

## **Тема работы**

Численное моделирование тепло-гидравлических характеристик неподвижного газового снаряда Тейлора.

## **Состав коллектива**

Студент ФФ НГУ: Лукьянов Андрей Александрович, магистрант 2024 года выпуска.

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

## **Информация о гранте**

Проведение расчётов для 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 для четырех случаев скоростей опускного потока жидкости от 0.15 м/с до 0.30 м/с. Показано хорошее совпадение эксперимента и расчёта для трения в пленке жидкости. Показано хорошее совпадения эксперимента и расчёта для формы носика снаряда и толщины пленки. Расчитаны локальные коэффициенты теплопередачи для указанных скоростей и проведено сравнение экспериментальных данных с данными численного моделирования. В ходе работы в код имплементирована модель, учитывающая турбулентное число Прандтля.

## **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 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 для четырех случаев скоростей опускного потока жидкости от 0.15 м/с до 0.30 м/с. Анализ турбулентных характеристик потока полученных из модели турбулентности  $k-\omega$  SST. Исследование теплообмена. 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
$k$ , $m^2/c^2$	kqRWallFunction	kqRWallFunction	0.005	zeroGradient
$\omega$ , $c^{-1}$	omegaWallFunction	omegaWallFunction	0.003	zeroGradient
$\alpha$	$\theta = 0^\circ$	$\theta = 90^\circ$	$\alpha = 1$ (вода)	zeroGradient

	вода	воздух
$\rho$ , $kg/m^3$	998.2	1.2
$\mu$ , $Pa \cdot s$	$1.002 \cdot 10^{-3}$	$1.8 \cdot 10^{-5}$
$c_v$ , $J/kg \cdot K$	4185	1005
Pr	0.713	6.99
$\sigma$ , $N/m$	$72.74 \cdot 10^{-3}$	

$\theta$  – 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 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

Экспериментальные фотографии неподвижного пузыря Тейлора при расходной скорости жидкости 0.15, 0.20, 0.26, 0.30 м/с соответственно для изображений 1, 2, 3, 4 показаны на рисунке 1.б. При увеличении расхода опускного течения носик снаряда становится более острым. Форма схожа с формой носика у снарядов полученных при вынужденном течении для переходных чисел Рейнольдса. Вблизи носа пузыря происходит колебание его формы с небольшой амплитудой. На рисунке 1.а показана расчетная поверхность снарядов полученная при тех же условиях, что и эксперимент. В ходе моделирования был проведен расчет для начального снаряда длиной 68 мм для скорости течения 0.15 м/с. При увеличении скорости длина снаряда увеличивалась и составляла 72 мм, 76 мм, 79 мм для скорости жидкости 0.20, 0.26, 0.30 м/с соответственно. Расчетная межфазная поверхность построена по объёмной доли жидкости 0.5. Одно из различий в форме снаряда при моделировании от экспериментального это доньшко. 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. Это различие может быть связано либо с подходом для расчета турбулентности при моделировании.

Во второй части работы исследовались локальные коэффициенты теплообмена на стенках

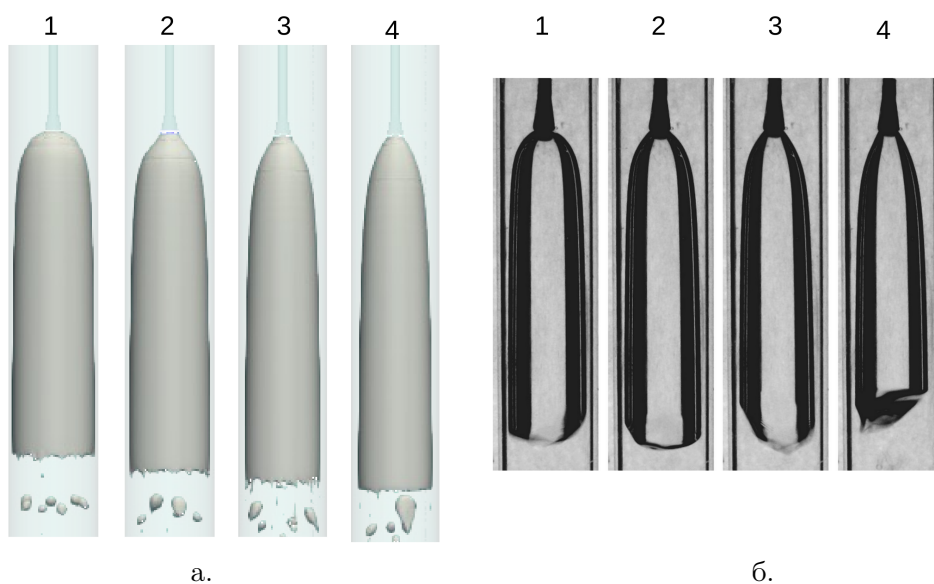


Рис. 1: Форма межфазной поверхности (а – расчётная, б– экспериментальная [1]) для разных скоростей  $U$  опускного потока: 1 – 0.15 м/с; 2 – 0.20 м/с; 3 – 0.25 м/с; 4 – 0.30 м/с.

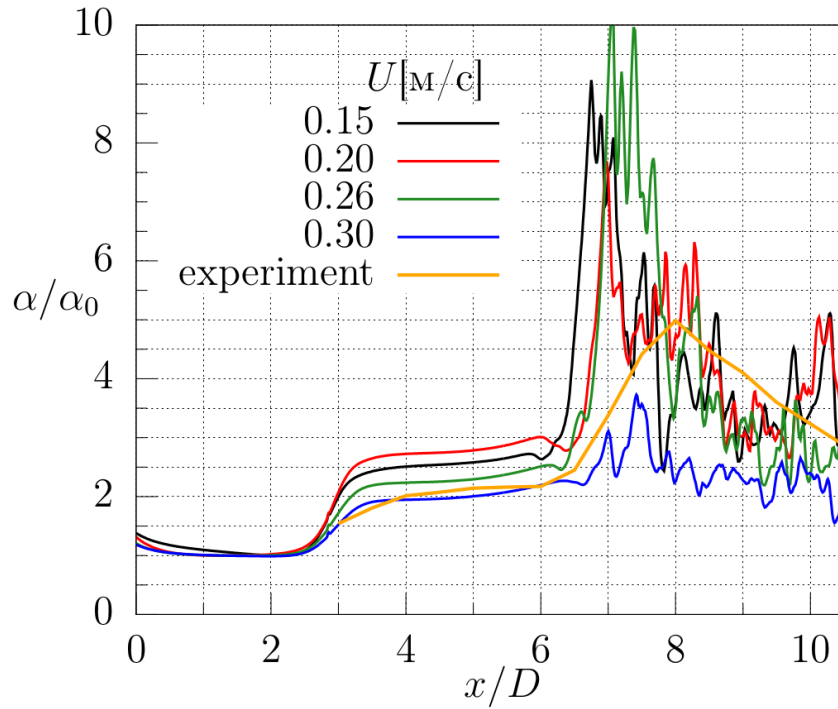


Рис. 2: Распределение локального коэффициента теплоотдачи на стенке канала для каждой скорости опускного потока, оранжевая линия соответствует экспериментальным данным [1] для скорости 0.30 м/с.

канала для всех скоростей опускного потока. Модель URANS дополнялась зависимостью от турбулентного числа Прандтля, что позволило улучшить результаты для случая нагреваемой стенке. На стенке канала происходил постоянный нагрев, из-за чего температура в жидкости увеличивалась и достигала максимума в области перед пузырьем, а затем постепенно уменьшалась. При турбулентном режиме течения перенос теплоты внутри жидкости осуществляется в основном за счет перемешивания. При этом процесс перемешивания протекает настолько интенсивно, что по сечению ядра потока температура жидкости постоянна. Резкое изменение температуры наблюдается лишь внутри тонкого слоя у поверхности.

На рисунке 2 показано распределение локального коэффициента теплопередачи, нормированное на однофазное:

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{T_{max} - T_0}{T(x) - T_0} \quad (1)$$

где  $\alpha_0$ , коэффициент теплоотдачи в однофазном потоке,  $T(x)$  это температуры вдоль стенки канала. На графике построены распределения для разных скоростей опускного потока жидкости. Проведено сравнение с экспериментом, данные которого показаны оранжевой линией. Видно качественное соответствие результатов. По мере развития пограничного слоя температура вблизи стенки в кольцевой области увеличивалось, а коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  падал. Вблизи верхней части пузыря Тейлора жидкость ускорялась при попадании в кольцевую область жидкой пленки, и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  постепенно увеличивался, в то время как температура стенок соответственно падала.

Вблизи нижней части пузыря Тейлора коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  снова увеличивался после увеличения скорости жидкости в кольцевой области. Точка перегиба наблюдается в том

месте, где струя жидкости выходит из кольцевой области, за пределами которой скорость жидкости замедляется. Пик коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  пришелся на осевое расстояние, составляющее приблизительно  $2D$  от дна пузыря Тейлора.

#### **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.

3. Лукьянов Андрей Александрович, Численное моделирование тепло-гидравлических характеристик висячего снаряда Тейлора, Выпускная квалификационная работа магистра, Физический факультет, Кафедра Физики Неравновесных Процессов, Новосибирский Государственный Университет, Новосибирск, 2024 г.

4. Кашинский О.Н., Алексеев М.В., Лукьянов Ан.А., Курдюмов А.С., Лобанов П.Д., Исследование гидродинамических характеристик неподвижного пузыря Тейлора при различных скоростях опускного потока жидкости // Теплофизика и аэромеханика, 2024 (в печати)

5. Лукьянов Ан. А., Алексеев М. В., Исследование гидродинамических характеристик неподвижного снаряда Тейлора при разных скоростях опускного потока, СТС 2023

6. Лукьянов Ан. А., Алексеев М. В., Численное исследование тепло-гидравлических характеристик неподвижного снаряда Тейлора, МНСК 2023

7. Лукьянов А.А., Численное моделирование локальных характеристик неподвижного снаряда Тейлора, тезисы докладов II школы-семинара НЦФМ "Математическое моделирование на супер-ЭВМ экс- и зеттафлопсной производительности, г. Саров, 25-29 сентября 2023г., стр. 67

#### **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.