УДК 621.6.052.6
doi:10.18720/SPBPU/2/id20-366

Иванов Евгений Александрович[1]
20evgeniy08@mail.ru

Клюев Арсентий Сергеевич[1]
arsentiyklyuyev@gmail.com

Жарковский Александр Аркадьевич[1]
azharkovsky@gmail.com

Борщев Игорь Олегович[1]
borshchevspbspu@mail.ru

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

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУР МУЛЬТИФАЗНОГО ПОТОКА В ПРОГРАММНОМ КОМПЛЕКСЕ OPENFOAM

Аннотация. Выполнено численное моделирование различных структур мультифазного потока в трубе с использованием программного комплекса OpenFOAM. Представлено визуальное сравнение расчётных структур мультифазного потока для разделённого, разделено-волнового, пробкового и кольцевого режимов течения расчёта с экспериментальными данными. Для моделирования мультифазного потока использовался решатель compressibleInterFoam. Из результатов численного моделирования следует, что программный комплекс OpenFOAM позволяет корректно предсказывать режим мультифазного течения в трубе в зависимости от чисел Рейнольдса для газовой и жидкой фазы потока.

Ключевые слова: мультифазный, моделирование, OpenFOAM.

Ivanov Evgeniy[1]
20evgeniy08@mail.ru

Klyuyev Arsentiy[1]
arsentiyklyuyev@gmail.com

Zharkovskii Aleksandr[1]
azharkovsky@gmail.com

Borshchev Igor[1]
borshchevspbspu@mail.ru

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

NUMERICAL SIMULATION OF MULTIPHASE FLOW STRUCTURES IN OPENFOAM SOFTWARE PACKAGE

Abstract. Numerical simulation of various structures of multiphase flow in the pipe was performed using the OpenFOAM software package. A visual comparison of multiphase flow design structures for separated, split-wave, cork and ring flow modes with experimental data is presented. For multiphase flow modeling the solver compressibleInterFoam was used. From the results of numerical modeling it follows that the OpenFOAM software package allows correct prediction of multiphase flow modes in the pipe depending on Reynolds numbers for gas and liquid phases of the flow.

Keywords: multiphase, flow, simulation, OpenFOAM.

Введение

Математическое моделирование мультифазных потоков в разветвлённых сетях трубопроводов затруднено многообразием режимов течения, которые зависят от скоростей жидкой и газовой фазы, а также от положение трубопровода в пространстве (горизонтальное расположение, расположение под углом, вертикальное расположение участка трубопровода). Также моделирование осложняется возможными локальными объектами сети, такими как задвижки, клапаны и т. д. Поэтому существующие эмпирические подходы к моделированию сильно ограничиваются областью применения [1, 2, 4, 5].

В настоящее время для моделирования гидродинамики получили распространение трёхмерные методы расчёта, основанные на методе конечных объёмов (далее МКО) [5]. При использовании МКО математическая модель является более универсальной,

чем эмпирические или одномерные методы расчёта. Верифицированная на простых задачах математическая модель МКО может быть применима для задач с более сложной геометрической формой.

Для численного расчёта мультифазного течения в разветвлённой сети трубопровода была выбрана свободно распространяющаяся библиотека OpenFOAM, поставляемая с открытым исходным кодом на языке программирования C++. Данная библиотека позволяет выполнять численное моделирования методом конечных объёмов и имеет встроенные решатели для моделирования гидрогазодинамики мультифазных потоков.

Описание структур мультифазного потока на участках трубопровода

В научных работах [1, 2] представлены схемы возможных структур мультифазного потока на участках горизонтального трубопровода. В научной статье авторов Afshin J., Ghajar and Clement

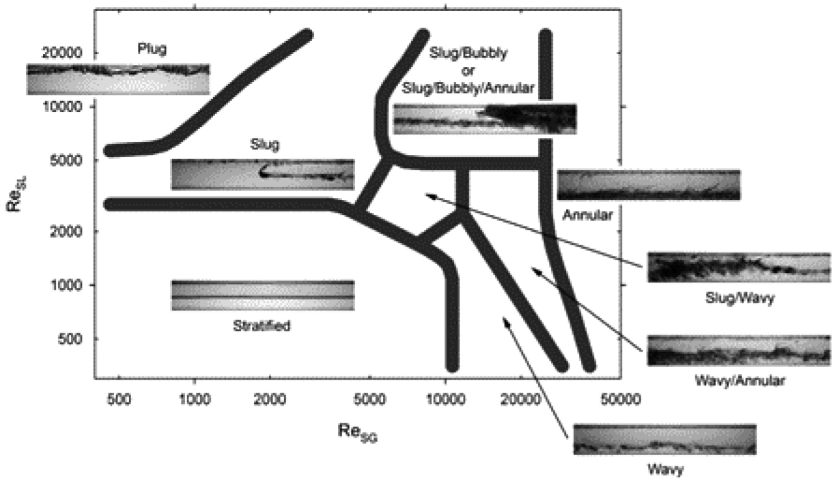

Рис. 1. Структуры мультифазного потока в горизонтальном трубопроводе в научной статье авторов Afshin J., Ghajar and Clement C. Tang

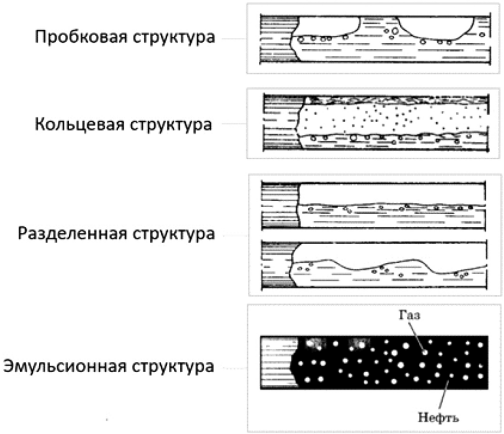

Рис. 2. Структуры мультифазного потока автора Марон В. И.

C. Tang [2] представлено 8 различных структур потока в зависимости от числа Рейнольдса для каждой фазы.

В научной литературе «Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах» Марон В. И. [1], автор объединяет промежуточные структуры потока и оставляет только 4 принципиально разных структуры потока, рисунок 2.

Описание математической модели

Для моделирования мультифазного потока использовался решатель compressibleInterFoam, являющийся частью библиотек OpenFOAM.

Решатель compressibleInterFoam используется для моделирования гетерогенных сжимаемых двухфазных потоков. Данный решатель использует метод VOF (Volume of fluid) для отслеживания интерфейса между жидкой и газовой фазой потока. Вязкость, плотность и удельная теплоёмкость потока определяется для газожидкостной смеси. Где объёмная концентрация газожидкостной смеси α может иметь значение от 0 до 1, где при 1 газожидкостная смесь принимает свойства жидкости, а при 0 – газа. В решатель включены следующие уравнения для газожидкостной смеси:

уравнение движения, уравнение неразрывности, уравнение энергии, и уравнение переноса для величины объёмной концентрации α. Перечисленные уравнения решателя compressibleInterFoam представлены ниже:

– уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{dt} + \nabla \cdot \left(\rho U\right) = 0, \tag{1}$$

– уравнение движения:

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho U U\right) = -\nabla p + \nabla \left(\mu \nabla U\right) + S_U, \tag{2}$$

– уравнение энергии:

$$\frac{\partial \left(\rho C_p T\right)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho U C_p T\right) = \nabla \cdot \left(k \nabla T\right) + S_T, \tag{3}$$

– уравнение переноса объёмной концентрации:

$$\frac{\partial \alpha}{dt} = \nabla \cdot \left(\alpha U\right) + \nabla \cdot \left(\left(1-\alpha\right)\alpha U_r\right) = 0, \tag{4}$$

где ρ – плотность, U – скорость, t – время, p – давление, μ – динамическая вязкость, C_p – удельная теплоемкость, T – температура, k – теплопроводность, S_U и S_T – дополнительные источники в уравнении движения и в уравнении энергии.

Для решения описанных выше уравнений используется метод конечных объёмов с алгоритмом решения PIMPLE [3].

Описание постановки задачи

Расчётная геометрия представляет собой участок трубопровода с диаметром D = 25,4 мм и относительной длиной трубы L/D=214. Визуализация расчётной геометрии представлена на рисунке 3.

Рис. 3. Расчётная геометрия участка трубопровода

Построение расчётной сетки выполнено в некоммерческом программном комплексе Salome, расчётная сетка структурированная, тип элементов – гексаэдры. Для экономии вычислительных сетка построена грубой – 90 тыс. элементов расчётной сетки. Затем в процессе расчёта был применён метод адаптивного сгущения сетки на основе отслеживания границы интерфейса между жидкой и газовой фазой. Визуализация адаптивной расчётной сетки представлена на рисунке 4. Верхняя граница количества элементов при адаптивном сгущении сетки составила 1 млн элементов.

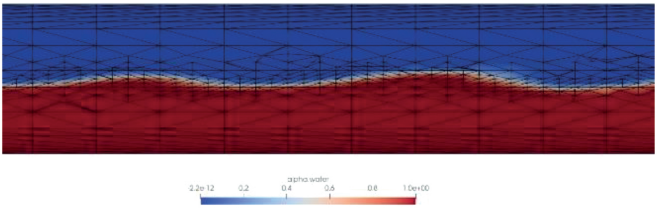

Рис. 4. Визуализация адаптивной расчётной сетки в процессе расчёта

В качестве граничных условий на входе в трубу задавалась скорость U для каждой фазы, которая соответствует определенному числу Рейнольдса. Стенки считались неподвижными, на выходе задано статическое давление $p = 1$ атм. Так как в расчёте учитывалась сжимаемость газа, на входе задана температура 20 °C.

Формирование пробковой структуры течения возникает в основном из-за существующих возмущений в потоке связных с различными внешними факторами которые создают пульсации параметров потока, такими как насосы, задвижки, сложная геометрия трубопровода и т. д. Поэтому для формирования пробковой структуры течения в расчёте необходимым условием является некоторое возмущение потока на входе. В связи с этим на входе задано периодическая подача газовой либо жидкой фазы с частотой 10 Гц.

В качестве жидкой фазы в расчёте использовалась несжимаемая вода с плотностью 998 кг/м^3 и кинематической вязкостью 10^{-6} м^2/с.

В качестве газа использовался идеальный воздух при нормальных условиях 1 атм, 20 °C.

Результаты численного моделирования

В таблицы 1 представлены режимы течения, которые были рассчитаны в среде OpenFOAM.

Таблица 1

Режимы течения

Режим течения	Число Рейнольдса жидкой фазы, Re_l	Число Рейнольдса газовой фазы Re_g
Разделенная структура	705	832
Разделенно-волновая структура	1500	16 000
Пробковая структура	17 000	4000
Кольцевая структура	17 000	28 000

Для представленных режимов течения выполнено визуальное сравнение расчёт-эксперимент. Результаты экспериментальных данных заимствованы из научной статьи Afshin J., Ghajar and Clement C. Tang [2].

На рисунках 5, 6 представлено визуальное сравнение раздельной структуры течения двухфазного потока.

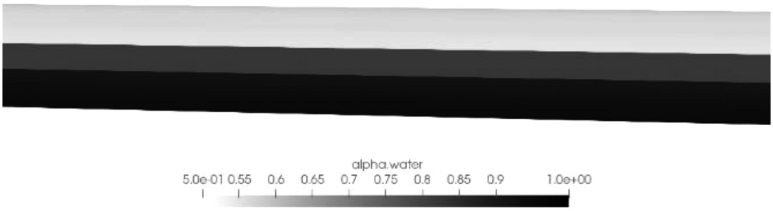

Рис. 5. Разделённая структура потока, расчёт. $Re_g = 832$, $Re_l = 705$

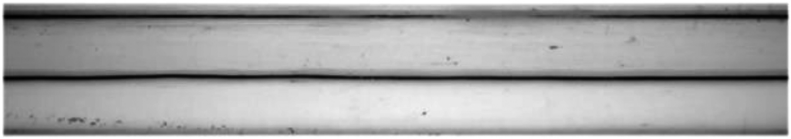

Рис. 6. Разделенная структура потока, эксперимент. $Re_g = 832$, $Re_l = 705$

Из рисунков 5, 6 видно, что структура потока в обоих случаях имеет чёткую границу раздела фаз по центру трубы. При данных числах Рейнольдса, течение для обоих фаз ламинарное.

На рисунках 7, 8 представлено визуальное сравнение разделенно-волновой структуры течения двухфазного потока.

Рис. 7. Разделенно-волновая структура потока, расчёт $Re_g = 16\,000$, $Re_l = 1500$

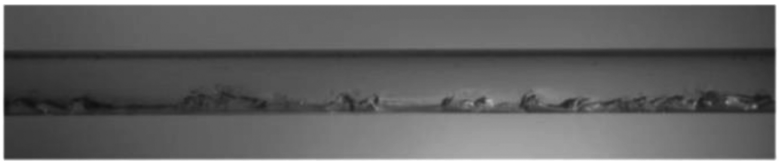

Рис. 8. Разделенно-волновая структура потока, расчет $Re_g = 16\,000$, $Re_l = 1500$

Из рисунков 7, 8 следует, что турбулентное течение газовой фазы формирует периодические волны на границе раздела жидкой и газовой фазы. Расчёт показывает более плавную структуру волн, предполагается, что это связано с недостаточной густотой расчётной сетки.

На рисунках 9, 10 представлено визуальное сравнение пробковой структуры течения двухфазного потока.

Из рисунков 9, 10 видно, что турбулентный поток жидкой фазы формирует пробковую структуру течения в потоке как

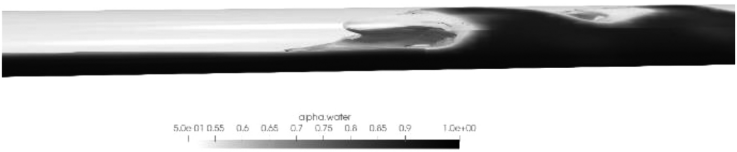

Рис. 9. Пробковая структура потока, расчёт. $Re_g = 4000$, $Re_l = 17\,000$

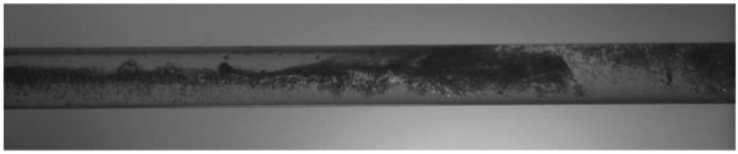

Рис. 10. Пробковая структура потока, эксперимент
$Re_g = 4000$, $Re_l = 17\,000$

в расчётной модели, так и в эксперименте. Однако недостаточное разрешение расчётной сетки не позволяет детально разрешить отдельные пузырьки воздуха присутствующие в эксперименте.

На рисунках 11, 12 представлено визуальное сравнение кольцевой структуры течения двухфазного потока.

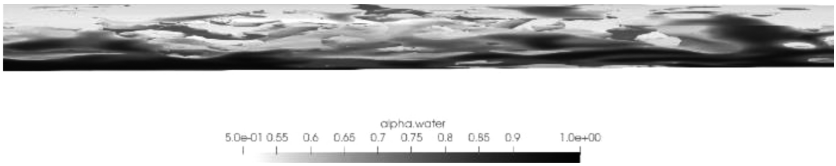

Рис. 11. Кольцевая структура потока, расчёт
$Re_g = 28\,000$, $Re_l = 17\,000$

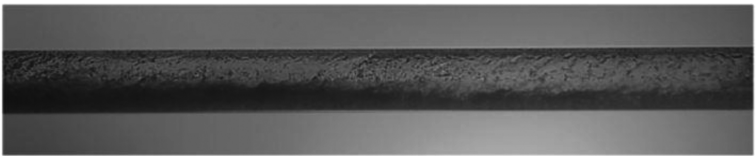

Рис. 12. Кольцевая структура потока, эксперимент
$Re_g = 28\,000$, $Re_l = 17\,000$

Из рисунков 11, 12 следует, что числам Рейнольдса $Re_g = 28\,000$ и $Re_l = 17\,000$ соответствует кольцевая структура потока как для расчёта, так и для эксперимента.

Выводы

Из проведённых численных исследований следует, что решатель compressibleInterFoam программного комплекса OpenFOAM позволяет моделировать различные структуры мультифазного потока: разделённая, разделено-волновая, пробковая, кольцевая. Результаты численного моделирования подтверждаются визуальным сравнением с экспериментальными данными. Однако для более точного моделирования деталей потока требуется значительное сгущение расчётной сетки, что в свою очередь требует значительных вычислительных ресурсов. Стоит отметить, что количественная оценка течения мультифазного потока затрудняется сильно выраженной нестационарной природой данного процесса.

Список литературы

1. **Марон В. И.** Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах : учебное пособие. – СПб. : Издательство «Лань», 2012. – 256 с. – (Учебники для вузов. Специальная литература).

2. **Afshin J. Ghajar and Clement C. Tang**. Heat Transfer Measurements, Flow Pattern Maps, and Flow Visualization for Non-Boiling Two-Phase Flow in Horizontal and Slightly Inclined Pipe. 2007. DOI: 10.1080/01457630701193906

3. OpenFOAM 7 User Guide, 2019.

4. **Taitel Y., and Dukler A. E.** Model for Predicting Flow Regime Transitions in Horizontal and Near Horizontal Gas-Liquid Flow // AIChE Journal. –1976. – vol. 22, no. 1. – pp. 47–55.

5. **Mandhane J. M., Gregory G. A. and Aziz K.** A flow pattern map for gasliquid flow in horizontal pipes // Int. J. Multiphase Flow. –1974. – 1. – pp. 537–53.