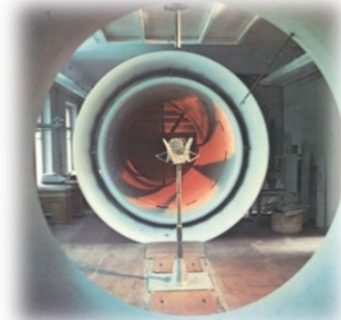




Санкт-Петербургский политехнический университет

*Физико-механический институт, Высшая школа  
прикладной математики и вычислительной физики*



# Опыт использования СПО OpenFOAM для обучения основам вычислительной гидродинамики в СПбПУ

*Смирновский Александр Андреевич*

*e-mail: [smirnovskysaha@gmail.com](mailto:smirnovskysaha@gmail.com)*



# Структура доклада

1. Кратко о Политехническом университете и реализуемой программе подготовки бакалавров.
2. Несколько слов о том, что такое «вычислительная гидродинамика».
3. Немного об открытых пакетах OpenFOAM и ParaView.
4. Краткое содержание курса, посвящённого изучению работы с пакетом OpenFOAM.
5. Пример задания для студентов.
6. Заключение: достоинства и недостатки использования OpenFOAM для обучения студентов.

# Направление подготовки “Прикладные математика и физика”

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого



Физико-механический институт  
(бывший физико-механический факультет)



Высшая школа прикладной математики и вычислительной физики  
(кафедры “Прикладная математика”, “Гидроаэродинамика”, “Теплофизика”)



Направление подготовки “Прикладные математика и физика”

Бакалавриат (план приёма 50 чел.)

Магистратура (план приёма 20 чел.)

# Направление подготовки “Прикладные математика и физика”

Основные дисциплины направления (3-4 курсы бакалавриата):

- Основы механики жидкости и газа
- Основы теории упругости
- Основы теплофизики
- Основы вычислительной гидродинамики
- Динамика вязкой жидкости и турбулентность
- Введение в технологии суперкомпьютерных вычислений
- Моделирование турбулентности
- Введение в компьютерный инжиниринг
- Современные проблемы механики

## Блок дисциплин по освоению прикладного программного обеспечения (ПО)

	Дисциплина	Сем.	ПО
1	Исследовательские проекты в области механики сплошных сред	6	<b>FloS</b> (СПбПУ),
		7	<b>FloS, OpenFoam</b>
		8	<b>OpenFoam</b>
2	Программные средства вычислительной гидродинамики и теплофизики	6	<b>FDS</b>
		7	<b>ANSYS Fluent</b>
3	Компьютерное моделирование в механике деформируемого твердого тела	8	<b>ANSYS Mechanical</b>

# Вычислительная гидродинамика

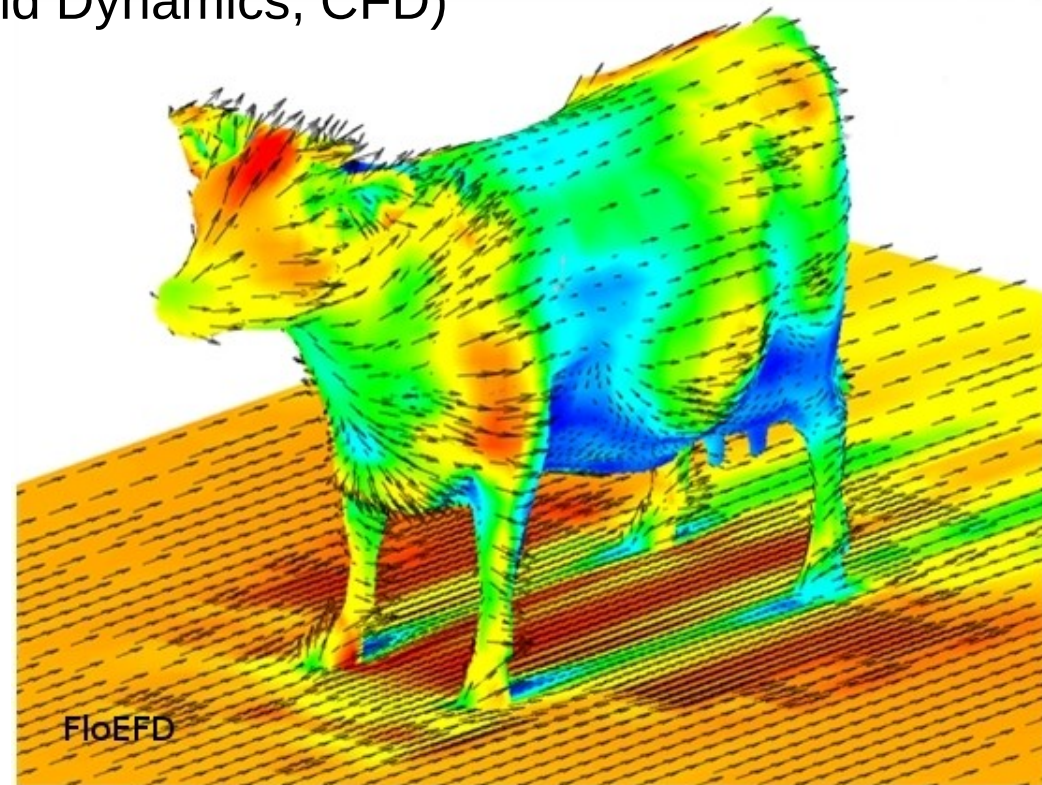
OpenFOAM — это инструмент для решения задач вычислительной гидроаэродинамики (и не только...)

Что такое «вычислительная гидродинамика»?

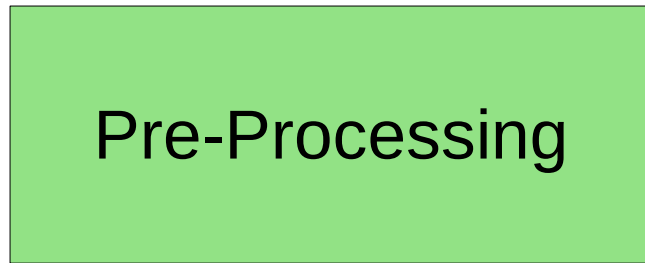
(Computational Fluid Dynamics, CFD)

CFD:

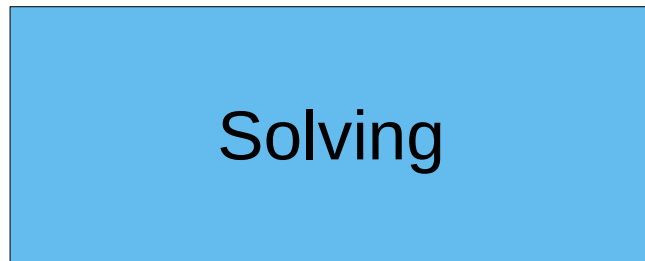
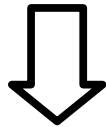
- ▼ Colors For Directors
- ▼ Colorful Figure Delivery
- ▼ Cleverly Forged Data



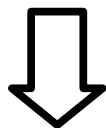
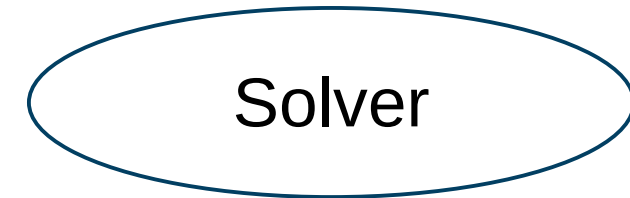
# Этапы численного решения задачи



Постановка задачи:  
геометрия, сетка,  
граничные условия,  
параметры и т.п.



Численное решение:  
запуск солвера  
(решателя)



Обработка результатов:  
визуализация и т.д.



# Краткий обзор пакета OpenFOAM

OpenFOAM — пакет, предназначенный для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных по методу конечного объёма

Особенности:

- ▼ Свободно распространяется под лицензией GNU GPLv3
- ▼ Работает с неструктурированными сетками
- ▼ Может работать в параллельном режиме (при помощи библиотеки MPI)
- ▼ В основном предназначен для работы в ОС на базе Linux
- ▼ Вся работа с пакетом осуществляется из командной строки



# Краткий обзор пакета OpenFOAM

Open  $\nabla$  FOAM

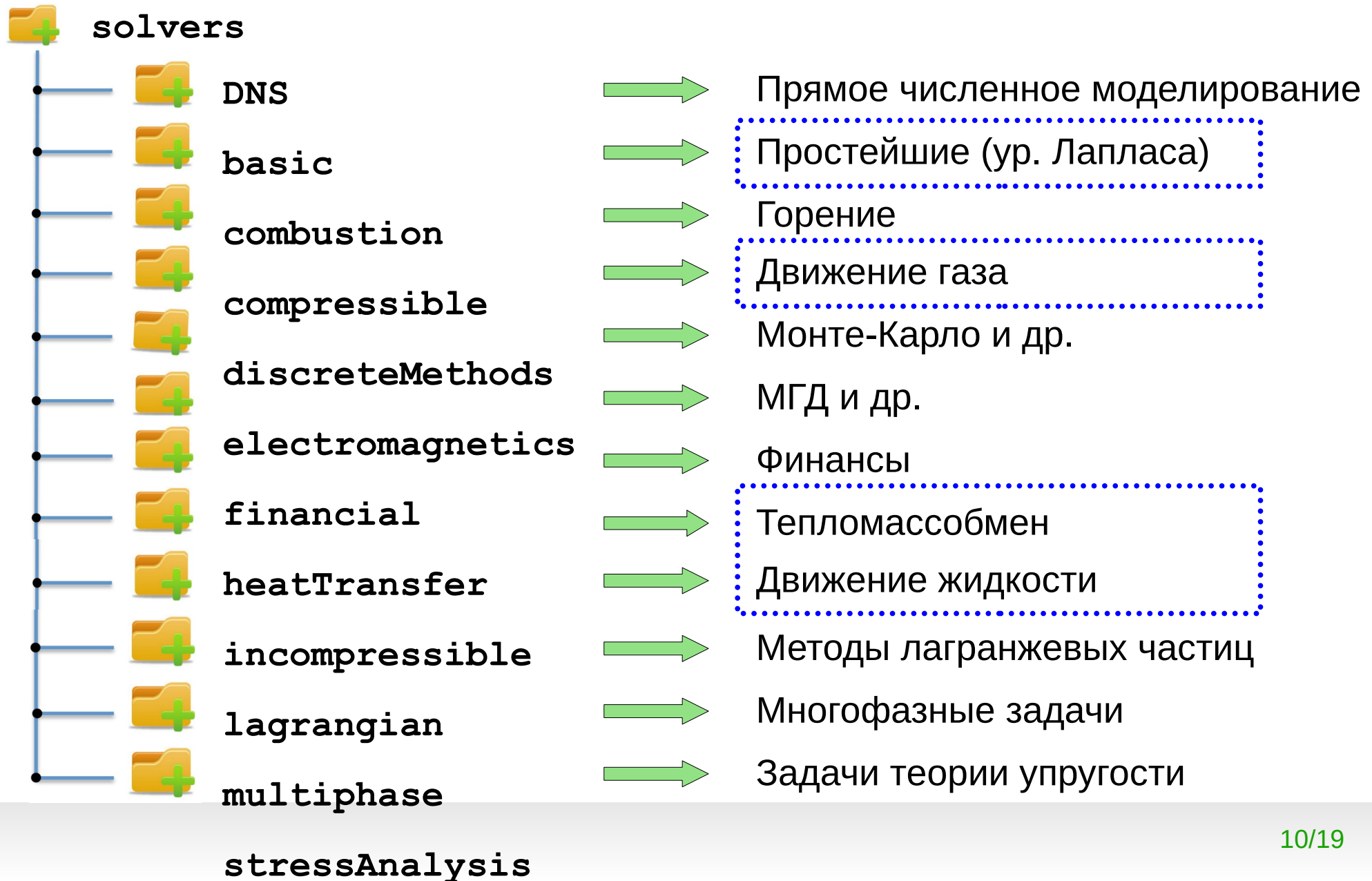
Field Operation And Manipulation

скаляр, вектор, тензор

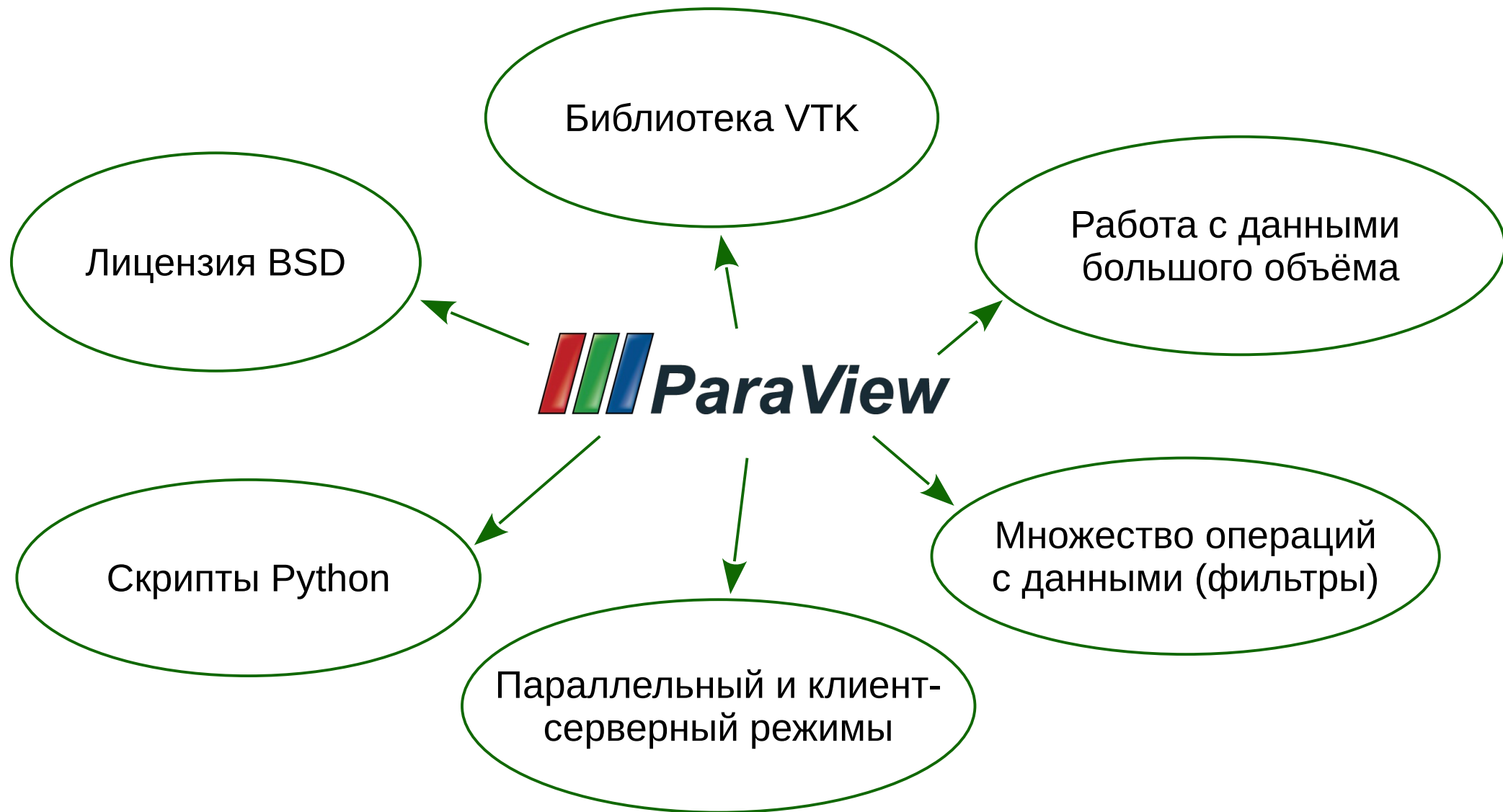
операции с полями,  
дифференциальные операторы (div, rot,  
grad, ...)

- ▼ Библиотека для программиста (C++)
- ▼ Набор готовых солверов и утилит

# Структура пакета OpenFOAM



# Визуализация данных: пакет ParaView



# Структура курса, посвящённого изучению OpenFOAM

Курс OpenFOAM идёт в двух семестрах

## 1. Осенний семестр (7 семестр бакалавриата):

- Введение в численное моделирование и метод конечных объёмов
- Структура пакета OpenFOAM
- Основы работы в ОС Linux
- Демонстрация работы с OpenFOAM на примере из tutorial
- Изучение простейшего сеточного генератора blockMesh, построение сетки для расчёта стационарного течения в плоском канале
- Постановка задачи, проведение расчёта и визуализация результатов расчёта течения в канале
- Проведение небольшой исследовательской работы и подготовка отчёта
- Постановка и решение ещё пяти работ, подготовка отчётов

Аттестация за осенний семестр: успешная сдача отчётов по 6 работам

# Структура курса, посвящённого изучению OpenFOAM

## 2. Весенний семестр (8 семестр бакалавриата):

- Дополнительные сведения о работе с пакетом OpenFOAM
- Обзор свободно распространяемых сеточных генераторов
- Постановка и проведение подготовительных расчётов для выполнения курсовой работы
- Выполнение индивидуальных заданий для курсовой работы

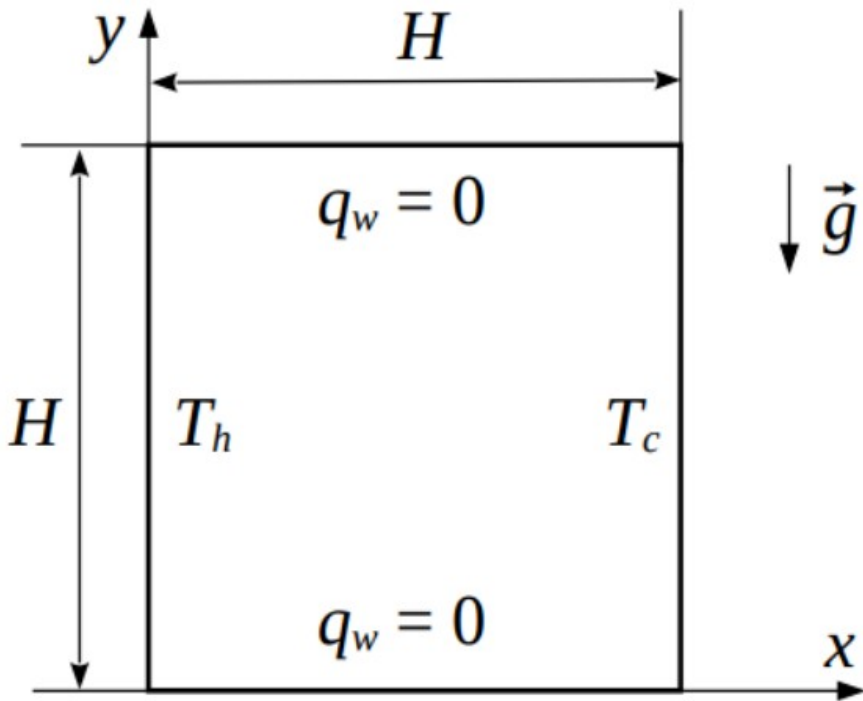
Аттестация за весенний семестр: успешная подготовка и защита курсовой работы

## Техническое обеспечение:

- Подготовленный образ виртуальной машины Virtual Box с установленным дистрибутивом Ubuntu 19.04, OpenFOAM, ParaView.
- Ноутбуки Высшей школы с установленным Virtual Box и виртуальной машиной.
- Узел на кластере Высшей школы для выполнения работы по постановке и тестированию параллельного расчёта.

# Пример постановки и решения задачи в OpenFOAM

Задача свободной конвекции в квадратной полости



$$\Delta T = T_h - T_c$$

- ▶ Левая стенка при высокой температуре, правая – при низкой
- ▶ Течение жидкости с учётом теплообмена и плавучести в поле силы тяжести

# Пример постановки и решения задачи в OpenFOAM

Пример файла задания начальных и граничных условия для температуры

```
FoamFile
{
    version      2.0;
    format       ascii;
    class        volScalarField;
    object       T;
}
dimensions     [0 0 0 1 0 0 0];
internalField  uniform 300;
boundaryField  {
    w_left
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 301;
    }
    w_right
    {
        type      fixedValue;
        value     uniform 300;
    }
    w_top_bottom
    {
        type      zeroGradient;
    }
}
}
```

# Пример постановки и решения задачи в OpenFOAM

## Пример вывода результатов расчёта в виртуальной машине

The screenshot displays a virtual machine environment with a terminal window on the left and a ParaView 5.6.0 64-bit window on the right. The terminal shows the output of an OpenFOAM simulation at three time steps: 1997, 1998, and 2000. The output includes solving for variables  $U_x$ ,  $U_y$ , and  $h$ , and the pressure gradient  $p_{rgh}$ . It also reports time step continuity errors and density ( $\rho$ ) maximum/minimum values. The ParaView window shows a 2D visualization of the temperature field, with a color scale ranging from 300 (red) to 301 (blue). The simulation results are visualized as a heatmap on a square domain, showing a gradient from red to blue.

```
Time = 1997
DILUPBiCGStab: Solving for Ux, Initial residual = 9.59042e-06, Final residual = 3.50242e-06
DILUPBiCGStab: Solving for Uy, Initial residual = 1.34023e-05, Final residual = 5.19733e-06
DILUPBiCGStab: Solving for h, Initial residual = 8.61146e-08, Final residual = 8.1769e-08
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.000789194, Final residual = 2.35978e-06, No
time step continuity errors : sum local = 1.92127e-08, global = 2.4781e-19, cumulative =
rho max/min : 1.16103 1.15716
ExecutionTime = 4.85 s ClockTime = 5 s

Time = 1998
DILUPBiCGStab: Solving for Ux, Initial residual = 1.55379e-05, Final residual = 5.16718e-06
DILUPBiCGStab: Solving for Uy, Initial residual = 2.12131e-05, Final residual = 6.81829e-06
DILUPBiCGStab: Solving for h, Initial residual = 1.19437e-07, Final residual = 1.10839e-07
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.000700835, Final residual = 2.5323e-06, No
time step continuity errors : sum local = 1.99151e-08, global = 3.98582e-19, cumulative =
rho max/min : 1.16103 1.15716
ExecutionTime = 4.85 s ClockTime = 5 s

Time = 1999
DILUPBiCGStab: Solving for Ux, Initial residual = 8.85081e-06, Final residual = 3.08786e-06
DILUPBiCGStab: Solving for Uy, Initial residual = 1.1881e-05, Final residual = 4.4766e-06
DILUPBiCGStab: Solving for h, Initial residual = 9.18177e-08, Final residual = 7.59857e-08
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.000701448, Final residual = 1.81464e-06, No
time step continuity errors : sum local = 1.45796e-08, global = -2.36772e-19, cumulative =
rho max/min : 1.16103 1.15716
ExecutionTime = 4.86 s ClockTime = 5 s

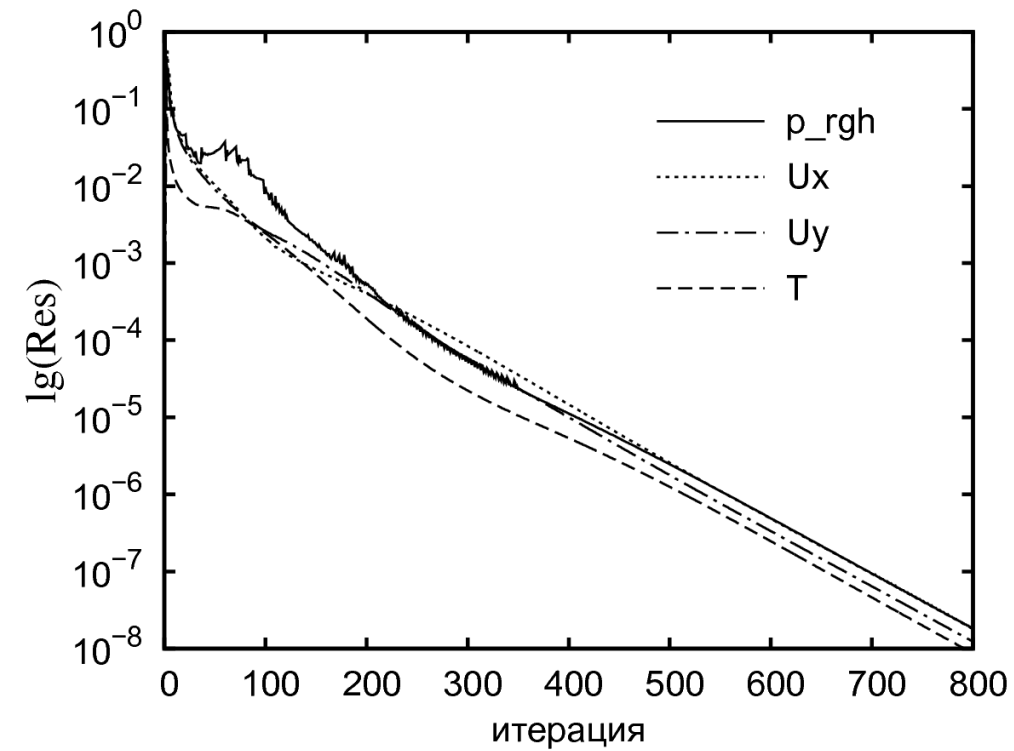
Time = 2000
DILUPBiCGStab: Solving for Ux, Initial residual = 1.55785e-05, Final residual = 5.10293e-06
DILUPBiCGStab: Solving for Uy, Initial residual = 2.14503e-05, Final residual = 6.87273e-06
DILUPBiCGStab: Solving for h, Initial residual = 1.04282e-07, Final residual = 9.23877e-08
GAMG: Solving for p_rgh, Initial residual = 0.000728707, Final residual = 2.84674e-06, No
time step continuity errors : sum local = 2.2166e-08, global = -2.51436e-19, cumulative =
rho max/min : 1.16103 1.15716
ExecutionTime = 4.86 s ClockTime = 5 s

End
Lubuntu@lubuntu-openfoam:~/OpenFOAM/lubuntu-7/run/buoyantCavity$
```

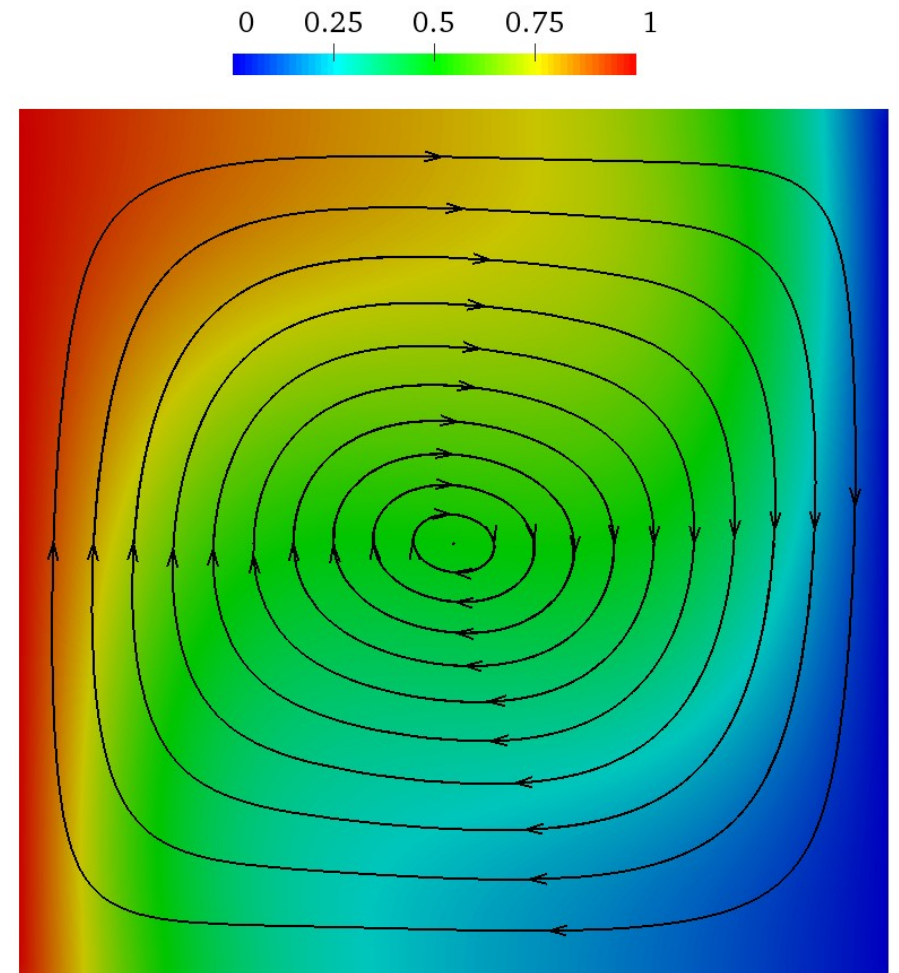


# Пример постановки и решения задачи в OpenFOAM

## История сходимости



## Поле безразмерной температуры и линии тока



# Заключение (1)

Достоинства использования свободного программного обеспечения OpenFOAM для решения задач вычислительной гидродинамики:

1. Свободный доступ к дистрибутиву, примерам и документации.
2. Возможность модификации решателей и создания собственных.
3. Большое онлайн сообщество CFD и множество материалов по OpenFOAM.

Недостатки использования OpenFOAM в обучении:

1. Работа с командной строкой.
2. Нормальная работа только в ОС на базе Linux.
3. Постановка задачи происходит путём редактирования текстовых конфигурационных файлов.
4. Документация порой является слишком «скудной», многие (очевидные для специалиста) вещи не описаны.

## Заключение (2)

### Резюме

- Курс OpenFOAM является дополнительным; студенты также изучают другие программные пакеты, в т.ч. коммерческий пакет ANSYS Fluent.
- Заранее подготовленная среда рабочего окружения позволяет существенно сократить время выявления и решения возникающих в процессе работы с OpenFOAM проблем и затруднений.
- Как показала практика, у студентов в основном не возникает проблем с использованием виртуальной машины.
- Основные сложности при работе с пакетом OpenFOAM – необходимость работы из командной строки и «ручная» правка конфигурационных файлов.
- В целом, пакет OpenFOAM можно рекомендовать для обучения студентов старших курсов, имеющих навыки работы со специализированным ПО

