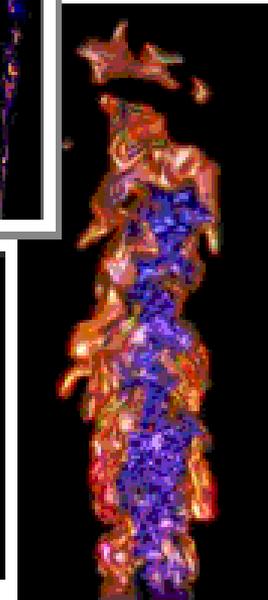
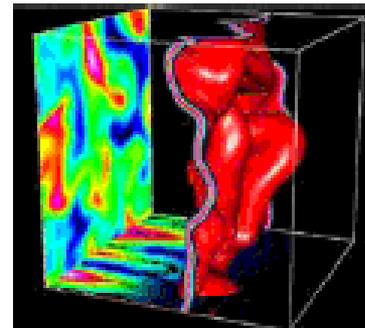
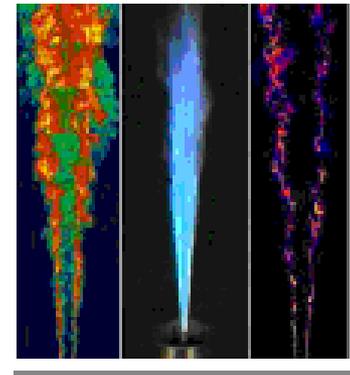


# Возможности пакета OpenFOAM для моделирования турбулентного пламени и задач тушения пожаров

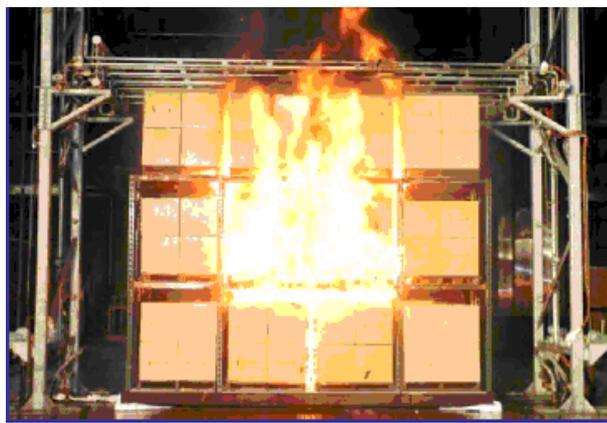
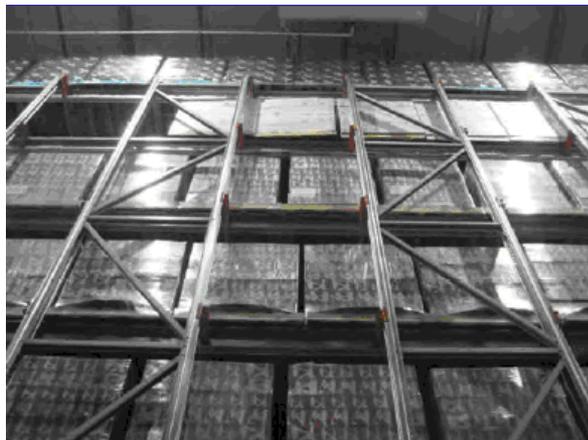
Сергей Стрижак  
НР, МГТУ им. Н.Э.Баумана

# Состояние вопроса

- Научное сообщество, которое решает задачи моделирования пламени и пожаротушения, сталкивается со следующими нерешенными проблемами:
- Моделирование горения твердых горючих материалов
- Расчет излучающей теплопередачи и образования сажи
- Горение в пограничном слое
- Погасание и исчезновение пламени
- Методы тушения пламени (взаимодействия пламени и газочапельной струи)
- Детонационное горение
- Научное сообщество сталкивается с проблемами:
- Сообщество невелико
- Существует ограниченное количество пакетов
- Необходим баланс между научными моделями и промышленными расчетами
- Ограниченные возможности эксперимента
- Software:
- OpenSource: FDS, OpenFOAM, Code\_Saturne, ISIS
- Коммерческое: Ansys,-CFX,Fluent, Star-CCM, Fire
- Приложения:
- Лесные пожары (горение древесины), распространение пламени в помещениях, развитие пламени в технических устройствах, развитие крупного пламени вдоль предметов



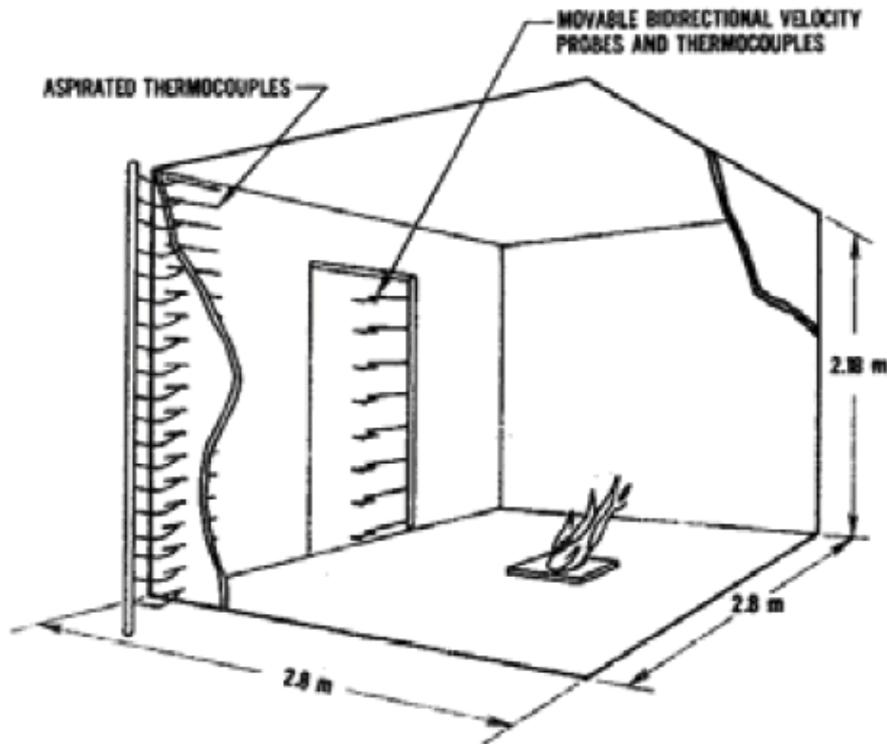
## Актуальность: Безопасное хранение товаров на складе



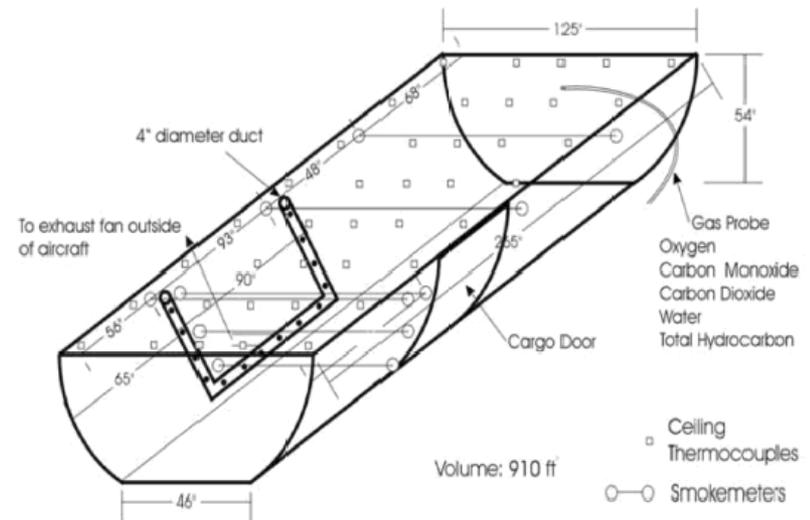
Компания FM Global (<http://www.fmglobal.com/>). Страховой бизнес.

## Актуальные проблемы.

Безопасность в зданиях и салонах самолета. Эвакуация персонала.



- Type of Aircraft: Boeing-707



Ground test measurements: 15 tests with

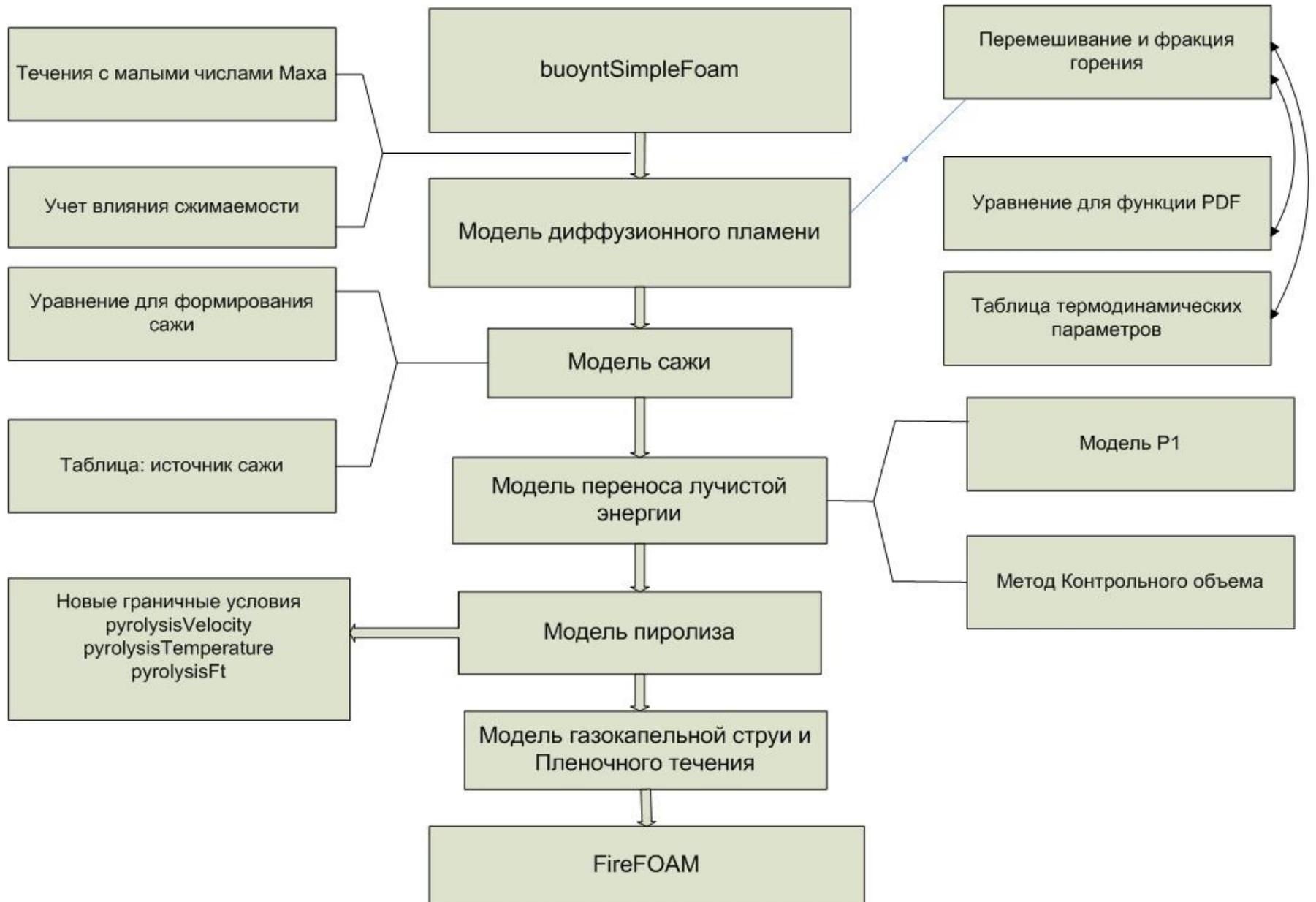
- 40 thermocouples
- 6 smoke meters
- 3 gas analyzers

- OpenFOAM General Public License Open Source Code
- Наличие мультифизических моделей
- Расширенное сеточное моделирование
- Параллельный расчет (Open-MPI)
- Объектно-ориентированный подход в программировании на C++ (инкапсуляция, полиморфизм, наследование)
- FireFoam: моделирование пожаров и тушение пожаров для промышленных приложений
- <http://code.google.com/p/firefoam-dev>

# Некоторые стандартные решатели в OpenFOAM

- 1) boundaryFoam – 1D решатель для создания пограничного слоя
- 2) icoFoam – решатель для несжимаемого, ламинарного потока
- 3) laplacianFoam – решение уравнение Лапласа
- 4) rhoCentralFoam - решатель для невязкого сжимаемого потока с использованием “central-upwind” схемы Kurganov & Tadmor
- 5) simpleFoam - решатель для стационарного несжимаемого, турбулентного потока. Алгоритм SIMPLE.
- 6) pisoFoam – решатель для нестационарного несжимаемого турбулентного потока. Алгоритм PISO.
- 7) sonicFoam - решатель для нестационарного сжимаемого турбулентного потока.
- 8) buoyantSimpleFoam – решатель для моделирования конвективных потоков
- 9) pimpleFoam - решатель для несжимаемого течения, использующий PIMPLE ( PISO-SIMPLE) алгоритм. Используют большой шаг по времени.
- 10) dsmcFoam DSMC= Direct Simulation Monte-Carlo – решатель для моделирования динамики разряженного газа
- 11) channelFoam – LES решатель для канала
- 12) dnsFoam – прямое численное моделирование изотропной турбулентности

# Развитие решателя fireFoam



# Основные уравнения для сжимаемых течений (усреднение по Фавру)

Уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0$$

Уравнение движения

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} (\nu + \nu_t) \left( \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right) + \bar{\rho} g_i$$

Уравнения для полной энтальпии

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{h}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{h}}{\partial x_j} = -\frac{D\bar{p}}{Dt} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \left( D + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \bar{q}''}{\partial x} + \bar{\omega}_{h_z}''$$

Уравнения для фракции смеси

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{Z}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{Z}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \left( D + \frac{\nu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial \tilde{Z}}{\partial x_j} \right) + \bar{\omega}_{Y_k}''$$

Уравнения для энтальпии

$$\tilde{h} = \sum_k h_{f,k}^0 \tilde{Y}_k + \int_{T_0}^{\tilde{T}} \sum_k (Cp_k(\tau) \tilde{Y}_k) d\tau$$

Уравнение состояния

$$\bar{p} = \bar{\rho} \frac{R_u}{M} \tilde{T}$$

Уравнение для массовой фракции компонент

$$\tilde{Y}_k = \int_0^1 f_k(Z) Pdf(Z) dZ$$

# Модели турбулентности

## 1) Применение вихреразрешающих методов (LES)

- SGS (subgrid scale) stress tensor-eddy viscosity model – Модель Смагоринского
- Turbulent flux-gradient model (предположение о градиентном переносе)
- Модель одного дифференциального уравнения

$$\frac{\partial \bar{\rho} k}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} u k) = \nabla \cdot (\bar{\rho} v_k \nabla k) + P - \varepsilon$$

$$v_k = c_k \Delta k^{1/2} \quad \varepsilon = c_\varepsilon k^{3/2} \Delta^{-1}$$

## 2) RANS со стандартной k-е моделью турбулентности

# Модель горения

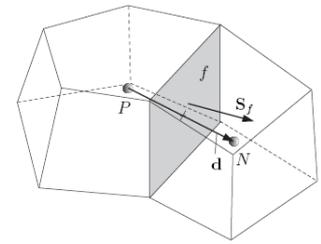
- Eddy Dissipation Model (EDC)  
(концепция диссипации вихрей)  
- Mixing controlled reaction rate  
(реакция происходит в мелких турбулентных структурах)
- Уравнение переноса функция плотности вероятности для пассивного скаляра (beta-pdf)

$$\bar{\dot{\omega}}_m = (B_m - A_m) \frac{MW_m}{MW_{fu}} \bar{\dot{\omega}}_{F_k} \quad \text{Скорость реакции}$$

$$\bar{\dot{\omega}}_{F_k} = C_{EDC} \bar{\rho} \frac{1}{\tau_t} \min\left(\tilde{Y}_F, \frac{\tilde{Y}_o}{s}\right) = C_{EDC} \bar{\rho} \frac{\varepsilon}{k} \min\left(\tilde{Y}_F, \frac{\tilde{Y}_o}{s}\right)$$

$$\bar{\dot{\omega}}_{F_k} = C_{EDC} \bar{\rho} \frac{1}{\tau_t} \min\left(\tilde{Y}_F, \frac{\tilde{Y}_o}{s}\right) = C_{EDC} \bar{\rho} \frac{\varepsilon_{SGS}}{k_{SGS}} \min\left(\tilde{Y}_F, \frac{\tilde{Y}_o}{s}\right)$$

# Метод решения



- Метод контрольного объема
- Неструктурированные многогранные ячейки
- Физические переменные определяются в узлах ячейки
- Второй порядок аппроксимации членов уравнений по пространству и времени:
- Временные слагаемые (backward);
- Конвективные слагаемые (Gauss linear, Gauss limitedLinear 0.5);
- Диффузионные слагаемые (Gauss linear corrected).
- TVD/NVD схемы для ограничения скалярных величин
- Метод разделения для связи скорость-давление PISO+SIMPLE
- Различные физические модели (CHEMKIN)

# Различные модели среды

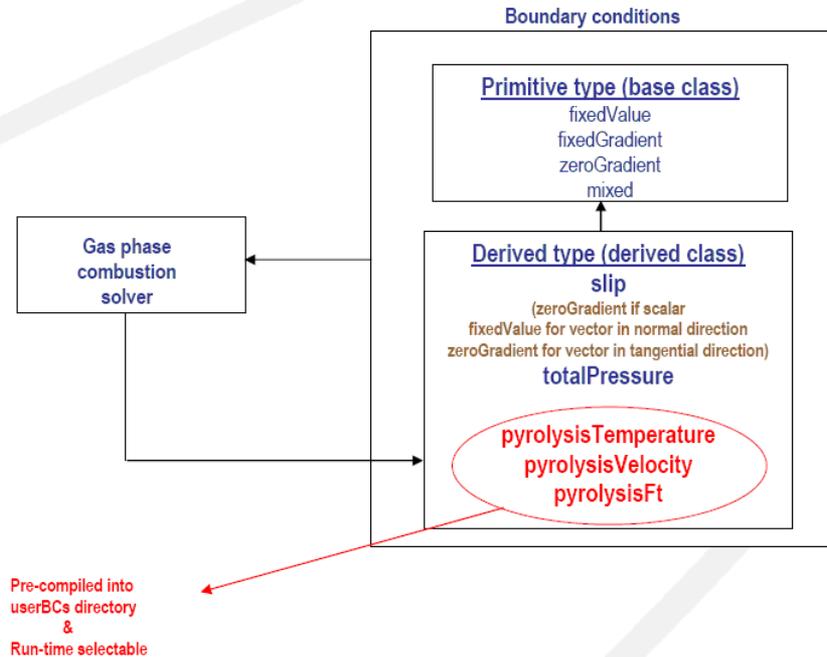
- модели диффузионного турбулентного пламени, модель быстрого горения
- модель излучения
- модель пиролиза: 1D уравнение, Уравнение Аррениуса для химических реакций
- Модель образования дыма – “flamelet” модель
- модель образования сажи
- динамика турбулентной газочапельной струи испаряющейся жидкости
- метод Лагранжа для моделирования движения капель
- модель разрушения струи на базе теории неустойчивости Кельвина-Гельмгольца, модель Розина-Раммлера для задания распределения размеров капель,
- модель тонкой пленки воды, движущейся вокруг горящих предметов,
- задание положения сопла-распылителя



# Примеры граничных условий

<i>Название ГУ</i>	<i>Описание</i>
Граничные условия, дочерние (derived) по отношению к смешанному	
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.
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
Mixed, symmetry plane, periodic and cyclic	Смешанное условие, условие симметрии, периодическое и циклическое условие
freestream, freestreamPressure	Условие свободного потока

# Развитие новых граничных условий в fireFoam



## Velocity BC for pyrolysis

```
void pyrolysisVelocityFvPatchVectorField::updateCoeffs ( )
{
    if (updated ( ))
    {
        return;
    }

    //- Calling the function that reads MLR & computes U
    calculateU ( );

    fixedValueFvPatchVectorField::updateCoeffs ( );
}
```

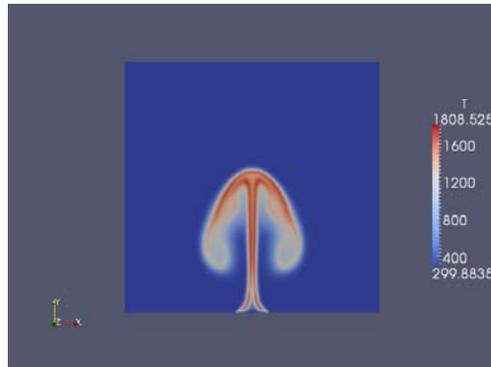
## Mixture fraction BC for pyrolysis

```
void pyrolysisFtFvPatchScalarField::updateCoeffs ( )
{
    if (updated ( ))
    {
        return;
    }

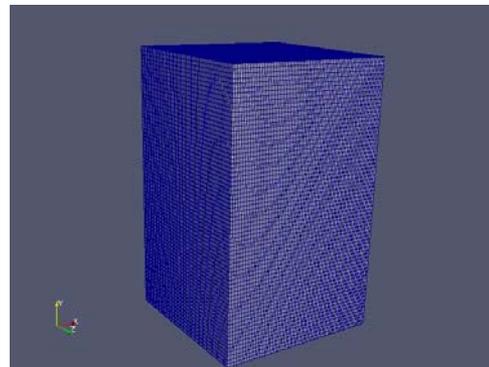
    //- Calling the function that reads MLR & assigns ft
    calculateFt ( );

    mixedFvPatchScalarField::updateCoeffs ( );
}
```

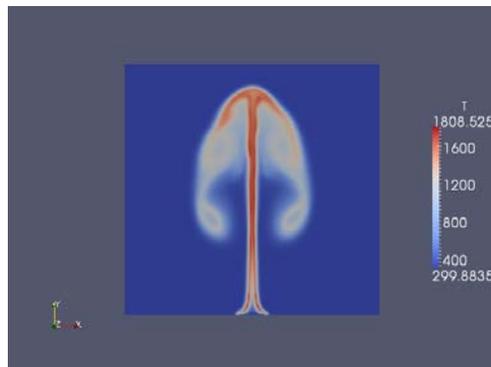
# Расчет пламени (tutorials:smallPool2DFire, smallPool3DFire)



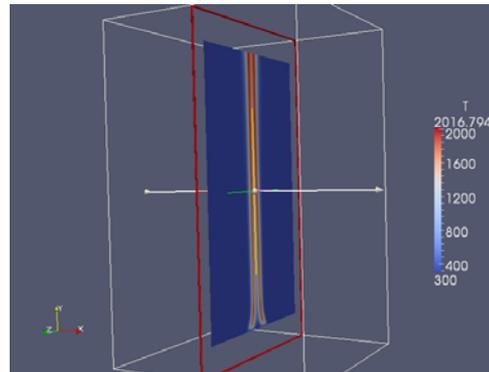
T=0.6 c



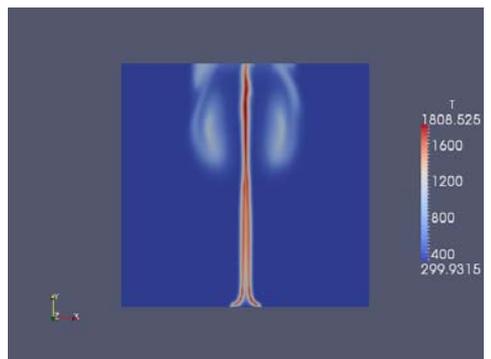
3D сетка



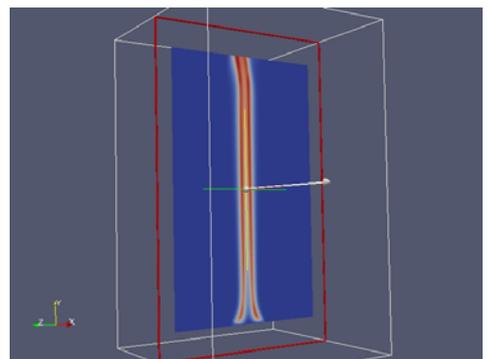
T=0.8 c



T=5 c



T=1.0 c



T=10 c

Domain:

$(-0.3 \ 0 \ -0.3) \ (0.3 \ 1 \ 0.3)$

Hexahedra: 343000

Сетка: blockmesh

Начальные данные:

$U = (0 \ 0.05 \ 0)$

$T = 300 \text{ K}$

$fu = 1.0$

$ft = 1.0$

$\text{CH}_4, \text{CO}_2; \text{H}_2\text{O}; \text{CO}; \text{сажа}$

Граничные условия:

Inlet:

$U$  – fixedValue;

$T$  – fixedValue;

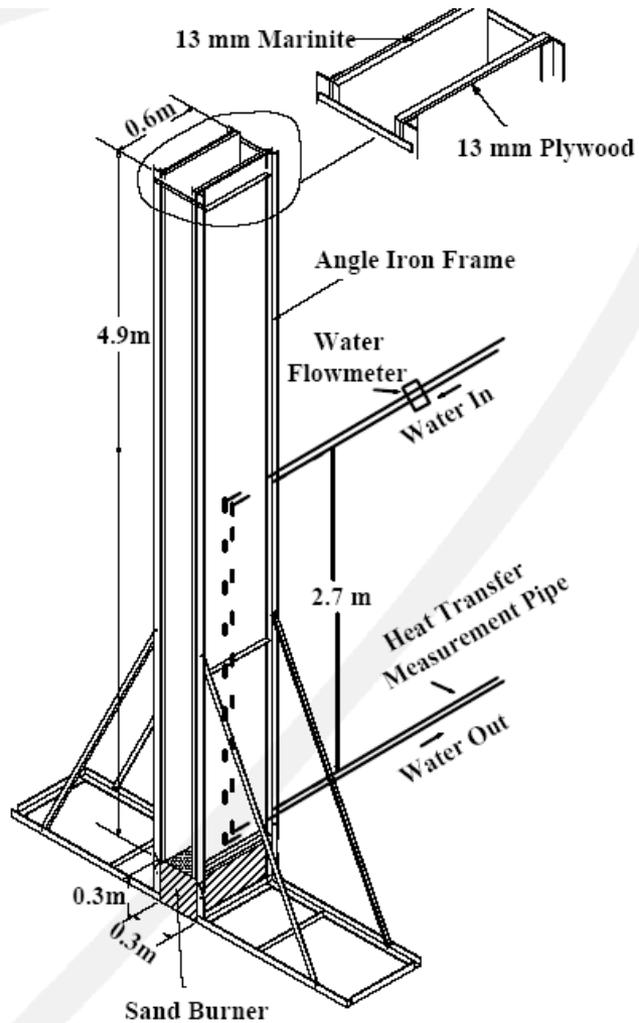
$k$  – fixedValue;

$P$  – buoyantPressure;

LES model – oneEqEddy

Расчет:  $U, p, T, \mu_t, Q, fu, ft$

# Тест с параллельными пластинами



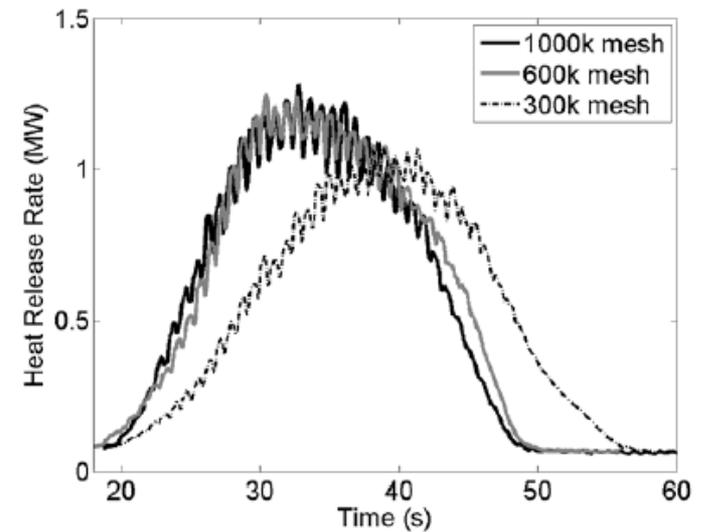
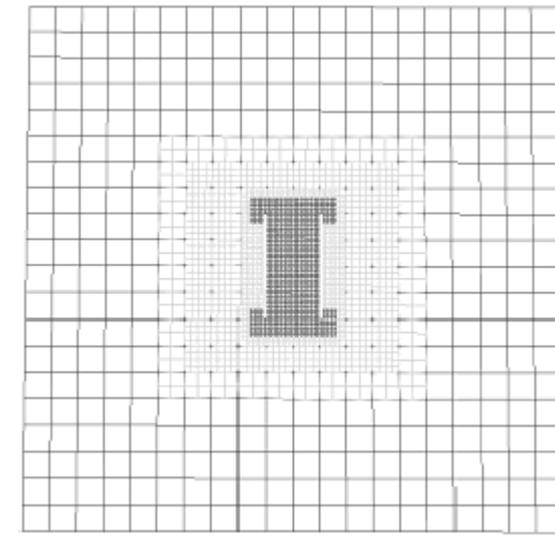
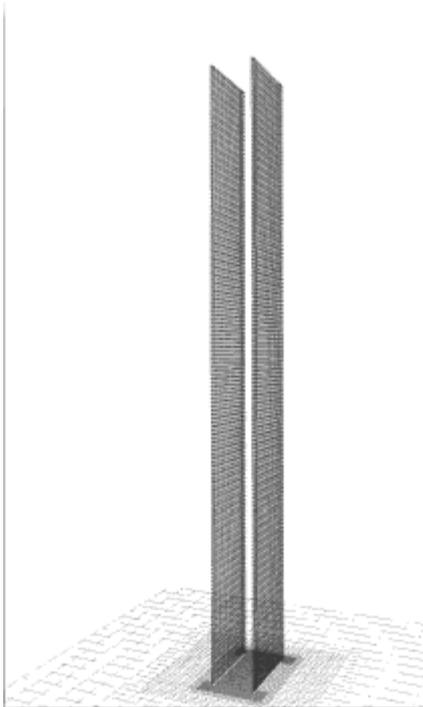
- Стандартный тест
- 0.6x0.3x2.4 м
- 60 kW пропановая горелка
- Тепловыделение близко к промышленному пожару
- Различные материалы
- (PMMA, CPVC, cardboard)
- 3 повторных тестах



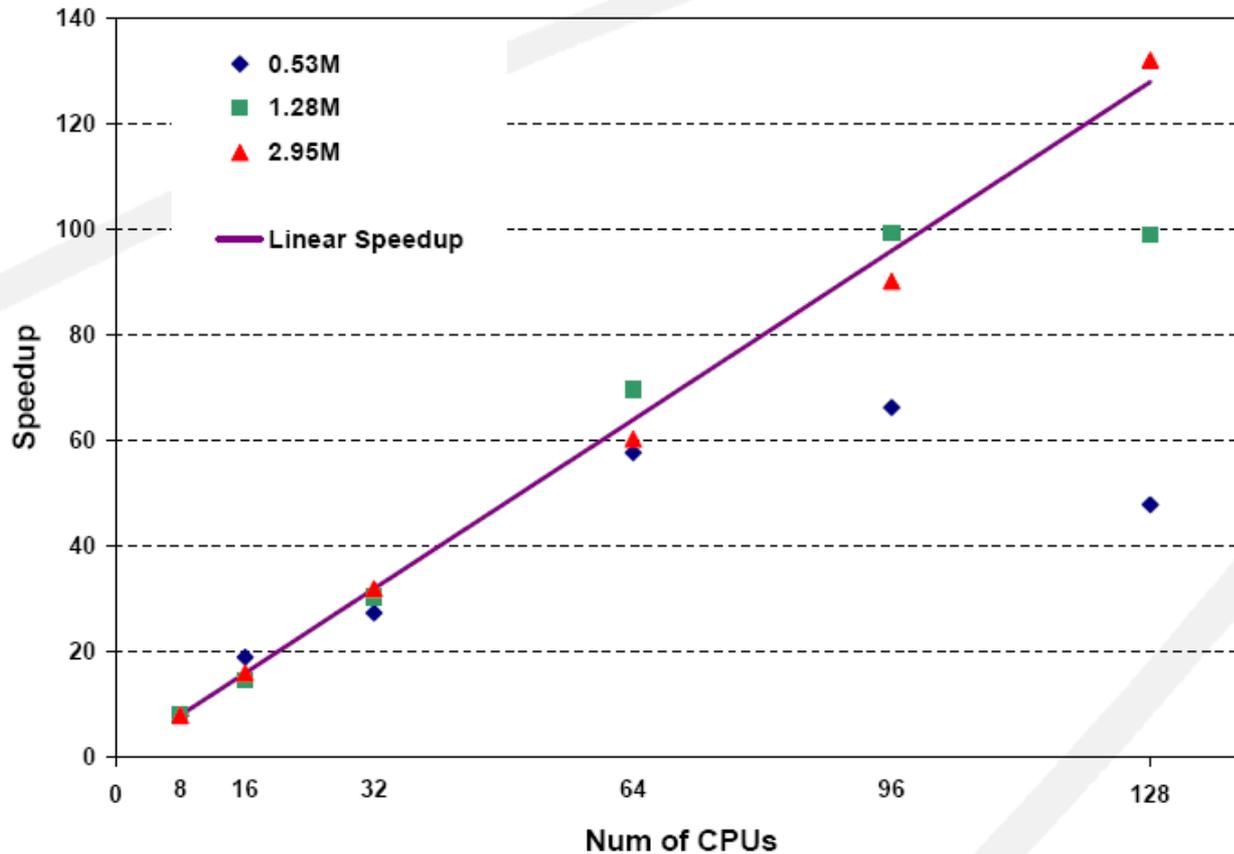
# Расчетная область и сетка

3 м (ширина) x 3 м (длина) x 8 м (высота)

Total no. Cells	Smallest cell size (x, y, z) dim in cm
300k	1.25 x 1.25 x 1.25
600k	0.94 x 1.25 x 0.94
1000k	0.625 x 1.25 x 0.625



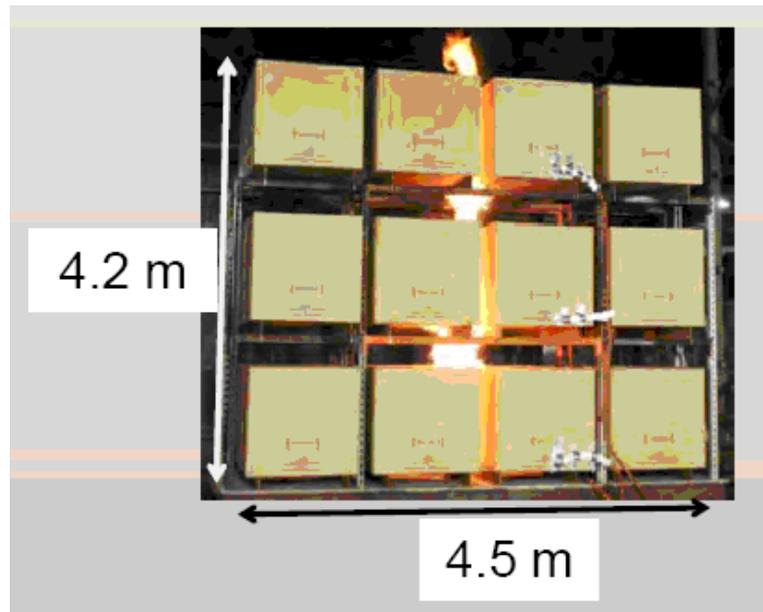
# Тест с параллельными пластинами на HPC



Need 10K mesh or more per CPU for efficiency

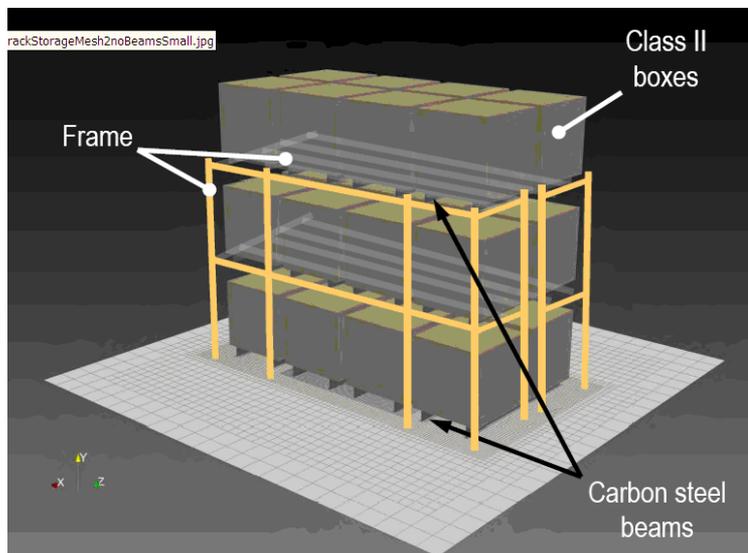


# Эксперимент

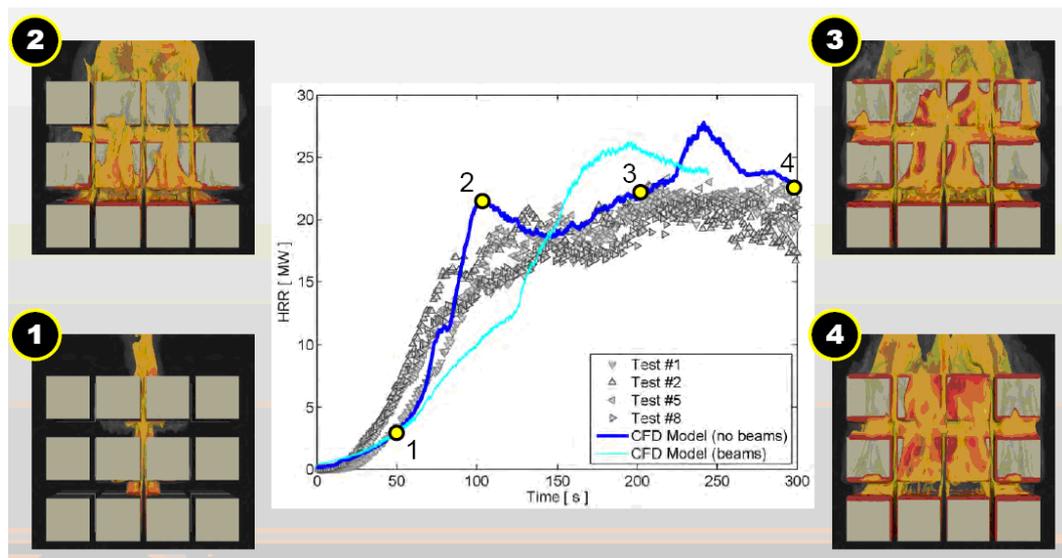
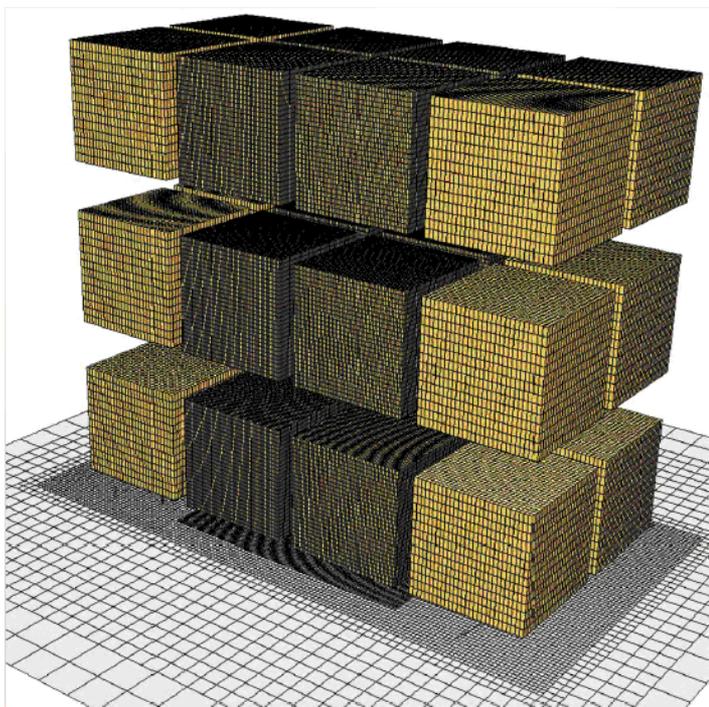


- Тестовая зона с размерами 4мх2мх3м, находящаяся под аппаратами тушения
- 20 MW калориметр
- Дополнительное измерительное оборудование
- Центральное и боковое воспламенение

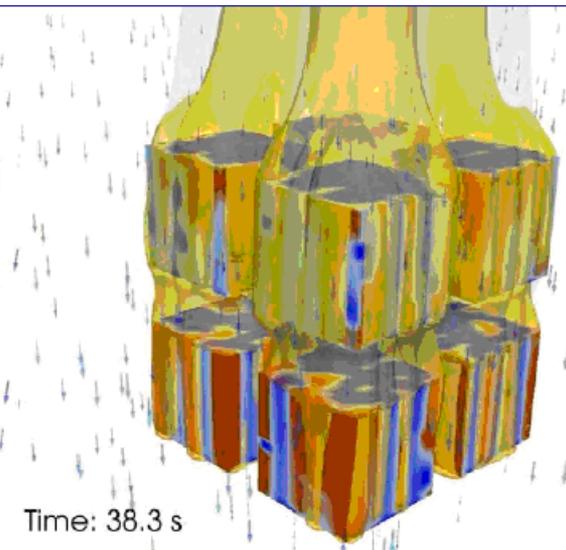
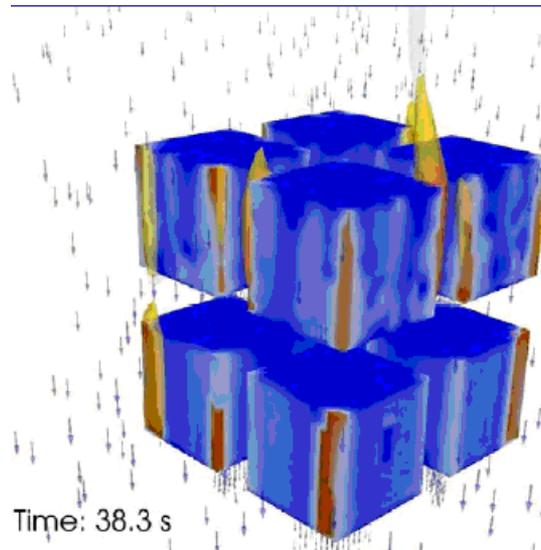
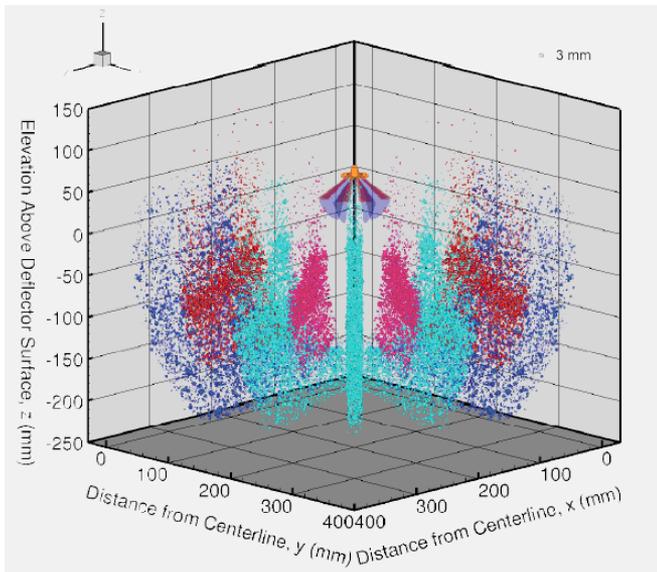
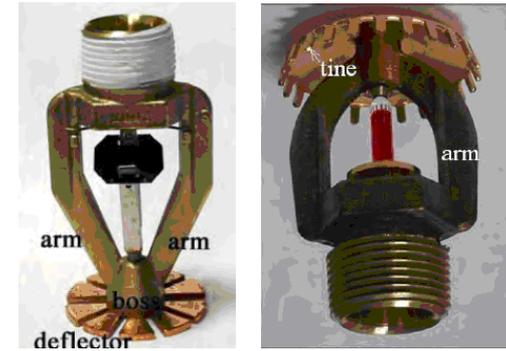
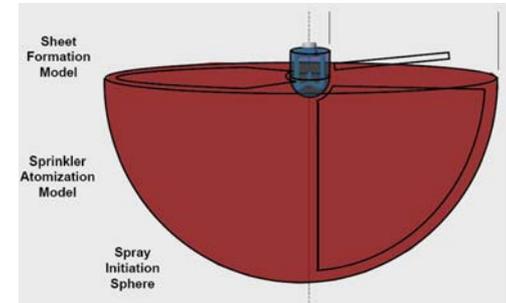
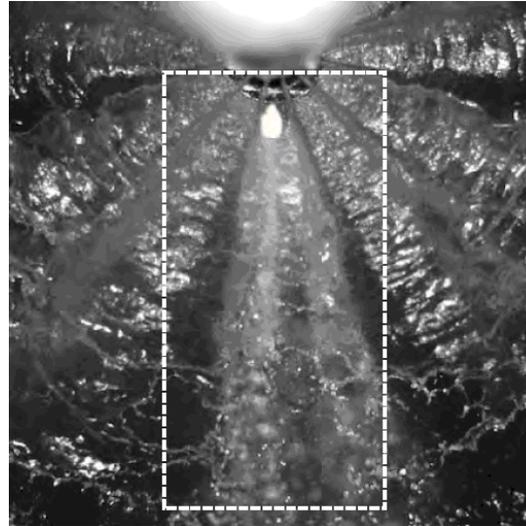
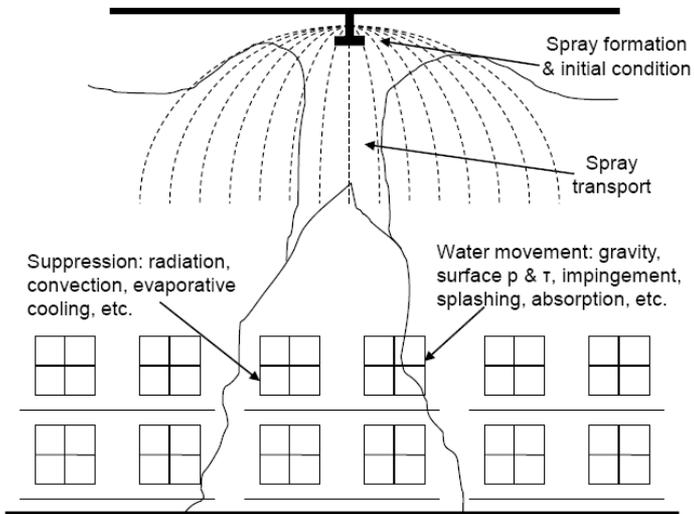
# Расчет



- Сетка – 350к-1.3 млн
- 32-128 сри
- T=10 минут
- CFL=0.4
- Расчет и визуализация
- Сравнение с экспериментом

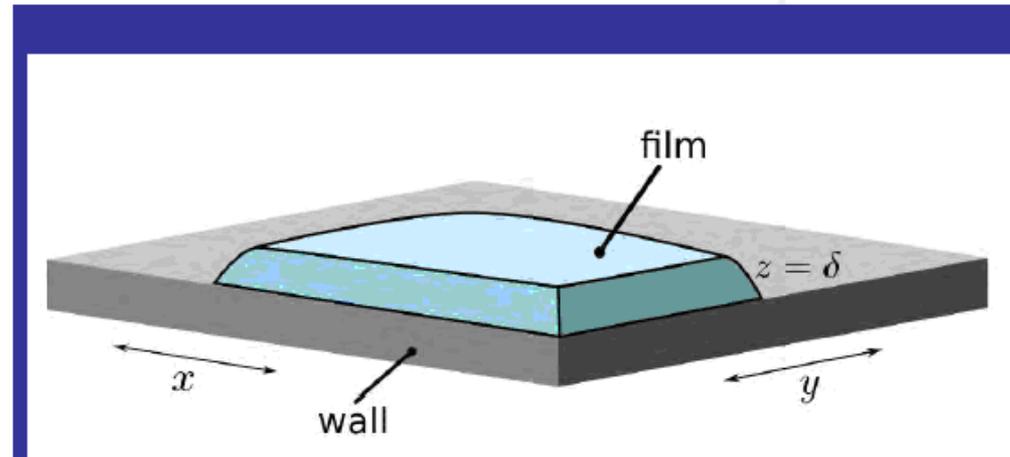
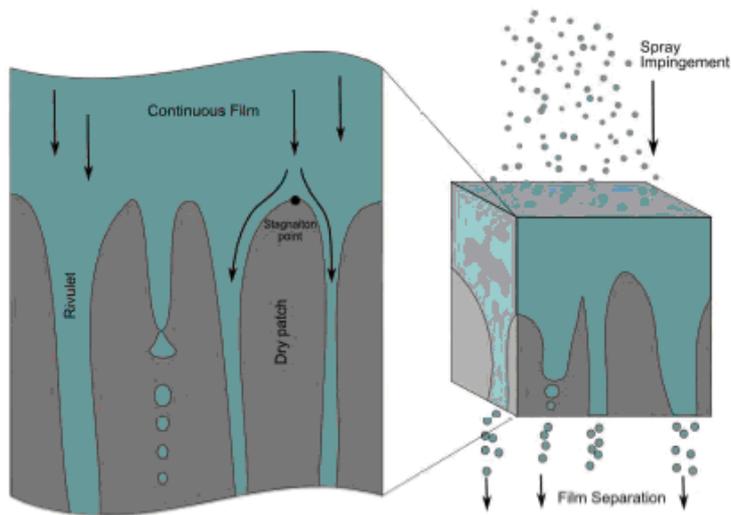
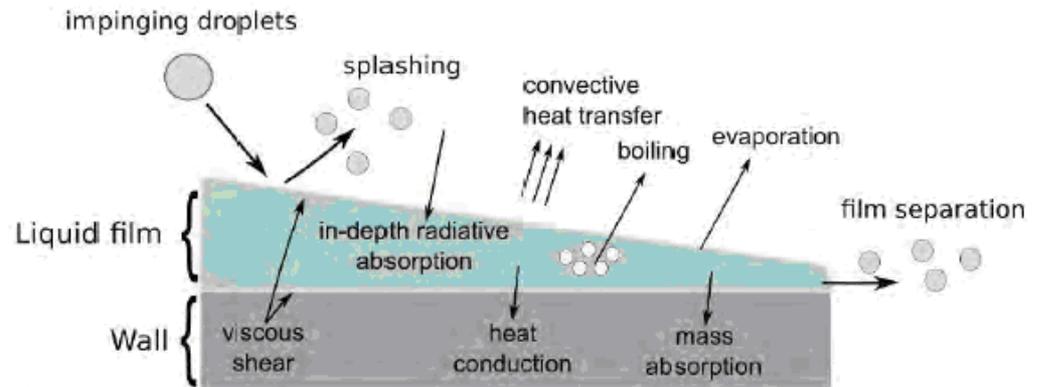


# Газокапельное тушение

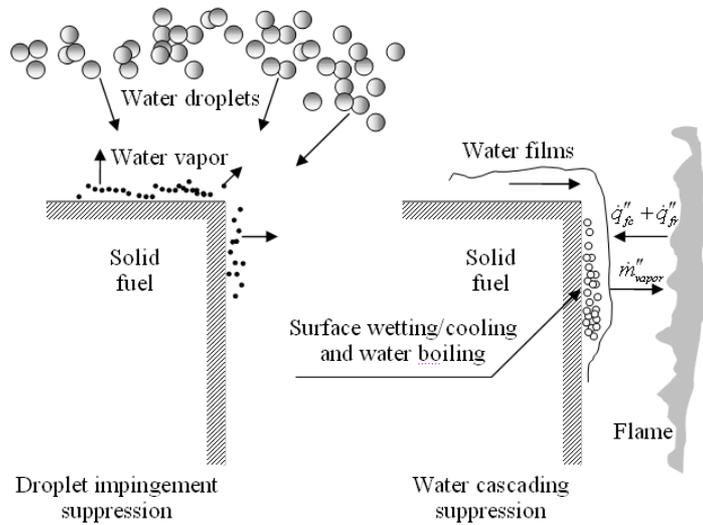


# Газокапельное тушение. Теория пленки.

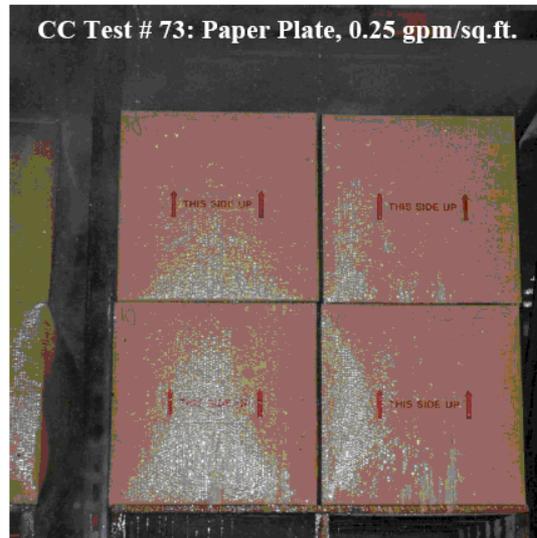
- Thin-film assumption
- Multiphase transport
- Film & rivulet flows



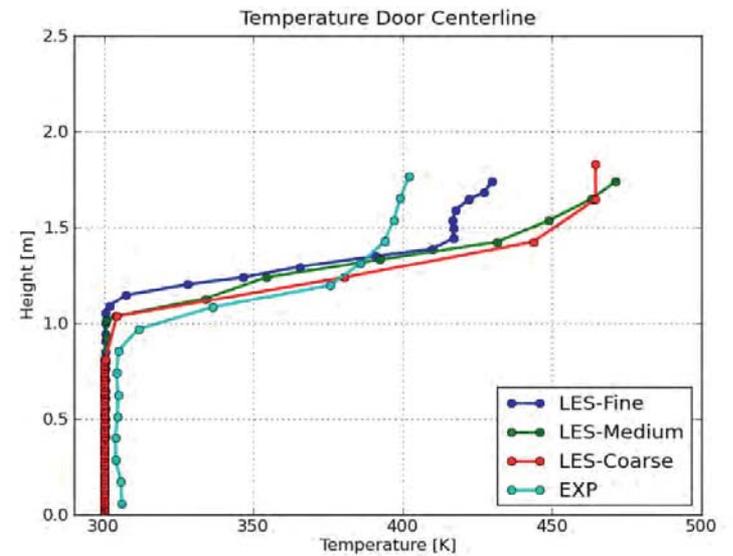
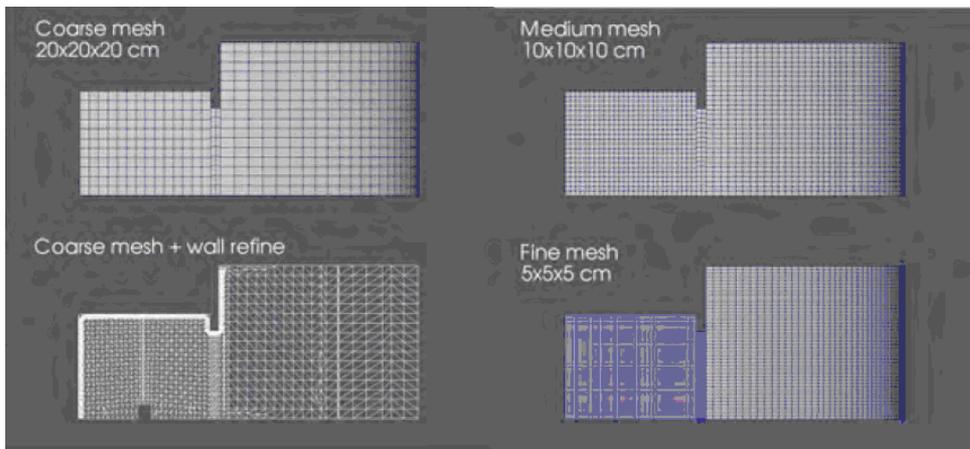
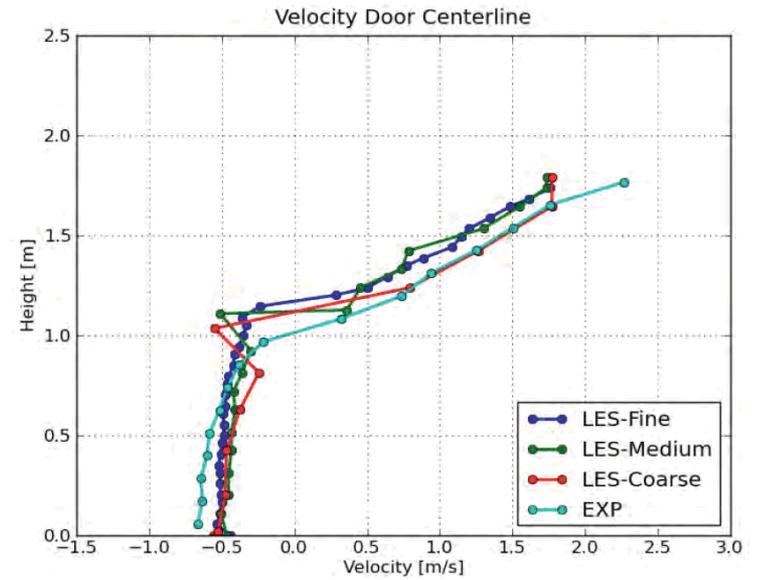
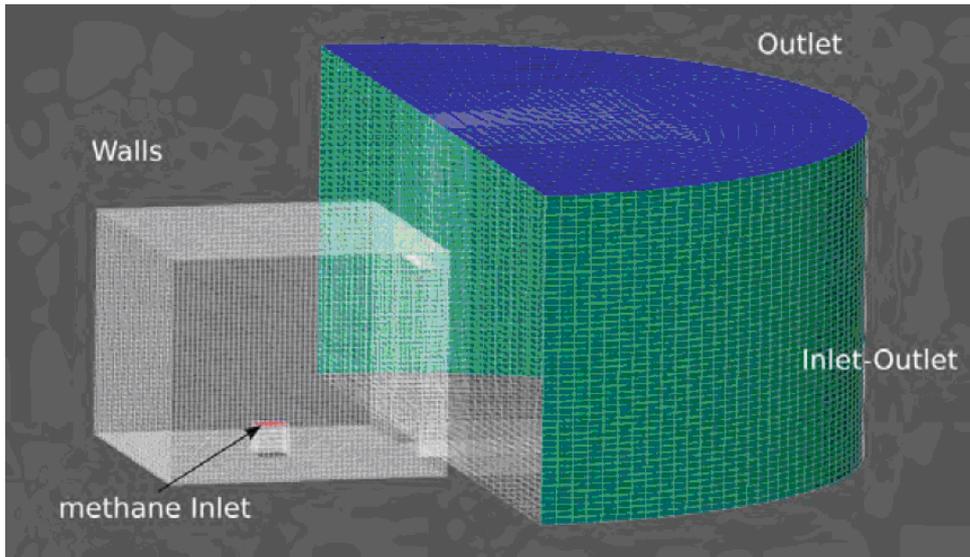
# Дальнейшее развитие решателя



Улучшение пленочной модели жидкости



# Расчет пламени в помещении



# Заключение

- Решатель fireFoam постоянно развивается
- Возможно использование решателя для моделирования задач тушения пламени
- Получено хорошее совпадение с результатами эксперимента
- Решатель хорошо масштабируется при запуске на большом количестве сри
- Основные разработчики:
- FM Global (США) и OpenCFD (Англия).
- 2009-2011 г.

В разработке также принимают участие:

- University of Kingston (Англия)
- University of Maryland (США)
- University of Edinburg (Шотландия)
- Politecnico di Milano (Италия)
- Ghent University (Бельгия)
- 25-30 разработчиков