

## **Тема работы**

Численное моделирование гидродинамики и теплообмена при движении пузыря Тейлора в микроканалах с использованием кода OpenFOAM.

## **Состав коллектива**

Алексеев Максим Валерьевич, almaxsom@mail.ru, к.ф.-м.н., с.н.с НГУ, Лаборатория теплофизических основ газогидратных технологий ФФ (исполнитель)

## **Информация о гранте**

Грант РФФИ № 20-79-10096 (НГУ) «Теоретическое и экспериментальное исследование пульсационных тепловых труб», руководитель Вожаков Иван Сергеевич, vozhakov@gmail.com, м.н.с НГУ, Лаборатория теплофизических основ газогидратных технологий ФФ.

## **Аннотация**

Проведено трехмерное моделирование течения пузыря Тейлора в круглом канале малого диаметра с использованием VOF метода. Получены подробные характеристики гидродинамики и теплообмена при развитом движении одиночного пузыря Тейлора для чисел Рейнольдса от 100 до 1000 и капиллярного числа в диапазоне 0.0006-0.006 в условиях постоянного теплового потока на стенку. Для подробного исследования течения в жидкой пленке была использована очень подробная сетка, которая сгущалась к стенке, тем самым позволяя разрешить мелкие детали в структуре течения. Показано, что в движущейся системе отсчета в области между газовым пузырем и стенкой вблизи хвоста пузыря существует каскад рециркуляционных зон разных размеров. Причем наименьшая из наблюдаемых зон существует и в лабораторной системе отсчета.

## **Научное содержание работы:**

### **Постановка задачи**

Для расчётов использовался решатель *compressibleInterFoam* из стандартного пула солверов кода OpenFOAM. Моделирование проводилось с использованием системы уравнений, основанной на уравнениях Навье – Стокса для несжимаемой ньютоновской жидкости. Для отслеживания границы раздела двух фаз, используется метод объема жидкости (VOF). Проведено исследование характеристик гидродинамики и теплообмена при развитом движении одиночного пузыря Тейлора для чисел Рейнольдса  $< 1000$  с условиями постоянного теплового потока на стенке.

### **Современное состояние проблемы**

В современном мире нарастает потребность в эффективном рассеивании более высоких тепловых потоков, что стимулирует развитие новых подходов к охлаждению. В настоящее время одним из эффективных теплоотводящих устройств является пульсационная тепловая трубка (РНР), разработанная в начале 1990-х годов как альтернативная модель тепловой трубы [1]. РНР стала многообещающим началом развития миниатюрных охлаждающих систем. В пульсационной трубе тепло переносится от испарителя к конденсатору с помощью паровых пузырей или пузырей Тейлора. Режим Тейлора характеризуется движением пузырьков газа, диаметр которых сравним с диаметром канала, а длина превышает его. Пузырьки отделены друг от друга жидкостными пробками, а от стенки тонкой пленкой жидкости.

Численное моделирование пузырей Тейлора осложняется тем, что толщина пленки намного меньше характерных размеров пузыря. Тем не менее, достаточное разрешение пленки жидкости является необходимым условием к корректному моделированию [2]. Когда инерционные

эффекты значительны, форма пузыря претерпевает значительные деформации. В это время тонкий слой жидкости также значительно деформируется и требования к сетке еще больше усиливаются.

В настоящее время при моделировании потока Тейлора для отслеживания межфазной поверхности часто используют метод объема жидкости (VOF) [3] и метод установки уровня (LS) [4]. Авторам удалось предсказать форму пузыря в различных режимах - от стационарных состояний при малых числах Рейнольдса до аксиально-симметричных нестационарных колебаний при умеренных числах Рейнольдса.

Список литературы:

1. H. Akachi, Pulsating heat pipes, in: Proceedings 5th International Heat Pipe Symp., 1996, 1996.
2. R. Gupta, D. Fletcher, B. Haynes, Taylor flow in microchannels: a review of experimental and computational work, The Journal of Computational Multiphase Flows 2 (1) (2010) 1–31.
3. E. L. Sharaborin, O. A. Rogozin, A. R. Kasimov, Computational study of the dynamics of the Taylor bubble, Fluids 6 (11) (2021) 38
4. M. D. Zimmer, I. A. Bolotnov, Evaluation of length scales and meshing requirements for resolving two-phase flow regime transitions using the level set method, Journal of Fluids Engineering 143 (6) (2021) 061403

#### **Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы**

Моделирование проводилось с использованием системы уравнений, основанной на уравнениях Навье – Стокса для сжимаемой ньютоновской жидкости. Управляющие уравнения модифицированы для описания многофазных потоков как единой жидкости. Для отслеживания границы раздела двух фаз, используется метод объема жидкости (VOF), который использует уравнение переноса для объемной доли жидкости. Для расчётов использовался решатель *compressibleInterFoam* из стандартного пула солверов кода OpenFOAM. Его можно применять для решения течений как для сжимаемых, так для несжимаемых сред. Кроме того использование этого решателя позволяет провести моделирование теплообмена со стенкой. Теплофизические свойства фаз представлены в таблице 1.

Расчетная область построена в виде цилиндра с радиусом  $R=1$  мм и длиной  $L=10$  мм. В сечении сетка состоит из трех блоков. Центральный блок выполнен в виде суперэллипса с равномерной сеткой внутри. Вокруг центрального блока располагался блок с равномерной радиальной сеткой. Следующий блок выполнен тоже в виде радиальной сетки, но со сгущением около стенки. Коэффициент сгущения был равен 0.1. Количество ячеек в сечении составляло 4625 ячеек. По оси  $x$  сетка была равномерная, количество ячеек составляло 1000. Окончательный размер сетки составил 4 625 000 ячеек. В начальный момент времени, в расчётной области устанавливались распределения для давления, температуры, скорости и объёмного содержания жидкости. Начальное поле объёмного содержания устанавливалось так, что образовывался газовый пузырь в жидкости. Начальная форма пузыря выполнена в виде комбинации цилиндра радиусом  $r_a=0.95$  мм и длиной 4.15 мм, и двух эллипсоидов с радиусами вдоль продольной оси  $r_{b,1}=0.53$  мм,  $r_{b,2}=0.65$  мм. Комбинация объёмов приводит к образованию начального пузыря длиной  $l=5.33$  мм, расположенного на расстоянии 1.47 мм от впускного отверстия.

В таблице 1 представлены граничные условия на поверхностях расчётной области. На входе

Таблица 1: Граничные условия и Теплофизические свойства фаз

	inlet	Wall	outlet
$U, m/s$	$(2u, 0, 0) \cdot (1 - (r/R)^2) - (u, 0, 0)$	moving Wall Velocity $(-u, 0, 0)$	pressure Inlet Velocity Outlet Velocity
$T, K$	fixed Value 293.15 K	fixed Gradient 5000 K/m	zero Gradient
$p, Pa$	zero Gradient	zero Gradient	uniform Total Pressure 101315 Pa
alpha	fixed Value 1	constant Alpha Contact Angle 5	calculated 1

	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
$\sigma, N/m$	$72.74 \cdot 10^{-3}$	

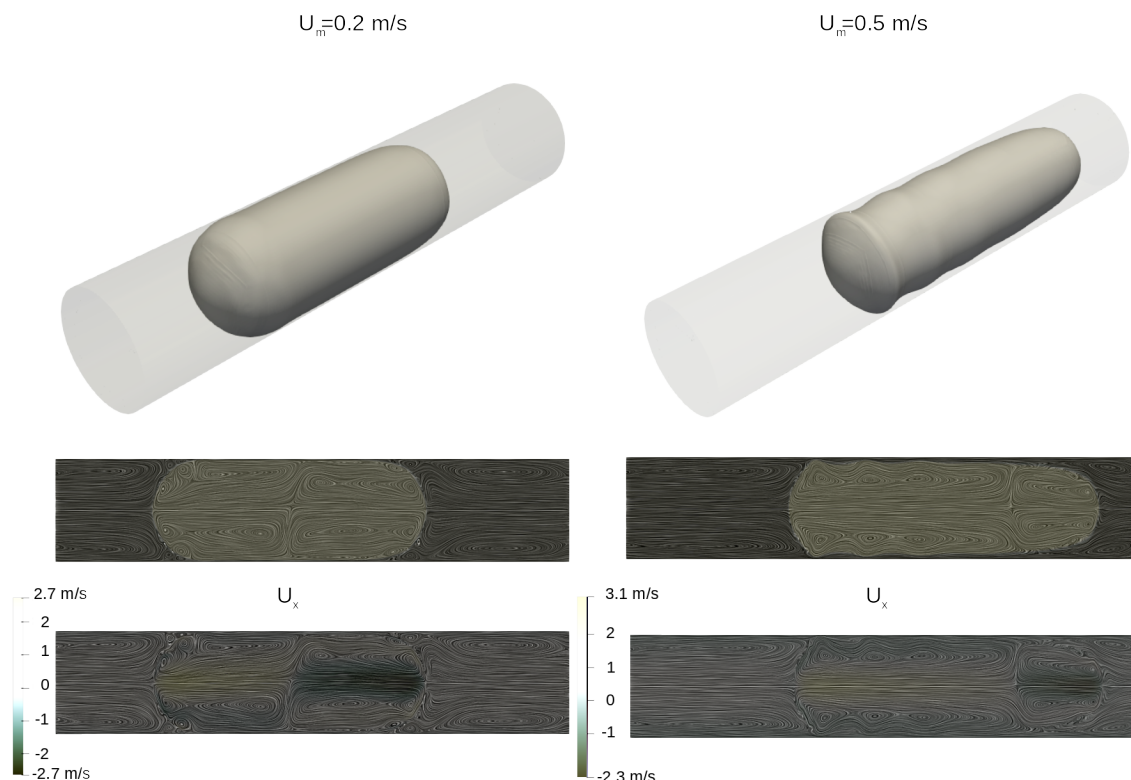


Рис. 1: Форма пузырей и линии тока в системе отсчета пузыря при различных скоростях.

устанавливался параболический профиль скорости, постоянная температура, нулевой градиент давления, постоянное значение объёмного содержания жидкости. На стенке устанавливалась условие движущейся стенки, постоянный градиент температуры, нулевой градиент давления, условие на постоянство контактного угла. На выходе скорость определялась из условия свободного втекания–вытекания в зависимости от давления, давление устанавливалось постоянным, градиент температуры был нулевым, постоянное значение объёмного содержания жидкости. Число Куранта было установлено для контроля использования переменного временного шага и адаптировано для каждого случая, но всегда ниже 0.5. Максимальная невязка в уравнениях была установлена на уровне  $1.0 \cdot 10^{-6}$ .

### Полученные результаты

Проведено трехмерное моделирование Тейлоровского течения и теплопередачи в канале диаметром  $d = 2$  мм и длиной  $5d$ , где в качестве рабочих жидкостей использованы воздух и вода с постоянными свойствами (свойства, указанные в таблице 1). Расходная скорость жидкости

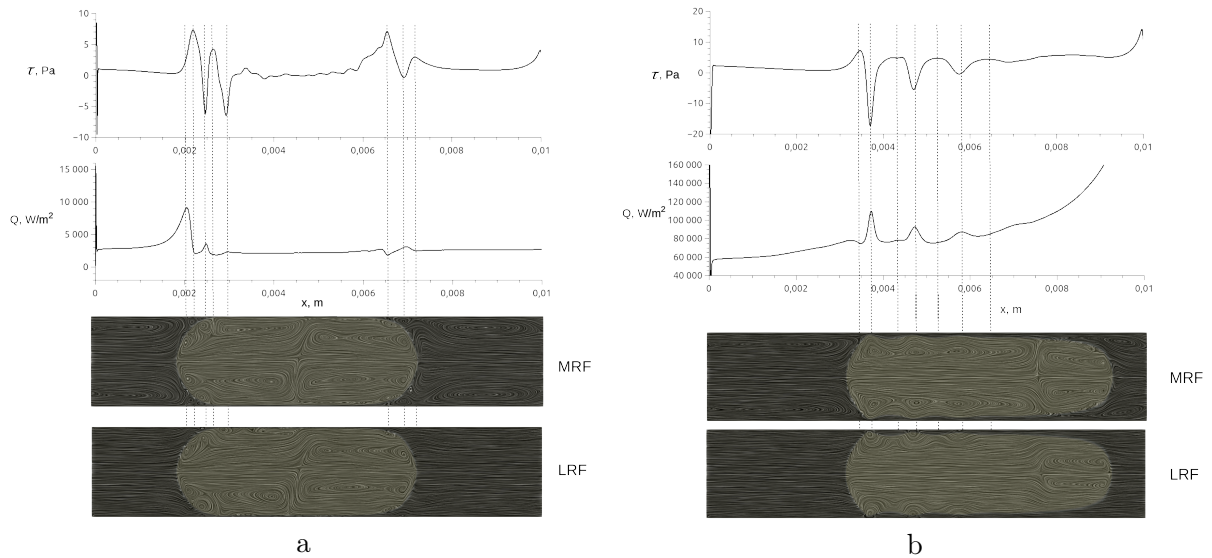


Рис. 2: Трение ( $\tau$ ), тепловой поток ( $Q$ ) и линии тока в движущейся (MRF) и лабораторной системе отчета (LRF) при различных скоростях потока: а- $U_m=0.2$  м/с, б-  $U_m=0.5$  м/с.

$U_m$  варьируются от 0,05 до 0,5 м/с. Число Рейнольдса ( $Re_b = 2\rho_l R U_b / \mu_l$ ) и капиллярное число ( $Ca_b = \mu_l U_b / \sigma$ ) лежат в диапазонах 100-1200 и  $6 \cdot 10^{-4} - 8 \cdot 10^{-3}$ , соответственно. Температура жидкости на входе составляет 293 К. На стенку канала подается постоянный тепловой поток 3 кВт/м<sup>2</sup> в диапазоне расходной скорости 0.05 до 0,2 м/с и 9 кВт/м<sup>2</sup> для расходной скорости 0.5 м/с. На рисунке 1 представлены стационарные формы пузырей для скоростей 0.2 м/с и 0.5 м/с. При малых скоростях в газе наблюдаются симметричные зоны рециркуляции, скорости которых направлены вблизи стенки в сторону движения пузыря в передней части, и в обратную сторону в задней части. При повышении скорости, нос пузыря вытягивается, а у хвоста наблюдаются колебания. При этом граница зон рециркуляции газа в пузыре смещается вперед, что делает их существенно несимметричными.

При низких значениях капиллярного числа ( $Ca_b \ll 1$ ) впереди и позади пузыря появляются полубесконечные области рециркуляции в движущейся системе отсчета (MRF). Средняя скорость жидкости, заключенной в этих областях, равна скорости пузырька. Хвост и нос пузыря имеют округлую форму и занимают практически все поперечное сечение трубки, а толщина пленки жидкости вокруг пузыря стремится к нулю. В этом случае пленку жидкости можно считать практически неподвижной.

Используемая расчетная сетка позволила подробно разрешить течение вблизи пузыря в переходной области от края к пленке жидкости. На рисунке 1 можно увидеть зоны рециркуляции в жидкости вблизи заднего и переднего края пузыря в движущейся системе отсчета. У заднего края пузыря наблюдается каскад таких зон с последовательным уменьшением размера. Можно заметить, что наименьшая зона рециркуляции сохраняется и в лабораторной системе отсчета (LRF)

При повышении капиллярного числа до умеренных значений ( $Ca_b < 1$ ) пузырь начинает двигаться немного быстрее, чем жидкость перед ним. В движущейся системе отсчета перед и позади пузыря появляются замкнутые рециркуляционные зоны.

Касательное напряжение на стенке, полученное по формуле

$$\tau = \mu \frac{\partial u_x}{\partial y}$$

для разных скоростей движения пузыря представлены на рисунке 2. Касательное напряжение на стенке для жидкой пробки при удалении от пузыря постоянное и близко к значениям однофазного течения жидкости. У переднего и заднего края пузырька напряжение резко возрастает. Рассчитанный тепловой поток со стенки по формуле:

$$q = \lambda \frac{\partial T}{\partial y}$$

вблизи пузыря отличается от однофазной области, причем колебания наблюдаются в области пленки, особенно вблизи хвоста пузыря. Вдали от пузыря значения теплового потока соответствуют однофазному течению жидкости и равняется заданному тепловому потоку 3 кВт/м<sup>2</sup> и 9 кВт/м<sup>2</sup> соответственно. Как показано на рисунке 2, провалы на графике теплового потока соответствуют границам зон рециркуляции, где осевая скорость близка к нулю.

#### **Публикации по работе.**

1. Alekseev, M.V., Vozhakov, I.S. 3D Numerical Simulation of Hydrodynamics and Heat Transfer in the Taylor Flow. J. Engin. Thermophys. 31, 299–308 (2022).

<https://doi.org/10.1134/S1810232822020102>

2. Alekseev M.V., Lukyanov A.A., Vozhakov I.S. Numerical Simulation of a Taylor Bubble in a Heated Tube // Interfacial Phenomena and Heat Transfer № 2, Т. 11, С. 65-79

<https://doi.org/10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2023047255> (2023 г.)

#### **Эффект от использования кластера в достижении целей работы**

Моделированию пузырей и снарядов Тейлора в канале является достаточно ресурсоёмким процессом. Создание подробных сеток для расчета связано с аппроксимацией пленки жидкости вблизи стенки и корректного расчета течения. Поэтому для расчёта необходимы существенные вычислительные ресурсы и использование параллельных вычислений на кластерах системах. Работа на кластере помогла уменьшить длительность вычислительных расчетов в несколько раз, тем самым ускорить проводимые исследования в рамках данной работы.