ISSN: 2658–5782

Номер 2 Апрель–Июнь 2019

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org

ИМех
им. Р.Р. Мавлютова

ISSN 2658–5782 Том 14 (2019), № 2, с. 108–114

Многофазные системы

http://mfs.uimech.org/mfs2019.2.005
DOI: 10.21662/mfs2019.2.005
УДК 532.529:5

Получена: 6.11.2019
Принята: 16.12.2019

Моделирование процесса ослабления сферического взрыва применением водной пены[1]

Болотнова Р.Х.*, **Гайнуллина Э.Ф.***, **Нурисламова Э.А.***,**

*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН, Уфа
**Башкирский государственный университет, Уфа

Представлена двухфазная модель динамического поведения сухой водной пены под воздействием сильной ударной волны в предположении, что пенная структура при ударном нагружении разрушается на взвесь монодисперсных микрокапель с формированием газокапельной смеси. Система уравнений модели водной пены включает законы сохранения массы, импульса и энергии каждой фазы в соответствии с однодавленческим, двухскоростным, двухтемпературным приближениями в трехмерной постановке с учетом сил межфазного сопротивления Шиллера–Наумана и межфазного контактного теплообмена Ранца–Маршалла. Термодинамические свойства воздуха и воды, составляющих газокапельную смесь, описаны уравнениями состояния Пенга–Робинсона и Ми–Грюнайзена. Наличие неравномерного по высоте процесса синерезиса водной пены, обусловленного гравитационными силами, учитывалось заданием распределения объемного содержания воды в пене. Дополнительный учет процесса синерезиса контролировался при расчете интенсивности сил межфазного сопротивления по модели Шиллера–Наумана введением параметра, зависящего от распределения по пространству начального водосодержания пены. Сферический взрыв моделировался в форме ударно-волнового импульса, энергия которого совпадала с энергией заряда взрывчатого вещества, используемого в экспериментах. Численное решение поставленной задачи реализовано с использованием открытого программного комплекса OpenFOAM на основе двухшагового вычислительного алгоритма PIMPLE. Численное решение задачи, полученное на основе предложенной модели газокапельной смеси, удовлетворительно согласуется с экспериментальными данными по сферическому взрыву в водной пене. Дан анализ динамики сферической ударной волны при ее прохождении сквозь водную пену. Исследованы причины значительного снижения амплитуды и скорости распространения ударных волн в изучаемой среде.

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

1. Введение

Изучение демпфирующих свойств водных пен при динамическом воздействии на основе математического и численного моделирований при согласовании с данными экспериментальных исследований представляет большую научную и практическую значимость, поскольку существенное снижение интенсивности и скорости распространения ударного импульса позволяет использовать водную пену в качестве мобильного средства шумоподавления и защиты от взрывов высокой интенсивности.

Демпфирующие свойства пузырьковых сред и структур из водной пены исследовались в работах [1–11]. В [1, 2] рассмотрены особенности динамики одномерных плоских ударных волн (УВ) в пузырьковых средах и газожидкостных смесях. В [3–5] моделировался сферический взрыв в газе и водной пене в одномерном приближении с использованием метода сквозного счета с учетом псевдовязкости Неймана–Рихтмайера в условиях, соответствующих экспериментальным данным [6].

[1]Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 17–41–020582-р_а), гранта Республики Башкортостан молодым ученым № 8 ГР и средств государственного бюджета по госзаданию 0246–2019–0052.

© Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН
© Болотнова Р.Х.
© Гайнуллина Э.Ф.
© Нурисламова Э.А.

В [7–10] изучалось взаимодействие воздушного сферического импульса давления с барьером из водной пены в двумерном осесимметричном приближении с использованием метода подвижных лагранжевых сеток [7, 8] и пакета OpenFOAM [9–11].

В настоящей работе продолжается изучение процессов, сопровождающих сферический взрыв в водной пене, начатое в [3–5], с более детальным учетом влияния сил межфазного сопротивления и контактного теплообмена. Уточненная модель водной пены численно реализована в виде нового решателя на основе программного комплекса OpenFOAM [12].

2. Уравнения модели

Система уравнений, моделирующая поведение водной пены при динамическом нагружении, состоит из уравнений сохранения массы, импульса и энергии для каждой фазы в предположении равенства давлений фаз, в случае двухскоростного и двухтемпературного приближений [13]:

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

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

$$\begin{aligned}\frac{\partial(\alpha_i\rho_i(e_i+K_i))}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_i\rho_i(e_i+K_i)\vec{v}_i) = \\ = -p\frac{\partial\alpha_i}{\partial t} - \operatorname{div}(\alpha_i\vec{v}_i p) + \\ + \operatorname{div}(\alpha_i\gamma_{i,eff}(\nabla h_i)) + K_{ht}(T_i - T_j),\end{aligned} \tag{3}$$

где α_i — объемное содержание; ρ_i — плотность; t — время; $\vec{v}_i$ — вектор скорости; e_i — внутренняя энергия; K_i — кинетическая энергия; p —давление; h_i — энтальпия; K_{ht} — коэффициент теплообмена; T_i — температура; $i, j = 1, 2$ — обозначения жидкой и газовой фаз.

Система уравнений (1)–(3) включает следующие выражения для используемых функций:

$\vec{\tau}_i$ — тензор вязких напряжений

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

где μ_i — динамическая вязкость; I — единичный тензор;

$\vec{F}_i$ — плотность межфазных сил [13]

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

$\vec{F}_{i,drag}$ — сила межфазного сопротивления

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

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

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

$\gamma_{i,eff}$ — эффективная температуропроводность i-й фазы

$$\gamma_{i,eff} = \frac{c_{p,i}}{c_{V,i}}\gamma_i,$$

где $c_{p,i}$, $c_{V,i}$ — удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме.

Коэффициент теплообмена K_{ht} определен в соответствии с моделью Ранца–Маршалла [14]:

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

где κ_i — теплопроводность; Nu, Pr, Re — числа Нуссельта, Прандтля и Рейнольдса соответственно.

В настоящей работе неравномерность процесса осаждения (синерезиса) пены, приводящего к потере водосодержания в верхних слоях пены, учтена в выражении, отвечающем за интенсивность сил межфазного сопротивления по модели Шиллера–Наумана [15], введением в коэффициент C_D параметра $c_s(\alpha_{10})$, зависящего от распределения по пространству водосодержания в водной пене:

$$C_D = \frac{c_s(\alpha_{10})(1 + 0.15\operatorname{Re}^{0.687})}{\operatorname{Re}}, \ \operatorname{Re} \leqslant 1000. \tag{4}$$

Для уравнения состояния воздуха принята форма Пенга–Робинсона [16]:

$$p = \frac{RT_2}{V_m - b} - \frac{a(T_2)}{V_m(V_m+b) + b(V_m - b)}, \tag{5}$$

в которой

$$\begin{gathered} a = 0.45724\frac{R^2{T_c}^2}{p_c}\lambda(T_r,\omega), \ \ b = 0.07780\frac{RT_c}{p_c}, \\ \lambda = (1 + \theta(1 - T_r^{0.5}))^2, \ \ T_r = \frac{T_2}{T_c}, \\ \theta = 0.37464 + 1.54226\omega - 0.26992\omega^2, \end{gathered}$$

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

Свойства воды описываются уравнением состояния в форме Ми–Грюнайзена [17]:

$$p = (\gamma_1 - 1)\rho_1 e_1 - \gamma_1 p_*, \quad e_1 = c_{V,1} T_1 + \frac{p_*}{\rho_1}, \qquad (6)$$

где $p_* = 6 \cdot 10^8$ Па, $\gamma_1 = 4.4$ — числовые параметры для воды.

При описании поведения водной пены в процессе ее взаимодействия с сильной УВ используется модель газожидкостной смеси, поскольку предполагается, что пенная структура разрушается на монодисперсные микрокапли [18] с диаметром $d_{10} = 8 \cdot 10^{-4}$ м.

3. Анализ результатов

В ходе численного моделирования были выполнены расчеты динамики УВ в условиях эксперимента [6] по сферическому взрыву заряда взрывчатого вещества (ВВ) в сухой водной пене с начальным объемным содержанием воды $\alpha_{10} = 0.0083$. Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1: в центре цилиндрического сосуда объемом ≈ 8 м^3 на высоте 1.5 м подвешено ВВ PLANP массой 145 г. Сосуд заполняется водной пеной, после чего заряд ВВ приводится в действие с помощью детонатора. Энергия создаваемого в эксперименте взрыва оценивается, как $Q \approx 0.8$ МДж [5]. Датчики, измеряющие давление в УВ, закреплены на различных высотах и расстояниях от центра взрыва таким образом, чтобы отраженные от окружающих поверхностей волны не оказывали влияния на результаты измерений (см. рис. 1).

Исследуемая задача решалась в следующей постановке: в центре сферы радиуса 2 м, заполненной водной пеной, моделировался взрыв в виде импульса с начальным распределением давления:

$$p(x, y, z) = p_0 + \Delta p e^{-(x^2+y^2+z^2)/a^2}, \qquad (7)$$

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

Для уменьшения неустойчивости в численных расчетах центр взрыва изолировался сферической областью радиуса 0.04 м, на поверхности которой задавалось граничное условие жесткой стенки.

Система уравнений (1)–(6) была численно решена с использованием нового решателя, полученного в среде пакета OpenFOAM на основе вычислительного алгоритма PIMPLE.

Поскольку расположение датчиков в эксперименте различается не только расстоянием до центра взрыва, но и по высоте (см. рис. 1), для каждого из датчиков решалась своя задача, учитывающая индивидуальное распределение плотности водной пены в зависимости от интенсивности процесса синерезиса, возникающего за счет влияния

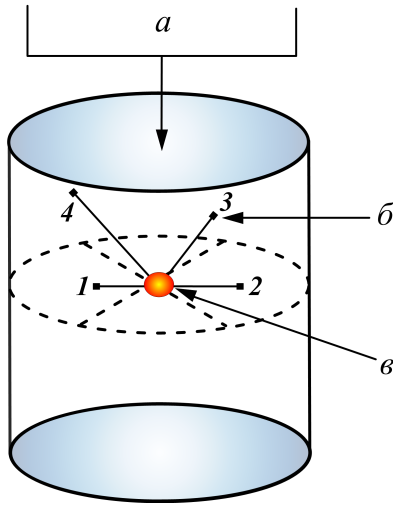

Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *а* — загрузка пены, *б* — датчики *1* – *4*, *в* — заряд ВВ

гравитации. Для датчиков *1* и *2*, расположенных в одной горизонтальной плоскости на расстоянии $l_1 = 0.41$ и $l_2 = 0.53$ м от центра взрыва и фиксирующих ударно-волновой импульс при $t < 1.5$ мс (см. рис. 1), действие силы тяжести будет равномерным и, следовательно, начальное объемное водосодержание $\alpha_{10} = 0.0083$ в этом случае не зависит от расстояния до точки взрыва (см. штриховые красные линии на рис. 2). Однако для датчиков *3* и *4*, которые закреплены выше центра взрыва и расположены от него на расстоянии $l_3 = 0.67$ и $l_4 = 0.93$ м, важно учитывать уменьшение водосодержания пены по высоте, обусловленное ее синерезисом. В расчетах, моделирующих распространение УВ в направлении датчиков *3* и *4*, начальное распределение объемного водосодержания в пене α_{10} задавалось в виде убывающей функции, которая снижается от максимального значения $\alpha_{10} = 0.0083$ в центре взрыва до величин $\alpha_{10} = 0.002$ и $\alpha_{10} = 0.001$ для положений датчиков *3* и *4* соответственно. На рис. 2 сплошной линией красного цвета показана зависимость распределения начального объемного водосодержания пены от расстояния до датчиков *3* и *4*.

При расчете сил межфазного сопротивления (4) в модели учитывалось влияние на вязкость процесса синерезиса, контролируемого зависимостью параметра c_s от водосодержания α_{10}: чем больше начальное водосодержание в пене, тем больше ее вязкость и тем сильнее действие сил межфазного сопротивления. На рис. 2 линиями синего цвета обозначены значения коэффициента c_s в зависи-

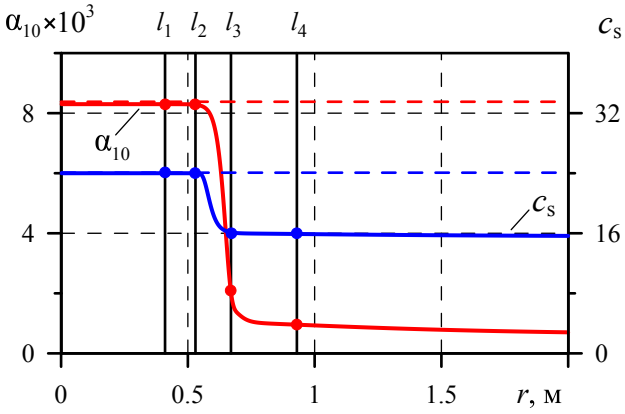

Рис. 2. Распределения начального объемного водосодержания пены α_{10} и параметра $c_s(\alpha_{10})$ в зависимости от расстояния до центра взрыва; $l_1, \ldots, l_4$ — местоположения датчиков

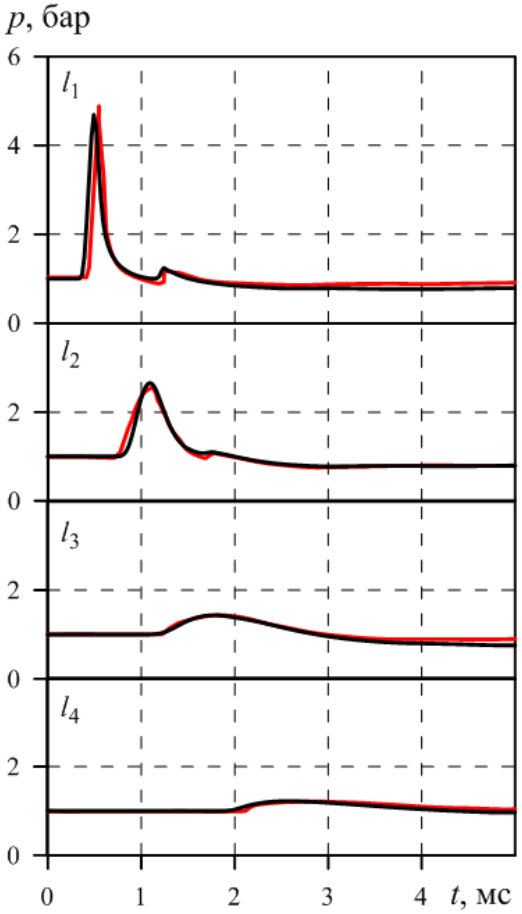

Рис. 3. Динамика давления в пене в местоположениях датчиков $l_1, \ldots, l_4$; черная линия — расчеты, красная линия — экспериментальные данные [6]

мости от расстояния до центра взрыва: значение c_s, равное 24 на датчиках *1* и *2* (штриховая линия), уменьшается до $c_s = 16$ в местоположении датчиков *3* и *4* (сплошная линия).

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования сферического взрыва в водной пене в виде расчетных и экспериментальных временных зависимостей давления, фиксируемых датчиками *1–4*, расположенными на расстояниях $l_1, \ldots, l_4$ от точки взрыва. Профили давления, полученные в ходе численного моделирования, и экспериментальные данные [6] обозначены линиями черного и красного цвета соответственно.

Амплитуда сферического импульса давления, равная в начальный момент времени $p = 30000$ бар (7), в результате взаимодействия с водной пеной ослабевает до 5 бар к моменту прихода УВ к датчику *1* при $t = 0.5$ мс. Как в эксперименте, так и в расчетах фиксируется двухволновая структура ударного импульса в положениях первых двух датчиков: за основным пиком давления следует второй пик, являющийся следствием отражения волны разрежения от центра взрыва. По мере распространения УВ вглубь пены импульс давления ослабевает и двухволновая структура фронта «размывается» под воздействием сил межфазного сопротивления и контактного теплообмена, что наблюдается на расчетных и экспериментальных зависимостях, полученных на датчиках *3* и *4*. Сравнительный анализ расчетов и экспериментальных данных [6] (см. рис. 3) показывает их хорошее согласование.

4. Заключение

Проведено численное моделирование и исследование процесса распространения в водной пене сферической УВ, сформированной в результате взрыва ВВ, для условий экспериментов [6]. При исследовании динамики УВ в водной пене использовалась предложенная модель газокапельной смеси, учитывающая силы межфазного взаимодействия, контактный теплообмен и влияние синерезиса водной пены, обусловленного гравитационными силами. Численное моделирование исследуемой задачи выполнено на основе открытого пакета OpenFOAM. Сравнение численных решений, полученных для временных зависимостей давления и экспериментальных осциллограмм давления в точках установки датчиков, показало их хорошее согласование по скорости распространения и амплитуде ударно-волнового импульса. Проведен анализ причин диссипации энергии УВ в водной пене, приводящих к ее значительному затуханию.

Список литературы

[1] Болотнова Р.Х., Галимзянов М.Н., Агишева У.О. Моделирование процессов взаимодействия сильных ударных волн в газожидкостных смесях // Известия ВУЗов. Поволжский регион. Физико-математические науки. 2011. № 2. С. 3–14. https://izvuz_fmn.pnzgu.ru/files/izvuz_fmn.pnzgu.ru/1211.pdf

[2] Bolotnova R.Kh., Galimzianov M.N., Topolnikov A.S., Buzina V.A., Agisheva U.O. Nonlinear Effects In Bubbly Liquid With Shock Waves // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2012. Vol. 6, No. 8. Pp. 1095–1102. https://waset.org/publications/14192/nonlinear-effects-in-bubbly-liquid-with-shock-waves

[3] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Численное моделирование сферического взрыва в пене // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 11, № 1. С. 60–65. DOI: 10.21662/uim2016.1.009

[4] 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

[5] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Влияние теплообменных процессов на снижение интенсивности сферического взрыва в водной пене // Прикладная математика и механика. 2019. Т. 83, № 3. С. 468–477. DOI: 10.1134/S0032823519030020

[6] Del Prete E., Chinnayya A., Domergue L., et al. Blast Wave Mitigation by Dry Aqueous Foams // Shock Waves. 2013. Vol. 23, No. 1 Pp. 39–53. DOI: 10.1007/s00193-012-0400-0

[7] Болотнова Р.Х., Агишева У.О. Пространственное моделирование динамики газожидкостной пены на подвижных лагранжевых сетках в условиях ударно-волнового воздействия // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2014. № 3. С. 427–440. http://num-meth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2014/pdf/v15r138.pdf

[8] Агишева У.О., Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Коробчинская В.А. Особенности вихреобразования при воздействии импульса давления на газовую область, ограниченную пенным слоем // Изв. РАН. МЖГ. 2016. № 6. С. 47–55. DOI: 10.1134/S0015462816060053

[9] 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

[10] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф. Особенности воздействия сферического импульса давления на границу газа с водной пеной // Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. 2018. Т. 28, № 3. С. 364–372. DOI: 10.20537/vm180307

[11] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. Wave dynamics and vortex formation under the impact of a spherical impulse on the boundary between gas and aqueous foam // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1268. 012015. DOI: 10.1088/1742-6596/1268/1/012015

[12] OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. http://www.openfoam.com

[13] 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

[14] Ranz W.E., Marshall W.R. Evaporation from Drops // Chem. Eng. Prog. 1952. Vol. 48, No. 22. P. 141–146. http://dns2.asia.edu.tw/~ysho/YSHO-English/1000%20CE/PDF/Che%20Eng%20Pro48,%20141.pdf

[15] Schiller L., Naumann Z. A Drag Coefficient Correlation // Z. Ver. Deutsch. Ing. 1935. Vol. 77. P. 40—65.

[16] 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

[17] Jolgam S., Ballil A., Nowakowski A., Nicolleau F. On Equations of State for Simulations of Multiphase Flows // Proceedings of the World congress on Engineering. 2012. Vol. III. http://www.iaeng.org/publication/WCE2012/WCE2012_pp1963-1968.pdf

[18] Ждан С.А. Численное моделирование взрыва заряда ВВ в пене // ФГВ. 1990. Т. 26. № 2. С. 103–110. https://elibrary.ru/item.asp?id=30555610

ISSN 2658–5782 14 (2019), **2**, 108–114

Multiphase Systems

http://mfs.uimech.org/mfs2019.2.005
DOI: 10.21662/mfs2019.2.005

Received: 6.11.2019
Accepted: 16.12.2019

Modeling of the spherical explosion attenuation process using aqueous foam

Bolotnova R.Kh.*, **Gainullina E.F.***, **Nurislamova E.A.****

*Mavlyutov Institute of Mechanics UFRC RAS, Ufa, Russia
**Bashkir State University, Ufa, Russia

The two-phase model of dry aqueous foam dynamic behavior under the strong shock wave influence is presented under assumption that the foam structure under shock loading is destroyed into a suspension of monodispersed microdrops with the formation of a gas-droplet mixture. The system of equations for the model of aqueous foam includes the laws of conservation of mass, momentum and energy for each phase in accordance with the single-pressure, two-speed, two-temperature approximations in a three-dimensional formulation, taking into account the Schiller–Naumann interfacial drag force and the Ranz–Marshall interfacial contact heat transfer. The thermodynamic properties of air and water forming a gas-droplet mixture are described by the Peng–Robinson and Mie–Grueneisen equations of state. The presence of non-uniform process in height of aqueous foam syneresis, which is due to gravitational forces, is taken into account by setting the distribution of the liquid volume fraction in the foam. An additional consideration of the syneresis process during calculating the intensity of interphase drag forces according to the Schiller–Naumann model was controlled by introducing the parameter depending on the spatial distribution of the initial liquid volume fraction of the foam. The spherical explosion is modeled in the form of the shock wave pulse whose energy coincided with the charge energy of the HE used in the experiments. The problem numerical solution is implemented using the OpenFOAM free software package based on the two-step PIMPLE computational algorithm. The numerical solution of the problem, obtained on the basis of the proposed gas-droplet mixture model, is in satisfactory agreement with the experimental data on a spherical explosion in aqueous foam. The analysis of the spherical shock wave dynamics while its propagation through aqueous foam is given. The causes of the significant decrease in the amplitude and velocity shock waves propagation in the medium under study are investigated.

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

References

[1] Bolotnova R.Kh., Galimzianov M.N., Agisheva U.O. [Simulation of a strong shock wave interaction process in gas liquid mixtures] [University proceedings. Volga region. Physical and mathematical sciences]. 2011. No. 2. Pp. 3–14 (in Russian). https://izvuz_fmn.pnzgu.ru/files/izvuz_fmn.pnzgu.ru/1211.pdf

[2] Bolotnova R.Kh., Galimzianov M.N., Topolnikov A.S., Buzina V.A., Agisheva U.O. Nonlinear Effects In Bubbly Liquid With Shock Waves // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2012. Vol. 6, No. 8. P. 1095–1102. https://waset.org/publications/14192/nonlinear-effects-in-bubbly-liquid-with-shock-waves

[3] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. [The numerical modeling of spherical explosion in the foam] *Trudy Instituta Mexaniki im. R.R. Mavlyutova Ufimskogo Nauchnogo Centra Rossijskoj Akademii Nauk* [Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics]. 2016. V. 11, No. 1. Pp. 60–65 (in Russian). DOI: 10.21662/uim2016.1.009

[4] 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

[5] 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, Suppl. 7. Pp. S71–S78. DOI: 10.1134/S0015462819070024

[6] 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

[7] Bolotnova R.Kh., Agisheva U.O. [Spatial modeling of water foam dynamics with moving Lagrangian grids under shock wave impact] *Vychislitel'nye metody i programmirovanie: novye vychislitel'nye texnologii* [Numerical methods and Programming]. 2014. No. 3. Pp. 427–440 (in Russian).
http://num-meth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2014/pdf/v15r138.pdf

[8] Agisheva U.O., Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F., Korobchinskaya V.A. Features of Vortex Formation under the Impact of a Pressure Pulse on a Gas Region Bounded by the Foam Layer // Fluid Dynamics. 2016. V. 51, No. 6. P. 757–766.
DOI: 10.1134/S0015462816060053

[9] 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

[10] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. Features of the impact of spherical shock impulse on the boundary of gas with aqueous foam *Vestnik Udmurtskogo Universiteta. Matematika. Mexanika. Komp'yuternye Nauki* [The Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science]. 2018. V. 28, No. 3. Pp. 364–372 (in Russian).
DOI: 10.20537/vm180307

[11] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. Wave dynamics and vortex formation under the impact of a spherical impulse on the boundary between gas and aqueous foam // J. Phys.: Conf. Ser. 2019. Vol. 1268. 012015.
DOI: 10.1088/1742-6596/1268/1/012015

[12] OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox.
http://www.openfoam.com

[13] 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

[14] Ranz W.E., Marshall W.R. Evaporation from Drops // Chem. Eng. Prog. 1952. Vol. 48, No. 22. P. 141–146.
http://dns2.asia.edu.tw/~ysho/YSHO-English/1000%20CE/PDF/Che%20Eng%20Pro48,%20141.pdf

[15] Schiller L., Naumann Z. A Drag Coefficient Correlation // Z. Ver. Deutsch. Ing. 1935. Vol. 77. P. 40—65.

[16] 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

[17] Jolgam S., Ballil A., Nowakowski A., Nicolleau F. On Equations of State for Simulations of Multiphase Flows // Proceedings of the World congress on Engineering. 2012. Vol. III.
http://www.iaeng.org/publication/WCE2012/WCE2012_pp1963-1968.pdf

[18] 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