

Численное моделирование сферического взрыва в пене¹

Болотнова Р.Х.* , Гайнуллина Э.Ф.*,**

* Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

** Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

Проведено численное исследование особенностей процесса распространения сферического взрыва в водной пене с начальным объемным водосодержанием $\alpha_{10} = 0.0083$, соответствующего условиям рассматриваемого эксперимента. Метод решения основан на двухфазной модели газожидкостной смеси в условиях двухтемпературной схемы в одномерном случае сферической симметрии. Численная реализация осуществлена методом сквозного счета с использованием подвижных лагранжевых сеток. Определены амплитуда и ширина начального импульса давления, исходя из величины энергии взрыва, используемой в эксперименте. Проведен сравнительный анализ результатов численного моделирования и натурального эксперимента. Показано, что уплотнение пены в ударной волне приводит к значительному снижению скорости и амплитуды ударной волны.

Ключевые слова: сферический взрыв, двухфазная модель, численное моделирование, водная пена

1. Введение

Актуальность исследования динамики ударных волн (УВ) в газожидкостных средах объясняется широким спектром практических задач: обеспечение пыле- и шумоподавления, пожаро- и взрывобезопасности технологических процессов, предупреждение загрязнения окружающей среды. Эффективность водных пен в качестве защитных барьеров, локализирующих действие взрыва, проявляется в существенном уменьшении амплитуды и скорости распространения в них УВ в силу высокой сжимаемости газожидкостных смесей.

Среди первых работ, в которых исследовались демпфирующие свойства пенных структур, следует отметить [1], в которой экспериментально исследовано прохождение слабых УВ по столбу водной пены. В [1] установлено, что газожидкостные пены эффективно поглощают энергию взрыва, позво-

ляя уменьшить параметры УВ более, чем на порядок в сравнении с газовой средой. В [2] проведено численное моделирование распространения УВ по вертикальному столбу газожидкостной пены на основе газочапельной модели с использованием модифицированной схемы Годунова. В [3] проанализирован процесс затухания УВ в релаксирующих средах с использованием смесевой модели. Численное моделирование взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) в пене и сравнение результатов расчетов сферического взрыва с экспериментальными данными рассмотрено в работе [4]. При этом движение газожидкостной пены также описано на основе смесевой модели с учетом тепловой релаксации фаз и особенностей дисперсной среды. В работах [5, 6] проведено исследование динамических процессов для пространственных задач, связанных с взаимодействием воздушных УВ с барьерами из водной пены. Численное моделирование процесса распространения УВ в водной пене в [5, 6] проведено методом сквозного счета с применением подвижных лагранжевых сеток на основе двухфазной модели газожидкостной смеси. В [6] исследованы режимы формирующихся внутренних течений в процессе переотражения воздушного ударно-волнового импульса от границы с пеной, приводящие к вихре-

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-01-97007-р_поволжье_a), Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ РФ (код проекта НШ-6987.2016.1).

образованию.

В настоящей работе исследованы явления затухания УВ в водных пенах, возникающие в результате мощного взрыва заряда ВВ. Моделирование процесса сферического взрыва ВВ проведено на основе новых, по сравнению с [1], экспериментальных данных E. Del Prete, Chinnayya A., Domergue L., et al [7], причем энергия начального импульса давления рассчитана с учетом мощности заряда ВВ, используемого в экспериментах [7]. Дан сравнительный анализ полученных результатов численного моделирования, экспериментов [7] и результатов по обработке имеющихся экспериментальных данных национальной лаборатории Sandia [7], представленных в аналитической форме.

2. Основные уравнения модели

Для исследования распространения мощного импульса давления в пене была построена математическая модель двухфазной среды в условиях двухтемпературной схемы в односкоростном приближении с равным давлением в фазах в случае сферической симметрии, основанная на положениях механики многофазных сред [8].

Система уравнений в лагранжевых переменных в случае одномерного сферического движения включает законы сохранения массы, импульса и внутренней энергии двухфазной среды [8].

Сохранение массы 1-ой и 2-ой фазы:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial(\rho_1 \alpha_1)}{\partial t} + \frac{\rho_1 \alpha_1}{\rho} \frac{(v-1)v}{x} + \\ + \frac{\rho_1 \alpha_1}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial r} \left(\frac{x}{r}\right)^{v-1} = 0, \\ \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial(\rho_2 \alpha_2)}{\partial t} + \frac{\rho_2 \alpha_2}{\rho} \frac{(v-1)v}{x} + \\ + \frac{\rho_2 \alpha_2}{\rho_0} \frac{\partial v}{\partial r} \left(\frac{x}{r}\right)^{v-1} = 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Сохранение импульса смеси:

$$\rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} = - \left(\frac{x}{r}\right)^{v-1} \frac{\partial p}{\partial r}. \quad (2)$$

Сохранение внутренней энергии для каждой фазы в случае двухтемпературного приближения:

$$\frac{\rho_0 \rho_1}{\rho} \frac{\partial e_1(\rho_1, T_1)}{\partial t} = B, \quad \frac{\rho_0 \rho_2}{\rho} \frac{\partial e_2(\rho_2, T_2)}{\partial t} = B, \quad (3)$$

где $B = -p \left(\frac{x}{r}\right)^{v-1} \frac{\partial v}{\partial r} - p(v-1) \frac{v}{r} \frac{\partial x}{\partial r} \left(\frac{x}{r}\right)^{\frac{(v-1)(v-2)}{2}}$.

Условие равенства давлений фаз $p_1 = p_2 = p$ в дифференциальной форме:

$$\frac{\partial p_1(\rho_1, T_1)}{\partial t} - \frac{\partial p_2(\rho_2, T_2)}{\partial t} = 0, \quad (4)$$

где α_i , ρ_i — объемное содержание и текущая плотность i -й фазы; $\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2$, ρ_0 — средняя и начальная средняя плотность среды соответственно; ρ_{i0} , T_i — начальная плотность и температура i -й фазы; $e_i(\rho_i, T)$, $p_i(\rho_i, T)$ — внутренняя энергия и давление i -й фазы; v — массовая скорость частиц; r , x — лагранжева и эйлерова координаты; $v = 1, 2, 3$ принимается в случае плоской, цилиндрической и сферической симметрии; $i = 1, 2$ — жидкая и газовая фаза соответственно.

В качестве уравнения состояния воды используется [9], в котором давление и внутренняя энергия представлены в виде суммы потенциальной (холодной) и тепловой составляющих (в форме Ми-Грюнайзена):

$$p_1 = p^{(p)} + p^{(T)}, \quad e_1 = e^{(p)} + e^{(T)}, \quad (5)$$

Для описания свойств воздуха принимается уравнение состояния совершенного газа:

$$p = \rho R T = \rho(\gamma - 1) c_V T, \quad e = c_V T, \quad (6)$$

где R — газовая постоянная; $c_V = 717$ Дж/К — удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме; $\gamma = 1.4$ — показатель адиабаты.

3. Описание эксперимента

В настоящей работе моделирование воздействия взрыва проводилось в условиях эксперимента [7], в котором с использованием ВВ PLANP массой ~ 145 г производился сферический взрыв в водной «сухой» пене с объемным содержанием жидкости $\alpha_1 = 0.0083$.

В [7] в центре цилиндрического сосуда объемом 8 м^3 на высоте 1.5 м закреплялось взрывное устройство (рис. 1). ВВ PLANP, помещенное в пластиковый шар диаметром 60 мм (для обеспечения сферической симметрии при распространении УВ), приводилось в действие с помощью детонатора. Датчики, измеряющие давление, были прикреплены к раме таким образом, чтобы отраженные от поверхностей волны не влияли на процесс формирования импульса. Погрешность измерений, обусловленная такой геометрией, не превышала 1% . Полученные в эксперименте осциллограммы давления представлены в [7] в общепринятой системе масштабирования расстояний, использующей шкалу Гопкинсона [10]. Пересчет расстояний из метрической системы в шкалу Гопкинсона производится следующим образом [10]:

$$\tilde{x} = \frac{x}{W^{1/3}} \quad \text{или} \quad \tilde{x} = \frac{x}{E^{1/3}}, \quad W = m\eta, \quad (7)$$

где x — расстояние от центра взрыва (м); W — масса ВВ в тротиловом эквиваленте (кг); m , η — масса

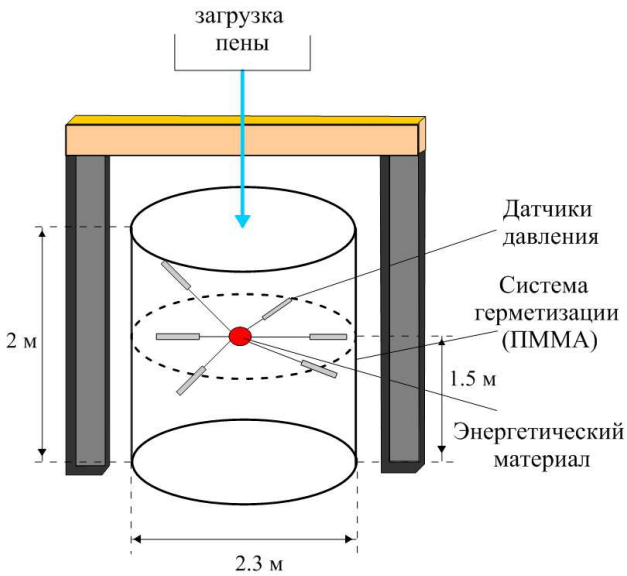


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

заряда (кг) и коэффициент перевода в тротильный эквивалент рассматриваемого ВВ соответственно; E — энергия взрыва (Дж). Для ВВ PLANP, используемого в [7], коэффициент перевода в тротильный эквивалент [11]: $\eta = 1.27$. Отсюда масса заряда ВВ PLANP $m = 0.145$ кг в пересчете на тротильный эквивалент будет равна: $W = 0.18415$ кг, и соответствующая ей энергия взрыва [11] определяется таким образом:

$$E = QW = 7.7 \times 10^5 \text{ Дж}, \quad (8)$$

где $Q = 4184$ кДж/кг — удельная энергия взрывного разложения тринитротолуола — основной компоненты PLANP. Отсюда следует формула для пересчета расстояния в шкалу Гопкинсона, используемую для графического представления результатов численного моделирования для сопоставительного анализа с экспериментальными данными [7]:

$$\tilde{x} = \frac{x}{0.5689} \text{ м/кг}^{1/3}.$$

4. Постановка задачи

В целях изучения динамики УВ в пене моделировалась следующая задача: в центре одномерной области в начальный момент времени задается распределение давления $p(x)$ (см. рис. 2 при $t = 0$), аппроксимируемое гладкой экспоненциальной функцией вида

$$p(x) = p_0 + \Delta p e^{-(x/a)^4}. \quad (9)$$

Суммарная внутренняя энергия начального

импульса в сферической системе координат определяется следующим образом [12]:

$$E = \int_{x^*}^{x_N} 4\pi x^2 \rho e dx, \quad (10)$$

где e — внутренняя энергия смеси, определяемая из условия аддитивности по массе входящих в нее составляющих [8]:

$$\rho e = \rho_1 e_1 \alpha_1 + \rho_2 e_2 \alpha_2. \quad (11)$$

Расчет интеграла энергии взрыва (10) в смеси производился методом Симпсона. Тестовые расчеты показали, что при значениях амплитуды и ширины начального импульса давления, равных соответственно $\Delta p = 350$ МПа и $a = 0.105$ м, расчетная начальная энергия взрыва совпадает с экспериментальным значением (8).

Начальные условия для поставленной задачи соответствуют схеме эксперимента [7]:

$$\begin{aligned} t = 0 : x^* \leq x \leq L : v(0, x) &= 0, \\ p(0, x) &= p(x), \quad p_0 = 0.1 \text{ МПа}, \quad L = 1.6 \text{ м}, \\ T_{10} = T_{20} &= 293 \text{ К}, \\ T_1(0, x) &= T_1(p(0, x)), \\ T_2(0, x) &= T_2(p(0, x)), \\ \rho_{10}(0, x) &= \rho_{10}(p(x), T_1(p(0, x))), \\ \rho_{20}(0, x) &= \rho_{20}(p(x), T_2(p(0, x))), \\ \rho_0 &= \rho_{10} \alpha_{10} + \rho_{20}(1 - \alpha_{10}), \\ \alpha_{10} &= 0.0083, \quad x^* = 0.113 \text{ м}, \quad x_N = 0.4 \text{ м}. \end{aligned} \quad (12)$$

В качестве граничных условий выбраны условия жесткой стенки:

$$x = x^*, \quad x = L : v(t, x^*) = 0, \quad v(t, L) = 0.$$

5. Численная реализация

Система пяти уравнений (1)–(4) с замыкающими соотношениями для давления и внутренней энергии (5)–(6), начальными и граничными условиями (12) представляет собой задачу Коши, которая решалась на явной разностной сетке с использованием линейной и квадратичной искусственных вязкостей Неймана–Рихтмайера [8, 13].

Для удобства численного решения рассматриваемая система уравнений относительно производных по времени от величин $\alpha_1, \rho_1, \rho_2, T_1, T_2$ приводилась к матричному виду. Частные производные скорости $\partial v / \partial r$ и давления $\partial p / \partial r$ по лагранжевой координате r для каждой точки сеточной области $r_j (j = 1, M)$, входящие в правую часть системы, аппроксимировались центрально-разностными соотношениями. В итоге полученная система из 5M

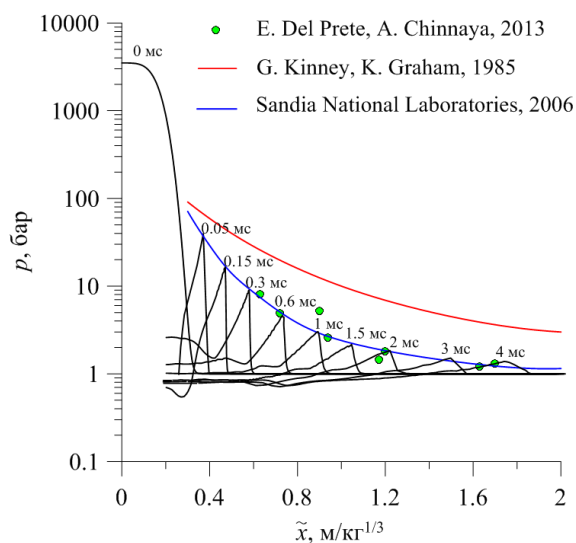


Рис. 2. Зависимость давления $p(\tilde{x})$ в пенной среде от расстояния в шкале Гопкинсона для указанных моментов времени

дифференциально-разностных уравнений на первом этапе расчетов решалась методом Крамера относительно производных от неизвестных величин, и затем на следующем этапе находились основные неизвестные $\alpha_1, \rho_1, \rho_2, T_1, T_2$ путем интегрирования по времени с использованием улучшенного метода Эйлера. Для обеспечения устойчивости решения шаги по пространству и по времени контролировались в соответствии с условием Куранта [8]. Численная реализация модели осуществлена на языке Object Pascal в свободной среде разработки Lazarus [14].

6. Результаты расчетов

В результате численного исследования поставленной задачи получены оценки эффективности демпфирующих свойств водной пены при воздействии на нее мощным зарядом ВВ. В целях тестирования разработанной двухфазной модели водной пены были рассчитаны временные зависимости давления в условиях эксперимента [7] в местоположении датчика, находящегося на расстоянии 0.41 м от точки взрыва, представленные на рис. 3. Как видно из графика, расчетные и экспериментальные профили имеют удовлетворительное согласование как по амплитуде, так и по длительности сформированного импульса давления. В момент времени $t \sim 1500$ мкс в расчетах фиксируется скачок давления, что является следствием переотражения волны разгрузки от границы области инициирования взрыва ВВ, подтверждаемый экспериментальным профилем давления, приведенном на том же рис. 3.

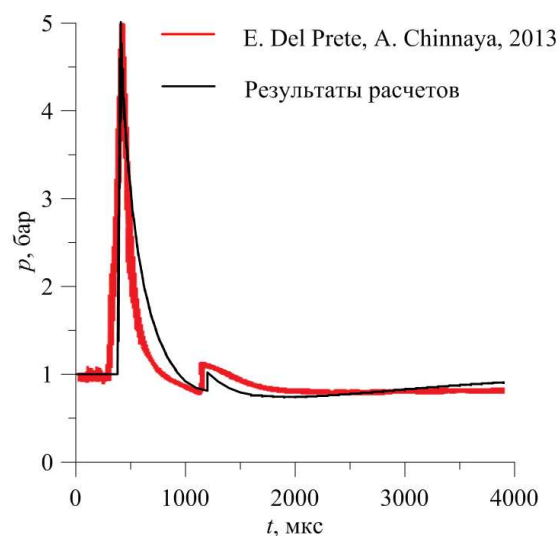


Рис. 3. Зависимость давления от времени в местоположении датчика 0.41 м от точки взрыва

На рис. 2 изображены расчетные профили давления в указанные моменты времени (мс). Здесь же приведены экспериментально фиксируемые пики максимальных давлений [7], обобщенные в аналитической форме результаты имеющихся экспериментальных данных национальной лаборатории Sandia [7] (синяя линия) для пены и данных базы Kinney, Graham [7] (красная линия) для газа. Отмеченный на рис. 3 вторичный пик импульса давления, отраженного от центра симметрии, наблюдается и на рис. 2, начиная с момента времени $t = 0.2$ мс. Расчетные пиковые значения амплитуды давления на рис. 2 имеют некоторое превышение экспериментальных величин по мере удаления от центра взрыва, что становится заметным при $\tilde{x} \geq 1$ м/кг^{1/3} и объясняется неучетом в модели влияния процессов теплообмена между газом и жидкостью.

В ходе вычислительного эксперимента проводился контроль динамики объемного водосодержания пены в процессе прохождения импульса давления. На рис. 4 показаны полученные в расчетах профили объемного содержания жидкости в пене для указанных моментов времени. Процесс уплотнения пены за фронтом УВ приводит к росту объемного содержания воды в пене до $\alpha_1 = 0.058$, что сопровождается уменьшением скорости распространения УВ и снижением ее амплитуды, чем и объясняются демпфирующие способности водной пены.

7. Заключение

Представлены результаты численного моделирования процесса распространения сферической

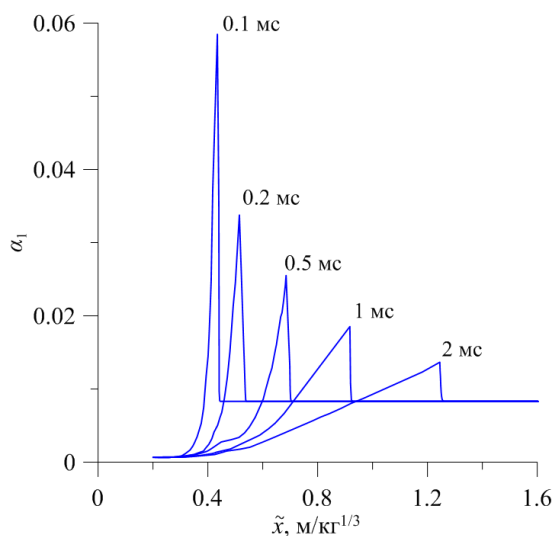


Рис. 4. Зависимость объемного содержания воды в пене $\alpha_1(\tilde{x})$ от расстояния в шкале Гопкинсона для указанных моментов времени

УВ, инициируемой взрывом заряда ВВ в водной пене. Программная реализация рассматриваемого процесса осуществлена на основе разработанной модели водной пены в среде разработки Lazarus. Проанализирована динамика объемного содержания воды в пене в процессе распространения ударной волны. Установлено, что сжатие пены в УВ приводит к ее уплотнению и сопровождается уменьшением скорости распространения УВ. Установлено, что использование пены с начальным водосодержанием $\alpha_{10} = 0.0083$ способно уменьшить амплитуду УВ до 5 раз и снизить ее скорость в 2 раза по сравнению с газовой средой.

Список литературы

- [1] Borisov A.A., Gelfand V.E., Kudinov V.M., Palamarchuk B.I., Stepanov V.V., Timofeev E.I., Khomik S.V. Shock waves in water foams // *Acta Astronautica*. 1978. Vol. 5, No. 11/12. P. 1027–1033.
- [2] Васильев Е.И., Митичкин С.Ю., Тестов В.Г., Хайбо Ху. Численное моделирование и экспериментальное исследование влияния процесса синерезиса на распространение ударных волн в газожидкостной пене // *Журнал технической физики*. 1997. № 11. С. 1–9.
- [3] Вахненко В.А., Кудинов В.М., Паламарчук Б. И. К вопросу о затухании сильных ударных волн в релаксирующих средах // *ФГВ*. 1984. № 1. С. 105–111.
- [4] Ждан С.А. Численное моделирование взрыва заряда ВВ в пене // *ФГВ*. 1990. Т. 26, № 2. С. 103–110.
- [5] Болотнова Р.Х., Агишева У.О. Пространственное моделирование динамики газожидкостной пены на подвижных лагранжевых сетках в условиях ударно-волнового воздействия // *Вычисл. методы и программирование*. 2014. Т. 15, № 3. С. 427–440.
- [6] 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.
- [7] E.Del Prete, Chinnayya A., Domergue L., et al. Blast Wave Mitigation by Dry Aqueous Foams // *Shock Waves*. 2013. Vol. 23, No. 1 P. 39–53.
- [8] Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1. 464 с. Ч. 2. 360 с.
- [9] Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // *Теплофизика высоких температур*. 2011. Т. 49, № 2. С. 310–313.
- [10] Baker W.E. Explosions in Air. University of Texas Press, 1973. 268 p.
- [11] Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы: оценка и предупреждение. М.: Химия, 1991. 432 с.
- [12] Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966. 688 с.
- [13] Neumann J., Richtmyer R. A method for the numerical calculation of hydrodynamical shocks // *Journal of Applied Physics*. 1950. Vol. 21, No. 3. P. 232–237.
- [14] Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф., Коробчинская В.А. Расчет сферического взрыва в газожидкостной смеси // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016619611 // *Официальный бюллетень Реестра программ для ЭВМ*. Москва. Роспатент. 29.06.2016.

The Numerical Modeling of Spherical Explosion in the Foam

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

* Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa

** Ufa State Aviation Technical University, Ufa

The spherical explosion propagation process in aqueous foam with the initial water volume content $\alpha_{10} = 0.0083$ corresponding to the experimental conditions is analyzed numerically. The solution method is based on the one-dimensional two-temperature spherically symmetric model for two-phase gas-liquid mixture. The numerical simulation is built by the shock capturing method and movable Lagrangian grids. The amplitude and the width of the initial pressure pulse are found from the amount of experimental explosive energy. The numerical modeling results are compared to the real experiment. It's shown, that the foam compression in the shock wave leads to the significant decrease in velocity and in amplitude of the shock wave.

Keywords: spherical explosion, two-phase model, numerical modeling, aqueous foam

