OpenFOAM

открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач механики сплошных сред

Что такое OpenFOAM:

- *Среда разработки и численного решения задач МСС*
- *Основной язык программирования — C++*
- *Операционная система — любая POSIX совместимая*
- *Полностью модульная платформа, реализующая метод конечных объёмов для решения дифференциальных уравнений в частных производных*

Краткие сведения

Тип	**Open Source Field Operation And Manipulation**
Разработчик	OpenCFD, Limited
Язык программирования	C++
Операционная система	Linux, UNIX
Первый выпуск	2004
Последняя версия	v1706
Лицензия	GNU GPL
Сайт	openfoam.com

Задачи OpenFOAM:

- *Гидродинамика ньютоновских и неньютоновских вязких жидкостей как в несжимаемом, так и сжимаемом приближении с учётом конвективного теплообмена и действием сил гравитации. Для моделирования турбулентных течений возможно использование RANS-моделей, LES- и DNS-методов. Возможно решение дозвуковых, околозвуковых и сверхзвуковых задач;*
- *Задачи теплопроводности в твёрдом теле;*
- *Многофазные задачи, в том числе с описанием химических реакций компонент потока;*
- *Задачи, связанные с деформацией расчётной сетки;*
- *Сопряжённые задачи;*
- *Некоторые другие задачи, при математической постановке которых требуется решение дифференциальных уравнений в частных производных в условиях сложной геометрии среды;*
- *Распараллеливание расчёта как в кластерных, так и многопроцессорных системах.*

Достоинства и недостатки:

Помимо основных модулей, существуют специализированные модули:

- *Несжимаемые течения;*
- *Сжимаемые течения;*
- *Многофазные течения;*
- *Моделирование методом крупных вихрей и прямое численное моделирование*
- *Горение;*
- *Задачи молекулярной динамики;*
- *Методы частиц в ячейках;*
- *Теплопередача;*
- *Прямое статистическое моделирование;*
- *Электромагнитные поля;*
- *Твердые тела*
- *Финансы*

Основные уравнения:

Основные уравнения: законы сохранения массы, импульса, скаляров и объема в интегральной форме (справедливы для любой сплошной среды – различаются только замыкающие законы):

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho \,\mathrm{d}V + \int_S \rho(\mathbf{v}-\mathbf{v}_\mathrm{b})\cdot\mathbf{n}\,\mathrm{d}S = 0$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho\mathbf{v} \,\mathrm{d}V + \int_S \rho\mathbf{v}(\mathbf{v}-\mathbf{v}_\mathrm{b})\cdot\mathbf{n}\,\mathrm{d}S = \int_S (\mathbf{T}-p\mathbf{I})\cdot\mathbf{n}\,\mathrm{d}S + \int_V \rho\mathbf{b}\,\mathrm{d}V$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \rho\phi \,\mathrm{d}V + \int_S \rho\phi(\mathbf{v}-\mathbf{v}_\mathrm{b})\cdot\mathbf{n}\,\mathrm{d}S = \int_S \Gamma\nabla\phi\cdot\mathbf{n}\,\mathrm{d}S + \int_V \rho b_\phi\,\mathrm{d}V$$

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\int_V \mathrm{d}V - \int_S \mathbf{v}_\mathrm{b}\cdot\mathbf{n}\,\mathrm{d}S = 0$$

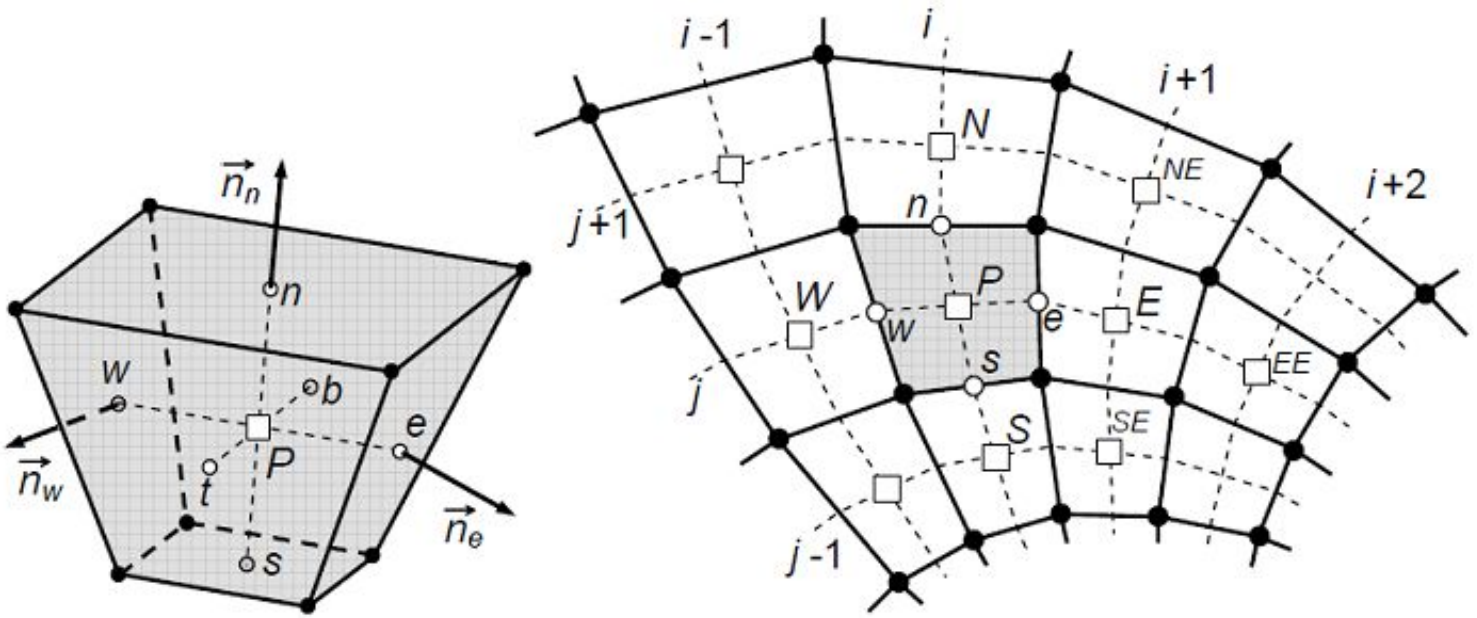
Метод конечных объемов

Метод конечных объемов (FVM) используется для аппроксимации законов сохранения

Вычислительная область разбивается на конечное число непересекающихся контрольных объемов произвольной многогранной формы

Структура данных:

- *Вершины*
- *Ребра (соединяют вершины)*
- *Грани (замкнутый многоугольник из ребер)*
- *Ячейки (объемы ограниченные гранями)*



В методе конечных объемов используются три уровня аппроксимации:

- *Аппроксимация интегралов по поверхности, объему и времени*
- *Интерполяция в точках, отличных от расчетных (центры контрольных объёмов)*
- *Численное дифференцирование (аппроксимация градиентов)*

Простейшие аппроксимации второго порядка точности

- *Метод средней точки для интегралов (Midpoint rule);*
- *Линейная интерполяция;*
- *Центральные разности (линейные* функции формы).

Код OpenFOAM

В терминах языка C++ большинство математических дифференциальных и тензорных операторов в программном коде уравнений может быть представлено в удобочитаемой форме.

Математическая формулировка

$$\frac{\partial \rho\varphi}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho\vec{U}\varphi) - \vec{\nabla}(\rho\Gamma_{\varphi}\vec{\nabla}\varphi) = S_{\varphi}$$

Код OpenFOAM:

```
volScalarField phiEqn
(
      fvm::ddt(rho,phi)
      +
      fvm::div(F,phi)
      fvm:: laplacian(gamma,phi)
      ==
      Su + fvm::Sp(Sp,phi)
);
F = linearInterpolate(U)& mesh.Sf()
```

Структура и средства OpenFOAM

Иерархия средств OpenFOAM

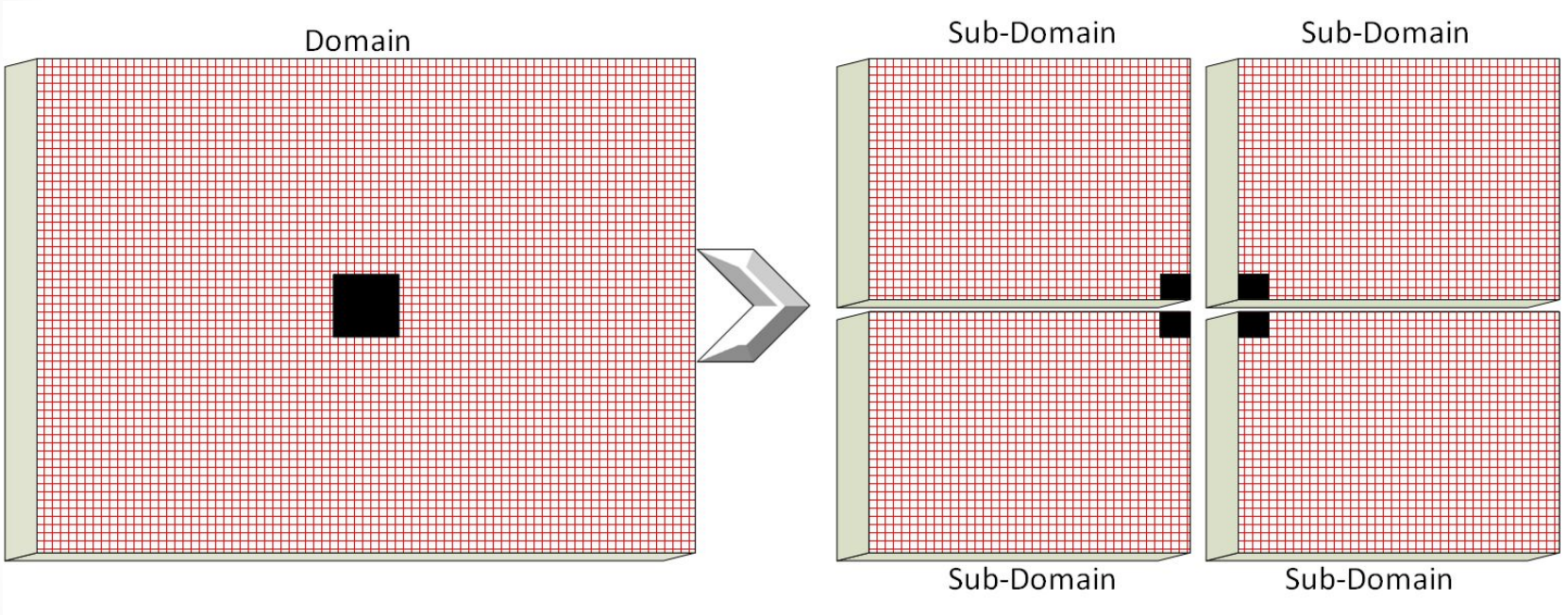
- *Одно из преимуществ OpenFOAM — гибкая ориентация на пользователя:*
- *Продвинутому пользователю и разработчику — средства решения задач механики сплошных сред в виде классов C++.*
- *Инженеру — набор небольших программ (решателей и утилит), предназначенных для решения задач узкого круга (и соответственно, ограниченным набором исходных данных)*

Иерархия решателей (моделей МСС) OpenFOAM

Находятся в папке $FOAM_APP/solvers:

- *DNS - Прямое численное моделирование*
- *Basic – Простейшие уравнения*
- *Combustion – Задачи с горением*
- *Compressible - Сжимаемые задачи (в т.ч. с M=1 и M>1)*
- *DiscreteMethods – Дискретные методы*
- *Electromagnetics – электромагнетизм*
- *Financial – финансовые*
- *HeatTransfer – Тепло- и массо- обмен*
- *Incompressible – Несжимаемые течения*
- *Lagrangian – Течение жидкости с учетом движения отдельных частиц*
- *Multiphase – Многофазные течения*
- *StressAnalysis – Анализ прочности*

Распараллеливание расчётов



Иерархия утилит OpenFOAM

Находятся в папке $FOAM_APP/utilities:

- *ErrorEstimation – Оценка погрешности численного решения уравнений*
- *Mesh – утилита для работы с сеткой*
- *PostProcessing - Обработка результатов расчетов*
- *Preprocessing – Подготовка исходных данных*
- *Miscellaneous – Разнообразные утилиты, не отнесенные к другим группам*
- *Surface – Работа с поверхностями сеток*
- *ParallelProcessing – Декомпозиция и сбор расчетной области при параллельных вычислениях*
- *Thermophysical – Расчет термодинамических параметров*

Используемые численные методы

Структура OpenFOAM является полностью модульной, каждый этап численного решения базовых уравнений выносится в отдельный модуль:

- *Дискретизация расчётной области (создание сетки)*
- *Дискретизация уравнений по времени и пространству*
- *Методы решения систем линейных алгебраических уравнений*
- *Граничные условия (в том числе пристеночные функции)*
- *Модели турбулентности (Reynolds-Averaged Stresses, Large Eddy*
- *Simulation)*
- *Контроль качества сетки*
- *Контроль сходимости решения*

Аспекты решения практических задач

Решаемая в OpenFOAM задача обязательно содержит:

- *Начальные и граничные условия (каталог 0)*
- *Расчетную сетку и физические свойства (каталог constant)*
- *Параметры интегрирования уравнений (каталог system)*

Для исследователя важно:

- *Правильно задать размерность*
- *Корректно задать граничные условия*
- *Проверить качество сетки*
- *Уметь анализировать процесс сходимости*

При постановке задачи в OpenFOAM используется основная структурная единица — словарь (dictionary).

Словарь (dictionary) *— формализованное описание исходных данных в виде текстового файла состоит из:*

- ***Содержимого***
- ***Заголовка***

Содержимое *может включать в себя:*

- *Описание под-словарей (sub-dictionary) — фигурные скобки {}*
- *Списки (именованные и анонимные) — круглые скобки ()*
- *Ключи — имя и значение переменной*
- *Описание размерности (может входить в состав ключа) — квадратные скобки []*
- *Динамические описания — исходный код на C++, переменные*
- *Комментарии в стиле C++ - //, /* … */;*

Главные элементы заголовка *— имя словаря (object), его расположение в иерархии случая (location) и тип словаря — class.*

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------------*\
| =========                      |                                            |
| \\      /  F ield              | OpenFOAM: The Open Source CFD Toolbox      |
|  \\    /   O peration          | Version:  2.3.0                            |
|   \\  /    A nd                | Web:      www.OpenFOAM.org                 |
|    \\/     M anipulation       |                                            |
\*---------------------------------------------------------------------------*/
FoamFile
{
    version     2.0;
    format      ascii;
    class       dictionary;
    location    "system";
    object      controlDict;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //
```

Основные единицы словаря OpeFOAM

```
mixture
{
    specie
    {
        nMoles          1;
        molWeight       28.96;
    }

    vertices
    (
        (0 0 0)
        (1 0 0)
        (1 1 0)
        (0 1 0)
        (0 0 0.1)
        (1 0 0.1)
        (1 1 0.1)
        (0 1 0.1)
    );
```

- *Под-словарь (sub-dictionary) выделяется фигурными скобками, ключ — включает в себя имя и значение (иногда размерность) и точку с запятой.*
- *Списки перечисляются в круглых скобках, разделителем служит пробел*

Основные единицы словаря: размерности OpeFOAM

```
dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];
```

- *Размерность указывается в квадратных скобках*

№	Характеристика	Единица измерения	Символ
1	Масса	килограмм	кг
2	Длина	метр	м
3	Время	секунда	с
4	Температура	Кельвин	К
5	Количество вещества	моль	моль
6	Ток	Ампер	А
7	Сила света	кандела	Кд

Динамические описания OpenFOAM

```
$internalField
```

- *Можно использовать переменные, которые содержат заданное значение или значение под-словаря*

```
#include
```

- *Подключать текстовые файлы*

Динамические описания OpenFOAM

- *Или программировать пользовательские подпрограммы*

```
inlet
    {
        type                codedFixedValue;
        redirectType        swirl;
         code
         #{
            const vector axis(1, 0, 0);
            vectorField v = 2.0*this->patch().Cf() ^ axis;
            v.replace(vector::X, 1.0);
            operator==(v);
         #};
         value              $internalField;
     }
```

Примеры граничных условий

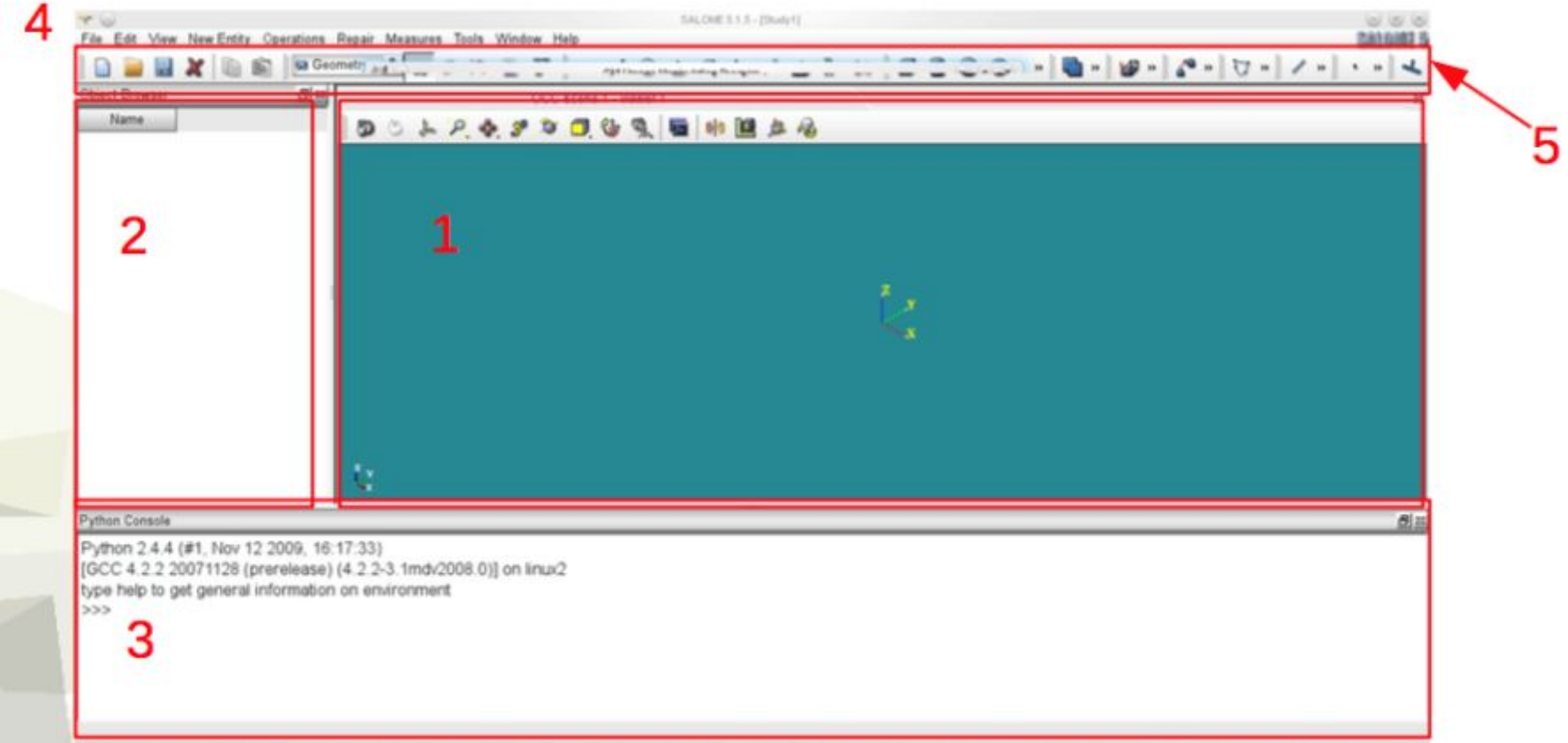
Название ГУ	***Описание***
fixedValue	*ГУ 1-го рода. Необходимо задать фиксированное значение на входе. Условие Дирихле.*
fixedGradient	*ГУ 2-го рода. Необходимо задать градиент величины на границе.*
zeroGradient	*ГУ 2-го рода. Нулевой градиент на границе. Условие Неймана.*
Mixed, symmentry plane, periodic and cyclic	*Смешанное условие, условие симметрии, переодическое и циклическое условие*
freestream, frestreamPressure	*Условие свободного потока*

Примеры граничных условий

inletOutlet	*Действует как ГУ 1-ого рода, если массовый (объемный) поток входит в расчетную область и как ГУ 2-ого рода, если поток выходит из расчетной области. Иными словами, zeroGradient если жидкость выходит из расчетной области и фиксированное значение (inletValue) если входит*
outletInlet	*Обратно inletOutlet* *Иными словами, zeroGradient если жидкость входит в расчетную область и фиксированное значение (outletValue) если выходит из нее*

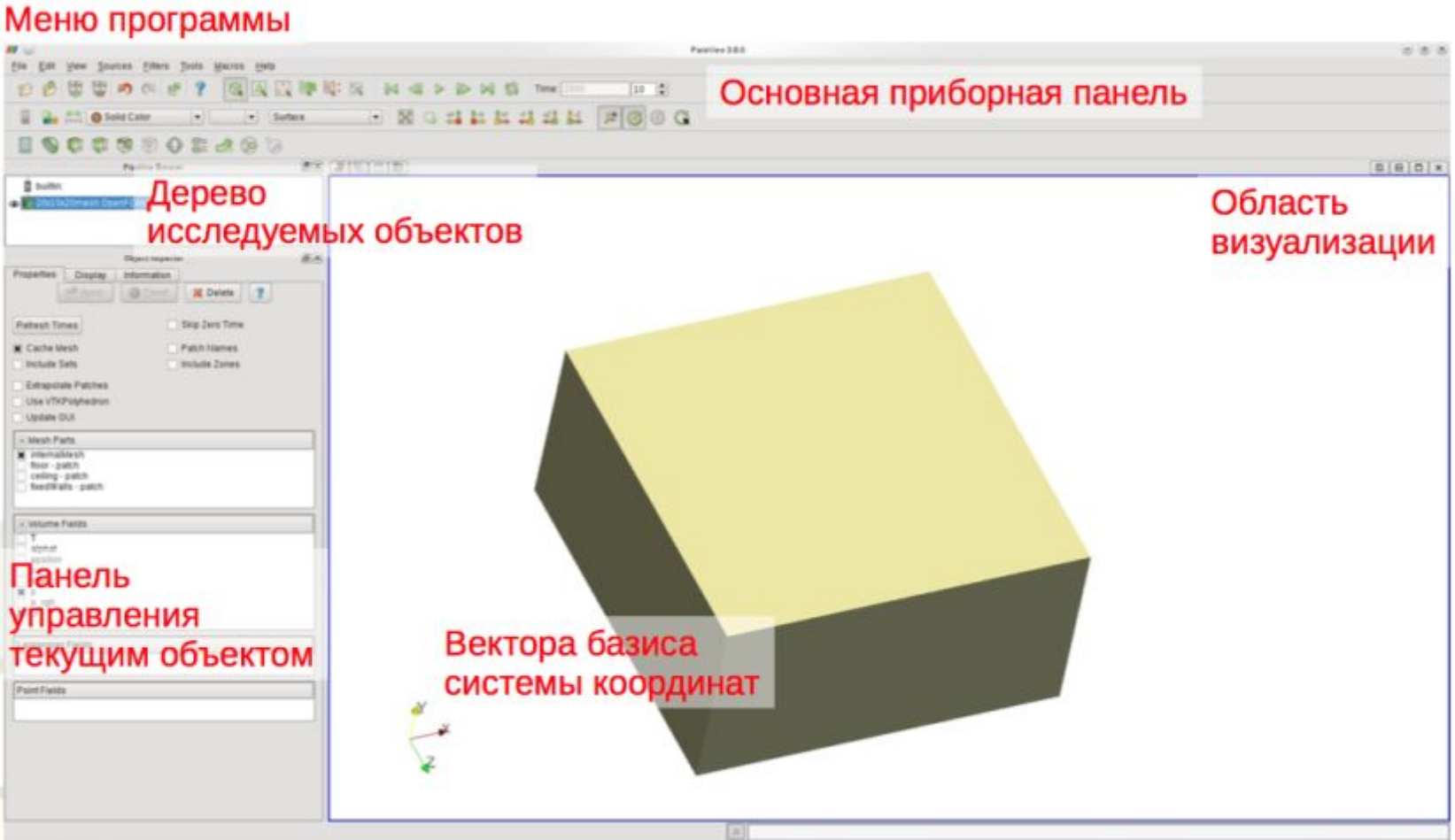
Связь с другими проектами

- ***SALOME –*** *пакет для работы с геометрией и сетками*
  Основное окно (1,центр), дерево объектов (2, слева), окно сообщений системы (3, снизу), меню (4, сверху), панель инструментов (5, между меню и основным окном)



Связь с другими проектами

- ***ParaView*** *– пакет для визуализации результатов и расчетных сеток, поставляется по умолчанию вместе с OpenFOAM*



Ответвления

- **BlueCFD**— *кросс-компилированная версия OpenFOAM для запуска на операционных системах Windows, производная от OpenFlow. Включает в себя дополнительные инструменты и функциональность, используемые в OpenFOAM. Разработка поддерживается компанией blueCAPE.*

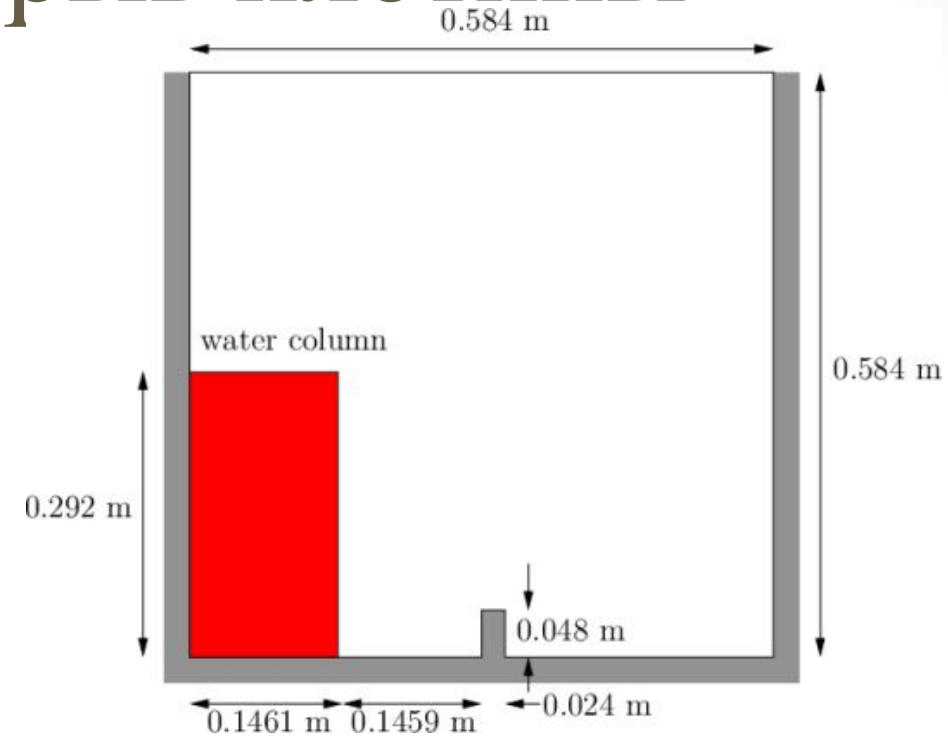
- **FreeFOAM**— *версия OpenFOAM независящая от операционной системы, портативна и более удобна для установки. Проект развивается параллельно с официальными выпусками OpenCFD и не имеет дополнительного функционала. Для сборки использует CMake.*

- **OpenFlow** *это исходный код дополнения для кросс-компилированного дистрибутива OpenFOAM, работающего на операционных системах Windows. Компоненты OpenFOAM в blueCFD разработаны на основе исходного кода OpenFlow. Разработка поддерживается компанией Symscape.*

- **OpenFOAM-extend** *поддерживается Wikki Ltd. Эта ветка включает в себя разработки сообщества, большая часть которых может быть установлена в официальную версию OpenFOAM с минимальными изменениями. Ветка разрабатывается параллельно с официальной версией OpenFOAM, но в последних версиях выпуски extend ветки отстают на один-два года.*

Пример «Прорыв плотины»

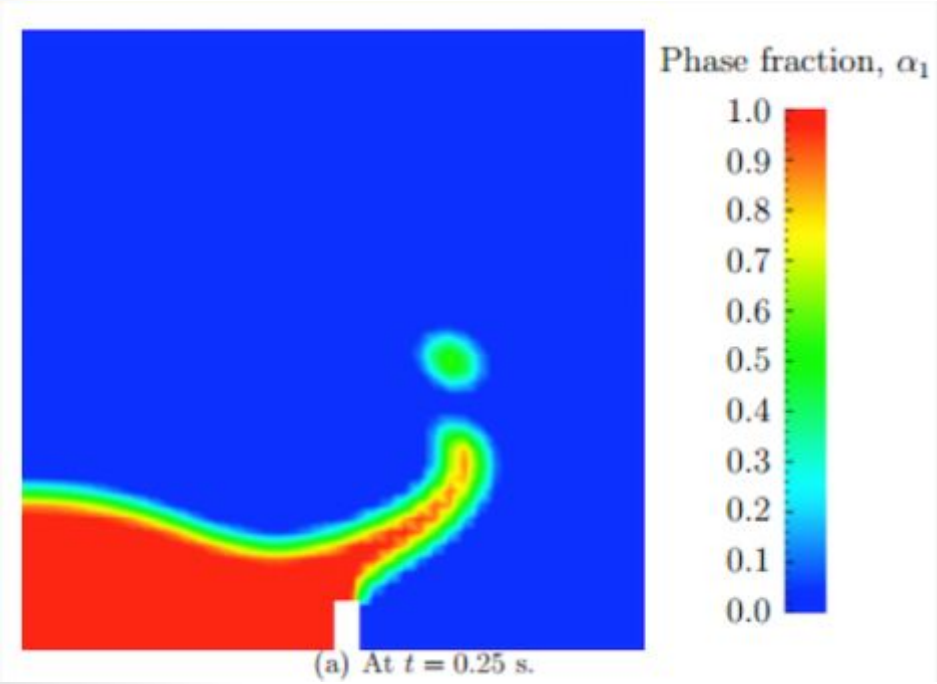
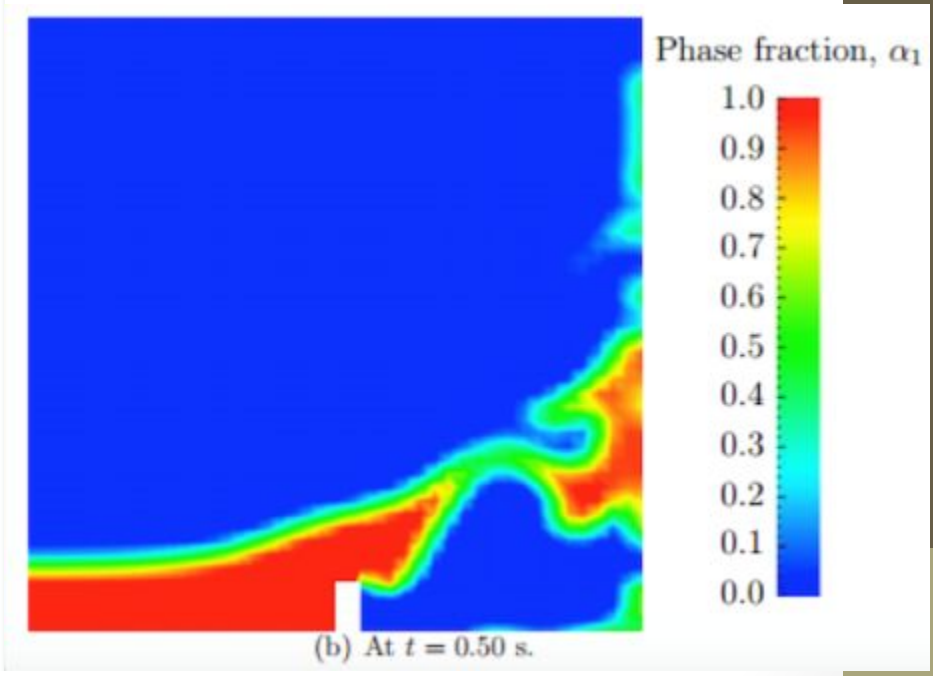
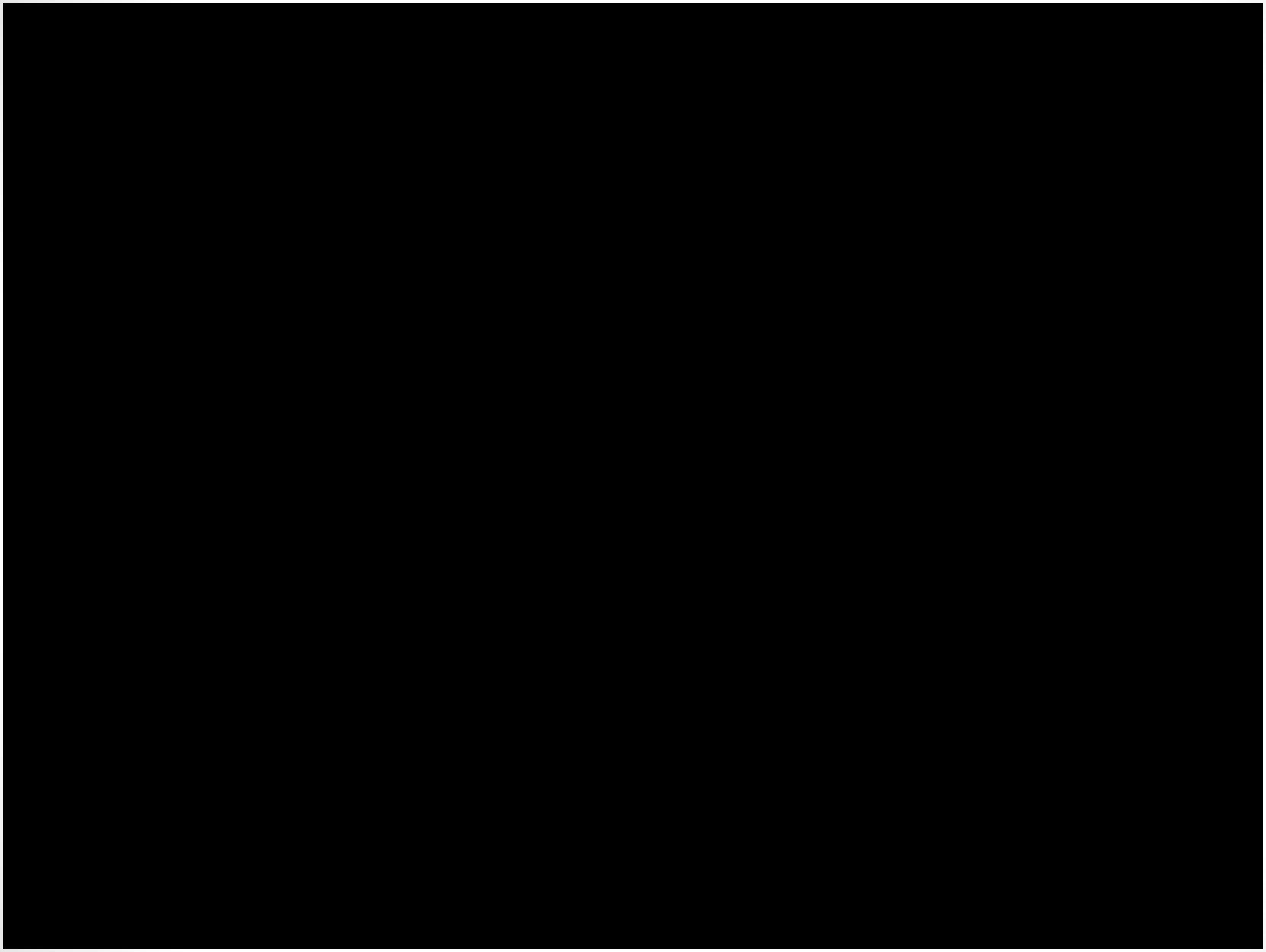
- *Мы будем решать упрощенную двумерную задачу прорыва плотины с использованием решателя interFoam. Особенностью задачи является нестационарное течение двух жидкостей, разделенных интерфейсом, или свободной поверхностью.*



Испытательная установка состоит из столба воды находящегося в состоянии покоя, расположенной позади мембраны, на левой стороне бака. В момент времени T = 0 с, мембрана удаляется, а столб воды падает. Во время распада, вода воздействует на препятствие на дне резервуара и создает сложную структуру потока, в том числе несколько захваченных карманов воздуха. Геометрия и начальная установка показана на рисунке.

Граничные условия

Пользователь может исследовать геометрии границ, порожденную blockMesh путем просмотра граничного файла в постоянном каталоге / Polymesh. Файл содержит список из 5 граничных патчей:

- *leftWall (левая стена)*
- *rightWall (правая стена)*
- *lowerWall (нижняя стена)*
- *атмосфера*
- *defaultFaces (стены по умолчанию)*

Положение фазы α при определенном времени