



Поднимающийся пузырь

Этот пример показывает, как моделировать две несмешивающиеся жидкости, отслеживая взаимодействие текучей среды. Пузырь масла поднимается через воду и сливается с маслом, уже находящимся вверху ёмкости. Первоначально существует три разные области: изначально неподвижный пузырёк масла, масло вверху ёмкости, и вода окружающая пузырёк масла. (см. рис.1) Ёмкость – цилиндрической формы с диаметром – $1 \cdot 10^{-2}$ м. и высотой – $1,5 \cdot 10^{-2}$ м. Слой масла имеет вязкость $0,0208 \text{ Па} \cdot \text{с}$ и плотность – 879 кг/м^3 . Для воды вязкость – $1,01 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ и плотность – 1000 кг/м^3 . Эффекты плавучести позволяют масляному пузырьку подниматься сквозь слой воды. Как только пузырёк достигнет границы жидкостей, он сольется со слоем масла.

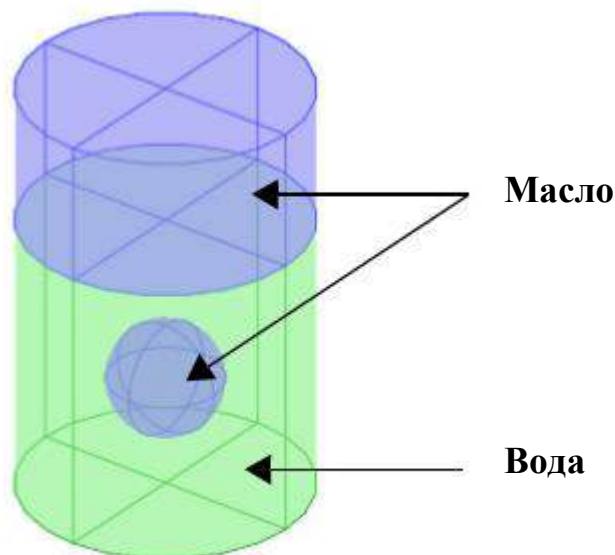


Рис.1: Изначальная позиция пузырька. Геометрия ассиметрична.

Как изложено выше топология границы жидкостей меняется со временем. Вы начинаете работать с тремя разделенными слоями, а заканчиваете с двумя. метод набора уровня, а также метод изменения поля хорошо подходят для моделирования движущихся границ, где происходит смена топологии. Оба метода доступны в модуле – «Вычисление динамики жидкости» как предопределенные методы взаимодействия физик. Этот пример показывает, как использовать методы Ламинарного двустороннего потока, Набора уровней.

Определение модели

Представление и конвекция границы жидкости.

Интерфейс набора уровня определяет границу жидкости, отслеживая изолинии функции набора уровня, ϕ . Набор уровня или изосчетный контур $\phi=0.5$ определяет расположение границы. Уравнение переноса и возврата к исходному значению ϕ , выглядит:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \phi = \gamma \nabla \cdot \left(\varepsilon \nabla \phi - \phi(1 - \phi) \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|} \right)$$

Где \mathbf{u} (СИ единицы измерения м/с) – скорость жидкости и γ (м/с), ε (м/с) – исходные значения. Параметр ε определяет толщину слоя вокруг границы где ϕ стремится от 0 к 1. Когда стабилизация используется для уравнения уровня, вы можете использовать толщину границы $\varepsilon = h_c/2$, где h_c – характеристика размера сетки, пройденной границы. Параметр γ – определяет количество возвратов. Удобное значение параметра γ – максимальная величина скорости, возникающей в модели.

Поскольку функция набора уровней изменяется плавно, её можно использовать для определения плотности и динамической вязкости:

$$\rho = \rho_w + (\rho_o - \rho_w)\phi$$

и

$$\mu = \mu_w + (\mu_o - \mu_w)\phi,$$

Здесь $\rho_w, \rho_o, \mu_w, \mu_o$, обозначают постоянные плотности и вязкости воды и масла соответственно.

Перемещение массы и импульса

В Ламинарном двустороннем потоке, Наборе уровней, перемещение массы и импульса управляется не сворачивающимися уравнениями Нэвье-Стокса, включая поверхностное натяжение:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \mu (\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{st}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$$

В представленных уравнениях ρ (СИ единица измерения кг/м³) – плотность, \mathbf{u} (м/с) – скорость, t (с) - время, p (Па) – давление, и μ (Па·с) – вязкость. Импульсные уравнения содержат гравитацию – $\rho \mathbf{g}$ и составляющие силы поверхностного натяжения, обозначаемые \mathbf{F}_{st} .

Поверхностное натяжение

Сила поверхностного натяжения определена как:

$$\mathbf{F}_{st} = \nabla \cdot \mathbf{T} = \nabla \cdot [\sigma \{ \mathbf{I} + (-\mathbf{n}\mathbf{n}^T) \} \delta]$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения, \mathbf{I} – единичная матрица, \mathbf{n} – единица измерения нормальной среды, и δ – дельта-функция Дирака, не равная нулю только в жидкостной среде. Нормальная среда вычисляется из формулы:

$$\mathbf{n} = \frac{\nabla \phi}{|\nabla \phi|}$$

Параметр набора уровней ϕ также используется для аппроксимации дельта-функции с помощью плавно меняющейся:

$$\delta = 6|\phi(1-\phi)||\nabla\phi|$$

Начальные условия

В момент времени $t=0$, скорость равна нулю. На рисунке 2 показана начальная функция набора уровня. Она автоматически посчитана, используя этап исследования фазы, нахождением расстояния до начала границы, D_{wi} .

Инициализированная функция набора уровней затем определяется из решения аналитического устойчивого состояния для прямого взаимодействия жидкостей:

$$\phi_{1,0} = \frac{1}{1 + e^{D_{wi}/\epsilon}}, \quad \phi_{2,0} = \frac{1}{1 + e^{-D_{wi}/\epsilon}}$$

В первоначально заполненных плоскостях Жидкостью 1 и Жидкостью 2 соответственно,

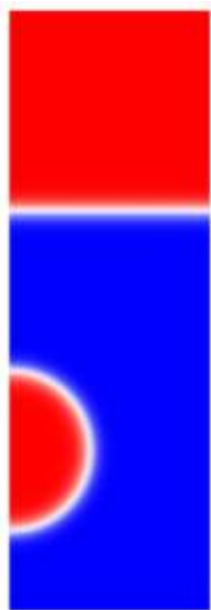


Рисунок 1: Поверхностный и контурный график, инициализированный функцией набора уровней.

Граничные условия

Не используем условия скольжения, $u=0$ вверху и внизу и условие мокрой стены на правой границе. Левая граница соответствует оси симметрии.

Рисунки 3 и 4 содержат скриншоты разделения жидкостей. Скриншоты показывают, как пузырёк проходит через воду и соединяется с маслом наверху. Пока пузырёк поднимается, его форма остаётся сферической из-за поверхностного натяжения и высокой вязкости масла. Когда он попадает на поверхность воды, сливается с маслом и создаёт волны на поверхности.

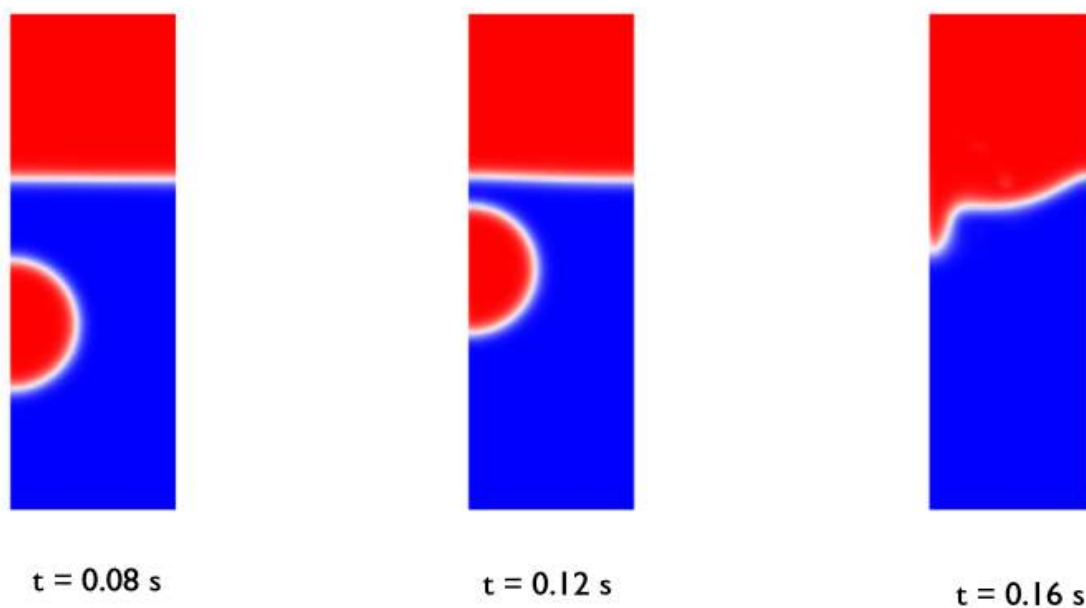


Рисунок 3: Скриншот, показывающий границы до и после того как пузырёк попадает на поверхность.

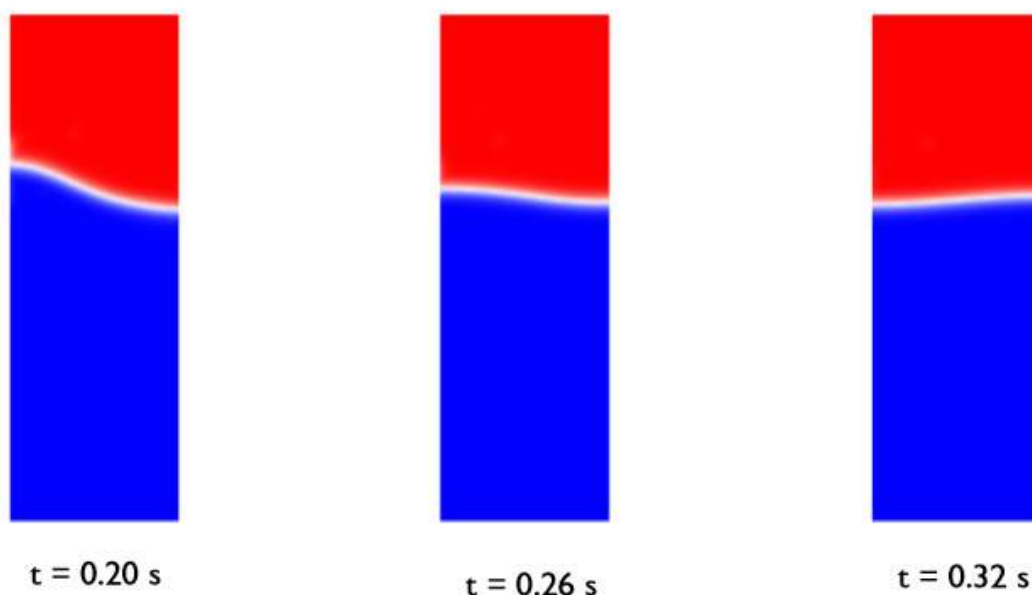


Рисунок 4: Скриншот показывает границу после того как пузырёк сливается с маслом вверху.

Один из способов исследования качества числовых результатов это проверить сохранение масс. Потому что нету реакций и течи через границы, общая масса каждой жидкости не должна меняться со временем. На рисунке 5 показана зависимость общей массы масла от времени. В течении симуляции масса изменяется не более чем на 0.2% , это показывает, что модель хорошо сохраняет массу.

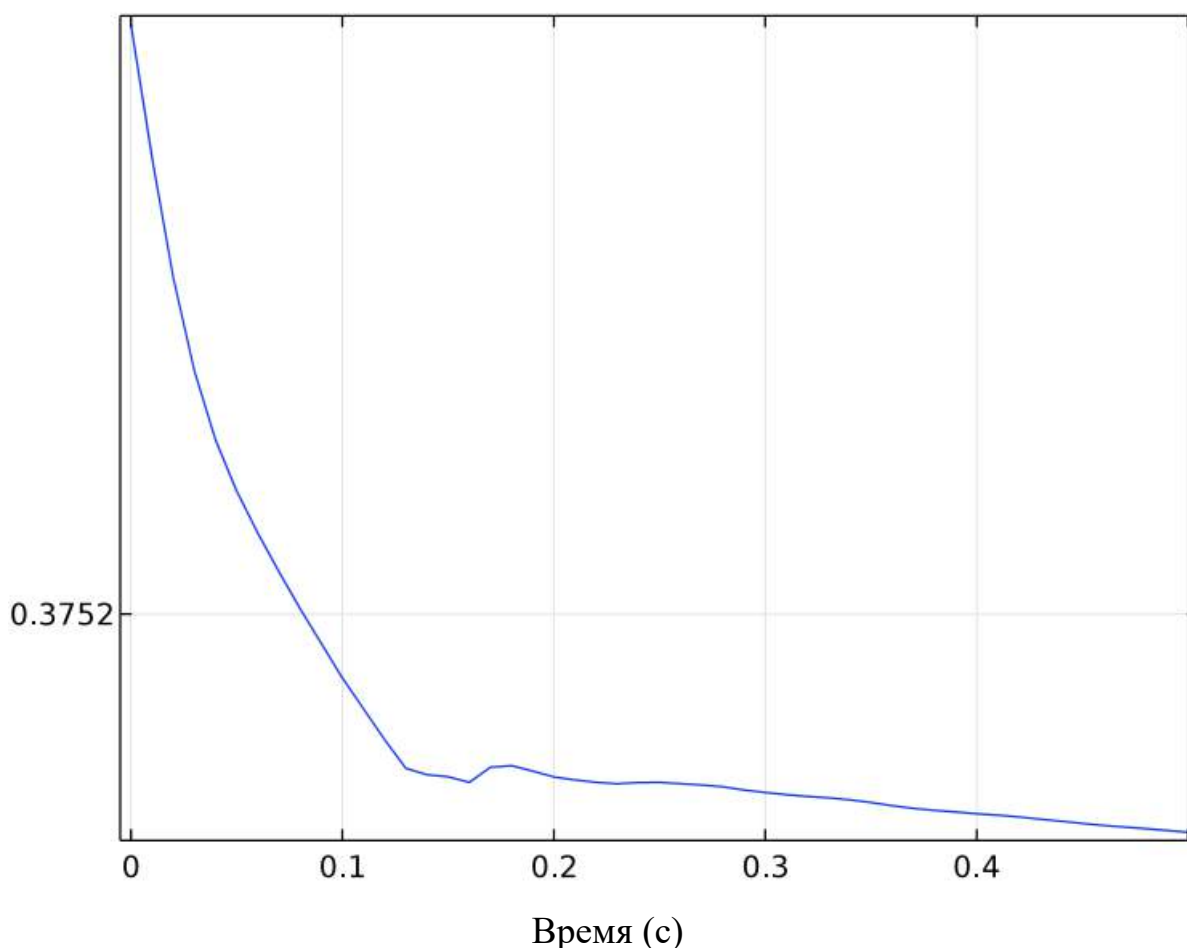


Рисунок 5: Общая масса масла как функция времени. Общая потеря массы в течении симуляции очень мала, менее 0,2%.

Заметки о реализации в COMSOL

Модель проста для создания и решения, используя или метод ламинарного двустороннего потока или метод набора уровней. Автоматически создано два шага исследования. Первый, показывает функцию набора уровней, а второй – рассчитывает динамику двустороннего потока.

Путь в библиотеке приложений:

CFD_Module/Multiphase_Tutorials/rising_bubble_2daxi

Инструкции по моделированию

Из меню Файл выбрать – Новый

В окне Новый, нажмите Мастер модели

Эта модель лицензируется в соответствии с COMSOL Software License Agreement 5.3.

Все торговые марки являются собственностью их соответствующих владельцев.

www.comsol.com/trademarks

Мастер модели:

1. В окне Мастера модели, нажмите 2D с осью симметрии.
2. В дереве Выбор Физики, выбрать – Поток Жидкости>Мультифазовый поток>Двусторонний поток, Набор уровней>Ламинарный двусторонний поток, Набор уровней.
3. Нажмите Добавить.
4. Нажмите Исследовать.
5. В дереве Выбор Исследования, выбрать – Предустановленные исследования для выбранных физических сред>Переходящее инициализацию фазы.
6. Нажмите Выполнить.

Геометрия:

1. В окне Построение Модели – под Компонентом 1, нажать Геометрия 1.
2. В окне Настройки геометрии найдите опцию – Единицы измерения.
3. Из списка Единицы длины выберите – мм.

Прямоугольник 1:

1. На панели инструментов Геометрия, нажмите Примитивы и выберите прямоугольник.
2. В окне Настройки для прямоугольника найдите опцию Размер и Форма.
3. В текстовом поле Ширина, пишем 5.
4. В текстовом поле Высота, пишем 15.

Многоугольник 1:

1. Правый клик по Прямоугольник 1 и выбрать – Построить выбранное.
2. На панели инструментов Геометрия, нажмите Примитивы и выберите – Многоугольник.
3. В окне Настройки для многоугольника, найдите опцию Координаты.
4. В текстовом поле r пишем 0 5.
5. В текстовом поле z пишем 10.

Круг 1:

1. Правый клик по Многоугольник 1 и выбрать – Построить выбранное.
2. На панели инструментов Геометрия, нажмите Примитивы и выберите Круг.
3. В окне Настройки для круга найдите опцию Размер и Форма.
4. В текстовом поле Радиус, пишем 2.
5. В текстовом поле Угол сектора, пишем 180.

6. Найдите опцию Расположение. В текстовом поле z – пишем 4.
7. Найдите опцию угол поворота. В текстовом поле Вращение, пишем -90.
8. Правый клик по Круг 1 и выбрать – Построить выбранное.

Объединение форм

В построителе модели, под Компонент 1 > Геометрия 1 правый клик на Объединение форм и выбрать – Построить выбранное.

Добавление материала

1. На панели инструментов Дом, нажать добавить материал, и открыть окно добавления материала.
2. Перейти в это окно.
3. В дереве выбрать – Жидкости и Газы>Жидкости>Преобразованное масло.
4. Нажать Добавить к Компоненту в окне панели инструментов.

Добавление материала

1. Перейти в окно Добавление материала.
2. В дереве выбрать Жидкости и Газы>Жидкости>Вода.
3. Нажать добавить к компоненту в окне панели инструментов.
4. На панели инструментов Дом, нажать Добавить материал, для того чтобы закрыть окно добавления материалов.

Вы можете оставить поле Выбор геометрической сущности пустым на этом этапе. Оно определится когда вы используете этот материал в текущих свойствах жидкости.

Набор Уровней

В окне Построителя Модели под Компонентом 1, нажмите Набор Уровней.

Начальное расположение 1

1. На панели инструментов Физика, нажмите Границы, и выберите Начальные расположение.
2. Выберите только границы 7,11 и 12.

Мультифизика

1. В окне Построителя Модели, под Компонентом 1 > Мультифизика, нажмите Двусторонний поток, Набор уровней 1.
2. В окне Настройки для Двустороннего потока, Набора уровней, найдите опцию свойства Жидкости 1.
3. Из списка Жидкость 1 выбрать – Преобразованное масло.
4. Найдите опцию свойства Жидкости 2, из списка выберите воду.
5. Найдите опцию Поверхностное Натяжение. Из списка коэффициентов Поверхностного Натяжения выбрать коэффициент из Библиотеки, взаимодействие жидкость/жидкость.
6. Выбрать Оливковое масло/вода, 20° из списка.

Набор Уровней

Модель Набора Уровней 1

1. В окне построителя модели, под Компонентом 1 > Набор уровней нажмите Модель Набора Уровней 1.
2. В окне настроек модели, найдите опцию Модель Набора Уровней.
3. В текстовом поле γ , пишем 0,1.

Начальные значения 2

1. На панели инструментов Физика, нажмите Области и выберите Начальные значения.
2. В окне настроек, найдите опцию Начальные значения.
3. Из списка Начальная Область выбрать Жидкость 2 ($\phi=1$).
4. Выбрать только Область 1.

Начальные значения 1

1. В окне построителя модели под Компонентом 1 > Набор уровней, нажмите Начальные значения 1.
2. В окне настроек, найдите опцию Начальные значения.
3. Из списка Начальная Область выбрать Жидкость 1 ($\phi=0$).

Ламинарный поток

На панели инструментов Физика, нажмите Набор Уровней и выберите Ламинарный поток.

В окне построителя модели, под Компонентом 1, нажмите Ламинарный поток.

Объемная сила 1

1. На панели инструментов Физика, нажмите Области и выберите Объемная сила.

2. В окне построителя модели, правый клик на Объемная сила 1 и выбрать Переименовать.
3. В диалоговом окне напишите Гравитация в текстовом поле.
4. Нажать ОК.
5. В окне настроек для Объемной силы, выбрать опцию Расположение области.
6. Из списка Расположение выбрать – все поверхности.
7. Найдите опцию Объемная сила. Укажите вектор F как

0	r
$-g_const*spf.rho$	z

Точка ограничения давления 1

1. На панели инструментов Физика, нажмите Точки и выберите Точка ограничения давления.
2. Выбрать только Точку 7.

Мультифизика

Мокрая стена 1

1. На панели инструментов Физика, нажмите Мультифизика и выберите граница> Мокрая стена.
2. Выберите только границы 9 и 10.

Определения

Перед созданием сетки, добавьте переменную для вычисления массы масла на поверхности модели. Вы можете использовать эту переменную позже для тестирования сохранения массы.

Переменные 1

1. На панели инструментов Дом, нажмите Переменные и выберите Локальные переменные.
2. В окне настроек найдите опцию Переменные.
3. Введите в таблицу данные ниже:

Name	Expression	Unit	Description
rho_oil	$tpf1.rho1*tpf1.Vf1$	kg/m ³	Oil mass per unit volume

Сетка 1

В окне построителя модели, под Компонентом 1, правый клик Сетка 1 и выбрать Свободная треугольная.

Размер

1. В окне Настроек для размера, найдите опцию Размер Элемента.
2. Нажмите Дополнительно.
3. Найдите опцию Параметры размера элемента. В текстовом поле Максимальный размер элемента введите – 0,2.
4. Нажмите Построить всё.

Исследование 1

Шаг 2: Зависимость от времени

1. В окне построителя модели, разверните узел - Исследование 1, затем нажмите Шаг 2: Зависимость от времени.
2. В окне настроек Зависимости от времени найдите опцию Настройки исследования.
3. В текстовом поле Время введите диапазон (0,0.5/50,0.5)

Решение 1

1. На панели инструментов Исследование, нажмите Показать стандартный решатель.
2. В окне Построитель модели, разверните узел Решение 1.
3. В окне Построитель модели, разверните узел Решение 1 > Настройки решателя > Решение 1 > Зависимые переменные 2, затем нажмите Скорость поля.
4. В окне Настройки для Поля, найдите опцию Масштабирование.
5. Из списка Методы, выберите Ручной.
6. В текстовом поле Масштаб введите 0.01.
7. В окне Построителя модели, под Исследованием 1 > Настройки решателя > Решение 1 > Зависимые переменные 2, нажмите Давление.
8. В окне Настройки для Поля найдите опцию Масштабирование.
9. Из списка Методы, выберите Ручной.
10. В текстовом поле Масштаб, введите 100.
11. В окне Построителя модели, нажмите Решение 1.
12. В окне Настройки для Решения, нажмите Вычислить.

Результаты

Затем, протестируйте в какой степени общая масса масла сохраняется.

Поверхностное слияние 1

На панели инструментов Результаты, нажмите Больше полученных значений и выберите Слияние>Поверхностное слияние.

Полученные значения

1. В окне Настройки для Поверхностного слияния, найдите опцию Выбор.
2. Из списка Выбор, выберите Все поверхности.
3. Нажмите Переместить Выражение в верхний правый угол области Выражений. Из меню выберите Компонент 1 > Определения > Переменные > rho_oil – масса масла на единицу объема.
4. Найдите раздел Выражения. В таблицу введите:

Expression	Unit	Description
rho_oil	g	Oil mass per unit volume

5. Найдите раздел Настройки Слияния. Поставьте флажок – Посчитать объемный интеграл.
6. Нажмите Оценить.

Таблица

1. Перейдите в окно Таблица.
2. Нажмите График по таблице в окне панели инструментов.

Результаты

Группа графиков 6

Сравним результаты с показанными на рисунке 5. Как показывает график, масса сохраняется с точностью до 0.1%.

Объемная доля жидкости 1

1. В окне построителя модели, под Результатами, нажмите Объемную долю жидкости 1.
2. В окне Настройка для двумерных графиков, найдите раздел Настройки графика.
3. Уберите флажки Границы набора данных графика.
4. В окне Построителя модели разверните узел Объемная доля жидкости 1, затем кликните Объемная доля жидкости.
5. В окне Настройки для поверхностей, найдите раздел цвет и стиль.
6. Из списка цветов, выберите WaveLight.
Чтобы воспроизвести графики, представленные на рисунках 2 и 3, постройте графики для значений времени 0, 0.08, 0.12, 0.16, 0.20, 0.26 и 0.32с.

7. В окне Построителя модели, нажмите Объемная доля жидкости 1.
8. В окне Настройка для двумерных графиков, найдите раздел Данные.
9. Из списка Время, выберите 0.
10. На панели инструментов Объемной доли жидкости 1, нажмите построить.
Повторите последние 2 шага для значений времени 0.08, 0.12, 0.16, 0.20, 0.26 и 0.32с.

Объемная доля жидкости 1 1

Добавьте график среза величины скорости, чтобы осесимметричная модель превратилась в 3Д.

1. В окне построителя Модели развернуть узел Результаты > Скорость 1.
2. Правый клик на Результаты>Объемная доля жидкости 1 и выберите Срез.
3. В настройках Среза выберите раздел Данные Плоскости.
4. Из списка плоскостей выберите плоскости zx.
5. В текстовом поле Плоскости введите 1.
6. В окне построителя Модели кликните на Объемная доля жидкости 1 1.
7. В настройках окна для 3Д графика выберите раздел данные.
8. Из списка Время, выберите 0.11.
9. На панели инструментов Объемная доля жидкости 1 1 нажмите построить.

Объемная доля жидкости 1 1

1. В окне построителя Модели, под Результатами, нажмите Объемная доля жидкости 1 1.
2. На панели инструментов Объемная доля жидкости 1 1 нажмите построить.
Наконец, сделайте анимацию используя текущие графики.
3. Нажмите Анимация и выберите Запустить.

Экспорт

В окне построителя Модели выберите на вкладке Результаты >Экспорт правым кликом на Анимация 1 и нажмите Играть.