

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ НА ПУЗЫРЬКОВУЮ СРЕДУ\*

К. А. Авдеев<sup>1</sup>, В. С. Аксенов<sup>2</sup>, А. А. Борисов<sup>3</sup>, Р. Р. Тухватуллина<sup>4</sup>, С. М. Фролов<sup>5</sup>,  
Ф. С. Фролов<sup>6</sup>

**Аннотация:** На основе системы уравнений двухфазного сжимаемого вязкого течения проведено двумерное численное моделирование проникновения ударной волны в воду с пузырьками воздуха и ее последующего распространения в пузырьковой жидкости в условиях, имитирующих условия экспериментов четырех групп авторов. И в расчетах, и в экспериментах объемное газосодержание воды изменялось в пределах от 0,5% до 19% при диаметре воздушных пузырьков 2,0–2,5 мм, а скорость ударной волны в пузырьковой жидкости изменялась в пределах от 40 до 800 м/с. Проведенные расчеты показали, что используемая физико-математическая модель двухфазного течения в целом правильно описывает динамику взаимодействия ударной волны с пузырьковой средой.

**Ключевые слова:** пузырьковая жидкость; ударная волна; ударная труба; численное моделирование

Эксперименты авторов выполнены с участием В. А. Сметанюка и И. О. Шамшина. Фамилии в списке авторов статьи перечислены в алфавитном порядке.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.609.21.0001 (идентификатор контракта RFMEFI57914X0038) «Разработка технологии создания гидрореактивной тяги в водометных двигателях высокоскоростных водных транспортных средств и создание стендового демонстрационного образца гидрореактивного импульсно-детонационного двигателя» в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы».

<sup>1</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, kaavdeev@mail.ru

<sup>2</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», v.aksenov@mail.ru

<sup>3</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, borisov@chph.ras.ru

<sup>4</sup> Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, tukhvatullinarr@gmail.com

<sup>5</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

<sup>6</sup> Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

## Литература

1. Куликов С. В., Храмкин М. Ф. Водометные движители (теория и расчет). — Л.: Судостроение, 1980. 312 с.
2. Зельдович Я. Б. К теории распространения детонации в газообразных системах // ЖЭТФ, 1940. Т. 10. № 5. С. 542–568.
3. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. Ч. I. 467 с.
4. Radvugin Yu. B., Posvyanskii V. S., Frolov S. M. Stability of 2D two-phase reactive flows // J. Phys. IV France, 2002. No. 12. P. 437–444.
5. Лидский Б. В., Посвянский В. С., Семенов И. В., Тухватулина Р. Р., Фролов С. М. Корректность смешанной эволюционно-краевой задачи и ее дискретного аналога для многофазных течений // Горение и взрыв, 2013. Вып. 6. С. 137–144.
6. Авдеев К. А., Аксенов В. С., Борисов А. А., Тухватулина Р. Р., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Численное моделирование передачи импульса от ударной волны к пузырьковой среде // Хим. физика, 2015 (в печати). Т. 34. № 5.
7. Тухватулина Р. Р. Исследование корректности задачи Коши для двухскоростного вязкого двухфазного течения (жидкость–газ) // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. № 2. С. 38–44.
8. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. — М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.
9. Mori Y., Hijikata K., Komine A. Propagation of pressure waves in two-phase flow // Int. J. Multiphase Flow, 1975. Vol. 2. P. 139–152.
10. Сычев А. И. Сильные ударные волны в пузырьковых средах // ЖТФ, 2010. Т. 80. Вып. 6. С. 31–35.
11. Накоряков В. Е., Покусаев Б. Г., Шрейбер И. Р., Кузнецов В. В., Малых Н. В. Экспериментальное исследование ударных волн в жидкости с пузырьками газа // Волновые процессы в двухфазных системах / Под. ред. С. С. Кутателадзе. — Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1975. С. 54–97.
12. Kalra S. P., Zvirin Y. Shock wave-induced bubble motion // Int. J. Multiphase Flow, 1981. Vol. 7. P. 115–127.

Поступила в редакцию 01.11.14