

УДАРНЫЕ ВОЛНЫ В ВОДЕ С ПУЗЫРЬКАМИ РЕАКЦИОННОСПОСОБНОГО ГАЗА: РАСЧЕТ*

К. А. Авдеев¹, В. С. Аксёнов², А. А. Борисов³, Д. Г. Севастополева⁴,
Р. Р. Тухватуллина⁵, С. М. Фролов⁶, Ф. С. Фролов⁷

Аннотация: На основе уравнений двухфазного сжимаемого вязкого реагирующего течения проведено численное исследование проникновения ударной волны (УВ) из газа в воду с пузырьками реакционноспособного газа (стехиометрической ацетиленокислородной смеси), равномерно распределенными по объему жидкости. Показано, что в такой пузырьковой жидкости может распространяться стационарный сверхзвуковой самоподдерживающийся фронт реакции с быстрым и полным выгоранием горючего в лидирующей УВ. Такой фронт реакции можно трактовать как детонационноподобный или как «пузырьковую детонацию». Проведено сравнение расчетной и измеренной скоростей волны пузырьковой детонации в диапазоне начальных газосодержаний от 2% до 6%. Получено удовлетворительное качественное и количественное согласие результатов. Численно исследована структура волн пузырьковой детонации. Показано, что в таких волнах газосодержание за лидирующим фронтом оказывается приблизительно в 3–4 раза больше, чем в волнах давления, распространяющихся в воде с пузырьками воздуха при прочих равных начальных условиях. Волна пузырьковой детонации может формироваться после проникновения УВ на неболь-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному контракту № 14.609.21.0001 (идентификатор контракта RFMEFI60914X0001) «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». Фамилии в списке авторов статьи перечислены в алфавитном порядке.

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

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

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

⁴ Центр импульсно-детонационного горения; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», dinasevastopoleva@icloud.com

⁵ Центр импульсно-детонационного горения, tukhvatullinart@gmail.com

⁶ Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», smfrol@chph.ras.ru

⁷ Центр импульсно-детонационного горения; Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, f.frolov@chph.ru

шую (~ 300 мм) глубину в столб пузырьковой жидкости. Предложенная модель может быть использована для поиска условий достижения наибольшей эффективности передачи количества движения от волн давления к пузырьковой жидкости в перспективных импульсно-детонационных водометных движителях.

Ключевые слова: пузырьковая среда; реакционноспособный газ; ударная волна; гидроударная труба; реагирующее двухфазное течение

Литература

1. *Фролов С. М., Фролов Ф. С., Аксенов В. С., Авдеев К. А.* Водометный импульсный детонационный двигатель (варианты) и способ создания гидрореактивной тяги. Заявка РСТ/RU2013/001148 от 23.12.2013. <http://www.idgcenter.ru/patentPCT-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 // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. № 2. С. 57–67.
3. *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.
4. *Авдеев К. А., Аксенов В. С., Борисов А. А., Фролов С. М., Фролов Ф. С., Шагин И. О.* Исследование передачи количества движения от ударной волны к пузырьковой жидкости // Хим. физика, 2015. Т. 34. № 11. С. 27–32.
5. *Hasegawa T., Fujiwara T.* Detonation oxyhydrogen bubbled liquids // 19th Symposium (International) on Combustion Proceedings. Hafia, 1982.
6. *Сычев А. И.* Воспламенение системы жидкость – пузырьки газа ударной волной // Физика горения и взрыва, 1985. Т. 21. № 2. С. 130–134.
7. *Сычев А. И.* Волна детонации в системе жидкость – пузырьки газа // Физика горения и взрыва, 1985. Т. 21. № 3. С. 103–110.
8. *Сычев А. И., Пинаев А. В.* Самоподдерживающаяся детонация в жидкостях с пузырьками взрывчатого газа // ПМТФ, 1986. № 1. С. 133–138.
9. *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 // Физика горения и взрыва, 1987. Т. 23. № 6. С. 76–84.
10. *Шагапов В. Ш., Вахитова Н. К.* Волны в пузырьковой системе при наличии химической реакции в газовой фазе // Физика горения и взрыва, 1989. № 6. С. 14–22.
11. *Троцюк А. В., Фомин П. А.* Модель пузырьковой детонации // Физика горения и взрыва, 1992. Т. 28. № 4. С. 129–136.
12. *Пинаев А. В., Кочетков И. И.* Пузырьковая детонация – самоподдерживающаяся уединенная волна с энергосвободением // Физика горения и взрыва, 2007. Т. 43. № 6. С. 104–111.
13. *Шагапов В. Ш., Абдрашитов Д. В.* Структура волн детонации в пузырьковой жидкости // Физика горения и взрыва, 1992. № 6. С. 89–96.

14. *Frolov S. M., Basevich V. Ya., Neuhaus M. G., Tatshl R.* A joint velocity-scalar PDF method for modeling premixed and nonpremixed combustion // Advanced computation and analysis of combustion / Eds. G. D. Roy, S. M. Frolov, P. Givi. — Moscow: ENAS Publ., 1997. P. 537–561.
15. *Patankar S. V., Spalding D. B.* A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows // Int. J. Heat Mass Transfer, 1972. Vol. 15. No. 10. P. 1510–1520.
16. *Кедринский В. К.* Гидродинамика взрыва: модели и эксперимент. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. 435 с.
17. *Кутателадзе С. С., Накоряков В. Е.* Тепломассообмен и волны в газожидкостных системах. — Новосибирск: Наука, 1984. 302 с.

Поступила в редакцию 18.12.15