

Тема работы

Численное моделирование неподвижного газового снаряда Тейлора.

Состав коллектива

Студент ФФ НГУ: Лукьянов Андрей Александрович, бакалавр до 2022 г., магистрант в настоящее время.

Научный руководитель: Алексеев Максим Валерьевич, almaxcom@mail.ru, к.ф.-м.н., с.н.с ИТ СО РАН, Лаборатория 6.2.

Информация о гранте

Проведение расчётов для бакалаврской и магистерской работы Лукьянова Андрея Александровича.

Аннотация

В работе проведено численное исследование неподвижного (висячего) снаряда Тейлора по условиям эксперимента [1] с применением нестационарной модели $k-\omega$ SST (shear stress transport) турбулентности. Проведен анализ режимных параметров течения жидкости и газа перед снарядом, в пленке жидкости, в снаряде и за ним. Показано хорошее совпадение эксперимента и расчёта для трения в пленке жидкости. Показано хорошее совпадения эксперимента и расчёта для формы носика снаряда и толщины пленки.

Научное содержание работы:

Современное состояние проблемы и постановка задачи

Газовый пузырь Тейлора в виде формы «снаряда» занимает почти все поперечное сечение трубы и реализуется в одноименном режиме течения двухфазного потока. Всплытие одиночного газового снаряда Тейлора в вертикальной трубе с жидкостью происходит с постоянной скоростью, которая не зависит от длины снаряда. С помощью установки зонда - трубки, в опускном потоке был получен стабилизированный, «висячий» - неподвижный снаряд Тейлора для диаметра трубы 20 мм [1]. Данная геометрия задачи позволила измерить характеристики течения жидкости вокруг газового снаряда Тейлора такие как: трение на стенке перед снарядом, в пленке снаряда, за снарядом, провести визуализацию и измерение толщины пленки. Детальные экспериментальные исследования висячего снаряда в работе [1] позволили использовать данную задачу для верификации CFD кодов. Впервые в качестве верификации данная задача была использована в работе [2]. Выявлено, что расчетное значение трения на стенке существенную роль оказывает детализация сетки в области пограничного пристеночного слоя.

Режимный анализ эксперимента показал, что при обтекании жидкостью «висячего» снаряда скорость потока соответствует переходному к турбулентности режиму течения. Наиболее рационально с вычислительной точки зрения использование нестационарных моделей турбулентности $k-\omega$ SST, которая является комбинацией $k-\epsilon$ и $k-\omega$ моделей турбулентности.

Развитие кластерных вычислений с применением свободного кода OpenFoam позволяет решать задачи о движении Тейлоровских снарядов в трубах. Например в работе [3] проведено трехмерное моделирование движения и процесса слияния двух Тейлоровских снарядов на сетках превышающие 8 миллионов ячеек. Применение решателя *compressibleInterFoam* кода OpenFOAM позволяет решать широкий круг задач движения и теплообмена двухфазной среды с выраженной межфазной границей в приближении сжимаемых и несжимаемых сред.

Целью данной работы – является трехмерное моделирование неподвижного

(висячего) газового снаряда Тейлора методом VOF с применением нестационарной модели турбулентности $k-\omega$ SST. Анализ турбулентных характеристик потока полученных из модели турбулентности $k-\omega$ SST. Сравнение расчётных данных с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Кашинский О.Н., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д. Трение на стенке при обтекании стационарного газового снаряда опускным потоком жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2008. Т. 15, No 1. С. 93–98

2. Гузей Д.В., Минаков А.В., Пряжников М.И., Дектерев А.А. Численное моделирование газожидкостных потоков в мини- и микроканалах // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, No 1. С. 61–72.

3. Shaban H., Tavoularis S. Detached eddy simulations of rising Taylor bubbles // Int. J. of Multiphase Flow. 2018. Vol. 107. P. 289–300

Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

В солвере *compressibleInterFoam* кода OPeNFOAM реализована модель для двух сжимаемых, неизотермических, несмешивающихся жидкостей с использованием подхода захвата границы раздела фаз на основе метода VOF. Теплофизические свойства двухфазной среды определяются как линейные комбинации свойств жидкой и газовой фаз. Условия расчёта и геометрия расчетной области соответствовали экспериментальному исследованию [1]. Модель двухфазного потока дополнялась URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) моделью турбулентности $k-\omega$ SST (shear-stressed transport), которая является комбинацией $k-\epsilon$ и $k-\omega$ моделей турбулентности.

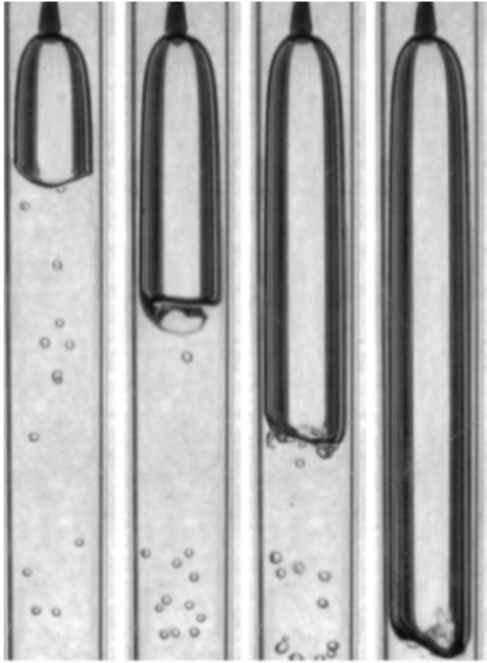
Таблица 1: Граничные условия и Теплофизические свойства фаз

	wall	wall (зонд)	inlet	outlet
U , м/с	noSlip	noSlip	0.15 (расходная скорость)	pressure-InletOutlet-Velocity
T , К	zeroGradient	zeroGradient	293.15	zeroGradient
p , Па	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	101315
k , м ² /с ²	kqRWallFunction	kqRWallFunction	0.005	zeroGradient
ω , с ⁻¹	omegaWall-Function	omegaWall-Function	0.003	zeroGradient
α	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\alpha = 1$ (вода)	zeroGradient

	вода	воздух
ρ , кг/м ³	998.2	1.2
μ , Па·с	$1.002 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-5}$
c_v , J/kg·K	4185	1005
Pr	0.713	6.99
σ , N/m	$72.74 \cdot 10^{-3}$	

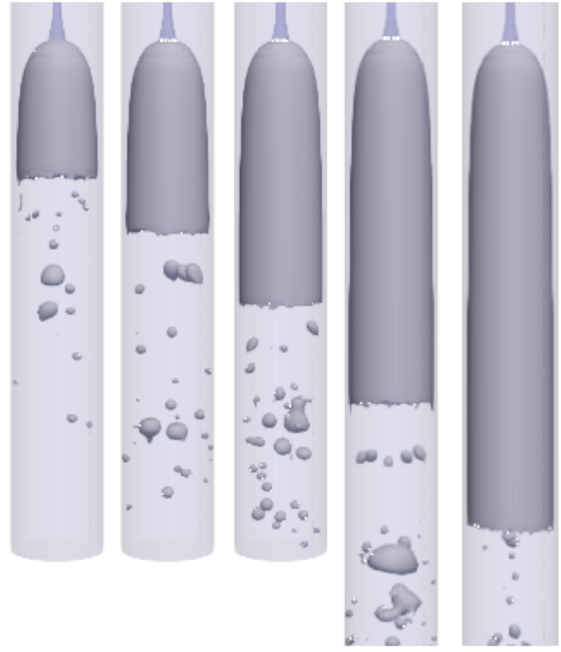
θ – контактный угол смачивания

В работе рассматривается расчётная область, состоящая из круглого цилиндра общей длиной $L = 150-250$ мм, радиусом $R=10$ мм. Внутри канала устанавливался цилиндрический зонд длиной $l_1 = 45$ мм и радиусом $r_1 = 1$ мм который заканчивался усеченным конусом длиной $l_2 = 5$ мм и внешним радиусом $r_2 = 2$ мм. В расчётах использовалась мультиблочная радиальная сетка со сгущением около стенки. Общее число ячеек расчетной сетки составляло 2.7 миллиона для рабочей области длиной 150 мм, и 4.2 миллиона для 250 мм. Определение трения на стенке осуществлялось по формуле $\tau = -\mu(\partial U_x / \partial r)$ без применения закона стенки, поскольку значения y^+ лежало в пределах единицы. В начальный момент времени распределение фаз внутри канала задавалась в виде газового снаряда. Снаряд состоял из цилиндра и двух полусфер, был установлен внутри расчетной области. Радиус цилиндра и полусферы составлял $r_0=9.5$ мм, длина снаряда l_0 менялась от 20 до 120 мм. Общая длина начального пузыря соответствовала средней длине пузыря, полученного в эксперименте. Сила тяжести g устанавливалась со направлено с потоком течения жидкости. В таблице 1



1 2 3 4

Рис. 1: Экспериментальное фото стационарного газового снаряда: 1- 30 мм, 2- 50 мм, 3 - 75 мм, 4 - 120 мм.[1]



1 2 3 4 5

Рис. 2: Расчетная межфазная поверхность для разных длин стационарного газового снаряда: 1 - 27 мм, 2 - 43 мм, 3 - 55 мм, 4 - 79 мм, 5 - 105 мм.

представлены граничные условия в обозначениях кода OpenFOAM для входной (inlet), выходной (outlet) поверхности расчетной области и на поверхностях стенок (wall).

Связь давления и скорости в уравнениях Навье–Стокса решалась с использованием метода PIMPLE. Алгоритм PIMPLE представляет собой комбинацию PISO (Pressure Implicit with Splitting of Operator) и SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations).

Полученные результаты

В эксперименте [1] были получены стационарные снаряды разной длины, рисунок 1. Скорость отпускного потока составляла примерно 0.15 м/с, что соответствует скорости всплывания снаряда для диаметра трубы 20 мм. Форма носика пузыря не зависит от длины снаряда. Толщина пленки жидкости зависит только от расстояния до носика снаряда. Схожие результаты были получены при численном моделировании. На рисунке 2 представлена расчетная межфазная поверхность построенная по объёмной доле жидкости $\alpha = 0.5$ для разных длин неподвижного газового снаряда. Одно из существенных различий в форме снаряда при трехмерном расчёте от экспериментального это доньшко снаряда. В экспериментах доньшко снаряда не устойчиво, есть плавный загиб боковой поверхности снаряда к доньшку. Доньшко в расчёте вогнуто вовнутрь снаряда, край между доньшком и боковой поверхностью снаряда острый с мелкими волнами, которые генерируют пузыри.

Количественное сравнение эксперимента и расчета по трению жидкости на стенке $\tau_\mu = -\mu(\partial U_x / \partial r)$ представлено на рисунке 3. Линиями указаны расчетные профили трения на стенке для пяти длин снарядов. Точками указаны экспериментальные значения трения в пленке жидкости ($x > 0$) и перед снарядом ($x < 0$). Расчётные профили трения хорошо

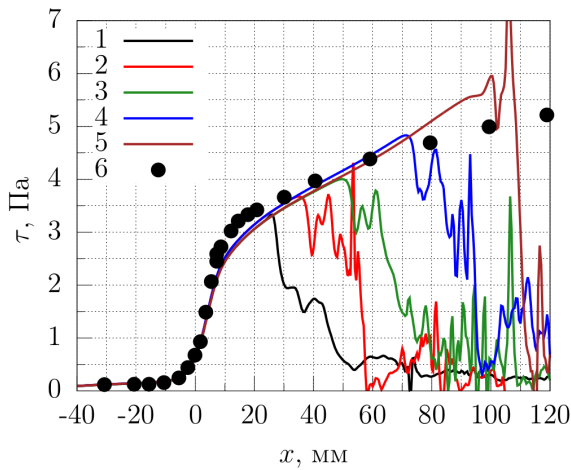


Рис. 3: Профиль трения $\tau_\mu = -\mu(\partial U_x/\partial r)$ на внешней стенке для разных длин снаряда: 1 - 30 мм, 2 - 43 мм, 3 - 55 мм, 4 - 79 мм, 5 - 105 мм, 6 - эксперимент [1]

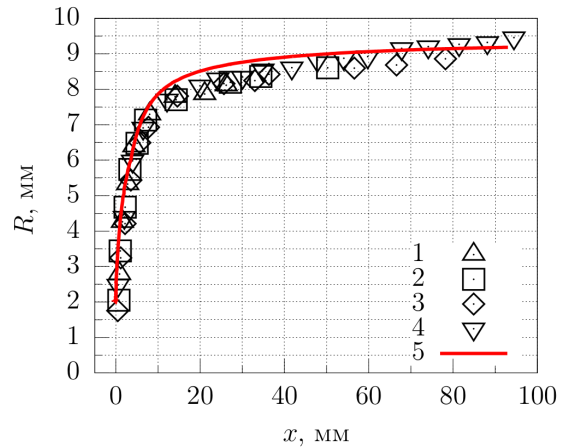


Рис. 4: Профили пузырей разной длины, 1-4: экспериментальные данные, 5-численный расчет; длина снаряда в эксперименте: 1 - 30 мм, 2 - 50 мм, 3 - 75 мм, 4 - 120 мм [1]

совпадают с экспериментом для снарядов с длиной 30 мм, 43 мм, 55 мм, 79 мм. Трение на стенке для снаряда 105 мм отклоняется от экспериментального значения в большую сторону после координаты $x = 70$ мм от носика снаряда. Данное отличие связано с ограниченностью расчетной области и влиянием малого количества ячеек для расчёта потока за снарядом. Сравнение экспериментальных профилей формы снаряда с разной длиной и расчетных профилей представлено на рисунке 4. Линией показаны расчетные профили для разных длин снарядов, которые наложены друг на друга в единую линию. Разными точками на рисунке показаны экспериментальные профили снарядов, ширина отметок соответствует погрешности измерений.

Публикации по работе.

1. Лукьянов Андрей Александрович, Численное моделирование стационарного снаряда Тейлора, Выпускная квалификационная работа бакалавра, Физический факультет, Кафедра Физики Неравновесных Процессов, Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, 2022 г.

2. Алексеев М. В., Лукьянов Ан. А. Численное моделирование неподвижного газового снаряда Тейлора. Теплофизика и аэромеханика, Том 30, № 2, с. 293–307, 2023.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Численное моделирование неподвижного снаряда Тейлора сопряжено использованием подробных сеток для расчета пленки жидкости вблизи стенки, так и ламинарного пограничного слоя в турбулентном потоке жидкости. Для корректного расчета таких течений необходимы значительные вычислительные ресурсы. Использование параллельных вычислений на кластерах позволяет уменьшить длительность вычислительных расчетов в несколько раз и ускорить проводимое численные исследования в рамках данной работы.