

*Школа-семинар*  
**«Основы использования  
OpenFOAM, SALOME и ParaView»**

**САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА**



*М.В. Крапошин (НИЦ Курчатовский институт)  
О.И. Самоваров (Институт системного программирования РАН)  
С.В. Стрижак (ГОУ ВПО МГТУ им. Баумана)*



# САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА. СПИСОК ЗАДАНИЙ

*На выбор предлагаются следующие 4 простых класса задач:*

- I. 2D обтекание бруса (внешнее, плоско-параллельное течение);*
- II. 2D обтекание цилиндра (внешнее, плоско-параллельное течение);*
- III. 3D обтекание сферы (внешнее, плоскопараллельное течение)*
- IV. 2D сужение потока в окнах клапана (внутреннее, плоско-параллельное течение)*



### САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА. ПОЛНЫЙ СПИСОК ЗАДАНИЙ (1)

*Для каждого из четырех классов предлагается несколько вариантов наборов исходных данных (варианты 1-8)*

Вариант 1 — 2D обтекание бруса при числе  $Re=100$  (ортогональная, структурированная гексаэдральная сетка).

Вариант 2 — 2D обтекание бруса при числе  $Re=1000$  (ортогональная, структурированная гексаэдральная сетка).

Вариант 3 — 2D обтекание бруса при числе  $Re=10000$  (ортогональная, структурированная гексаэдральная сетка).

Вариант 4 — 2D обтекание бруса при числе  $Re=100000$  (ортогональная, структурированная гексаэдральная сетка).

Вариант 5 — 2D обтекание цилиндра при числе  $Re=100$  (слабо неортогональная, структурированная гексаэдральная сетка).

Вариант 6 — 2D обтекание цилиндра при числе  $Re=1000$  (слабо неортогональная, структурированная гексаэдральная сетка).

Вариант 7 — 2D обтекание цилиндра при числе  $Re=10000$  (слабо неортогональная, структурированная гексаэдральная сетка).

Вариант 8 — 2D обтекание цилиндра при числе  $Re=100000$  (слабо неортогональная, структурированная гексаэдральная сетка).



### САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА. ПОЛНЫЙ СПИСОК ЗАДАНИЙ (2)

*Для каждого из четырех классов предлагается несколько вариантов наборов исходных данных (варианты 9-15)*

Вариант 9 — 3D обтекание сферы при числе  $Re=10000$  (тетраэдральная неструктурированная сетка).

Вариант 10 — 3D обтекание сферы при числе  $Re=100000$  (тетраэдральная неструктурированная сетка).

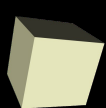
Вариант 11 — сужение потока в окнах с перекрытием 0%, несжимаемое

Вариант 12 — сужение потока в окнах с перекрытием 0%, сжимаемое

Вариант 13 — сужение потока в окнах с перекрытием 10%, несжимаемое

Вариант 14 — сужение потока в окнах с перекрытием 10%, сжимаемое

Вариант 15 — сужение потока в окнах с перекрытием 50%, сжимаемое

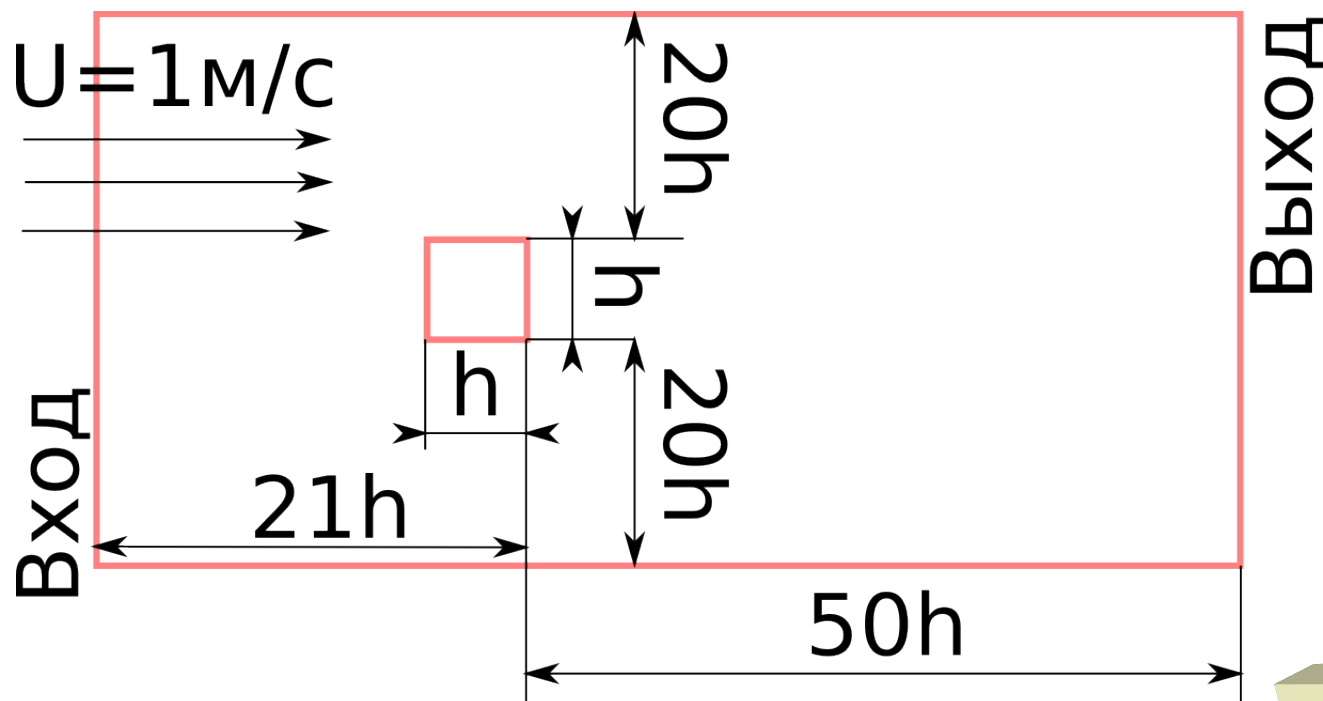


## I. ОБТЕКАНИЕ БРУСА — ГЕОМЕТРИЯ

Рассматривается плоско-параллельное обтекание бруса несжимаемой вязкой жидкостью при различных числах Рейнольдса. Для формирования геометрии используется параметр  $h = 10\text{см}$  ( $0.01\text{м}$ ) — см. схему снизу. Использовать модель  $k$ -omega SST

Требуется: 1) сформировать геометрию расчетной области средствами SALOME (GEOM) в блочно-гексаэдральном виде; 2) определить на геометрии поверхности для задания граничных условий; 3) построить гексаэдральную расчетную сетку средствами SALOME (SMESH); 4) в пакете OpenFOAM провести расчет

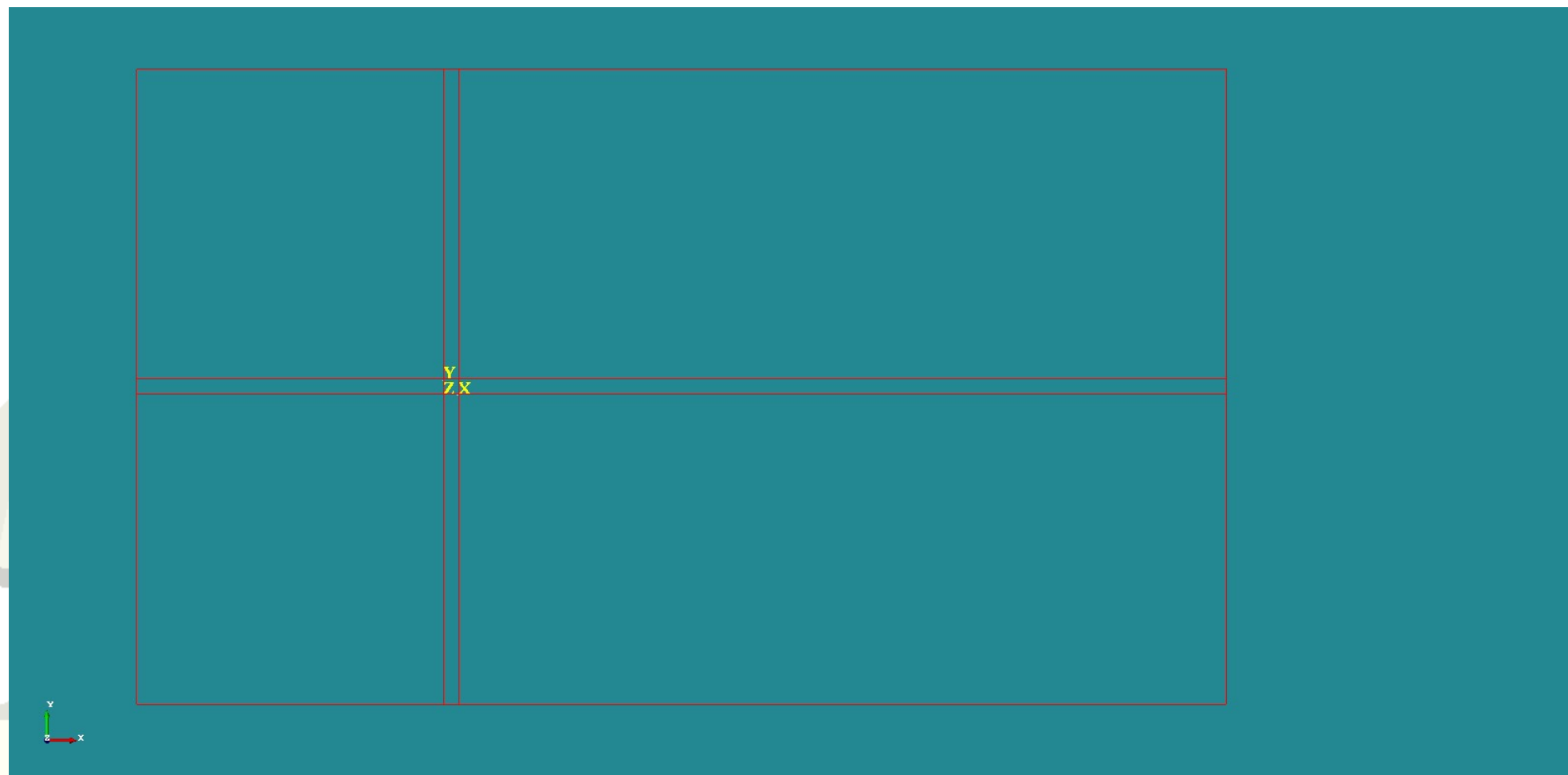
стационарного состояния для одного из следующих чисел  $Re$ : 100, 1000, 10000, 100000; 5) по результатам расчета в пакете ParaView построить поля скорости и давления; 6) построить распределение давления по периметру бруса





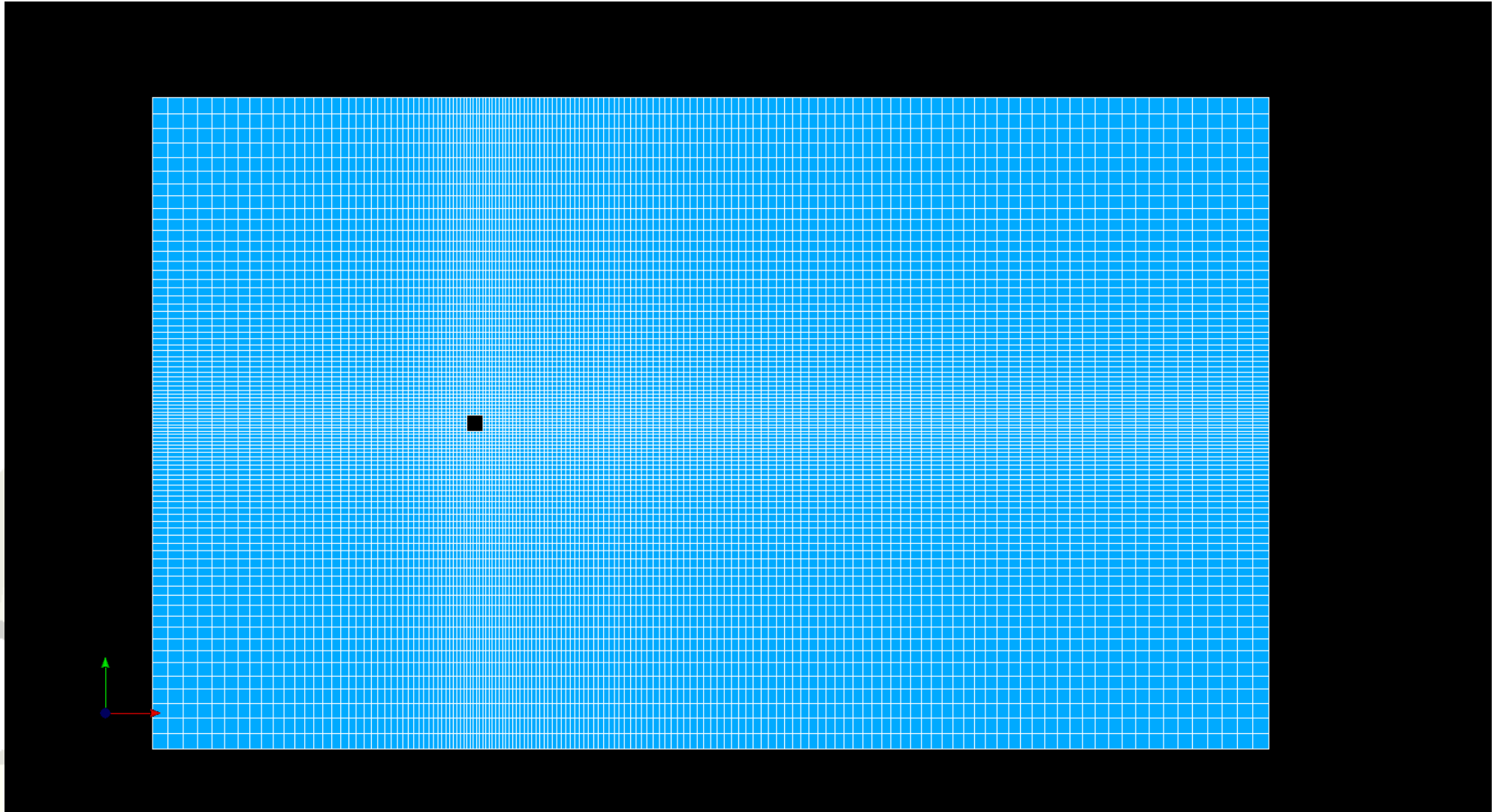
## I. ОБТЕКАНИЕ БРУСА — БЛОЧНАЯ ГЕОМЕТРИЯ

*По схеме расчетной области следует создать блочную геометрию похожего вида*





# I. ОБТЕКАНИЕ БРУСА — РАСЧЕТНАЯ СЕТКА





## I. ОБТЕКАНИЕ БРУСА — КРАЕВЫЕ УСЛОВИЯ

Невозмущенные поля давления ( $p$ ), скорости ( $U$ ), кинетической энергии турбулентности ( $k$ ), частоты диссипации кинетической энергии турбулентности ( $\omega$ ), турбулентной вязкости ( $\nu_t$ ). В нулевой момент времени  $p=0$ ,  $U=(0\ 0\ 0)$ ,  $k=1e-3$ ,  $\omega=1$ .

Граничные условия:

- На входе (*inlet*) — задается  $U$  ( $U_x=1\text{ м/с}$ ),  $k$ ,  $\omega$ . Нулевой градиент для давления
- На выходе (*outlet*) — задается давление  $p=0$ , нулевые градиенты для  $U$ ,  $k$ ,  $\omega$
- На стенках канала (*tube-walls*) — условие проскальзывания (*slip*) для всех величин
- На стенках бруса (*cube-walls*) — условие прилипание для скорости, пристеночные функции для  $k$ ,  $\omega$  и  $\nu_t$ , условие непроницаемости для  $p$

**Задание ГУ и НУ для полей  $k$ ,  $\omega$  и  $\nu_t$  необходимо только при решении турбулентной задачи**





# I. ОБТЕКАНИЕ БРУСА — КОНСТАНТЫ МОДЕЛИ

Исходя из заданных  $h$  (10см по умолчанию) и скорости на входе (1м/с по умолчанию) выбираем такую вязкость, чтобы соответствовала заданному числу  $Re$ :

- 1)  $Re=100$ , вязкость —  $1e-4$  (при  $h=10\text{см}$ ,  $U_x=1\text{м/с}$ )
- 2)  $Re=1000$ , вязкость —  $1e-5$  (при  $h=10\text{см}$ ,  $U_x=1\text{м/с}$ )
- 3)  $Re=10000$ , вязкость —  $1e-6$  (при  $h=10\text{см}$ ,  $U_x=1\text{м/с}$ )
- 4)  $Re=100000$ , вязкость —  $1e-7$  (при  $h=10\text{см}$ ,  $U_x=1\text{м/с}$ )

Для первых двух случаев можно не использовать моделирование турбулентности, для третьего и четвертого обязательно. Модель турбулентности -  $k\Omega SST$

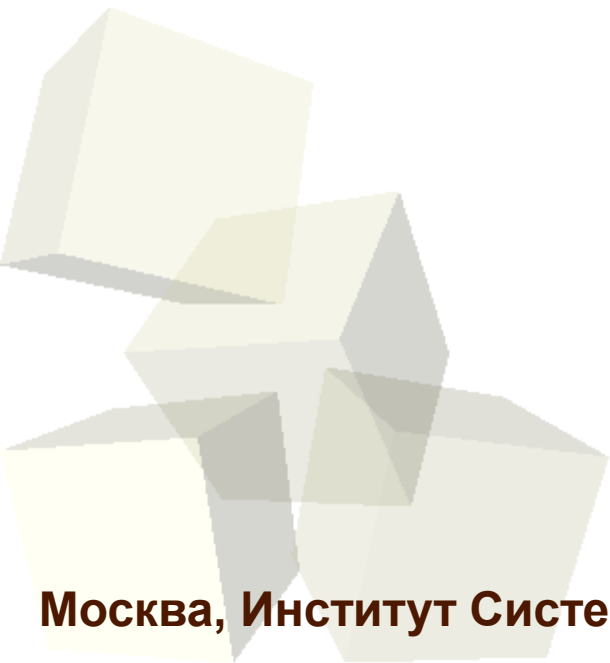


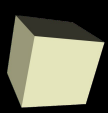
# I. ОБТЕКАНИЕ БРУСА — ПАРАМЕТРЫ СЧЕТА

*Расчет проводится по итерациям (шаг по времени = 1), вывод через каждые 100 шагов. Общее число итераций — 1000.*

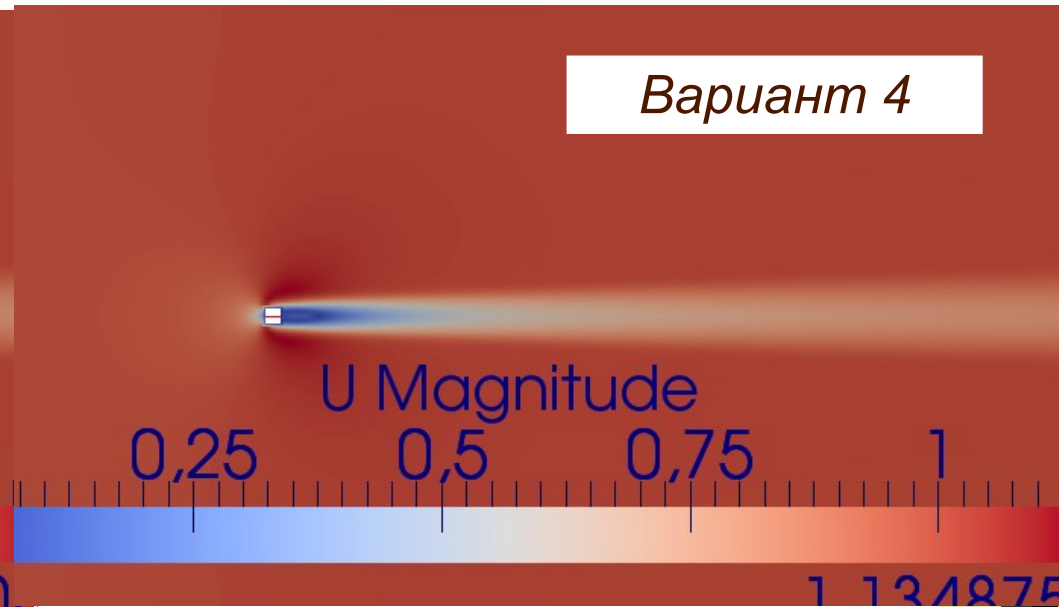
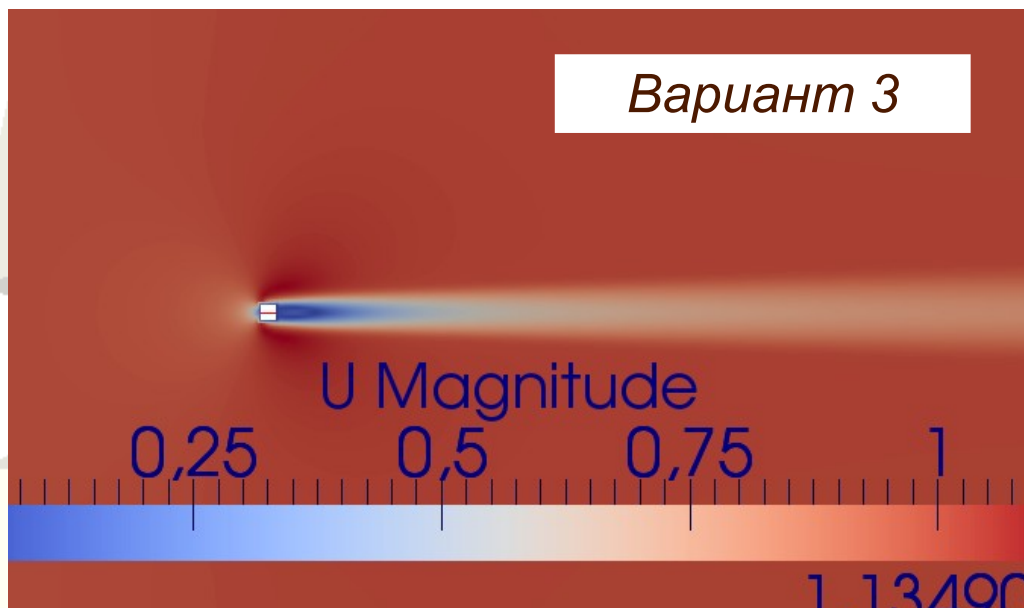
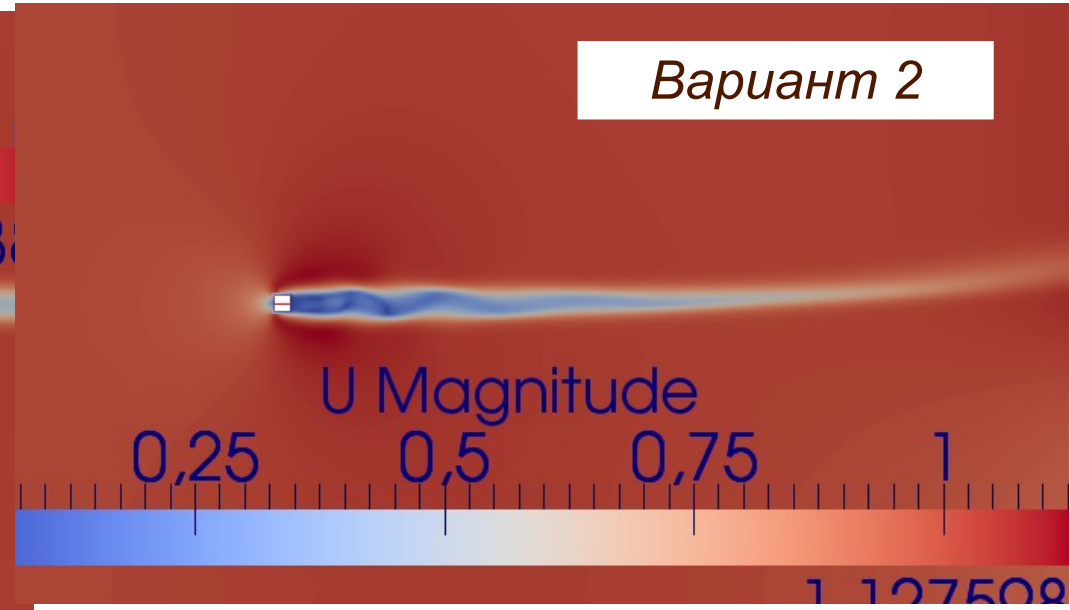
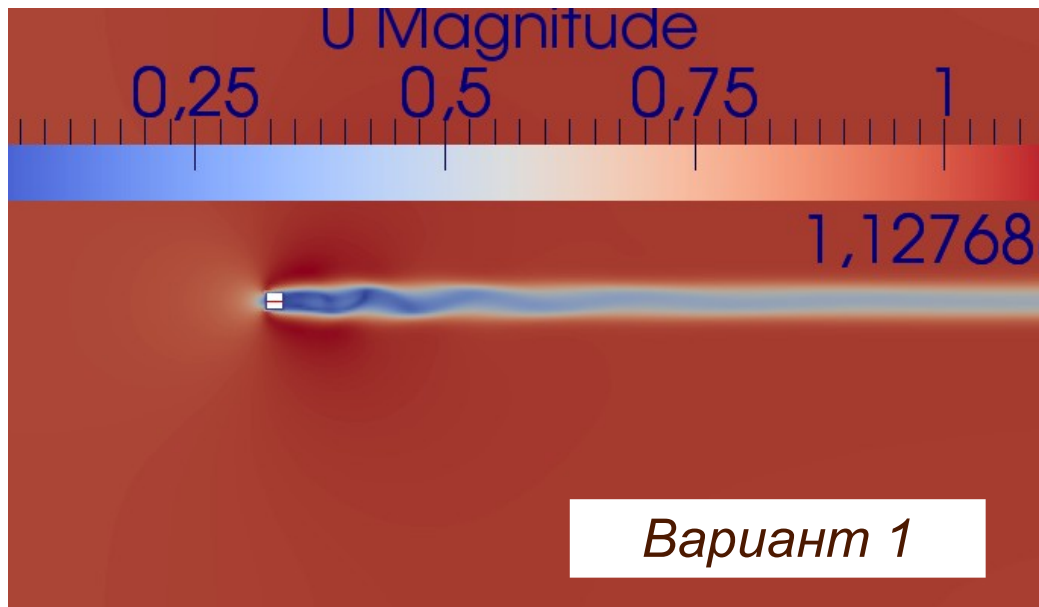
*Для адвективных слагаемых используется противопоточная схема дискретизации.*

*Коэффициенты релаксации:  $r_u = 0.5$ ,  $r_p = 0.3$ ,  $r_k = 0.7$ ,  $k_{\omega} = 0.7$*





## I. ОБТЕКАНИЕ БРУСА — РЕЗУЛЬТАТЫ





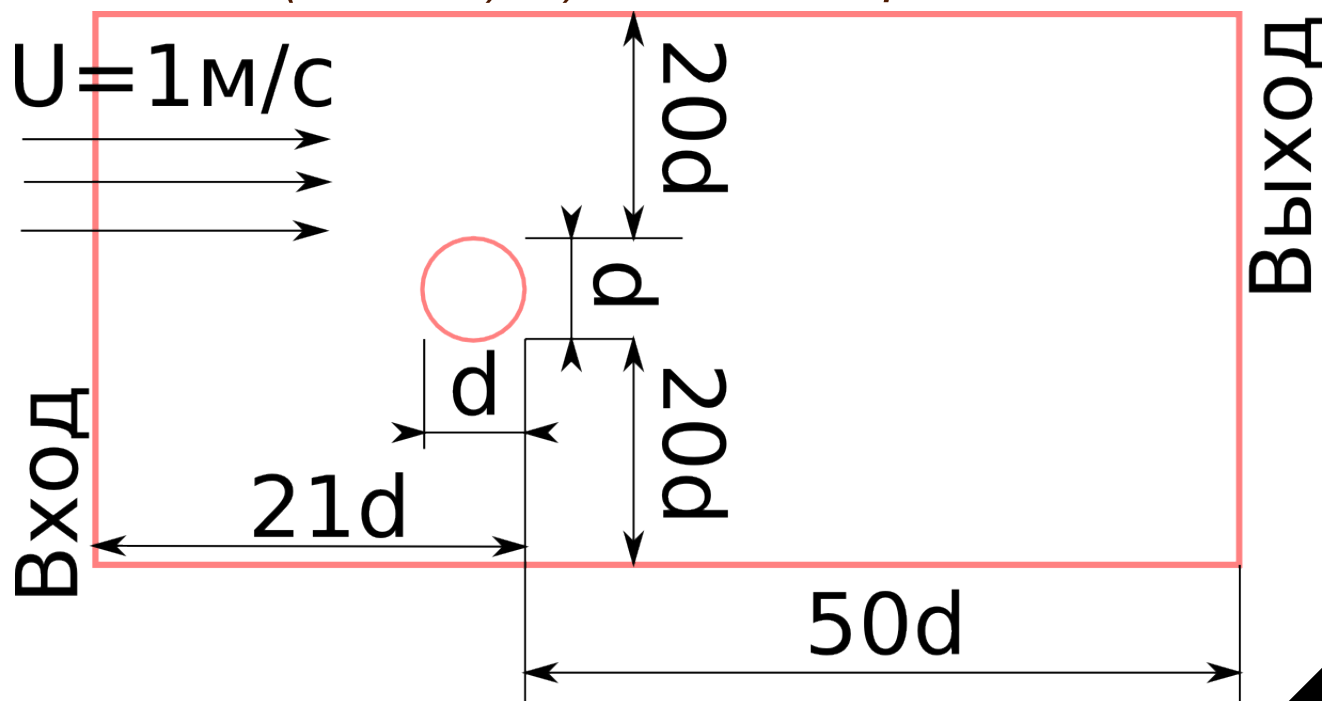
## II. ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА - ГЕОМЕТРИЯ

Рассматривается плоско-параллельное обтекание цилиндра несжимаемой вязкой жидкостью при различных числах Рейнольдса. Для формирования геометрии используется параметр  $d = 10\text{см}$  ( $0.01\text{м}$ ) — см. схему снизу.

Использовать модель  $k$ -omega SST

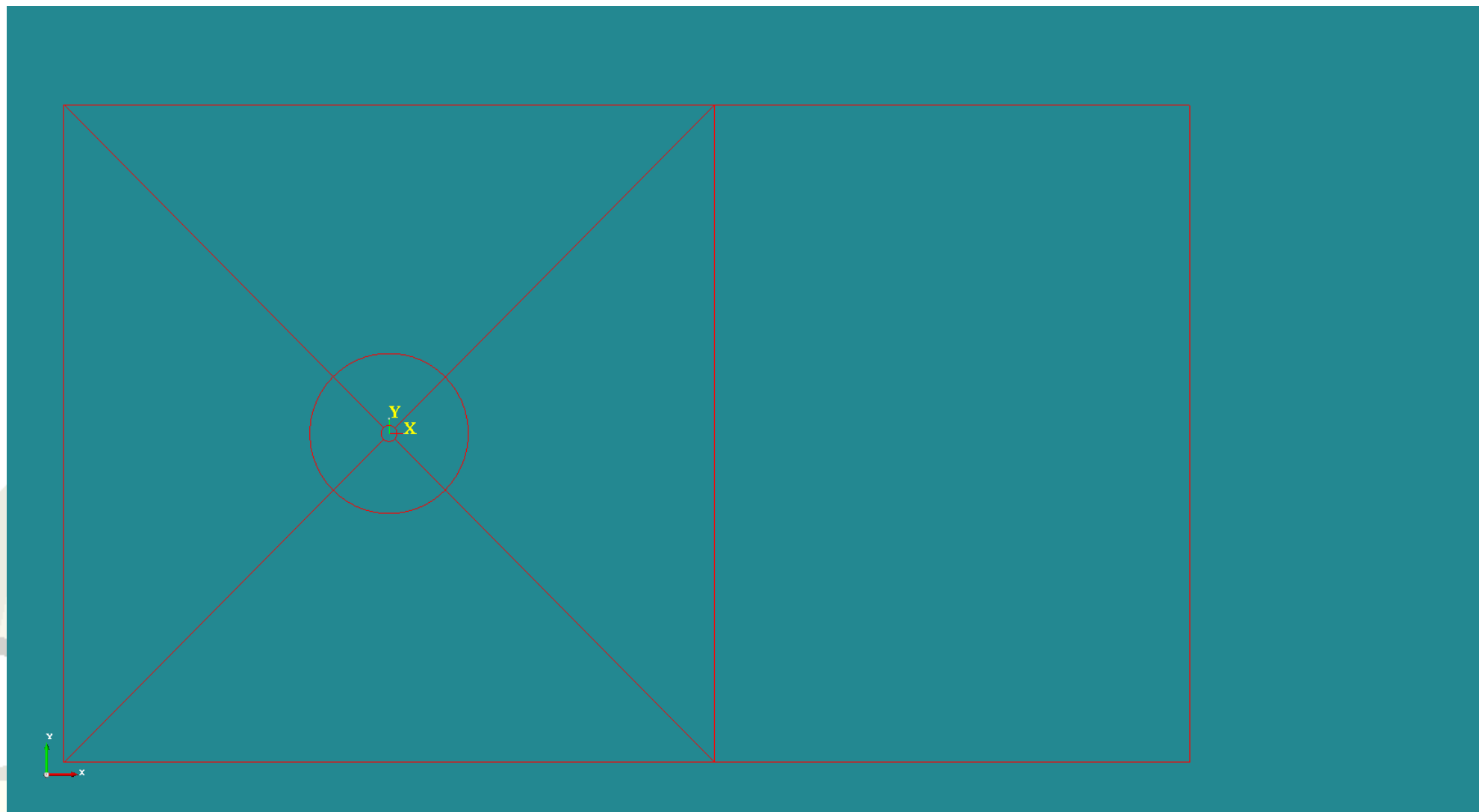
Требуется: 1) сформировать геометрию расчетной области средствами SALOME (GEOM) в блочно-гексаэдральном виде; 2) определить на геометрии поверхности для задания граничных условий; 3) построить гексаэдральную расчетную сетку средствами SALOME (SMESH); 4) в пакете OpenFOAM

провести расчет стационарного состояния для одного из следующих чисел  $Re$ : 100, 1000, 10000, 100000; 5) по результатам расчета в пакете ParaView построить поля скорости и давления; 6) построить распределение давления по периметру бруса



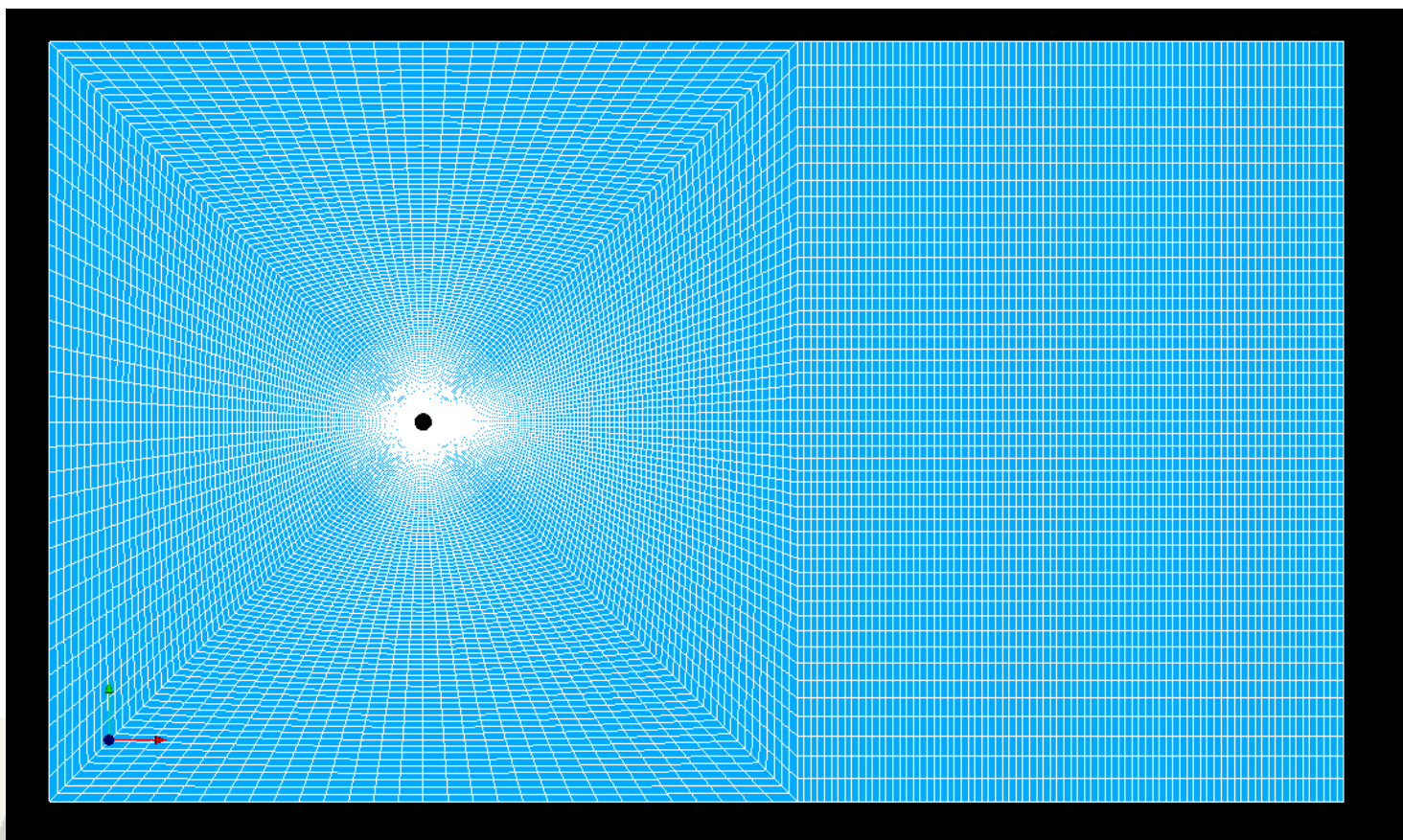


## II. ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА — БЛОЧНАЯ ГЕОМЕТРИЯ





## II. ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА — РАСЧЕТНАЯ СЕТКА





## II. ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА — КРАЕВЫЕ УСЛОВИЯ

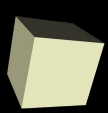
Невозмущенные поля давления ( $p$ ), скорости ( $U$ ), кинетической энергии турбулентности ( $k$ ), частоты диссипации кинетической энергии турбулентности ( $\omega$ ), турбулентной вязкости ( $\nu_t$ ). В нулевой момент времени  $p=0$ ,  $U=(0\ 0\ 0)$ ,  $k=1e-3$ ,  $\omega=1$ .

Граничные условия:

- На входе (*inlet*) — задается  $U$  ( $U_x=1\text{ м/с}$ ),  $k$ ,  $\omega$ . Нулевой градиент для давления
- На выходе (*outlet*) — задается давление  $p=0$ , нулевые градиенты для  $U$ ,  $k$ ,  $\omega$
- На стенках канала (*tube-walls*) — условие проскальзывания (*slip*) для всех величин
- На стенках цилиндра (*cyl-walls*) — условие прилипание для скорости, пристеночные функции для  $k$ ,  $\omega$  и  $\nu_t$ , условие непроницаемости для  $p$

**Задание ГУ и НУ для полей  $k$ ,  $\omega$  и  $\nu_t$  необходимо только при решении турбулентной задачи**





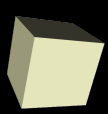
# II. ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА — КОНСТАНТЫ МОДЕЛИ

Исходя из заданных  $d$  (10см по умолчанию) и скорости на входе (1м/с по умолчанию) выбираем такую вязкость, чтобы соответствовала заданному числу  $Re$ :

- 1)  $Re=100$ , вязкость —  $1e-4$  (при  $d=10\text{см}$ ,  $U_x=1\text{м/с}$ )
- 2)  $Re=1000$ , вязкость —  $1e-5$  (при  $d=10\text{см}$ ,  $U_x=1\text{м/с}$ )
- 3)  $Re=10000$ , вязкость —  $1e-6$  (при  $d=10\text{см}$ ,  $U_x=1\text{м/с}$ )
- 4)  $Re=100000$ , вязкость —  $1e-7$  (при  $d=10\text{см}$ ,  $U_x=1\text{м/с}$ )

Для первых двух случаев можно не использовать моделирование турбулентности, для третьего и четвертого обязательно. Модель турбулентности -  $k\Omega SST$





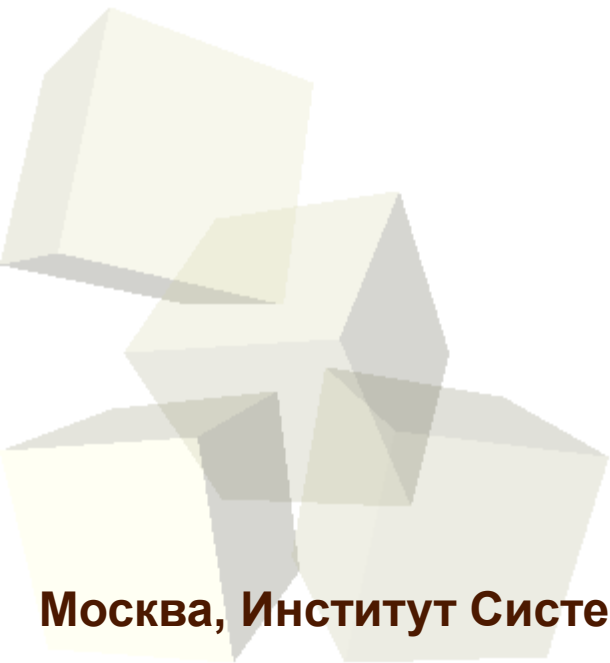
# II. ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА — ПАРАМЕТРЫ СЧЕТА

*Расчет проводится по итерациям (шаг по времени = 1), вывод через каждые 100 шагов. Общее число итераций — 1000.*

*Для адвективных слагаемых используется противопоточная схема дискретизации.*

*Коэффициенты релаксации:  $r_u = 0.5$ ,  $r_p = 0.3$ ,  $r_k = 0.7$ ,  $k_{\omega} = 0.7$*

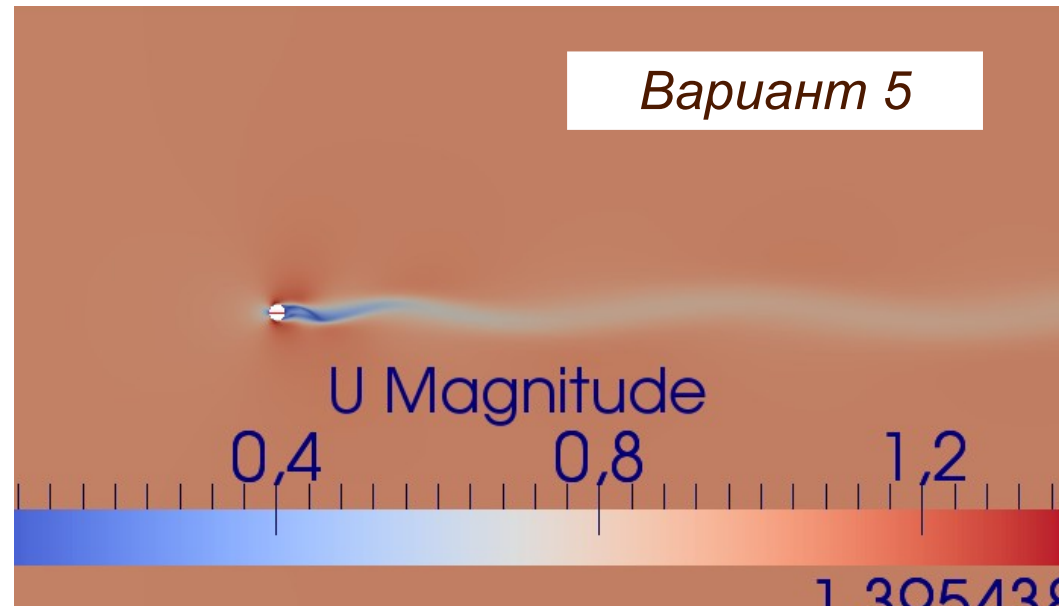
*Число поправок на неортогональность - 1*



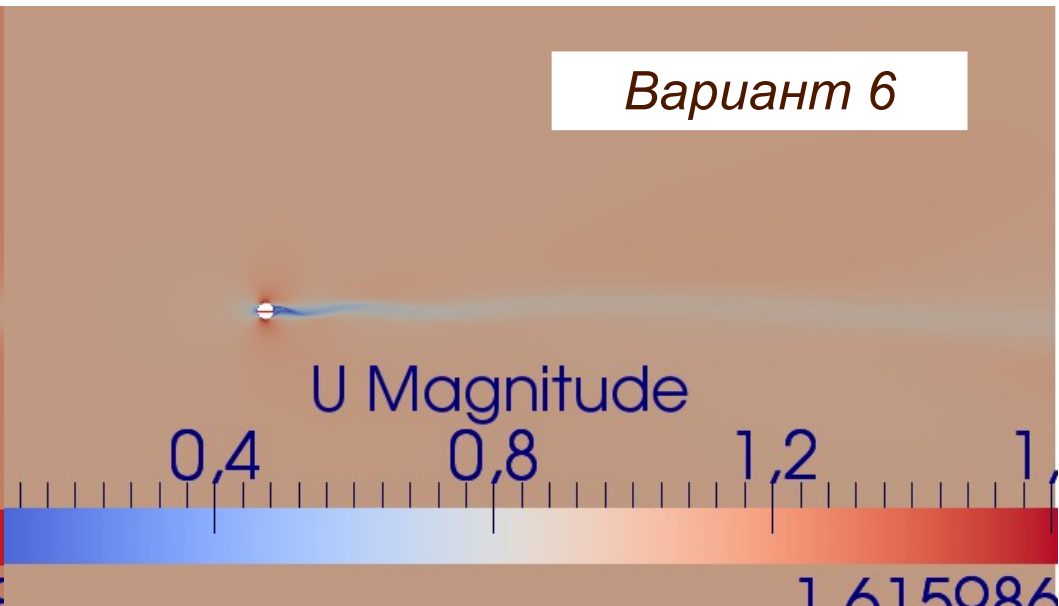


## II. ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА — РЕЗУЛЬТАТЫ

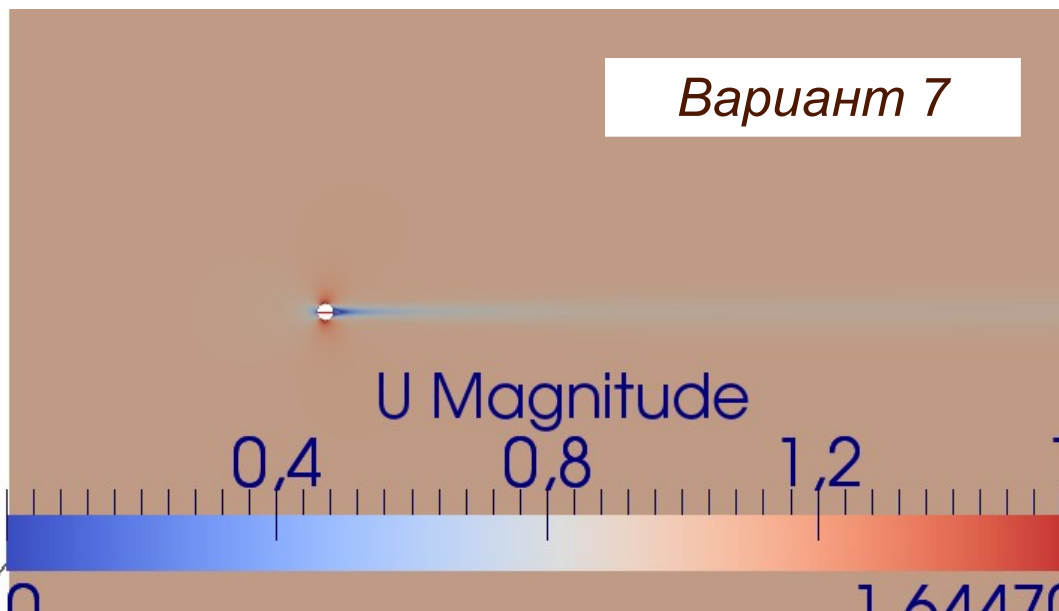
Вариант 5



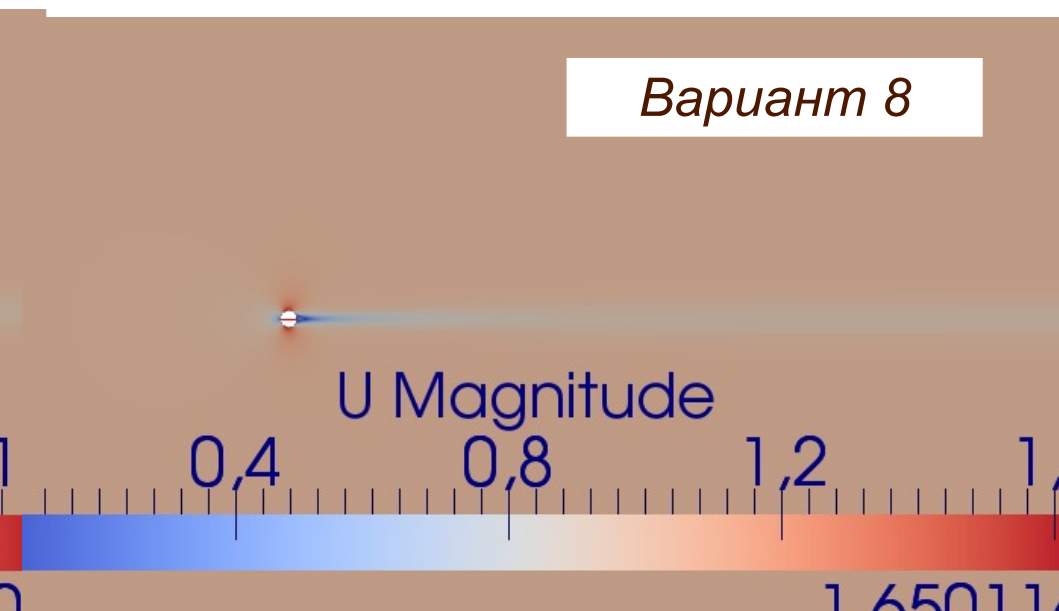
Вариант 6

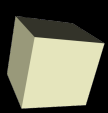


Вариант 7



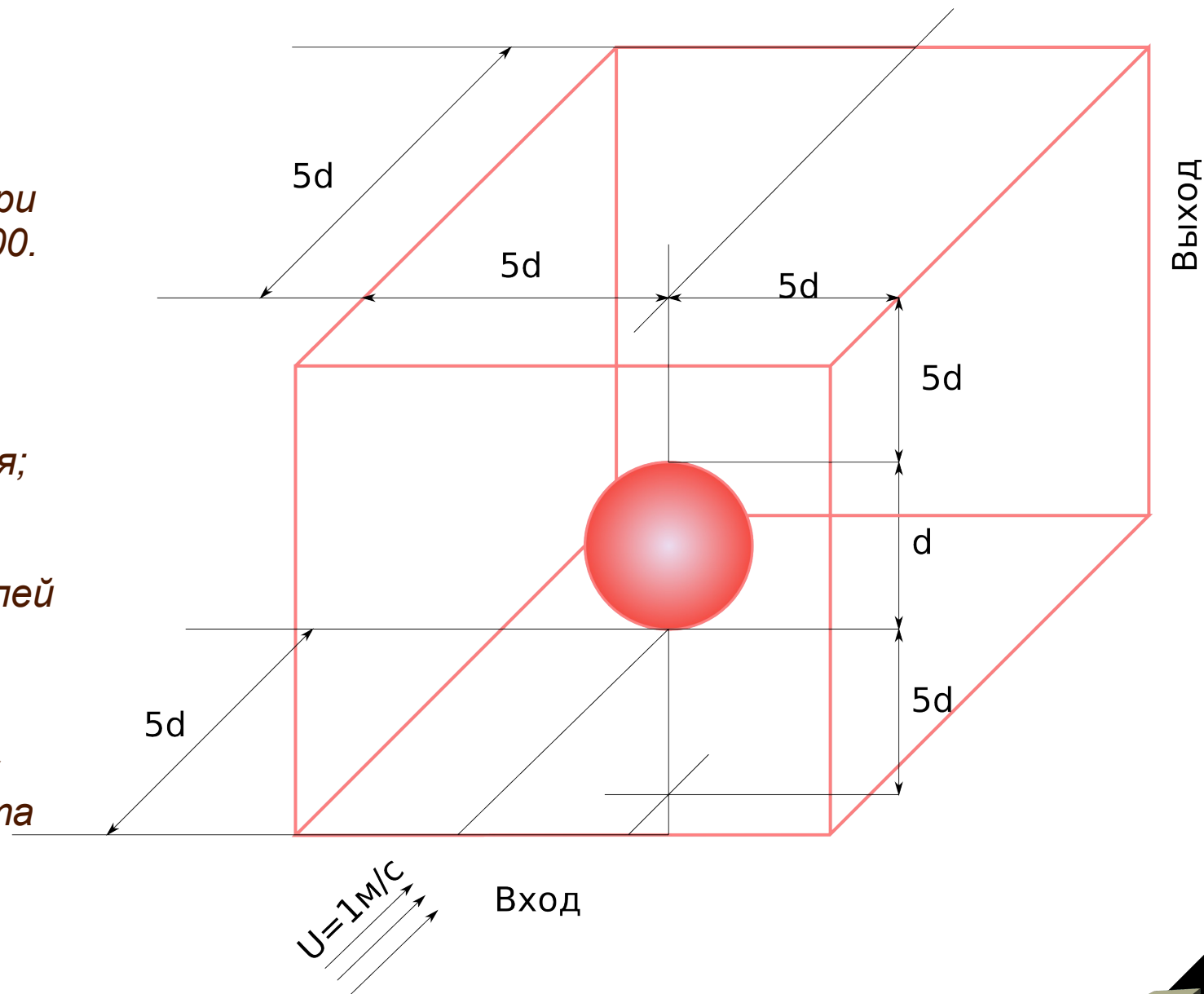
Вариант 8



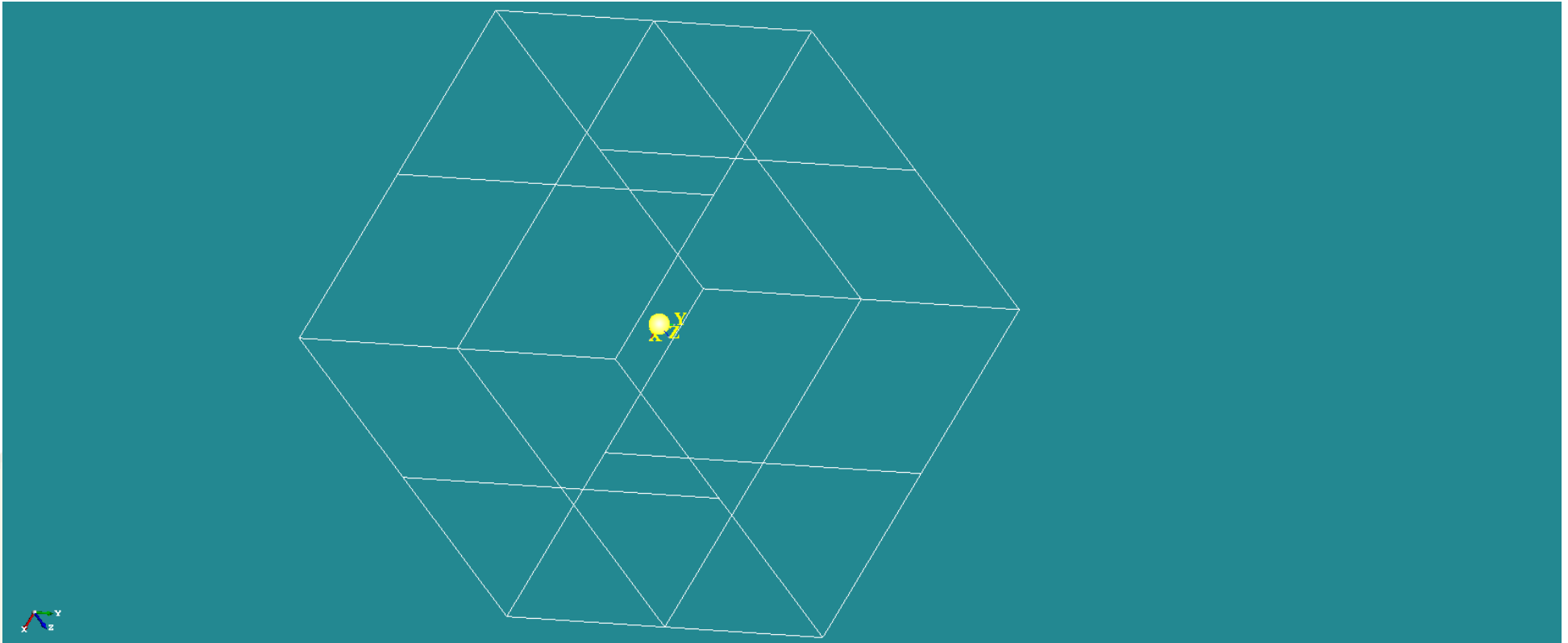


## III. ОБТЕКАНИЕ СФЕРЫ - ГЕОМЕТРИЯ

Рассматривается 3D течение вокруг сферы диаметром  $d$  вязкой несжимаемой жидкости при числах  $Re = 10000$  и  $100000$ . Требуется: а) создать геометрию и сетку (тетраэдральную) средствами SALOME; б) задать граничные условия; в) средствами пакета OpenFOAM выполнить расчет стационарных полей скорости и давления для одного из предложенных чисел  $Re$ ; г) выполнить визуализацию полученных данных средствами пакета ParaView

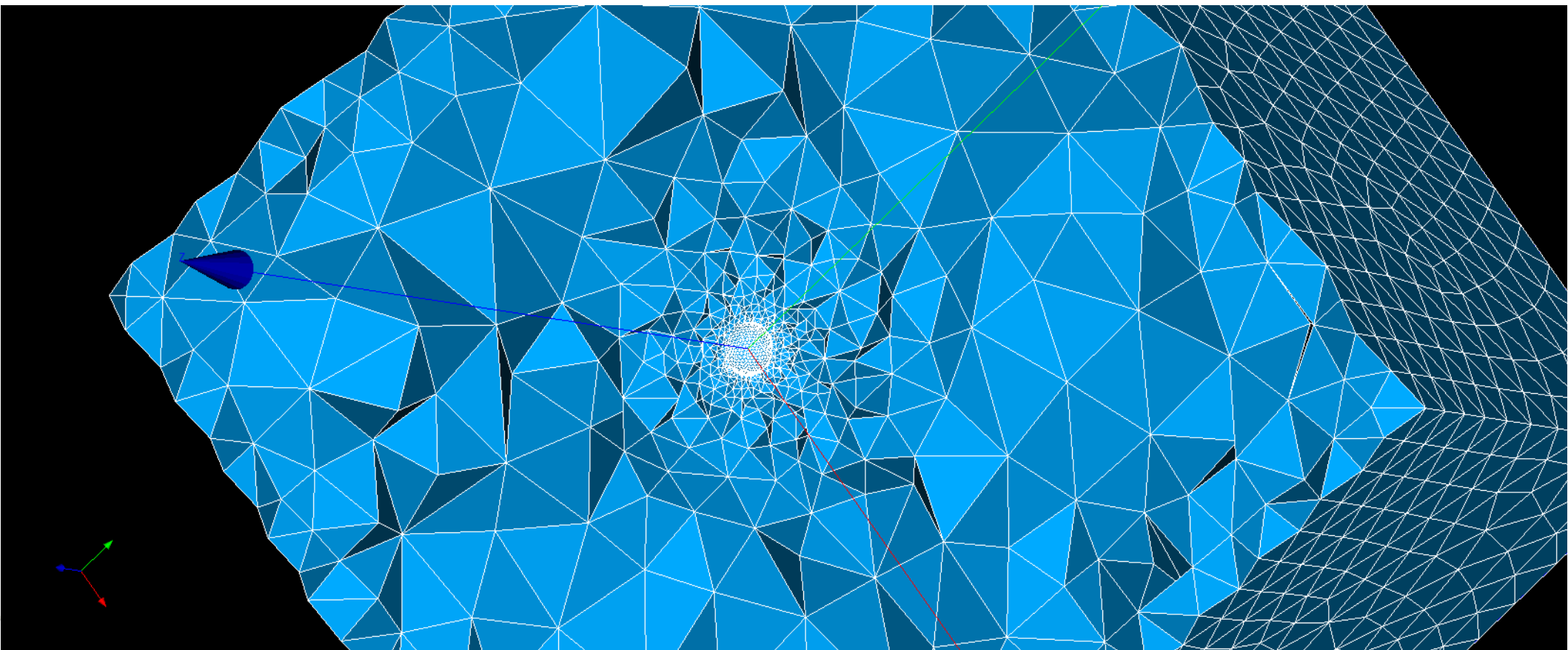


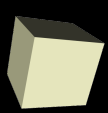
## **III. ОБТЕКАНИЕ СФЕРЫ — ГЕОМЕТРИЯ В SALOME**





## III. ОБТЕКАНИЕ СФЕРЫ — СЕТКА В SALOME



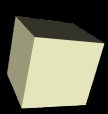


### III. ОБТЕКАНИЕ СФЕРЫ — КРАЕВЫЕ УСЛОВИЯ

Невозмущенные поля давления ( $p$ ), скорости ( $U$ ), кинетической энергии турбулентности ( $k$ ), частоты диссипации кинетической энергии турбулентности ( $\omega$ ), турбулентной вязкости ( $\nu_t$ ). В нулевой момент времени  $p=0$ ,  $U=(0\ 0\ 0)$ ,  $k=1e-3$ ,  $\omega=1$ .

Граничные условия:

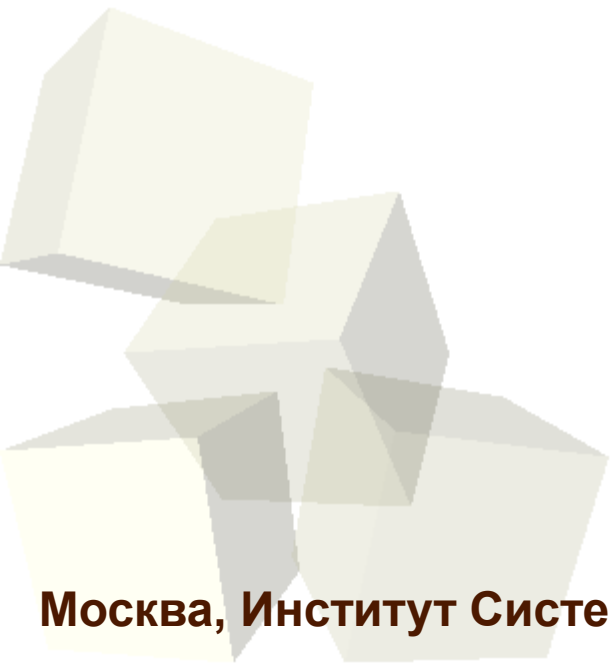
- На входе (*inlet*) — задается  $U$  ( $U_x=1\text{ м/с}$ ),  $k$ ,  $\omega$ . Нулевой градиент для давления
- На выходе (*outlet*) — задается давление  $p=0$ , нулевые градиенты для  $U$ ,  $k$ ,  $\omega$
- На стенках канала (*tube-walls*) — условие проскальзывания (*slip*) для всех величин
- На стенках сферы (*sphere-walls*) — условие прилипание для скорости, пристеночные функции для  $k$ ,  $\omega$  и  $\nu_t$ , условие непроницаемости для  $p$

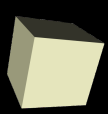


### III. ОБТЕКАНИЕ СФЕРЫ — КОНСТАНТЫ МОДЕЛЕЙ

Исходя из заданных  $d$  (10см по умолчанию) и скорости на входе (1м/с по умолчанию) выбираем такую вязкость, чтобы соответствовала заданному числу  $Re$ :

- 1)  $Re=10000$ , вязкость —  $1e-6$  (при  $d=10\text{см}$ ,  $U_x=1\text{м/с}$ )
- 2)  $Re=100000$ , вязкость —  $1e-7$  (при  $d=10\text{см}$ ,  $U_x=1\text{м/с}$ )





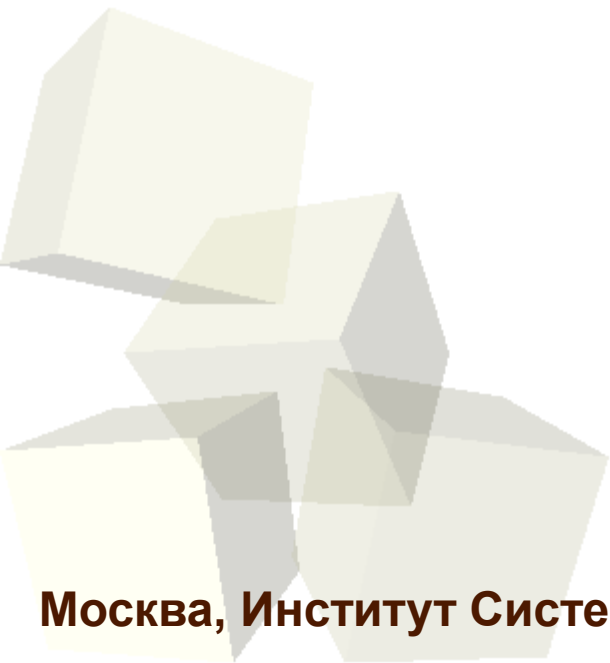
### III. ОБТЕКАНИЕ СФЕРЫ — ПАРАМЕТРЫ СЧЕТА

*Расчет проводится по итерациям (шаг по времени = 1), вывод через каждые 100 шагов. Общее число итераций — 1000.*

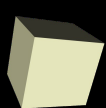
*Для адвективных слагаемых используется противопоточная схема дискретизации.*

*Коэффициенты релаксации:  $r_u = 0.5$ ,  $r_p = 0.3$ ,  $r_k = 0.7$ ,  $k_{\omega} = 0.7$*

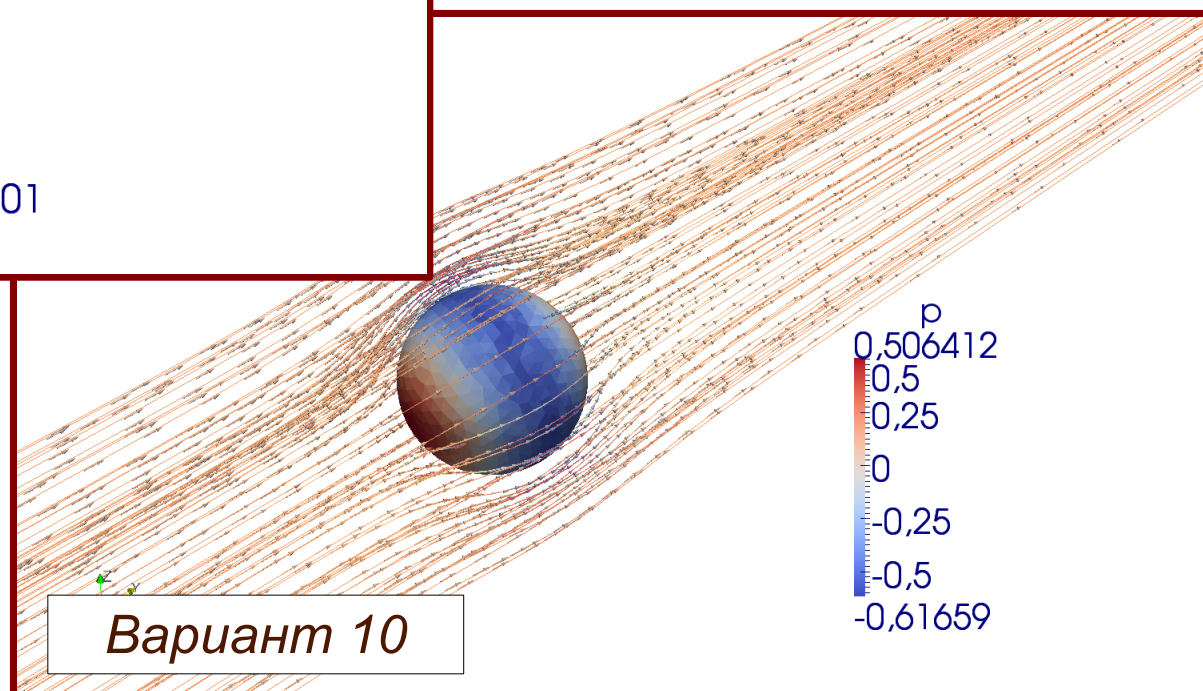
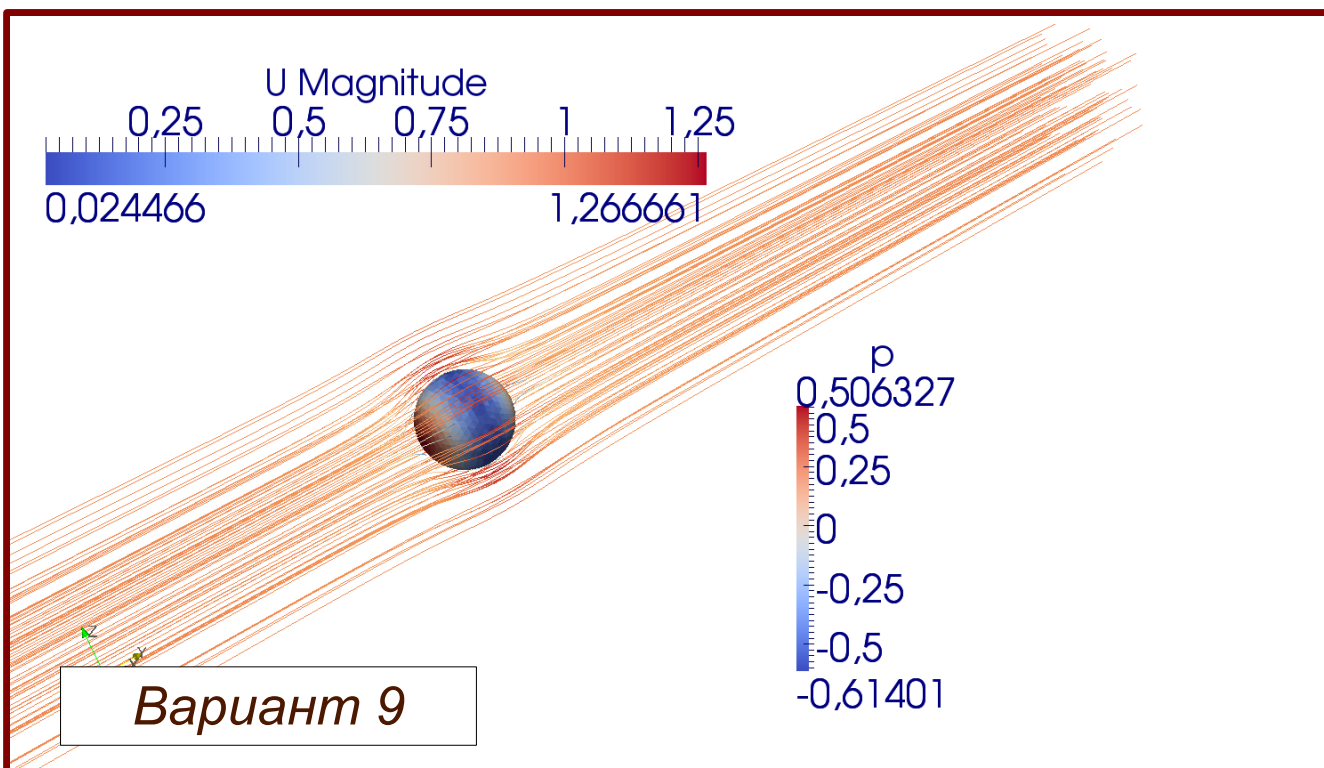
*Число поправок на неортогональность - 1*







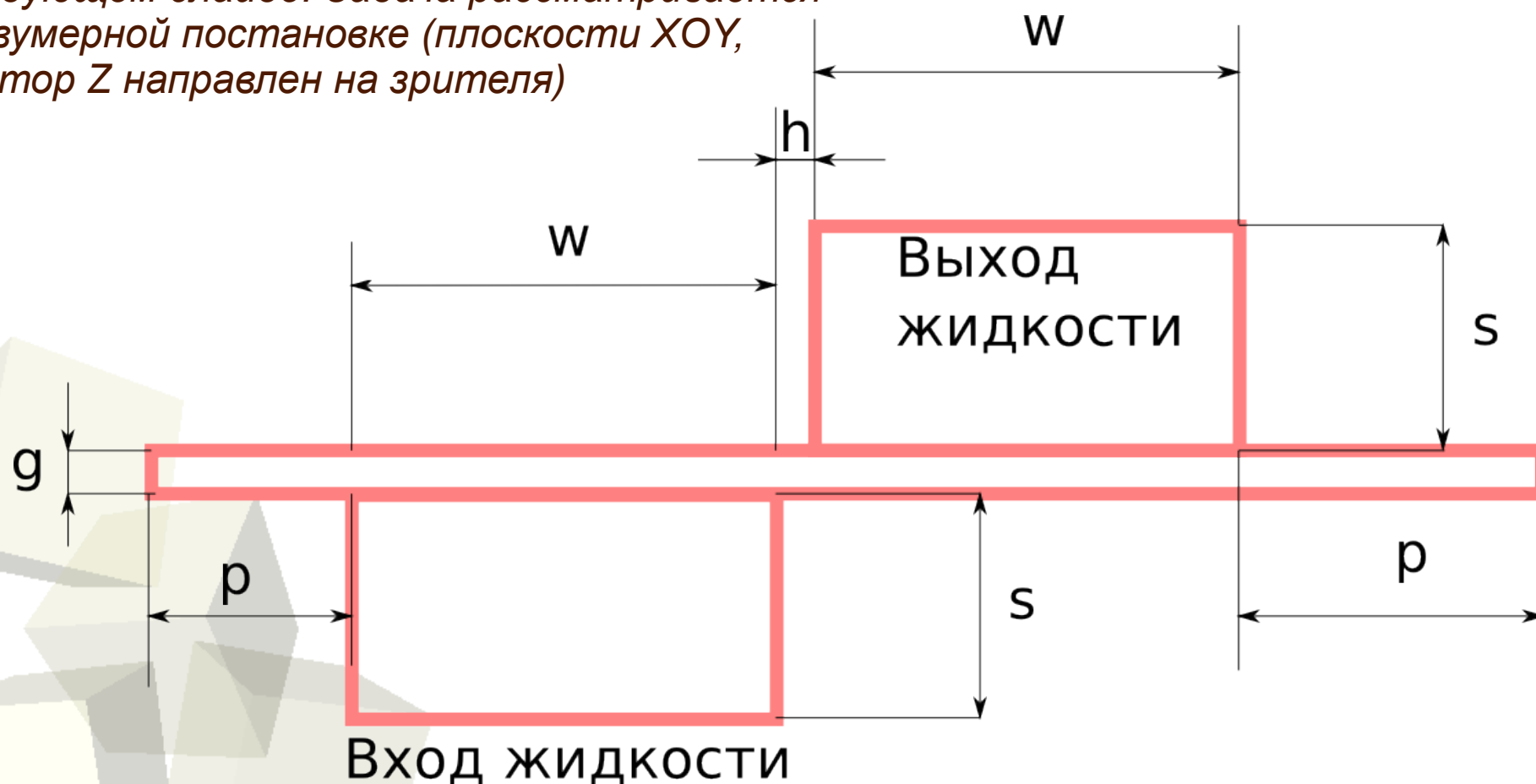
## III. ОБТЕКАНИЕ СФЕРЫ — РЕЗУЛЬТАТЫ





## IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — ГЕОМЕТРИЯ (1)

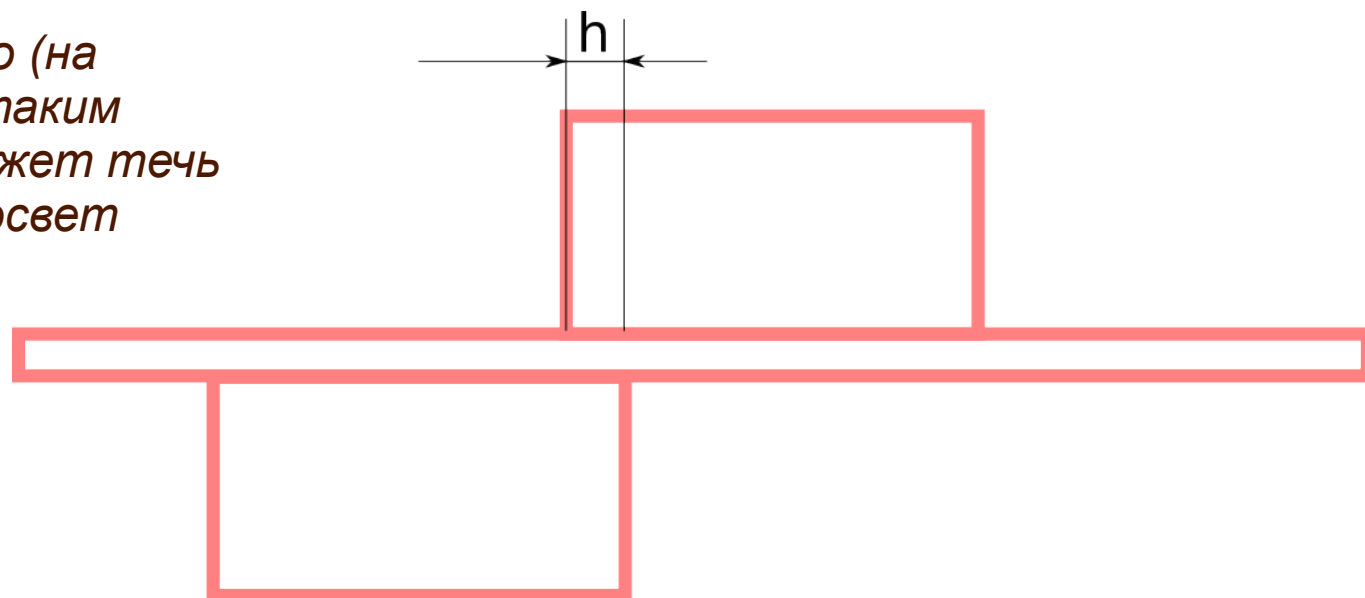
Рассматривается истечение через суживающееся отверстие в окнах клапана при различных степенях перекрытия  $h$  и агрегатных состояниях среды. Геометрические параметры следующие:  $w=30\text{мм}$ ,  $g=2\text{мм}$ ,  $s=15\text{мм}$ ,  $p=20\text{мм}$ . Значения  $h$  трех вариантов:  $-3\text{мм}$  (схема снизу),  $3\text{мм}$ ,  $15\text{мм}$ . Принципиальная схема для  $h=3\text{мм}$  и  $15\text{мм}$  представлена на следующем слайде. Задача рассматривается в двумерной постановке (плоскости  $XOY$ , вектор  $Z$  направлен на зрителя)



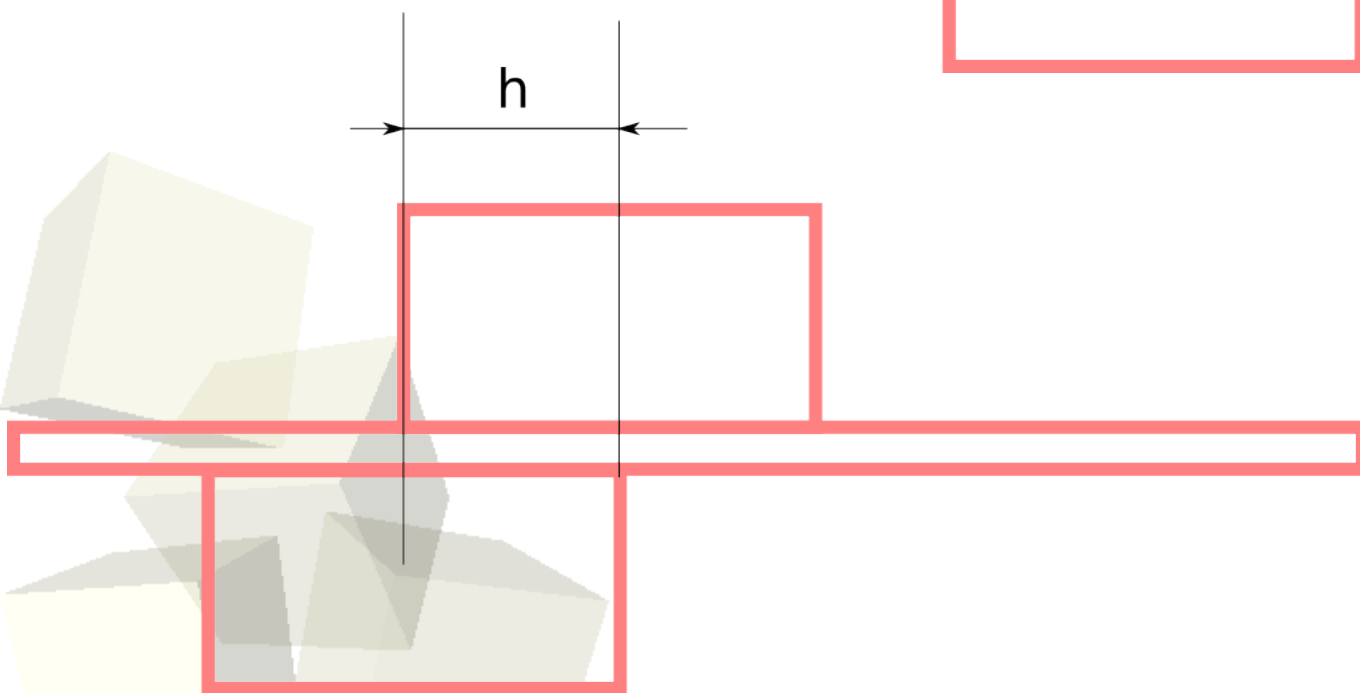


## IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — ГЕОМЕТРИЯ (2)

*Верхнее окно клапана частично (на  $h=3\text{мм}$ ) перекрывает нижнее, таким образом, что часть потока может течь напрямую через открытый просвет*

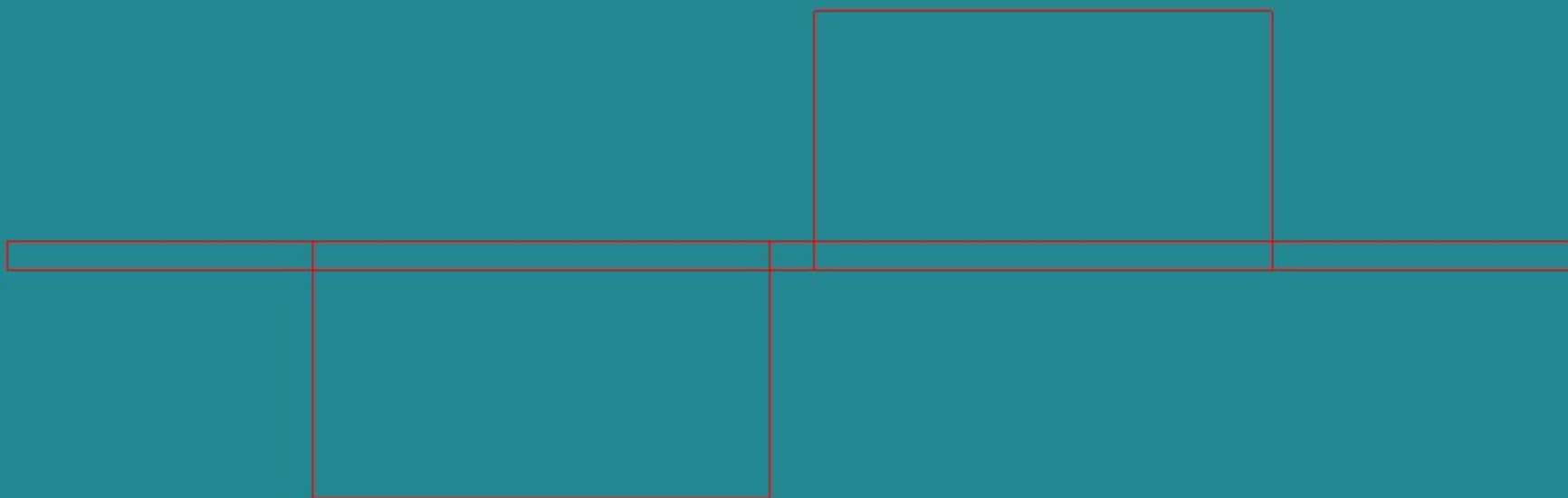


*Верхнее окно клапана на половину (на  $h=15\text{мм}$ ) перекрывает нижнее, таким образом, что поток может течь напрямую через просвет*



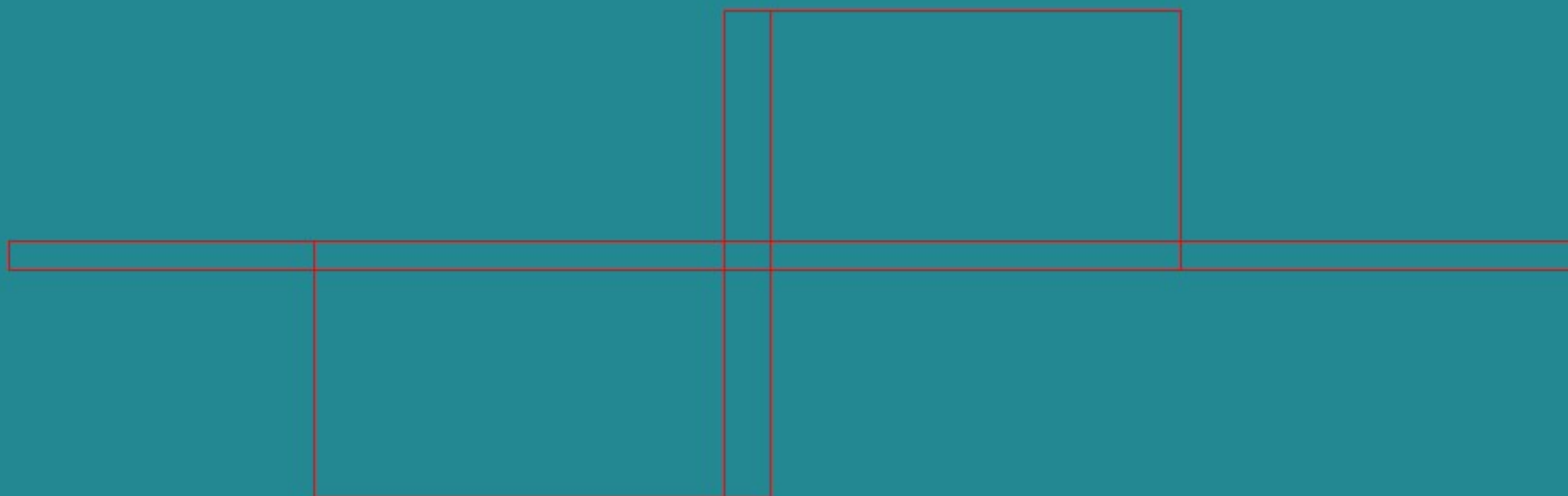


## IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — БЛОЧНАЯ ГЕОМЕТРИЯ (1)



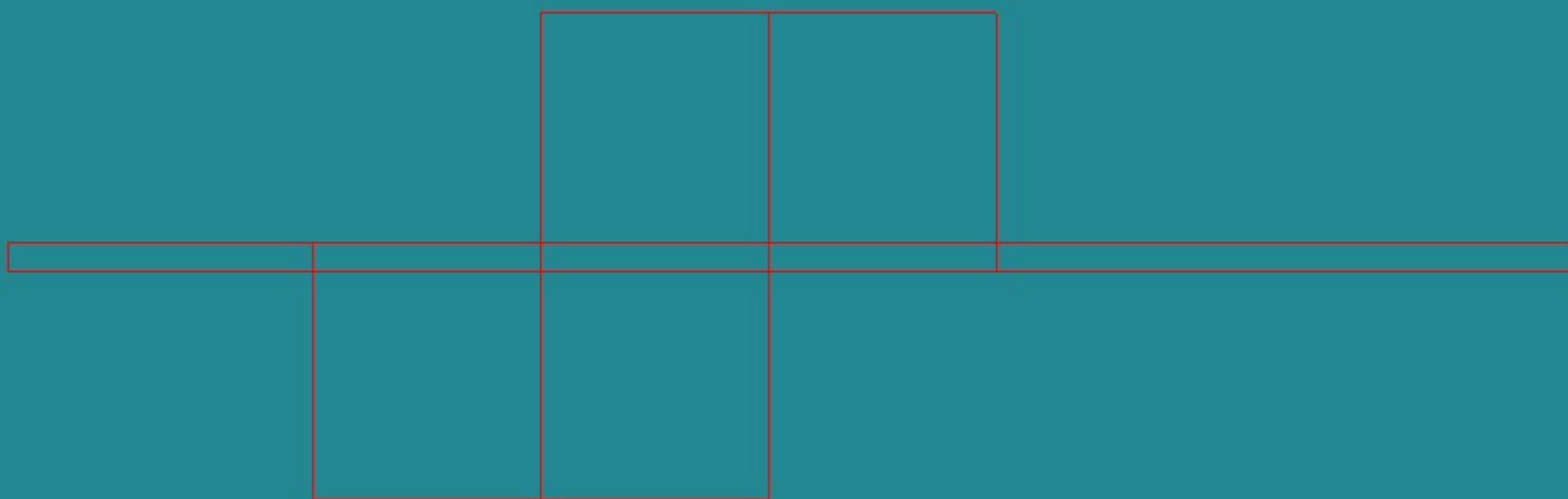


## IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — БЛОЧНАЯ ГЕОМЕТРИЯ (2)



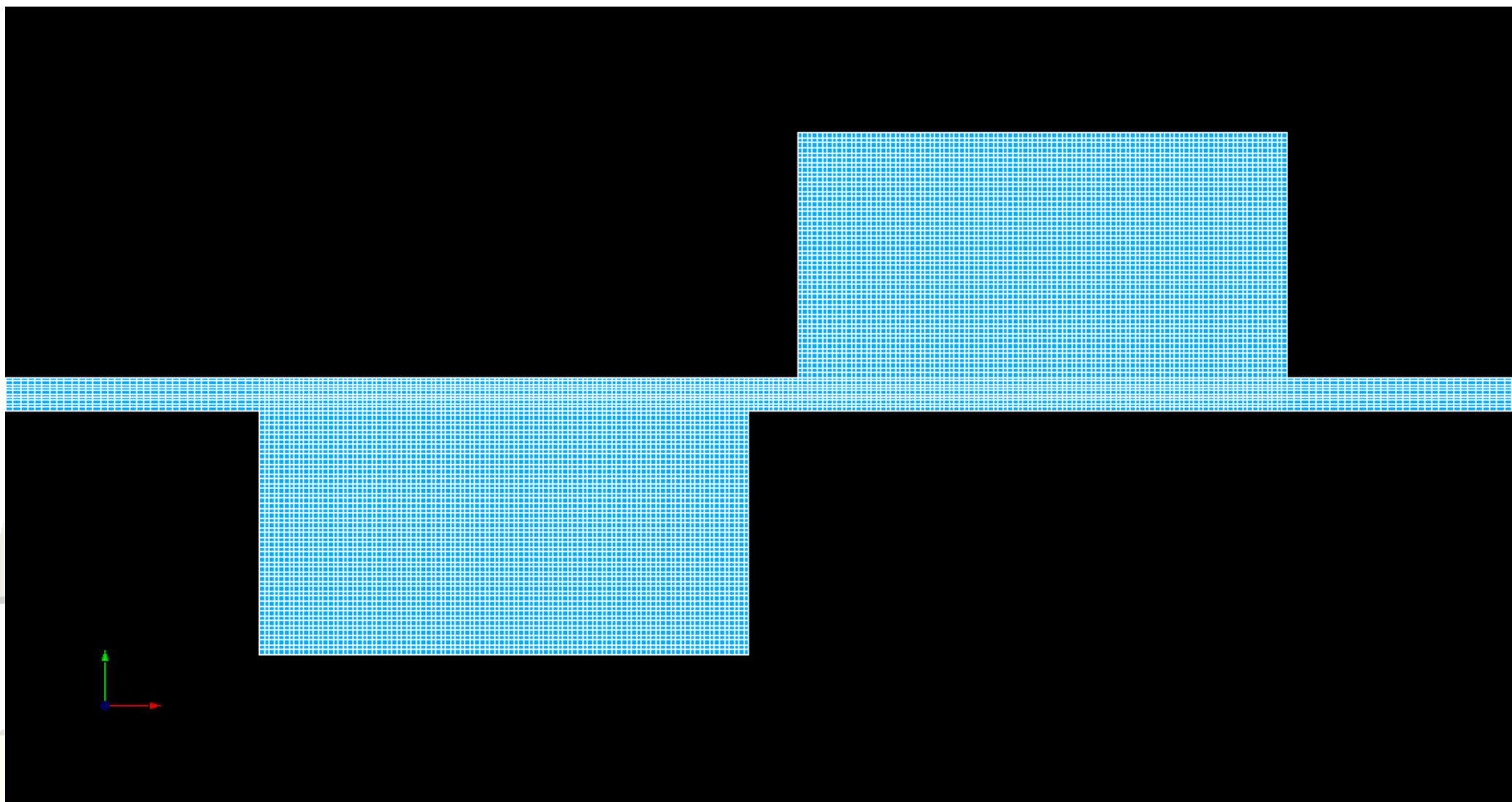


## IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — БЛОЧНАЯ ГЕОМЕТРИЯ (3)



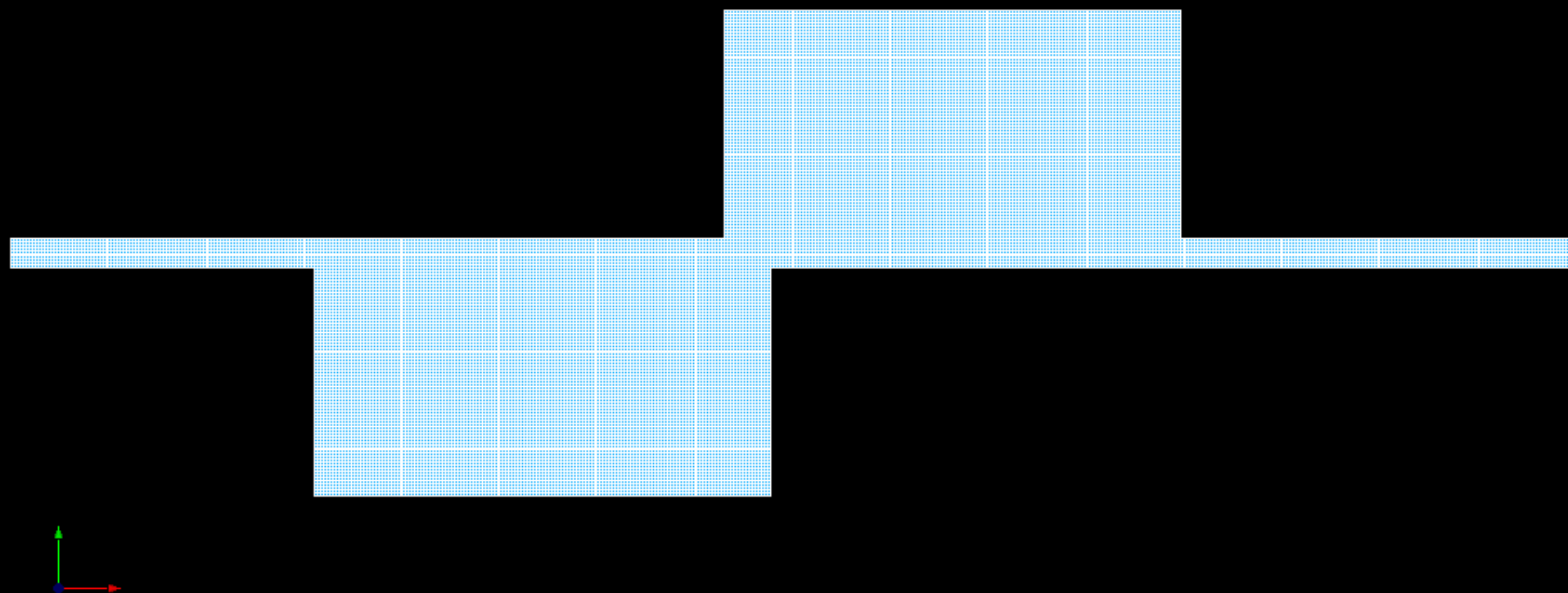


## IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — СЕТКА (1)





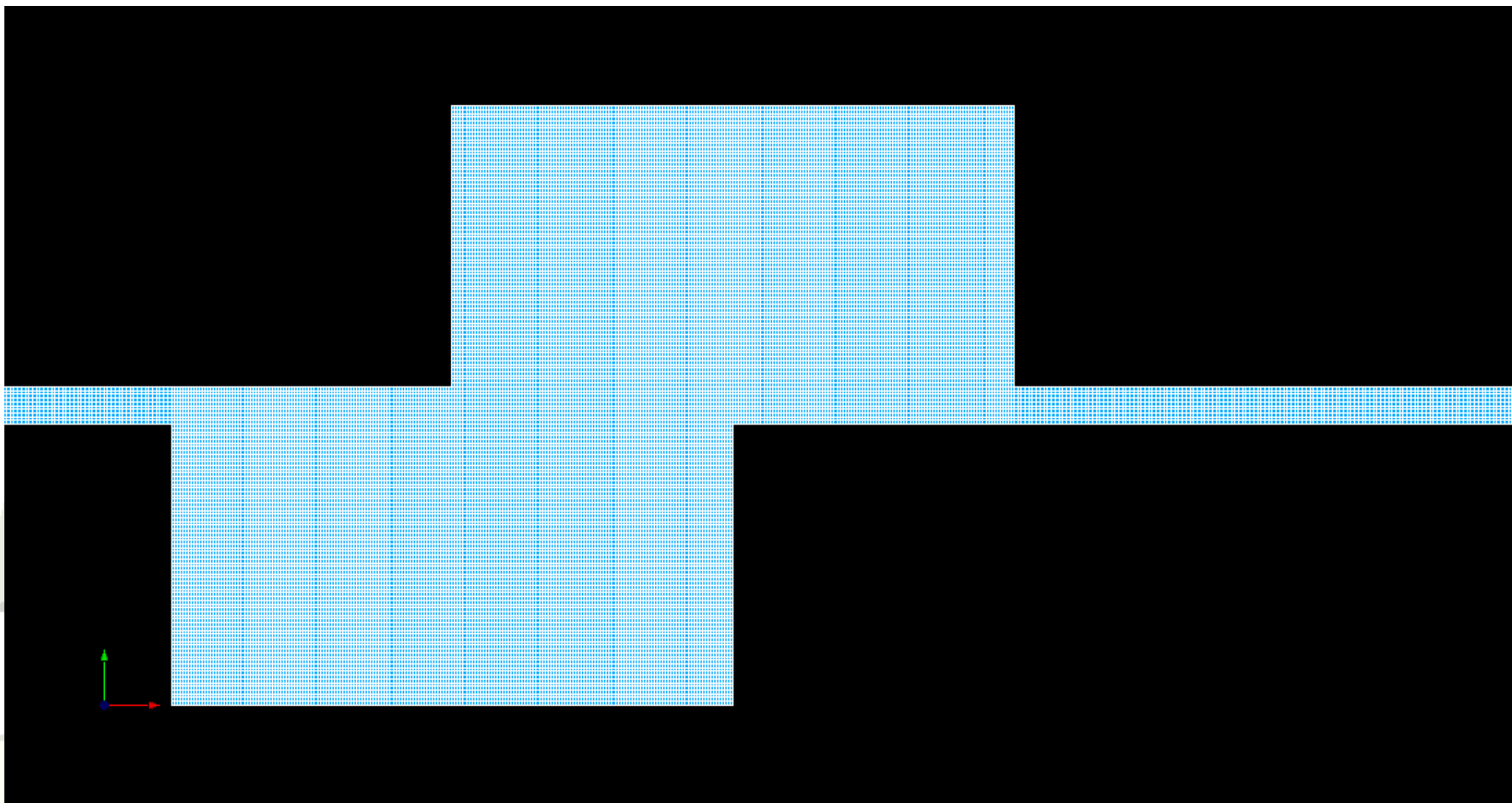
## IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — СЕТКА (2)

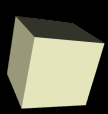






## IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — СЕТКА (3)



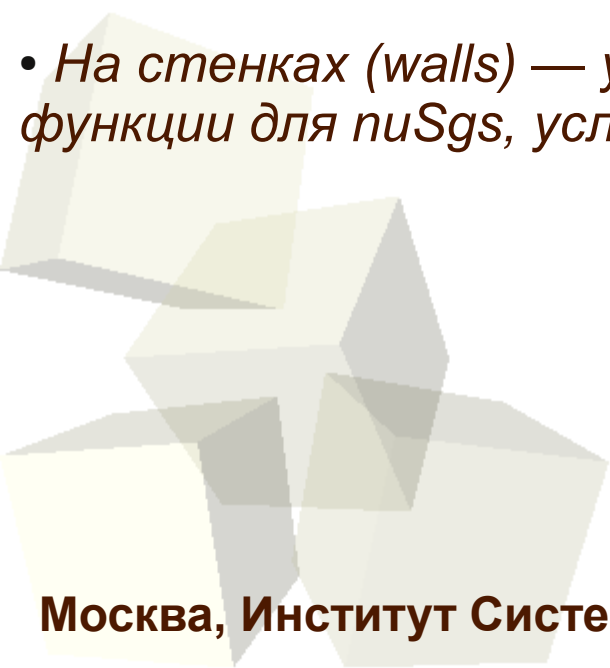


### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — КРАЕВЫЕ УСЛОВИЯ (НЕСЖИМАЕМАЯ СРЕДА)

*Невозмущенные поля давления ( $p$ ), скорости ( $U$ ), подсеточной вязкости. В нулевой момент времени  $p=1000$ ,  $U=(0\ 0\ 0)$ ,  $\nu Sgs=0$*

*Граничные условия:*

- На входе (inlet) — задается нулевой градиент скорости  $U$ ,  $\nu Sgs$ . Полное давление  $p$  (1000)*
- На выходе (outlet) — задается полное давление  $p=0$ , нулевые градиенты для  $U$  и  $\nu Sgs$*
- На стенках (walls) — условие прилипания для скорости, пристеночные функции для  $\nu Sgs$ , условие непроницаемости для  $p$*



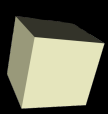


### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — КРАЕВЫЕ УСЛОВИЯ (СЖИМАЕМАЯ СРЕДА)

Невозмущенные поля давления ( $p$ ), скорости ( $U$ ), температуры ( $T$ ) подсеточной вязкости ( $\mu_{Sgs}$ ) и диффузии энтальпии ( $\alpha_{Sgs}$ ). В нулевой момент времени  $p=1e+6$ Па,  $U=(0\ 0\ 0)$ ,  $\mu_{Sgs}=0$ ,  $\alpha_{Sgs}=0$ ,  $T=573$ К

Граничные условия:

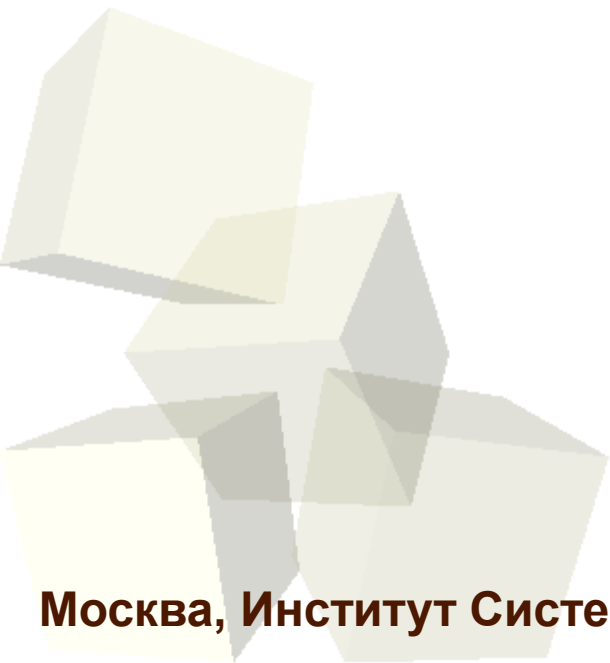
- На входе (inlet) — задается нулевой градиент скорости  $U$ ,  $\mu_{Sgs}$ . Полное давление  $p$  ( $1e+6$ ), температура  $T=573$ К
- На выходе (outlet) — задается волновое (waveTransmissive) условие для давления  $p=100$ кПа, нулевые градиенты для  $U$ ,  $T$  и  $\mu_{Sgs}$
- На стенках (walls) — условие прилипания для скорости, пристеночные функции для  $\alpha_{Sgs}$ ,  $\mu_{Sgs}$ , условие непроницаемости для  $p$ , нулевой градиент для температуры (адиабатная стенка)



### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — КОНСТАНТЫ МОДЕЛИ (НЕСЖИМАЕМАЯ СРЕДА)

*Для моделирования выбирается LES-метод, с моделированием подсеточной вязкости по алгебраической модели Смагоринского.*

*Молекулярная кинематическая вязкость принимается равной  $1e-5$  (воздух)*

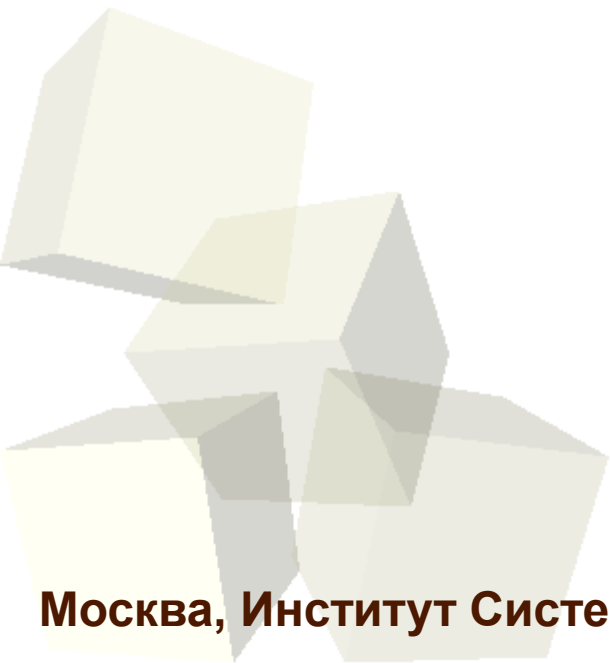


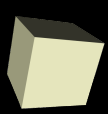


### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — КОНСТАНТЫ МОДЕЛИ (СЖИМАЕМАЯ СРЕДА)

*Для моделирования выбирается LES-метод, с моделированием подсеточной вязкости по алгебраической модели Смагоринского.*

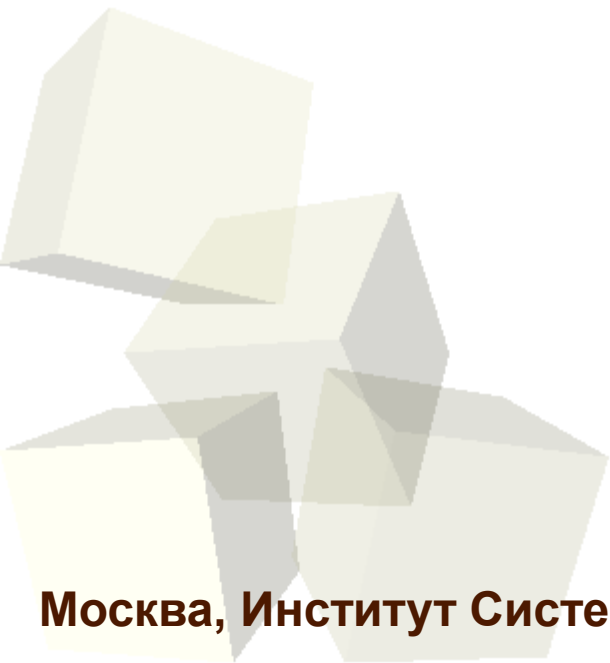
*Теплофизические свойства выбираются соответствующими воздуху (constant/thermophysicalProperties)*





### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — ПАРАМЕТРЫ СЧЕТА (НЕСЖИМАЕМАЯ СРЕДА)

*Проводится нестационарный расчет средствами `riboFoam`. Шаг по времени —  $1e-6$  —  $1e-5$ с (в зависимости от задачи), запись в файл — каждые 1000 шагов ( $1e-2$ с). Используется второй порядок точности интегрирования по времени (*backward*)*

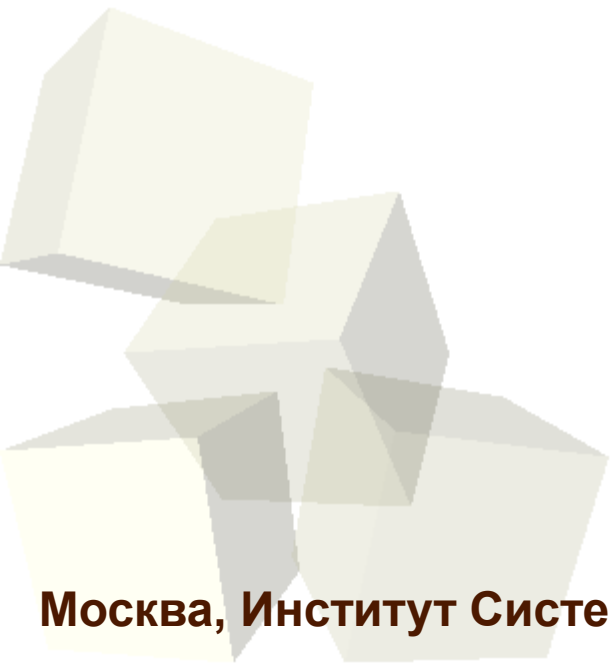




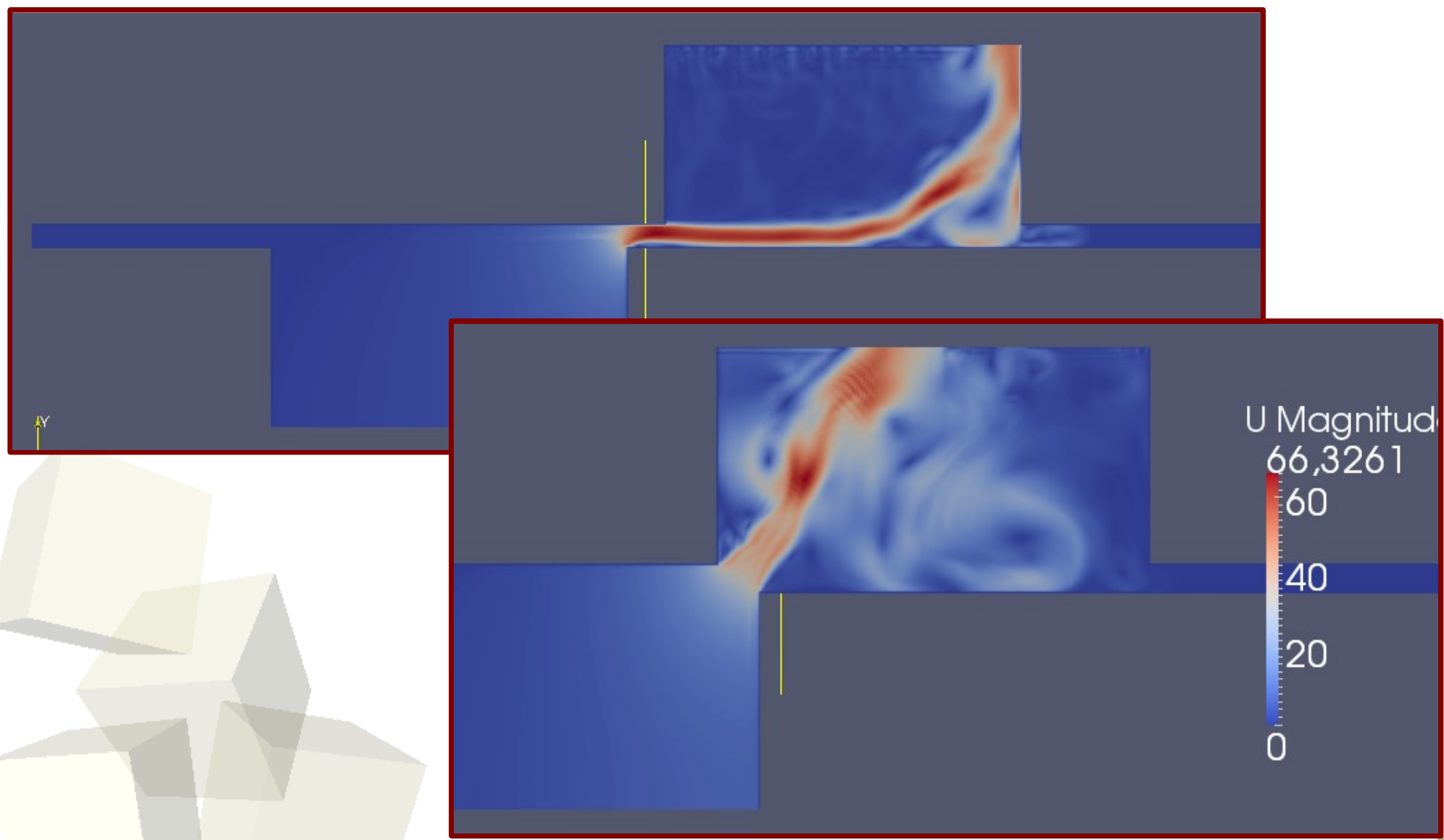
### IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — ПАРАМЕТРЫ СЧЕТА (СЖИМАЕМАЯ СРЕДА)

*Проводится нестационарный расчет средствами `rhoPisoFoam`. Шаг по времени —  $1e-8$  —  $1e-7$ с (в зависимости от задачи), запись в файл — каждые 1000 шагов ( $1e-4$ с). Используется второй порядок точности интегрирования по времени (`backward`).*

*Для того, чтобы учесть сверхзвуковое истечение, следует включить переключатель `transonic` (раздел `PISO` файла `system/fvSolution`) в положение `true`;*



**IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — РЕЗУЛЬТАТЫ  
(НЕСЖИМАЕМАЯ СРЕДА)**





## **IV. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОКОН КЛАПАНА — РЕЗУЛЬТАТЫ (СЖИМАЕМАЯ СРЕДА)**

