ДЕМОНСТРАЦИЯ ОБТЕКАНИЕ ОБРАТНОГО УСТУПА

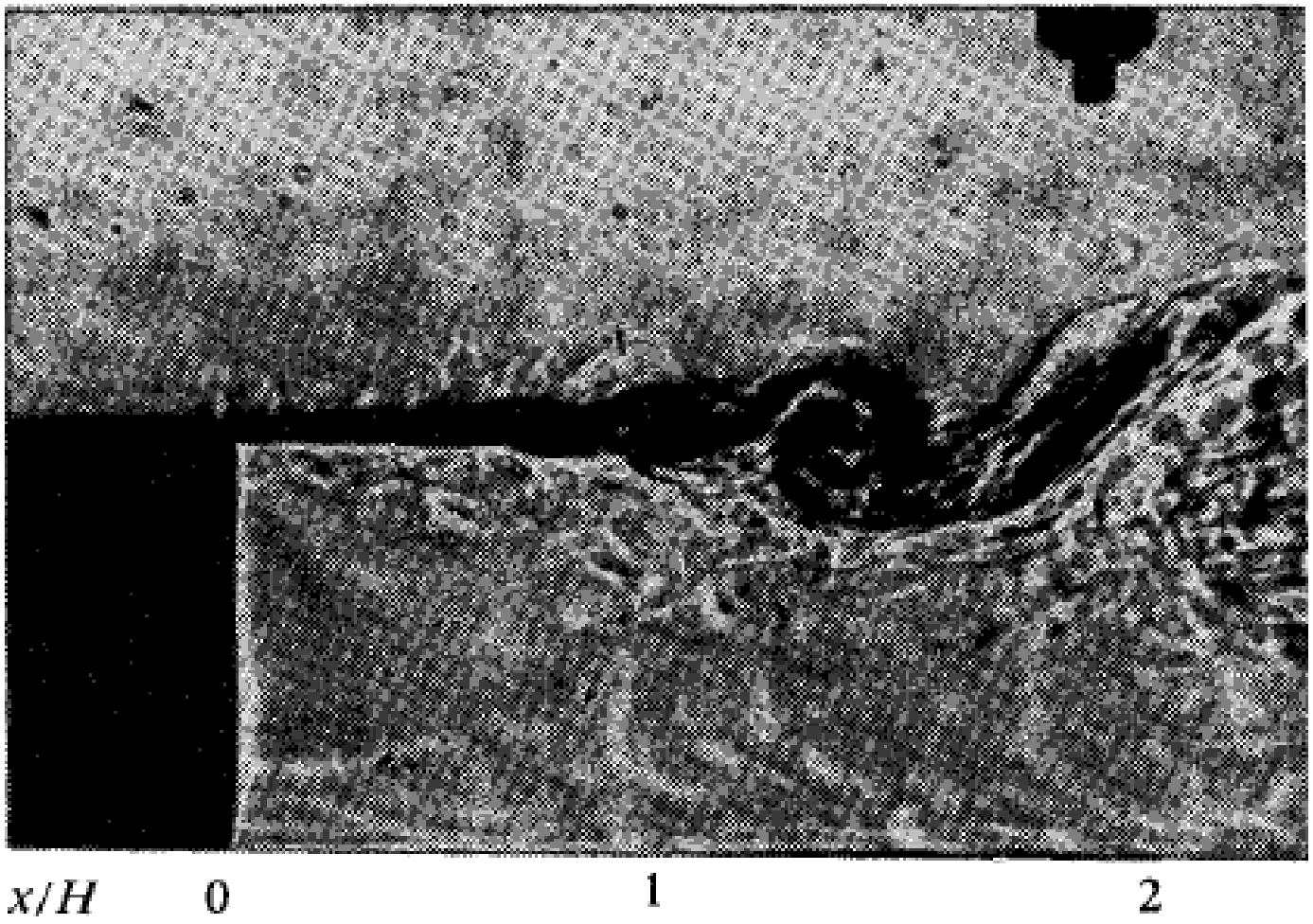
Стрижак С.В.
МГТУ им. Н.Э. Баумана
03.03.2015

РАСЧЕТ ТЕЧЕНИЯ В КАНАЛЕ (pitzDaily)
РАСЧЕТНАЯ ОБЛАСТЬ И ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

U = 10 м/с на входе, на остальных границах -стенка
URANS + K-e модель , K-omega SST модель
LES (метод крупны вихрей) + K one eddy equation model
Решатели: simpleFoam , pisoFoam
Использование пристеночных функций в модели турбулентности
Цель: а) стационарный расчет течения в канале (simpleFoam)
б) нестационарный расчет течения в канале (pisoFoam)

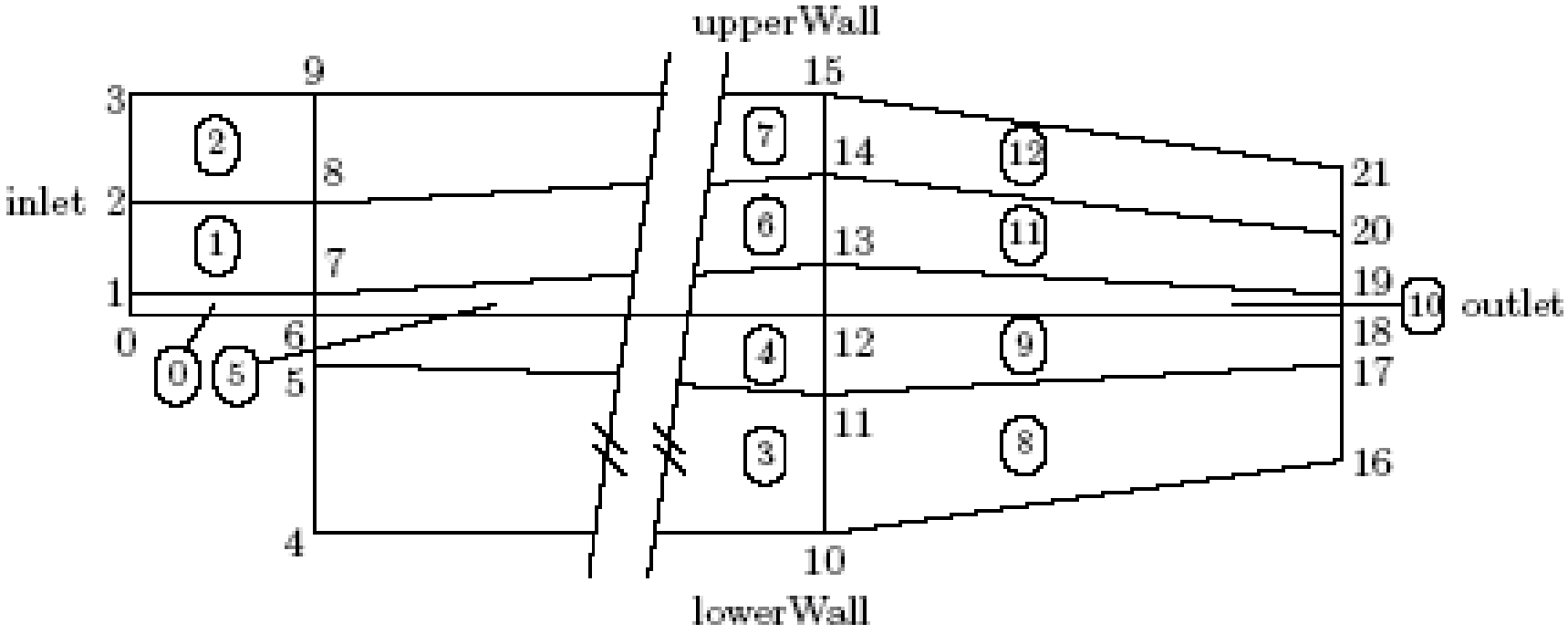
Р.В. Питц, Дж.У. Дейли. Горение в турбулентном слое смешения за уступом. Аэрокосмическая техника. 1984. N7. с.74-82

Шлирен фотография Re=22000



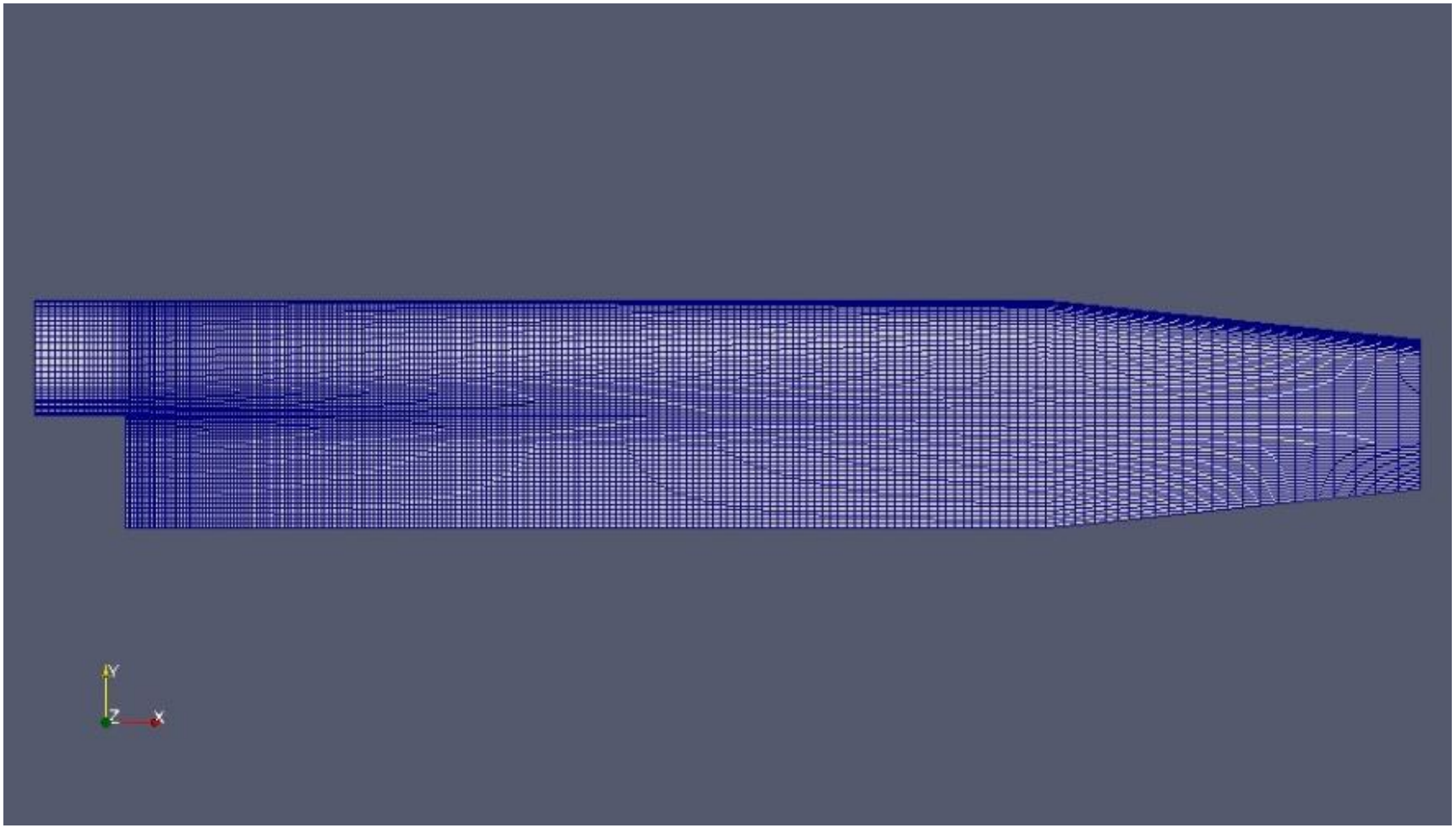
Р.В. Питц, Дж.У. Дейли. Горение в турбулентном слое смешения за уступом. Аэрокосмическая техника. 1984. N7. с.74-82

Блочная сетка



Блочная сетка — файл /constant/blockMeshDict
12 блоков

Расчетная сетка с адаптацией



Двухмерная расчета сетка содержит 12225 ячеек,
для трехмерного случая - 244500 ячеек (combustion/XiFoam/pitzDaily3D)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Governing equations

- Mass continuity for incompressible flow

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{3.4}$$

- Steady flow momentum equation

$$\nabla \cdot (\mathbf{U}\mathbf{U}) + \nabla \cdot \mathbf{R} = -\nabla p \tag{3.5}$$

where p is kinematic pressure and (in slightly over-simplistic terms) $\mathbf{R} = \nu_{eff}\nabla\mathbf{U}$ is the viscous stress term with an effective kinematic viscosity ν_{eff}, calculated from selected transport and turbulence models.

Initial conditions $U = 0$ m/s, $p = 0$ Pa — required in OpenFOAM input files but not necessary for the solution since the problem is steady-state.

Boundary conditions

- Inlet (left) with fixed velocity $\mathbf{U} = (10, 0, 0)$ m/s;
- Outlet (right) with fixed pressure $p = 0$ Pa;
- No-slip walls on other boundaries.

Transport properties

- Kinematic viscosity of air $\nu = \mu/\rho = 18.1 \times 10^{-6}/1.293 = 14.0$ μm^2/s

Turbulence model

- Standard $k - \epsilon$;
- Coefficients: $C_\mu = 0.09; C_1 = 1.44; C_2 = 1.92; \alpha_k = 1; \alpha_\epsilon = 0.76923$.

Solver name simpleFoam: an implementation for steady incompressible flow.

Математическая модель расчета параметров течения

(URANS – Unsteady Reynolds Averaged Navier-Stokes)

Обобщенное уравнение, отражающее законы сохранения и модель турбулентности, в интегральной форме

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_{\Omega}\rho\phi\,\mathrm{d}\Omega+\int_{\Omega}\rho\phi\vec{V}\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}S=\int_{S}\Gamma\,grad\phi\cdot\vec{n}\,\mathrm{d}S+\int_{\Omega}q_{\phi}\,\mathrm{d}\Omega \qquad (1)$$

Здесь ϕ - обобщенная переменная $\phi=\{1,u,\upsilon,w,k,\omega,h\}$ Ω - контрольный объем,

$\vec{V}$ - вектор скорости, Γ - коэффициенты переноса, $\vec{n}$ – вектор нормали

dS - Дифференциальный элемент площади

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i}=\tilde{P}_k-\beta^*\rho k\omega+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu+\sigma_k\mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right]$$ Модель k-omega SST Ментера

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i\omega)}{\partial x_i}=\alpha\rho S^2-\beta\rho\omega^2+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu+\sigma_\omega\mu_t)\frac{\partial\omega}{\partial x_i}\right]+2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial\omega}{\partial x_i} \qquad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho\tilde{\nu})}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho\tilde{\nu}u_j\right)=\frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}}\left\{\frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\mu+\rho\tilde{\nu})\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right]+C_{b2}\rho\left(\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right)^2\right\}+G_\nu-Y_\nu;$$ Модель Спаларта-Аллмараса (3)

$\rho,u,p,k,\omega,h,t,\mu$ - плотность, скорость, давление, кинетическая энергия турбулентности, скорость диссипации энергии, энтальпия, время, динамическая вязкость

Постановка задачи: Задание граничных и начальных условий, выбор расчетных схем

Математическая модель расчета параметров течения
(LES – Large Eddy Simulation)

$$u = \bar{u} + u' \quad \bar{u} = \int_{D1} G(\xi,\zeta,\eta,\Delta) u(\xi,\zeta,\eta,t) d\xi d\varsigma d\eta \tag{4}$$

u' - подсеточный масштаб скорости $\Delta = V^{1/3} = \left(\Delta x \Delta y \Delta z\right)^{1/3}$ (5)

$$\partial_t \bar{u} + \nabla \cdot \left(\bar{u} \otimes \bar{u}\right) = \nabla \cdot \left(\bar{S} - B\right) \quad S = -pI + 2\nu D$$

$$D = 0.5\left(\nabla u + \nabla u^T\right) \quad B = L + C + R \tag{6}$$

I - единичный тензор L - напряжения Леонарда

C - перекрестные члены R - подсеточные напряжения Рейнольдса

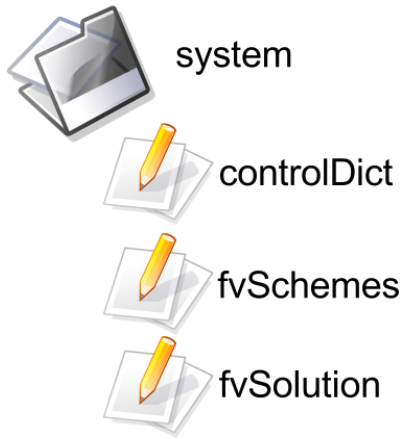
Дифференциальное уравнение для подсеточной кинетической энергии:

$$\frac{\partial k_{sgs}}{\partial t} + \nabla \cdot (k_{sgs} \bar{u}) = \nabla\left[\left(\nu + \nu_{SGS}\right) \cdot \nabla k_{sgs}\right] + 2\nu_{sgs}\left|\bar{s}\right|^2 - 0.916\frac{k_{sgs}^{3/2}}{\Delta} \tag{7}$$

$\nu_{sgs} = 0.067 k_{sgs}^{0.5} \Delta \quad \bar{s}$ - тензор подсеточной скорости деформации (8)

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ для примера pitzDaily. КАТАЛОГ ЗАДАЧИ

```
[cfd1@master simpleFoam]$ cd pitzDailyParallel/
[cfd1@master pitzDailyParallel]$ ll
total 12
drwxr-xr-x 2 cfd1 sm3 4096 Dec 22 16:43 0
drwxr-xr-x 3 cfd1 sm3 4096 Dec 22 16:43 constant
drwxr-xr-x 2 cfd1 sm3 4096 Dec 22 16:48 system
[cfd1@master pitzDailyParallel]$
[cfd1@master pitzDailyParallel]$ cd system/
[cfd1@master system]$ ll
total 16
-rw-r----- 1 cfd1 sm3 1222 Dec 22 16:43 controlDict
-rw-r----- 1 cfd1 sm3 1206 Dec 22 16:48 decomposeParDict
-rw-r----- 1 cfd1 sm3 1877 Dec 22 16:43 fvSchemes
-rw-r----- 1 cfd1 sm3 1940 Dec 22 16:43 fvSolution
```



ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ СКОРОСТИ 0/U

```
dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];

internalField   uniform (0 0 0);

boundaryField
{    inlet              {       type            fixedValue;       value           uniform (10 0 0);    }

outlet             {       type            zeroGradient;    }

upperWall          {       type            fixedValue;       value           uniform (0 0 0);    }

lowerWall          {       type            fixedValue;       value           uniform (0 0 0);    }

frontAndBack       {       type            empty;    }}//
********************************************************************************* //
```

ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ДАВЛЕНИЯ 0/P

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

internalField   uniform 0;

boundaryField
{
    inlet
    {  type            zeroGradient; }

    outlet
    { type             fixedValue;
      value            uniform 0; }

    upperWall
    { type             zeroGradient; }

    lowerWall
    { type             zeroGradient; }

    frontAndBack
    { type             empty;}
}
```

ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ 0/k

Использование пристеночной функции kqRWallFunction

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

internalField   uniform 0.375;

boundaryField
{
inlet    {       type            fixedValue;       value          uniform 0.375;    }
outlet    {       type            zeroGradient;    }
upperWall    {       type            kqRWallFunction;       value          uniform 0.375;    }
lowerWall    {       type            kqRWallFunction;       value          uniform 0.375;    }
frontAndBack    {       type            empty;
 }
}
// ************************************************************************* //
```

ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ЭНЕРГИИ ДИССИПАЦИИ 0/epsilon
Использование пристеночной функции epsilonWallFunction

```
dimensions      [0 2 -3 0 0 0 0];
internalField   uniform 14.855;
boundaryField
{
    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform 14.855; }
    outlet
    {
        type            zeroGradient;}
    upperWall
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 14.855; }
    lowerWall
    {
        type            epsilonWallFunction;
        value           uniform 14.855; }
    frontAndBack
    {
        type            empty;}
}
```

ЗНАЧЕНИЯ для тензора Рейнольдсовых напряжений 0/R
Использование пристеночной функции kqRWallFunction

```
dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];
internalField   uniform (0 0 0 0 0 0);
boundaryField
{
    inlet
    {
        type            fixedValue;
        value           uniform (0 0 0 0 0 0); }

    outlet
    {
        type            zeroGradient; }
    upperWall
    {
        type            kqRWallFunction;
        value           uniform ( 0 0 0 0 0 0 ); }
    lowerWall
    {
        type            kqRWallFunction;
        value           uniform ( 0 0 0 0 0 0 ); }
    frontAndBack
    {
        type            empty; }
}
```

ЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ ТУРБУЛЕНТНОЙ ВЯЗКОСТИ 0/nut
Использование пристеночной функции nutWallFunction

```
dimensions      [0 2 -1 0 0 0 0];
internalField   uniform 0;
boundaryField
{
    inlet
    {
        type            calculated;
        value           uniform 0;}
    outlet
    {
        type            calculated;
        value           uniform 0;}
    upperWall
    {
        type            nutWallFunction;
        value           uniform 0;}
    lowerWall
    {
        type            nutWallFunction;
        value           uniform 0;}
    frontAndBack
    {
        type            empty;}
}
```

УПРАВЛЕНИЕ РАСЧЕТОМ Файл /system/controlDict

```
application     simpleFoam;
startFrom       startTime;
startTime       0;
stopAt          endTime;
endTime         10;
deltaT          1;
writeControl    timeStep;
writeInterval   1;
purgeWrite      0;
writeFormat     ascii;
writePrecision  6;
writeCompression uncompressed;
timeFormat      general;
timePrecision   6;
runTimeModifiable yes;
```

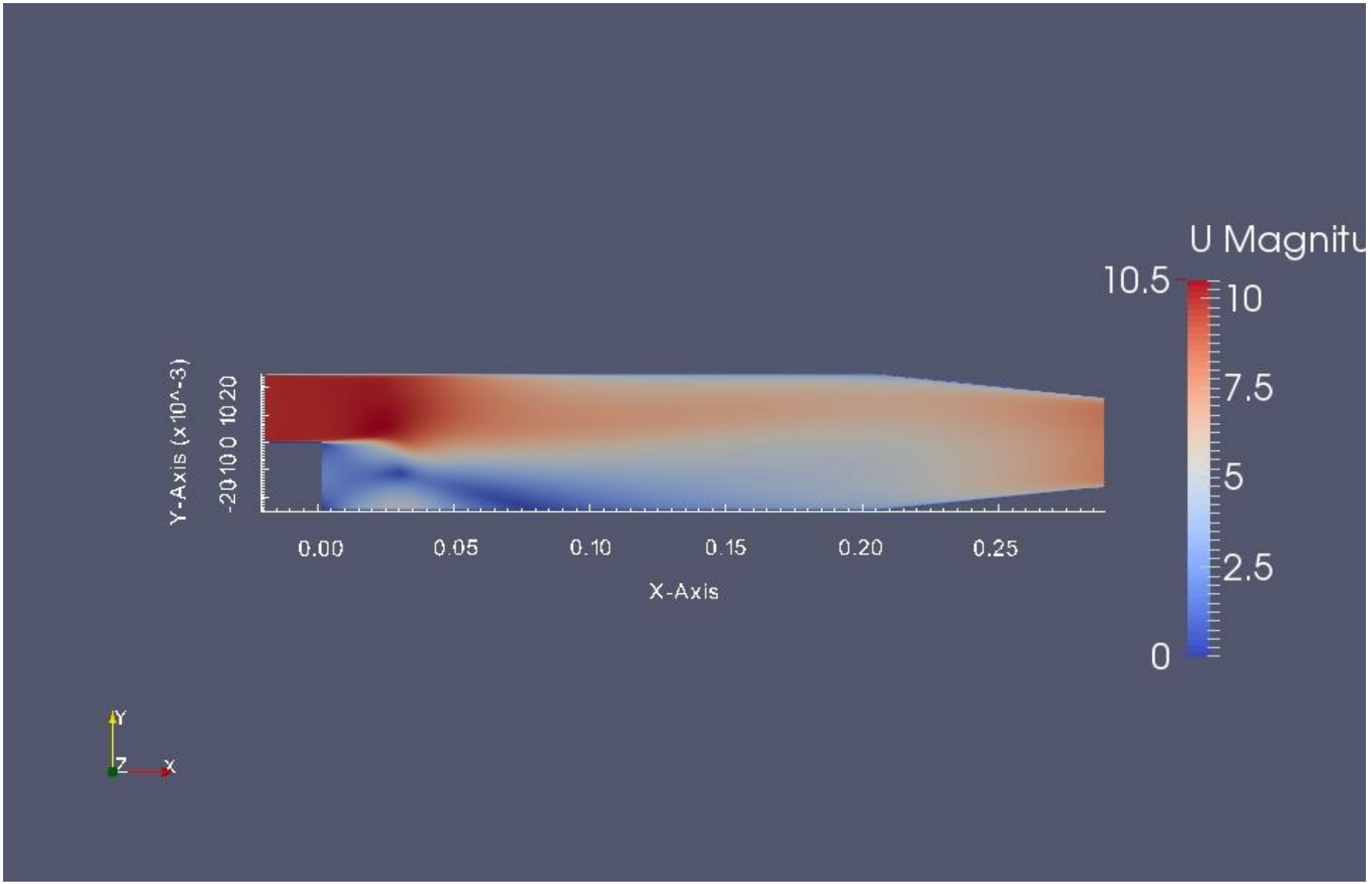
СХЕМЫ ДИСКРЕТИЗАЦИИ /system/fvSchemes

```
gradSchemes{    default         Gauss linear;
grad(p)         Gauss linear;
grad(U)         Gauss linear;}
divSchemes{     default         none;
div(phi,U)      Gauss GammaV 1.0;
div(phi,k)      Gauss Gamma 1.0;
div(phi,epsilon) Gauss Gamma 1.0;
div(phi,omega)  Gauss Gamma 1.0;
 div(phi,R)      Gauss Gamma 1.0;
div(R)          Gauss linear;
div(phi,nuTilda) Gauss upwind;
div((nuEff*dev(grad(U).T()))) Gauss linear;}
laplacianSchemes{    default         none;
laplacian(nuEff,U) Gauss linear corrected;
laplacian((1|A(U)),p) Gauss linear corrected;
laplacian(DkEff,k) Gauss linear corrected;
laplacian(DepsilonEff,epsilon) Gauss linear corrected;
 laplacian(DomegaEff,omega) Gauss linear corrected;
laplacian(DREff,R) Gauss linear corrected;
laplacian(DnuTildaEff,nuTilda) Gauss linear corrected;}
interpolationSchemes{    default         linear;    interpolate(U)  linear;}
snGradSchemes{    default         corrected;}
fluxRequired{    default         no;    p;}
```

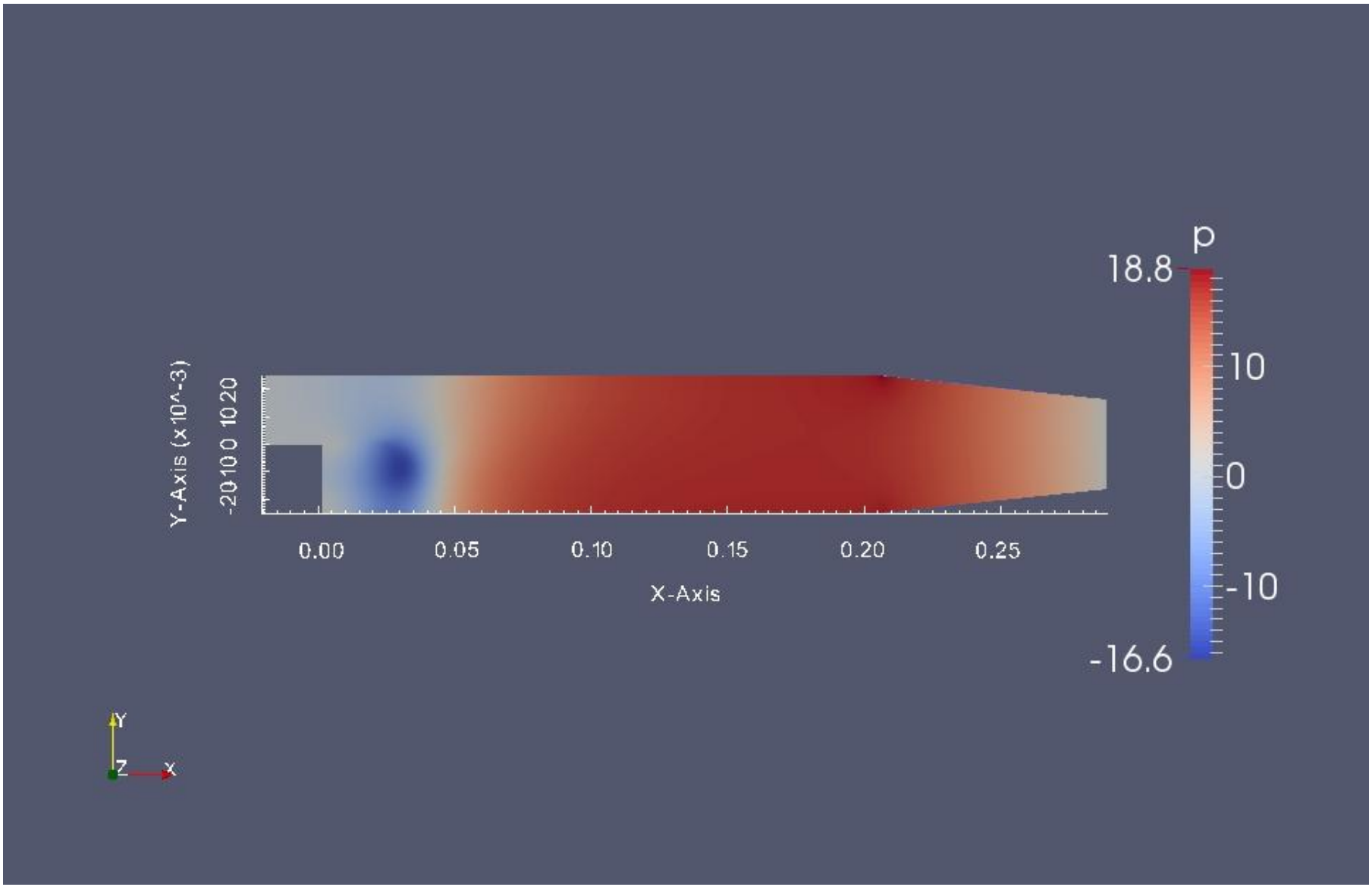
МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ СЛАУ Файл /system/fvSolutions

```
FoamFile
{ version 2.0; format ascii; class dictionary; object fvSolution;}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * //

Solvers {

p PCG { preconditioner DIC; tolerance 1e-06; relTol 0.01; };
U PBiCG { preconditioner DILU; tolerance 1e-05; relTol 0.1; };
k PBiCG { preconditioner DILU; tolerance 1e-05; relTol 0.1; };
epsilon PBiCG { preconditioner DILU; tolerance 1e-05; relTol 0.1; };
omega PBiCG { preconditioner DILU; tolerance 1e-05; relTol 0.1; };
R PBiCG { preconditioner DILU; tolerance 1e-05; relTol 0.1; };
nuTilda PBiCG { preconditioner DILU; tolerance 1e-05; relTol 0.1; };}

SIMPLE
{ nNonOrthogonalCorrectors 0;}
relaxationFactors
{ p 0.3; U 0.7; k 0.7; epsilon 0.7; omega 0.7; R
0.7; nuTilda 0.7;}
PISO
{ nCorrectors 4; nNonOrthogonalCorrectors 0; pRefCell 0; pRefValue 0;}
// ************************************************************************* //
```

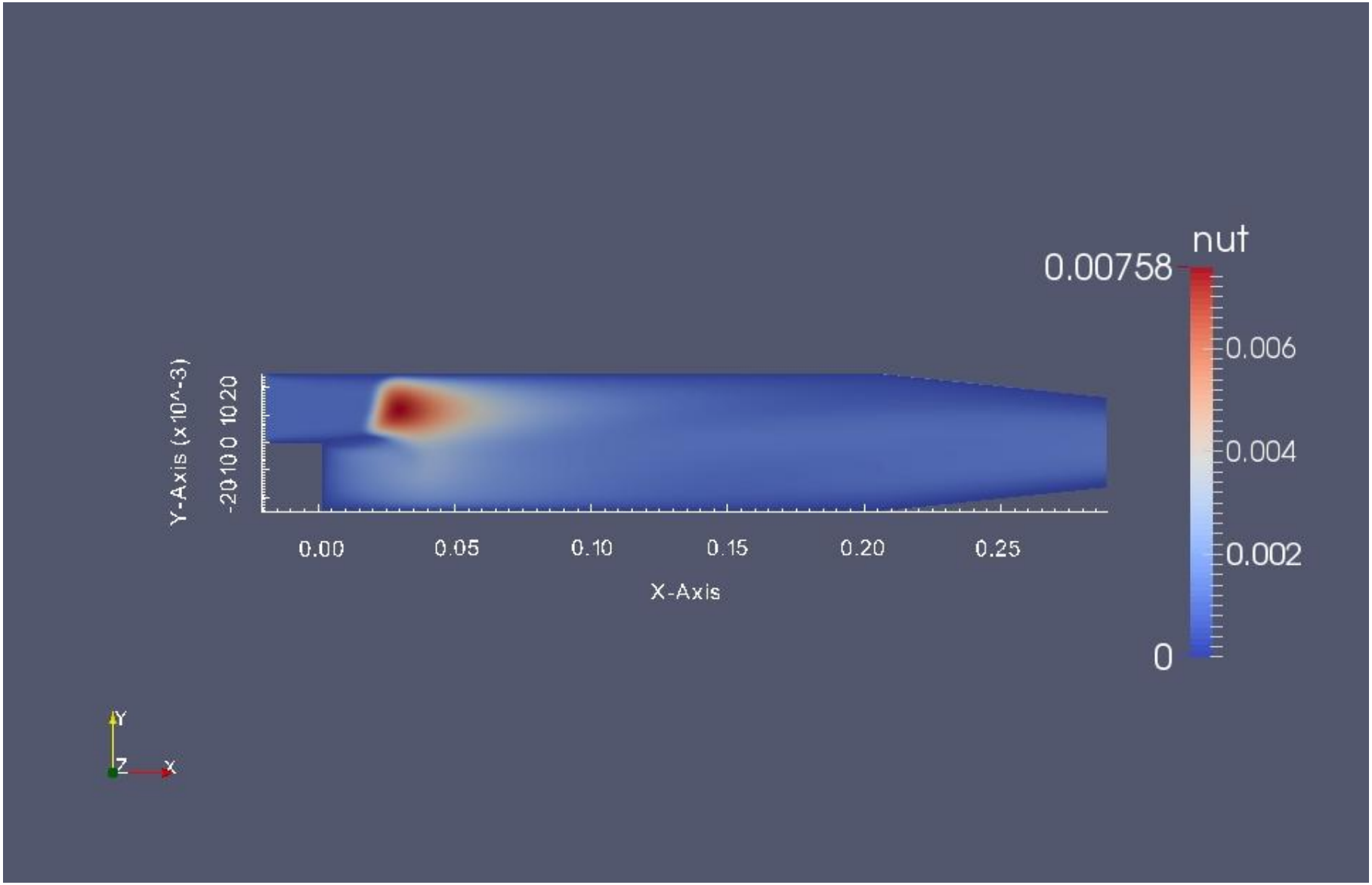
Результаты расчета UMagnitude в simpleFoam. T=100 с.



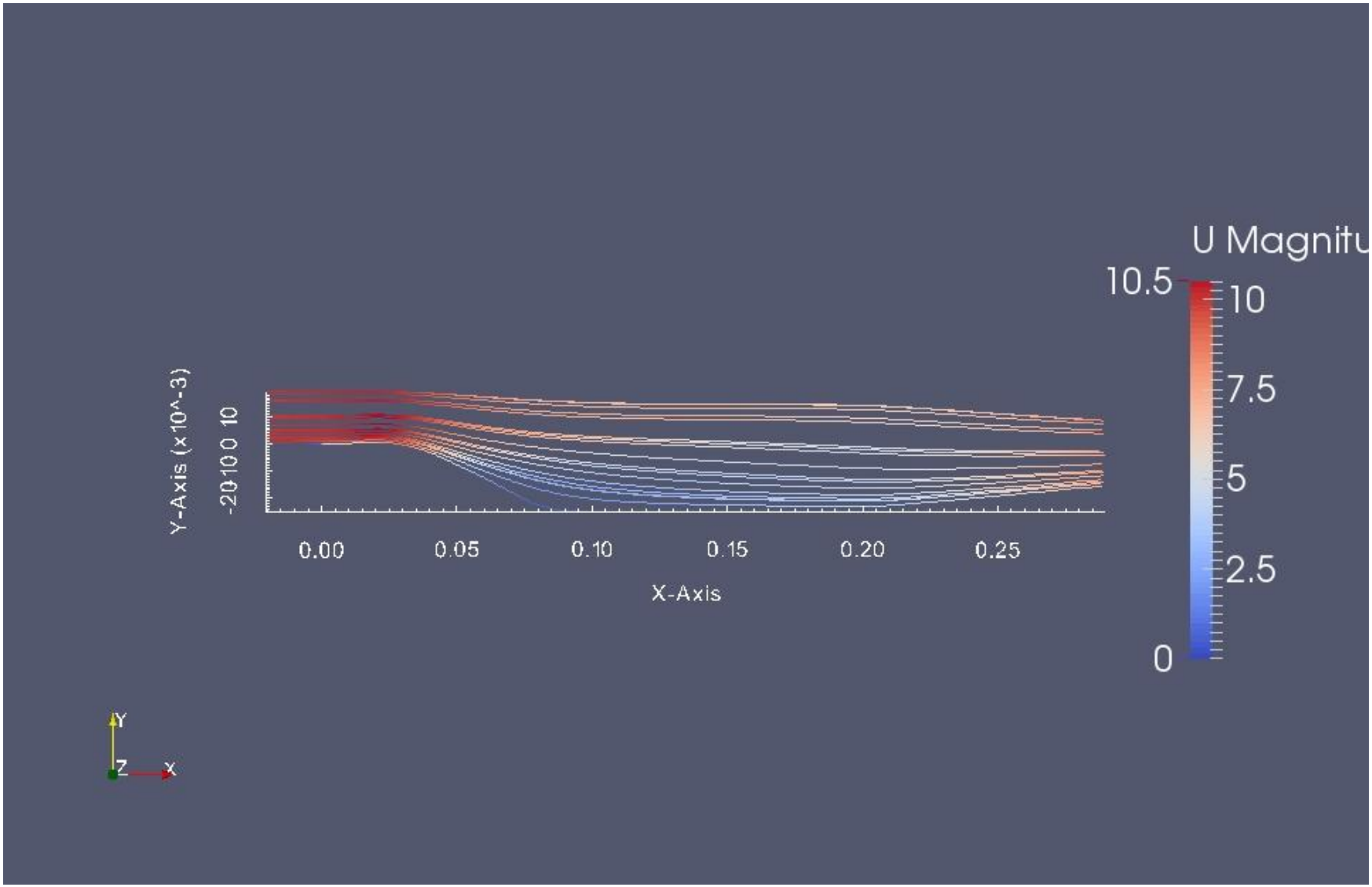
Результаты расчета p в simpleFoam. T=100 с.



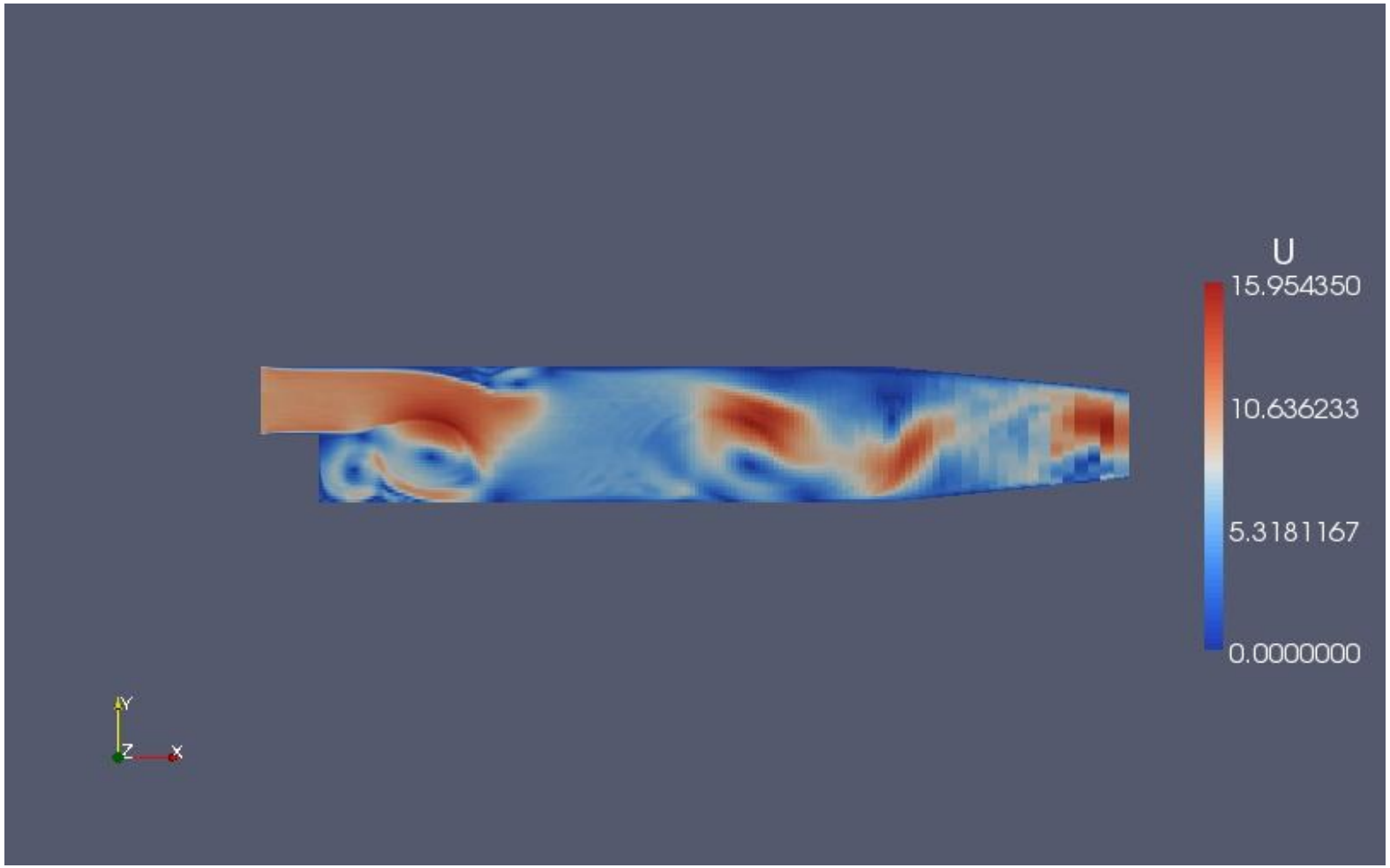
Результаты расчета nut в simpleFoam. T=100 с.



Результаты расчета линий тока в simpleFoam. T=100 с.



Результаты расчета скорости в pisoFoam



LES model. One eddy equation.

Общий алгоритм для любого расчетного кейса в OpenFOAM

$ blockMesh – подготовка расчетной сетки

$ checkMesh – проверка качества расчетной сетки

$ simpleFoam ($pisoFoam) – запуск решателя

$ foamToVTK - трансляция результатов в формат VTK

$ touch 1.foam – создание файла с раширением ‘foam’

$ simpleFoam > log & - создание log файла

$ foamLog log – запуск скрипта, использующего команды Linux grep, awk , sed для извлечения данных из log файла.

$ yPlusRAS – определение значения yPlus для URANS модели

$ gnuplot – построение графиков

Запуск Paraview и загрузка файлов с расширением vtk для обработки результатов расчета.