

ISSN: 2658–5782

Номер 3-4

2020

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org





Влияние синерезиса водной пены на скорость распространения ударной волны¹

Гайнуллина Э.Ф.

Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа

Выполнено численное моделирование распространения сферического ударного импульса в водной пене с объемным водосодержанием $\alpha_{10} = 0.0083$ в соответствии с литературными экспериментальными данными по взрыву взрывчатого вещества в водной пене. Используется допущение о разрушении пенной структуры ударной волной, что приводит к преобразованию пены в монодисперсную газочапельную смесь. Система уравнений двухфазной газочапельной модели водной пены включает законы сохранения массы, импульса, энергии каждой фазы и уравнение динамики объемного водосодержания в однодавленческом, двухскоростном, двухтемпературном приближении в трехмерной постановке и учитывает силы межфазного сопротивления Шиллера–Наумана, межфазный контактный теплообмен Ранца–Маршалла и влияние синерезиса пены на начальное распределение ее объемного водосодержания. Реалистичные уравнения состояния в форме Пенга–Робинсона и Ми–Грюнайзена использованы при описании термодинамических свойств воздуха и воды, составляющих газочапельную смесь. Численное моделирование рассматриваемых процессов выполнено в открытом программном комплексе вычислительной гидродинамики OpenFOAM методом контрольных объемов на основе итеративного двухшагового алгоритма PIMPLE. Проведен анализ влияния синерезиса пены на динамику ударного импульса в водной пене. Установлено, что неравномерное распределение объемного содержания воды в пене, обусловленное ее осаждением под действием силы тяжести, приводит к увеличению скорости ударного импульса в верхних слоях пены. При сравнительном анализе численных решений и экспериментальных данных в местоположениях датчиков показана важность учета явлений синерезиса при моделировании динамики ударной волны в водной пене. Достоверность расчетов по предлагаемой модели подтверждена их согласованием с экспериментальными данными.

Ключевые слова: сферический взрыв, ударная волна, водная пена, пакет OpenFOAM, численное моделирование

1. Введение

Теоретические и экспериментальные исследования ударных волн (УВ) в водных пенах важны для изучения процессов, влияющих на демпфирующие свойства газожидкостных смесей. Снижение интенсивности УВ водными пенами, осуществляемое за счет высокой сжимаемости пенных структур, может быть использовано в различных отраслях промышленности для защиты производственных объектов от высокоэнергетического воздействия и обеспечения безопасности технологических процессов.

Способности водных пен снижать основные параметры УВ были исследованы экспериментально в работах [1–3], в которых показано, что применение пенных преград снижает амплитуду ударного импульса на порядок по сравнению с газом.

В [4, 5] теоретически изучены пространственные эффекты, сопровождающие взаимодействие воздушных ударно-волновых импульсов с преградами из водных пен.

Численное моделирование взрыва взрывчатого вещества (ВВ) в пене с использованием односкоростной смеси модели, учитывающей контактный теплообмен между фазами и особенности дисперсной среды, проведено в работе [6]. Динамика сферического взрыва в пене, соответствующего экспериментам [3], численно исследована в [7, 8] на основе одномерной односкоростной модели газо-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке средствами государственного бюджета по госзаданию 0246–2019–0052.

капельной смеси методом сквозного счета с учетом псевдовязкости Неймана–Рихтмайера, в [9, 10] — с применением трехмерной двухскоростной модели водной пены, учитывающей межфазные силы, тепловую релаксацию фаз и влияние процесса синерезиса (осаждения) пены, численно реализованной методом контрольных объемов в программном комплексе OpenFOAM.

В настоящем исследовании проведено изучение волновых течений, возникающих при сферическом взрыве в водной пене, с более детальным, по сравнению с [9, 10], анализом влияния гравитационных сил на динамику УВ в пенной среде.

2. Уравнения модели

При описании водной пены используется предположение о разрушении ее структуры ударным импульсом с формированием взвеси микрокапель диаметра $d_{10} = 30$ мкм [6] в газе за фронтом сильной УВ. Система модельных уравнений газожидкостной среды включает уравнения неразрывности, импульса, энергии каждой фазы и уравнение динамики объемного водосодержания в соответствии с однодавленческим, двухскоростным, двухтемпературным приближениями для газожидкостной смеси в двумерной осесимметричной постановке [11].

- Закон сохранения массы фаз:

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

где α_i — объемное содержание; ρ_i — плотность; \vec{v}_i — вектор скорости; t — время; $i, j = 1, 2$ — обозначения жидкой и газовой фаз.

- Закон сохранения импульса фаз:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i)}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i \vec{v}_i) = \\ = -\alpha_i \nabla p + \operatorname{div}(\alpha_i \vec{\tau}_i) + \vec{F}_i, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\operatorname{div}(\alpha_i \rho_i \vec{v}_i \vec{v}_i)$ — вектор-дивергенция пары векторов [11]; p — давление; тензор вязких напряжений $\vec{\tau}_i$ и плотность межфазных сил \vec{F}_i имеют вид:

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

$$\vec{F}_i = \vec{F}_{i,drag} + \vec{F}_{i,vm}.$$

Здесь μ_i — динамическая вязкость; I — единичный тензор; $\vec{F}_{i,drag}$ — сила межфазного сопротивления, определяемая моделью Шиллера–Наумана [12]:

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

$\vec{F}_{i,vm}$ — сила присоединенных масс:

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

Коэффициент C_D в выражении силы межфазного сопротивления зависит от параметра $c_s(\alpha_{10})$, определяющего влияние синерезиса пены на интенсивность межфазного взаимодействия [9, 10]:

$$C_D = \frac{c_s(\alpha_{10})(1 + 0.15 \operatorname{Re}^{0.687})}{\operatorname{Re}}, \quad \operatorname{Re} \leq 1000. \quad (3)$$

- Закон сохранения энергии фаз:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\alpha_i \rho_i (e_i + K_i))}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_i \rho_i (e_i + K_i) \vec{v}_i) = \\ = -p \frac{\partial \alpha_i}{\partial t} - \operatorname{div}(\alpha_i \vec{v}_i p) + \\ + \operatorname{div}(\alpha_i \gamma_i \frac{c_{p,i}}{c_{v,i}} \nabla h_i) + K_{ht} (T_j - T_i), \end{aligned} \quad (4)$$

где e_i, K_i — внутренняя и кинетическая энергии; γ_i — температуропроводность; $c_{p,i}, c_{v,i}$ — удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме; h_i — энтальпия; T_i — температура.

Коэффициент теплообмена K_{ht} определен согласно модели Ранца–Маршалла [13]:

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

где κ_2 — теплопроводность газа; $\operatorname{Nu}, \operatorname{Re}, \operatorname{Pr}$ — числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля.

- Уравнение динамики содержания воды в пене:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \alpha_1}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_1 (\alpha_1 \vec{v}_1 + \alpha_2 \vec{v}_2)) + \\ + \operatorname{div}(\alpha_1 \alpha_2 (\vec{v}_1 - \vec{v}_2)) - \alpha_1 \operatorname{div}(\alpha_1 \vec{v}_1 + \\ + \alpha_2 \vec{v}_2) = \alpha_1 \alpha_2 \left(\frac{1}{\rho_2} \frac{d\rho_2}{dt} - \frac{1}{\rho_1} \frac{d\rho_1}{dt} \right), \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

- Уравнение состояния газа в форме Пенга–Робинсона [14]:

$$p = \frac{RT_2}{V_m - b} - \frac{a(T_2)}{V_m(V_m + b) + b(V_m - b)}, \quad (6)$$

в котором

$$a = 0.45724 \frac{R^2 T_c^2}{p_c} \lambda(T_r, \omega), \quad b = 0.07780 \frac{RT_c}{p_c},$$

$$\lambda = (1 + \theta(1 - T_r^{0.5}))^2, \quad T_r = \frac{T_2}{T_c},$$

$$\theta = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2,$$

где R — универсальная газовая постоянная; V_m — молярный объем; T_c, p_c — критические значения температуры и давления для воздуха; ω — ацентрический фактор.

- Широкодиапазонное уравнение состояния воды [15] в форме Ми–Грюнайзена с упругим потенциалом типа Борна–Майера:

$$p = p^{(p)} + p^{(T)}, \quad e = e^{(p)} + e^{(T)}, \quad (7)$$

где

$$p^{(p)}(\rho) = A \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-\beta+1} \exp \left[b \left(1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-\beta} \right) \right] - K \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\xi+1}, \quad \rho = \frac{1}{V},$$

$$e^{(p)}(\rho) = \int_{\rho^*}^{\rho} \frac{p^{(p)}(\rho)}{\rho^2} d\rho = \frac{A}{\beta \rho_0 b} \exp \left[b \left(1 - \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{-\beta} \right) \right] - \frac{K}{\xi \rho_0} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\xi} + e^*,$$

$$\frac{\xi_V(\rho)}{\rho} = \Gamma(\rho) c_V.$$

Константа интегрирования e^* обеспечивает выполнение условий $e^{(p)}(\rho^*) = 0, p^{(p)}(\rho^*) = 0$.

3. Постановка задачи и анализ результатов

Рассматривается задача о воздействии УВ на водную пену для условий экспериментов по сферическому взрыву ВВ в пенной среде, подробно описанных в [3]. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1: в цилиндрическом сосуде, заполненном водной пеной с начальным объемным водосодержанием $\alpha_{10} = 0.0083$, происходит детонация ВВ PLANP (масса заряда 145 г). Параметры сильной УВ, инициированной взрывом, измерялись датчиками, расположенными на расстояниях $l_1 = 0.41, l_2 = 0.53, l_3 = 0.67$ и $l_4 = 0.93$ м от его центра.

В соответствии с экспериментом [3] (рис. 1) расчетная область исследуемой задачи представляет собой цилиндр радиусом 2 м, заполненный водной пеной. При формировании начальных условий поставленной задачи предварительно учитывается процесс синерезиса, который определяется временным интервалом $\Delta t \approx 10$ мин от момента заливки пены до инициирования взрыва. В настоящей работе предполагается, что распределение α_{10} по мере увеличения высоты варьируется от 0.0083



Рис. 1. Схема эксперимента: 1–4 — местоположения датчиков давления

до 0.001, что показано изменением насыщенности синего цвета на рис. 1.

В центре расчетной области задается импульс давления, моделирующий взрыв:

$$p(x, y, z) = p_0 + \Delta p e^{-(x^2+y^2+z^2)/a^2},$$

где $\Delta p = 3000$ МПа, $p_0 = 0.1$ МПа, $a = 0.035$ м.

Центр взрыва изолирован сферой радиусом 0.04 м с граничным условием жесткой стенки на ее поверхности с целью повышения устойчивости расчетов. Система уравнений (1)–(7) была численно реализована методом контрольных объемов в новом решателе, созданном автором в открытом пакете OpenFOAM, с использованием алгоритма PIMPLE.

Сравнительный анализ расчетов и экспериментальных данных [3] в местоположении датчиков 1–4 показан на рис. 2. Численные решения с учетом и без учета явлений синерезиса обозначены линиями черного и синего цвета соответственно, данные экспериментов [3] — линией красного цвета. На графиках видно, что расчетная динамика УВ, фиксируемая датчиками 1 и 2, имеет двухволновую структуру и согласуется с экспериментальными осциллограммами давлений по скорости и амплитуде ударного импульса. Процесс синерезиса пены сопровождается увеличением объемного газосодержания в ее верхних слоях за счет перемещения жидкой фракции пены вниз под действием гравитационных сил. Неравномерное по высоте распределение объемного водосодержания влияет на скорость распространения УВ в пенной среде: с увеличением высоты пена становится менее плотной, а скорость ударного импульса в вертикальном направлении увеличивается, что сильнее всего проявляется на датчике 4, расположенном выше остальных.

Динамика сферического ударно-волнового импульса в водной пене показана на рис. 3 в виде расчетных пространственных распределений дав-

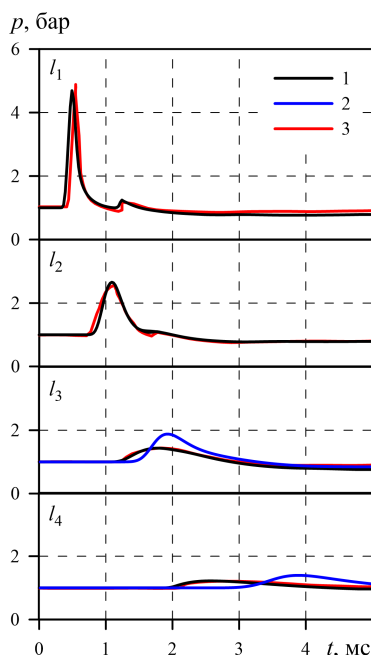


Рис. 2. Результаты расчетов динамики импульса давления в пене для датчиков, расположенных на расстоянии $l_1 = 0.41$, $l_2 = 0.53$, $l_3 = 0.67$, $l_4 = 0.93$ м от центра взрыва, 1 – с учетом и 2 – без учета процесса синергизма, 3 – экспериментальные данные [3]

ления (а) и векторных полей скоростей (б) в указанные моменты времени. Снижение объемного водосодержания в верхних слоях пены в процессе ее синергизма приводит к ускорению движения ударного импульса в вертикальном направлении до ≈ 100 м/с ($t = 2$ мс, рис. 3(б)). По мере распространения УВ в центре взрыва формируется область низких давлений и малых скоростей ($t = 2.5$ мс), которая со временем расширяется (см. рис. 3 при $t = 3$ мс, $t = 3.5$ мс). В окрестности этой зоны происходит смена направления потока к центру взрыва. Описанный процесс показан на рис. 3(б) при $t = 2.5$ мс. Дальнейшее отражение волн разрежения от центра симметрии приводит к образованию второй волны сжатия амплитудой ≈ 1.1 бар ($t = 3$ мс, рис. 3(а)), распространяющейся со скоростью ≈ 20 м/с вслед за основной УВ ($t = 3$ мс, рис. 3(б)). В местоположении датчиков 3 и 4 ($t = 3$ мс, рис. 3(б)) сохраняется локальная зона высоких скоростей, что ускоряет движение фронта УВ в вертикальном направлении.

4. Заключение

Численно исследована эволюция сферического взрыва в водной пене, моделируемого в соответствии с данными экспериментов [3]. Простран-

ственная математическая модель, используемая для описания динамики УВ в водной пене, учитывает силы межфазного взаимодействия, контактный теплообмен и влияние осаждения водной пены под гравитационным воздействием на начальное распределение объемного содержания воды в пенной среде. Численная реализация предлагаемой модели выполнена в открытом программном комплексе OpenFOAM. Исследованы особенности структуры формирующегося ударно-волнового течения. Показано, что снижение объемного содержания воды в верхних слоях пены в процессе ее синергизма сопровождается увеличением скорости УВ в вертикальном направлении. Установлено наилучшее согласование расчетов при учете процесса синергизма пены с экспериментальными данными [3].

Автор работы выражает искреннюю благодарность научному руководителю д.ф.–м.н. Раисе Хакимовне Болотновой за ценные советы и помощь в постановке и решении задачи.

Список литературы

- [1] Borisov A.A., Gelfand B.E., Kudinov V.M., Palamarchuk B.I., Stepanov V.V., Timofeev E.I. and Khomik S.V. Shock waves in water foams // *Acta Astronautica*. 1978. Vol. 5, No. 11/12. P. 1027–1033. DOI: 10.1016/0094-5765(78)90007-3
- [2] Hartman W., Boughton B., Larsen M. Blast mitigation capabilities of aqueous foam // Technical Report. SAND2006-0533. Sandia: Sandia National Laboratories. 2006. 98 p. <https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2006/060533.pdf>
- [3] Del Prete E., Chinnayya A., Domergue L., et al. Blast Wave Mitigation by Dry Aqueous Foams // *Shock Waves*. 2013. Vol. 23, No. 1. P. 39–53. DOI: 10.1007/s00193-012-0400-0
- [4] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Исследование осесимметричных волновых течений при взаимодействии сферического ударного импульса с барьером из водной пены // *Труды Института механики Уфимского научного центра РАН*. 2017. Т. 12, № 2. С. 238–243. DOI: 10.21662/uim2017.2.036
- [5] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. Dynamics of a spherical explosion in aqueous foam taking into account heat-exchange and dissipative processes // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. Vol. 1400. 077027. DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077027
- [6] Ждан С.А. Численное моделирование взрыва заряда ВВ в пене // *ФГВ*. 1990. Т. 26, № 2. С. 103–110. eLIBRARY ID: 30555610
- [7] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Исследование демпфирующих свойств водной пены под воздействием сферической ударной волны // *Известия ВУЗов. Поволжский регион. Физико-математические науки*. 2017. № 2. С. 108–121. DOI: 10.21685/2072-3040-2017-2-9
- [8] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Влияние теплообменных процессов на снижение интенсивности сферического взрыва в водной пене // *ПММ*. 2019. Т. 83, № 3. С. 468–477. DOI: 0.1134/S0032823519030020

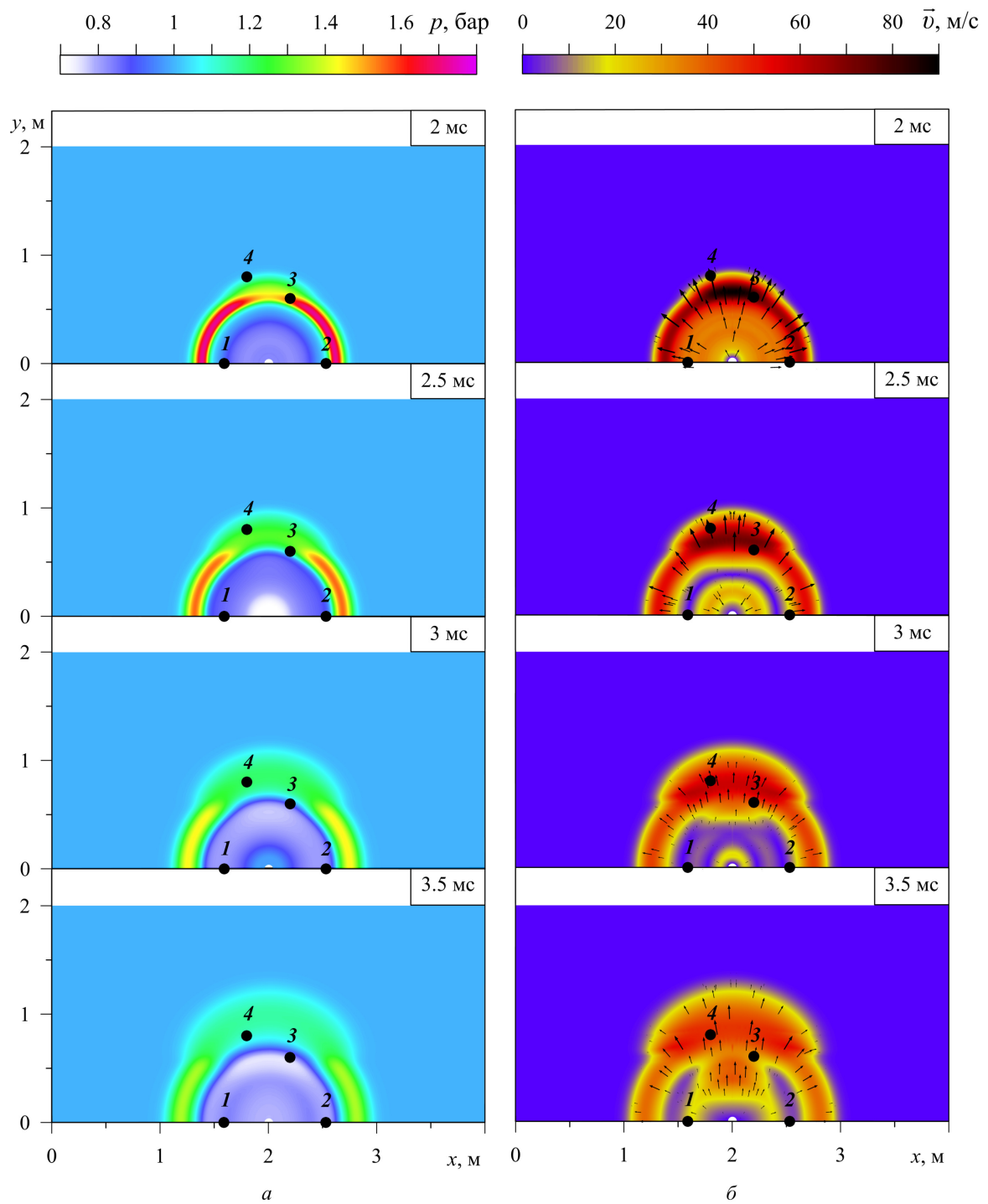
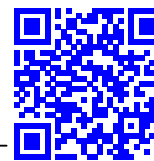


Рис. 3. Динамика полей давления и векторных полей скоростей в указанные моменты времени; 1–4 – местоположения датчиков давления

- [9] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Нурисламова Э.А. Моделирование процесса ослабления сферического взрыва применением водной пены // Многофазные системы. 2019. Т. 14, №. 2. С. 108–114.
DOI: [10.21662/mfs2019.2.015](https://doi.org/10.21662/mfs2019.2.015)
- [10] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Моделирование динамики ударного воздействия на водные пены с учетом вязкоупругих свойства явлений синерезиса // Изв. РАН. МЖГ. 2020. №. 5. Р. 28–32.
DOI: [10.31857/S0568528120050023](https://doi.org/10.31857/S0568528120050023)
- [11] Zeno Tacconi. Feasibility analysis of a two-fluid solver for cavitation and interface capturing as implemented in OpenFOAM // Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica, Politecnico di Milano. 2018. 134 p.
<https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/139684>
- [12] Schiller L., Naumann Z. A Drag Coefficient Correlation // Z. Ver. Deutsch. Ing. 1935. Vol. 77. P. 40–65.
- [13] Ranz W.E., Marshall W.R. Evaporation from Drops // Chem. Eng. Prog. 1952. Vol. 48, No. 22. P. 141–146.
- [14] Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals. 1976. Vol. 15. P. 59–64.
DOI: [10.1021/i160057a011](https://doi.org/10.1021/i160057a011)
- [15] Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма //ТВТ. 2011. Т. 49, № 2. С. 310–313.
eLIBRARY ID: [15639102](https://elibrary.ru/15639102)



Influence of aqueous foam syneresis on the shock wave propagation velocity

Gainullina E.F.

Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa, Russia

Numerical simulation of the spherical shock pulse propagation in aqueous foam with volumetric liquid fraction of 0.0083 has been carried out in accordance with the published experimental data on the explosion of HE in aqueous foam. The assumption is used that the foam structure is destroyed by the shock wave, which leads to the transformation of the foam into a monodisperse gas-droplet mixture. The system of equations for the two-phase gas-droplet model of aqueous foam includes the laws of conservation of mass, momentum, energy for each phase and the equation for the dynamics of the volumetric liquid fraction in a single-pressure, two-velocity, two-temperature approximations in a three-dimensional formulation and takes into account the forces of the Schiller-Naumann interfacial drag, the Ranz-Marshall interphase contact heat exchange and the effect of foam syneresis on the initial distribution of its volumetric liquid fraction. Realistic equations of state in the form of Peng-Robinson and Mie-Gruneisen are used to describe the thermodynamic properties of air and water that make up a gas-droplet mixture. Numerical modeling of the processes under consideration was carried out in the open software of computational fluid dynamics OpenFOAM using the finite volume method based on the iterative two-step PIMPLE algorithm. The analysis of the effect of foam syneresis on the dynamics of shock pulse in aqueous foam is given. It was found that the uneven distribution of the liquid fraction in the foam, caused by its sedimentation under the gravity, leads to the increase in the shock pulse velocity in upper layers of the foam. In comparative analysis of numerical solutions and experimental data at sensor locations, the importance of taking into account syneresis phenomena in modeling the dynamics of shock wave in aqueous foam is shown. The reliability of calculations obtained by the proposed model is confirmed by their agreement with experimental data.

Keywords: spherical explosion, shock wave, aqueous foam, OpenFOAM package, numerical modeling

References

- [1] Borisov A.A., Gelfand B.E., Kudinov V.M., Palamarchuk B.I., Stepanov V.V., Timofeev E.I. and Khomik S.V. Shock waves in water foams // *Acta Astronautica*. 1978. Vol. 5. No. 11/12. P. 1027–33.
DOI: 10.1016/0094-5765(78)90007-3
- [2] Hartman W., Boughton B., Larsen M. Blast mitigation capabilities of aqueous foam // Technical Report. SAND2006-0533. Sandia: Sandia National Laboratories. 2006. 98 p.
<https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2006/060533.pdf>
- [3] Del Prete E., Chinnayya A., Domergue L., et al. Blast Wave Mitigation by Dry Aqueous Foams // *Shock Waves*. 2013. Vol. 23. No. 1 P. 39–53.
DOI: 10.1007/s00193-012-0400-0
- [4] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. [Investigation of axisymmetric wave flows under interaction of a spherical impact pulse with a barrier of aqueous foam] *Trudy Instituta Mexaniki im. R.R. Mavlyutova Ufimskogo Nauchnogo Centra Rossijskoj Akademii Nauk* [Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics]. 2017. V. 12. No. 2. Pp. 238–243 (in Russian).
DOI: 10.21662/uim2017.2.036
- [5] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. Dynamics of a spherical explosion in aqueous foam taking into account heat-exchange and dissipative processes // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. Vol. 1400. 077027.
DOI: 10.1088/1742-6596/1400/7/077027
- [6] Zhdan S.A. Numerical modeling of the explosion of a high explosive (HE) charge in foam // *Combust., Explos., Shock Waves*. 1990. V. 26. No. 2. Pp. 221–227.
DOI: 10.1007/BF00742416
- [7] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. [A research of damping properties of aqueous foam under the impact of spherical shock waves] *Izvestiya VUZov. Povolzhskij Region. Fiziko-Matematicheskie Nauki* [University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences]. 2017. No. 2. Pp. 108–121 (in Russian).
DOI: 10.21685/2072-3040-2017-2-9
- [8] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. Influence of Heat-exchange Processes on Decreasing an Intensity of a Spherical Explosion in Aqueous Foam // *Fluid Dynamics*. 2019. V. 54. No. 7. Pp. 970–977.
DOI: 10.1134/S0015462819070024

- [9] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F., Nurislamova E.A. [Modeling of the spherical explosion attenuation process using aqueous foam] *Mnogofaznye sistemy* [Multiphase systems]. 2019. V. 14. No. 2. Pp. 108–114 (in Russian).
DOI: [10.21662/mfs2019.2.015](https://doi.org/10.21662/mfs2019.2.015)
- [10] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. Modeling the Dynamics of Shock Impact on Aqueous Foams with Account for Viscoelastic Properties and Syneresis Phenomena // *Fluid Dynamics*. 2020. V. 55. No. 5. P. 604–608.
DOI: [10.1134/S001546282005002X](https://doi.org/10.1134/S001546282005002X)
- [11] Zeno Tacconi. Feasibility analysis of a two-fluid solver for cavitation and interface capturing as implemented in OpenFOAM // Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica, Politecnico di Milano. 2018. 134 p.
<https://www.politesi.polimi.it/handle/10589/139684>
- [12] Schiller L., Naumann Z. A Drag Coefficient Correlation // *Z. Ver. Deutsch. Ing.* 1935. Vol. 77. P. 40–65.
- [13] Ranz W.E., Marshall W.R. Evaporation from Drops // *Chem. Eng. Prog.* 1952. Vol. 48. No. 22. P. 141–146.
- [14] Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // *Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals*. 1976. Vol. 15. P. 59–64.
DOI: [10.1021/i160057a011](https://doi.org/10.1021/i160057a011)
- [15] Nigmatulin R.I., Bolotnova R.Kh. Wide-Range Equation of State of Water and Steam: Simplified Form // *High Temperature*. 2011. Vol. 49. Issue 2. P. 303–306.
DOI: [10.1134/S0018151X11020106](https://doi.org/10.1134/S0018151X11020106)