



CFD-Weekend 2023

**СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ  
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА  
SIGMAFLOW**

**Гаврилов А.А., Дектерев А.А., Литвинцев К.Ю.,  
Филимонов С.А., Харламов Е.Б.**

**Институт Теплофизики СО РАН им. С.С. Кутателадзе**

## SigmaFlow - моделируемые процессы

- стационарные и нестационарные течения;
- неньютоновские жидкости (**упруго-вязко-пластичные**);
- турбулентность (**RANS, RANS/LES, LES**);
- процессы смешения и диффузии неоднородных газовых смесей;
- химические реакции в потоке, горение газообразного, жидкого и твердого топлива;
- сопряженный теплообмен;
- радиационный теплообмен (**P1, DO, FV**);
- движение дисперсной фазы в потоке (**Лагранж, Эйлер**);
- процессы с фазовыми переходами (**кавитация, кристаллизация**);
- течения со свободной поверхностью;
- течения газа и жидкости с подвижными твердыми телами

## Численный метод

- **Метод контрольного объема** для неструктурированной сетки;
- **SIMPLE** подобный метод для связи полей давления и скорости;
- Совмещенные сетки с монотонизацией **P<sub>хи</sub>–C<sub>оу</sub>**;
- Нестационарные слагаемые – неявный трёхслойный метод, метод Кранка–Николсона
- Аппроксимация конвективных потоков – **CDS, High-order CDS, QUICK, TVD ...**;
- Решение системы алгебраических уравнений:  
стабилизированный метод бисопряжённых градиентов,  
алгебраический многосеточный метод
- **Распараллеливание** – разбиение на подобласти, MPI

## Программные продукты

***SigmaFlow*** – некоммерческий универсальный CFD программный комплекс (набор физических моделей, пре-постпроцессинг)

***SigmaFlame*** – специализированная программа для моделирования топочных камер энергетических КОТЛОВ

Продажа - ООО «Торинс». Потребители - институты системы ВТИ, ТКЗ, КБ, ВУЗы, КБ (Россия, Казахстан, Украина)

***SigmaFire*** – специализированная программа для моделирования пожаров в зданиях и сооружениях

Продажа в составе комплекса СигмаПБ – ООО «ЗК Эксперт»

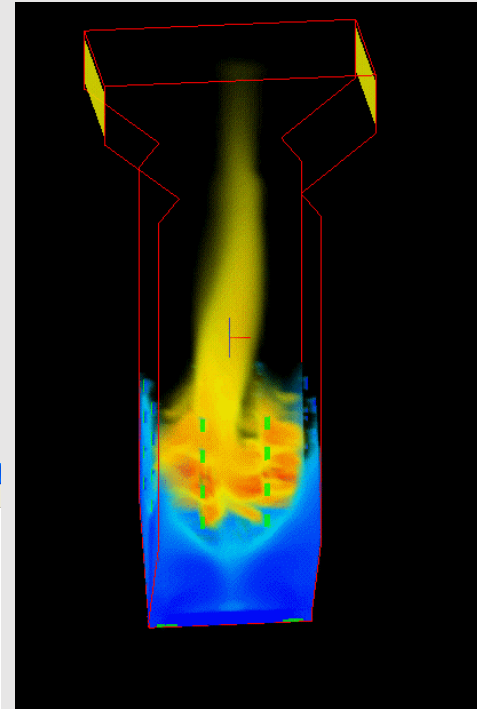
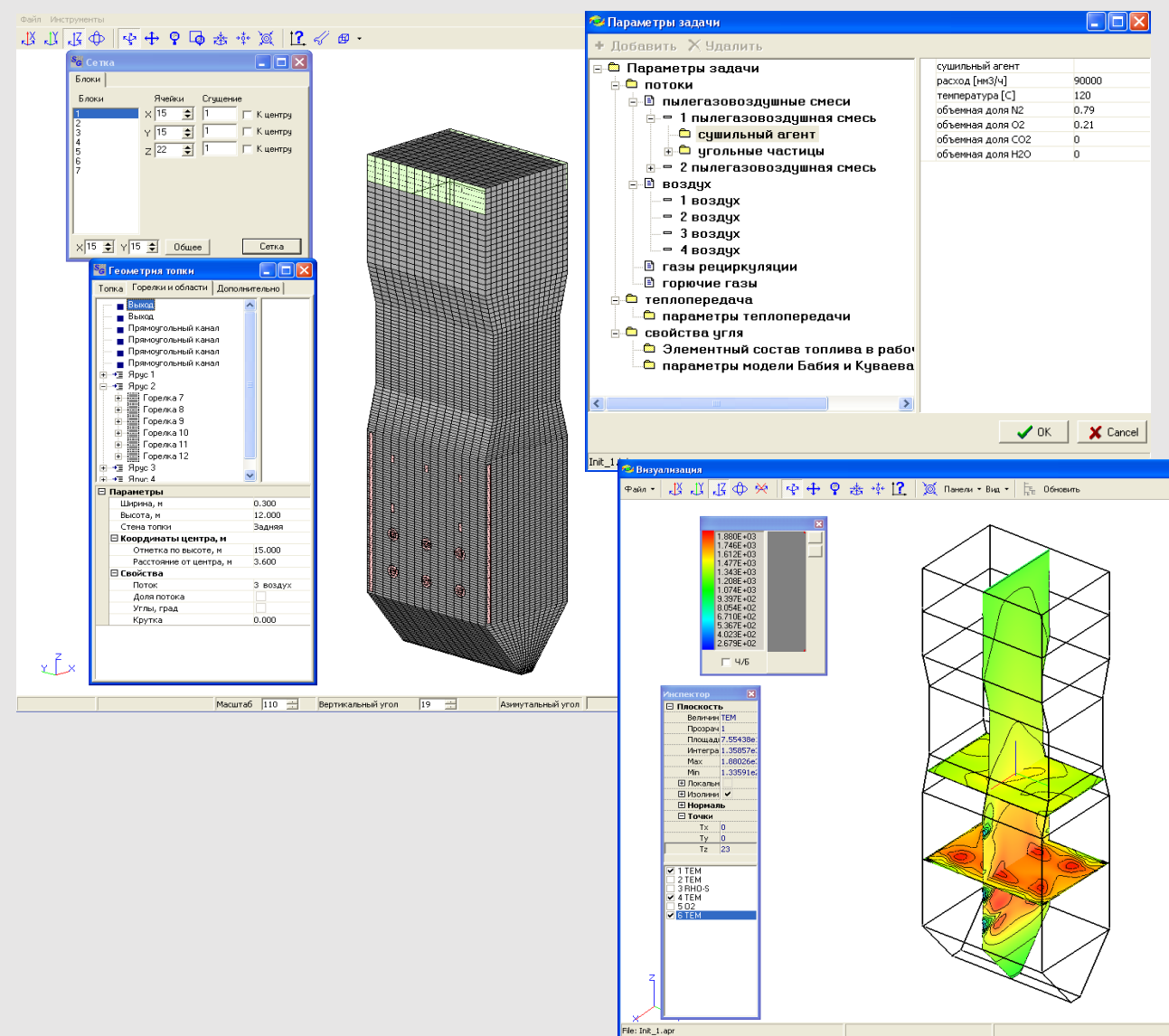
***TubeFlow*** – специализированная программа для расчета течения раствора в буровых колоннах (BakerHughes)

***PoreFlow*** – специализированная программа для моделирование многофазного потока в пористой среде (Газпромнефть)

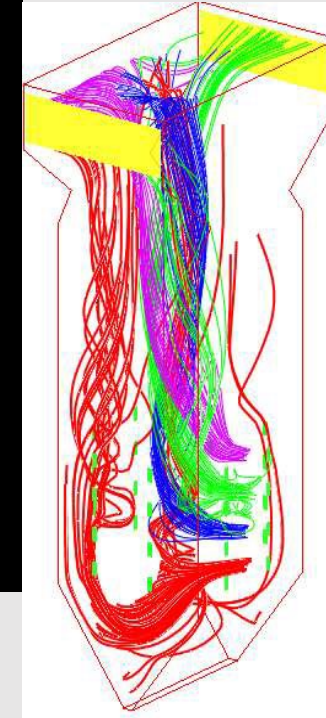
***Sigma Eco*** – специализированная программа для моделирование аэродинамики городской среды

# Программные продукты

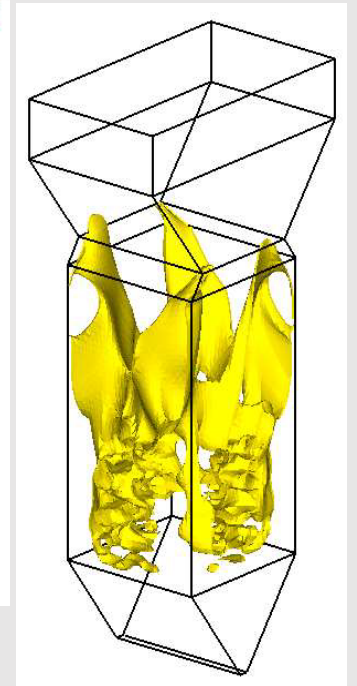
**SigmaFlame** – специализированная программа для моделирования топочных камер энергетических котлов



Температура



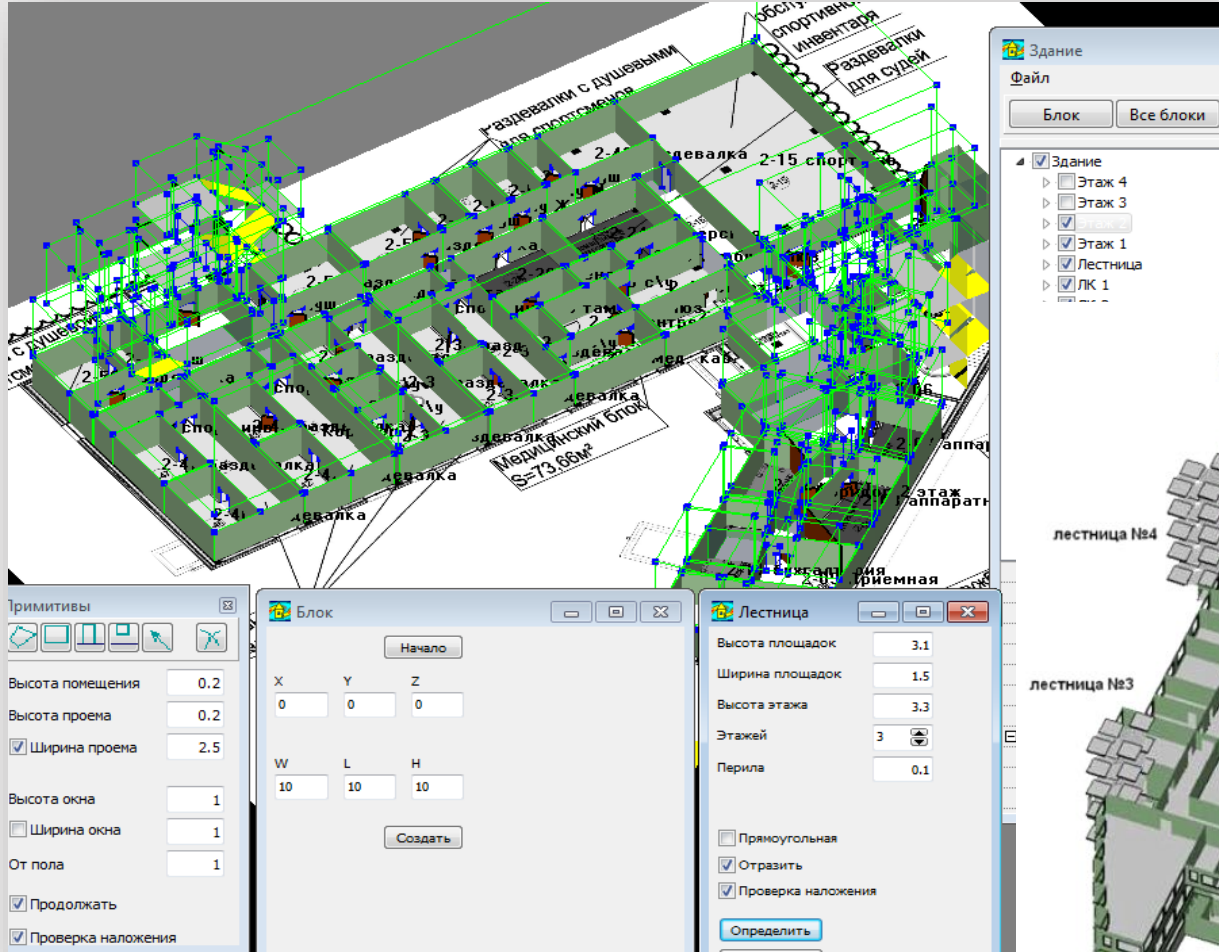
Траектории частиц  
угля



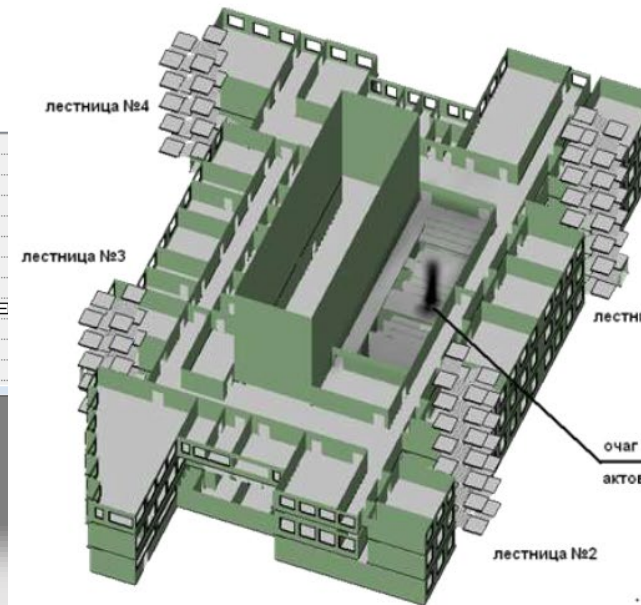
Изоповерхность  
концентрации NO<sub>x</sub>

# Программные продукты

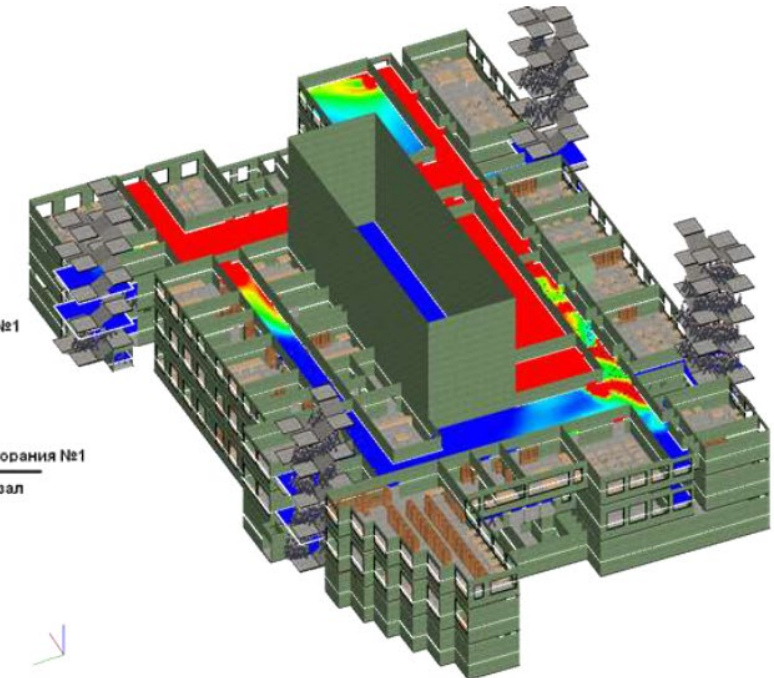
**SigmaFire** – специализированная программа для моделирования пожаров в зданиях и сооружениях



СЦЕНАРИЙ ПОЖАРА



250 СЕК. ПОСЛЕ НАЧАЛА ПОЖАРА



# SigmaFlow - моделируемые процессы

## *SigmaFlow -1.x*

1. стационарные и нестационарные течения;
- 2.
3. турбулентность (k- $\xi$ , k- $\omega$  SST, DES, DDES, LES Smagorinsky);
4. процессы смешения и диффузии неоднородных газовых смесей;
5. химические реакции в потоке, горение газообразного (глобальные реакции + EBU модель), жидкого и твердого топлива;
6. сопряженный теплообмен;
7. радиационный теплообмен (P1);
8. движение дисперсной фазы в потоке (Лагранж, Эйлер);
9. процессы с фазовыми переходами (кавитация, кристаллизация);
10. течения со свободной поверхностью - VOF;
11. течения газа и жидкости с подвижными твердыми телами – VOS
12. сетки - криволинейные многоблочные

## *SigmaFlow -2.x*

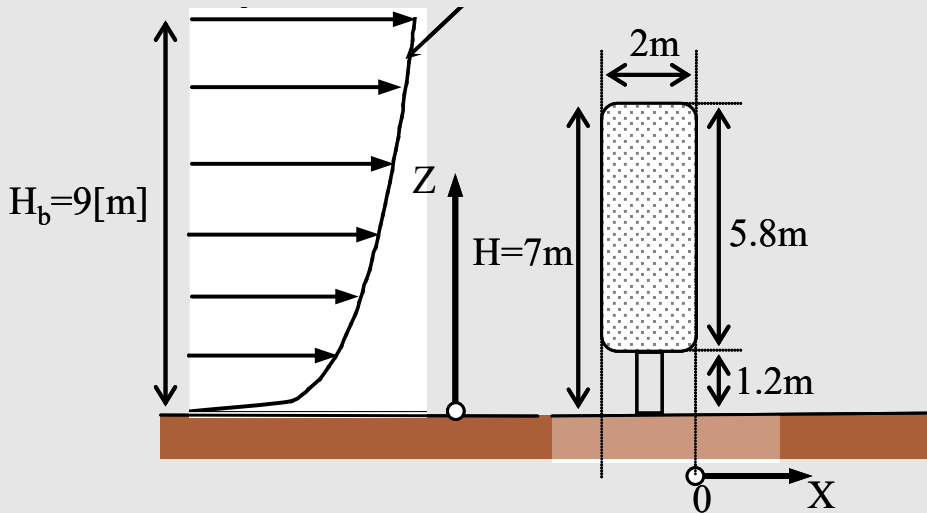
*версия с распараллеливанием*

1. стационарные и нестационарные течения;
2. неньютоновские жидкости (упруго-вязко-пластичные);
3. турбулентность (k- $\omega$  SST,  $\zeta$ -f,  $\zeta$ -a, RSM, PANS, RANS/LES, LES);
4. процессы смешения и диффузии неоднородных газовых смесей;
5. ....
6. сопряженный теплообмен;
7. радиационный теплообмен (P1, DO, FV);
8. движение дисперсной среды (инерционно-диффузионная модель);
9. процессы с фазовыми переходами (кавитация);
10. течения со свободной поверхностью - VOF;
11. течения газа и жидкости с подвижными твердыми телами – IBM
12. сетки – произвольные неструктурированные

# Продолжаются работы по совершенствованию модели аэродинамики городской среды

## Учет растительности

В эксперименте располагался ряд деревьев высотой  $H=7\text{m}$ . Для набегающего потока известны значения скорости на высотах 1м, 3м и 9м. Значение энергии турбулентности на входе  $k = 3,02 \text{ (м}^2/\text{с}^2)$ . Плотность листвы деревьев составляла  $LAD = 1,17 \text{ м}^{-1}$ , коэффициент лобового сопротивления составляет величину  $C_D = 0,8$ .

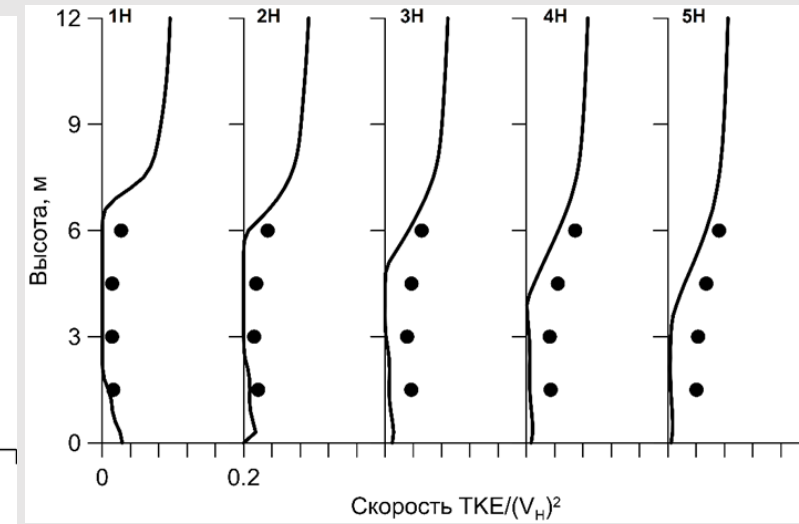
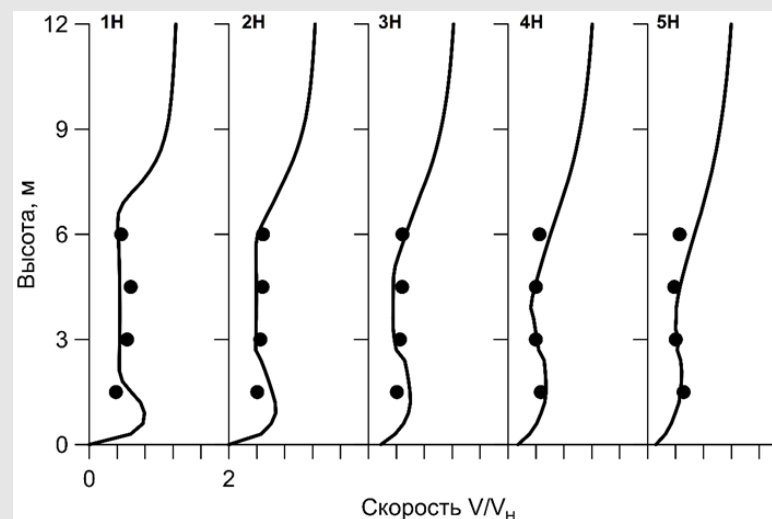
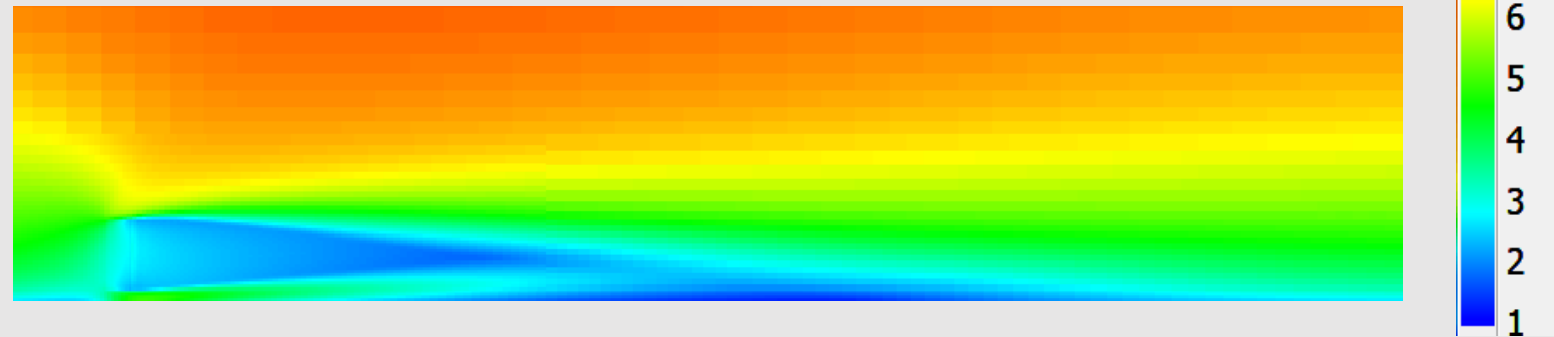


$$S_V = -\rho_z C_D LAD |V|^2 V$$

$$S_k = \rho_h C_D LAD (\beta_p |V|^3 - \beta_d |V|k)$$

$$S_\varepsilon = \rho_h C_D LAD (C_{\varepsilon 4} \beta_p |V|^3 - C_{\varepsilon 5} \beta_d |V|k)$$

Поле скорости, м/с





## Математическая модель теплообмена с зелеными насаждениями

Определение температуры зеленых насаждений

$$T_L = \frac{r_a}{2 \cdot LAD \cdot \rho_a \cdot C_p} (E_{rad} - Q_L) + T_a$$

$$Q_L = LAD \frac{L_w \cdot \rho_a}{r_{ps} + r_a} (w_1 - w_a)$$

$$r_a = \frac{\rho_a \cdot C_p \cdot d}{\lambda_a \cdot Nu}$$

$$Nu = 0.68 \cdot (Re^{1.5} + Prt^{0.75})^{0.33}$$

где  $E_{rad}$  - плотность энергии излучения, Вт/м<sup>3</sup>,  $Q_L$  - скрытая плотность теплового потока, связанная с транспирацией воды и дальнейшим ее испарением,  $r_a$  – аэродинамическое сопротивление насаждений (с/м);  $r_s$  - сопротивление переносу пара листовой поверхностью растительного покрова, с/м;  $w$  – концентрация насыщенных паров воды при заданной температуре рассчитывается на основе уравнения Антуана:

$$w(T) = 133.322 \cdot 10^{\frac{8.07131 - 1730.63}{T - 39.724}}$$

Теплообмен между воздушной средой и зелеными насаждениями,  $Q$ , Вт/м<sup>3</sup>.

$$Q_S = \frac{2 \cdot LAD \cdot \rho_a \cdot C_p}{r_a} (T_L - T_a)$$

## Математическая модель тепловлагообмена с зелеными насаждениями

В области зеленых насаждений в уравнении переноса излучения коэффициенты затухания  $\beta$ ,  $\text{м}^{-1}$ , и рассеяния  $\sigma$ ,  $\text{м}^{-1}$ , определяется параметрами LAD и степенью черноты  $\varepsilon$ , коэффициент поглощения принимается равным нулю.

$$\beta = LAD$$

$$\sigma = (1 - \varepsilon) \cdot LAD$$

В области зеленых насаждений рассчитанная плотность энергии излучения  $E_{rad}$  используется в уравнении для расчета температуры листа и не используется в основном уравнении сохранения энергии

Температура

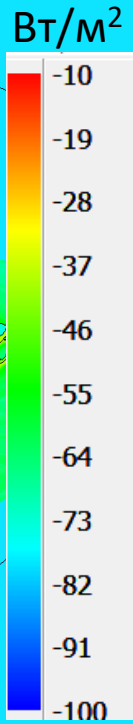
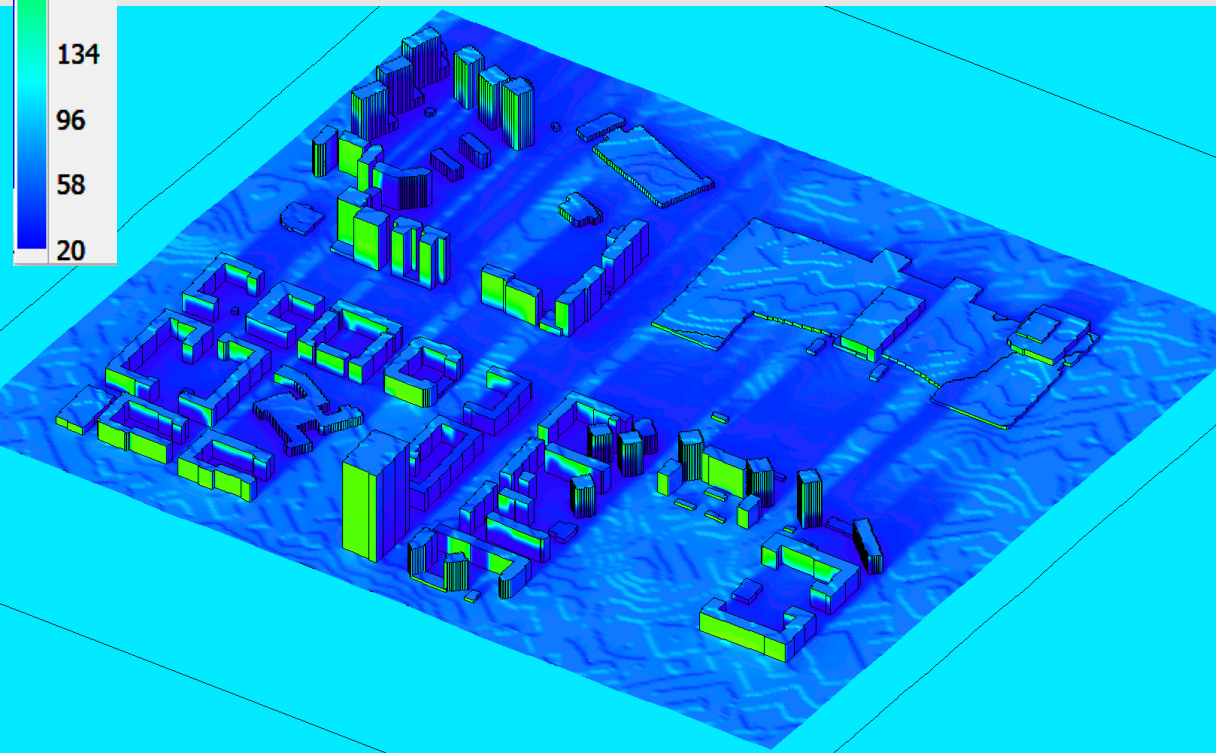
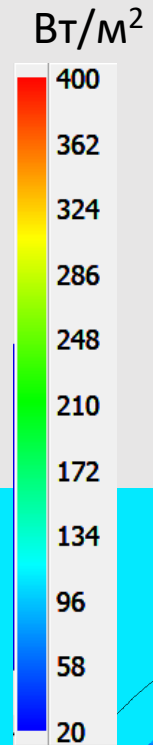
Пары воды



# Суточная динамика потока излучения

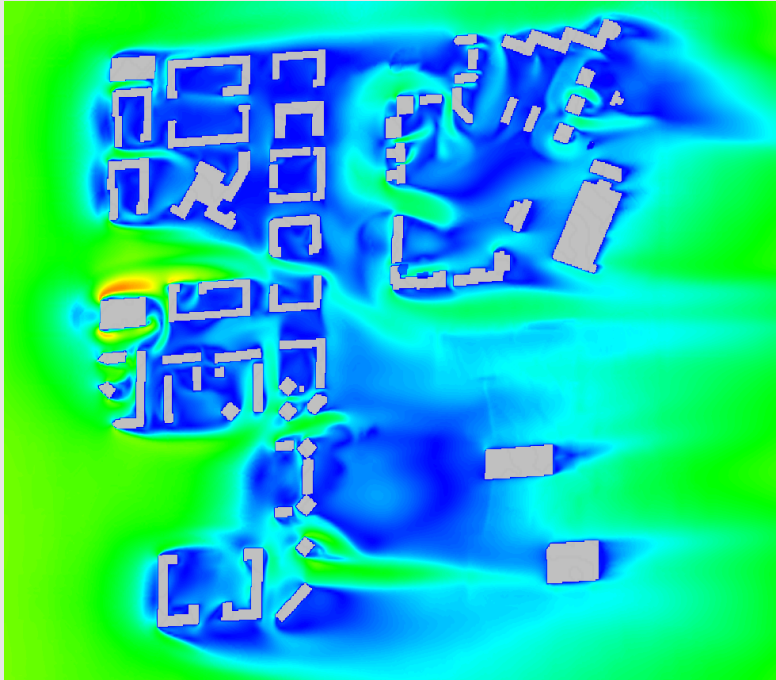
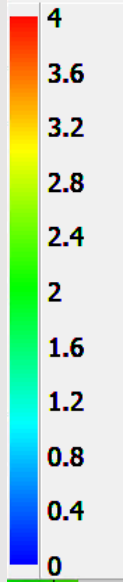
падающего солнечного

сумарного теплового

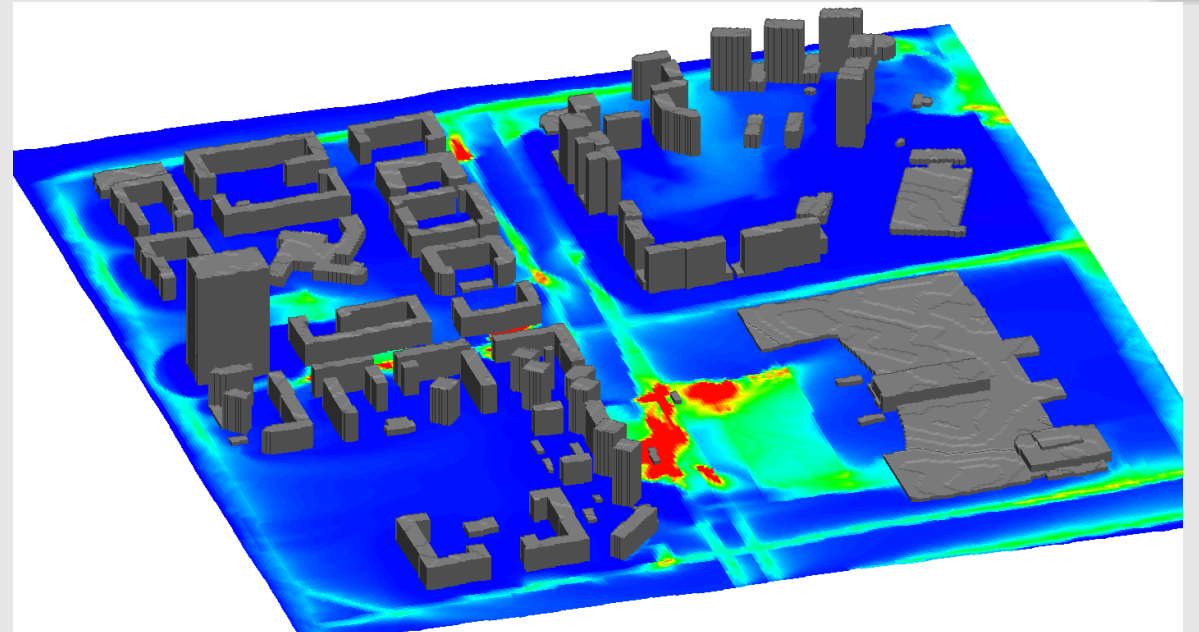
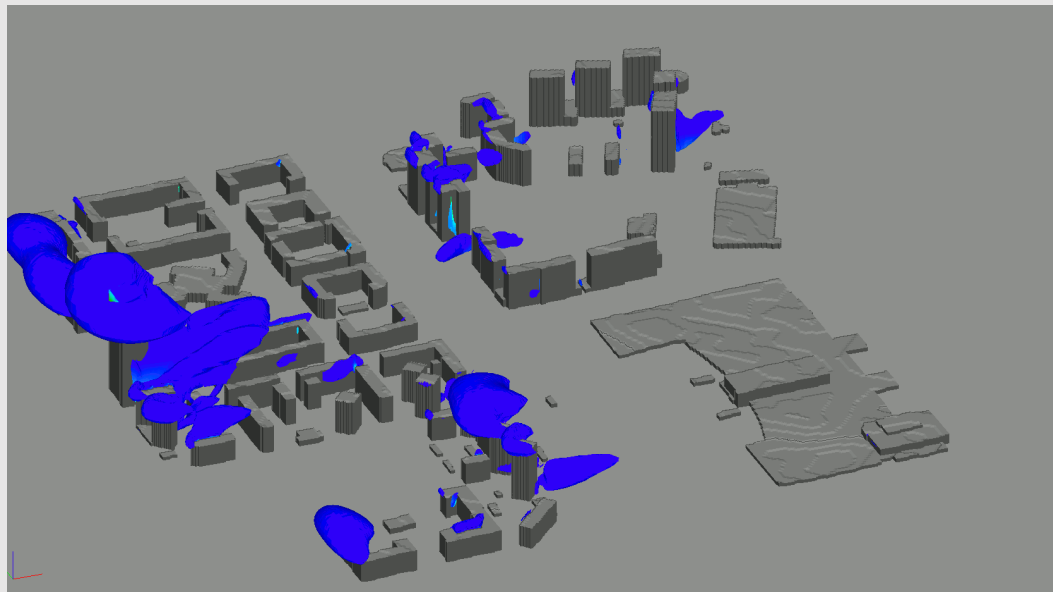
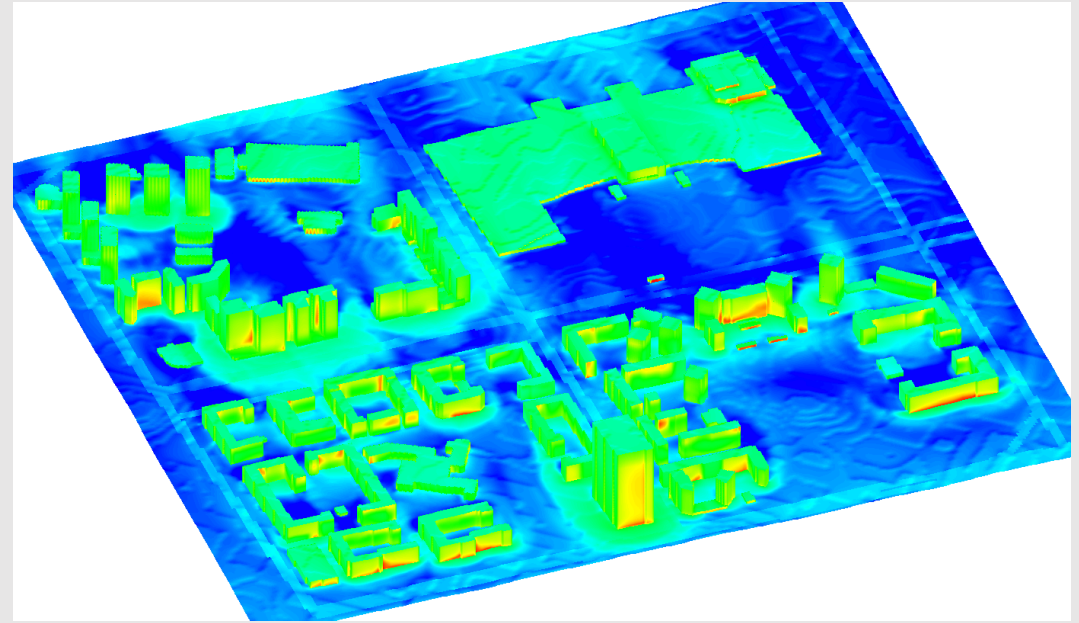
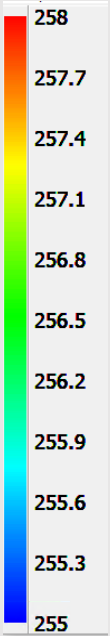


# Динамика полей скорости, температуры и CO<sub>2</sub>

$|\mathbf{V}|$ , м/с

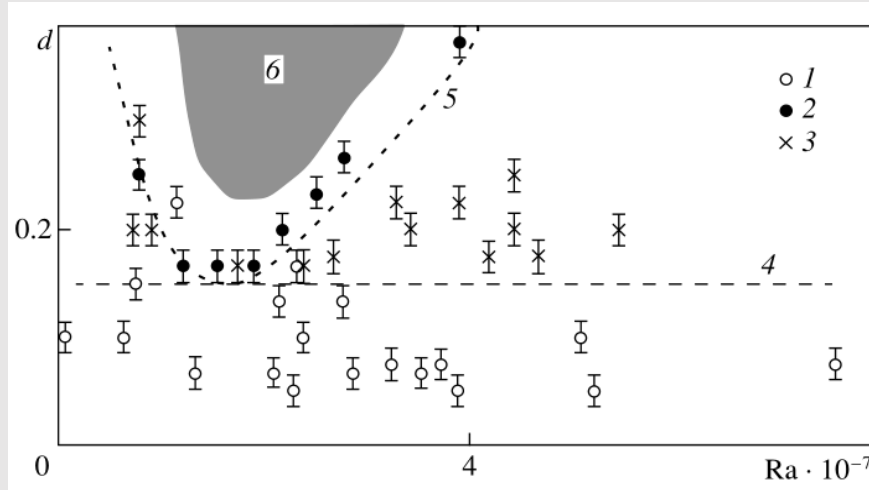
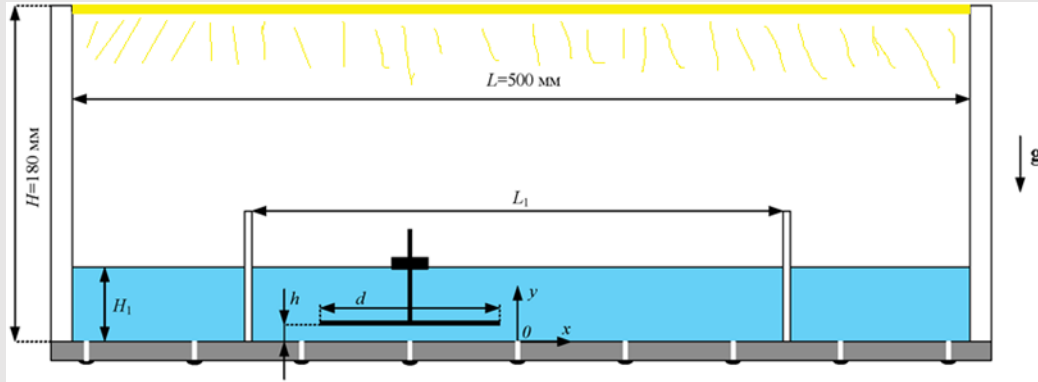


T, K



# Продолжение исследований динамики конвективных течений при наличии свободноплавающих включений

## Эксперимент



Температура



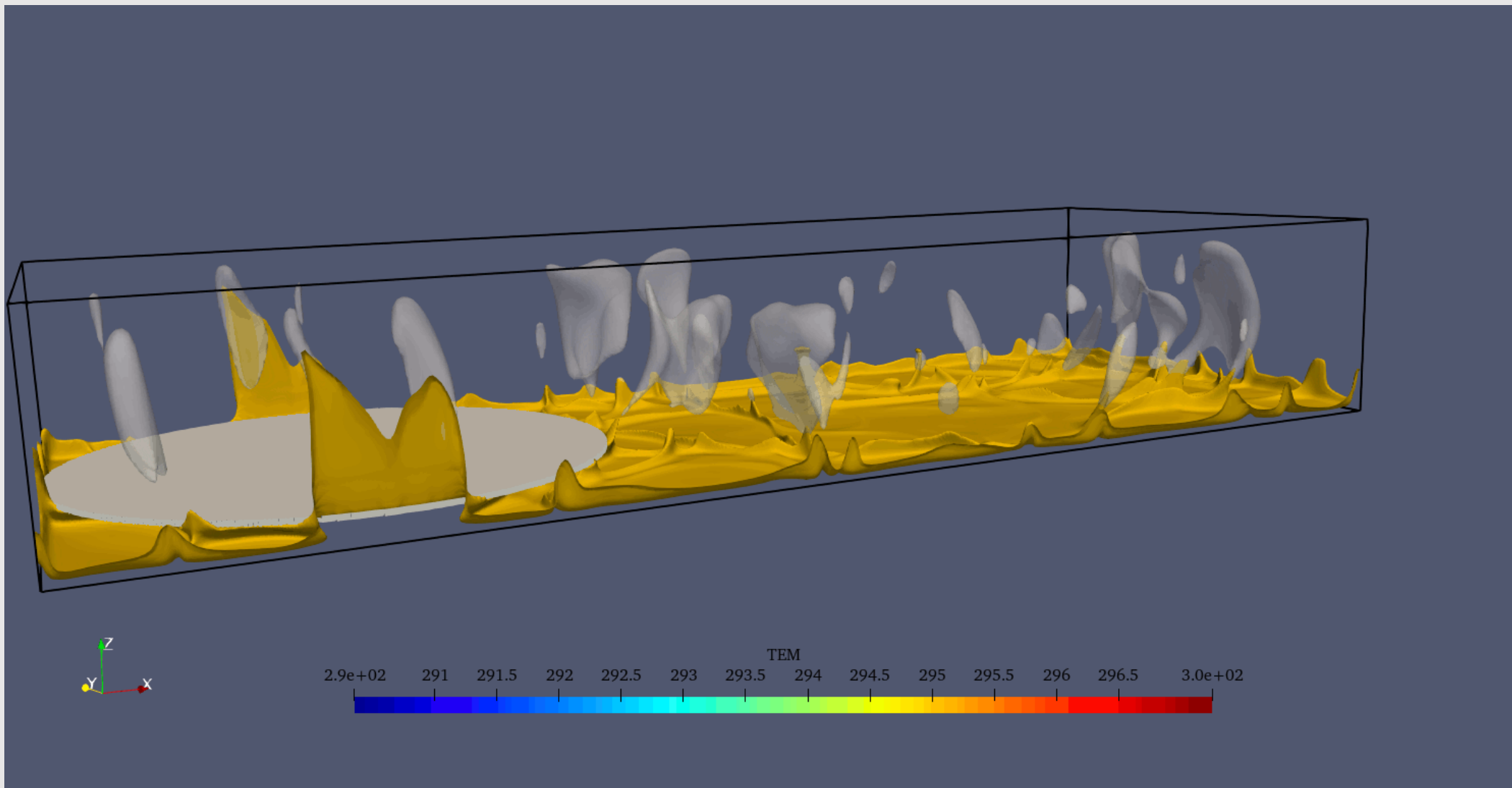
Модуль скорости



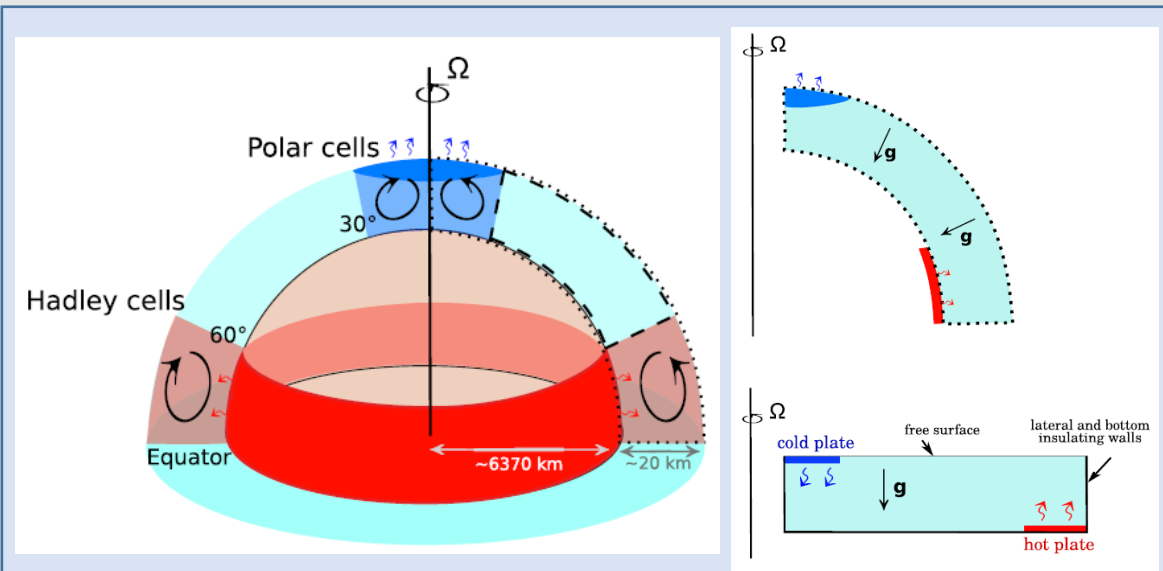
Time: 1.5

Карта режимов течений: 1 - регулярные колебания; 2 - хаотические; 3 - переходные режимы; 4 - граница области регулярных колебаний; 5 - граница между переходными и хаотическими режимами; 6 - область отсутствия крупномасштабных течений

# Пространственное моделирование



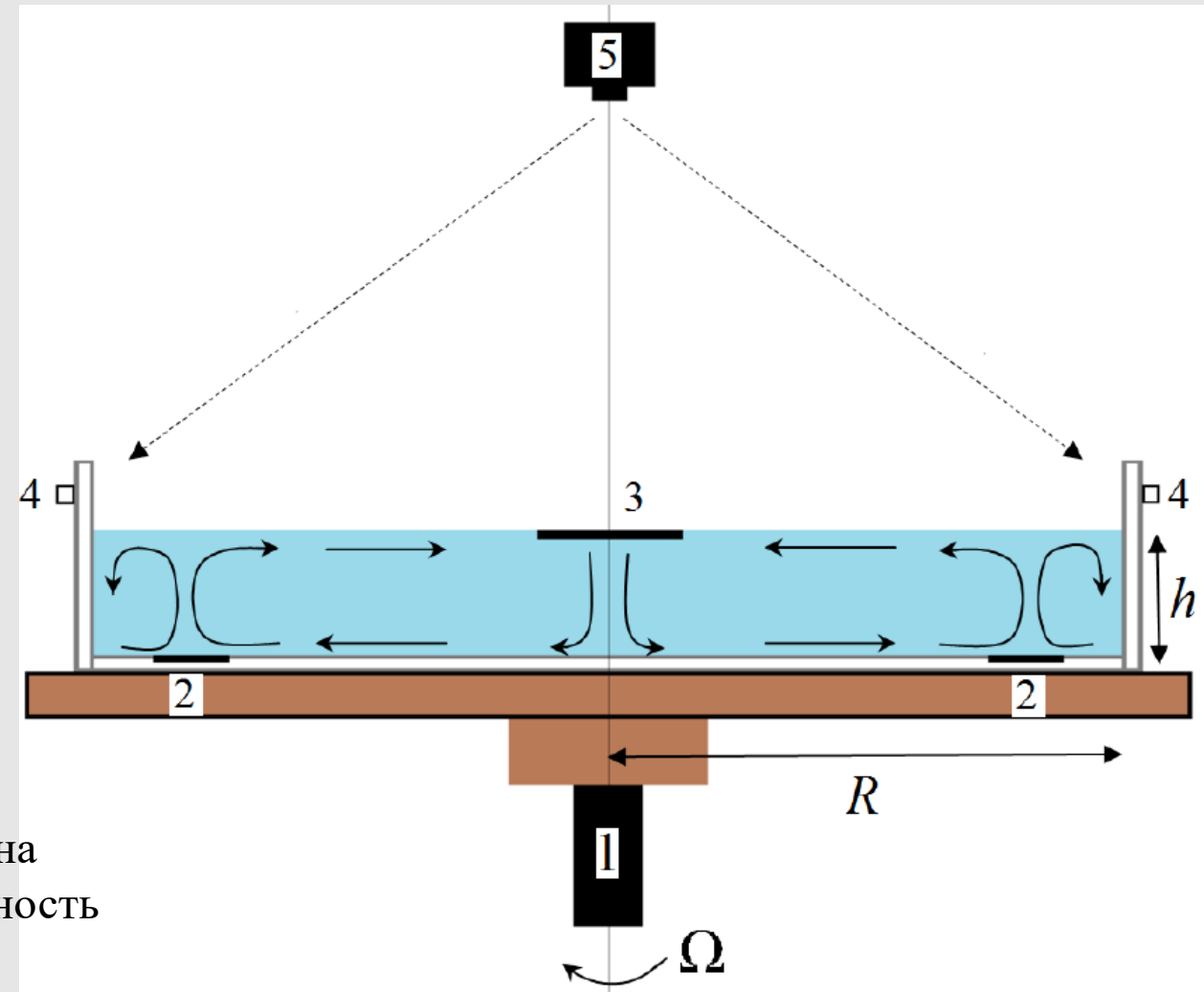
# Прямое численное моделирование лабораторной модели общей циркуляции атмосферы



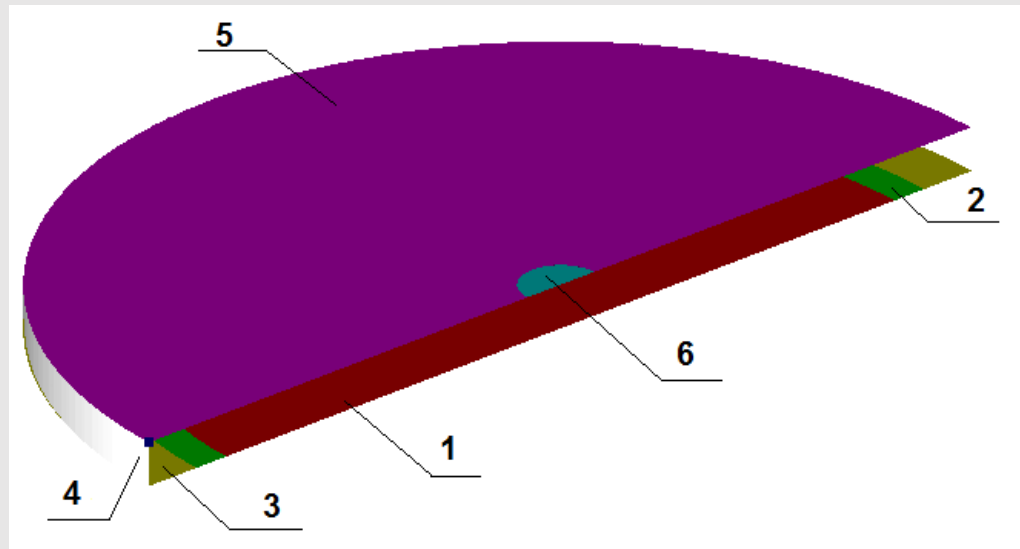
Scolan, H. and Read, P.L., A rotating annulus driven by localized convective forcing: a new atmosphere-like experiment. *Experiments in Fluids*, 2017, 58, 75.

Диаметр модели – 690 мм, высота слоя – 30 мм, ширина нагревателя – 25 мм рабочая жидкость – ПМС-5, мощность нагрева – 123 Вт, мощность охлаждения – 3 Вт

## Лабораторная модель ИМСС



# Численная модель лабораторной модели



## Геометрия

Радиус модели  $R = 345$  мм,

Высота слоя  $h = 30$  мм,

2 - кольцевой нагреватель, ширина 25 мм

6 - центральный холодильник, радиус – 28 мм

5 – свободная граница

1, 3, 4 – вращающиеся адиабатические стенки

## Свойства жидкости (силиконовое масло)

плотность –  $911 \text{ кг/м}^3$

кинематическая вязкость –  $\nu = 5.146 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ , динамическая -  $0.004688 \text{ Па} \cdot \text{с}$

температуропроводность –  $8.34 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$

число Прандтля  $Pr = 61.7$

Коэффициент объемного теплового расширения для ПМС-5  $\beta = 0.0009 \text{ град}^{-1}$

**Начальные условия** – твердотельное вращение, температура жидкости – 20 градусов Цельсия.

## Граничные условия для температуры.

Мощность нагревателя – +123 Вт

Мощность холодильника – -3 Вт

Свободная поверхность – -120 Вт

## Вращение

1 –  $T = 77$  (угловая скорость  $\Omega = 0.0816 \text{ рад/с}$ ),

2 –  $T = 57$  (угловая скорость  $0.110 \text{ рад/с}$ ),

3 –  $T = 47$  (угловая скорость  $0.1337 \text{ рад/с}$ ),

4 –  $T = 27$  (угловая скорость  $0.233 \text{ рад/с}$ ),

5 –  $T = 17$  с (угловая скорость  $0.3696 \text{ рад/с}$ ).



# Конечно-объёмная сетка

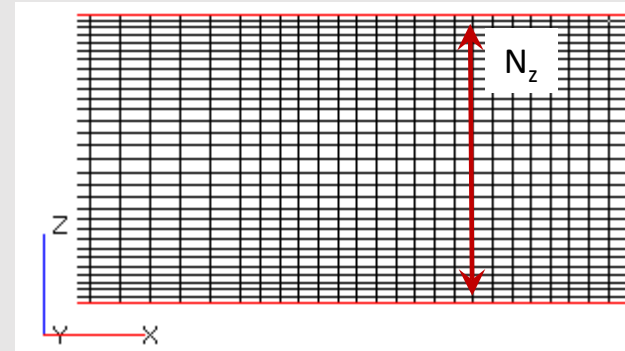
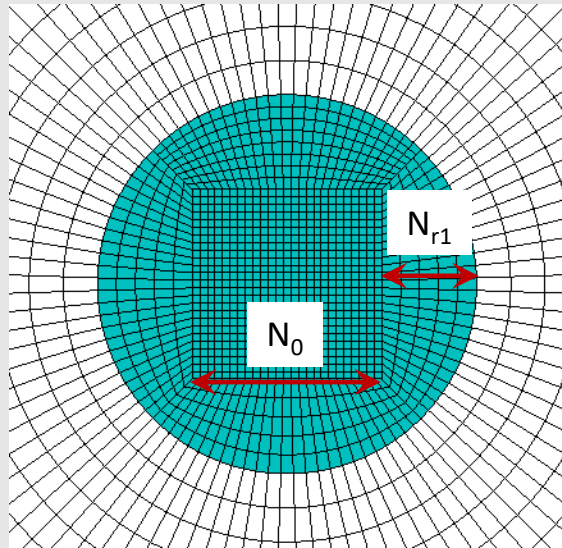
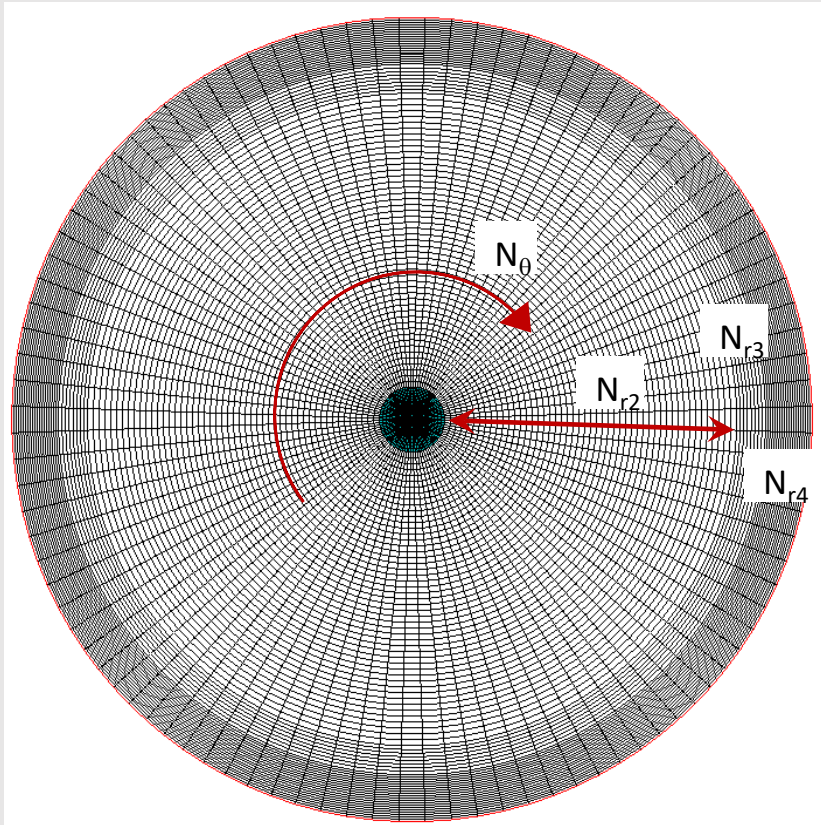


Таблица 1. Дискретизация сеток

Mesh	$N_\theta$	$N_z$	$N_0$	$N_{r1}$	$N_{r2}$	$N_{r3}$	$N_{r4}$	$N_c, 10^6$
coarse	100	30 (5)	25	5	50	8	20	0.27
base	260	40 (5)	65	10	100 (2.5)	20	30	1.833
fine	480	60 (5)	120	15	200 (1)	40	60	9.288

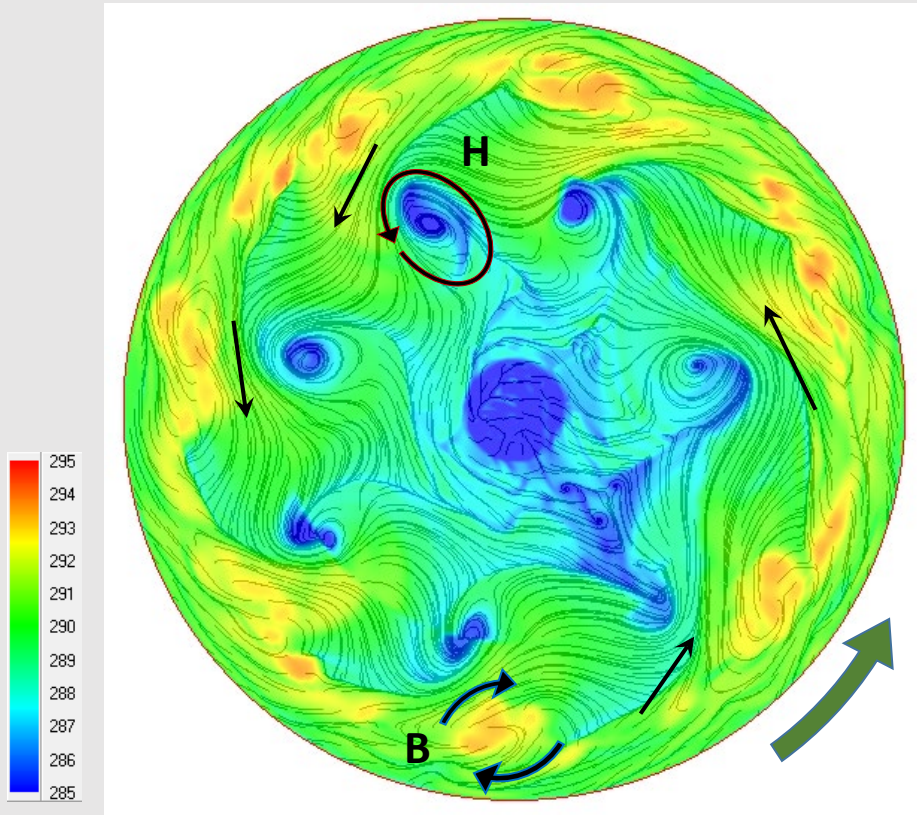
## CFD программы: σFlow

- модель – нестационарное пространственное течение несжимаемой жидкости в приближении Буссинеска;
- центрально-разностная схема для конвективных членов;
- схема Кранка-Николсон для нестационарных членов;
- время осреднения  $> 7600$  с

$$r_{12} = 1.72, r_{23} = 1.89$$

# Картина течения. Волновой режим $T=27$ с

Течение у свободной поверхности

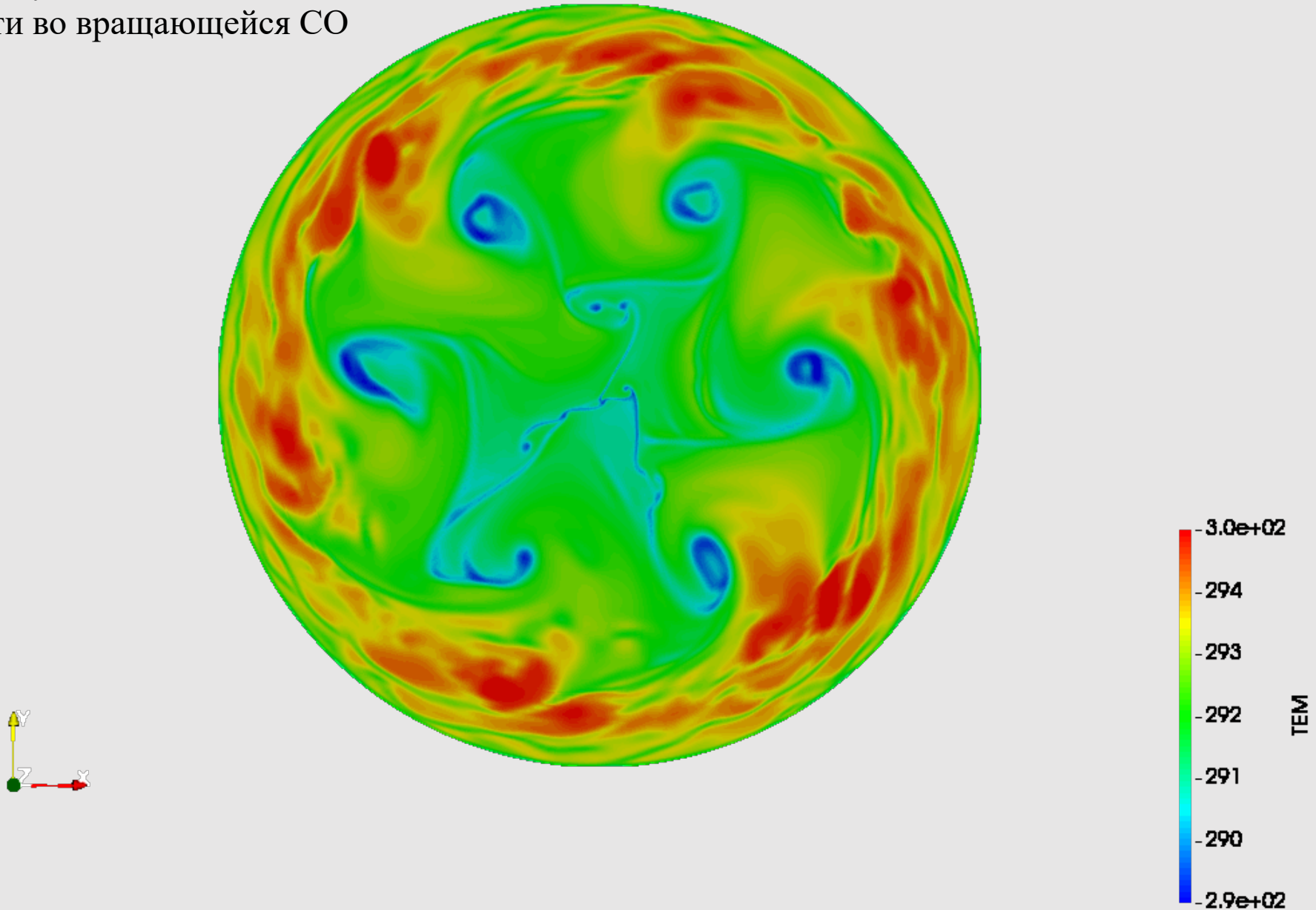


Осреднённое меридиональное течение



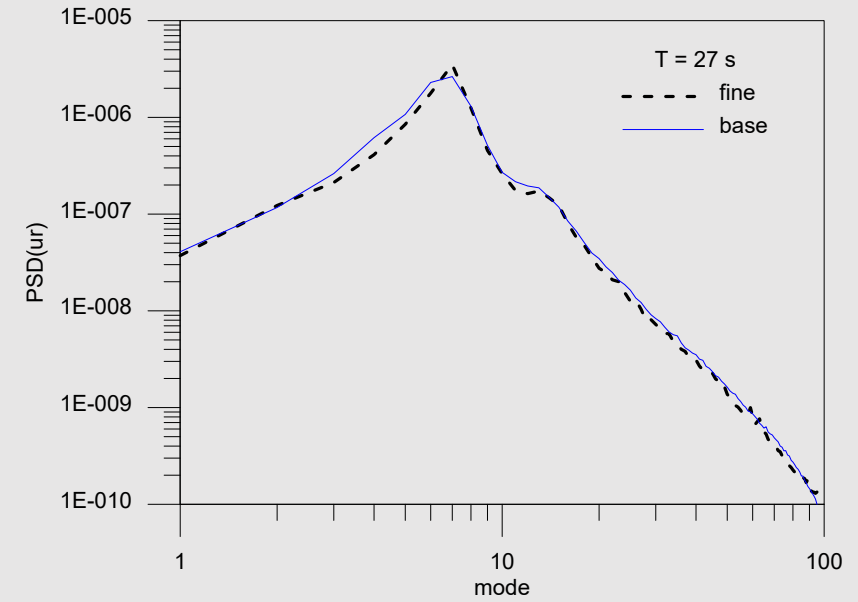
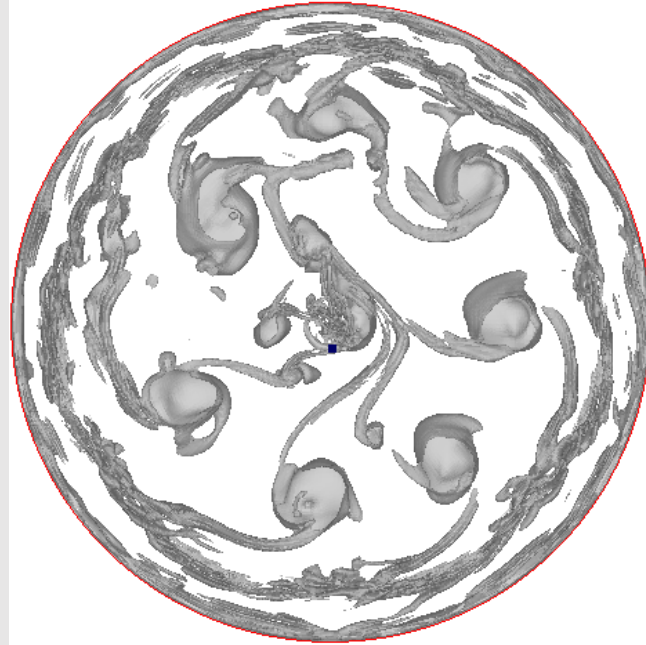
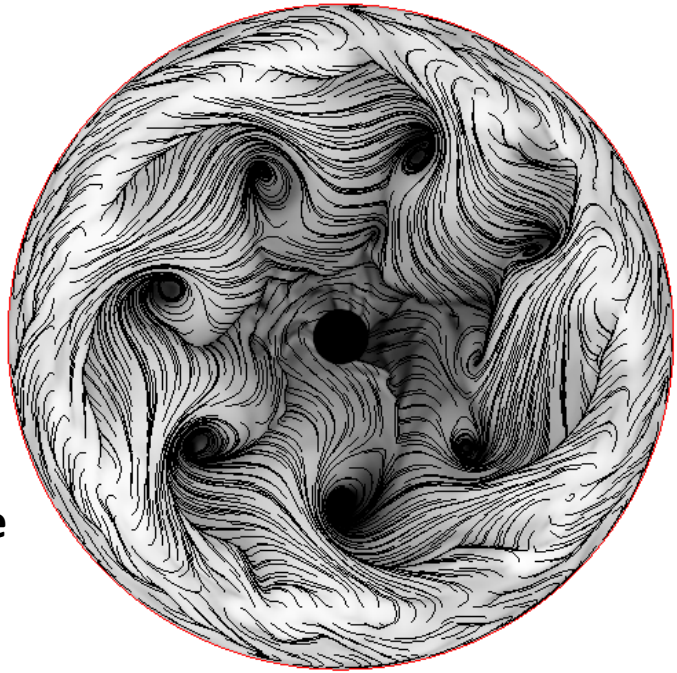
## Картина течения. Волновой режим $T=27$ с

Температура у свободной  
поверхности во вращающейся СО



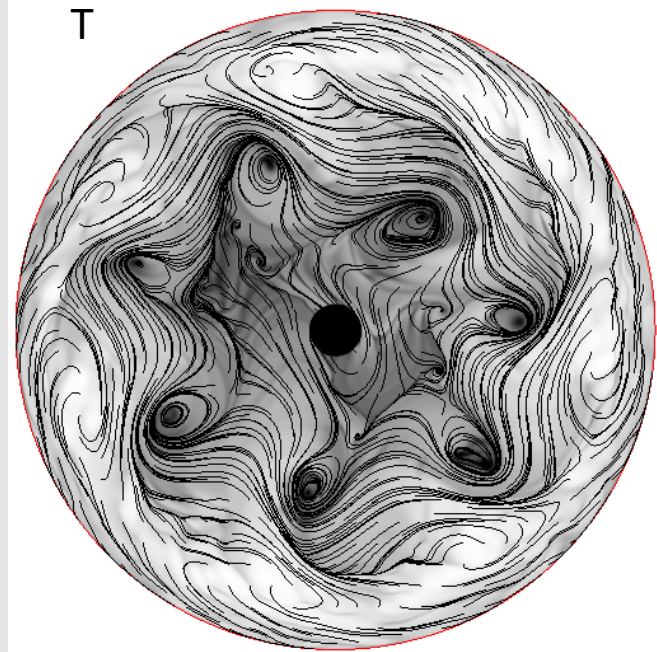
# Мгновенное течение

base

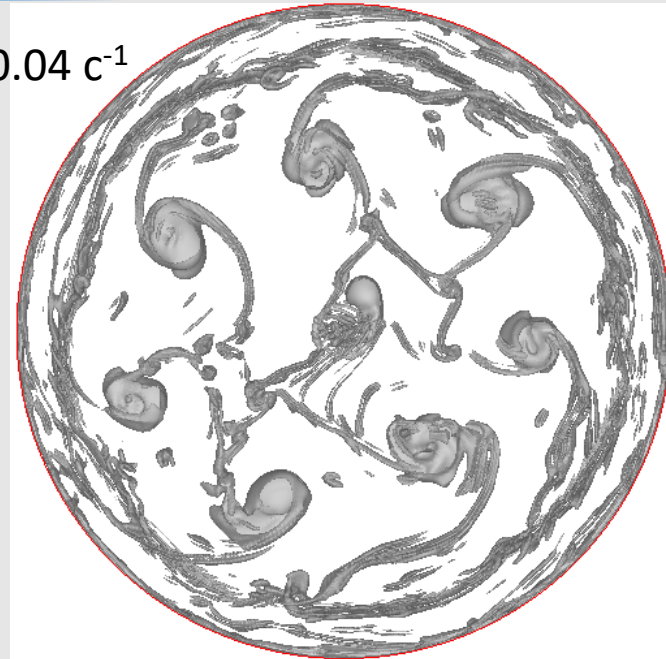


T

fine



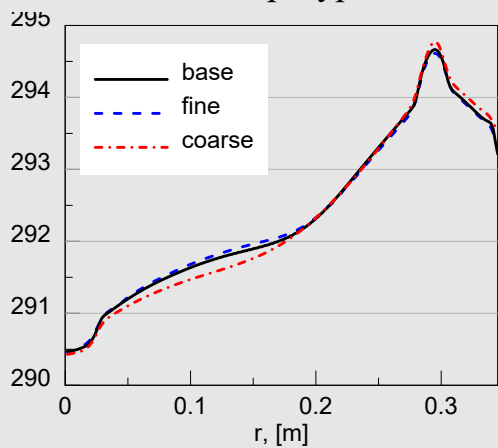
$$\lambda_2 = -0.04 \text{ c}^{-1}$$



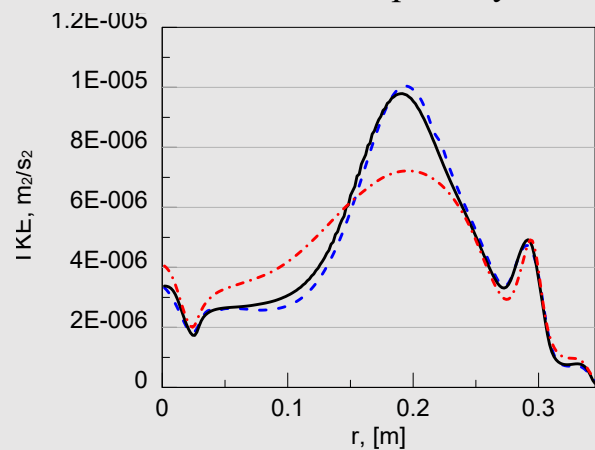
Спектральная плотность мощности пульсаций радиальной компоненты скорости вдоль окружности  $r = 0.193$  м.

# Интегральные радиальные распределения

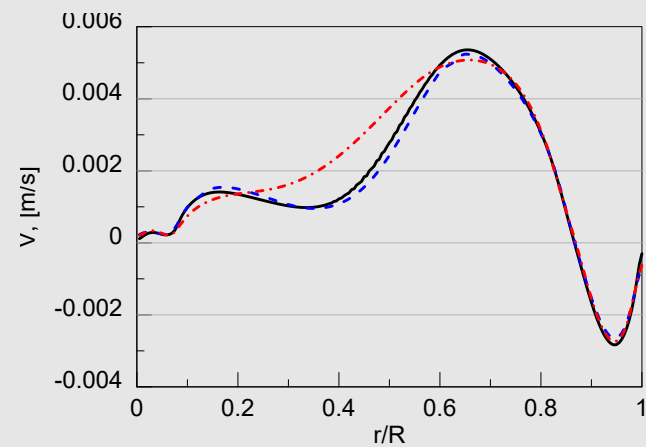
температура



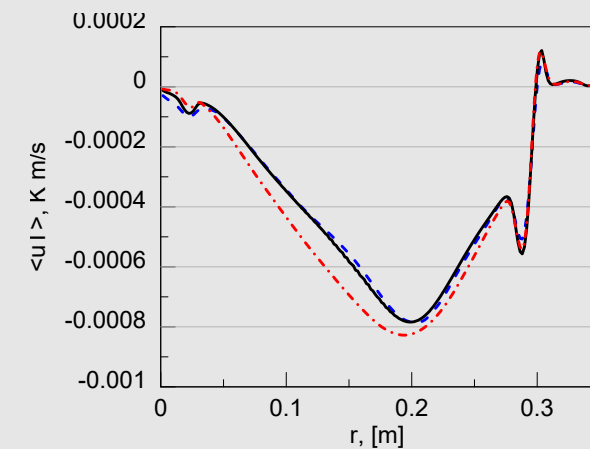
кинетическая энергия пульсаций



азимутальная скорость

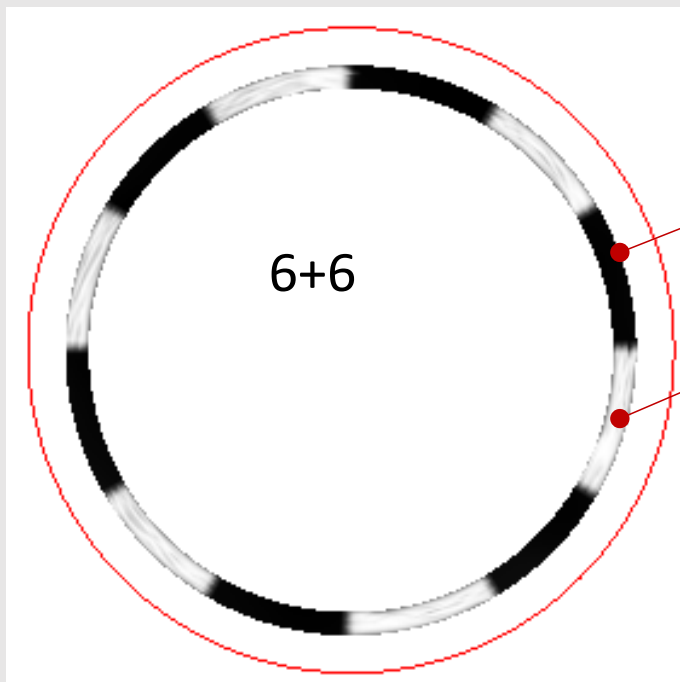


радиальный  
турбулентный поток  
тепла



Осреднение по азимуту и высоте

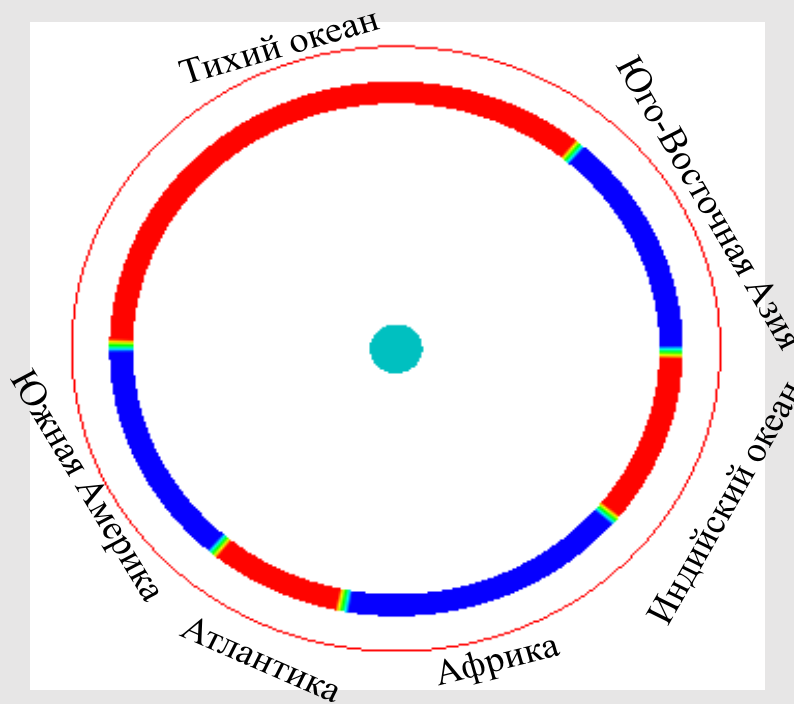
$$A(r) = \frac{1}{2\pi r H} \int_0^H dz \int_0^{2\pi} d\phi (A(r, \phi, z) r)$$



нагреватель

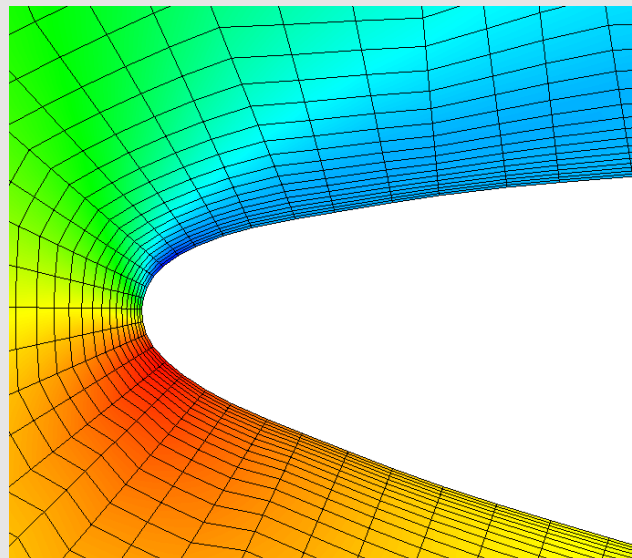
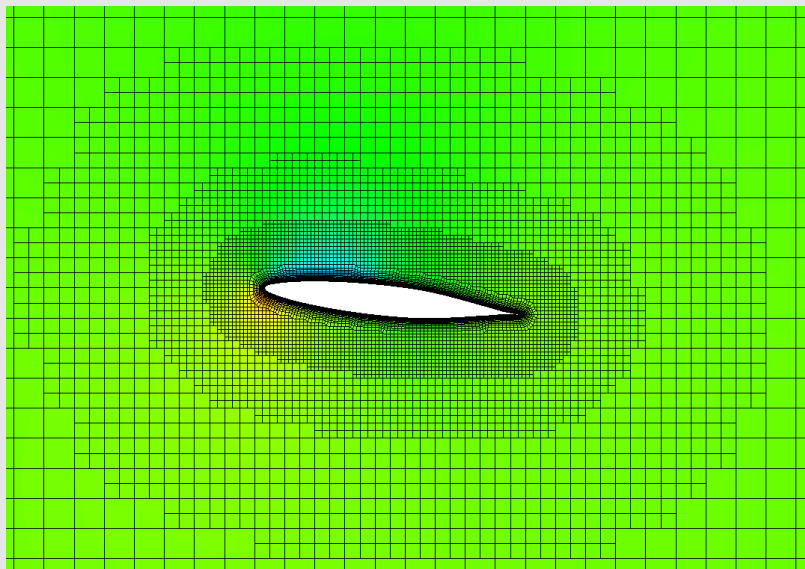
«изолятор»

Неоднородный периодический нагреватель



Не периодический нагреватель

# Восстановление модели кавитации



## Параметры

$$\rho_f = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_f = 0.001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$\rho_v = 1.0 \text{ kg/m}^3 \quad \mu_v = 1.0\text{E-}05 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

$$U = 12.192 \text{ m/s}$$

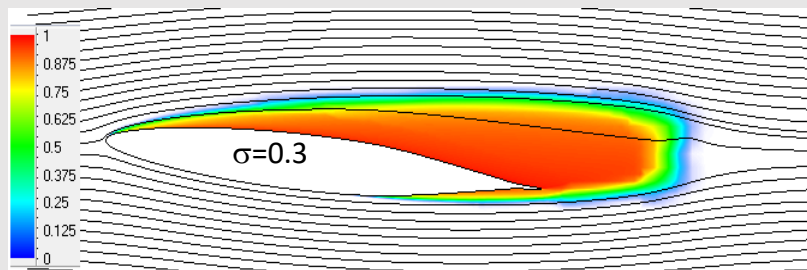
Угол атаки  $6^\circ$

## Кавитационное число

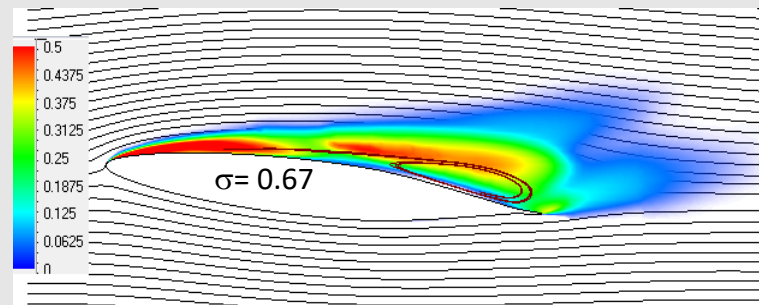
$$\sigma = \frac{p_\infty - p_s}{\rho_f U^2 / 2}$$

## Доля паровой фазы и траектории частиц для осредненных полей

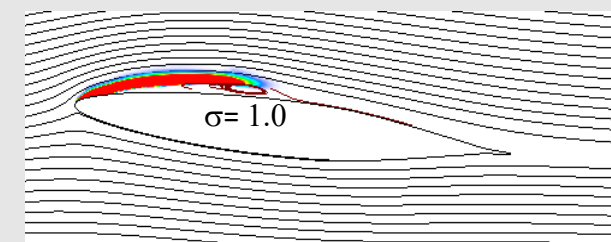
supercavitation



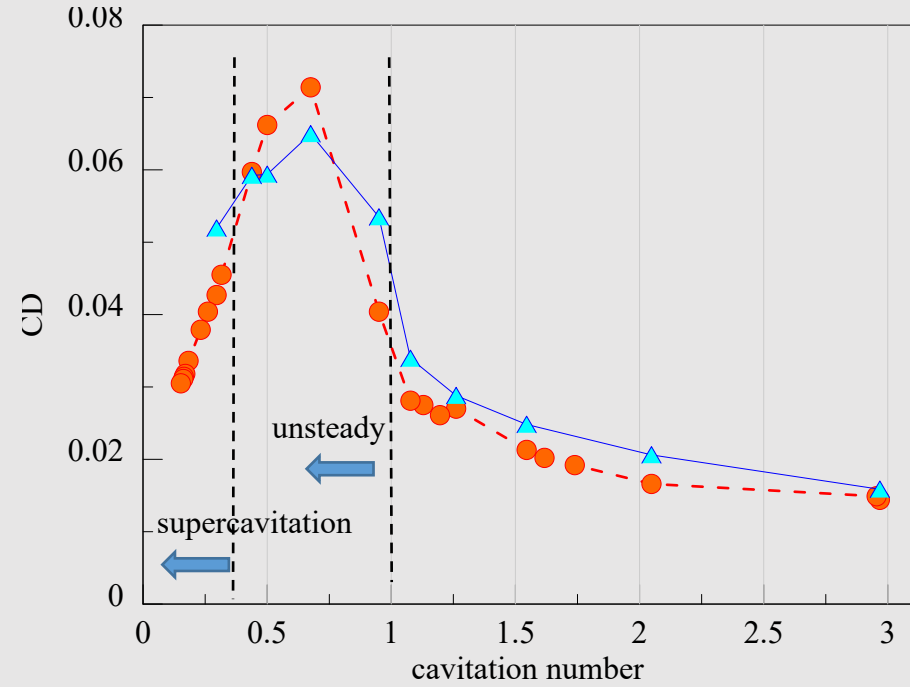
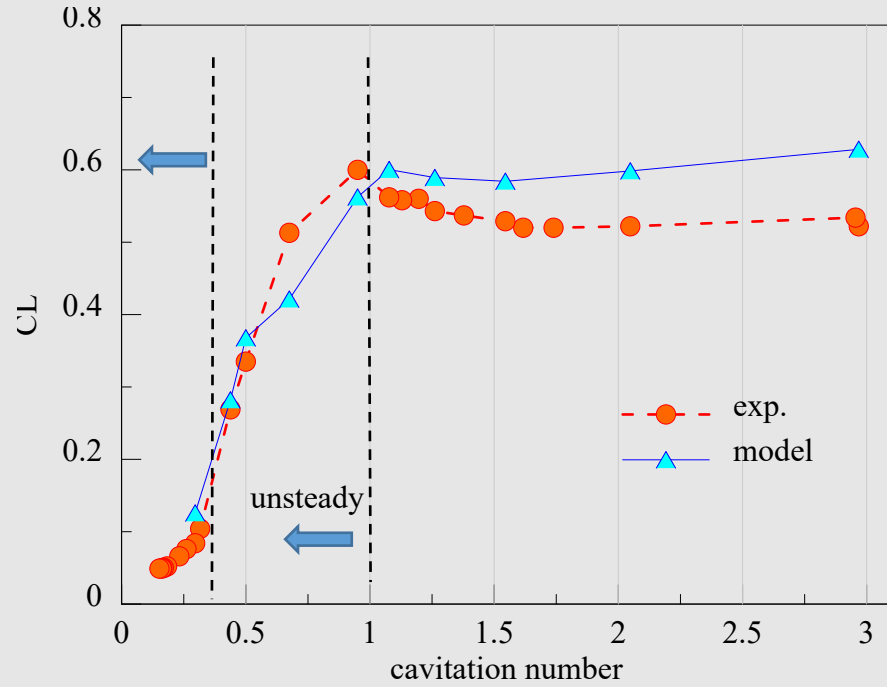
unsteady



steady



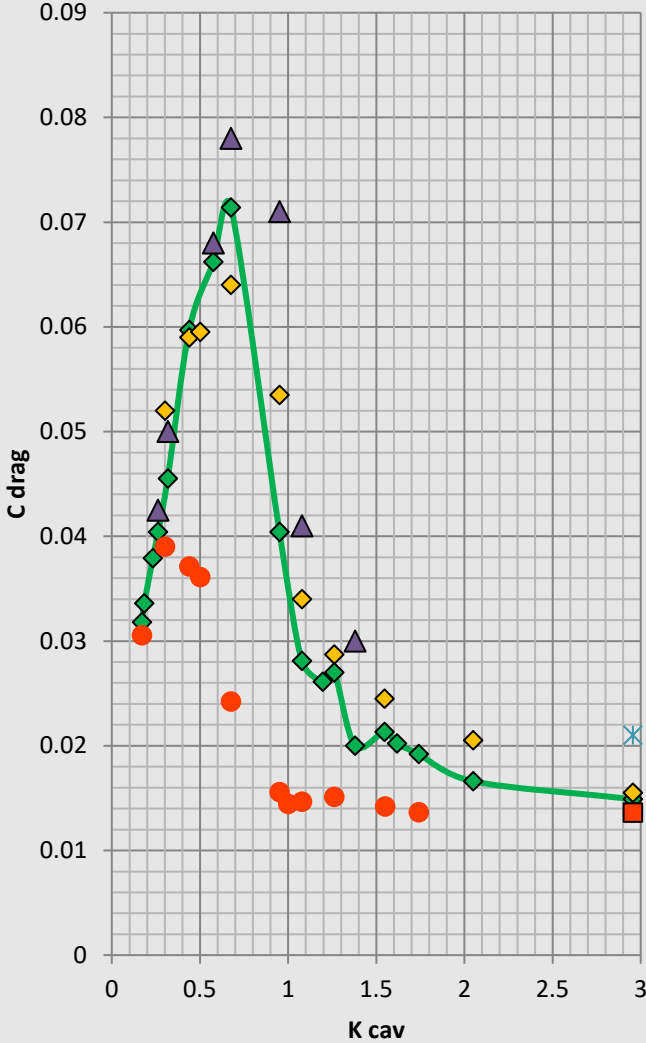
## Коэффициенты подъёмной силы и сопротивления



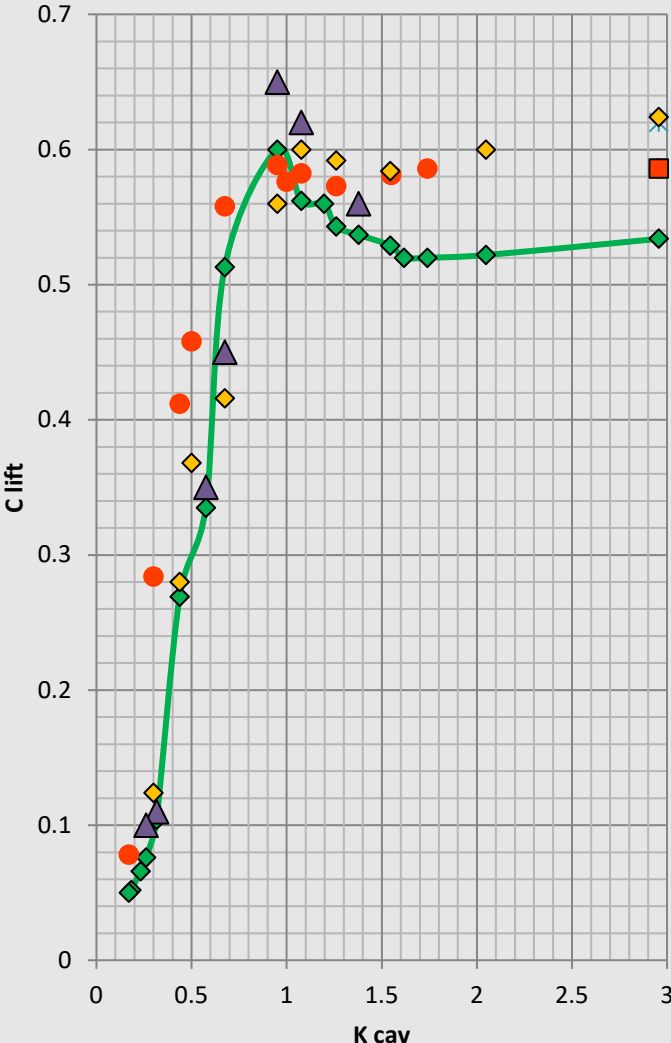


# C drag / C lift plots

$$K_{cav} = \frac{P_o - P_v}{\frac{\rho}{2} V^2}$$

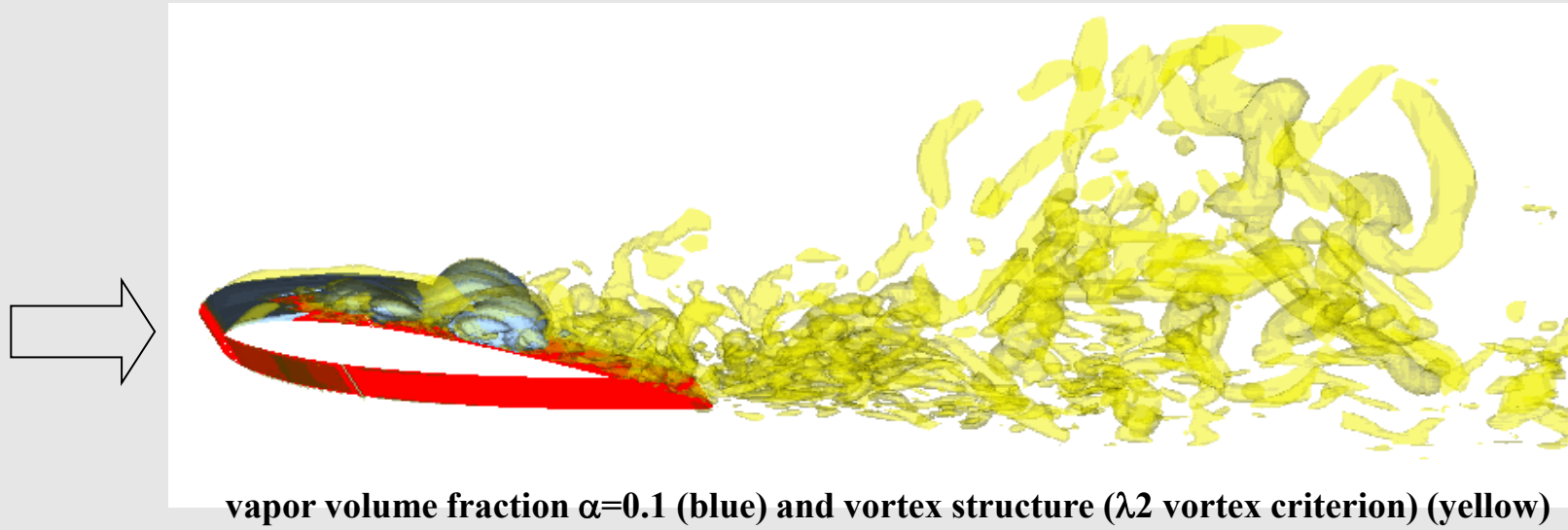


- ◆ C drag exp
- C drag FV
- C drag noncavitating flow
- ▲ StarCCM+ (3D)
- ✱ OpenFOAM noncavitating flow (3D)
- ◆ SigmaFlow



- ◆ C lift
- C lift FV
- C lift noncavitating flow
- ▲ StarCCM+ (3D)
- ✱ OpenFOAM noncavitating flow (3D)
- ◆ SigmaFlow

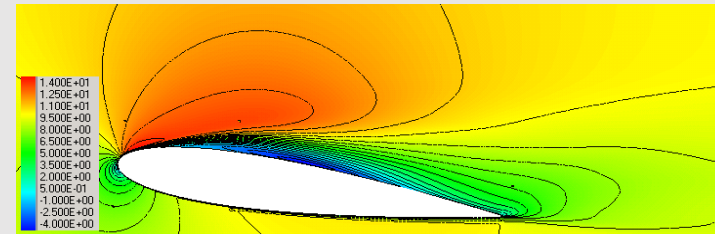
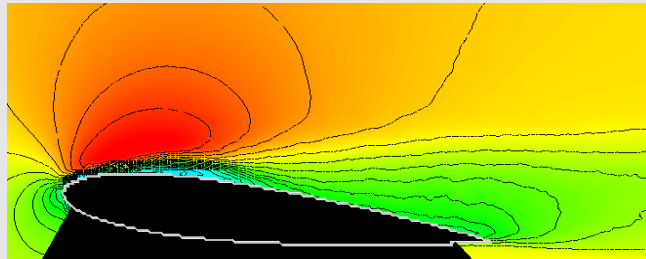
# Кавитационные течения



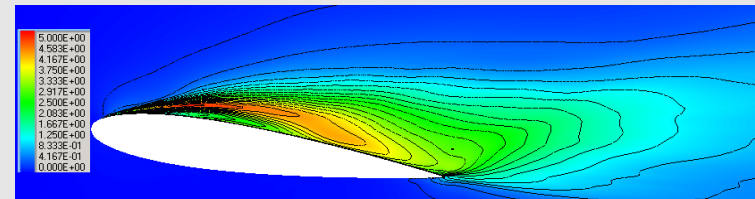
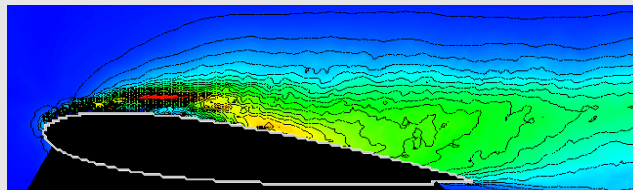
Experiment PIV (IT SB RAS)

Simulation, DES

streamwise  
velocity

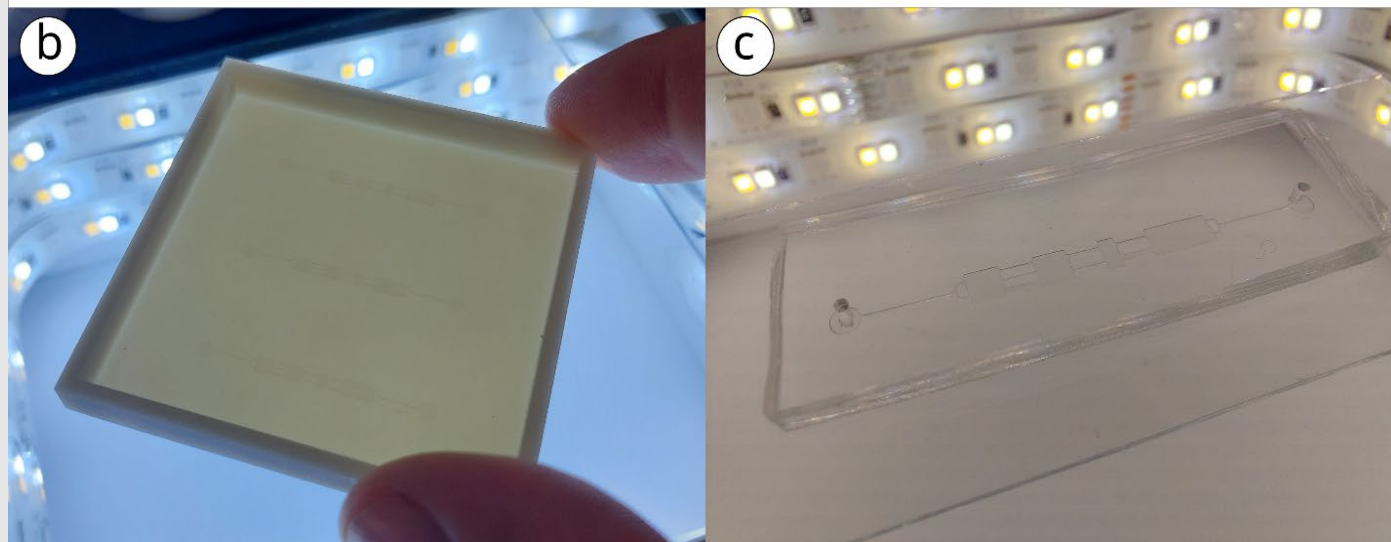
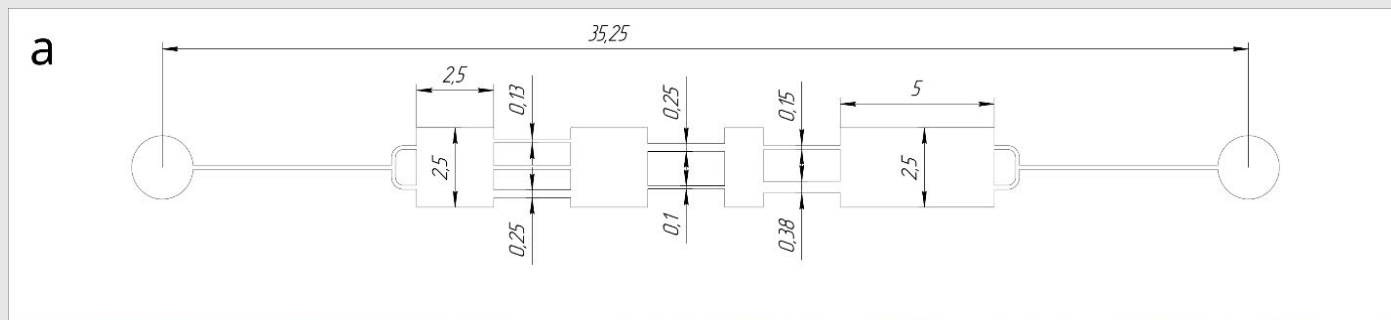


fluctuation

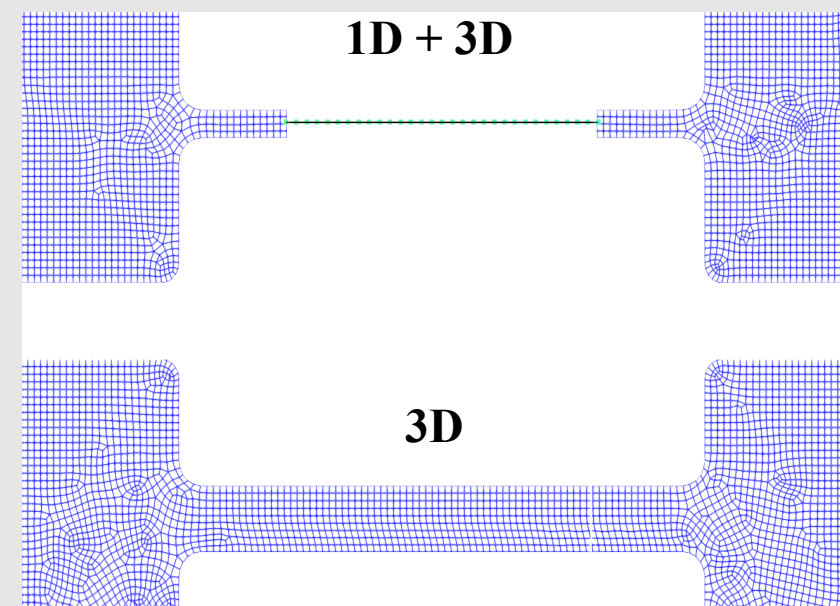


# Развитие гибридной 1D – 3D модели течения

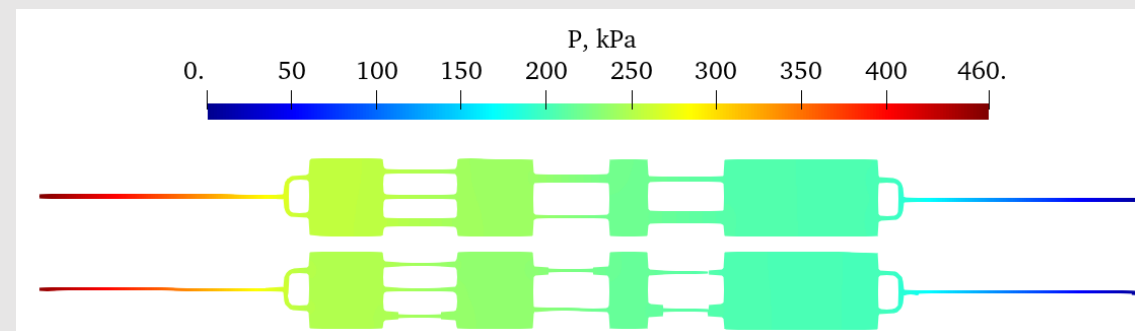
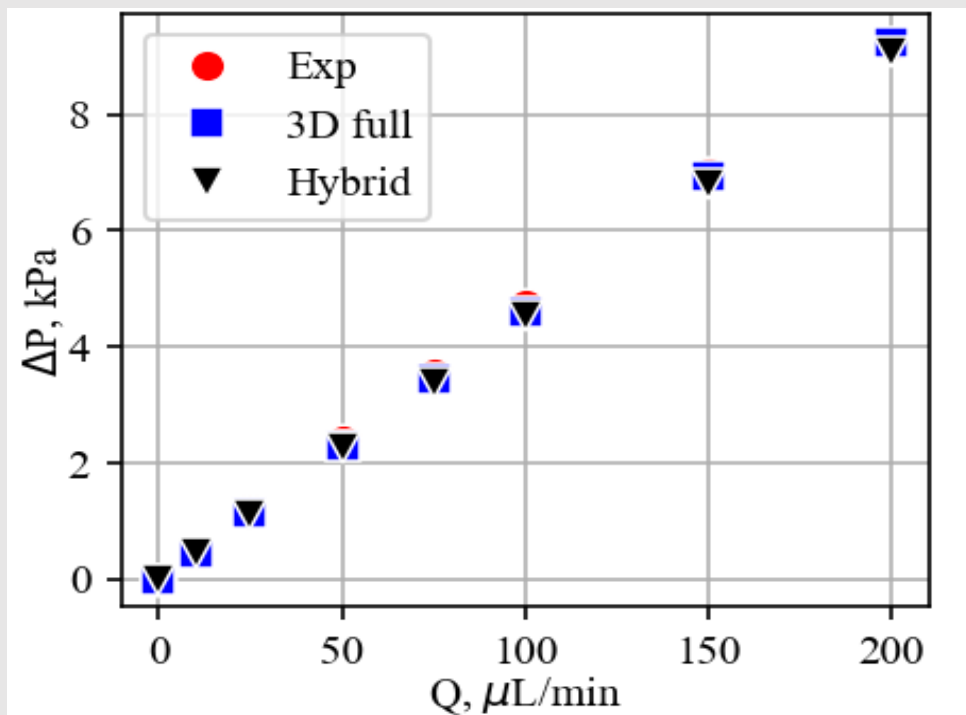
## Микрофлюидный чип



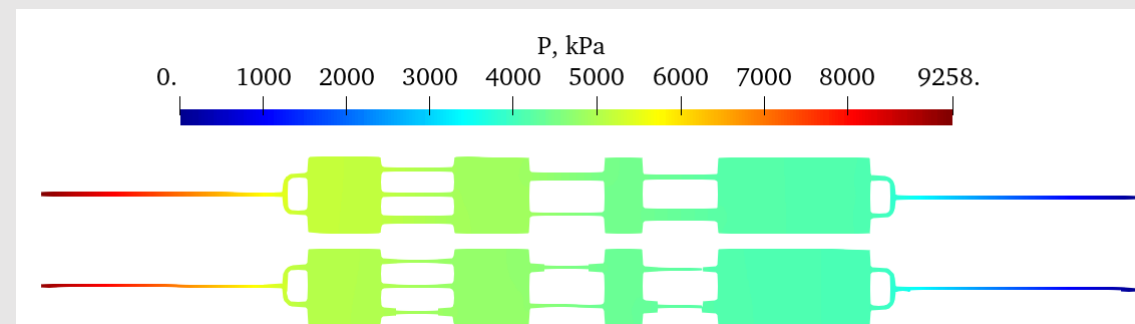
## Фрагмент расчетной сетки



## Развитие гибридной 1D – 3D модели течения



10 мкл/мин

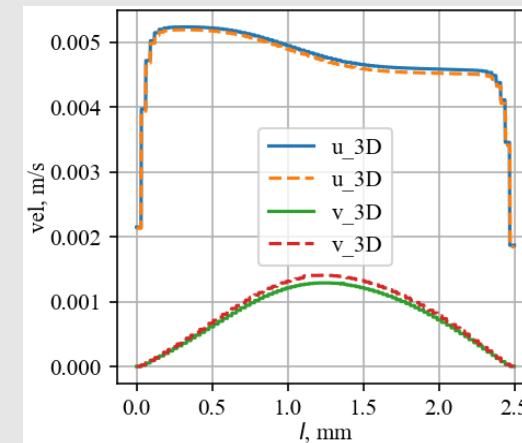
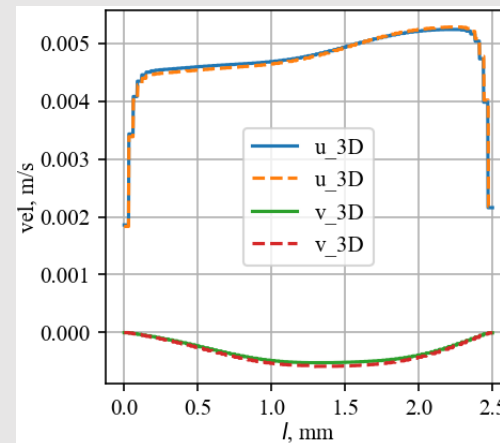
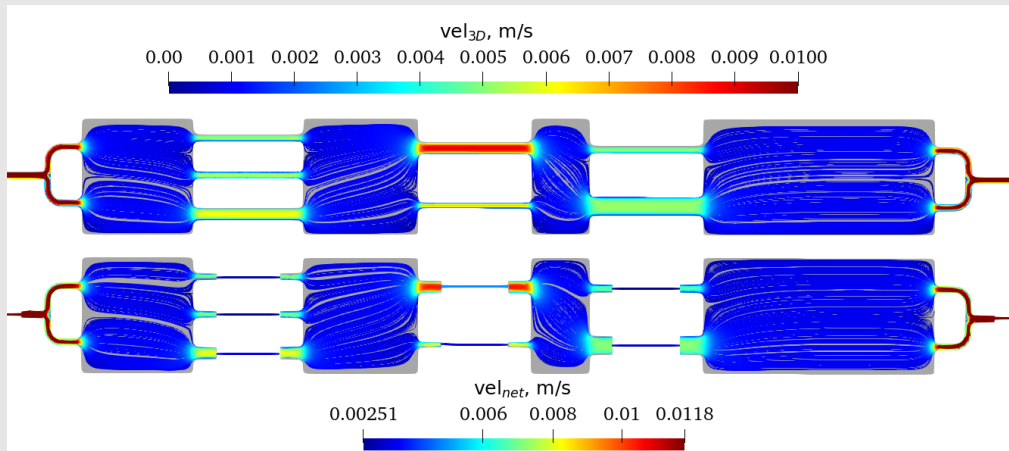


200 мкл/мин

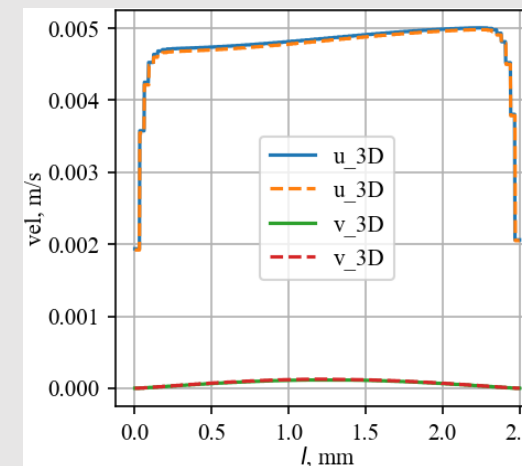
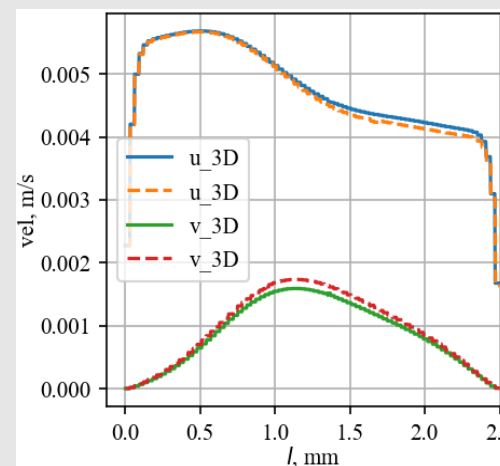
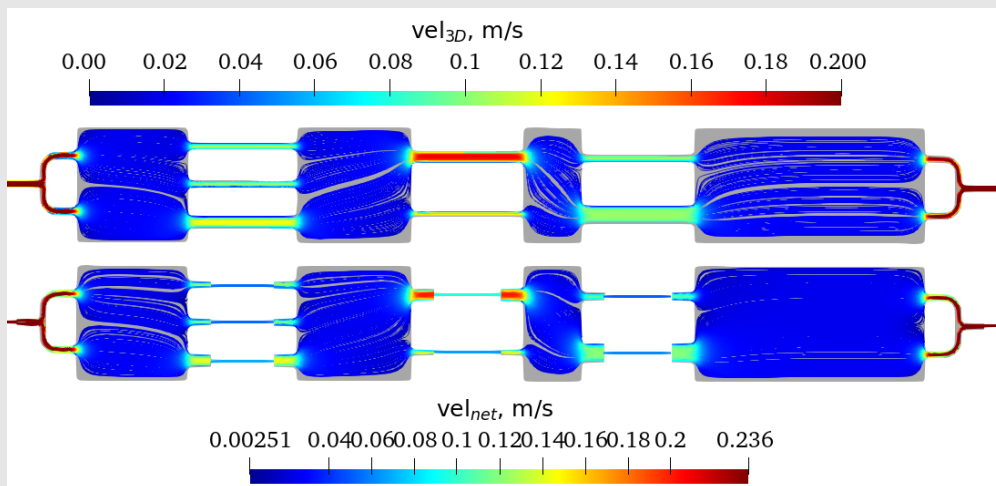
Поле давления в центральном сечении пространственной и гибридной, для различных расходов жидкости

# Развитие гибридной 1D – 3D модели течения

10 мкл/мин



200 мкл/мин



Линии тока, раскрашенные в цвета поля скорости  
центрального сечения 3D и гибридной моделей

## Задачи развития SigmaFlow на 2024 год

1. Проект с Нанософт по разработке специализированного *CFD модуля* для nanoCAD.
2. Развитие построителя расчетных сеток (Huavey).
3. Развитие моделей горения ориентированных на моделирование пожаров (ЗК Эксперт).
4. Развитие модели подвижных твердых тел на основе IBM метода.
5. Развитие модели многофазного потока в пористой среде (Газпромнефть)

**Спасибо за внимание!**