

ВЛИЯНИЕ ЭКРАНИРУЮЩЕГО СЛОЯ ГАЗОВЗВЕСИ НА СИЛОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ЖЁСТКУЮ СТЕНКУ

П.Е. Беляев, Н.Л. Клиначева

Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Российская Федерация
E-mail: gbelbih@gmail.com

Приводится анализ влияния параметров экранирующего слоя на величину импульса избыточного давления, передаваемого на жёсткую неподвижную стенку ударной волной. Показано, что уменьшение диаметра частиц в экранирующем слое приводит к замедлению оттока газа от преграды, что, в свою очередь, приводит к увеличению импульса избыточного давления. На основе численного эксперимента выработаны предложения по повышению эффективности экранирования с учётом описанного эффекта.

Ключевые слова: ударные волны; экранирование; защита от ударных волн; газовзвесь.

Введение

Причиной возникновения ударных волн может быть множество явлений, таких как взрывы, аварийные разрывы ёмкостей высокого давления, перемещения тел в среде со скоростью, превышающей скорость звука в данной среде. Ударные волны могут представлять большую опасность для инженерных сооружений и персонала из-за сильных перепадов давления и высоких скоростей. Несмотря на то, что первые работы по способам защиты от ударных волн были опубликованы более сорока лет назад, данная тема до сих пор остаётся актуальной и последние работы [1–4] это подтверждают.

Постановка задачи

Рассмотрим одномерную задачу о набегании плоской ударной волны длины l_w на однородный слой газовзвеси длины l_s , экранирующий жёсткую неподвижную стенку. Для описания движения газа с твёрдыми частицами используем модель двухскоростного двухфазного континуума с основными допущениями: расстояния, на которых меняются средние значения параметров много больше размеров частиц и расстояний между ними, за исключением фронта ударной волны, частицы имеют сферическую форму, смесь монодисперсная, эффекты вязкости и теплопроводности существенны лишь в процессах межфазного взаимодействия, столкновения и дробление частиц не происходят. Несущей фазой является калорически идеальный газ. Однако для газовой фазы может быть использовано и более сложное уравнение состояния, позволяющее вычислять температуру газа [5]. Расчёты будем проводить посредством численного алгоритма на основе метода крупных частиц [6] с модификацией, предложенной в [7, 8].

Система уравнений математической модели соответствует [1, 9, 10]:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \frac{\partial \rho_1 u_1}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial \rho_2 u_2}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial n u_2}{\partial x} = 0, \quad \rho_1 \frac{d_1 u_1}{dt} = -\alpha_1 \frac{\partial p}{\partial x} - n f, \quad \rho_2 \frac{d_2 u_2}{dt} = -\alpha_2 \frac{\partial p}{\partial x} - n f,$$

$$\rho_1 \frac{d_1 e_1}{dt} = -\frac{p \alpha_1}{\rho_1} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + n f (u_1 - u_2) - n q, \quad \rho_2 \frac{d_2 e_2}{dt} = -\frac{p \alpha_2}{\rho_2} \frac{\partial \rho_1}{\partial t} + n q.$$

Где, согласно [11],

$$f = \frac{\pi d^2 \rho_1^\circ C_d (u_1 - u_2) |u_1 - u_2|}{8}, \quad q = \pi d \lambda_1 Nu (T_1 - T_2).$$

Для замыкания системы уравнений используем

$$p = p_1(\rho_1^0, T_1) = p_2(\rho_2^0, T_2), \quad e_1 = e_1(\rho_1^0, T_1), \quad e_2 = e_2(\rho_2^0, T_2),$$

$$\rho_1 = \rho_1^0 \alpha_1, \quad \rho_2 = \rho_2^0 \alpha_2, \quad \alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad E_i = e_i + \frac{u_i^2}{2} \quad (i=1,2).$$

Начальное распределение параметров ударной волны с треугольным профилем скорости задаётся аналогично [2]:

$\frac{u_1}{u_{1H}} = \frac{x}{x_H}$	$\frac{\rho_1^0}{\rho_{1b}^0} = \xi$	$\frac{p}{p_H} = \xi^\gamma$	$\alpha_1 = 1$	$(0 \leq x \leq x_H)$
$u_1 = 0$	$\frac{\rho_1}{\rho_{1b}^0} = 1$	$\alpha_1 = 1$	$\frac{p}{p_0} = 1$	$(x_H \leq x \leq x_s)$
$u_1 = 0$	$\frac{\rho_1}{\rho_{1b}^0} = \alpha_{10}$	$\alpha_1 = \alpha_{10}$	$\frac{p}{p_0} = 1$	$(x_s \leq x \leq x_w)$
$u_2 = 0$	$\frac{\rho_2}{\rho_{20}^0} = 1$	$\alpha_2 = \alpha_{20}$	$\frac{T_2}{T_0} = 1$	$(x_s \leq x \leq x_w)$

$$\xi = \left(1 - \frac{(\gamma-1)(u_{1H} - u_1)}{2a_{1H}} \right)^\gamma$$

Здесь u_i, ρ_i, e_i, T_i – скорость, плотность, энергия, объёмная доля и температура ($i=1,2$). Параметры с индексом 1 относятся к газу, с индексом 2 – к частицам. Параметры с индексом 0 и b отвечают начальным значениям. ρ_i^0 – истинное значение плотности.

Значение параметров по разные стороны разрыва связаны между собой соотношениями Ренкина–Гюгоннио. Схема постановки задачи представлена на рис. 1.

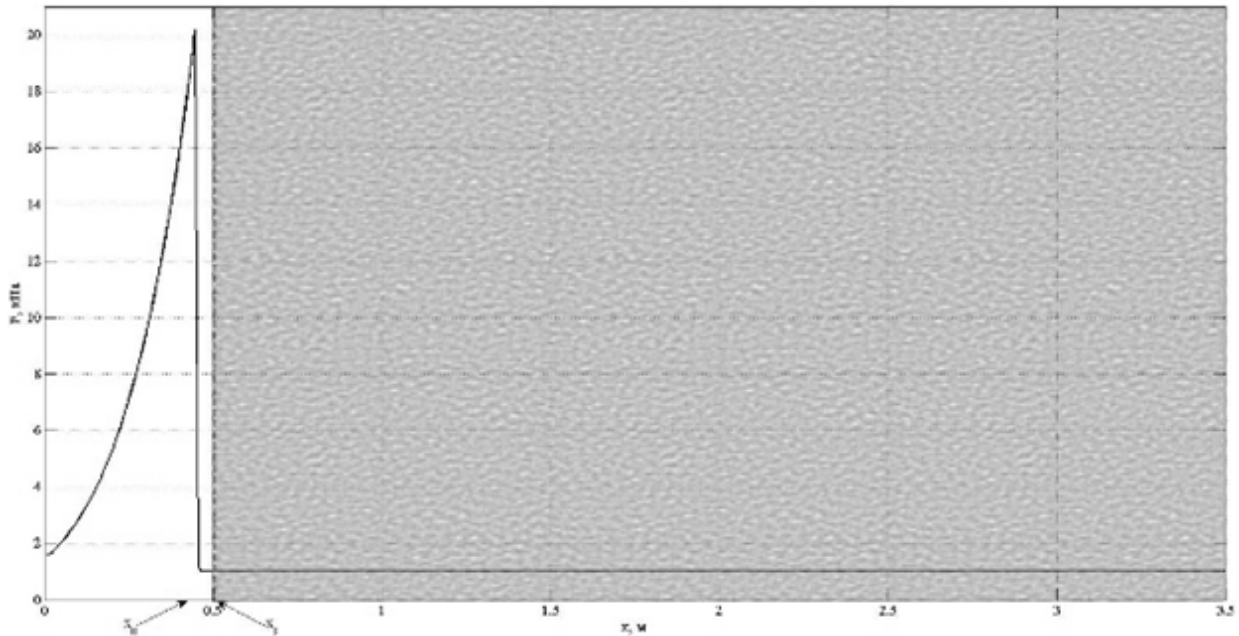


Рис. 1

Результаты

Расчёты проводились при следующих параметрах смеси газа с кварцевым песком: $T_0 = 293$ К, $p_0 = 0,1$ МПа, $c_p = 1005$ м²/(с²·К), $\gamma = 1,4$, $\alpha_{10} = 341$ м/с, $\rho_{10}^0 = 1,21$ кг/м³, $\lambda_1 = 0,026$ кг·м/(с³·К), $\mu_1 = 1,85 \cdot 10^{-5}$ кг/(м·с), $\rho_2^0 = 2500$ кг/м³, $c_2 = 710$ м²/(с²·К).

Расчёт выполнен для экранирующего слоя газозвеси с длиной $l_s = 3$ м, объёмных долей частиц $0,001 \leq \alpha_2 \leq 0,01$ и диаметром частиц $100 \text{ мкм} \leq d \leq 1 \text{ мм}$.

В процессе взаимодействия ударной волны с неподвижной стенкой можно выделить три этапа: мгновенное повышение давления на стенке, последующее плавное повышение давления и постепенное падение давления до начального. Первый этап связан с отражением от стенки переднего ударного скачка в газовой фазе, при этом давление в ней резко повышается, возникает движущаяся в обратном направлении отражённая ударная волна. На втором этапе давление повышается плавно в силу взаимодействия падающей и отражённой ударных волн. Отражённая ударная волна движется навстречу набегающему потоку газозвеси, давление которого плавно возрастает, а скорость уменьшается. Наибольшее давление образуется вблизи стенки, где тормозится набегающий поток. Происходит дальнейшее взаимодействие отражённой волны уплотнения с волной разряжения, что подводит к началу третьего этапа, этапа разгрузки преграды. Давление на стенке начинает уменьшаться, а поток меняет своё направление на противоположное. Первой своё направление меняет несущая, газовая фаза. Если масса дисперсной фазы мала, то частицы, увлекаемые газом, меняют направление движения. Тяжёлые частицы, движущиеся медленнее, чем газ, или движущиеся в противоположную сторону, препятствуют оттоку газа от стенки, увеличивая тем самым время действия избыточного давления на неё.

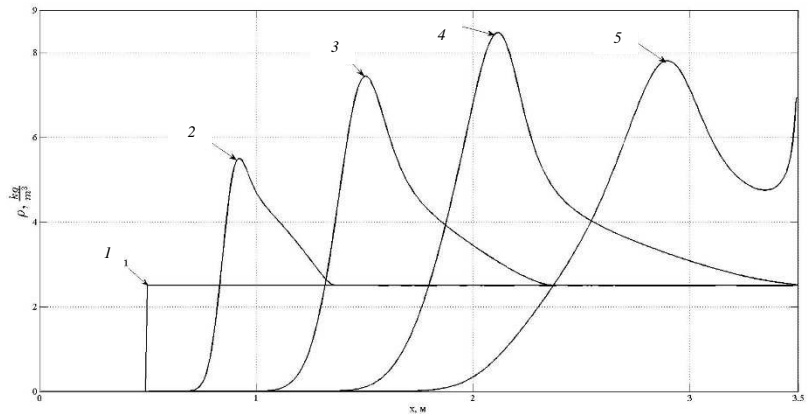


Рис. 2

На рис. 2 представлена зависимость парциальной плотности конденсированной фазы от координаты. Номера графиков соответствуют моментам времени: 1 – $t = 0$ с, 2 – $t = 0,9$ мс, 3 – $t = 2,8$ мс, 4 – $t = 5,5$ мс, 5 – $t = 14,8$ мс. Из рис. 2 видно, что частицы скапливаются возле стенки, что мешает оттоку газа от преграды.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости избыточного давления на стенке от времени при

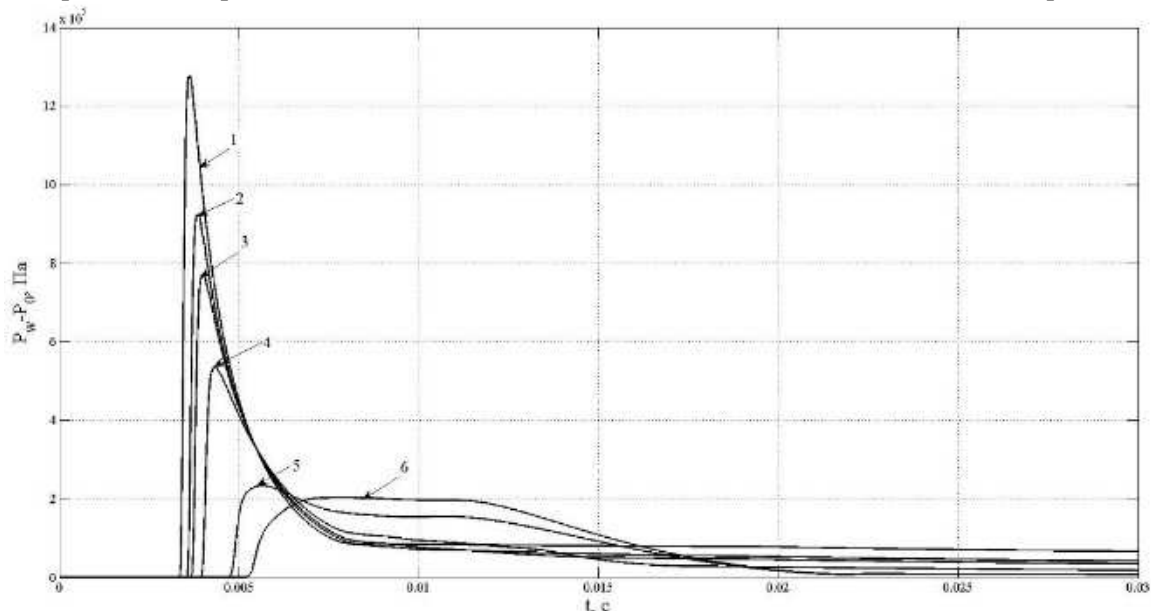


Рис. 3

фиксированных объёмных долей частиц в экранирующем слое газозвеси и различных диаметрах. Номер графика соответствует диаметру частиц в экранирующем слое следующим образом: 2 – $d = 1$ мм, 3 – $d = 600$ мкм, 4 – $d = 300$ мкм, 5 – $d = 100$ мкм, 6 – $d = 60$ мкм. Графики с номером 1 соответствуют протеканию процесса при отсутствии экранирующего слоя. Графики зависимостей на рис. 3 построены для объёмной доли частиц $\alpha_2 = 0,001$, на рис. 4 – для $\alpha_2 = 0,01$.

Из рис. 3 и 4 видно, что при фиксированной объёмной доле уменьшение диаметра частиц ведёт к уменьшению максимального избыточного давления, создаваемого на стенке набегающей ударной волной, но также видно, что уменьшение диаметра увеличивает время разгрузки стенки.

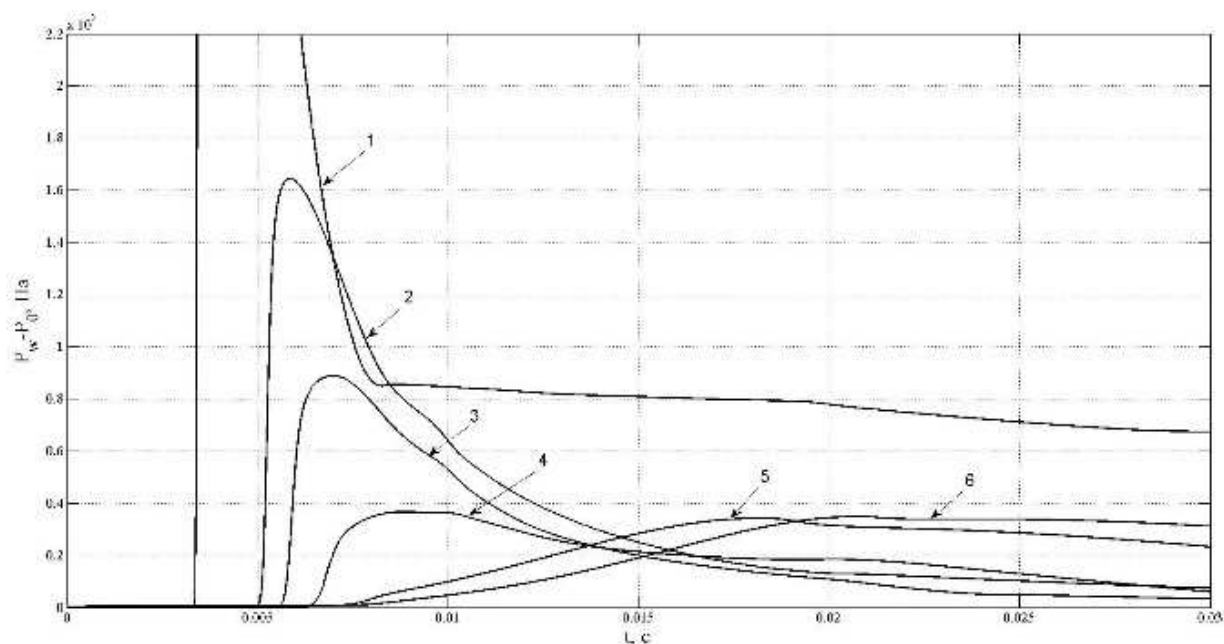


Рис. 4

На рис. 5 представлены зависимости импульса избыточного давления, передаваемого набегающей ударной волной на стенку, I_g от диаметра частиц в экранирующем слое при фиксированной объёмной доле.

$$I_g = \int_{t_s}^{t_f} (P_w(\tau) - P_0) d\tau.$$

Здесь $P_w(\tau)$ – величина давления на стенке в момент времени τ , P_0 – давление в начальный момент времени в невозмущённой области, t_s – время начала взаимодействия ударной волны со стенкой, t_f – время конца взаимодействия ударной волны со стенкой.

На рис. 6 представлена зависимости максимального избыточного давления на стенке от диаметра частиц в экранирующем слое при фиксированной объёмной доле частиц.

Номера графиков на рис. 5 и 6 соответствуют объёмной доле частиц в экранирующем слое: 1 – $\alpha_2 = 0,001$, 2 – $\alpha_2 = 0,004$, 3 – $\alpha_2 = 0,007$, 4 – $\alpha_2 = 0,01$.

Из рис. 6 видно, что при уменьшении диаметра и увеличении объёмной доли частиц максимальное избыточное давление на стенке значительно снижается. Так, например, использование экранирующего слоя с параметрами $\alpha_2 = 0,007$ и $d = 0,0004$ позволяет снизить максимальную величину избыточного давления в условиях данной задачи в десять раз.

При этом, как видно из рис. 5, уменьшение диаметра при фиксированной объёмной доле частиц не даёт однозначного повышения эффективности экранирующего слоя в плане уменьшения импульсного воздействия ударной волны на стенку: при уменьшении диаметра частиц импульс избыточного давления так же уменьшается, но до определённой величины диаметра, своей для разных значений объёмной доли частиц, начиная с которой наблюдается быстрый рост величины импульса избыточного давления.

Рис. 5 и 6 наглядно демонстрируют необходимость подбора параметров экранирующего с учётом выносливости и предела прочности материалов. Построение данных зависимостей позволяет при фиксированной объёмной доле частиц определить допустимый диапазон диаметров, ограничиваемы слева соотношением выносливости материалов экранируемого сооружения, справа – соотношением предела прочности материалов и максимального избыточного давления.

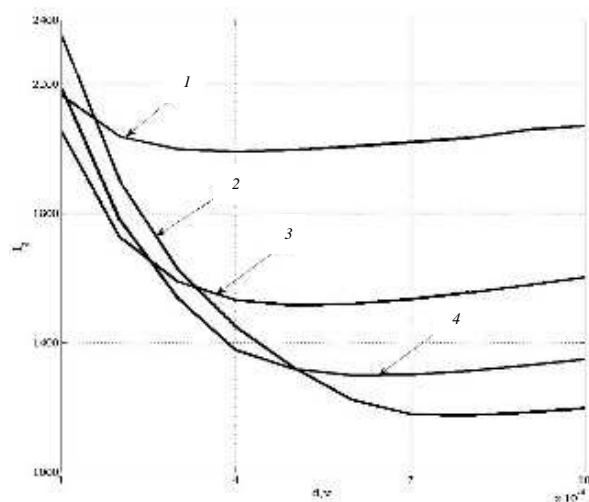


Рис. 5

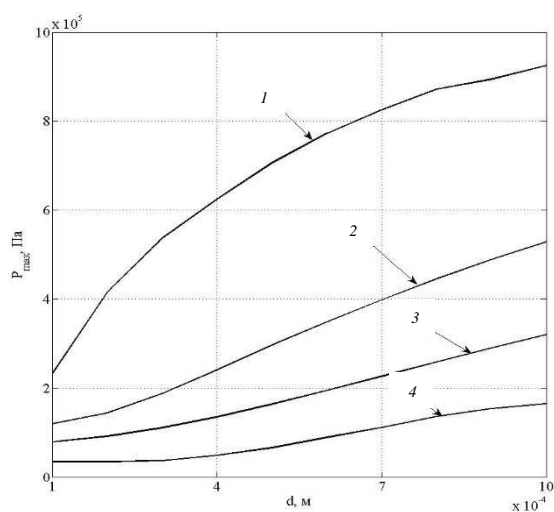


Рис. 6

Заключение

В ходе работы показано, что уменьшение диаметра частиц в экранирующем слое приводит к увеличению времени разгрузки экранируемой преграды, что увеличивает импульсное воздействие избыточного давления, создаваемого ударной волной на стенке. Начиная с определённой величины диаметра при фиксированной объёмной доле частиц, дальнейшее уменьшение диаметра приводит к снижению эффективности экранирующего слоя. При выборе параметров экранирующего слоя следует учитывать данную особенность экранирования газозвесями, так при снижении величины максимального избыточного давления ниже предела прочности нужно, вместе с тем, не превысить допустимые для выносливости экранируемой конструкции величины импульсного воздействия.

Литература

1. Клиначева, Н.Л. Численное исследование инвариантности некоторых моделей многокомпонентных сред / Н.Л. Клиначева // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й научной конференции Секции естественных наук. – 2015. – С. 121–124.
2. Клиначева, Н.Л. Модифицированная математическая модель «замороженной» газозвеси / Н.Л. Клиначева, Ю.М. Ковалев, В.Ф. Куропатенко // Инженерно-физический журнал. – 2014. – Т. 87, № 6. – С. 1398–1403.
3. Ковалёв, Ю.М. Особенности ослабления ударных волн экранирующими решётками / Ю.М. Ковалёв // Вестник Челябинского государственного университета. – 1997. – Т. 6, № 1. – С. 72–81.
4. Ковалев, Ю.М. Ослабление воздушных ударных волн системой решеток / Ю.М. Ковалев, А.Ю. Черемохов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Мат. моделирование физ. процессов». – 1997. – Вып. 3. – С. 39–43.
5. Моделирование взрыва шнурового заряда в пологе леса при отсутствии пожара / В.А. Антонов, А.М. Гришин, Ю.М. Ковалев, Л.Ю. Наймушина // Физика горения и взрыва. – 1993. – Т. 29, № 4. – С. 115–123.
6. Белоцерковский, О.М. Метод крупных частиц в газовой динамике / О.М. Белоцерковский, Ю.М. Давыдов. – М.: Наука, 1982. – 392 с.
7. Ковалёв, Ю.М. Анализ некоторых модификаций метода крупных частиц на примере исследования течений газозвесей / Ю.М. Ковалёв, Е.А. Ковалёва, Е.Е. Пигасов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2015. – Т. 7, № 3. – С. 71–77.
8. Гришин, Ю.А. Повышение устойчивости вычислительного алгоритма метода крупных частиц / Ю.А. Гришин, В.А. Зенкин // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2011. – № 13. – С. 41.

9. Ковалёв, Ю.М. Математическая модель газозвеси с химическими превращениями в приближении парных взаимодействий. / Ю.М. Ковалёв, Е.Е. Пигасов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование». – 2014. – Т. 7, № 3. – С. 40–49.

10. Ковалёв, Ю.М. Определение вида силы межфазного взаимодействия для математической модели газозвеси с парными взаимодействиями / Ю.М. Ковалёв // Вестник ЮУрГУ. Серия «Математика. Механика. Физика». – 2014. – Т. 6, № 3. – С. 23–29.

11. Бусройд, Р. Течение газа со взвешенными частицами / Р. Бусройд. – М.: Мир, 1976. – 377 с.

Поступила в редакцию 8 августа 2016 г.

*Bulletin of the South Ural State University
Series "Mathematics. Mechanics. Physics"
2016, vol. 8, no. 4, pp. 49–55*

DOI: 10.14529/mmph160406

IMPACT OF GAS SUSPENSION SHIELDING LAYER ON THE FORCE EFFECT OF SHOCK WAVES ON A RIGID WALL

P.E. Belyaev, N.L. Klinacheva

South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation

E-mail: gbelbih@gmail.com

The article deals with the analysis of influence of shielding layer parameters on the amount of excessive pressure impulse translated on the fixed rigid wall by the shock wave. It is demonstrated that the decrease in the diameter of particles in shielding layer leads to gas drainage from the barrier, which in turn leads to the increase of excessive pressure impulse. The suggestions on increasing the shielding efficiency are made based on the numerical experiment and taking into account the described effect.

Keywords: shock waves; shielding; shock wave protection; gas suspension.

References

1. Klinacheva N.L. Chislennoe issledovanie invariantnosti nekotorykh modeley mnogokomponentnykh sred (Numerical investigation of invariance of some multicomponent medium models). *Nauka YuUrGU: materialy 67-y nauchnoy konferentsii Sektsii estestvennykh nauk* (Science of SUSU: Proceedings of the 67th Scientific Conference. Section of Natural Sciences), 2015, pp. 121–124. (in Russ.).

2. Klinacheva N.L., Kovalev Y.M., Kuropatenko V.F. Modified Mathematical Model of a "Frozen" Gas Suspension. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, Vol. 87, no. 6, pp. 1456–1462. DOI: 10.1007/s10891-014-1150-x

3. Kovalyev Yu.M. *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 1997, Vol. 6, no. 1, pp. 72–81. (in Russ.).

4. Kovalev Yu.M., Cheremokhov A.Yu. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. "Mat. modelirovanie fiz. protsessov"*, 1997, Issue 3, pp. 39–43. (in Russ.).

5. Antonov V.A., Grishin A.M., Kovalev Yu.M., Naymushina L.Yu. *Fizika goreniya i vzryva*, 1993, Vol. 29, no. 4, pp. 115–123. (in Russ.).

6. Belotserkovskiy O.M., Davydov Yu.M. *Metod krupnykh chastits v gazovoy dinamike* (Particle-in-cell method in gas dynamics). Moscow, Nauka Publ., 1982, 392 p. (in Russ.).

7. Kovalev Yu.M., Kovaleva E.A., Pigasov E.E. The Analysis of Some Modifications of the Large-Particle Method on the Basis of Research of Gas-Suspension Currents. *Bulletin of South Ural State University. Series of "Mathematics. Mechanics. Physics"*, 2015, Vol. 7, no 3, pp. 71–77. (in Russ.).

8. Grishin Yu.A., Zenkin V.A. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana*, 2011, no. 13, p. 41. (in Russ.).

9. Kovalev Yu.M., Pigasov E.E. *Bulletin of the South Ural State University. Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software*, 2014, Vol. 7, no 3, pp. 40–49. (in Russ.). DOI: 10.14529/mmp140304

10. Kovalev Y.M. Detection of a Type of Interphase Interaction Force for Mathematical Models of Gas Suspension with Pair Interaction. *Bulletin of South Ural State University. Series of "Mathematics. Mechanics. Physics"*, 2014, Vol. 6, no. 3, pp. 23–29. (in Russ.).

11. Busrojd R. *Techenie gaza so vzveshennymi chastitsami* (The gas flow with suspended particles). Moscow, Mir Publ., 1976, 377 p. (in Russ.).

Received August 8, 2016