



POLYTECH

Peter the Great
St. Petersburg Polytechnic
University



РАЗВИТИЕ КОМПЛЕКСА ПРОГРАММ SINF/FLAG-S

Опыт реализации нескольких подходов к расчету низкоскоростных неизотермических течений газа во вращающихся полостях.

Смирнов Е.М., Колесник Е.В., Смирновский А.А., Смирнов С.И.

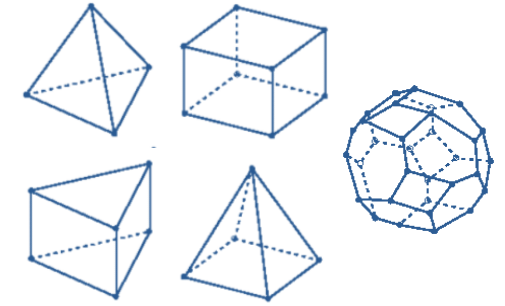
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)

Физико-Механический Институт

Комплекс программ SINF/Flag-S

Основные характеристики

- Flag-S: **F**luids and **g**ases — **S**imulations
- Разрабатывается с 2005 г. по настоящее время
- Языки программирования: Fortran-90, C
- Метод конечных объемов (объемно-центрированный подход)
- Неструктурированные многоблочные сетки с ячейками произвольной топологии
- Регулярная стыковка на межблочных границах
- Параллелизация на основе MPI, для декомпозиции сетки используется библиотека Metis



Классы задач, решаемых с использованием кода SINF/Flag-S

- Ламинарные и турбулентные течения жидкости
- Задачи сопряженного теплообмена, процессы испарения и конденсации на границах раздела сред
- Течения со свободной поверхностью (метод Volume of Fluid)
- Течения в пористых средах
- Высокоскоростные течения газа
- Теплообмен при вынужденной, свободной и смешанной конвекции в полях массовых сил

Комплекс программ SINF/Flag-S

Расчет течений несжимаемой жидкости (слабосжимаемого газа)

- SIMPLE-подобные алгоритмы
- Метод Роджерса-Квака
- Нестационарный безытерационный алгоритм
- Схемы расчета конвективных потоков

First order upwind, Second order upwind, QUICK, Central Difference 2-nd, 4-th order

- Линейный солвер

CG, BiCGStab, GMRES, Geometric Multi Grid, предобуславливатели SGS, ILU, IC

Расчет течений сжимаемого газа в широком диапазоне чисел Маха на основе единого подхода

- Неявная схема
- Схемы расчета конвективных потоков
Godunov, ROE, HLL, HLLC, AUSM (AUSM+, AUSM+up, AUSMD, SLAU)
- MUSCL подход, схемы второго порядка точности
TVD схемы, скалярные ограничители
- Способы подавления карбункул-неустойчивости
искусственная вязкость, гибридные схемы
- Регуляризация системы уравнений динамики сжимаемого газа на основе метода Turkel

Расчет низкоскоростных неизотермических течений газа во вращающихся полостях

Запись уравнений в относительной системе координат



Слагаемые в уравнении движения:

центробежная сила $-\rho\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r})$

сила Кориолиса $-2\rho(\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V})$

Система уравнений движения и теплообмена

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} - \rho \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - 2\rho (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V})$$

$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} C_p T) = \frac{\partial p}{\partial t} + 2\mu \dot{S}^2 - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{V})^2 + \mathbf{V} \cdot \nabla p + \lambda \nabla^2 T$$

Уравнение состояния
совершенного газа

$$p = (\gamma - 1) \rho e$$

$$e = c_v T$$

Расчет потенциала центробежной силы и гидростатического давления

Равновесие в поле потенциальной силы: $\mathbf{f}_c = -\nabla\Pi$

$$\nabla p_h = \rho_h \mathbf{f}_c \quad \text{– условие равновесия}$$

Преобразование слагаемых в уравнении движения:

$$-\nabla p + \rho \mathbf{f}_c = -\nabla p + \rho_h \mathbf{f}_c + (\rho - \rho_h) \mathbf{f}_c = -\nabla(p - p_h) + (\rho - \rho_h) \mathbf{f}_c$$

Гидростатическое давление $\nabla p_h = -\rho_h \nabla\Pi$

адиабатическое приближение

$$\rho_h = \left[\frac{p_h \rho_{ref}^\gamma}{p_{ref}} \right]^{\frac{1}{\gamma}}$$

$$p_h = p_{ref} \left[-\frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{\rho_{ref}}{p_{ref}} \Pi + 1 \right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

изотермическое приближение

$$\rho_h = p_h \frac{\rho_{ref}}{p_{ref}}$$

$$p_h = p_{ref} \exp \left[\Pi \frac{\rho_{ref}}{p_{ref}} \right]$$

Для центробежной силы:

$$\mathbf{f}_c = -\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) = -\nabla\Pi$$

$$\nabla p_h = -\rho_h \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) = \rho_h \mathbf{f}_c$$

$$\Pi = -\frac{\omega^2 (R^2 - R_{ref}^2)}{2}$$

Segregated Solver для сжимаемого газа

Система уравнений

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} - \rho \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - 2\rho (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V})$$

$$\frac{\partial (\rho C_p T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} C_p T) = \frac{\partial p}{\partial t} + 2\mu \dot{S}^2 - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{V})^2 + \mathbf{V} \cdot \nabla p + \lambda \nabla^2 T$$

- все силы учитываются явно;
- метод решения – SIMPLEC;
- для нестационарных задач $\partial p / \partial t$ добавляется явно, как источник в правой части;
- опция “привязки” давления в одной точке.

Опция задания относительного давления

- абсолютное давление (default)
- давление относительно постоянного уровня P_{REF}
- давление относительно гидростатического давления p_h

Модель существенно сжимаемого газа в консервативной форме

Система уравнений

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V} + p \mathbf{n}) = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) - \rho \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - 2\rho (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V})$$

Уравнение энергии относительно энтальпии

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} H) = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{V} - q) - \rho \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) \cdot \mathbf{V}$$

Уравнение состояния совершенного газа

$$p = (\gamma - 1) \rho e$$

$$e = c_v T$$

$$H \equiv C_p T + \frac{V^2}{2} = E + \frac{p}{\rho}$$

$$E \equiv C_v T + \frac{V^2}{2}$$

- Неявная схема «в приращениях»
- Неявный учет силы Кориолиса и центробежной силы
- Опция задания относительного давления
- Метод регуляризации Turkel для расчета течений с низкими числами Маха

Модель существенно сжимаемого газа в консервативной форме

Система уравнений

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V} + p \mathbf{n}) = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}) - \rho \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}) - 2\rho (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{V})$$

Уравнения энергии относительно ротальпии

$$\frac{\partial (\rho (E + \Pi))}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} (H + \Pi)) = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{V} - q)$$

$$\Pi = -\frac{\omega^2 (R^2 - R_{ref}^2)}{2}$$

вектор
консервативных
переменных

вектор
потоков

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho (E + \Pi) \end{bmatrix} \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho V_n \\ \rho u V_n + p n_x \\ \rho v V_n + p n_y \\ \rho w V_n + p n_z \\ \rho V_n (H + \Pi) \end{bmatrix} \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} p \\ u \\ v \\ w \\ T \end{bmatrix}$$

Из-за добавления потенциала в уравнение энергии изменились характеристические свойства системы



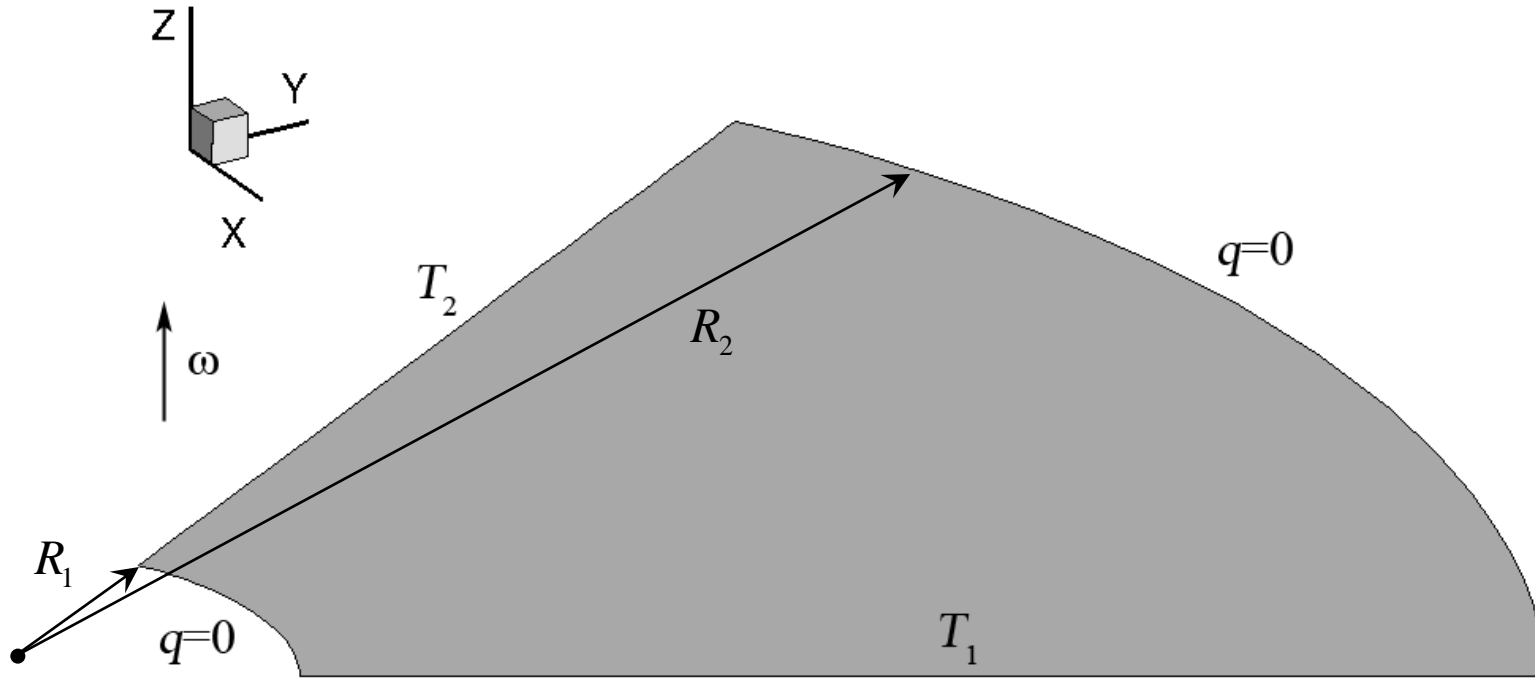
Модификация численного метода для случая быстрого вращения

➤ Модификация метода регуляризации Turkel для расчета течений с низкими числами Маха

Матрицы Якоби: $\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{w}} \quad \frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{w}} \quad \left(\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial \mathbf{w}} \right)^{-1}$

Верификационные и тестовые расчеты

Расчетная область:



Параметры постановки:

$$Ra = 4.16 \cdot 10^3$$

$$Pr = 0.7$$

$$Ro = 0.0288$$

параметр гидростатического перепада $\frac{\omega^2 (R_2^2 - R_1^2)}{P_1}$

Размерные
параметры

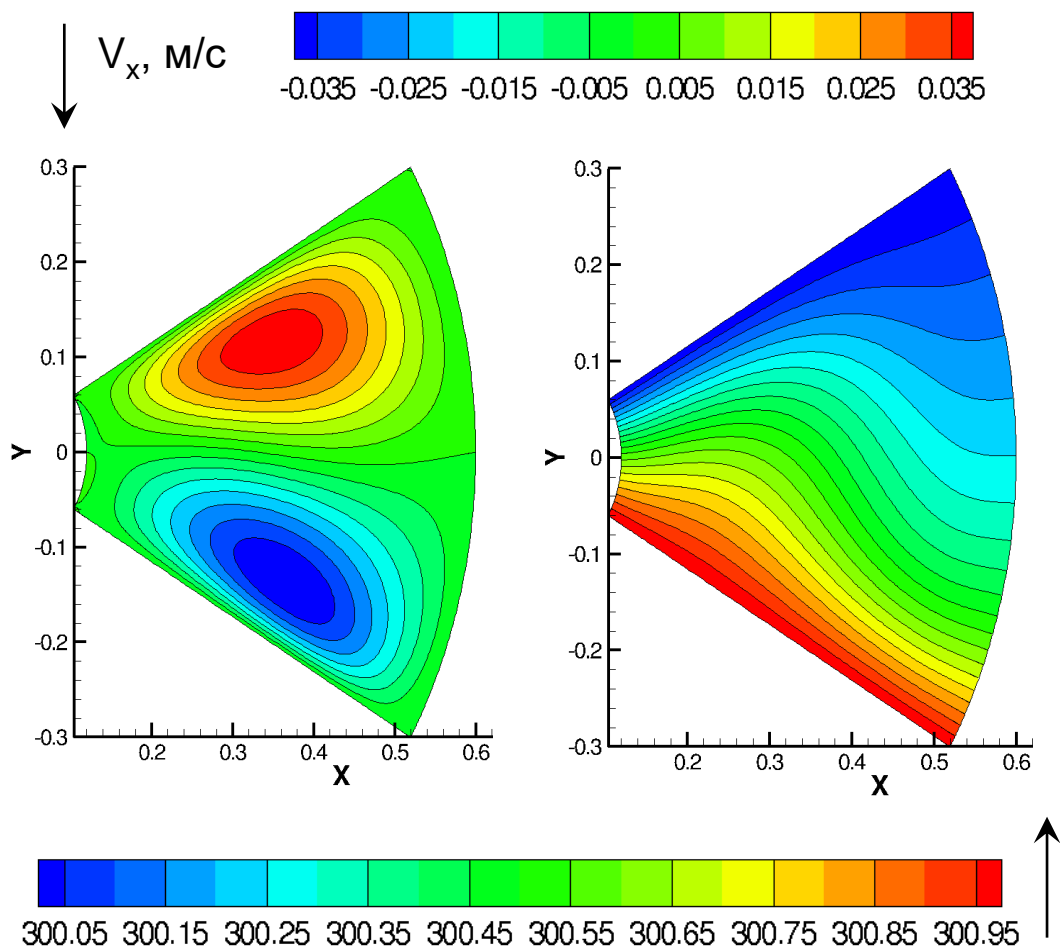
$$T_1 = 300 \text{ K} \quad R_1 = 0.6 \text{ м} \quad P_1 = 100000 \text{ Па}$$

$$T_2 = 301 \text{ K} \quad R_2 = 0.12 \text{ м} \quad \rho_1 = 1.16 \text{ кг / м}^3$$

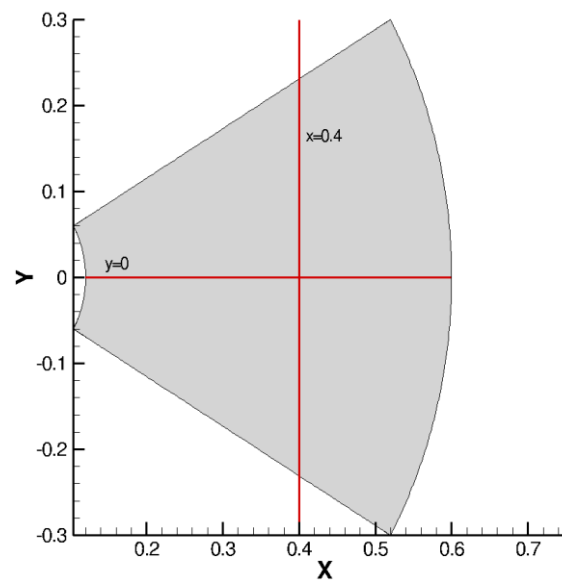
$$\omega = 10; 200; 1000 \text{ рад / с}$$

Верификационные и тестовые расчеты

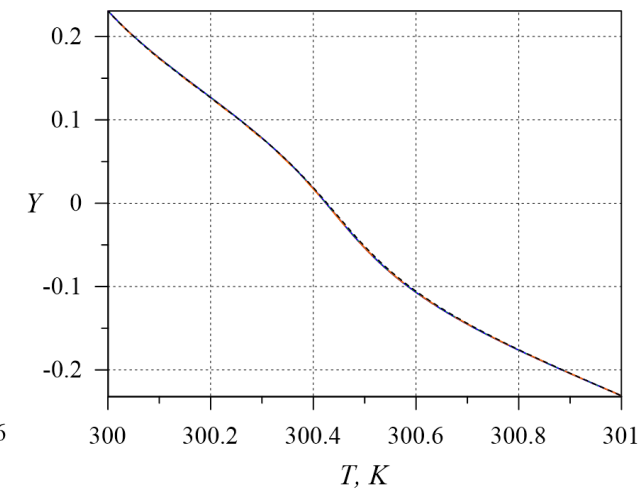
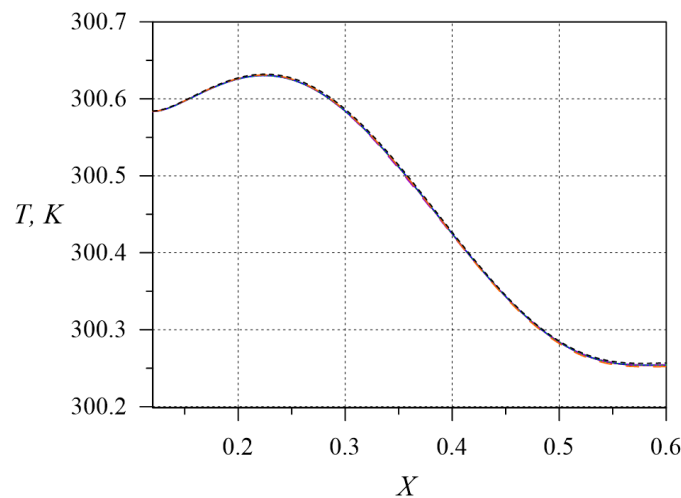
Тест 1. $\omega = 10 \text{ рад} / \text{с}$ $\frac{\omega^2 (R_2^2 - R_1^2)}{P_1} = 0.0003$



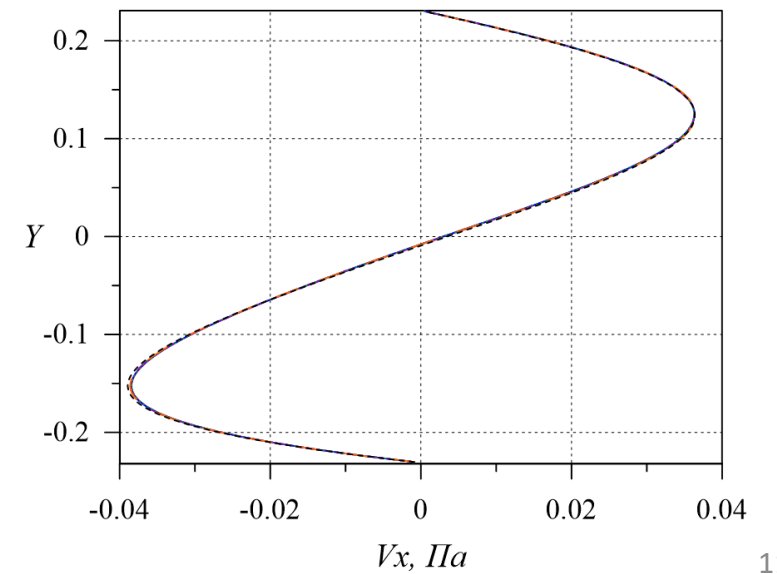
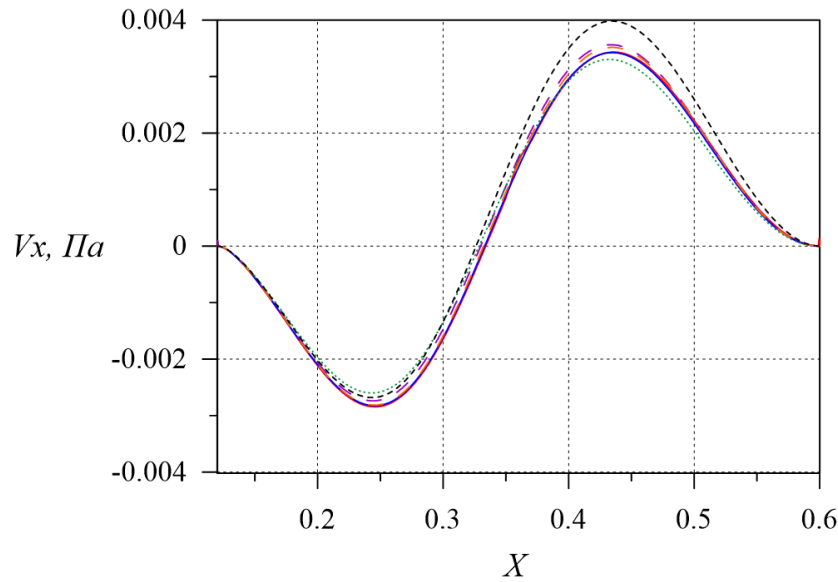
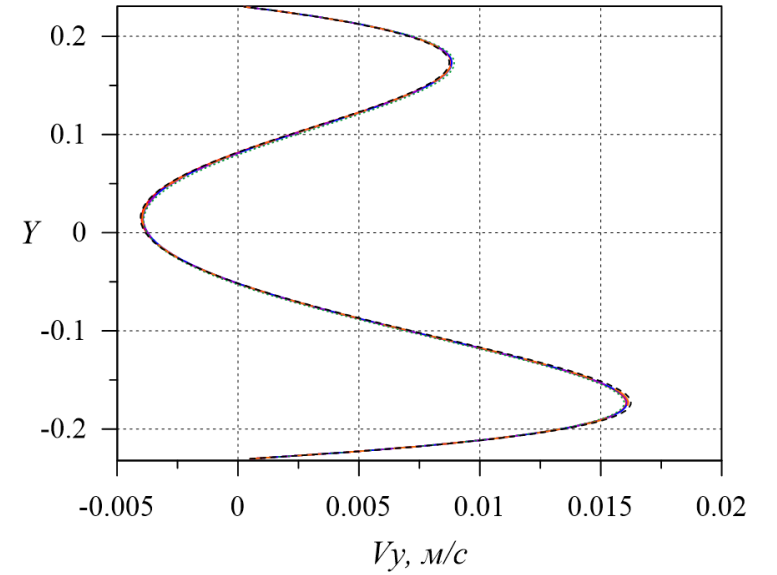
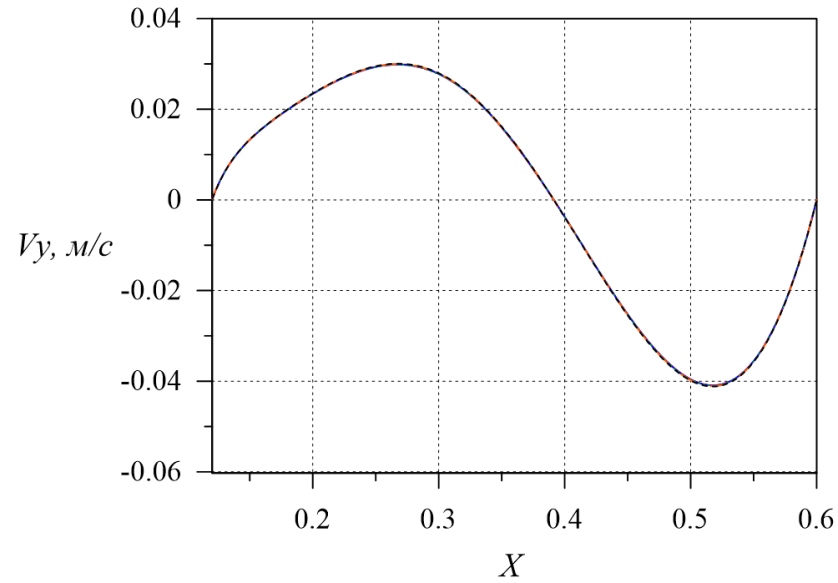
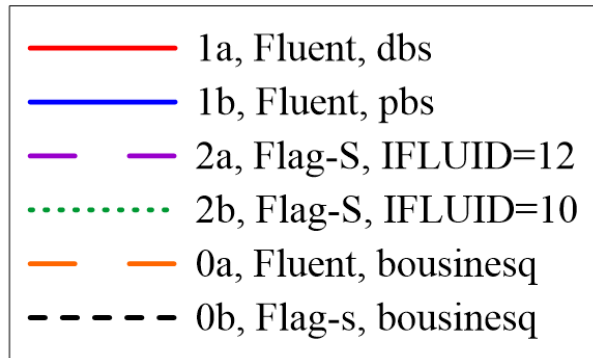
Распределение характеристик вдоль линий:



- 1a, Fluent, dbs
- 1b, Fluent, pbs
- 2a, Flag-S, IFLUID=12
- ... 2b, Flag-S, IFLUID=10
- 0a, Fluent, bousinesq
- - - 0b, Flag-s, bousinesq

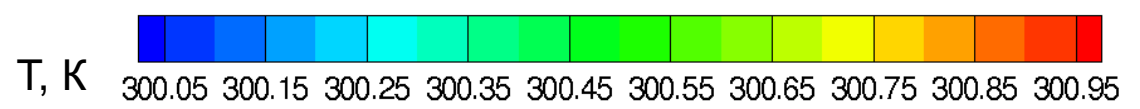
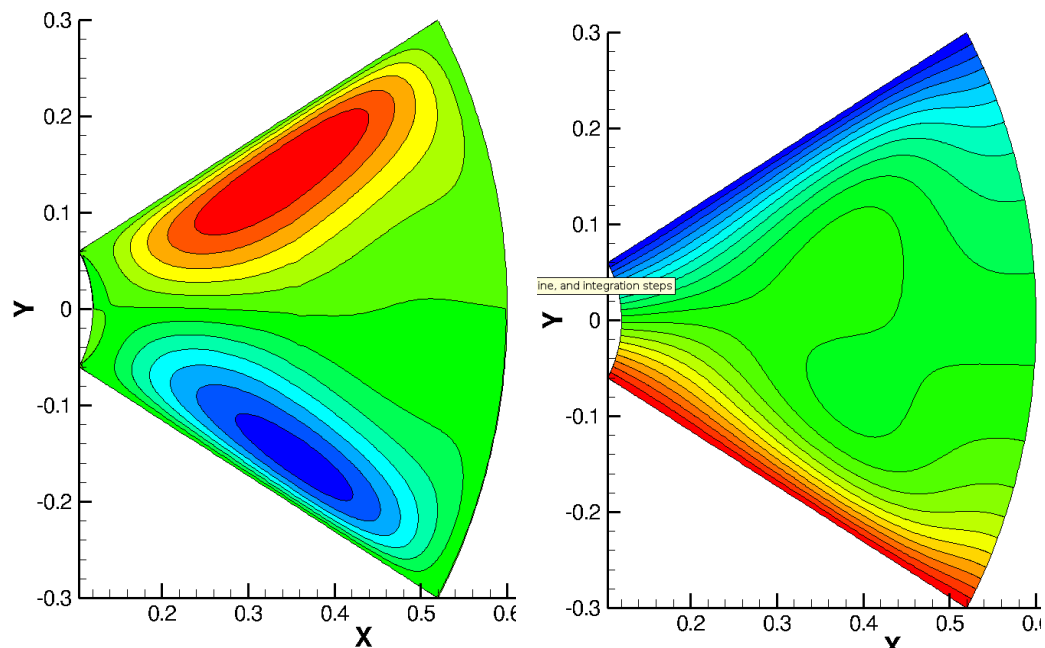
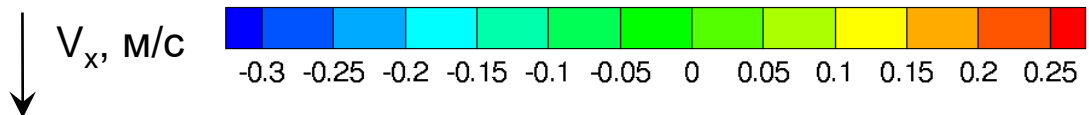


Верификационные и тестовые расчеты

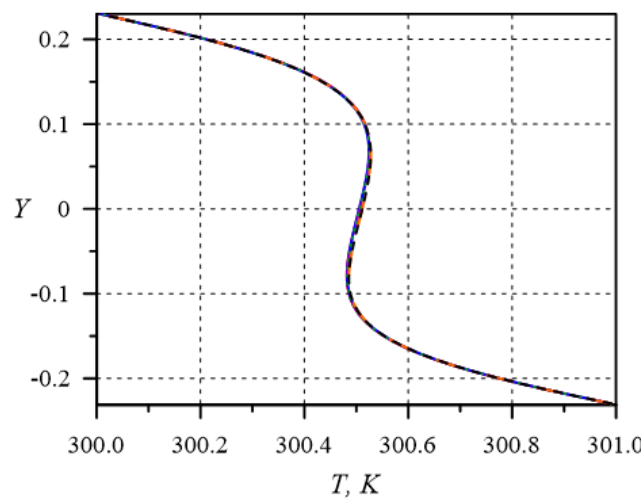
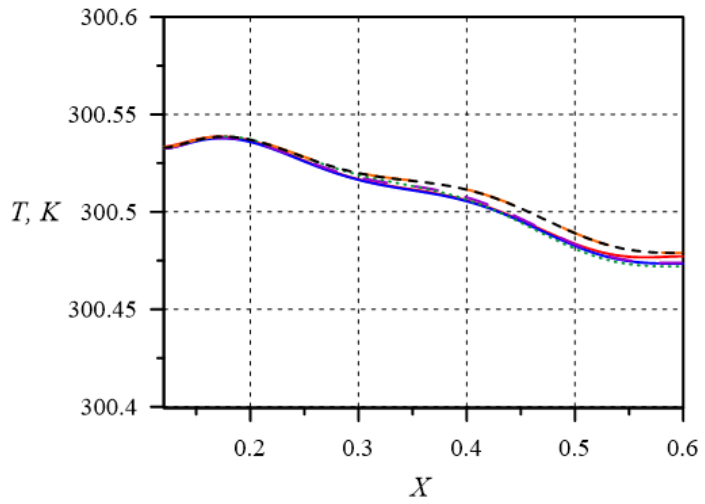


Верификационные и тестовые расчеты

Тест 2. $\omega = 200 \text{ рад/с}$ $\frac{\omega^2 (R_2^2 - R_1^2)}{P_1} = 0.14$

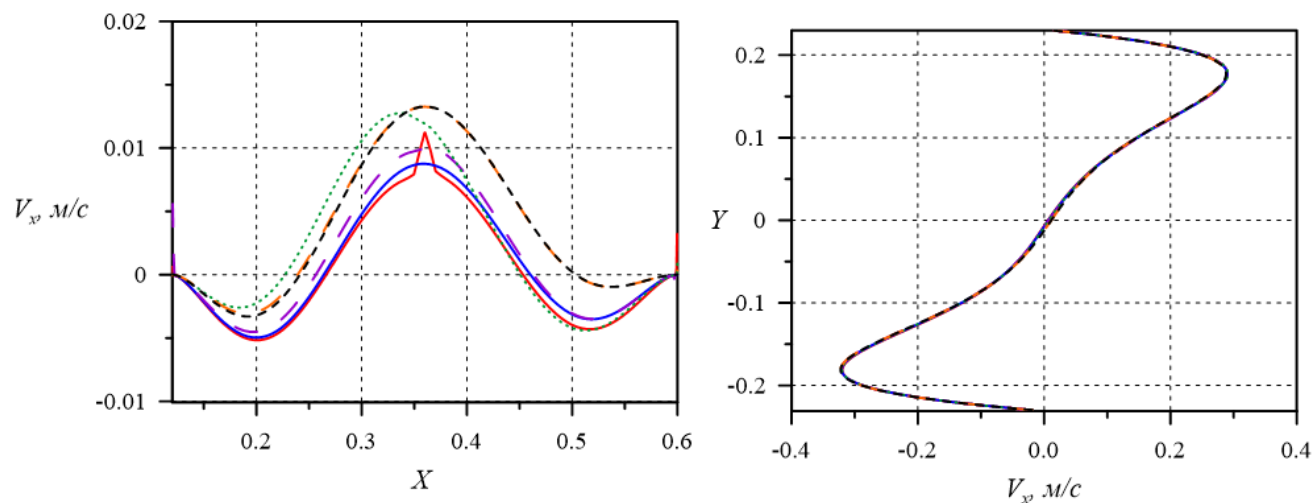
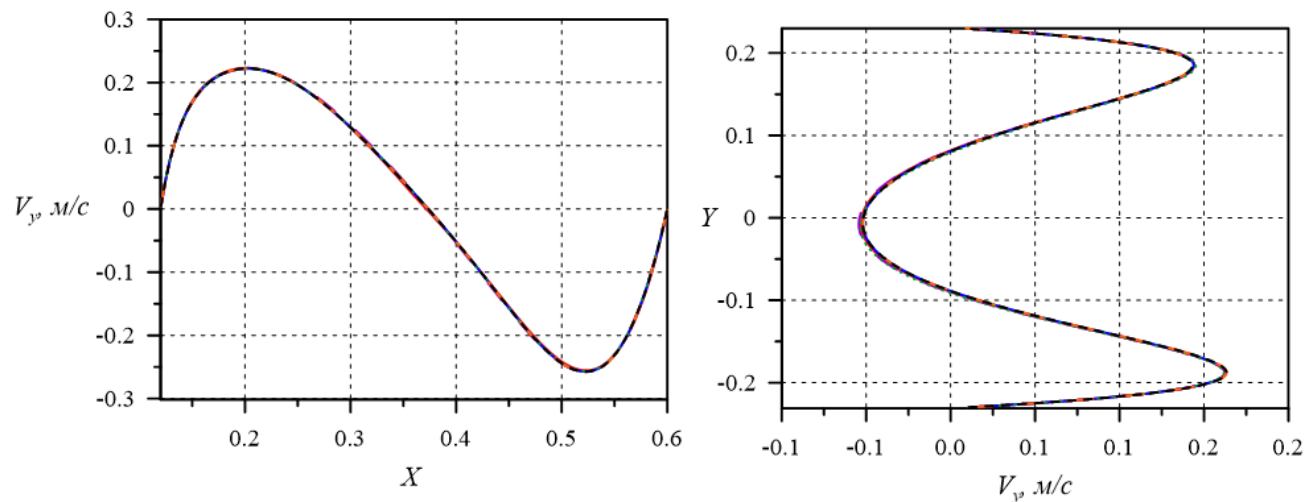


- 1a, Fluent, dbs
- 1b, Fluent, pbs
- 2a, Flag-S, IFLUID=12
- ⋯ 2b, Flag-S, IFLUID=10
- 3a, Flag-S, IFLUID=12, ph
- - - 3b, Flag-S, IFLUID=10, ph



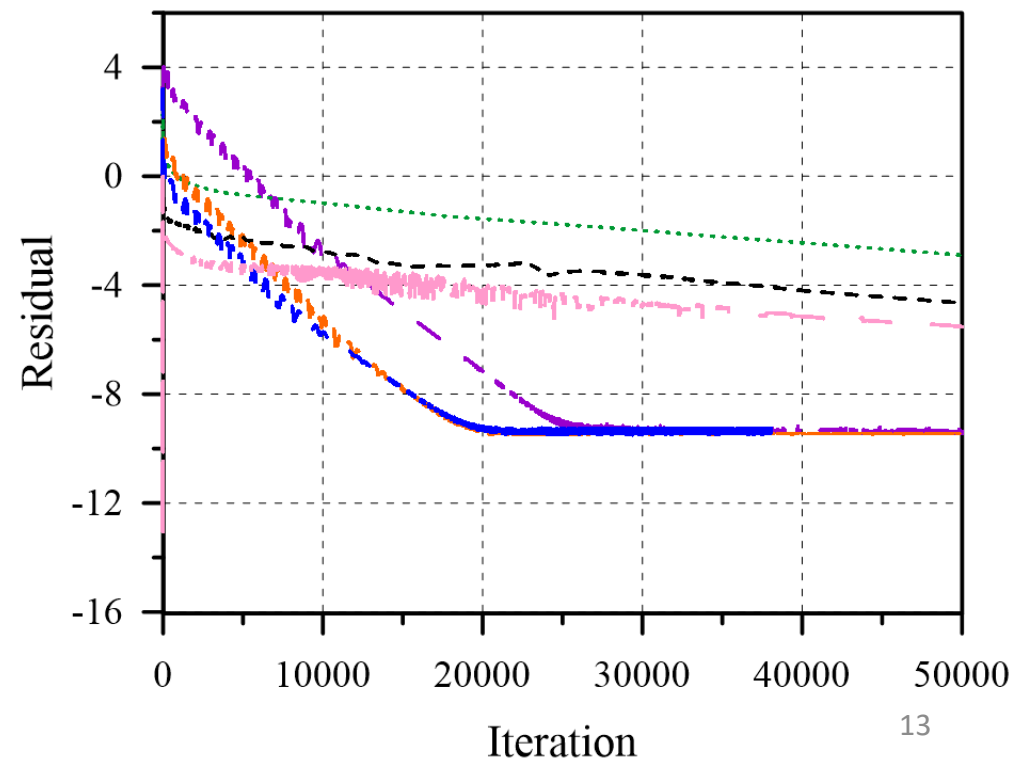
Верификационные и тестовые расчеты

— 1a, Fluent, dbs
— 1b, Fluent, pbs



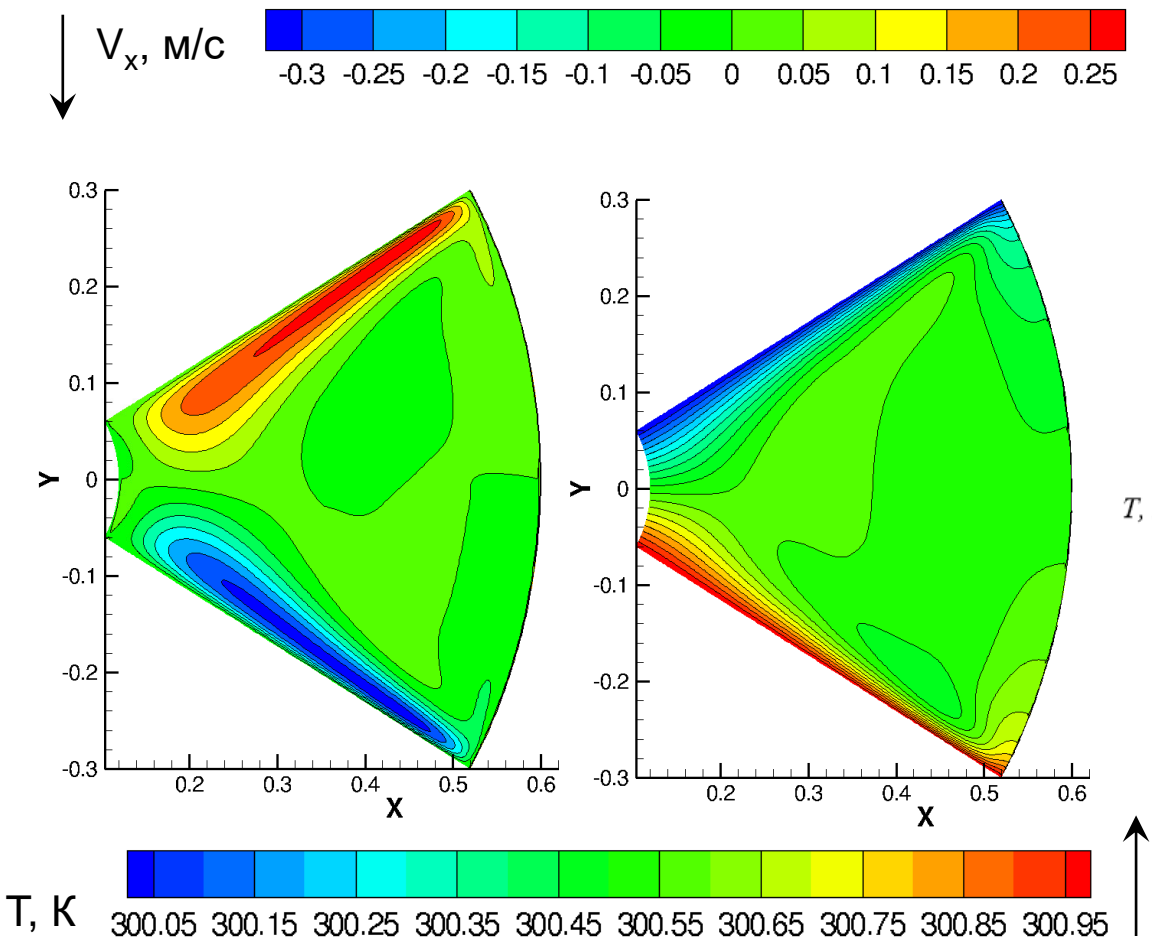
История сходимости

— Flag-S, IFLUID=12
- - - Flag-S, IFLUID=10
— Flag-S, IFLUID=12, ph, adiabatic
- - - Flag-S, IFLUID=10, ph, adiabatic
— Flag-S, IFLUID=10, ph, isothermal
— Flag-S, IFLUID=12, ph, isothermal

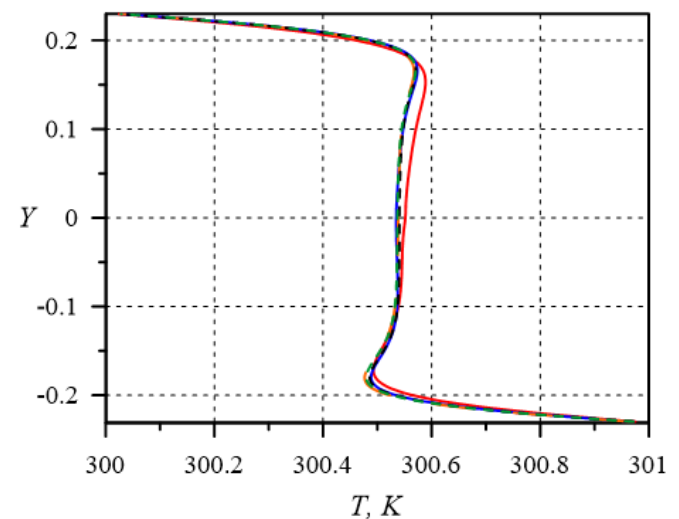
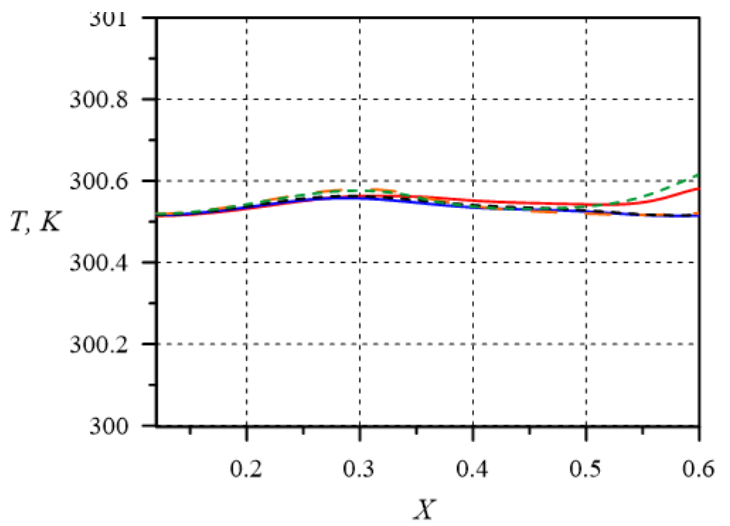


Верификационные и тестовые расчеты

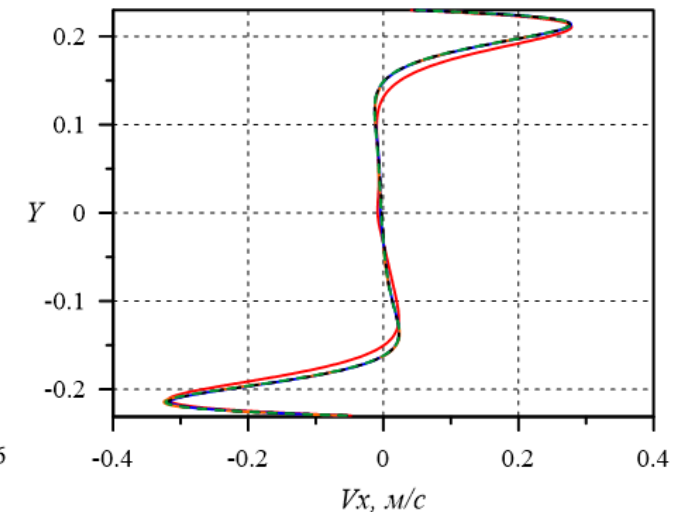
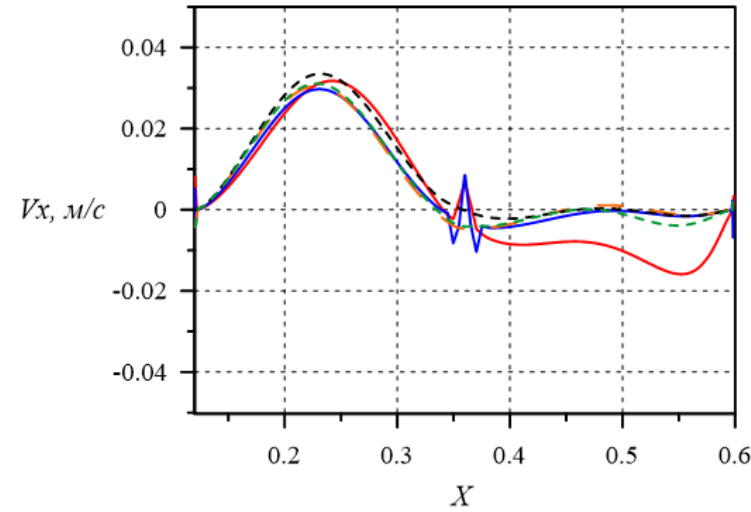
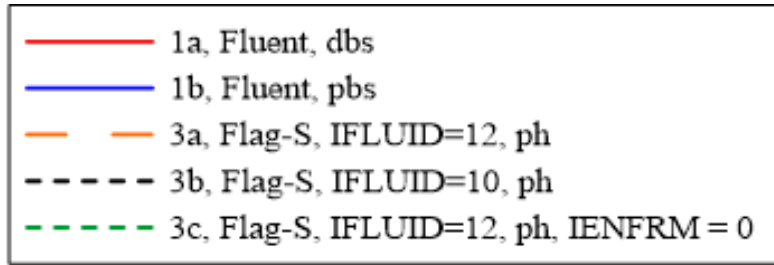
Тест 3. $\omega = 1000 \text{ рад/с}$ $\frac{\omega^2 (R_2^2 - R_1^2)}{P_1} = 3.45$



- 1a, Fluent, dbs
- 1b, Fluent, pbs
- 3a, Flag-S, IFLUID=12, ph
- 3b, Flag-S, IFLUID=10, ph
- 3c, Flag-S, IFLUID=12, ph, IENFRM = 0

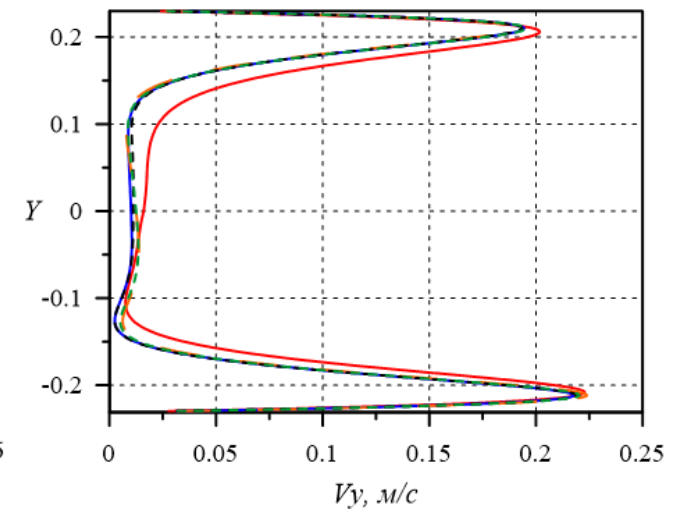
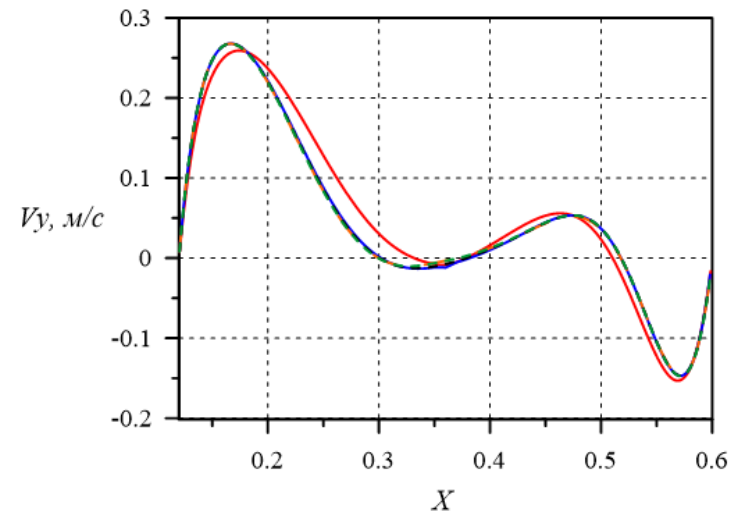


Верификационные и тестовые расчеты

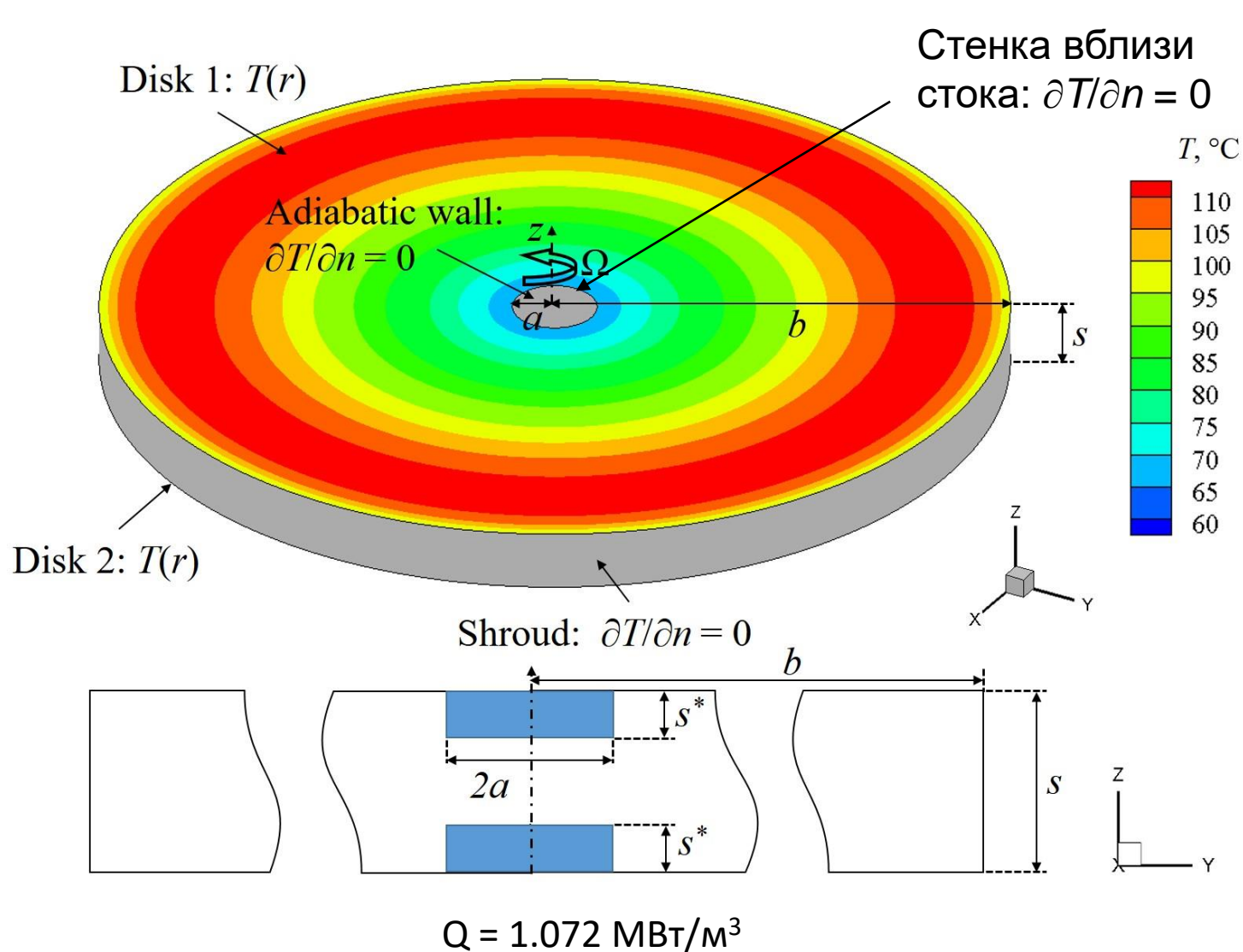


Учет силы Кориолиса и центробежной силы

- явная схема $CFL < 10$
- неявная схема $CFL > 30$



Модельная задача о турбулентной свободной конвекции в обогреваемой быстро вращающейся междисковой полости с приосевым объемным стоком тепла



Геометрические
параметры:

$$s/b = 0.13$$

$$a/b = 0.09$$

$$s^*/s = 0.30$$

$$(b = 0.485 \text{ м})$$

Число Прандтля

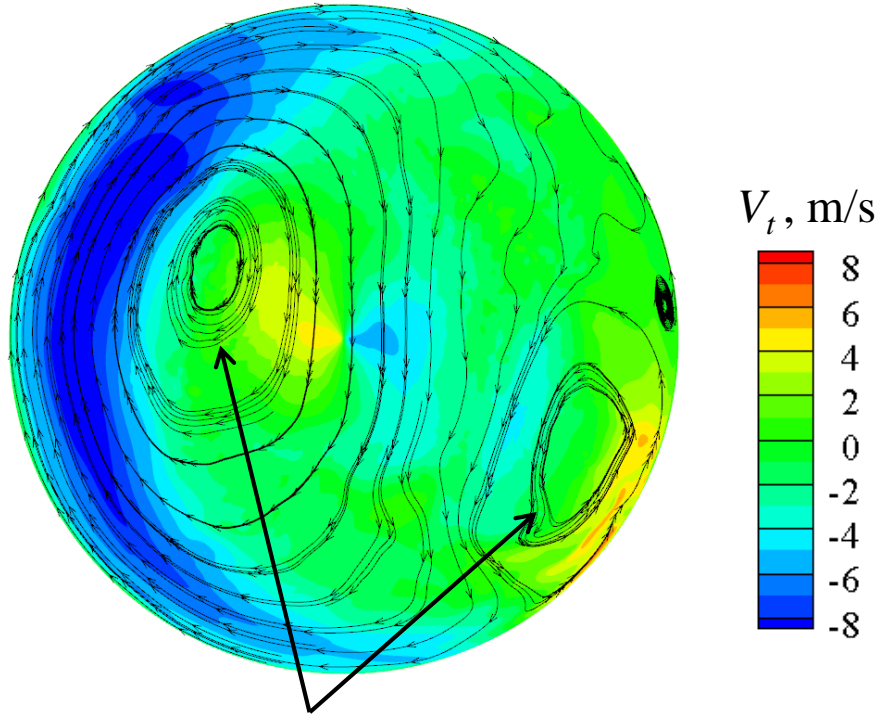
$$\text{Pr} = 0.71$$

Вращательное число
Рейнольдса

$$\text{Re}_\varphi = 2 \cdot 10^6 \quad (\Omega = 128 \text{ рад/с})$$

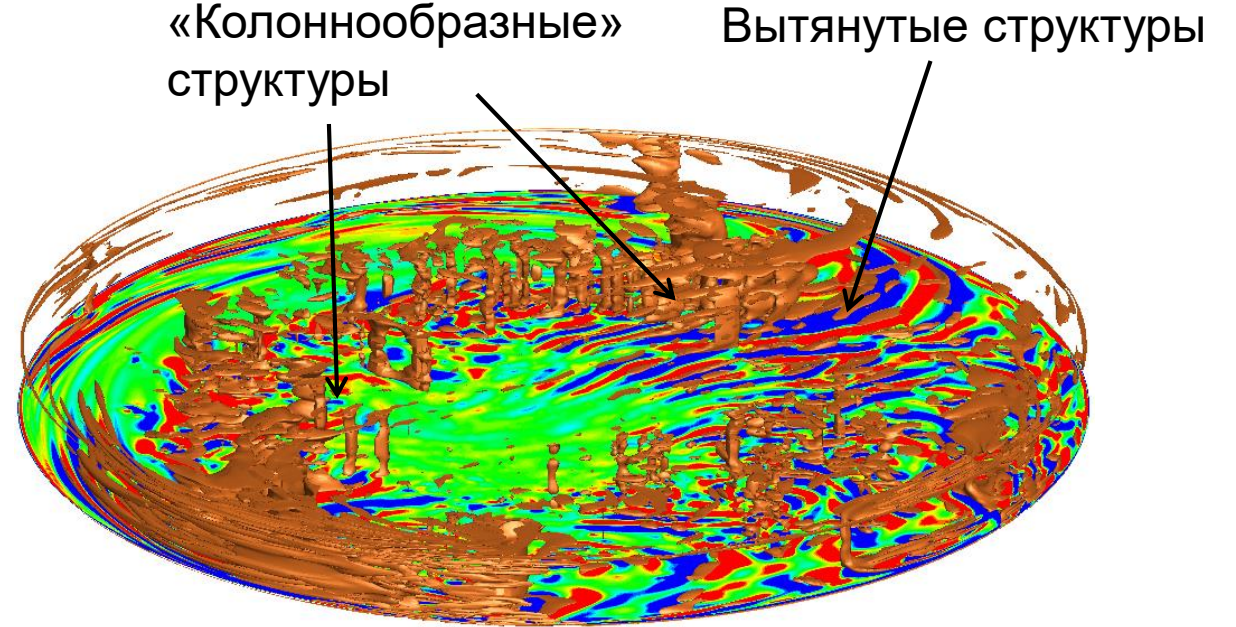
Структура течения

Распределение тангенциальной скорости в центральной междисковой плоскости

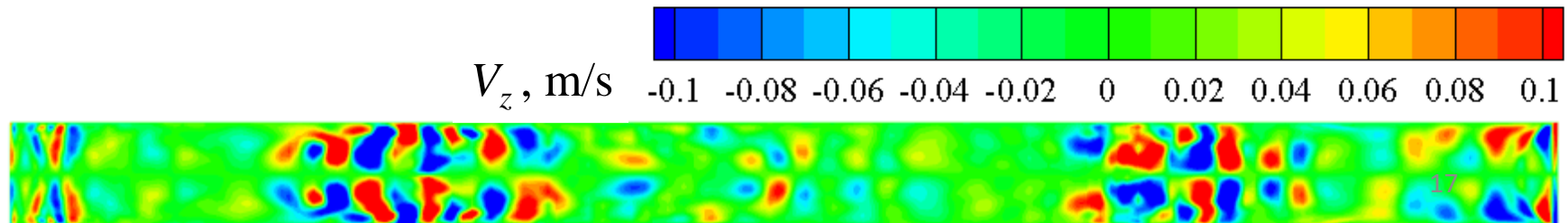


Крупномасштабные (циклонический и антициклонический) вихри

Изоповерхность Q-критерия и поле осевой скорости на расстоянии 3 мм от диска

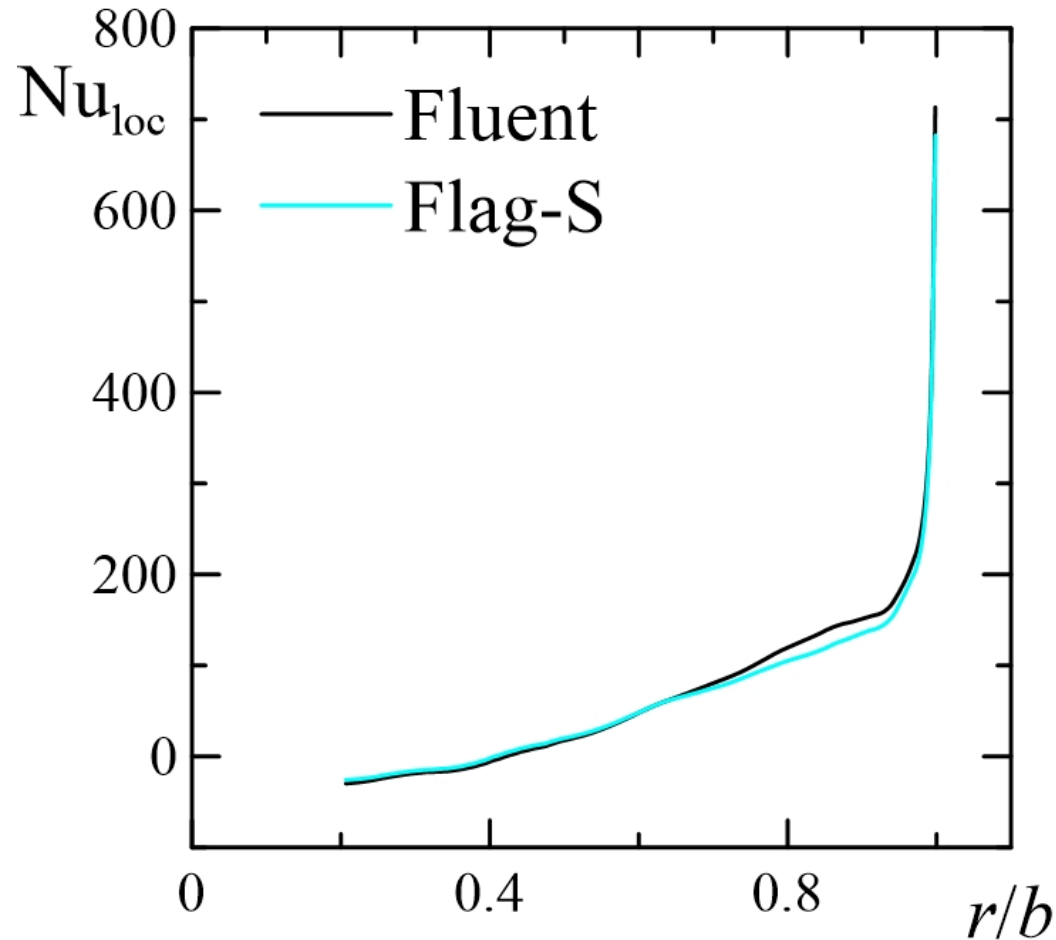


Распределение осевой скорости в центральном аксиальном сечении



Сопоставление SINF/Flag-s и ANSYS Fluent

Радиальное распределение локального числа Нуссельта, осредненного по времени



$$\Delta T = \langle T \rangle_{диск} - \langle T \rangle_{ядро}$$

$$Nu_{loc} = \langle q \rangle_{\varphi,t} r / (\Delta T \lambda)$$

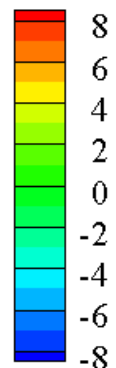
Сопоставление SINF/Flag-s и ANSYS Fluent

Центральная плоскость, тангенциальная скорость: 10 мм от стенки ($z/s = 0.35$), осевая скорость:

ANSYS Fluent

SINF/Flag-S

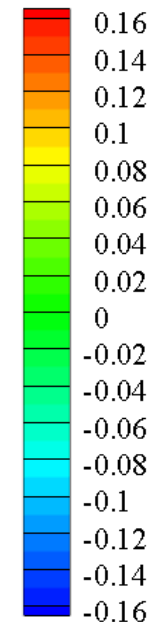
V_t , m/s



ANSYS Fluent

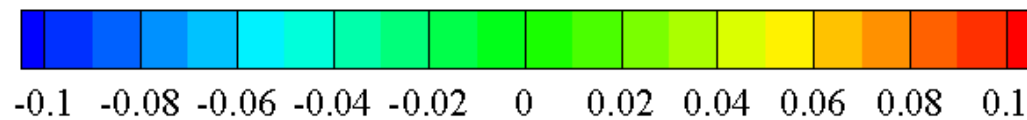
SINF/Flag-S

V_z , m/s

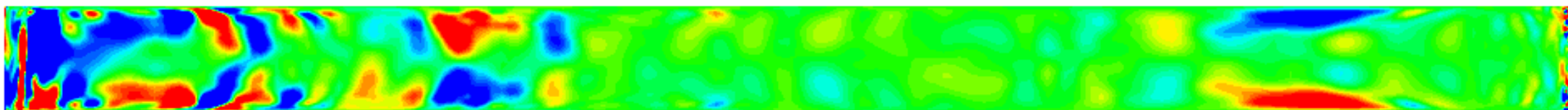


Центральная плоскость, осевая скорость:

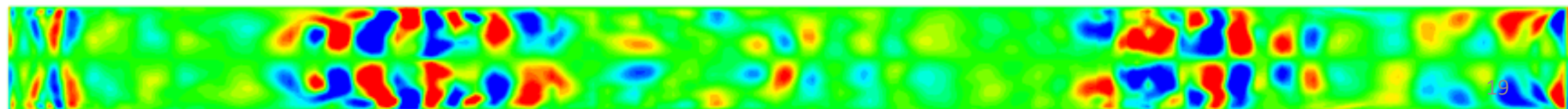
V_z , m/s



ANSYS Fluent

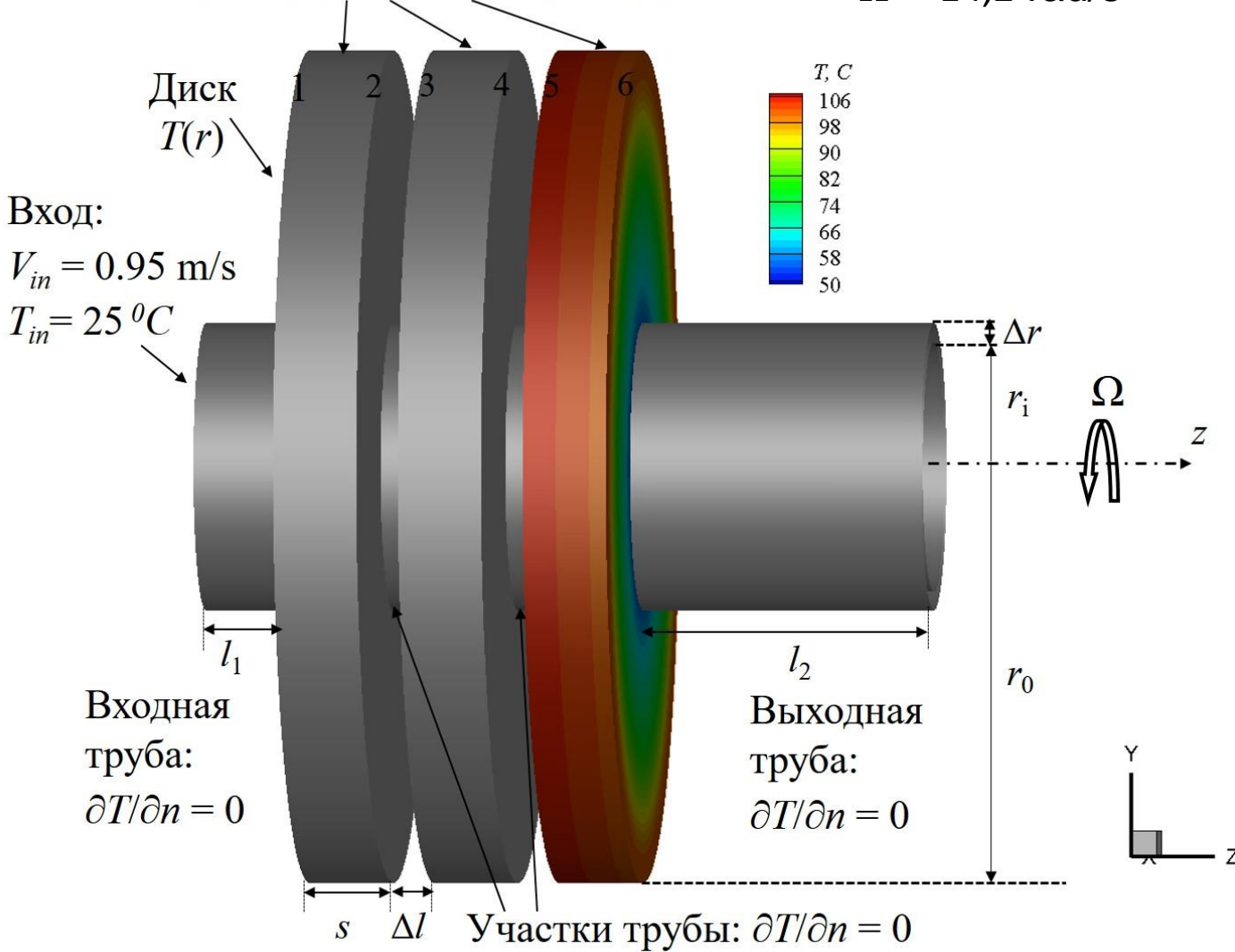


SINF/Flag-S



Турбулентная смешанная конвекция в системе из трех быстровращающихся обогреваемых кольцевых полостей с транзитным осевым потоком

Кожух: $T(z)$ – линейное распределение $\Omega = 14,2 \text{ rad/s}$



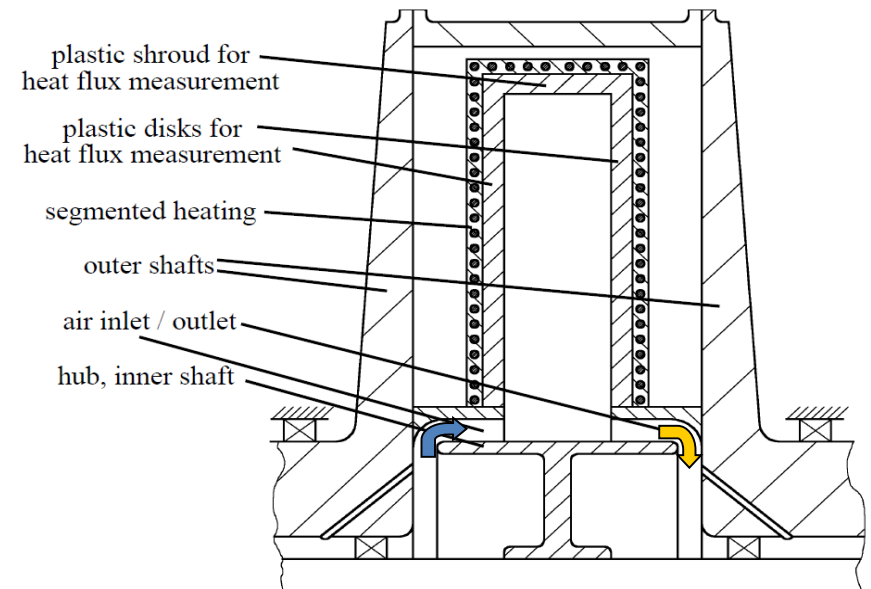
Условия взяты из эксперимента для одиночной полости (Bohn et al, 2000)

$$Re_\Omega = \Omega r_0^2 / \nu = 2 \cdot 10^5$$

$$Re_z = 2 r_i W_{in} / \nu = 2 \cdot 10^4$$

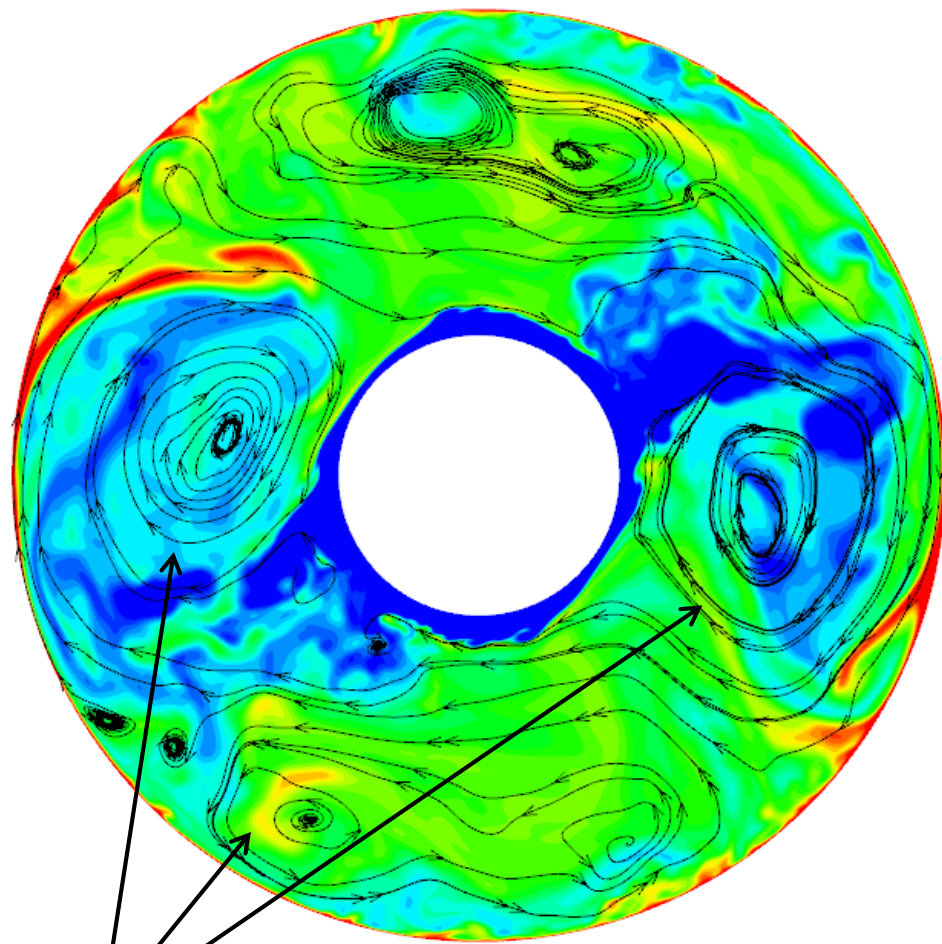
$$Ro = W_{in} / \Omega r_i = 0.56$$

$$\varepsilon_T = \beta \Delta T = 0.24$$

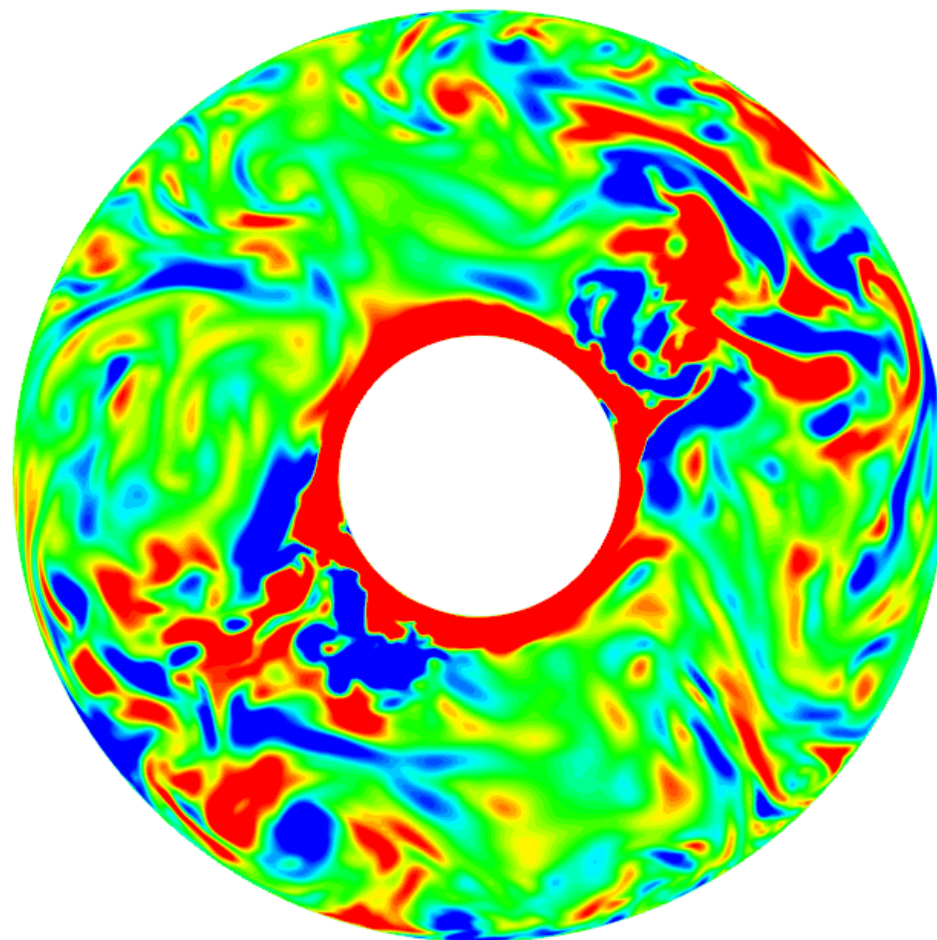
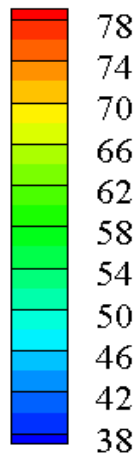


Структура течения

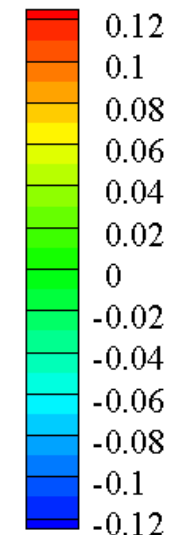
Мгновенные поля температуры и осевой скорости в центральной междисковой плоскости (между первыми двумя дисками)



T [°C]

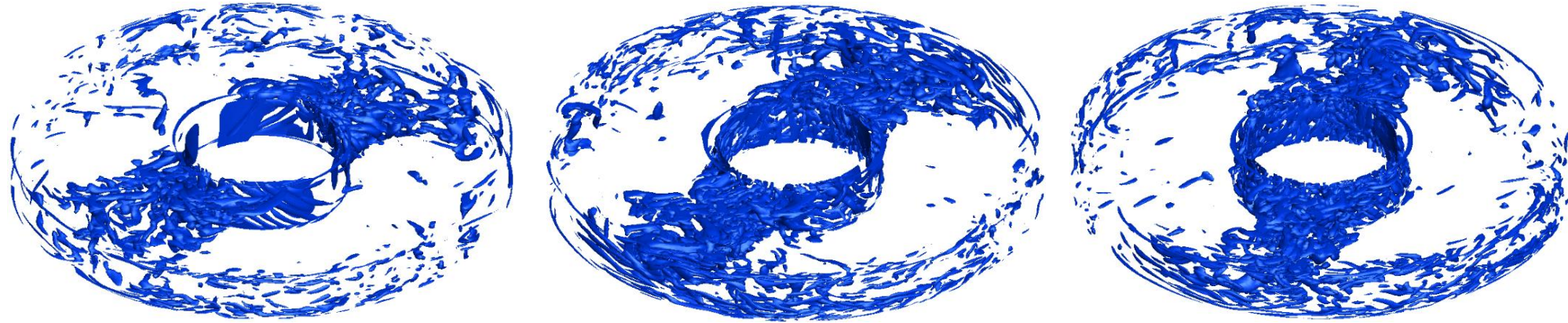


V_z [m/s]

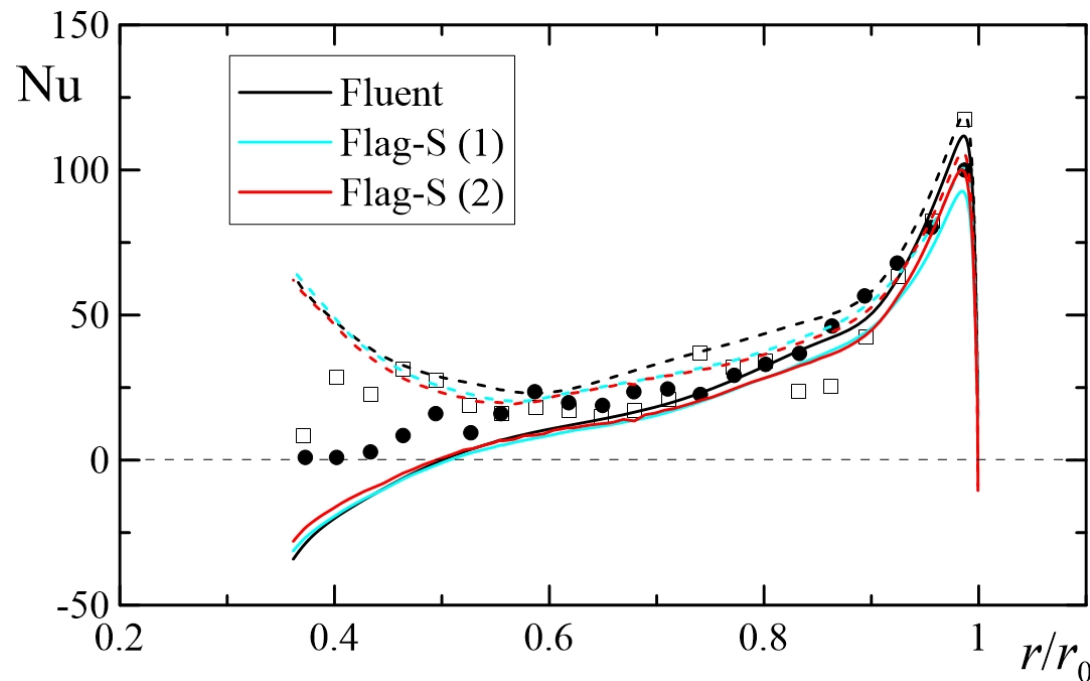


Крупномасштабные вихри

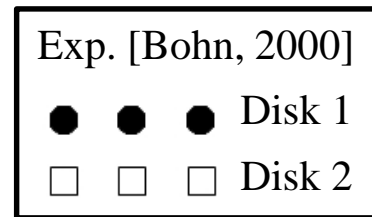
Сопоставление SINF/Flag-s и ANSYS Fluent



**Изоповерхности
Q-критерия в трех
междисковых
полостях
(SINF/Flag-S)**



**Радиальные
изменения
локального числа
Нуссельта на
поверхностях диска**



Flag-S (1) – расчет по “Simple”-подобному алгоритму

Flag-S (2) – расчет по модели существенно сжимаемого газа

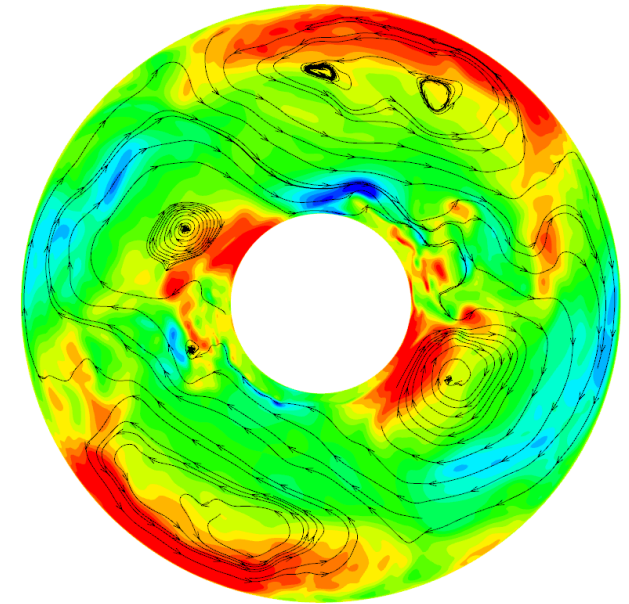
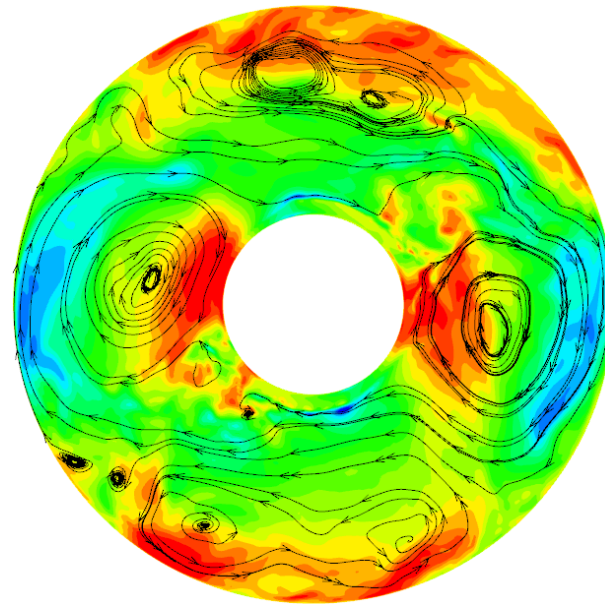
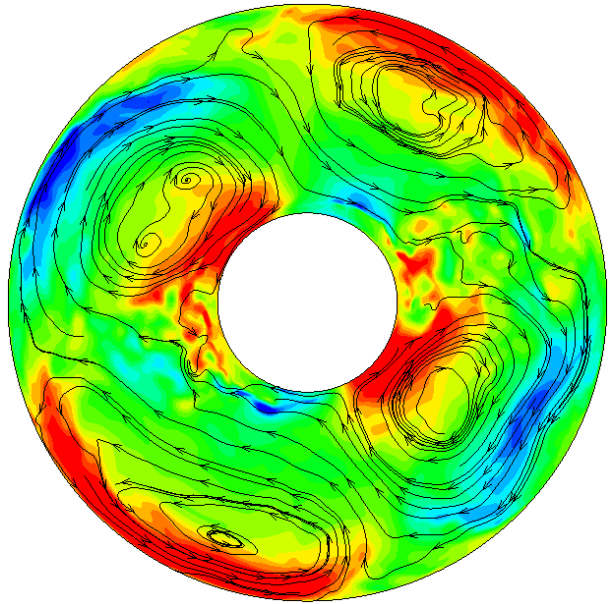
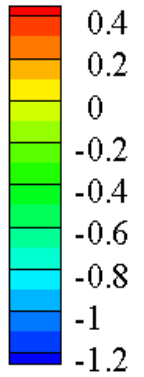
Сопоставление SINF/Flag-s и ANSYS Fluent

ANSYS Fluent

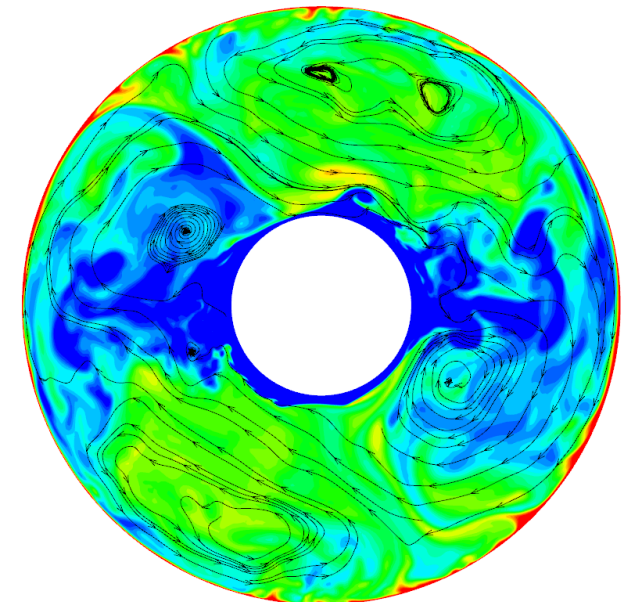
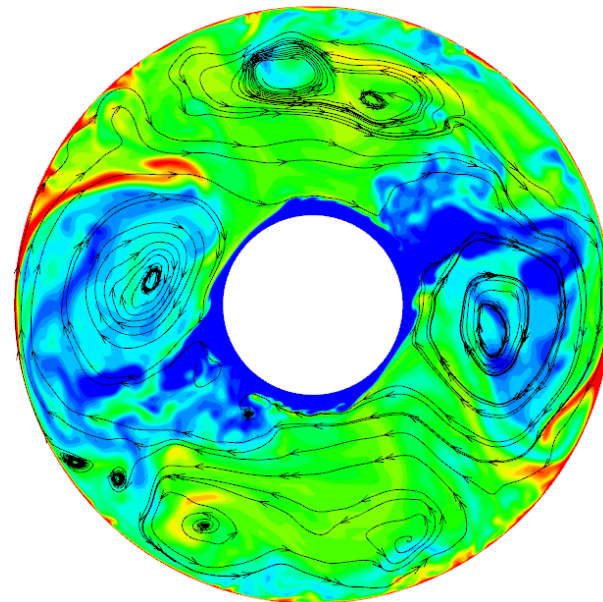
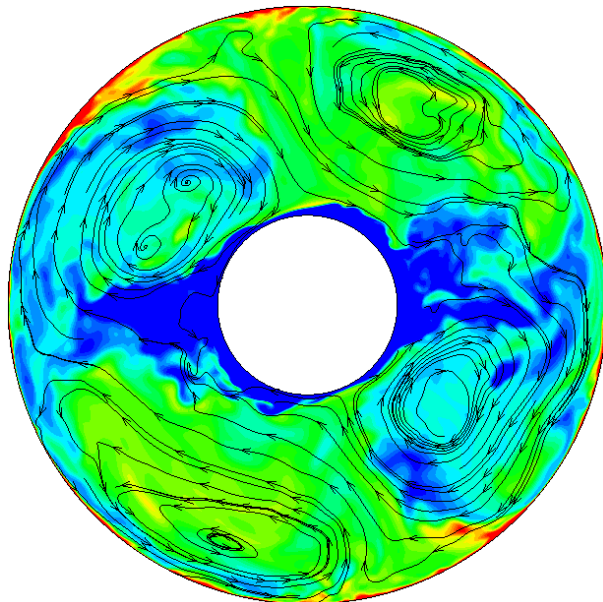
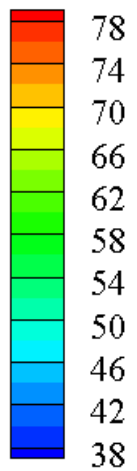
SINF/Flag-S (1)

SINF/Flag-S (2)

V_t [m/s]



T [°C]



Заключение

- В коде SINF/Flag-S реализован учёт центробежной и Кориолисовой сил во вращающейся системе координат, как на базе SIMPLE-подобного алгоритма (для слабосжимаемого газа), так и в случае использования алгоритма для расчёта сжимаемых течений газа в широком диапазоне чисел Маха.
- Разработанные алгоритмы успешно верифицированы на ряде простых тестовых задач путём сопоставления с результатами, получаемыми при помощи пакета ANSYS Fluent.
- Проведены расчёты турбулентной конвекции в быстро вращающихся полостях. Результаты сопоставлены с аналогичными расчётами, проведёнными в ANSYS Fluent, а также с имеющимися экспериментальными данными. Получено приемлемое согласие.

Планы на будущее

- Апробация реализованных подходов при расчетах низкоскоростных неизотермических течений газа в интенсивных полях массовых сил в условиях сопряженного теплообмена.
- Развитие возможностей кода SINF/Flag-S для расчета сложных течений реального газа, в частности, течений влажного пара, и соответствующая адаптация численных схем и алгоритмов.

Спасибо за внимание!