} \right)^{-1}, 0 \leq z \leq z_f, \\
 p &= p_0, T_1 = T_0, v_{1r} = v_{1z} = 0, \\
 \rho_1^0 &= \rho_{110}^0, \rho_{12} = 0, \rho_1 = \rho_1^0 \alpha_1, \\
 \rho_2 &= \rho_2^0 \alpha_2, \\
 T_2 &= T_0, v_{2r} = v_{2z} = 0, \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \rho_3 = 0, T_3 = 0, v_{3r} = v_{3z} = 0, \\
 z_f &< z \leq z_L \cup z_R < z < Z, \\
 p &= p_0, T_1 = T_0, v_{1r} = v_{1z} = 0, \rho_1^0 = \rho_{110}^0, \rho_{12} = 0, \rho_1 = \rho_1^0 \alpha_1, \\
 \rho_2 &= \rho_2^0 \alpha_2, \\
 T_2 &= T_0, v_{2r} = v_{2z} = 0, \rho_3 = \rho_3^0 \alpha_3, T_3 = T_0, v_{3r} = v_{3z} = 0, \\
 \alpha_1 &+ \alpha_2 + \alpha_3 = 1, \\
 z_L &< z \leq z_R.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Здесь индексами “f” и “0” отмечены параметры фаз соответственно за и перед фронтом ударной волны; M_0 и a_{1f} - число Маха набегающей ударной волны и адиабатическая скорость звука в газе за ударным скачком; γ_{11} - показатель адиабаты инертного газа.

Граничные условия задачи задаются в виде равенства нулю нормальных составляющих скоростей фаз на стенках канала:

$$v_{iz}(0, r, t) = v_{ir}(z, 0, t) = v_{ir}(z, R, t) = 0, 0 \leq r \leq R, 0 \leq z \leq Z. \tag{3}$$

На правой границе расчетной области ($z = z_{\rightarrow \leftarrow **}$) для всех трёх фаз ставилось условие их свободного протекания.

Замкнутая система дифференциальных уравнений (1) вместе с представленными начальными (2) и граничными (3) условиями решалась численно методом крупных частиц [3]. Расчеты осуществлялись для смесей воздуха, газообразных продуктов горения пороха, частиц пороха и кварцевого песка.

Во всех расчетах начальная длина инициирующей ударной волны полагались равными $z_f = 0.4$ м. и радиус трубопровода $R = 0.5$ м. Число Маха (M) набегающей ударной волны равно 9, что соответствует давлению за ударным скачком 9.43 МПа.

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

В расчетах использовано следующие выражение для пространственного распределения концентрации инертных частиц в трубопровода.

$$\varepsilon(z,r,A)=1 \quad (4)$$

Параметр $0 \leq A \leq 1$ зависимости (4) характеризует степень неоднородности пространственного распределения концентрации инертных частиц. При этом предельные значения $A=0$ и $A=1$ соответствуют наименьший (нулевой) и наибольшей степеням неоднородности распределения концентрации инертных частиц.

При этом использовались следующие значения термодинамических параметров фаз:

инертный газ-воздух:

$T_0=293$ К, $p_0=0.1$ МПа, $\gamma_{11}=1.4$, $R_{11}=287$ м²/(с²·К), $\mu_{11}=1.7 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), $\lambda_{11}=2.57 \cdot 10^{-2}$ кг·м/(с³·К), $\rho_{110}^0=1.29$ кг/м³, $\rho_{120}^0=1.03$ кг/м³;

газообразные продукты горения топлива:

$c_{p2}=1675$ м²/(с²·К), $R_{12}=328$ м²/(с²·К), $\lambda_{12}=8.37 \cdot 10^{-2}$ кг·м/(с³·К), $\gamma_{12}=1.24$, $\mu_{12}=1.7 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с);

частицы унитарного топлива:

$\rho_2^0=1550$ кг/м³, $c_2=1466$ м²/(с²·К), $Q^0=1.93$ МДж/кг, $T_s=473$ К, $\phi=0.7$, $v_s=6.5 \cdot 10^{-4}$ м/с.

частицы кварцевого песка:

$\rho_2^0=2500$ кг/м³, $c_2=710$ м²/(с²·К).

Некоторые результаты.

На рис. 2 представлены расчетные профили давления газовой смеси при прохождении волны гетерогенной детонации через слой неоднородных инертных частиц. Кривые 1–11 на рис. 2 соответствуют моментам времени $t=4.7, 9.43, 14.1, 18.8, 23.6, 26.5, 33, 42.5, 51.9, 56.7, 61.4$ мс и

параметрам фаз $m_{20}=0.5$; $d_{20}=30$ мкм; $m_{30}=10$; $d_{30}=30$ мкм (при $t=0$). Вычисления проводились для экранирующих слоёв инертной газозвеси протяжённостью $l_s=5$ м. Параметр $A=0.8$. На моменты времени $t=18.8$ и 23.6 (кривые 4–5) в газозвеси унитарного топлива формируется волна гетерогенной детонации, распространяющаяся в режиме Чепмена – Жуге с постоянной для данной смеси скоростью. На начальном этапе этого взаимодействия (см. кривую 6 на рис. 2) наблюдается заметное повышение давления в проходящей волне из-за торможения набегающего потока в плотном слое инертных частиц. Рост давления в проходящей волне стимулирует горение частиц пороха и вместе с тем усиливает теплообмен между горячим газом и инертными частицами. Поглощение тепла инертными частицами приводит к ослаблению проходящей волны горения, и она интенсивно затухает (кривая 7–8 на рис. 2). В последующем проходящая волна достигает правой границы слоя инертных частиц, где распадается на проходящую ударную волну, движущуюся в зоне унитарного топлива ($z > z_R$) и волну разрежения, распространяющуюся в область трехфазной смеси ($z \leq z_R$). Волна разрежения способствует некоторому ослаблению затухающей волны горения, однако в последующем после её отражения от левой границы облака инертных частиц образуется отражённая в облако инертной газозвеси волна сжатия, вновь способствующая усилению горения частиц пороха (кривые 9 на рис.2). В рассматриваемом примере расчета процесс горения частиц унитарного топлива не прекращается под действием инертной фазы.

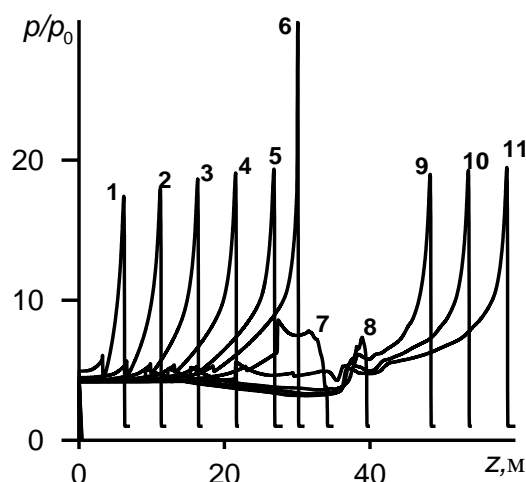


Рис. 2. Профили давления газовой смеси при прохождении волны гетерогенной детонации через слой неоднородных инертных частиц.

В работе численно изучено влияние исходного относительного массового содержания инертных частиц на прерывание распространение

детонационных волн в газозвесях унитарного топлива. На рис. 3 представлены расчетные профили давления газовой смеси при

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

прохождении волны гетерогенной детонации через слой неоднородных инертных частиц. Кривые 1–12 на рис. 2 соответствуют моментам времени $t=4.7, 9.43, 14.1, 18.8, 23.6, 26.5, 33.0, 37.7, 47.2, 56.7, 66.1, 75.5$ мс и параметрам фаз $m_{20}=0.5$; $d_{20}=30$ мкм; $m_{30}=15$; $d_{30}=30$ мкм (при $t=0$).

Остальные параметры такие же как на рис.2. Из рис.3 видно, что увеличение массового содержания инертных частиц приводит к прекращению процесса горения частиц унитарного топлива.

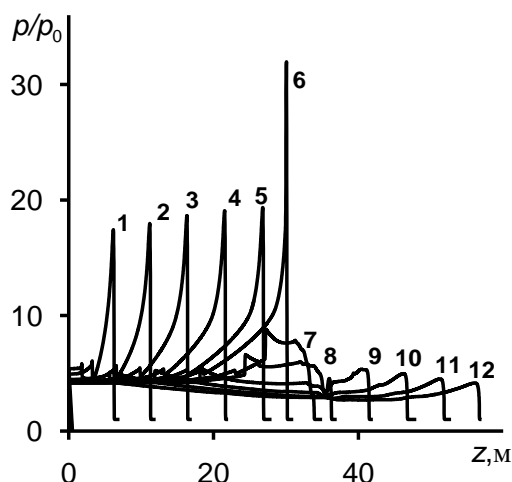


Рис. 3. Профили давления газовой смеси при прохождении волны гетерогенной детонации через слой неоднородных инертных частиц.

Ниже приведены некоторые результаты численного исследования влияния размера инертных частиц на распространение детонационных волн в газозвесьях унитарного топлива. Кривые 1–12 на рис. 4 соответствуют моментам времени $t=4.7, 9.43, 14.1, 18.8, 23.6, 26.5, 33.0, 37.7, 42.5, 47.2, 51.9, 56.7$ мс и параметрам фаз $m_{20}=0.5$; $d_{20}=30$ мкм; $m_{30}=15$; $d_{30}=360$ мкм (при $t=0$). Остальные параметры такие же как на рис.3. Из рис.4 видно, что размер инертных частиц существенно влияет на структуру детонационных волн. При фиксированных параметрах трубопровода, газозвесьях унитарного топлива и инертных частиц для $d_{30}=360$ мкм наблюдается продолжение

детонации, для $d_{30}=30$ мкм (см. рис.3) срыв детонации в трубопровода. Такое влияние размера частиц можно объяснить исходя из анализа законов межфазного трения и контактного теплообмена фаз. В соответствии с этими законами интенсивность обмена импульсов и энергий фаз возрастает при уменьшении размера дисперсных частиц. Чем меньше радиус частиц тем сильнее торможение газа (из-за трения) и его охлаждение (из-за теплообмена с частицами). Торможение газа приводит к снижению температуры (и давления) газа. Таким образом, межфазное трение и теплообмен оказывают противоположное воздействие на давление газа.

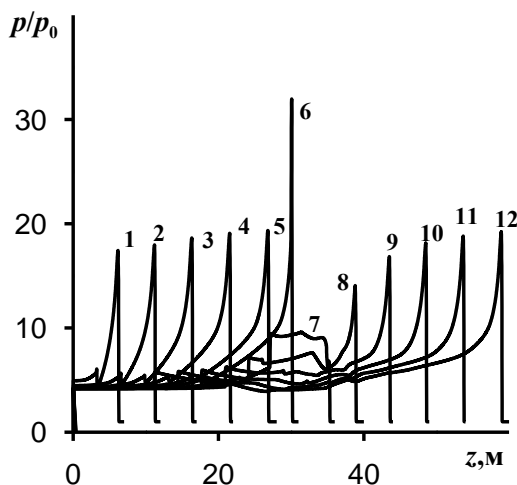


Рис. 4. Профили давления газовой смеси при прохождении волны гетерогенной детонации через слой неоднородных инертных частиц.

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИЦ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.716
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

Таким образом, проведенное исследование свидетельствует о существенном влиянии - массового содержания и размера инертных частиц

на прерывание или продолжение процесса распространения волны гетерогенной детонации.

References:

1. Nigmatulin, R.I. (1987). *Dinamika mnogofaznykh sred.* (p.464). Moscow: Nauka. Ch.1.
2. Kutushev, A.G. (2003). *Matematicheskoe modelirovanie volnovykh protsessov v aerodispersnykh i poroshkoobraznykh sredakh.* (p.284). SPb: Nedra.
3. Belotserkovskiy, O.M., & Davydov, Y.M. (1982). *Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike.* Moscow: Nauka.
4. Kutushev, A.G., & Pichugin, O.N. (1993). Chislennoe isledovanie protsessa preryvaniya rasprostraneniya detonatsionnykh voln v gazovzvesyakh unitarnogo topliva sloem inertnykh chastits. *Fizika gorennya i vzryva, T. 29, № 2*, pp. 90–98.
5. Kutushev, A.G., & Pichugin, O.N. (1996). O vliyaniy prostranstvennoy neodnorodnosti raspredeleniya chastits v ekraniruyushchem sloe na podavlenie detonatsionny volny v aerovzvesi unitarnogo topliva. *FGV, T. 32, № 4*, pp. 107–109.
6. Khuzhaerov, B.Kh., Kutushev, A.G., Burnashev, V.F., & Nazarov, U.A. (2010). Chislennoe modelirovanie protsessa preryvaniya rasprostraneniya detonatsionnykh voln v gazovzvesyakh unitarnogo topliva sloem inertnykh chastits. *Problemy mekhaniki, № 1*, pp. 31–35.
7. Fedorov, A.V., & Tropin, D.A. (2011). Opredelenie kriticheskogo razmera oblaka chastits, neobkhodimogo dlya podavleniya gazovoy detonatsii. *FGV, T. 47, № 4*, pp. 100–108.
8. Fedorov, A.V., Tropin, D.A., & Bedarev, I.A. (2010). Matematicheskoe modelirovanie podavleniya detonatsii vodorokislorodnoy smesi inertnymi chastitsami. *FGV, T. 46, № 3*, pp. 103–115.
9. Fomin, P.A., & Chen, Dzh-R. (2009). Vliyanie khimicheski inertnykh chastits na parametry i podavlenie detonatsii v gazakh. *FGV, T. 45, № 3*, pp. 77–88.
10. Papalexandris, M.V. (2004). Numerical simulation of detonations in mixtures of gases and solid particles. *J. Fluid Mech., V.507*, pp. 95–142.