

ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

1. Аннотация

Не смотря на длительный период изучения процесса кипения, многие вопросы до сих пор остаются открытыми. Существующие корреляции теплопередачи работают лишь в узких диапазонах изменения параметров для конкретных жидкостей и конфигураций нагревателя, для которых они были разработаны. Микрогравитация увеличивает пространственные и временные масштабы задачи, позволяя исследовать многочисленные эффекты, скрытые плавучестью в земных условиях, и, как следствие, детально изучить процессы зарождения, роста, отрыва и коалесценции паровых пузырей. Тема данного исследования представляет интерес не только с фундаментальной точки зрения, но и практической, поскольку теплообменные системы с фазовыми переходами находят широкое применение в космической промышленности, где процесс кипения существенно отличается.

С использованием Ansys fluent проведено численное исследование поля температуры нагревателя до образования пузыря для калибровки скоростной термографии. Помимо этого, была проведена попытка моделирования роста одиночного парового пузыря на поверхности нагревателя с различными начальными радиусами методом VOF.

2. Тема работы

Динамика роста одиночного парового пузыря при кипении в условиях микрогравитации

3. Состав коллектива

1. Зорькина Анастасия Ильинична студент 4-го курса бакалавриата физического факультета кафедры физики неравновесных процессов 19348 группы, лаборант ИТ СО РАН.
2. Научный руководитель: к.ф.-м.н., профессор, чл.-кор., зав. лабораторией интенсификации процессов теплообмена ИТ СО РАН Кабов О.А,

4. Научное содержание работы

4.1. Современное состояние проблемы

Кипение – процесс активно, использующийся, как в повседневной жизни, так и во многих областях промышленности. В пищевой, химической, нефтеперерабатывающей, при проектировании атомных электростанций, в теплоэнергетике, медицине - кипение является неотъемлемой частью во многих сферах жизни человека. Благодаря высокому коэффициенту теплопередачи кипение применяется для охлаждения компонентов электронной аппаратуры. В частности, теплообменные системы с фазовыми переходами активно используются в космической отрасли. Но из-за сложности проведения экспериментов, количество работ по влиянию гравитации на процесс кипения ограничено, и требуются дополнительные исследования. Физика кипения зависит от многих факторов: геометрии, шероховатости, смачиваемости и методов подготовки нагреваемой поверхности, теплофизических свойств исследуемой жидкости, условий проведения эксперимента и т. д. Несмотря на длительный период изучения этого процесса, существующие корреляции теплопередачи работают лишь в узких диапазонах параметров, для конкретных жидкостей и конфигураций нагревателей, для которых они были разработаны, что требует дополнительных исследований. Гравитация является важнейшим параметром, влияющим на процесс кипения. Поскольку микрогравитация увеличивает отрывной диаметр пузырьков и уменьшает частоту их вылета, она обеспечивает более высокое временное и пространственное разрешение задачи. Отсутствие плавучести, вместе с ней и конвекции, которые доминируют в земных условиях, позволяет более подробно изучить другие важные физические явления, такие как термокапиллярные потоки и

микроконвекцию, вызванную ростом пузырьков. Проведение экспериментов в условиях микрогравитации позволит создать новые корреляции для будущих космических применений, например, для охлаждения оборудования. Для лучшего понимания механизмов теплопередачи при кипении на нагреваемых поверхностях проведен многомасштабный эксперимент по росту одиночного пузыря в строго контролируемых условиях, в котором принимали участие 13 исследовательских групп из 8 стран.

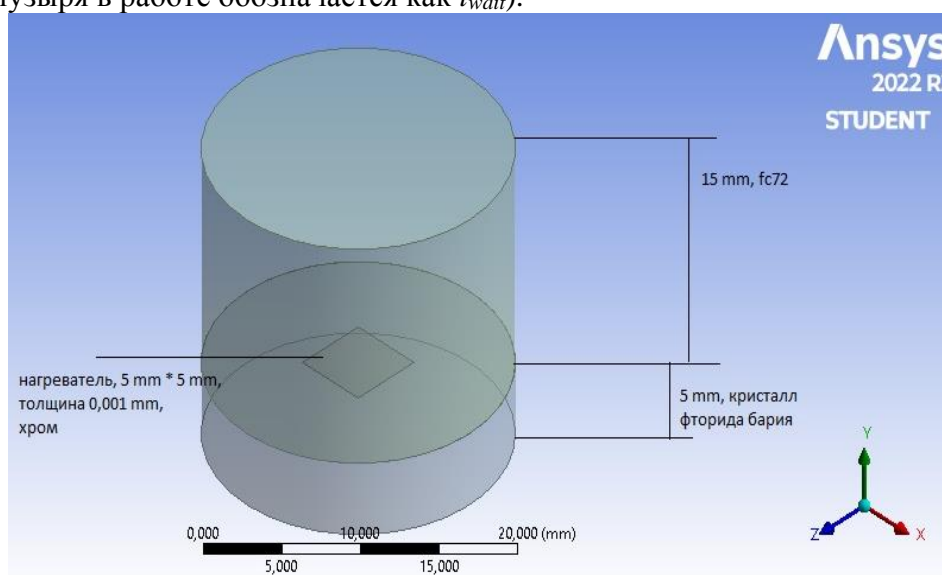
В программе Ansys fluent проведено численное исследование поля температуры нагревателя до момента образования пузыря для точной калибровки скоростной термографии. Проведено моделирование роста парового пузыря на поверхности нагрева методом VOF в двумерном случае, получены результаты роста пузыря в течение 100 ms.

[1]. Straub J. Boiling Heat Transfer and Bubble Dynamics in Microgravity // ADVANCES IN HEAT TRANSFER. – 2001. - Т. 35. – С. 1-116.

[2] Sielaff A. et al. The multiscale boiling investigation on-board the International Space Station: An overview // Applied thermal engineering. – 2022. – С. 117932.

4.2 Подробное описание работы, включая используемые алгоритмы

Тепловизор регистрировал поле температуры нагревателя снизу. В ходе анализа данных ИК камеры установлено, что её калибровка была смещена. Для точного определения поля температуры на нагревателе проведены численные исследования. Задача решалась методом конечных объемов с использованием программного обеспечения Ansys fluent. Решено трехмерное нестационарное уравнение теплопроводности во всей расчетной области. В Ansys geometry построена геометрическая модель (рис.1), состоящая из тонкопленочного нагревателя, изготовленного из хрома, подложки из фторида бария, прозрачной в ИК диапазоне, и жидкой области (в качестве рабочей жидкости используется перфторгексан (FC-72)). С помощью Ansys meshing была построена неструктурированная расчетная сетка рис 1. Были поставлены следующие граничные условия: на нагревателе задан постоянный тепловой поток, величина которого составляла $0,5 \text{ Вт/см}^2$ ($0,75 \text{ Вт/см}^2$; 1 Вт/см^2 ; $1,5 \text{ Вт/см}^2$ в эксперименте величина теплового потока варьировалась, расчет выполнен для каждого случая). Внешние стенки теплоизолированы, начальная температура во всей расчетной области устанавливалась равной $T = 309,84 \text{ К}$ ($314,55 \text{ К}$, $320,55 \text{ К}$). Время расчета составило 2 s и 5 s (соответствует времени работы нагревателя до образования парового пузыря в работе обозначается как t_{wait}).



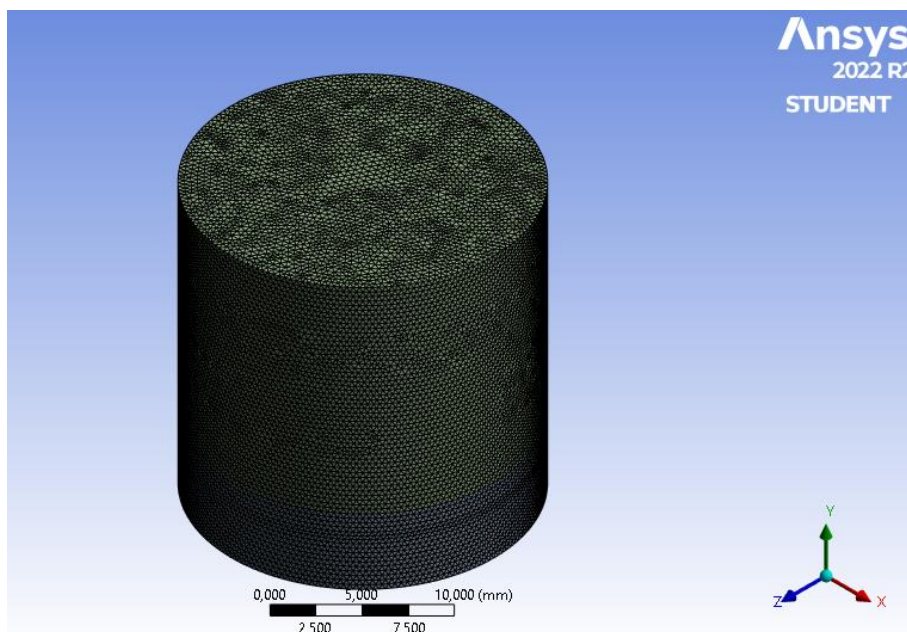


Рис.1. Геометрия и расчетная сетка для нахождения распределения температуры в подложке и в жидкости.

Так же были предприняты попытки решения задачи о росте парового пузыря на поверхности нагрева. Для моделирования движения фаз использовался метод VOF (volume of fluid). Задача решалась в двумерной и осесимметричной постановке с начальными радиусами парового пузыря $R_{нач} = 0,05$ мм. Вблизи поверхности нагревателя произведено сгущение сетки.

Рассмотрим модель для исследования деформаций свободной поверхности. Уравнение сохранения импульса используется для определения поля скорости, решается во всей области и является общим для всех фаз:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla(\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)) + \rho \vec{g} + \vec{F}, \quad (1)$$

где скорость \vec{v} рассматривается как усредненная по массе переменная, при этом $g = 0$ м/с² (рассматриваем условия микрогравитации):

$$v_m = \frac{\alpha_{liq} \rho_{liq} v_{liq} + \alpha_{gas} \rho_{gas} v_{gas}}{\rho} \quad (2)$$

сумма объемных долей равна единице:

$$\alpha_{liq} + \alpha_{gas} = 1 \quad (3)$$

Уравнение сохранения массы с использованием определенных выше переменных имеет стандартный вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad (4)$$

Модель VOF включает в себя эффекты поверхностного натяжения вдоль границы раздела между каждой парой фаз. В данной работе использовалась модель CSF (непрерывной поверхностной силы) для вычисления силы поверхностного натяжения для ячеек, содержащих границу раздела газ–жидкость. В этой модели в правую часть уравнения 1 добавляется капиллярная сила \vec{F} :

$$\vec{F} = \frac{2\rho k \vec{n}}{(\rho_{liq} + \rho_{gas})} \sigma, \quad (5)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, \vec{n} – нормаль к поверхности, которая оценивается по градиенту объемной доли, k – локальная кривизна, которая определяется следующим образом:

$$k = \frac{1}{|\vec{n}|} \left[\left(\frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \nabla \right) |\vec{n}| - (\nabla, \vec{n}) \right] \quad (6)$$

Отслеживание границы раздела между газом и жидкостью осуществляется путем

решения уравнения неразрывности для объемной доли газа:

$$\frac{\partial \rho_{gas} \alpha_{gas}}{\partial t} + \text{div}(\rho_{gas} \alpha_{gas} \vec{v}) = 0 \quad (7)$$

Уравнения сохранения энергии выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \text{div}(\vec{v}(\rho E) + P) = \text{div}(k_{eff} \nabla T) \quad (8)$$

В модели VOF энергия E рассматривается как усредненная по массе переменная:

$$E = \frac{\sum_{i=1}^2 \alpha_i \rho_i E_i}{\sum_{i=1}^2 \alpha_i \rho_i}, \quad (9)$$

индекс i отвечает за номер фазы, E_i равна теплоемкости i -ой фазы помноженную на температуру.

Сопряжение между полем скорости и давления реализуется с помощью алгоритма SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations). Для решения уравнения неразрывности использовалась схема PRESTO! (PREssure STaggering Option). Для определения градиентов использовался алгоритм Least Squares Cell Based. Дискретизация конвективных членов производилась с помощью схемы Second Order Upwind. Схема дискретизации Geo-reconstruction использовалась для аппроксимации границы раздела. Алгоритм непрерывной поверхностной силы (CSF) был использован для моделирования поверхностного натяжения. В модель включались линейная зависимость плотности жидкости и поверхностного натяжения от температуры.

4.3 Полученные результаты

На рис.2 представлено рассчитанное распределение температур. На рис. 3 температура в подложке и в жидкости вдоль оси y . Таким образом, определив распределение температуры нагревателя и ее изменение за время t (расчет был проведен для времени $t_{wait} = 2$ s и $t_{wait} = 5$ s) и сравнив их с экспериментальными данными, записанными за 1 с до образования пузыря, получен сдвиг температуры с тепловизора для каждого случая. Сравнение температур, определенных в результате численного расчета с данными с ИК камеры (с учетом полученного сдвига) приведено на рис. 4, значения температуры (эксперимента и расчета) усреднены по площади квадрата со стороной 2 мм, расположенного в центре нагревателя. Так, с использованием Ansys fluent была проведена калибровка ИК камеры, что позволило с высокой точностью определить распределение температуры на нагревателе и её зависимость от времени.

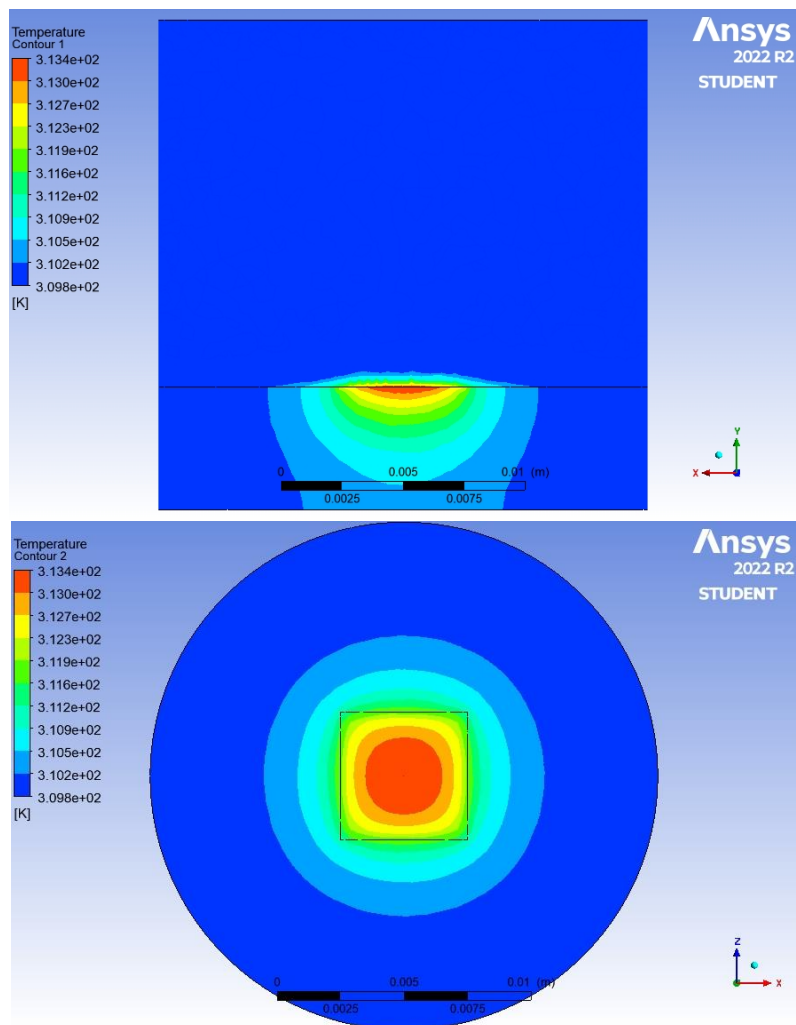


Рис.2. Полученное распределение температуры в подложке и жидкости для плоскостей $z = 0$ и $y = 0$ соответственно в момент времени $t = 2$ s, $q = 1$ W/cm², $T_{\text{начальное}} = 309,84$ K.

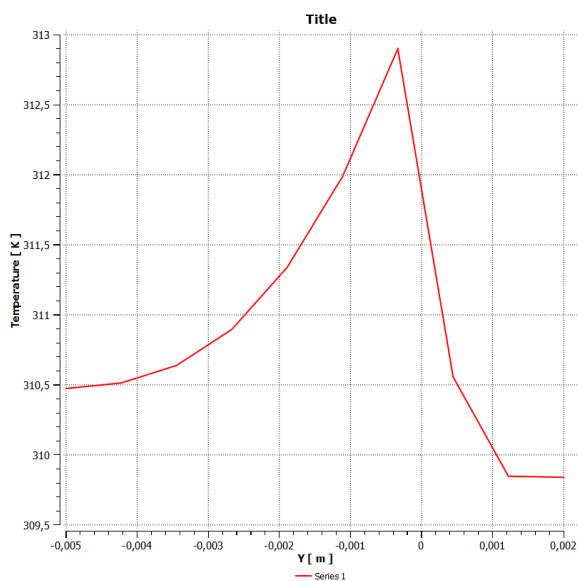


Рис.3. Распределение температуры в расчетной области вдоль оси симметрии y ,

$$q = 1 \text{ W/cm}^2, T = 309,84 \text{ K}, T_{\text{sub}} = 1 \text{ K}, t_{\text{wait}} = 2 \text{ s}$$

$p = 500$ мбар, $T_{\text{sub}} = 1$ °C, $t_{\text{wait}} = 2$ с, $q = 0,5$ Вт/см²

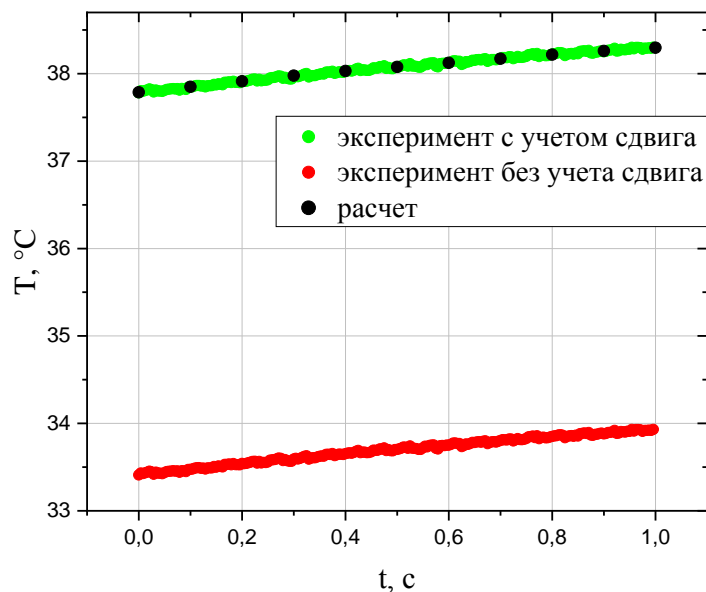


Рис.4. Усредненная температура нагревателя: экспериментальная (с учетом и без учета сдвига) и рассчитанная, результаты представлены за 1 с до инициализации пузыря

Получены предварительные результаты по росту парового пузыря на поверхности нагревателя. Начальный радиус пузыря $R = 0,05$ мм, в качестве граничного условия с поверхности нагревателя (прямоугольник – хром) задан постоянный тепловой поток $q = 0,5$ Вт/см², рабочая жидкость – вода, $T_{\text{начальное}} = 374$ К во всех областях. Моделирование фазового перехода требует больших вычислительных ресурсов, что достигнуто при помощи использования оборудования ИВЦ НГУ. На рис. 5 и 6 представлена эволюция парового пузыря в различные моменты времени.

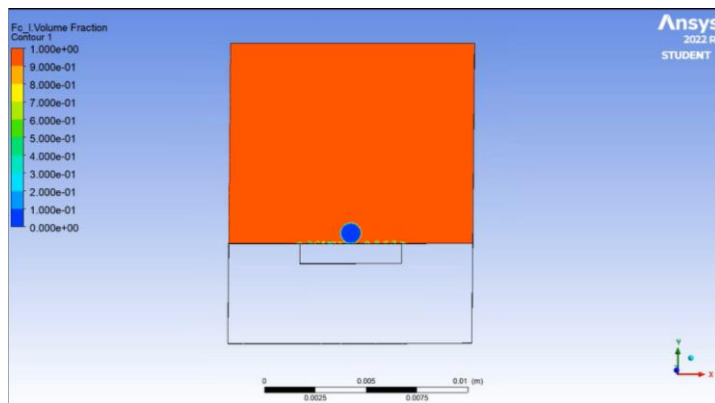


Рис. 5. Начальный момент роста пузыря, $t = 0$ s.

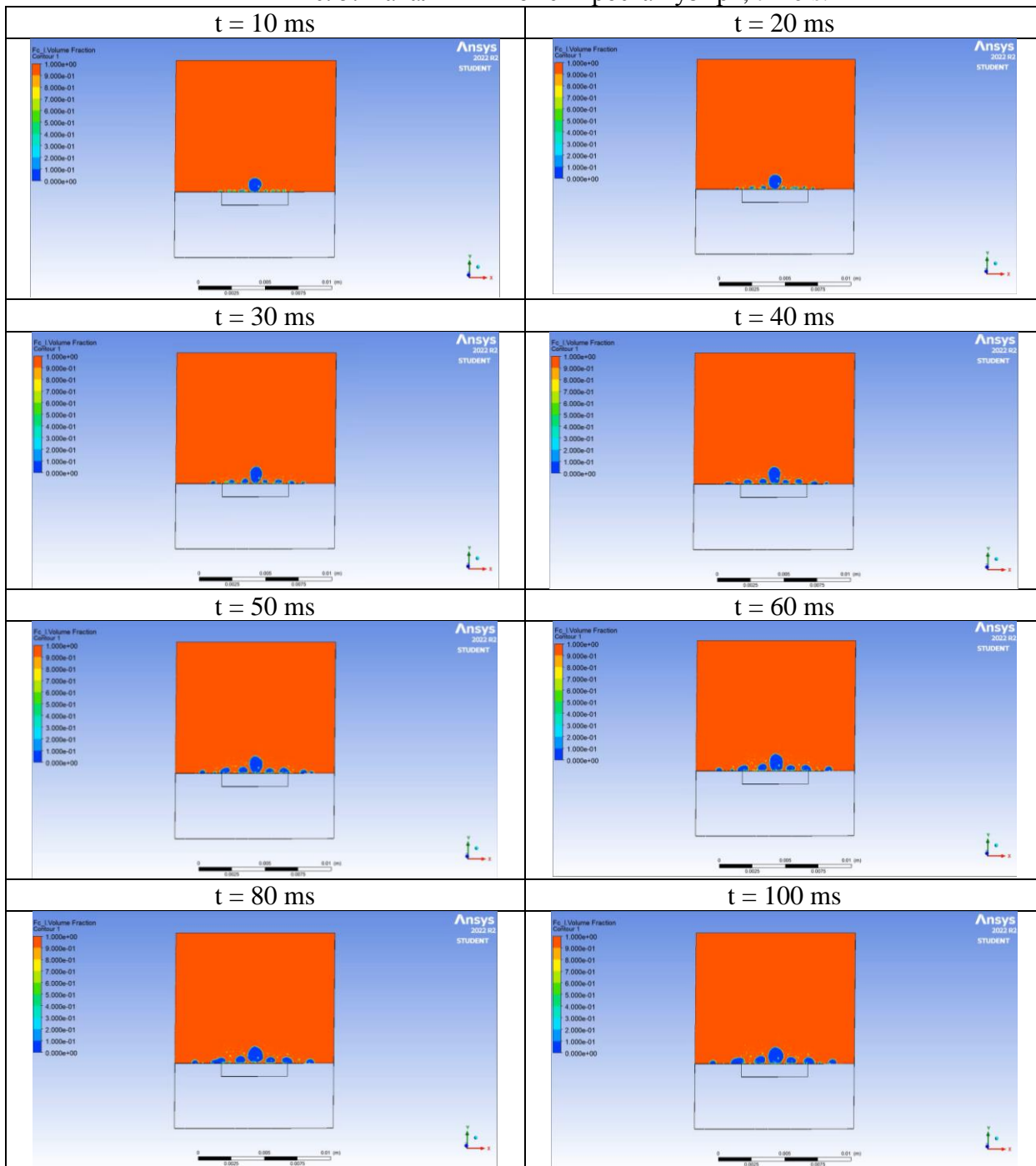


Рис. 6. Пузырь в различные моменты времени

5. Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Проведение численного моделирования методом VOF (volume of fluid) на обычном ПК является сложной задачей, поскольку решение приведенных уравнений требует больших вычислительных ресурсов. Использование кластера позволило в несколько раз сократить время расчета.