ISSN: 2658-5782



Номер 2

Апрель-Июнь 2019

МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

mfs.uimech.org



ISSN 2658-5782

Том 14 (2019), № 2, с. 74-81



Многофазные системы



http://mfs.uimech.org/mfs2019.2.001 DOI: 10.21662/mfs2019.2.001 УДК 532.529:5 Получена: 12.09.2019 Принята: 15.11.2019

Динамика ударных волн и эволюция вихреобразования при взаимодействии сферического воздушного импульса со слоем водной пены¹

Гайнуллина Э.Ф.

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

В работе проведено численное исследование процесса взаимодействия мощного воздушного сферического ударно-волнового импульса с защитным барьером из водной пены с начальным объемным содержанием воды 0.2. Толщина пенного слоя выбрана для выполнения условия неотражения волны сжатия от внешней границы пены в рассматриваемые временные интервалы. При изучении динамики волновых течений использовано предположение о разрушении пенной структуры на взвесь микрокапель за фронтом сильной ударной волны. Двухфазная среда описана на основе модели газокапельной смеси, которая включает в себя законы сохранения массы, импульса и энергии каждой фазы в соответствии с однодавленческим, двухскоростным, двухтемпературным приближениями в двумерной осесимметричной постановке. При учете сил межфазного сопротивления использована модель Шиллера-Наумана. Влияние контактного теплообмена на границе между фазами учтено моделью Ранца-Маршалла. Для описания свойств воздуха и воды использованы уравнения состояния Пенга-Робинсона и совершенной жидкости. Численная реализация модели проведена с применением открытого программного комплекса OpenFOAM на основе двухшагового вычислительного алгоритма PIMPLE. Результаты численного исследования задачи представлены в виде пространственных распределений полей давления, скоростей и линий тока. Установлено значительное ослабление интенсивности сферической ударной волны при ее взаимодействии со слоем водной пены. Исследованы причины и динамика образования серии тороидальных вихрей в газовой области за фронтом ударной волны. Подтверждена достоверность полученных результатов сравнением с решениями аналогичной задачи, найденными другим численным методом.

Ключевые слова: сферическая ударная волна, ударный импульс, барьер из водной пены, пакет OpenFOAM, численное моделирование, вихревые течения

1. Введение

Изучение динамики ударных волн (VB) в процессе их взаимодействия с водными пенами представляет большую научную и практическую значимость: высокая сжимаемость пенных структур позволяет существенно снизить амплитуду и скорость распространения ударного импульса, что делает возможным применение защитных пенных преград для локализации последствий взрывов высокой интенсивности. В связи с этим приобретают актуальность исследования по изучению демпфирующих свойств водных пен при динамическом воздействии на основе математического и численного моделирования.

Факторы, влияющие на степень ослабления УВ в водных пенах, проанализированы в теоретических и экспериментальных работах [1–3]. В [4, 5] рассмотрены особенности динамики одномерных плоских УВ в пузырьковых средах и пенных структурах. Демпфирующие свойства водной пены исследовались в работах [6–14]. В [6–8] моделировался сферический взрыв в газе и водной пене в условиях, соответствующих экспериментальным данным [9]. Полученные численные решения имеют удовлетворительное согласование с эксперимен-

¹Работа 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 © Гайнуллина Э.Ф.

том. В [10–13] исследовалась динамика УВ при взаимодействии воздушного сферического импульса давления с барьером из водной пены в двумерном осесимметричном приближении с использованием метода подвижных лагранжевых сеток [10, 11] и пакета OpenFOAM [12–14]. Оценена достоверность полученных решений и выявлены условия возникновения тороидальных вихрей в исследуемой области.

Настоящая работа выполнена с использованием программного комплекса OpenFOAM [15] и является продолжением исследований [11–14]. В отличие от [14], в данной работе свойства газовой фазы описаны уравнением состояния Пенга–Робинсона, учитывающим межмолекулярные взаимодействия в реальном газе, и изучена динамика образования вихревых зон для более длительных временных интервалов.

2. Уравнения модели

Предполагается, что за фронтом сильной УВ пена разрушается на монодисперсные микрокапли диаметра $d_0 = 30$ мкм [16], что позволяет использовать при ее описании модель газожидкостной смеси. Система модельных уравнений двухфазной среды для исследуемой задачи включает законы сохранения массы, импульса и энергии каждой фазы в соответствии с однодавленческим, двухскоростным и двухтемпературным приближениями [17]:

• уравнения неразрывности и импульса фаз:

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

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

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

Слагаемое \vec{F}_i определяет плотность межфазных сил в виде суммы сил межфазного сопротивления $\vec{F}_{i,drag}$ и присоединенных масс $\vec{F}_{i,vm}$ [17]:

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

$$\vec{F}_{i,drag} = \frac{3}{4} \alpha_2 C_D \frac{\rho_1}{d_0} (\vec{v}_i - \vec{v}_j) |\vec{v}_i - \vec{v}_j|,$$
$$\vec{F}_{i,vm} = 0.5 \alpha_2 \rho_1 \left(\frac{d_j \vec{v}_j}{dt} - \frac{d_i \vec{v}_i}{dt} \right).$$

Коэффициент C_D для числа Рейнольдса Re = $\frac{\rho_1 |\vec{v_1} - \vec{v_2}| d_0}{\mu_1}$ согласно модели сопротивления Шиллера–Наумана [18] записывается в виде:

$$C_D = egin{cases} rac{24(1+0.15\,\mathrm{Re}^{0.687})}{\mathrm{Re}}, & \mathrm{Re}\leqslant 1000,\ 0.44, & \mathrm{Re}> 1000; \end{cases}$$

• уравнения энергии фаз

$$\frac{\partial(\alpha_{i}\rho_{i}(e_{i}+K_{i}))}{\partial t} + \operatorname{div}(\alpha_{i}\rho_{i}(e_{i}+K_{i})\vec{v}_{i}) =
= -p\frac{\partial\alpha_{i}}{\partial t} - \operatorname{div}(\alpha_{i}\vec{v}_{i}p) +
+ \operatorname{div}(\alpha_{i}\gamma_{i,eff}(\nabla h_{i})) + K_{ht}(T_{j}-T_{i}),$$
(3)

где e_i — внутренняя энергия; K_i — кинетическая энергия; h_i — энтальпия; T_i — температура; $\gamma_{i,eff}$ — эффективная температуропроводность:

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

в которой $c_{p,i}$, $c_{V,i}$ — удельные теплоемкости при постоянном давлении и объеме; γ_i — температуропроводность.

Для определения коэффициента теплообмена *K_{ht}* используется модель Ранца– Маршалла [19]:

$$K_{ht} = \frac{\kappa_1 \,\mathrm{Nu}}{d_0}, \quad \mathrm{Nu} = 2 + 0.6 \,\mathrm{Re}^{1/2} \,\mathrm{Pr}^{1/3},$$

где κ_1 — теплопроводность воды; Nu, Pr — числа Нуссельта и Прандтля соответственно.

Для уравнения состояния воздуха принята форма Пенга–Робинсона [20]:

$$p = \frac{RT_2}{V_m - b} - \frac{a(T_2)}{V_m(V_m + b) + b(V_m - b)},$$
 (4)

в которой

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

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

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

где T_c , p_c — критические значения температуры и давления для воздуха; V_m — молярный объем; R —

где

универсальная газовая постоянная; ω — ацентрический фактор.

Свойства воды описываются уравнением состояния совершенной жидкости:

$$\rho_1 = p \psi_1 + \rho_{10}, \tag{5}$$

где ρ_{10} , $\psi_1 = m_1/(RT_1)$ — плотность при нормальных условиях и сжимаемость воды соответственно; m_1 — молярная масса воды.

Постановка задачи и анализ результатов

Рассматриваемая цилиндрическая область радиуса y = 3.4 м и длины x = 1.4 м с условиями симметрии на оси Ox и плоскости x = 0 заполнена газом ($0 \le y \le 3.4$ м, $0 \le x < 1$ м) и содержит слой водной пены толщиной 0.4 м ($0 \le y \le 3.4$ м, $1 \le x \le 1.4$ м) с начальным объемным водосодержанием $\alpha_{10} = 0.2$. Толщина пенного слоя выбрана для выполнения условия неотражения волны сжатия от внешней границы пены x = 1.4 м в рассматриваемые временные интервалы. Начальный импульс давления, как и в [11–14], имеет вид:

$$p(x,y) = p_0 + \Delta p e^{-(x^2 + y^2)/a^2},$$
(6)

где $\Delta p = 100$ МПа, $p_0 = 0.1$ МПа, a = 0.15 м.

Граница области, образованной сферой радиуса 0.1 м с центром в точке симметрии (0,0,0), соответствует граничному условию жесткой стенки с целью изоляции центра взрыва для минимизации неустойчивости в численных расчетах.

Численное решение уравнений (1)–(5) проведено с использованием пакета OpenFOAM на основе алгоритма PIMPLE [15]. На первом этапе расчетов производится выбор временного шага в зависимости от числа Куранта. Затем следует второй этап — предиктор, в котором решаются уравнения неразрывности (1), импульса (2) и энергии (3). На этапе корректора уточняются величины давления и компонент скоростей. Циклы предиктора и корректора выполняются до тех пор, пока не достигнута заранее заданная точность решения.

Для тестирования предложенной модели газокапельной смеси, полученной с использованием пакета OpenFOAM, были проведены расчеты воздействия сферического ударного импульса на водную пену для условий экспериментов [9]. В этом исследовании производился сферический взрыв заряда взрывчатого вещества в сухой водной пене с начальным объемным водосодержанием $\alpha_{10} = 0.0083$. В [14] дан сравнительный анализ расчетов по используемой в настоящей работе модели с экспериментальными данными [9], результатами экспериментов по взрывам в пене [21], обобщенными в аналитической форме, показано их удовлетворительное согласование.

Численное решение задачи о взаимодействии воздушного ударного импульса с барьером из водной пены представлено на рис. 1 и 2 в виде полей давления, скоростей и линий тока в указанные моменты времени. Слой водной пены обозначен зеленым цветом. Максимальная амплитуда импульса давления (6), изначально равная 100 МПа, в силу сферичности УВ снижается с течением времени и при подходе к границе пенного слоя (при t = 0.5 мс) составляет ≈ 1 МПа. Число Маха М, характеризующее распределение скоростей на начальной стадии распространения ударного импульса (t = 0.1 мc), оценивается величиной M = 3.5, которая уменьшается до M = 1.5 при воздействии УВ на пенный слой (*t* = 0.5 мс). В процессе взаимодействия воздушной УВ с водной пеной происходит сжатие пены до $\alpha_1 = 0.3$ (t = 3 мс), что приводит к значительному снижению скорости распространения УВ. За счет диссипативных процессов у границы пенного слоя происходит падение амплитуды импульса давления к моменту времени t = 5 мс до 0.16 МПа(рис. 1).

Основной причиной формирования вихревых структур за фронтом УВ является искривление линий тока за счет развития неустойчивости Рихтмайера–Мешкова [22, 23], возникающей в результате изгиба границы газ–пена при ее взаимодействии со сферической УВ.

Вблизи оси симметрии Ox, начиная с t = 1.2 мс формируется область низких давлений, которая расширяется с течением времени. Искривление линий тока в этой зоне приводит к возникновению вихревых зон за фронтом УВ, которые, учитывая осесимметричность задачи, имеют тороидальную форму. Визуализация расчетов вихревых структур представлена на рис. 2. На фрагменте, соответствующем времени t = 2.5 мс, показан сформированный вихрь 1, момент возникновения которого фиксируется при t = 2.1 мс. Вихрь вращается против часовой стрелки с угловой скоростью $\omega_1 \approx 1400$ рад/с и расположен вблизи оси симметрии Ох, что согласуется с расчетами, выполненными методом подвижных лагранжевых сеток [11]. Здесь же показан сформированный в момент времени t = 2.5 мс тороидальный вихрь 2, имеющий угловую скорость $\omega_2 \approx 600$ рад/с, направленную противоположно вихрю 1. К моменту времени t = 3 мс вихрь 2 расширяется и вблизи пенного слоя рождается новый вихрь 3, вращающийся против часовой стрелки с угловой скоростью $\omega_3 \approx 250$ рад/с.



Рис. 1. Распределение полей давления при взаимодействии сферической ударной волны в газе с пенным барьером в моменты времени t = 2, 2.5, 3, 4 и 5 мс соответственно. Слой водной пены обозначен зеленым цветом



Рис. 2. Динамика полей скоростей, линий тока и эволюция основных вихревых зон (1–4) при взаимодействии сферической ударной волны в газе с пенным барьером в моменты времени t = 2, 2.5, 3, 4 и 5 мс соответственно. Объемное водосодержание в пене показано спектром зеленого цвета

Дальнейшее развитие процесса приводит к турбулизации потока за фронтом УВ, что сопровождается возникновением серии небольших вихрей. К моменту времени t = 4 мс вихрь 1 вырождается, а 2 и 3 — ослабевают. При t = 4 мс формируется новый вихрь 4, вращающийся против часовой стрелки с угловой скоростью $\omega_4 \approx 400$ рад/с, который исчезает через 0.5 мс. На стадии завершения исследуемого процесса (t = 5 мс) область интенсивного вихревого течения смещается вверх в направлении движения фронта УВ (сравним моменты времени t = 4 мс и t = 5 мс). При этом вихри 2 и 3 сохраняют устойчивую структуру.

Начиная с t = 4 мс, вблизи оси симметрии Ox, наблюдаются слабые волны давления, меняющие свое направление в процессе переотражения от пенного слоя и плоскости симметрии x = 0 (сравним фрагменты рис. 2 при t = 4 и 5 мс). Значения скоростей и давлений в этой зоне не превышают по амплитуде 100 м/с и 0.11 МПа соответственно, вихреобразование здесь не происходит.

4. Заключение

Проведено численное моделирование процесса взаимодействия воздушного сферического ударного импульса с барьером из водной пены, являющееся продолжением исследований, выполненных в [11-14]. В работе использована модель газожидкостной смеси, учитывающая силы межфазного взаимодействия и теплообменные процессы на контактной межфазной поверхности. Для описания свойств воздуха и воды применяются уравнения состояния Пенга-Робинсона и совершенной жидкости. Численное решение поставленной задачи проведено в двумерном осесимметричном приближении с применением пакета OpenFOAM. Подтверждена достоверность полученных решений сравнением с решениями аналогичной задачи другими численными методами [11] и экспериментальными данными [9]. Анализ результатов численных исследований показал, что увеличение объемного водосодержания в пенном слое при его уплотнении под воздействием ударного импульса приводит к снижению скорости фронта УВ и блокирует ее прохождение вглубь пены. Проведен детальный анализ причин возникновения, развития серии тороидальных вихрей и турбулизации потока в газовой области за фронтом УВ.

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] Britan A., Shapiro H., Liverts M., Chinnayya A., Hadjadj A., Ben-Dor G. Macro-mechanical modelling of blast wave mitigation in foams. Part I: review of available experiments and models // Shock Waves. 2013. Vol. 23, No. 1. P. 5–23. DOI: 10.1007/s00193-012-0417-48
- [2] Британ А.Б., Васильев Е.И., Куликовский В.А. Моделирование процесса ослабления ударной волны экраном из пены // ФГВ. 1994. № 3. С. 135–142. https://www.sibran.ru/upload/iblock/fb5/ fb5e3e5ec365fbcaa2604b935524bf8c.pdf
- [3] Васильев Е.И., Митичкин С.Ю., Тестов В.Г., Хайбо Ху. Динамика давления при ударном нагружении газожидкостных пен // ЖТФ. 1998. Т. 68, № 7. С. 19-23. http://elibrary.lt/resursai/Uzsienio%20leidiniai/ ioffe/ztf/1998/07/ztf_t68v07_04.pdf
- [4] 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
- [5] 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/nonlineareffects-in-bubbly-liquid-with-shock-waves
- [6] 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
- [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 // Прикладная математика и механика. 2019. Т. 83, № 3. С. 468–477. DOI: 10.1134/S0032823519030020
- 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
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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

- [13] 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
- [14] 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
- [15] OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. http://www.openfoam.com
- [16] 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
- [17] 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
- [18] Schiller L., Naumann Z. A Drag Coefficient Correlation // Z. Ver. Deutsch. Ing. 1935. Vol. 77. P. 40–65.

- [19] 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
- [20] 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
- [21] 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/accesscontrol.cgi/2006/060533.pdf
- [22] Meshkov E.E. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave // Fluid Dynamics. 1969. Vol. 4, No. 5. P. 101–104. DOI: 10.1007/BF01015969
- [23] Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // Commun. Pure Appl. Math. 1960. Vol. 13. P. 297–319.
 DOI: 10.1002/cpa.3160130207

ISSN 2658-5782

Multiphase Systems

http://mfs.uimech.org/mfs2019.2.001 DOI:10.21662/mfs2019.2.001

14 (2019), **2**, 74-<mark>81</mark>



Received: 12.09.2019 Accepted: 15.11.2019

Shock waves dynamics and evolution of vortex formation during the interaction of spherical air pulse with aqueous foam layer

Gainullina E.F.

Mavlutov Institute of Mechanics, UFRC RAS, Ufa

The numerical study of the powerful air spherical shock-wave pulse interaction with the protective aqueous foam barrier with the initial liquid volume fraction of 0.2 is carried out in this paper. The foam layer thickness is selected to satisfy the condition of the non-reflection of compression wave from the foam external boundary at the considered time intervals. In studying the wave flows dynamics, we used the assumption of the foam structure destruction into the microdrops suspension behind the strong shock wave front. The two-phase medium is described on the basis of the gas-droplet mixture model, which 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 two-dimensional axisymmetric formulation. The Schiller-Naumann model is used for taking into account the interfacial drag forces. The contact heat transfer influence at the interface between the phases is taken into account by the Ranz-Marshall model. To describe the properties of air and water, the Peng-Robinson and perfect fluid equations of state are used. The numerical implementation of the model is carried out using the OpenFOAM open-source software with the two-step PIMPLE algorithm. The numerical study results are presented as spatial distributions of pressure fields, velocities and streamlines. The significant attenuation of the spherical shock wave intensity during its interaction with the aqueous foam layer has been established. The causes and dynamics of the toroidal vortices series formation in the gas region behind the shock front are investigated. The results reliability is confirmed by comparison with the solutions of the similar problem, found by another numerical method.

Keywords: spherical shock wave, shock impulse, aqueous foam barrier, OpenFOAM package, numerical modeling, vortex flows

References

- [1] Britan A., Shapiro H., Liverts M., Chinnayya A., Hadjadj A., Ben-Dor G. Macro-mechanical modelling of blast wave mitigation in foams. Part I: review of available experiments and models // Shock Waves. 2013. V. 23, No. 1. Pp. 5–23. DOI: 10.1007/s00193-012-0417-48
- [2] Britan A.B., Vasil'ev E.I., Kulikovskii V.A. Modeling the process of shock-wave attenuation by a foam screen // Combust. Explos. Shock Waves. 1994. V. 30, Issue 3. Pp. 389–396. DOI: 10.1007/BF00789435
- [3] Vasil'ev E.I., Mitichkin S.Yu., Testov V.G., Hu Haibo. Numerical simulation and experimental research on the effect of syneresis on the propagation of shock waves in a gas-liquid foam // Technical Physics. 1997. V. 42, No. 11. Pp. 1241–1248. DOI: 10.1134/1.1258855
- [4] 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

- [5] 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. V. 6, No. 8. Pp. 1095–1102. https://waset.org/publications/14192/nonlineareffects-in-bubbly-liquid-with-shock-waves
- [6] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. [The numerical modeling of spherical explosion in the foam] [Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics]. 2016. V. 11, No. 1. Pp. 60–65 (in Russian).
 DOI: 10.21662/uim2016.1.009
- [7] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. [A research of damping properties of aqueous foam under the impact of spherical shock waves] [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, Suppl. 7. Pp. S71–S78. DOI: 10.1134/S0015462819070024
- Del Prete E., Chinnayya A., Domergue L., et al. Blast Wave Mitigation by Dry Aqueous Foams // Shock Waves. 2013. V. 23, No. 1. Pp. 39–53.
 DOI: 10.1007/s00193-012-0400-0
- [10] Bolotnova R.Kh., Agisheva U.O. [Spatial modeling of water foam dynamics with moving Lagrangian grids under shock wave impact] [Numerical methods and Programming]. 2014. No. 3. Pp. 427–440 (in Russian). http://num-meth.srcc.msu.ru/zhurnal/tom_2014/pdf/ v15r138.pdf
- [11] 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
- [12] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. [Investigation of axisymmetric wave flows under interaction of a spherical impact pulse with a barrier of aqueous foam] [Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics]. 2017. V. 12, No. 2. Pp. 238–243 (in Russian). DOI: 10.21662/uim2017.2.036
- [13] Bolotnova R.Kh., Gainullina E.F. Features of the impact of spherical shock impulse on the boundary of gas with aqueous foam [The Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science]. 2018. V. 28, No. 3. Pp. 364–372 (in Russian). DOI: 10.20537/vm180307
- 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
- [15] OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. http://www.openfoam.com

- [16] 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
- [17] 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
- [18] Schiller L., Naumann Z. A Drag Coefficient Correlation // Z. Ver. Deutsch. Ing. 1935. V. 77. Pp. 40–65.
- [19] Ranz W.E., Marshall W.R. Evaporation from Drops // Chem. Eng. Prog. 1952. V. 48, No. 22. Pp. 141–146. http://dns2.asia.edu.tw/~ysho/YSHO-English/1000% 20CE/PDF/Che%20Eng%20Pro48,%20141.pdf
- [20] Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals. 1976. V. 15. Pp. 59–64. DOI: 10.1021/i160057a011
- [21] 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/accesscontrol.cgi/2006/060533.pdf
- [22] Meshkov E.E. Instability of the interface of two gases accelerated by a shock wave // Fluid Dynamics. 1969. V. 4, No. 5. Pp. 101–104. DOI: 10.1007/BF01015969
- [23] Richtmyer R.D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // Commun. Pure Appl. Math. 1960. V. 13. Pp. 297–319. DOI: 10.1002/cpa.3160130207