

Иванов Евгений Александрович¹
20evgeniy08@mail.ru

Клюев Арсентий Сергеевич¹
arsentiuklyuyev@gmail.com

Жарковский Александр Аркадьевич¹
azharkovsky@gmail.com

Борщев Игорь Олегович¹
borshchevspbpu@mail.ru

¹ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», Россия, г. Санкт-Петербург

**МЕТОДИКА РАСЧЁТА
ГИДРАВЛИЧЕСКОГО УДАРА В ТРУБОПРОВОДЕ
С УЧЁТОМ КАВИТАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ
В ОТКРЫТОМ
ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ OPENFOAM**

Аннотация. Гидравлический удар, возникающий в трубопроводных системах, может стать причиной аварий и вызвать разрушение трубопроводов, арматуры и оборудования. При колебании давления в следствие гидравлического удара, давление в фазе разрежения может снизиться ниже давления насыщенных паров, что приведёт к возникновению кавитационной каверны. Это явление сопровождается дополнительным увеличением амплитуды колебания давления, что приводит к дополнительным нагрузкам, возникающим в гидравлической сети. В работе рассмотрена методика расчёта гидравлического удара с помощью программного комплекса OpenFOAM, которая учитывает возникновение кавитационных каверн.

Ключевые слова: гидроудар, трубопровод, OpenFOAM.

Ivanov Evgeniy¹
20evgeniy08@mail.ru

Klyuyev Arseniy¹
arsentiuklyuyev@gmail.com

Zharkovskii Aleksandr¹
azharkovsky@gmail.com

Borshchev Igor¹
borshchevpsbpu@mail.ru

¹*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia, St. Petersburg*

CALCULATION METHOD OF WATER HAMMER IN THE PIPELINE TAKING INTO ACCOUNT CAVITATION PHENOMENA IN THE OPEN SOFTWARE PACKAGE OPENFOAM

Abstract. Hydraulic shock that occurs in pipeline systems can cause accidents and destroy pipelines, valves and equipment. If the pressure fluctuates due to a water hammer, the pressure in the rarefaction phase may drop below the pressure of saturated vapors, resulting in a cavitation. This phenomenon is accompanied by an additional increase in the amplitude of pressure fluctuation, which leads to additional loads occurring in the hydraulic system. The aim of the paper is to provide the method for calculation of the hydraulic shock with the help of OpenFOAM software complex, which takes into account the cavitation formation.

Keywords: water, hammer, pipeline, OpenFOAM.

Введение

Гидравлическая сеть состоит из множества различных элементов: насосы, задвижки, клапаны, соединения др. Данные элементы подвержены износу в следствие воздействия на них нестационарных нагрузок, возникающих при переходных процессах, что приводит к снижению жизненного цикла сети и авариям.

Опасным явлением возникающем в гидравлической сети при переходных процессах является гидравлический удар, который подробно описан в литературе [1, 2, 3]. В результате гидравлического удара происходит колебание масс жидкости вследствие её сжимаемости, что приводит к периодическим колебаниям давления.

При колебании давления в следствие гидравлического удара, давление в фазе разрежения может снизиться ниже давления

насыщенных паров, что приведёт к возникновению кавитационной каверны. Это явление сопровождается дополнительным увеличением амплитуды колебания давления, что приводит к дополнительным нагрузкам, возникающим в гидравлической сети.

Цель. В данной статье предлагается методика расчёта гидравлического удара с учётом возникновения кавитационных каверн в открытом программном комплексе OpenFOAM. Выполнена верификация предложенной методики расчёта на экспериментальных данных и выполнено сравнение предложенной методики с существующей методикой расчёта методом характеристик [4].

Описание математической модели

Численное моделирование гидравлического удара выполнено с использованием C++ библиотек открытого CFD пакета OpenFOAM. Данные библиотеки являются бесплатными и предоставляются под лицензией GPLv3.

Решение задачи гидравлического удара для турбулентного потока с возможностью моделирования кавитации выполнено с использованием решателя `cavitatingFoam`, который является частью OpenFOAM [5]. Данный решатель позволяет моделировать сжимаемые турбулентные течения вязкой жидкости с использованием гомогенной мультифазной модели для моделирования кавитации. Сжимаемость среды описывается баротропным уравнением состояния (1). Дифференциальное уравнение (1) представляет собой зависимость плотности среды от давления:

$$\frac{d\rho_m}{dt} = \Psi \frac{dP}{dt}, \quad (1)$$

где ρ_m – плотность парожидкостной смеси, t – время, P – давление, Ψ – сжимаемость среды, которая равняется скорости распространения волны a в квадрате (2):

$$\Psi = \frac{1}{a^2}. \quad (2)$$

Массовая доля пара в парожидкостной смеси обозначается как γ и рассчитывается с использованием уравнения (3):

$$\gamma = \frac{\rho_m - \rho_{l,sat}}{\rho_{v,sat} - \rho_{l,sat}}, \quad (3)$$

где ρ_m – плотность парожидкостной среды, $\rho_{l,sat}$ – плотность жидкой фазы при давлении парообразования, $\rho_{v,sat}$ – плотность паровой фазы при давлении парообразования. Кавитации нет в ячейке расчётной сетки при условии $\gamma = 0$, в случае $\gamma = 1$ элемент ячейки сетки полностью занят паром.

Плотность парожидкостной среды ρ_m рассчитывается с учётом массовой доли пара в жидкости (4):

$$\rho_m = (1 - \gamma)\rho_l^0 + (\gamma\Psi_v + (1 - \gamma)\Psi_l)P_{sat} + \Psi_m(P - P_{sat}), \quad (4)$$

где обозначение l и v – соответствуют жидкой и паровой фазе, обозначение m – соответствует парожидкостной смеси. Сжимаемость парожидкостной смеси Ψ_m может быть смоделирована несколькими подходами. В данном случае используется линейная модель Wallis, основанная на массовой доле пара, и которая описывается уравнением (5):

$$\Psi_m = \gamma\Psi_v + (1 - \gamma)\Psi_l. \quad (5)$$

Значение вязкости μ_m смеси рассчитывается уравнением (6):

$$\mu_m = \gamma\mu_v + (1 - \gamma)\mu_l. \quad (6)$$

С учётом описанного выше подхода уравнение неразрывности (7) примет вид:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m U) = 0, \quad (7)$$

где U – скорость парожидкостной смеси. Рассчитанное значение плотности парожидкостной смеси ρ_m из уравнения неразрывности используется для получения предварительного значения γ (3) и Ψ (5). После этого выполняется численное решение уравнения сохранения импульса (8):

$$\frac{\partial \rho_m U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m U U) = -\nabla P + \nabla \cdot \left[\mu_{eff} \left(\nabla U + (\nabla U)^T \right) \right], \quad (8)$$

где μ_{eff} – эффективная вязкость, вычисляемая уравнением (9):

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t, \quad (9)$$

где μ_t – турбулентная вязкость, которая численно рассчитывается с использованием RANS модели турбулентности. В данном случае используется *k-Omega* модель турбулентности с пристеночными функциями, учитывающими шероховатость стенок.

Численное решение приведённых выше уравнений выполнено методом конечных объёмов с использованием PIMPLE алгоритма, который подробно описан в литературе [5].

Описание экспериментальной установки

В качестве экспериментальных данных были использованы результаты экспериментальных исследований, проведённых автором С. S. Martin и представленных в статье [6]. Также приведено сравнение с программным продуктом FlowMaster в котором используется метод характеристик для решения уравнений гидроудара в одномерной постановке. Данные результатов расчёта FlowMaster были взяты из верификационного отчёта, предоставленного поставщиком программного продукта.

Схема экспериментального стенда представлена на рисунке 1.

Поток воды из верхнего резервуара протекает через трубопровод длиной 102 м, с постоянным диаметром 13,41 мм, толщина стенок которого 1,24 мм вниз на слив. Задвижка Gate Valve используется для поддержания требуемой величины расхода и давления жидкости, режимы работы стендовой установки представлены в таблице 1.

По длине трубопровода установлены датчики давления x/L в которых происходит мониторинг значения давления во времени в процессе гидроудара. Сценарий гидроудара обеспечивается быстрым закрытием задвижки на выходе трубопровода Ball Valve.

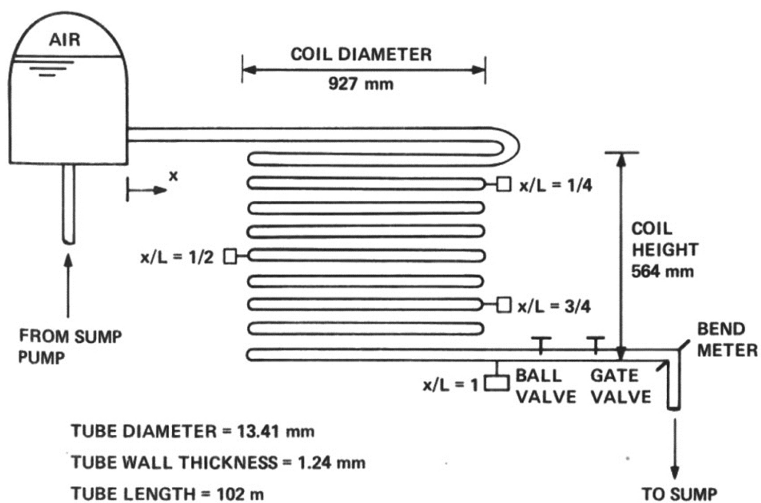


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Таблица 1

Режимы работы стендовой установки

Режим работы	Давление в верхнем резервуаре, м	Объёмный расход, м ³ /с
Без кавитации (No Cavitation)	74	$9,76 \cdot 10^{-5}$
Режим кавитации 1 (Limited Cavitation 1)	72,4	$1,04374 \cdot 10^{-4}$
Режим кавитации 2 (Limited Cavitation 2)	71,4	$1,107 \cdot 10^{-4}$
Режим кавитации 3 (Limited Cavitation 3)	70,3	$1,1666 \cdot 10^{-4}$
Умеренная кавитация (Moderate Cavitation)	68,7	$1,6906 \cdot 10^{-4}$
Сильная кавитация (Severe Cavitation)	23,7	$1,44485 \cdot 10^{-4}$

Постановка задачи в OpenFOAM

Для моделирования верификационной задачи была сгенерирована структурированная двухмерная расчётная сетка, имитирующая участок трубопровода, количество элементов расчётной сетки по высоте трубы равняется 10.

В качестве граничных условий на входе в трубопровод задано статическое давление, соответствующее давлению в верхнем резервуаре. На выходе задана скорость как функция времени $V(t)$, изменение скорости потока на выходе трубопровода соответствует закрытию задвижки. На стенках задано условие прилипания жидкости. Учтена шероховатость стенок, $\delta = 0,5$ мм. Скорость распространения ударной волны $a = 1315$ м/с. Тип расчёта – нестационарный, шаг по времени адаптивный, соответствует акустическому числу Куранта $C_o = 50$. Давление парообразования $P_{sat} = 2057$ Па.

В результате расчёта получены графики пульсации давления в зависимости от времени на различных участках трубопровода x/L для всех представленных режимов в таблице 1.

Результаты

В качестве результатов моделирования приводятся графики пульсации давления (рисунок 2) в зависимости от времени на участке трубопровода $x/L = 1/2$ для всех режимов из таблицы 1.

Выводы

Из проведённых верификационных расчётов можно сделать вывод, что моделирование гидроудара в турбулентном потоке с использованием CFD подхода даёт высокую точность как для режима без кавитации, так и для режимов с развитой кавитацией. Двухмерная постановка задачи позволяет значительно сократить время вычислений с сохранением высокой точности результатов.

Сравнение CFD моделирования с одномерным моделированием методом характеристик (FlowMaster) показало, что для гидроудара без кавитации оба подхода демонстрируют высокую точность результатов, однако с ростом кавитационных каверн точность метода характеристик падает.

Стоит отметить, что библиотека OpenFOAM не имеет специализированных граничных условий для моделирования работы

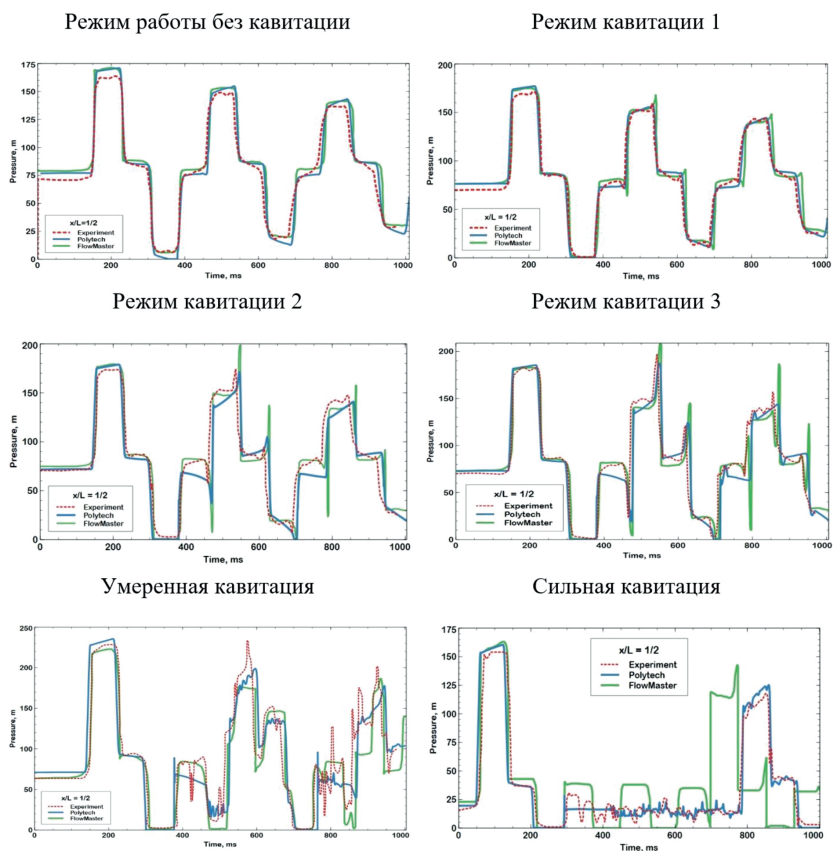


Рис. 2. Графики пульсации давления в зависимости от времени на участке трубопровода $x/L = 1/2$

насосов, задвижек и др. Это требует дополнительной разработки библиотек с граничными условиями которые имитируют характеристики работы оборудования гидравлической сети.

Список литературы

1. **Жуковский Н. Е.** О гидравлическом ударе в водопроводных трубах. – Л. : Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1949.
2. **Ghidaoui M. S., Zhao M., Mcinnis D. A. et al.** A review of water hammer theory and practice [J] // Applied Mechanics Reviews. – 2005. – 58(1). – 49–76.
3. **Sharp B. B.** Water Hammer Problems and Solutions. – 1981. – ISBN 0-7131-3427-5.
4. **Sharon Mandair, Bryan Karney, Robert Magnan, Jean-François Morissette.** Comparing Pure CFD and 1-D Solvers for the Classic Water Hammer Models of a Pipe-Reservoir System // 1st International WDSA/CCWI 2018 Joint Conference, Kingston, Ontario, Canada – July 23–25, 2018.
5. OpenFOAM User Guide, Version 7, 2019.
6. **Martin C. S.** Experimental investigation of column separation with rapid closure of downstream valve // 4th International conference on Pressure surges, 1983.