

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, околзвуковых 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):

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV + \int_S \rho(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV + \int_S \rho \mathbf{v}(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S (\mathbf{T} - p\mathbf{I}) \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \rho \mathbf{b} dV$$

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_S \rho \phi(\mathbf{v} - \mathbf{v}_b) \cdot \mathbf{n} dS = \int_S \Gamma \nabla \phi \cdot \mathbf{n} dS + \int_V \rho b_\phi dV$$

$$\frac{d}{dt} \int_V dV - \int_S \mathbf{v}_b \cdot \mathbf{n} dS = 0$$

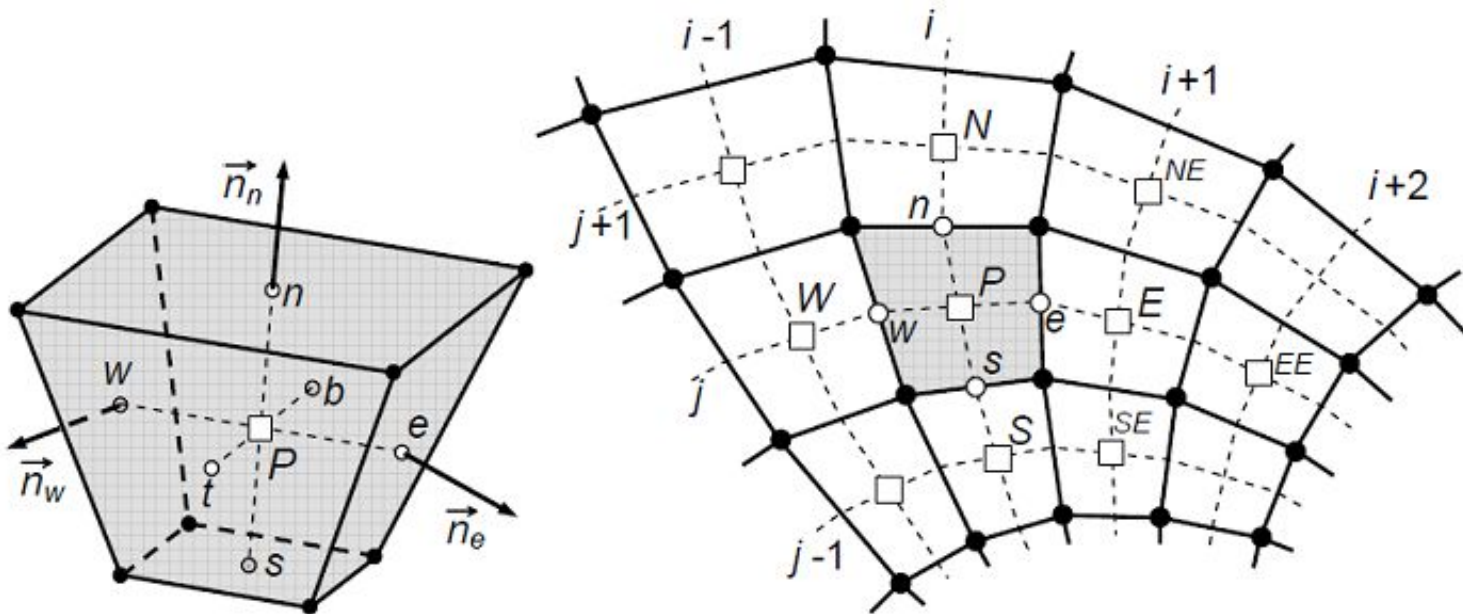
Метод конечных объемов

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

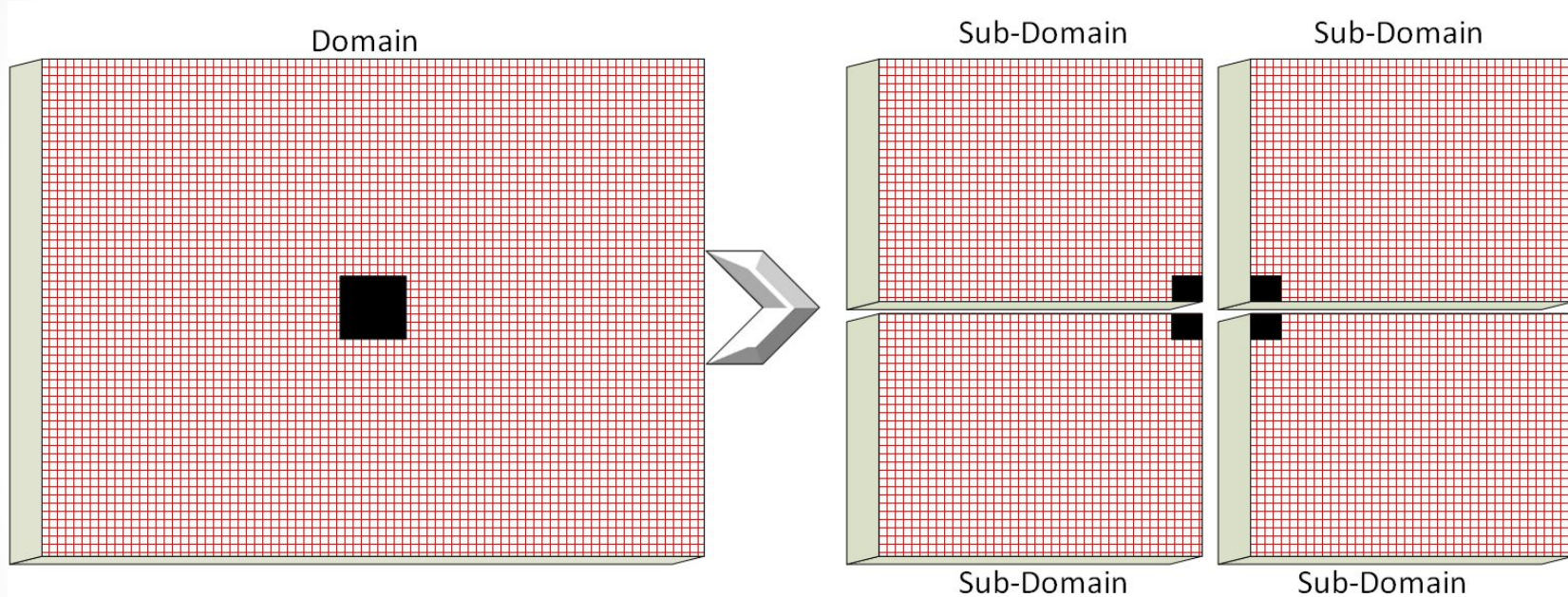
- *Одно из преимуществ OpenFOAM — гибкая ориентация на пользователя:*
- *Продвинутому пользователю и разработчику — средства решения задач механики сплошных сред в виде классов C++.*
- *Инженеру — набор небольших программ (решателей и утилит), предназначенных для решения задач узкого круга (и соответственно,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

```
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 OreFOAM

`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 подсловаря

`#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
<i>fixedValue</i>	ГУ 1-го рода. Необходимо задать фиксированное значение на входе. Условие Дирихле.
<i>fixedGradient</i>	ГУ 2-го рода. Необходимо задать градиент величины на границе.
<i>zeroGradient</i>	ГУ 2-го рода. Нулевой градиент на границе. Условие Неймана.
<i>Mixed, symmetry plane, periodic and cyclic</i>	Смешанное условие, условие симметрии, периодическое и циклическое условие
<i>freestream, freestreamPressure</i>	Условие свободного потока

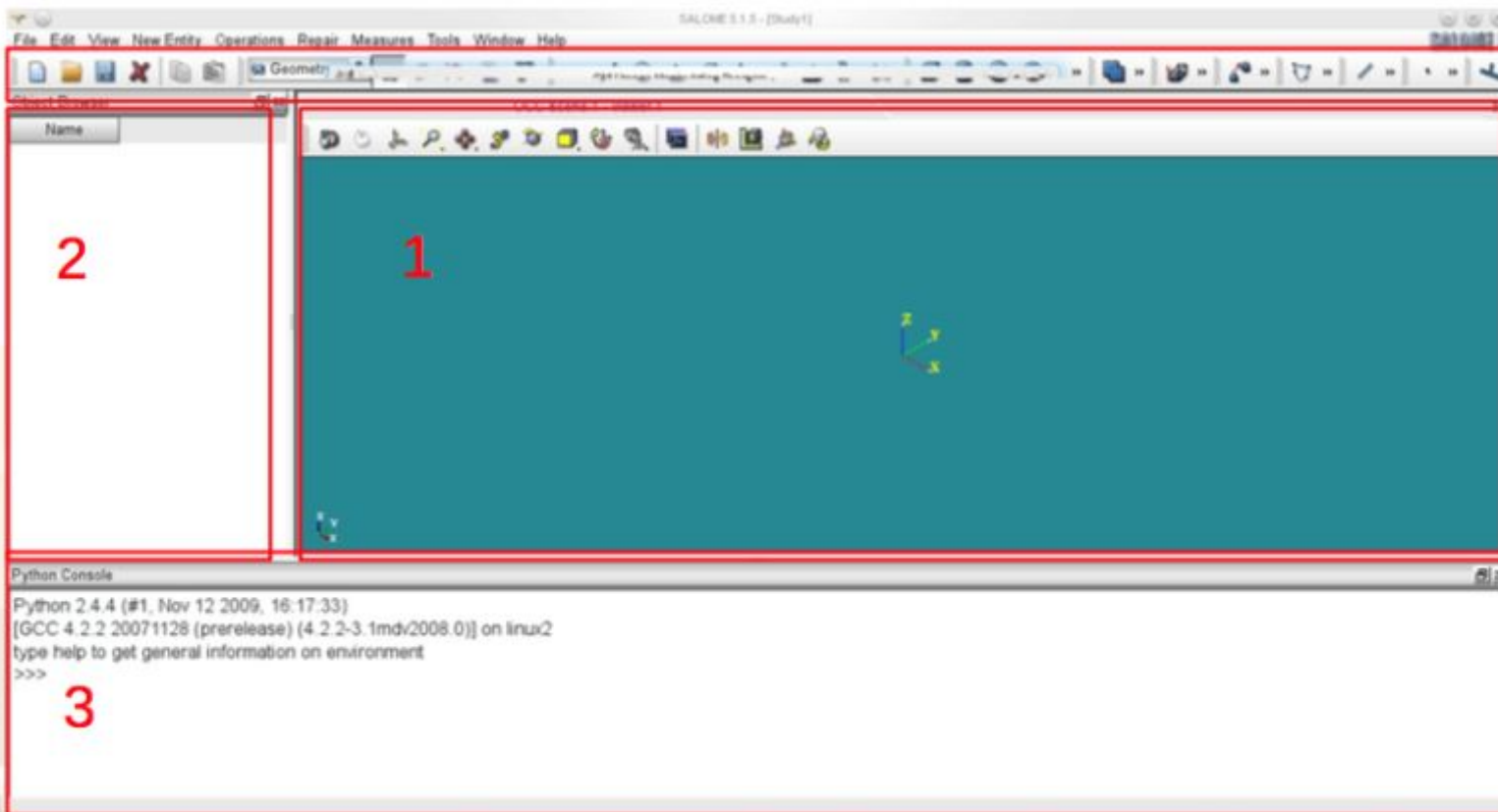
Примеры граничных условий

<i>inletOutlet</i>	<i>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</i>
<i>outletInlet</i>	<i>Обратно inletOutlet Иными словами, zeroGradient если жидкость входит в расчетную область и фиксированное значение (outletValue) если выходит из нее</i>

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)

4



5

2

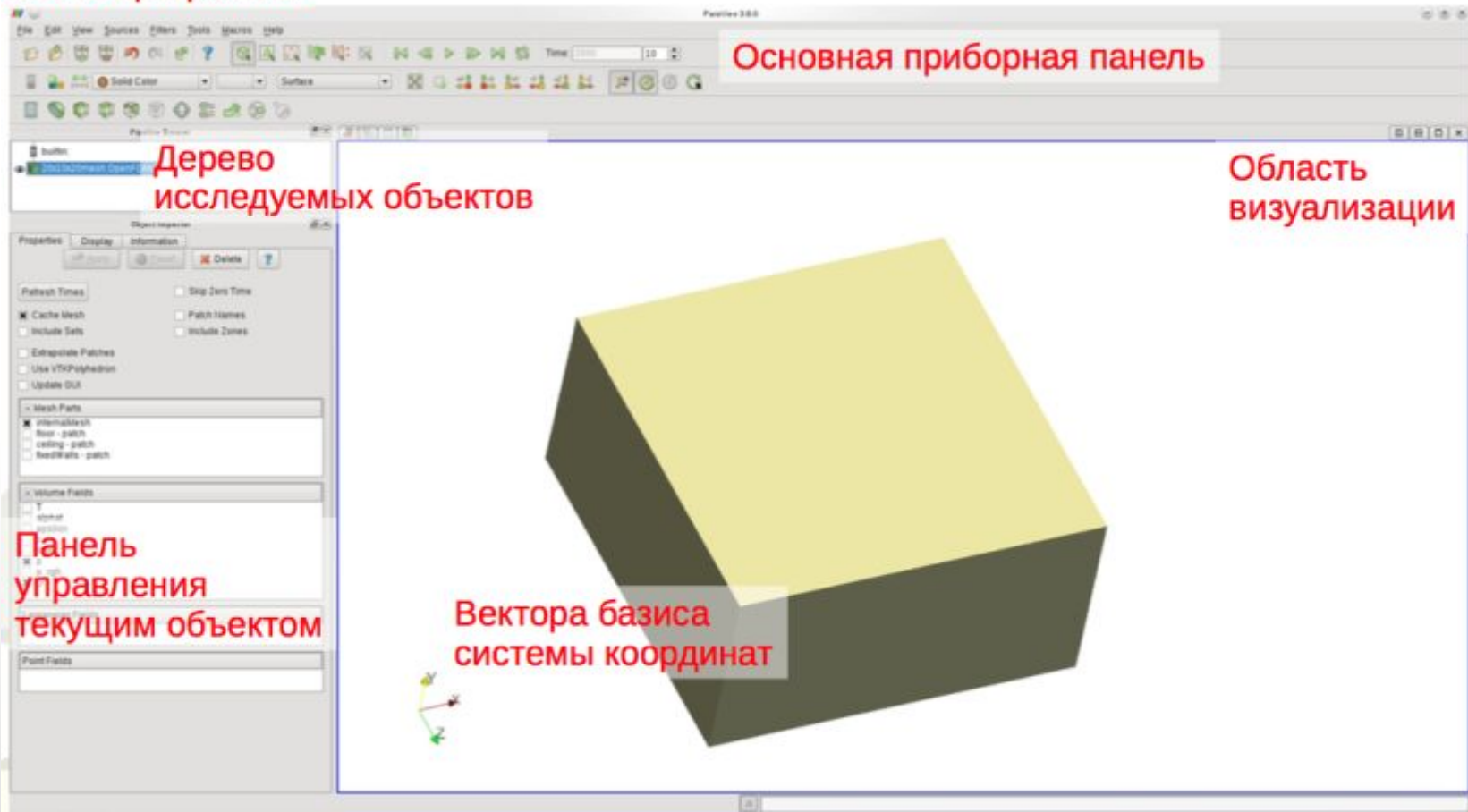
1

3

Связь с другими проектами

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

Меню программы

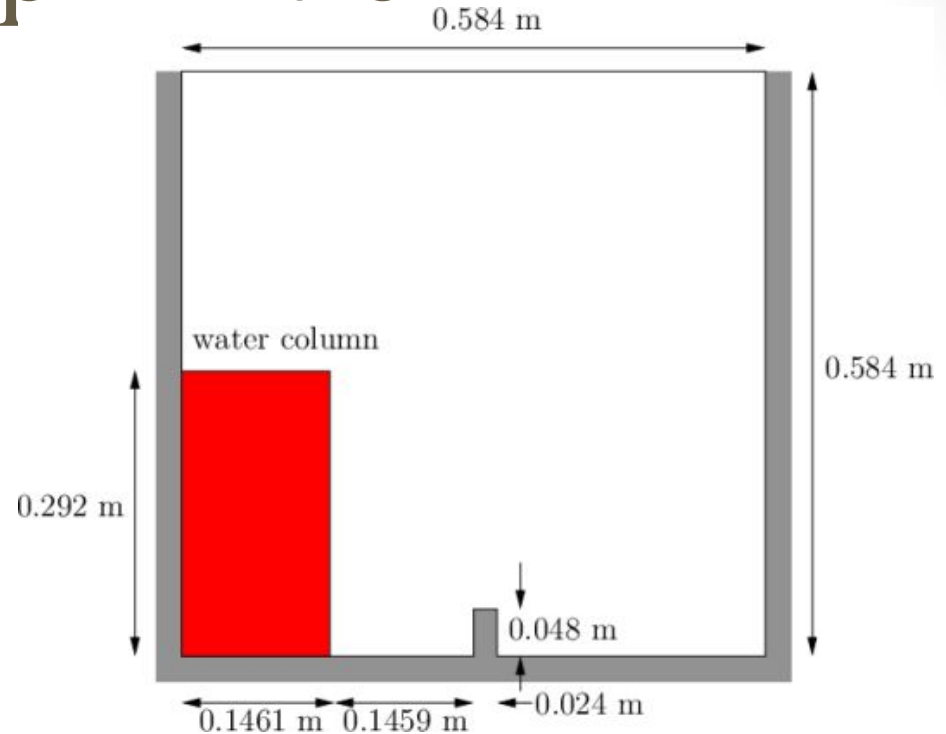


ОТВЕТВЛЕНИЯ

- **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 независимая 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 Symscapе.
- **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

