

Особенности диссипации энергии взрывной волны применением водной пены

© Р.Х. Болотнова, Э.Ф. Гайнуллина, В.А. Коробчинская

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского федерального исследовательского центра РАН, Уфа, Россия
E-mail: elina.gef@yandex.ru

Поступило в Редакцию 12 мая 2023 г.

В окончательной редакции 29 сентября 2023 г.

Принято к публикации 30 октября 2023 г.

Исследованы особенности динамики ударных волн, возникающих при взрыве заряда взрывчатого вещества цилиндрической формы в воздухе и в окружающем заряд слое водной пены, на основе двухфазной газожидкостной модели в однодавленческом, двухскоростном, двухтемпературном приближениях с учетом сил межфазного взаимодействия и межфазных теплообменных процессов. По результатам исследований оценена степень снижения скорости и амплитуды ударного импульса при наличии слоя водной пены по сравнению с данными для воздушной среды. Проведен сравнительный анализ полученных расчетов с экспериментальными данными. Оценено безопасное для человека расстояние от центра взрыва в воздухе и при применении защитного барьера водной пены.

Ключевые слова: взрыв, взрывчатое вещество цилиндрической формы, воздушная среда, водная пена, ударные волны, численное моделирование.

DOI: 10.61011/PJTF.2023.24.56871.106A

Изучение особенностей ослабления ударных волн (УВ) за счет применения водной пены важно с точки зрения анализа эффективности пенных барьеров в задачах обеспечения противоударной защиты. Результаты серии полевых экспериментов по взрывам заряда взрывчатого вещества (ВВ) в газе и водной пене свидетельствуют о значительном снижении интенсивности ударного воздействия в случае, когда заряд ВВ окружен пеной [1–3]. Исследование динамики слабых УВ с использованием ударных труб, содержащих газ и слой водной пены, показало существенное снижение скорости волны сжатия при ее распространении в пенной среде [4,5].

Математические модели, описывающие ударно-волновые процессы в водной пене, предложены в работах [6–8]. На основе двухфазной газожидкостной модели в [6] изучены особенности динамики сферического взрыва в пене для условий экспериментов, изложенных в [1], и решена модельная задача о взаимодействии воздушного сферического импульса давления с пенным слоем [7]. В [8] разработана упруговязкопластическая модель пены, описывающая ее поведение при слабом ударном воздействии. Проанализирован процесс формирования упругого предвестника, опережающего основную волну сжатия. Представляют интерес дальнейшие исследования, направленные на более детальное изучение эффективности пенной преграды, окружающей заряд ВВ.

В настоящей работе исследуется динамика сильных УВ в воздухе и водной пене для условий полевых экспериментов [3], в которых заряд ВВ цилиндрической формы окружался полусферическим слоем водной пены. В отличие от экспериментов [1] по сферическому взрыву ВВ с энергией взрыва $\Delta E \approx 7.7 \cdot 10^5 \text{ J}$ в сосуде объемом $V \approx 8 \text{ m}^3$, полностью заполненном водной пеной, в

рассматриваемых в настоящей работе экспериментах [3] взрывной заряд покрывался пенным слоем небольшой толщины с общим объемом $V \approx 1 \text{ m}^3$.

Схема представленного в [3] эксперимента показана на рис. 1. Цилиндрический заряд ВВ С4 массой $M_{HE} = 82 \text{ g}$, обладающий энергией взрыва $\Delta E \approx 4.2 \cdot 10^5 \text{ J}$, располагался на металлической пластине диаметром $d = 0.76 \text{ m}$. Датчик давления был закреплен на расстоянии $l = 0.5 \text{ m}$ и высоте $h = 0.23 \text{ m}$ относительно заряда ВВ, чтобы отраженные волны не влияли на результаты измерений. На первом этапе экс-

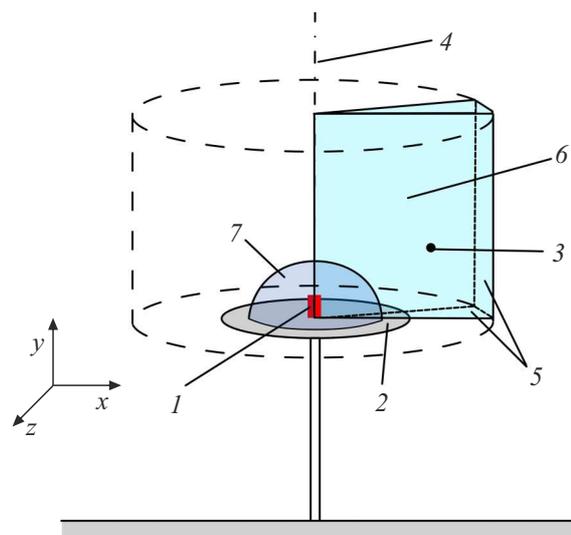


Рис. 1. Схема эксперимента [3] и расчетной области. 1 — заряд ВВ, 2 — жесткая подложка, 3 — датчик давления, 4 — ось симметрии, 5 — свободные границы, 6 — расчетная область, 7 — слой водной пены.

периментов исследовался взрыв ВВ в воздухе, на втором заряд окружался полусферическим слоем водной пены радиусом $r_{foam} = 0.2$ м и плотностью $\rho_{foam} \approx 60$ кг/м³, что соответствует пене с начальным объемным водосодержанием $\alpha_{10} \approx 6\%$.

Процесс распространения сильной УВ в воздухе и водной пене описывался моделью двухфазной газожидкостной среды с индивидуальными распределениями скоростей и температур фаз в предположении равенства давлений фаз [9,10]. Далее приведены уравнения сохранения массы, импульса, энергии i -й фазы и уравнение динамики объемного водосодержания:

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i)}{\partial t} + \text{div}(\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i)}{\partial t} + \text{div}(\alpha_i \rho_i \mathbf{v}_i \mathbf{v}_i) = -\alpha_i \nabla p + \text{div}(\alpha_i \boldsymbol{\tau}_i) + \mathbf{F}_{i,drag} + \mathbf{F}_{i,vm}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\alpha_i \rho_i (e_i + K_i))}{\partial t} + \text{div}(\alpha_i \rho_i (e_i + K_i) \mathbf{v}_i) \\ &= -p \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} - \text{div}(\alpha_i \mathbf{v}_i p) + \text{div} \left(\alpha_i \frac{c_{p,i}}{c_{v,i}} \gamma_i \nabla h_i \right) \\ &+ K_{ht} (T_j - T_i), \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \text{div}(\alpha_1 \mathbf{v}) + \text{div}(\alpha_1 \alpha_2 (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)) - \alpha_1 \text{div} \mathbf{v} \\ &= \alpha_1 \alpha_2 \left(\frac{1}{\rho_2} \frac{d\rho_2}{dt} - \frac{1}{\rho_1} \frac{d\rho_1}{dt} \right). \end{aligned} \quad (4)$$

В уравнениях (1)–(4) использованы следующие обозначения: α_i — объемное содержание, ρ_i — плотность, \mathbf{v}_i — скорость, γ_i — температуропроводность, T_i — температура, p — давление, K_i — кинетическая энергия, $c_{p,i}$, $c_{v,i}$ — удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме, K_{ht} — коэффициент теплообмена, h_i — энтальпия, $\mathbf{v} = \alpha_1 \mathbf{v}_1 + \alpha_2 \mathbf{v}_2$ — скорость газожидкостной смеси. Нижними индексами $i, j = 1, 2$ обозначены водная и газовая фазы пены.

В уравнении (2) тензор вязких напряжений и сила присоединенных масс имеют вид

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mu_i (\nabla \mathbf{v}_i + \nabla \mathbf{v}_i^T) - \frac{2}{3} (\mu_i \text{div} \mathbf{v}_i) \mathbf{I},$$

$$\mathbf{F}_{i,vm} = 0.5 \alpha_1 \rho_2 \left(\frac{d_i \mathbf{v}_i}{dt} - \frac{d_j \mathbf{v}_j}{dt} \right),$$

где μ_i — динамическая вязкость, \mathbf{I} — единичный тензор. Для описания межфазного сопротивления в газожидкостной среде с диаметром капель d_{10} выбрана модель Шиллера–Науманна

$$\mathbf{F}_{i,drag} = \frac{3}{4} \alpha_1 C_D \frac{\rho_2}{d_{10}} (\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j) |\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j|.$$

Межфазный теплообмен учитывался в соответствии с моделью Ранца–Маршалла

$$K_{ht} = \frac{\kappa_2}{d_{10}} \text{Nu}, \quad \text{Nu} = 2 + 0.6 \text{Re}^{1/2} \text{Pr}^{1/3},$$

κ_2 — теплопроводность воздуха, Nu, Pr — числа Нуссельта и Прандтля. Свойства воздуха и воды описаны совершенными уравнениями состояния в соответствии с [11]. Численная реализация модели выполнена в программном комплексе OpenFOAM [11].

При описании поведения водной пены использовалась газожидкостная модель, которая допускает, что воздействие сильной УВ разрушает пенную структуру, формируя за фронтом УВ взвесь микрокапель [1]. Предполагается, что при температуре выше критических значений за фронтом УВ происходит испарение капель, что сопровождается переходом газожидкостной смеси в однофазную газовую среду со значительной потерей энергии УВ (до 80%).

При численном моделировании исследуемого процесса использовалось осесимметричное приближение. Расчетная область была построена в соответствии с данными эксперимента [3] (рис. 1) при следующих граничных условиях: Oy — ось симметрии; $0 \leq x \leq 0.38$, $y = 0$ [м] — жесткая стенка, определяющая наличие жесткой подложки 2; на остальных поверхностях задано условие свободной границы. Взрыв ВВ моделировался в виде начального импульса

$$p(0, x, y, z) = p_0 + \Delta p \exp(-(x^2 + y^2 + z^2)/a^2),$$

$$T(0, x, y, z) = T_0 + \Delta T \exp(-(x^2 + y^2 + z^2)/a^2), \quad (5)$$

где a — ширина импульса, p_0 , T_0 — давление и температура невозмущенной среды, Δp , ΔT — максимальные амплитуды избыточного давления и температуры. Параметры начального импульса (5) выбирались таким образом, чтобы в процессе расчетов формирующаяся УВ совпадала с ее экспериментальным профилем (рис. 2) на датчике давления 3 [3].

Для обоснования достоверности численного моделирования на рис. 2 представлено сравнение расчетных и экспериментальных осциллограмм давления в месте расположения датчика 3 (рис. 1) при взрыве ВВ в воздухе (а) и при окружении заряда ВВ водной пеной (б). Получено удовлетворительное согласование расчетов с экспериментальными данными [3]. Данные расчетов и экспериментов, представленных на рис. 2, показывают, что применение водной пены снижает скорость фронта и амплитуду формирующейся УВ на датчике 3 на ~ 43 и $\sim 70\%$ соответственно.

На рис. 3 показана пространственная динамика УВ, возникающей в результате взрыва цилиндрического заряда в воздухе (а) и водной пене (б), для моментов времени $t = 0.25$ и 0.4 ms, соответствующих времени прихода УВ на датчик (ср. с рис. 2). Полученная в расчетах волновая картина течения в виде распределения полей давлений качественно и по форме согласуется

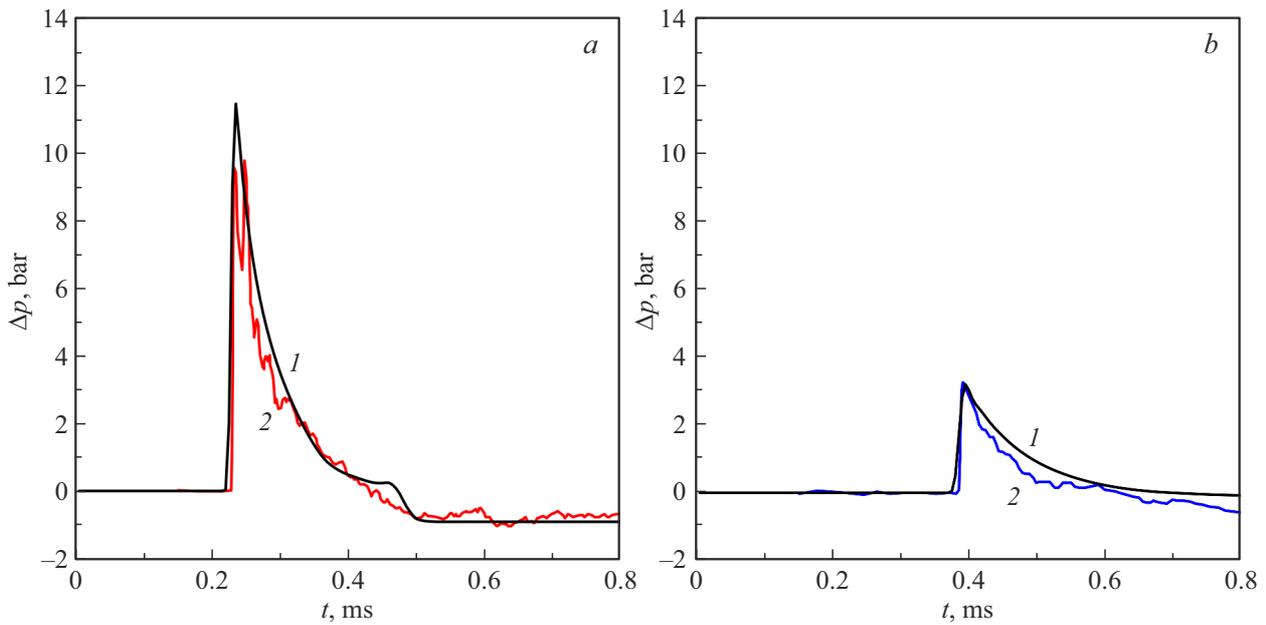


Рис. 2. Расчетные (1) и экспериментальные (2) осциллограммы давлений в месте расположения датчика на расстоянии $l = 0.5$ м [3] от центра взрыва ВВ: в воздухе (а) и при окружении заряда ВВ слоем водной пены (b).

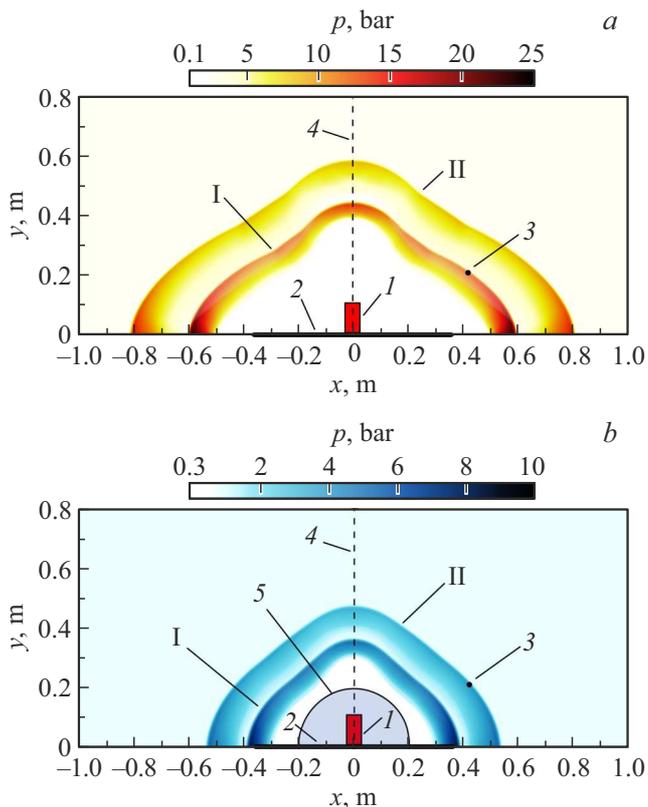


Рис. 3. Расчетные распределения полей давлений при взрыве ВВ в воздухе (а) и при окружении заряда ВВ слоем водной пены (b) [3] в моменты времени $t = 0.25$ (I) и 0.4 ms (II). 1 — заряд ВВ в момент времени $t = 0$, 2 — жесткая подложка, 3 — датчик давления, 4 — ось симметрии, 5 — слой водной пены в момент времени $t = 0$.

с представленными в [3] численными решениями для условий эксперимента с более мощной энергией взрыва в воздухе $\Delta E \approx 1.3 \cdot 10^6$ J заряда ВВ цилиндрической формы.

В результате наших расчетов было установлено, что при наличии пенной преграды возникающий режим волнового течения характеризуется значительной диссипацией энергии взрыва на начальной стадии процесса взаимодействия УВ с водной пеной вследствие потери энергии на испарение водной фазы в центральной высокотемпературной зоне взрыва, что ослабляет энергию взрыва более чем в 4 раза. Сравнительный анализ численных решений, полученных для взрыва ВВ при наличии слоя водной пены и без него, показал, что максимальные значения давлений и скоростей наблюдаются на фронте УВ вблизи оси $y = 0$, при этом за фронтом УВ в центральной области около оси симметрии формируется расширяющаяся с течением времени зона разрежения.

В исследованиях [12] приведены данные о последствиях ударного воздействия на человека. Показано, что импульс избыточного давления амплитудой $\Delta p > 0.34$ bar приводит к разрыву барабанной перепонки; взрывное повреждение легких происходит при $\Delta p > 1$ bar. Следовательно, основываясь на данных [12], в случае исследуемого эксперимента по взрыву в воздухе ВВ с энергией взрыва $\Delta E \approx 4.2 \cdot 10^5$ J минимальное безопасное расстояние от центра взрыва для человека составляет $l_{safe} \approx 2.5$ m, где $\Delta p < 0.3$ bar. При окружении заряда ВВ слоем водной пены толщиной $r_{foam} = 0.2$ m за счет ослабляющего действия пены l_{safe} снижается в ~ 1.7 раза и составляет ~ 1.5 m.

Таким образом, применение пенных преград способно защитить человека от разрушительного ударного воздействия при взрыве ВВ, что может быть использовано при решении задач обеспечения безопасности в условиях чрезвычайных ситуаций.

Финансирование работы

Исследования выполнены при финансовой поддержке средствами госбюджета по госзаданию 0246-2019-0052.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] E. Del Prete, A. Chinnayya, L. Domergue, A. Hadjadj, J.-F. Haas, *Shock Waves*, **23** (1), 39 (2013). DOI: 10.1007/s00193-012-0400-0
- [2] K.L. Monson, K.M. Kyllonen, J.L. Leggitt, K.E. Edmiston, C.R. Justus, M.F. Kavlick, M. Phillip, M.A. Roberts, C.W. Shegogue, G.D. Watts, *J. Forensic Sci.*, **65** (6), 1894 (2020). DOI: 10.1111/1556-4029.14536
- [3] K. Ahmed, A.Q. Malik, *AIP Adv.*, **10** (6), 065130 (2020). DOI: 10.1063/5.0010283
- [4] M. Monloubou, J. Le Clanche, S. Kerampran, in *Actes 24ème Congrès Français de Mécanique* (Association Française de Mécanique, Brest, 2019), p. 255125.
- [5] S.P. Medvedev, S.V. Khomik, V.N. Mikhalkin, A.N. Ivantsov, G.L. Agafonov, A.A. Cherepanov, T.T. Cherepanova, A.S. Betev, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **946**, 012061 (2018). DOI: 10.1088/1742-6596/946/1/012061
- [6] Р.Х. Болотнова, Э.Ф. Гайнулина, *Изв. РАН. Механика жидкости и газа*, № 5, 28 (2020). DOI: 10.31857/S0568528120050023 [R.Kh. Bolotnova, E.F. Gainullina, *Fluid Dyn.*, **55** (5), 604 (2020). DOI: 10.1134/S001546282005002X].
- [7] R.Kh. Bolotnova, E.F. Gainullina, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1268**, 012015 (2019). DOI: 10.1088/1742-6596/1268/1/012015
- [8] R.Kh. Bolotnova, E.F. Gainullina, *J. Phys.: Conf. Ser.*, **2103**, 012217 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/2103/1/012217
- [9] Р.И. Нигматулин, *Динамика многофазных сред* (Наука, М., 1987), ч. 1. [R.I. Nigmatulin, *Dynamics of multiphase media* (Hemisphere, N.Y., 1990)].
- [10] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, *Теоретическая физика. Гидродинамика* (Наука, М., 1986). [L.D. Landau, E.M. Lifshitz, *Fluid mechanics* (Pergamon Press, Oxford, 1987), vol. 6.
- [11] *OpenFOAM. The open source computational fluid dynamics (CFD) toolbox* [Электронный ресурс]. <http://www.openfoam.com>
- [12] P. Peters, *Mil. Med.*, **176** (1), 110 (2011). DOI: 10.7205/milmed-d-10-00300