

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕНЕРАЦИИ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ УДАРНЫХ ВОЛН И ВОЛН СЖАТИЯ В ПУЗЫРЬКОВЫХ СРЕДАХ

С. А. Губин<sup>1</sup>, А. М. Сверчков<sup>2</sup>, С. И. Сумской<sup>3</sup>

**Аннотация:** Предложены модель и численный метод для расчета распространения ударных волн / волн сжатия в пузырьковой среде в протяженных трубопроводных системах. Модель рассматривает процесс в одномерном приближении, исходя из механического, теплового, скоростного и фазового равновесия системы «паровые пузырьки – жидкость». Численная реализация предложенной модели осуществлялась с использованием подхода С. К. Годунова. Модель с хорошей точностью воспроизводит имеющиеся экспериментальные данные по структуре и параметрам циркулирующих волн в сплошной/пузырьковой среде. Показана возможность генерации ударных волн в потоках с переменными высотными отметками при распространении в них ударных волн / волн сжатия в случае появления кавитации и последующего схлопывания кавитационных зон. Данный эффект можно рассматривать как локальный гидроудар, при «классическом» гидроударе поток тормозится на закрытых задвижках. Расчетным путем показано, что схлопывание кавитационных зон с генерацией волн давления приводят к усилению нагрузок на трубопровод: возникающие давления в 1,5 раза больше по сравнению с «классическим» гидроударом.

**Ключевые слова:** ударные волны; волны сжатия; пузырьковая среда; гидроудар; кавитация; метод С. К. Годунова

DOI: 10.30826/CE21140106

### Литература

1. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Козарко Б. С., Козарко С. М. Исследование волн сжатия в смеси жидкости с пузырьками газа // Докл. Акад. наук СССР, 1973. Т. 213. № 5. С. 1043.
2. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Козарко С. М., Симанков С. М., Тимофеев Е. В. Исследование разрушения пузырьков газа в жидкости ударными волнами // Известия Академии наук СССР. Механика жидкости и газа, 1975. Т. 4. С. 51–56.
3. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Нигматулин Р. И., Тимофеев Е. И. Влияние плотности газа на дробление пузырьков ударными волнами // Докл. Акад. наук СССР, 1977. Т. 235. С. 292–294.
4. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Тимофеев Е. И. Отражение плоских ударных волн от твердой стенки в системе пузырьки газа – жидкость // Механика жидкости и газа, 1978. Т. 2. С. 174.
5. Гельфанд Б. Е., Степанов В. В., Тимофеев Е. И., Цыганов С. А. Усиление ударных волн в неравновесной системе жидкость – пузырьки растворяющегося газа // Докл. Акад. наук СССР, 1978. Т. 239. № 1. С. 71.
6. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Нигматулин Р. И., Рахматулин Х. А., Тимофеев Е. И. Усиление ударных волн в жидкостях с пузырьками пара и растворяющегося газа // Докл. Акад. наук СССР, 1982. Т. 263. № 3. С. 594.
7. Borisov A. A., Gelfand B. E., Timofeev E. I. Shock waves in liquid containing gas bubbles // Int. J. Multiphas. Flow, 1983. Vol. 9. No. 5. P. 531–543.
8. Кедринский В. К. Распространение возмущений в жидкости, содержащей пузырьки газа // Прикладная механика и техническая физика, 1968. Т. 9. № 4. С. 29–34.
9. Kedrinskii V. K. Negative pressure profile in cavitation zone at underwater explosion near free surface // Acta Astronaut., 1976. Vol. 3. No. 7-8. P. 623–632.
10. Кедринский В. К. Ударные волны в жидкости с пузырьками газа // Физика горения и взрыва, 1980. Т. 16. № 5. С. 14–25.
11. Чернов А. А., Кедринский В. К., Давыдов М. Н. Спонтанное зарождение пузырьков в газонасыщенном расплаве при его мгновенной декомпрессии // Прикладная механика и техническая физика, 2004. Т. 45. № 2. С. 162–168.
12. Комиссаров П. В., Соколов Г. Н., Борисов А. А. Особенности подводного взрыва неидеально детонирующего энергетического материала, богатого алюминием // Хим. физика, 2011. Т. 30. № 2. С. 62–69.
13. Комиссаров П. В., Соколов Г. Н., Ермолаев Б. С., Борисов А. А. Смесевые составы для подводных взрывов с усиленным действием за счет включения воды как внешнего окислителя и их взрывные характеристики // Физико-химическая кинетика в газовой динамике, 2011. Т. 12. № 1. С. 5.
14. Комиссаров П. В., Борисов А. А., Басакина С. С., Лавров В. В. Усиление взрывной волны подводного взрыва металлизированного заряда в направлении пузырькового канала в сплошной воде // Хим. физика, 2019. Т. 38. № 8. С. 12–23.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, gubin\_sa@mail.ru

<sup>2</sup>Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, sverchkov@safety.ru

<sup>3</sup>Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, sumskoi@mail.ru

15. Авдеев К. А., Аксёнов 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.
16. Авдеев К. А., Аксенов В. С., Борисов А. А., Тухватуллина Р. Р., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Численное моделирование воздействия ударной волны на пузырьковую среду // Горение и взрыв, 2015. Т. 8. № 2. С. 45–56.
17. Авдеев К. А., Аксенов В. С., Борисов А. А., Севастопольева Д. Г., Тухватуллина Р. Р., Фролов С. М., Фролов Ф. С., Шамшин И. О., Басара Б., Эдельбауэр У., Пахлер К. Расчет распространения ударной волны в воде с пузырьками реакционноспособного газа // Хим. физика, 2017. Т. 36. № 4. С. 20–31.
18. Тухватуллина Р. Р., Фролов С. М. Ударные волны в жидкости, содержащей инертные и реакционноспособные газовые пузырьки // Горение и взрыв, 2017. Т. 10. № 2. С. 52–61.
19. Пчельников А. В., Гражданкин А. И., Кручинина И. А., Сумской С. И., Дадонов Ю. А., Лисанов М. В. Оценка риска аварий на объектах хранения и перевалки нефти и нефтепродуктов // Безопасность труда в промышленности, 2004. Т. 6. С. 33–37.
20. Сумской С. И., Агапов А. А., Софьин А. С., Сверчков А. М., Егоров А. Ф. Моделирование аварийных утечек на магистральных нефтепроводах // Безопасность труда в промышленности, 2014. Т. 9. С. 50–53.
21. Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. — М.-Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949. 104 с.
22. Ильичев А. Т., Сумской С. И., Шаргатов В. А. Нестационарные течения в деформируемых трубах: закон сохранения энергии // Труды Математического института имени В. А. Стеклова, 2018. Т. 300. С. 76.
23. Чарный И. А. Неустойчившееся движение реальной жидкости в трубах. — Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. 222 с.
24. Colebrook C. F. Turbulent flow in pipes, with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws // P. I. Civil Eng., 1939. Vol. 11. P. 133.
25. Lockhart R. W., Martinelli R. C. Proposed correlation of data for isothermal two-phase, two-component flow in pipes // Chem. Eng. Prog., 1949. Vol. 45. P. 695.
26. Lagumbay R. S. Modeling and simulation of multi-phase/multicomponent flows. — Department of Mechanical Engineering, The University of Colorado, 2006. Ph.D. Thesis. 243 p.
27. Лурье М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. — М.: Издательский центр РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2012. 456 с.
28. Губин С. А., Губина Т. В., Сумской С. И., Лисанов М. В. Моделирование переходных и аварийных процессов в магистральных нефтепроводах с помощью метода С. К. Годунова // Безопасность труда в промышленности, 2013. Т. 10. С. 66–71.
29. Sumskoi S. I., Sverchkov A. M. Modeling of non-equilibrium processes in oil trunk pipeline using Godunov type method // Physcs. Proc., 2015. Vol. 72. P. 347–350.
30. Sumskoi S. I., Sverchkov A. M., Lisanov M. V., Egorov A. F. Modelling of non-equilibrium flow in the branched pipeline systems // J. Phys. Conf. Ser., 2016. Vol. 751. No. 1. P. 012022.
31. Sumskoi S. I., Sverchkov A. M., Lisanov M. V., Egorov A. F. Simulation of compression waves / shock waves propagation in the branched pipeline systems with multi-valve operations // J. Phys. Conf. Ser., 2016. Vol. 751. No. 1. P. 012024.
32. Sumskoi S. I., Sofin A. S., Lisanov M. V. Developing the model of non-stationary processes of motion and discharge of single and two-phase medium at emergency releases from pipelines // J. Phys. Conf. Ser., 2016. Vol. 751. No. 1. P. 012025.
33. Bergant A., Simpson A. R. Pipeline column separation flow regimes // J. Hydraul. Eng., 1999. Vol. 125. No. 8. P. 835–848.
34. Арбузов Н. С. Обеспечение технологической безопасности гидравлической системы морских нефтеналивных терминалов в процессе налива судов у причальных сооружений: Дис. . . . д-ра техн. наук. — М., 2014. 310 с.

Поступила в редакцию 14.02.2021