

# Исследование осесимметричных волновых течений при взаимодействии сферического ударного импульса с барьером из водной пены<sup>1</sup>

Болотнова Р.Х.<sup>\*</sup>, Гайнуллина Э.Ф.<sup>\*,\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

<sup>\*\*</sup>Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

Решена задача о сферическом взрыве в газовой области при наличии защитного пенного слоя в двумерной осесимметричной постановке с использованием двухфазной модели газожидкостной смеси, включающей законы сохранения массы, импульса и энергии смеси и уравнение динамики объемного содержания фаз. Численная реализация модели проводилась с помощью модификации стандартного решателя `compressibleMultiphaseInterFoam` открытого пакета `OpenFOAM`. Результаты компьютерного моделирования визуализированы с помощью графической платформы `ParaView`.

**Ключевые слова:** сферическая ударная волна, слой водной пены, численное моделирование, пакет `OpenFOAM`

## 1. Введение

Ударные волны, возникающие при взрывах высокой интенсивности, способны вызвать многочисленные разрушения и привести к значительному экологическому и материальному ущербу. Водная пена позволяет существенно снизить интенсивность и скорость распространения ударного импульса по причине ее высокой сжимаемости. Следовательно, моделирование ударно-волновых процессов в газожидкостных структурах является важным и актуальным научным направлением, связанным с проблемами обеспечения взрывобезопасности технологических процессов на промышленных объектах.

Вопросы динамики ударных волн в пузырьковых пенных структурах в одномерном плоском приближении исследовались в [1, 2]. В работах [3, 4] при решении аналогичных задач использовалось двумерное осесимметричное приближение на осно-

ве вычислительных методов с применением подвижных лагранжевых сеток. Численное моделирование сферического взрыва в водной пене, основанное на экспериментах [5], реализовано в [6, 7], при этом достигнута удовлетворительная корреляция экспериментальных данных и численных решений.

В настоящем исследовании с применением программного комплекса `OpenFOAM` [8] решена задача о воздействии импульса давления на газовую область, содержащую барьер из водной пены, и исследованы причины, приводящие к образованию вихревых течений. Проведена верификация пакета `OpenFOAM` путем сопоставления полученных решений с расчетами аналогичной задачи с использованием лагранжева подхода [4].

## 2. Постановка задачи

В качестве расчетной области принимался цилиндр длиной  $x = 1$  м и радиуса  $y = 2$  м, ( $y = 0$  — ось симметрии цилиндра), заполненный газом ( $y = 2$  м,  $x < 0.8$  м) и содержащий слой водной пены толщиной 0.2 м с начальным объемным водосодержанием  $\alpha_{10} = 0.1$  (схема расчетной области показана на рис. 1). Начальный импульс давления,

<sup>1</sup>Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-41-020582-р\_а), АН РБ (договор № 40/10).

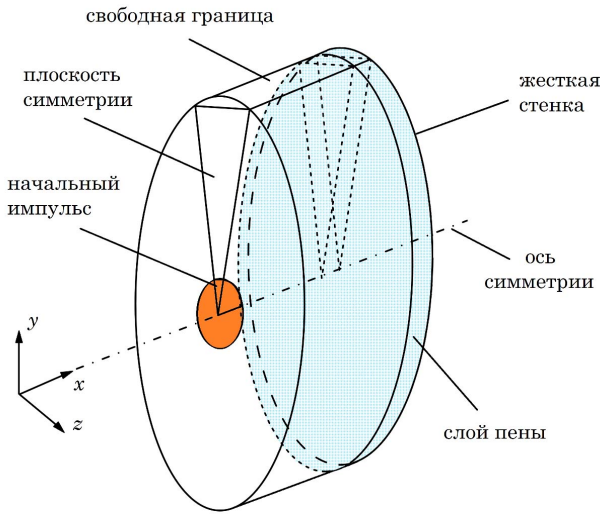


Рис. 1. Схема расчетной области

формирующий ударную волну, задавался в виде:

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

где  $\Delta p = 100$  МПа,  $p_0 = 0.1$  МПа,  $a$  — ширина импульса, равная 0.15 м.

### 3. Основные уравнения модели

Система уравнений двухфазной сжимаемой среды, согласно условиям поставленной задачи, включает законы сохранения массы, импульса, внутренней энергии смеси и уравнение динамики объемного содержания фаз:

- уравнение неразрывности смеси

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (1)$$

$$\rho = \rho_1 \alpha_1 + \rho_2 \alpha_2; \quad (2)$$

- уравнение импульса смеси

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla p; \quad (3)$$

- уравнение внутренней энергии смеси

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} + p \operatorname{div} \vec{v} = 0, \quad (4)$$

$$c_v = \left( \frac{\alpha_1}{c_{v1}} + \frac{\alpha_2}{c_{v2}} \right)^{-1}; \quad (5)$$

- уравнение динамики объемного водосодержания

$$\frac{d\alpha_1}{dt} + \alpha_1 \operatorname{div} \vec{v} = - \left( \frac{\alpha_1 \psi_1}{\rho_1} \right) \frac{dp}{dt}, \quad (6)$$

где  $\alpha_i, \rho_i, \psi_i = 1/(R_i T), c_{vi}$  — объемное содержание, плотность, сжимаемость и изохорная теплоемкость  $i$ -й фазы;  $i = 1, 2$  — обозначения жидкой и газовой фазы;  $t$  — время;  $\vec{v}, p, T$  — скорость, давление, температура смеси.

- уравнения состояния идеальной среды, используемое для описания свойств газа и воды:

$$\rho_1 = p\psi_1 + \rho_{10}, \quad \rho_2 = p\psi_2, \quad (7)$$

где  $\rho_{10}$  — плотность воды при нормальных условиях.

Численное решение системы уравнений (1)–(7) проводилось методом конечных объемов с использованием алгоритма PIMPLE, являющегося комбинацией методов PISO и SIMPLE. В выбранный решатель compressibleMultiphaseInterFoam были внесены некоторые изменения для его соответствия системе уравнений (1)–(7). Блок-схема метода решения представлена на рис. 2, последовательность численных расчетов разделена на несколько этапов.

На первом этапе выполняются пункты 1–3:

1. Задаются начальные условия.
2. Производится выбор временного шага, исходя из предельного значения числа Куранта, и осуществляется контроль окончания расчетов.
3. Решается уравнение объемного водосодержания (6) для получения  $\alpha_1$  на новом временном шаге.

На втором этапе — предикторе — последовательно выполняются действия 4–12 до тех пор, пока в цикле предиктора не достигнуто заданное число итераций или условие сходимости решения:

4. Пересчитываются плотность  $\rho$  (2) и теплоемкость смеси  $c_v$  (5) с учетом новых значений  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ .
5. Решается уравнение неразрывности (1) для получения нового значения плотности смеси  $\rho$ .
6. Решается уравнение импульса (3) для получения новых значений компонент вектора скорости смеси  $\vec{v}$ .
7. Решается уравнение энергии (4) для получения нового значения температуры смеси  $T$ .
8. Рассчитываются текущие плотности воды  $\rho_1$  и газа  $\rho_2$  по уравнениям состояния (7).

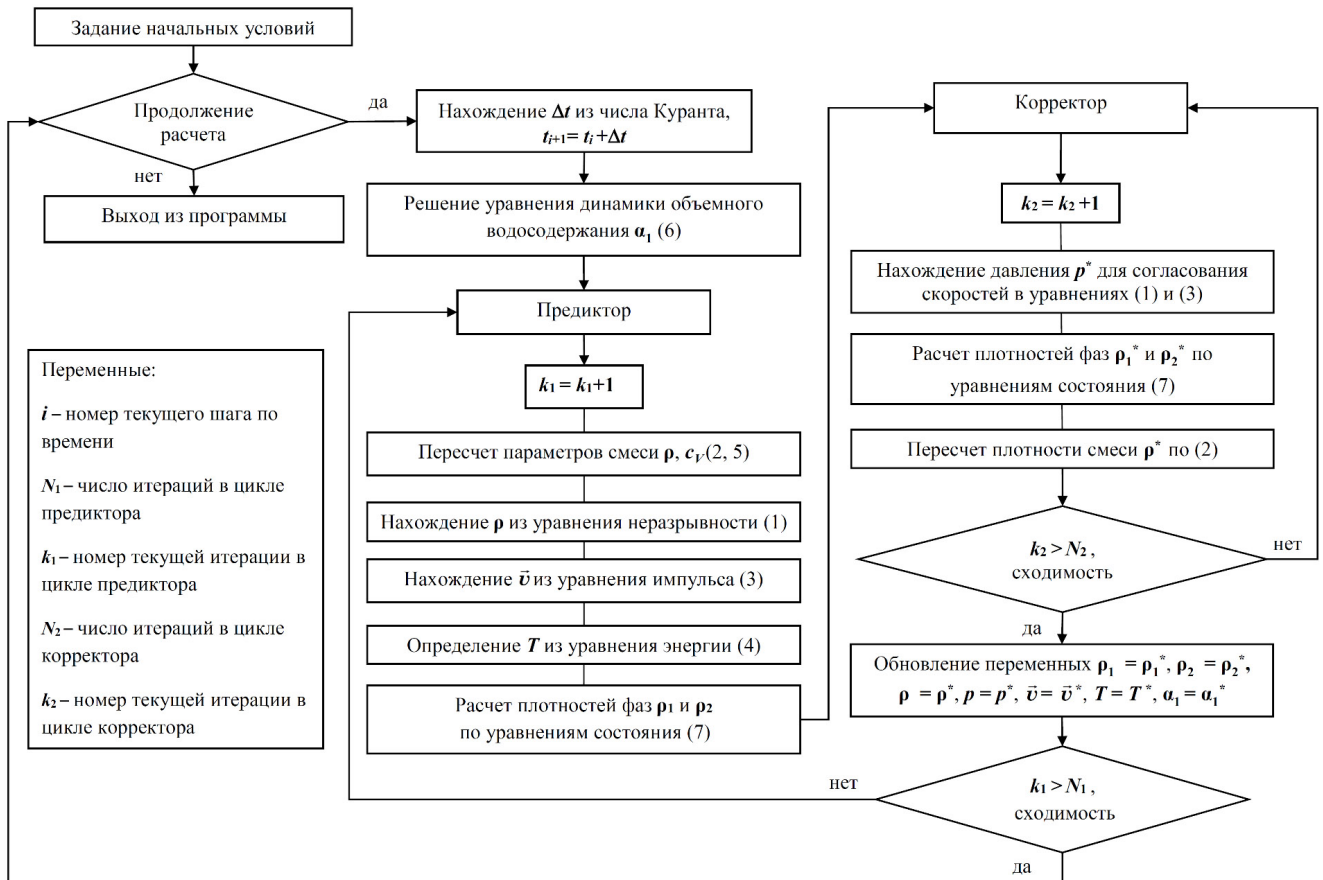


Рис. 2. Блок-схема метода решения задачи с использованием пакета OpenFOAM

Третий этап — корректор — является частью второго этапа и включает в себя последовательность действий 9–11, которые выполняются пока в цикле корректора не достигнуто заданное число итераций или условие сходимости решения:

9. С целью согласования компонент вектора скорости, полученных при решении уравнения импульса (3) и уравнения неразрывности (1), истинные значения давления  $p$  и скорости  $\vec{v}$  представляются в виде суммы их текущих значений  $p^*$ ,  $\vec{v}^*$  и поправок  $p'$ ,  $\vec{v}'$ :

$$p = p^* + p', \quad \vec{v} = \vec{v}^* + \vec{v}'. \quad (8)$$

Далее решается уравнение импульса (3) для истинных значений  $p$  и  $\vec{v}$ , представленных в форме (8), и, пренебрегая членами малого порядка, находится зависимость поправки вектора скорости  $\vec{v}'$  от поправки к давлению  $p'$ :  $\vec{v}' = f(p')$ , которая подставляется в уравнение неразрывности (1) для нахождения поправки к давлению  $p'$ , с помощью которой находят  $\vec{v}'$  и истинные значения давления и скорости из (8).

10. Производится расчет текущих плотностей воды  $\rho_1$  и газа  $\rho_2$  по уравнениям состояния (7).
11. Пересчитываются плотности смеси  $\rho$  (2) с учетом новых значений  $\rho_1$  и  $\rho_2$ .
12. Осуществляется присвоение переменным их новых значений, полученных в ходе расчетов 3–11, и происходит возвращение к пункту 2.

#### 4. Результаты расчетов

Результаты численного моделирования процесса взаимодействия воздушного ударного импульса с барьером из водной пены представлены на рис. 3 в виде распределения давлений, векторных полей скоростей и линий тока в момент времени  $t = 1.2$  мс. Существенное снижение скорости фронта ударной волны в пене блокирует прохождение ударной волны вглубь пены и тем самым меняет движение волнового импульса вдоль направления границы газа с пенным слоем. Максимальное значение локального импульса давления в приграничной

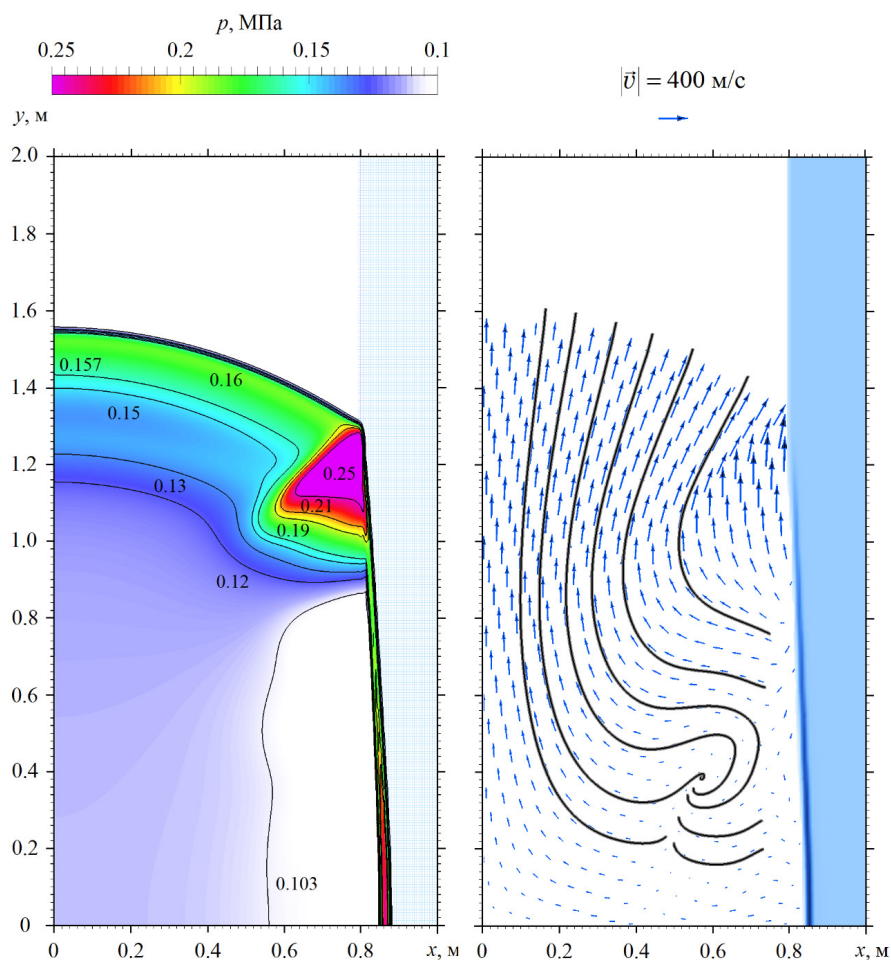


Рис. 3. Распределение полей давления, скорости и линий тока при распространении сферической ударной волны в газе с пенным барьером в момент времени  $t = 1.2$  мс

зоне газ–пена в рассматриваемый момент времени  $t = 1.2$  мс составляет 0.25 МПа. Взаимодействие фронта ударного импульса и волны, отраженной от границы с пенной преградой, приводит к пространственной неоднородности распределения давлений и скоростей в газовой области, что сопровождается образованием вихревой зоны как следствие развития неустойчивости Рихтмайера–Мешкова [9]. На рис. 3 можно наблюдать сформированный в газовой области тороидальный вихрь (учитывая осесимметричную постановку задачи), раскручивающийся против часовой стрелки.

## 5. Заключение

В двумерной осесимметричной постановке решена задача воздействия сферического ударно-волнового импульса на слой водной пены с начальным объемным водосодержанием  $\alpha_1 = 0.1$ . Численное моделирование про-

ведено с использованием стандартного решателя `compressibleMultiphaseInterFoam` пакета OpenFOAM, модифицированного в соответствии с условиями поставленной задачи. Анализ результатов расчетов показал, что «перенаправление» ударного импульса вдоль границы пенной преграды приводит к усложнению волновой картины течения в газе. Этот процесс блокирует прохождение ударной волны вглубь пены и сопровождается формированием в газе тороидального вихря. Расчеты с использованием пакета OpenFOAM показали удовлетворительное согласование с результатами, полученными при решении аналогичной задачи в работе [4] методом подвижных лагранжевых сеток.

## 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.
- [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.
- [3] Болотнова Р.Х., Агишева У.О. Пространственное моделирование динамики газожидкостной пены на подвижных лагранжевых сетках в условиях ударно-волнового воздействия // Вычислительные методы и программирование. 2014. № 3. С. 427–440.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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.
- [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.
- [8] OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. URL: <http://www.openfoam.com>.
- [9] Мешков Е.Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. № 5. С. 151–158.

## Investigation of axisymmetric wave flows under interaction of a spherical impact pulse with a barrier of aqueous foam

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

\*Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa

\*\*Ufa State Aviation Technical University, Ufa

The problem of spherical explosion in the gas region with a protective foam layer is solved in a two-dimensional axisymmetric formulation using a two-phase model of a gas-liquid mixture that includes the laws of conservation of mass, momentum and energy of the mixture and the equation for the dynamics of the volume content of phases. The numerical implementation of the model was carried out by modifying the standard solver of the compressibleMultiphaseInterFoam of the open package OpenFOAM. The results of computer modeling are visualized using the ParaView graphical platform.

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

