

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ЖИДКОСТИ, СОДЕРЖАЩЕЙ ИНЕРТНЫЕ И РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫЕ ГАЗОВЫЕ ПУЗЫРЬКИ*

Р. Р. Тухватуллина¹, С. М. Фролов²

Аннотация: Предложена физико-математическая модель, описывающая двухфазное двухскоростное течение инертной жидкости с инертными или реакционноспособными газовыми пузырьками. Показано, что на основе предложенной модели можно получить решения с ударной волной (УВ) с осциллирующей структурой, а также уединенную сверхзвуковую самоподдерживающуюся волну пузырьковой детонации. Проведено сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными по скорости и структуре ударных и детонационных волн, распространяющихся в жидкости с пузырьками азота или ацетилено-кислородной смеси.

Ключевые слова: пузырьковая среда; реакционноспособный газ; пузырьковая детонация; ударная волна; двухфазное течение

Литература

1. Фролов С. М., Аксенов В. С., Фролов Ф. С., Авдеев К. А. 2013. Водометный импульсный детонационный двигатель (варианты) и способы создания гидрореактивной тяги. Заявка РСТ/RU 2013/001148 от 23.12.2013. <http://www.idgcenter.ru/patentRST-RU2013-001148.htm>.
2. Авдеев К. А., Аксенов В. С., Борисов А. А., Тухватуллина Р. Р., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Численное моделирование передачи импульса от ударной волны к пузырьковой среде // Хим. физика, 2015. Т. 34. № 5. С. 34–46.
3. Noordzij L. Shock waves in bubble–liquid mixture // Phys. Commun. Amst., 1971. Vol. 3. No. 1. P. 51.
4. Burdukov A. P., Kuznetsov V. V., Kutateladze S. S., Nakoryakov V. E., Pokusaev B. G., Shreiber I. R. Shock wave in a gas–liquid medium // J. Appl. Mech. Tech. Phy., 1973. Vol. 14. No. 3. P. 349–352.
5. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Козарко С. М., Козарко Б. С. Исследование волн сжатия в смеси жидкости с пузырьками газа // Докл. АН СССР, 1973. Т. 213. № 5. С. 1043–1064.
6. Mori Y., Hijikata K., Komine A. Propagation of pressure waves in two-phase flow // Int. J. Multiphas. Flow, 1975. Vol. 2. No. 2. P. 139–152.
7. 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: сб. статей / Под ред. С. С. Кутателадзе. — Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР, 1975. С. 54–97.
8. Padmanabhan M. Shock wave formation in flowing bubbly mixtures by steepening of pressure waves // Int. J. Multiphas. Flow, 1978. Vol. 4. P. 81–88.
9. Borisov A. A., Gelfand B. E., Timofeev E. I. Shock waves in liquids containing gas bubbles // Int. J. Multiphas. Flow, 1983. Vol. 9. No. 5. P. 531–543.
10. Beylich A. E., Gülhan A. On the structure of nonlinear waves in liquids with gas bubbles // Phys. Fluids A Fluid. Dyn., 1990. Vol. 2. No. 8. P. 1412–1428.
11. Kameda M., Matsumoto Y. Shock waves in a liquid containing small gas bubbles // Phys. Fluids, 1996. Vol. 8. No. 2. P. 322–335.
12. Kameda M., Shimaura N., Higashino F., Matsumoto Y. Shock waves in a uniform bubbly flow // Phys. Fluids, 1998. Vol. 10. No. 10. P. 2661–2668.
13. Сычев А. И. Сильные ударные волны в пузырьковых средах // ЖТФ, 2010. Т. 80. № 6. С. 31–35.
14. Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Борисов А. А., Фролов С. М., Фролов Ф. С., Шамишин И. О. Исследование передачи количества движения от ударной волны к пузырьковой жидкости // Хим. физика, 2015. Т. 34. № 11. С. 27–32.
15. Hasegawa T., Fujiwara T. Detonation oxyhydrogen bubbled liquids // 19th Symposium (International) on Combustion Proceedings. — Elsevier, 1982. P. 675–683.
16. Сычёв А. И. Воспламенение системы жидкость – пузырьки газа ударной волной // ФГВ, 1985. Т. 21. № 2. С. 130–134.
17. Сычев А. И. Волна детонации в системе жидкость – пузырьки газа // ФГВ, 1985. Т. 21. № 3. С. 103–110.
18. Сычев А. Н., Пинаев А. В. Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ, 1986. № 1. С. 133–138.

*Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.609.21.0001 (идентификатор контракта RFMEFI60914X0001) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант 16-29-01065 офи-м).

¹Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, tukhvattullinarr@gmail.com

²Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, smfrol@chph.ras.ru

19. Пинаев А. В., Сычев А. И. Структура и свойства детонации в системах жидкость – пузырьки газа // ФГВ, 1986. Т. 22. № 3. С. 109–118.
20. Пинаев А. В., Сычев А. И. Влияние физико-химических свойств газа и жидкости на параметры и условия существования волны детонации в системах жидкость – пузырьки газа // ФГВ, 1987. Т. 23. № 6. С. 76–84.
21. Beylich A. E., Gülhan A. Waves in reactive bubbly liquids // Adiabatic waves in liquid–vapor systems. — Berlin–Heidelberg: Springer, 1990. P. 39–48.
22. Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Борисов А. А., Садыков И. А., Фролов С. М., Фролов Ф. С., Шамшин И. О. Феноменология процесса распространения ударной волны в воде с пузырьками реакционноспособного газа // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 4. С. 64–82.
23. Красный Ю. П., Михо В. В. Самоподдерживающаяся нелинейная волна детонации в жидкости с пузырьками горючего газа // ФГВ, 1989. Т. 25. № 2. С. 75–81.
24. Шагапов В. Ш., Вахитова Н. К. Волны в пузырьковой системе при наличии химических реакций в газовой фазе // ФГВ, 1989. Т. 25. № 6. С. 14–22.
25. Троцюк А. В., Фомин П. А. Модель пузырьковой детонации // ФГВ, 1992. Т. 28. № 4. С. 129–136.
26. Шагапов В. Ш., Абдрашитов Д. В. Структура волн детонации в пузырьковой жидкости // ФГВ, 1992. Т. 28. № 6. С. 89–96.
27. Kedrinskii V. K. The Iordansky – Kogarko – van Wijngaarden model: Shock and rarefaction wave interactions in bubbly media // Appl. Sci. Res., 1997. Vol. 58. P. 115–130.
28. Авдеев К. А., Аксёнов В. С., Борисов А. А., Севастополева Д. Г., Тухватуллина Р. Р., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Ударные волны в воде с пузырьками реакционноспособного газа: расчет // Горение и взрыв, 2016. Т. 9. № 4. С. 47–63.
29. Иорданский С. В. Об уравнениях движения жидкости, содержащей пузырьки газа // ПМТФ, 1960. Т. 3. С. 102–110.
30. Когарко Б. С. Об одной модели кавитирующей жидкости // Докл. АН СССР, 1961. Т. 137. № 6. С. 1331–1333.
31. Wijngaarden V. L. On equations of motion for mixtures of liquid and gas bubbles // J. Fluid Mech., 1968. Vol. 33. P. 465.
32. Нугматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Часть I. — М.: Наука, 1987. 464 с.
33. Stuhmiller J. H. The influence of interfacial pressure forces on the character of two-phase flow model equations // Int. J. Multiphas. Flow, 1977. Vol. 3. No. 6. P. 551–560.
34. Tikhvatullina R. R., Frolov S. M. Well-posed Euler model of shock and detonation induced two-phase flow in bubbly liquid // Progress in detonation physics / Eds. S. M. Frolov, G. D. Roy. — Moscow: TORUS PRESS, 2016. P. 106–120.
35. Вильямс Ф. А. Теория горения / Пер с англ. — М.: Наука, 1971. 616 с. (Williams F. A. Combustion theory. — Addison-Wesley, 1985. 680 p.)
36. Haberman W. L., Morton R. K. An experimental investigation of the drag and shape of air bubbles rising in various liquids. Washington, DC, USA, 1953. Technical Report No. DTMB-802.
37. Smith G. P., Golden D. M., Frenklach M., Moriarty N. W., Eiteneer B., Goldenberg M., Bowman C. T., Hanson R. K., Song S., Gardiner W. C., Jr., Lissianski V. V., Qin Z. GRI-Mech 3.0, 2000. http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/.
38. Goodwin D. G., Moffat H. K., Speth R. L. Cantera: An object-oriented software toolkit for chemical kinetics, thermodynamics, and transport processes. Version 2.2.1, 2016. <http://www.cantera.org>.
39. Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е. Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. — Новосибирск: Наука, 1984. 301 с.

Поступила в редакцию 14.02.17