

## Impact Factor:

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

SIS (USA) = 0.912  
PIHHC (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: 2020 Issue: 05 Volume: 85

Published: 30.05.2020 <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](mailto:umaralin@rambler.ru)

## ATTENUATION OF DETONATION WAVES IN GAS-SUSPENSIONS OF UNITARY FUEL WITH LAYERS OF INHOMOGENEOUS INERT PARTICLES

**Abstract:** In the framework of the model of mechanics of heterogeneous media, a numerical study of the process of attenuation of detonation waves in gas-suspended unitary fuels by layers of homogeneous and inhomogeneous inert particles was performed. It was shown that the diameter, layer lengths and heterogeneity of inert particles have a significant effect on the process of interruption of a heterogeneous detonation wave in gas-suspended unitary fuels.

**Key words:** burning, detonation, detonation wave, mathematical model, unitary fuel, inert particles, interruptions, layer lengths, diameter and mass content of particles.

**Language:** Russian

**Citation:** Nazarov, U. A. (2020). Attenuation of detonation waves in gas-suspensions of unitary fuel with layers of inhomogeneous inert particles. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 05 (85), 721-725.

**Soi:** <http://s-o-i.org/1.1/TAS-05-85-130> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2020.05.85.130>

**Scopus ASCC:** 2604.

### ОСЛАБЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН В ГАЗОВЗВЕСЯХ УНИТАРНОГО ТОПЛИВА СЛОЯМИ НЕОДНОРОДНЫХ ИНЕРТНЫХ ЧАСТИЦ

**Аннотация:** В рамках модели механики гетерогенных сред выполнено численное исследование процесса ослабления детонационных волн в газовзвесьях унитарного топлива слоями однородных и неоднородных инертных частиц. Показано, что диаметр, длины слоя и неоднородность инертных частиц существенно влияет на процесс прерывания волны гетерогенной детонации в газовзвесьях унитарного топлива.

**Ключевые слова:** горение, детонация, детонационная волна, математическая модель, унитарного топлива, инертных частиц, прерывания, длины слоя, диаметр и массовое содержание частиц.

#### Введение

УДК 532.529: 518.5

Вопросам прерывания распространения детонационных волн в газовзвесьях слоем инертных частиц посвящены работы [2,4-10]. В [4-5] численно исследованы процессы прерывания распространения плоских волн гетерогенной детонации в монодисперсных газовзвесьях унитарного топлива, содержащих слой инертных твердых частиц. Изучено влияния пространственной неоднородности распределения химически инертных частиц в экранирующем

слое на процесс прерывания волны гетерогенной детонации. В [7-10] рассмотрены условия подавления детонации путем введения инертных частиц в газовзвесьях, по которой распространяется детонационная волна. Исследовано влияние начальных параметров смеси на возможности подавления детонации инертными частицами.

В данной работе приведены результаты численного исследования процесса прерывания распространения волны гетерогенной детонации в газовзвесьях унитарного топлива в трубах, частично заполненном слоем 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

Система дифференциальных уравнений двухмерного осесимметричного нестационарного движения дисперсной трёхфазной реагирующей смеси двухкомпонентного газа, частиц унитарного топлива, инертных частиц и замыкающие соотношения аналогичны, приведенным в [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, 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.

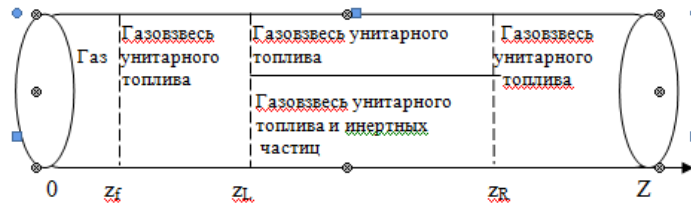


Рис. 1. Схематическое представление задачи о прерывании распространения волны гетерогенной детонации слоем инертных частиц.

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

$$v_{1z} = v_{1f} \frac{z}{z_f}, \quad v_{1r} = 0, \quad p = p_f \sigma^{\gamma_{11}}; \quad \rho_1^0 = \rho_{1f}^0 \sigma, \quad \rho_{11}^0 = \rho_1^0, \quad \rho_{12} = 0,$$

$$\alpha_1 = 1, \quad a_{1f}^2 = \gamma_{11} \frac{p_f}{\rho_{1f}^0 R_{11}}, \quad T_1 = \frac{p}{\rho_1^0 R_{11}}, \quad \frac{v_{1f}}{a_{110}} = \frac{2}{(\gamma_{11} + 1)} \left( M_0 - \frac{1}{M_0} \right),$$

$$\sigma = \left[ 1 - \left( \frac{\gamma_{11} - 1}{2} \right) \frac{v_{1f}}{a_{1f}} \left( 1 - \frac{z}{z_f} \right) \right]^{2 / (\gamma_{11} - 1)}, \quad \frac{\rho_{1f}^0}{\rho_{10}^0} = \frac{(\gamma_{11} + 1) M_0^2}{2 + (\gamma_{11} - 1) M_0^2}, \quad (1)$$

$$\frac{p_f}{p_0} = 1 + \frac{2\gamma_{11}}{\gamma_{11} + 1} (M_0^2 - 1), \quad \frac{T_f}{T_0} = \left( \frac{p_f}{p_0} \right) \left( \frac{\rho_{1f}^0}{\rho_{10}^0} \right)^{-1}, \quad 0 \leq z \leq z_f.$$

$$p = p_0, \quad T_1 = T_0, \quad v_{1r} = v_{1z} = 0, \quad \rho_1^0 = \rho_{110}^0, \quad \rho_{12} = 0, \quad \rho_1 = \rho_1^0 \alpha_1, \quad \rho_2 = \rho_2^0 \alpha_2,$$

**Impact Factor:**

ISRA (India) = 4.971	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.126	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.716	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

$$T_2 = T_0, \quad v_{2r} = v_{2z} = 0, \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \rho_3 = 0, \quad T_3 = 0, \quad v_{3r} = v_{3z} = 0,$$

$$z_f < z \leq z_L \cup z_R < z < Z.$$

$$p = p_0, \quad T_1 = T_0, \quad v_{1r} = v_{1z} = 0, \quad \rho_1^0 = \rho_{110}^0, \quad \rho_{12} = 0, \quad \rho_1 = \rho_1^0 \alpha_1, \quad \rho_2 = \rho_2^0 \alpha_2,$$

$$T_2 = T_0, \quad v_{2r} = v_{2z} = 0, \quad \rho_3 = \rho_3^0 \alpha_3, \quad T_3 = T_0, \quad v_{3r} = v_{3z} = 0, \quad \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1,$$

$$z_L < z \leq z_R.$$

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

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

$$v_{iz}(0, r, t) = v_{ir}(z, 0, t) = v_{ir}(z, R, t) = 0, \\ 0 \leq r \leq R, \quad 0 \leq z \leq Z. \quad (2)$$

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

Задача 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.

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

$$\varepsilon(z, r, A) = 1 \quad (3)$$

Параметр  $0 \leq A \leq 1$  в зависимости (3) 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:

$$T_0 = 293 \text{ К}, \quad p_0 = 0.1 \text{ МПа}, \quad \gamma_{11} = 1.4,$$

$$R_{11} = 287 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К}), \quad \mu_{11} = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}),$$

$$\lambda_{11} = 2.57 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}/(\text{с}^3 \cdot \text{К}),$$

$$\rho_{110}^0 = 1.29 \text{ кг}/\text{м}^3, \quad \rho_{120}^0 = 1.03 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

газообразные продукты горения топлива:

$$c_{p2} = 1675 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К}), \quad R_{12} = 328 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К}),$$

$$\lambda_{12} = 8.37 \cdot 10^{-2} \text{ кг} \cdot \text{м}/(\text{с}^3 \cdot \text{К}), \quad \gamma_{12} = 1.24,$$

$$\mu_{12} = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с});$$

частицы унитарного топлива:

$$\rho_2^0 = 1550 \text{ кг}/\text{м}^3, \quad c_2 = 1466 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К}),$$

$$Q^0 = 1.93 \text{ МДж}/\text{кг}, \quad T_s = 473 \text{ К}, \quad \varphi = 0.7,$$

$$v_s = 6.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}/\text{с}.$$

частицы кварцевого песка:

$$\rho_2^0 = 2500 \text{ кг}/\text{м}^3, \quad c_2 = 710 \text{ м}^2/(\text{с}^2 \cdot \text{К}).$$

**Некоторые результаты.** На рис.2 представлена интегральная расчётная зависимость минимального исходного относительного массового содержания частиц дисперсной инертной фазы ( $d_3 = 3$  мкм) от начального относительного массового содержания унитарного топлива ( $d_{20} = 30$  мкм). Кривая 1 соответствует протяжённости экранирующих слоёв инертной газовой смеси 10 м, кривая 2 соответствует протяжённости экранирующих слоёв инертной газовой смеси 6 м. Видно, что с увеличением слоя инертных частиц минимально необходимое для прерывания детонационной волны относительное массовое содержание уменьшается.

## Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.126	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.716	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

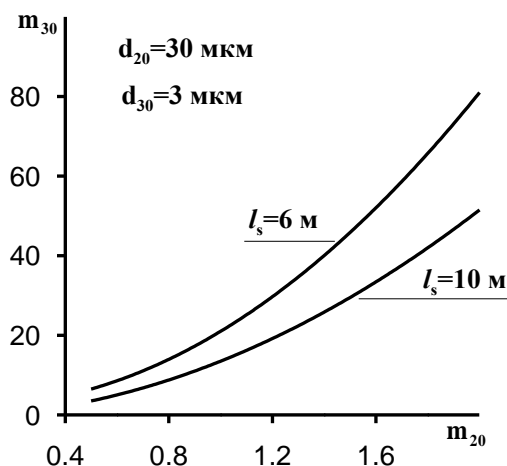


Рис. 2. Зависимости критического (минимального) относительного массового содержания инертных частиц, необходимого для подавления гетерогенной детонации, от начального относительного массового содержания унитарного топлива.

На рис. 3 представлена интегральная расчётная зависимость минимального исходного относительного массового содержания частиц дисперсной инертной фазы ( $d_3=3$  мкм) от начального относительного массового содержания унитарного топлива ( $d_{20}=30$  мкм). Кривая 1 соответствует слоя однородных (полностью заполненном) инертных частиц,

кривая 2 соответствует слоя неоднородных (частично заполненном) инертных частиц. Протяжённости экранирующих слоёв инертной газовой смеси 6 м. Видно, что слой однородных инертных частиц требует значительно меньше их массового содержания, чем слой неоднородных инертных частиц для подавления детонационных волн в газозвесах унитарного топлива.

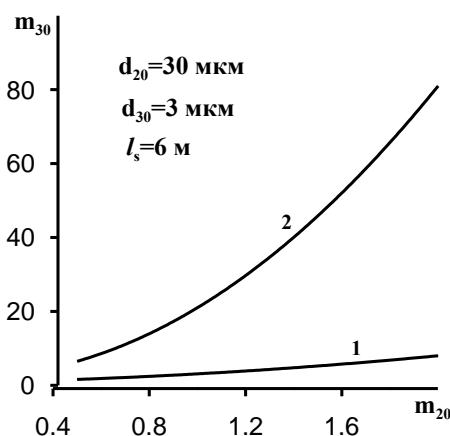


Рис. 3. Зависимости критического (минимального) относительного массового содержания инертных частиц, необходимого для подавления гетерогенной детонации, от начального относительного массового содержания унитарного топлива.

На рис.4 представлена интегральная расчётная зависимость минимального исходного относительного массового содержания частиц дисперсной инертной фазы от начального относительного массового содержания унитарного топлива ( $d_{20}=30$  мкм). Кривая 1 соответствует инертных частиц диаметром  $d_{30}=3$

мкм, кривая 2 -  $d_{30}=120$  мкм. Протяжённости экранирующих слоёв инертной газовой смеси 10 м. Видно, что размера инертных частиц существенно влияет на прерывания распространения детонационных волн в газозвесах унитарного топлива.

## 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

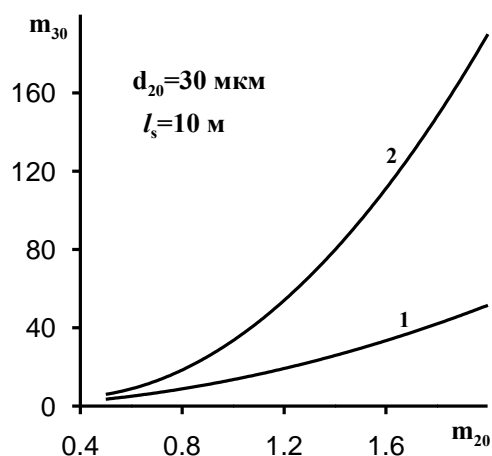


Рис. 4. Зависимости критического (минимального) относительного массового содержания инертных частиц, необходимого для подавления гетерогенной детонации, от начального относительного массового содержания унитарного топлива.

В результате проведенного численного исследования показано, что диаметр, длины слоя и неоднородность инертных частиц можно оказывать существенное влияния на процесс

прерывания волны гетерогенной детонации в газозвесьях унитарного топлива.

## References:

1. Nigmatulin, R.I. (1987). *Dinamika mnogofaznyh sred.* Ch.1, (p.464). Moscow: Nauka.
2. Kutushev, A.G. (2003). *Matematicheskoe modelirovanie volnovykh processov v ajerodispersnyh i poroshkoobraznyh sredah.* (p.284). SPb: Nedra.
3. Belocerkovskij, O.M., & Davydov, Jy.M. (1982). *Metod krupnyh chastic v gazovoj dinamike.* Moscow: Nauka.
4. Kutushev, A.G., & Pichugin, O.N. (1993). Chislennoe isledovanie processa preryvaniya rasprostraneniya detonacionnyh voln v gazozvjesyah unitarnogo topliva sloem inertnyh chastic. *Fizika gorenija i vzryva*, T. 29, № 2, pp. 90-98.
5. Kutushev, A.G., & Pichugin, O.N. (1996). O vlijanii prostranstvennoj neodnorodnosti raspredelenija chastic v jekraniruushhem sloe na podavlenie detonacionnyj volny v ajerovzvesi unitarnogo topliva. *FGV*, T. 32, № 4, pp. 107-109.
6. Huzhajorov, B.H., Kutushev, A.G., Burnashev, V.F., & Nazarov, U.A. (2010). Chislennoe modelirovanie processa preryvaniya rasprostraneniya detonacionnyh voln v gazozvjesyah unitarnogo topliva sloem inertnyh chastic. *Problemy mehaniki*, № 1, pp. 31-35.
7. Fedorov, A.V., & Tropin, D.A. (2011). Opredelenie kriticheskogo razmera oblaka chastic, neobhodimogo dlja podavlenija gazovoj detonacii. *FGV*, T. 47, № 4, pp. 100-108.
8. Fedorov, A.V., Tropin, D.A., & Bedarev, I.A. (2010). Matematicheskoe modelirovanie podavlenija detonacii vodorokislorodnoj smesi inertnymi chasticami. *FGV*, T. 46, № 3, pp. 103-115.
9. Fomin, P.A., & Chen, Dzh-R. (2009). Vlijanie himicheski inertnyh chastic na parametry i podavlenie detonacii v gazah. *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.