

## Анализ влияния синерезиса и реологических свойств водной пены на снижение интенсивности ударного воздействия<sup>1</sup>

Болотнова Р.Х., Гайнуллина Э.Ф.

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

Теоретическое и экспериментальное изучение поведения водной пены под ударным воздействием важно с точки зрения поиска эффективных решений экологических и промышленных задач по обеспечению взрывобезопасности технологических процессов.

Факторы, оказывающие влияние на способность пенных структур ослаблять интенсивность ударных волн, проанализированы в [1], [2].

Настоящая работа является продолжением исследований [3]–[6] по изучению демпфирующих свойств водной пены в условиях ударного нагружения. Для исследования эволюции ударной волны в водной пене разработана однодавленная, двухскоростная, двухтемпературная модель газок капельной смеси, включающая законы сохранения массы, импульса и внутренней энергии для каждой фазы [7] с учетом динамической вязкости, сил межфазного сопротивления Шиллера-Наумана, контактного межфазного теплообмена Ранца-Маршалла, вязко-упругости и процессов синерезиса. Термодинамические свойства газовой и водной фаз описывались реалистическими уравнениями состояния в форме Пенга-Робинсона [8] и Ми-Грюнайзена [9] соответственно. Численная реализация предложенной модели выполнена методом контрольных объемов в открытом программном комплексе OpenFOAM [10].

Динамика распространения ударной волны в водной пене, инициированной мощным взрывом, исследовалась в соответствии с условиями эксперимента [11], в котором в центре цилиндрического сосуда, заполненного сухой водной пеной, производился взрыв заряда ВВ. Осциллограммы давления в проходящей ударной волне регистрировались датчиками, установленными на различных высотах и расстояниях от центра взрыва.

Результаты численных исследований показали, что при прохождении сквозь водную пену интенсивность и скорость ударной волны значительно снижаются за счет действия сил межфазного сопротивления и сферической симметрии исследуемого процесса.

Учет в модели явления осаждения пены под действием гравитационных сил (синерезиса),

приводящего к снижению водосодержания в верхних слоях пены, сопровождается уменьшением влияния диссипативных процессов в этой зоне и усиливает амплитуду ударной волны. Сравнительный анализ проведенных численных исследований с учетом синерезиса показал наилучшее согласование с экспериментальными данными [11] по сравнению с результатами, полученными с изначально равномерным распределением водосодержания в пене.

### Список литературы:

- [1] Britan A., Shapiro H., Liverts M., Ben-Dor G., Chinnayya A., Hadjadj A. Macro-mechanical modeling of blast wave mitigation in foams. Part I: review of available experiments and models // Shock Waves. 2013. Vol. 23. No.1. P. 5–23.
- [2] Vasil'ev E.I., Mitichkin S.Yu., Testov V.G., Haibo Hu. Pressure dynamics during shock loading of aqueous foams // Technical Physics. 1998. Vol. 43.No. 7.P. 761–765.
- [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.
- [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.
- [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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Peng D.Y., Robinson D.B. A new two-constant equation of state // Industrial and Engineering Chemistry: Fundamentals. 1976. Vol. 15. P. 59–64.
- [9] Нигматулин Р.И., Болотнова Р.Х. Широкодиапазонное уравнение состояния воды и пара. Упрощенная форма // ТВТ. 2011. Т. 49. № 2. С. 310–313.
- [10] OpenFOAM. The Open Source Computational Fluid Dynamics (CFD) Toolbox. URL: <http://www.openfoam.com>.
- [11] 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.

<sup>1</sup>Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-90013