

VIII Российская конференция
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
В АЭРОАКУСТИКЕ И АЭРОДИНАМИКЕ



20—25 сентября 2021 г., ГЕЛЕНДЖИК



ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ОБТЕКАНИИ ВЯЗКИМ ГАЗОМ ОБЛАСТИ СОЧЛЕНЕНИЯ ПЛАСТИНЫ И ЗАТУПЛЕННОГО РЕБРА

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

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

Физико-механический институт

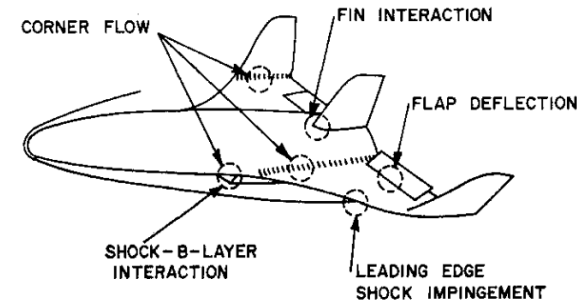


Вязко-невязкое взаимодействие в трехмерных течениях с подковообразными вихревыми структурами

Натекание потока на препятствие, установленное на обтекаемой поверхности

Задачи высокоскоростных летательных аппаратов

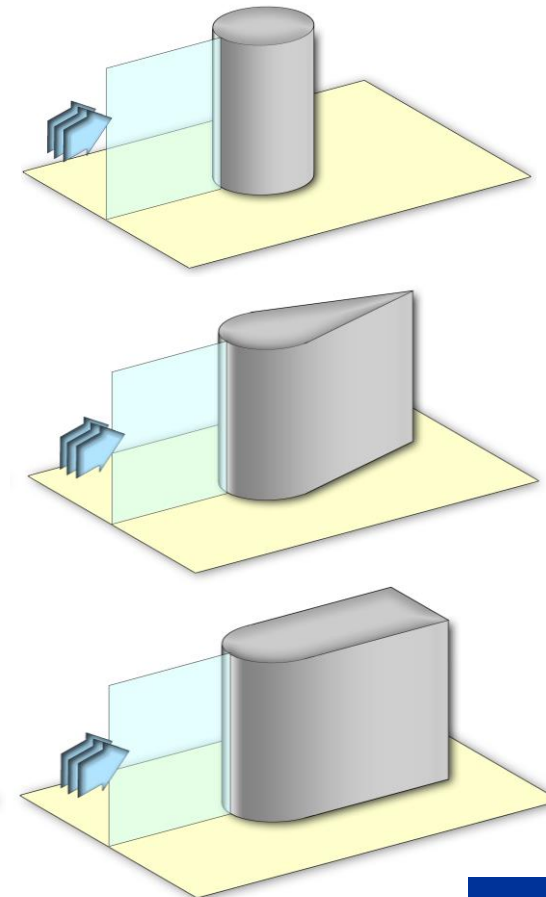
- конструирование элементов летательных аппаратов: соединения фюзеляжа и крыла, хвостового оперения и других элементов



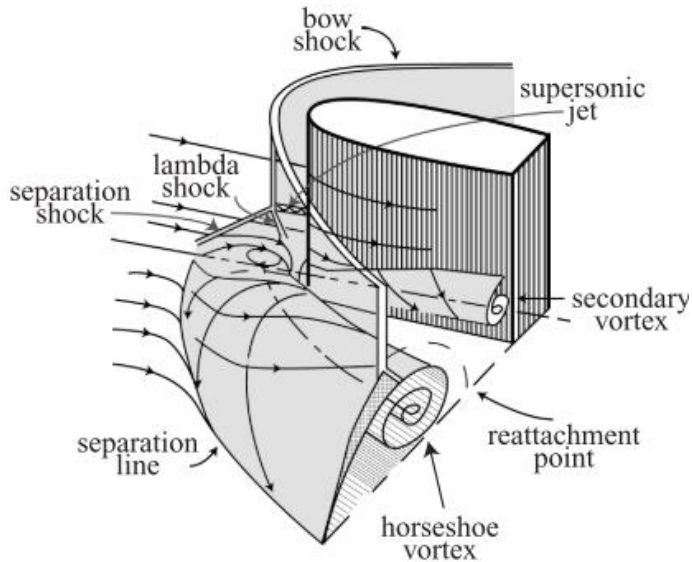
Актуальность и практическая значимость

- правильное предсказание характеристик теплообмена
- получение новых данных о структуре вязко-невязкого взаимодействия
- получение данных о динамических нагрузках на элементы конструкции

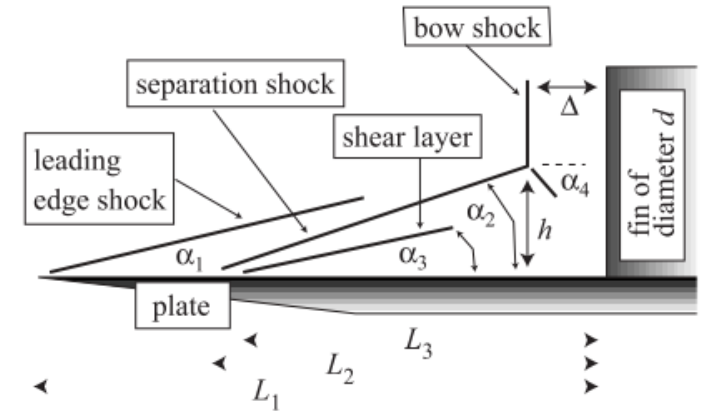
Модельные конфигурации



Натекание сверхзвукового потока на препятствие, установленное на обтекаемой поверхности



- существенно трехмерная структура потока
- протяженная отрывная область
- система подковообразных вихрей
- область сложного ударно-волнового взаимодействия
- сильно неоднородное распределение теплового потока в области перед обтекаемым телом



Войтенко Д.М., Зубков А.И., Панов Ю.А. Обтекание цилиндрического препятствия на пластине сверхзвуковым потоком газа // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1966. – № 1. – С. 121.

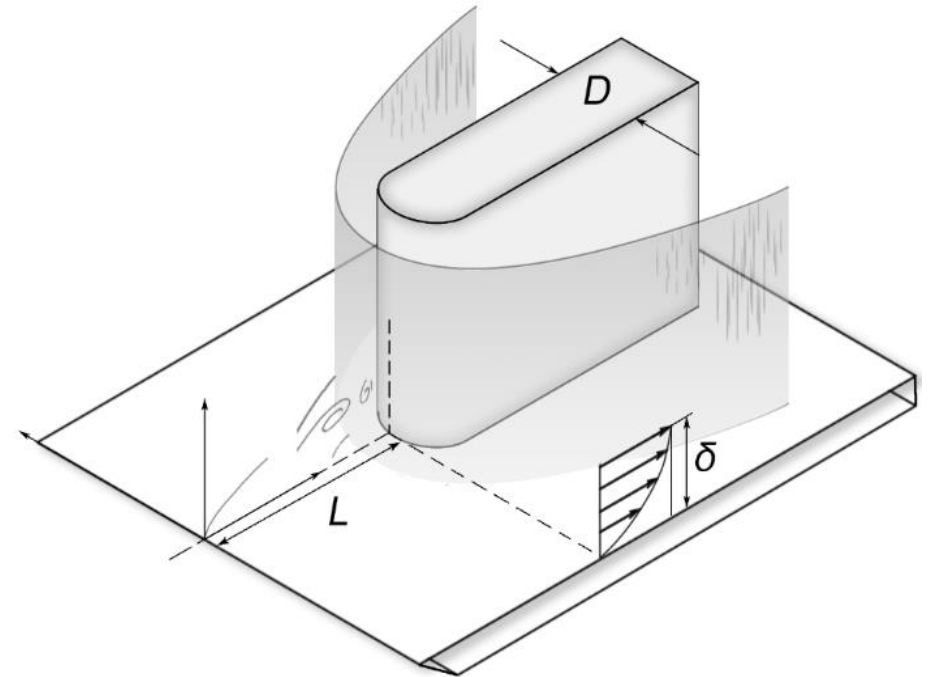
Адуевский В.С., Медведев К.И. Физические особенности течения в области отрыва при трехмерном взаимодействии пограничного слоя с ударной волной // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. – 1967. – № 1

Боровой В.Я., Рыжкова М.В. Теплообмен на пластине и конусе при трехмерном взаимодействии пограничного слоя с ударной волной, образующейся вблизи цилиндрического препятствия // Аэродинамическое нагревание при гиперзвуковых скоростях потока. Труды ЦАГИ, – 1972

Сверхзвуковое ламинарное обтекание затупленного ребра

За последние десятилетия достигнут большой прогресс как в экспериментальных, так и в численных исследованиях трёхмерного сверхзвукового обтекания установленных на пластине различных препятствий, однако и на данный момент остается множество вопросов, требующих более детального изучения.

- Структура вязко-невязкого взаимодействия определяется большим числом параметров задачи
- Возникновение нестационарных автоколебательных режимов течения при изменении определяющих параметров является малоизученной областью
- Для корректного моделирования рассматриваемого класса течений необходим численный метод, который позволяет достаточно точно и аккуратно разрешить все особенности сложного течения



Код SINF/Flag-S (Fluids and gases – Simulations)

Общая характеристика

- Метод конечных объемов
- Неструктурированные многоблочные сетки с ячейками произвольной топологии
- Регулярная стыковка на межблочных границах
- Параллелизация на основе MPI, для декомпозиции сетки используется библиотека ParMetis
- Система контроля версий Mercurial

Решаемые классы задач

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

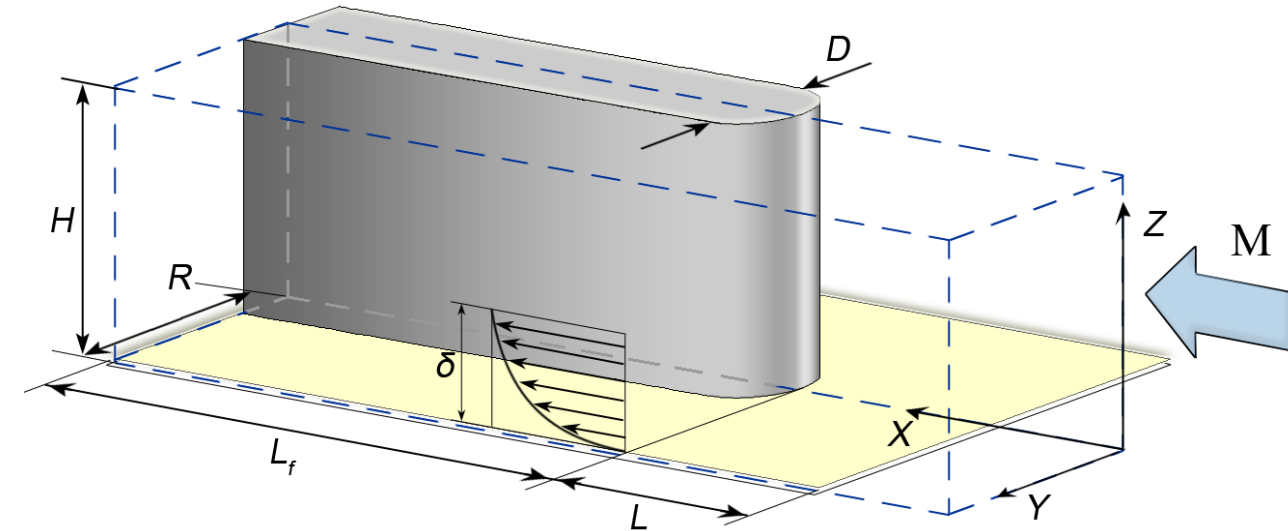
Расширенная версия SINF/Flag-S: течения вязкого газа при разных M

«Универсальный» солвер: расчеты течений сжимаемого газа в широком диапазоне чисел Маха на основе единого подхода



Постановка задачи

Расчетная область



Определяющие параметры

Число Рейнольдса и число Маха набегающего потока $Re_D = \frac{\rho_\infty V_\infty D}{\mu_\infty} \quad M_\infty > 1$

Геометрический фактор L/D

Свойства среды (воздух) $Pr = 0.7 \quad \gamma = c_p/c_V = 1.4$

Температурный фактор T_w/T_∞

Граничные условия

① – условие прилипания

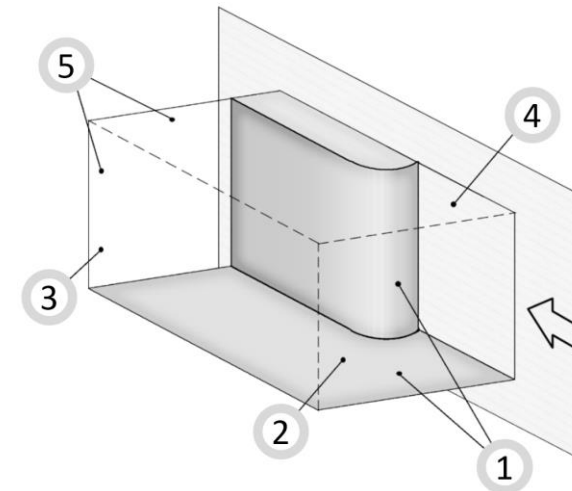
$$T_w = const$$

③ – выходная граница

② – входная граница

④ – условие симметрии

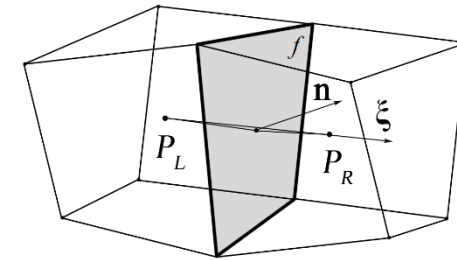
⑤ – «гибридные»
неотражающие граничные
условия



Численный метод для расчета течений сжимаемого газа

Схемы расчета конвективных потоков

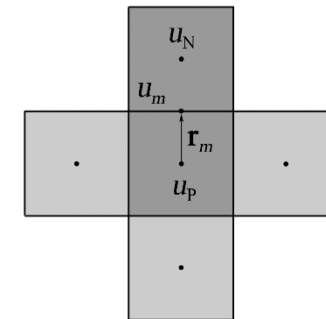
- **HLL, HLLC, ROE, Godunov, AUSM, AUSM+, AUSM+-up, AUSMD, SLAU**



Схемы второго порядка точности

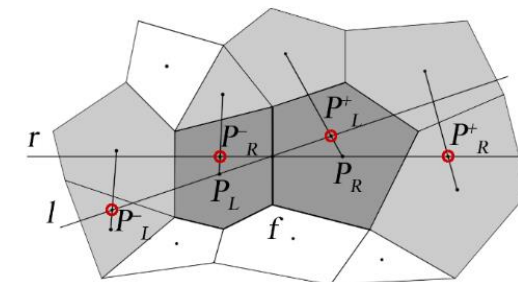
Кусочно-линейное распределение переменных в ячейке (**MUSCL** подход)

- скалярные ограничители
- **TVD схемы второго порядка точности (обобщение на неструктурированные сетки*)**



Трехслойная схема «разностью назад»

- Неявная схема в приращениях



*) C. le Touse, A. Murrone, and H. Guillard, Multislope MUSCL method for general unstructured meshes // J. Comput. Phys. 284, 389–418 (2015).

Бахвалов П.А., Козубская Т.К. Схема с квазиодномерной реконструкцией переменных, определенных в центрах элементов трехмерной неструктурированной сетки // Матем. моделирование. – 2016. – Т. 28. № 3. – С. 79–95.

Расчетно-экспериментальное исследование Tutty et al (2013)*

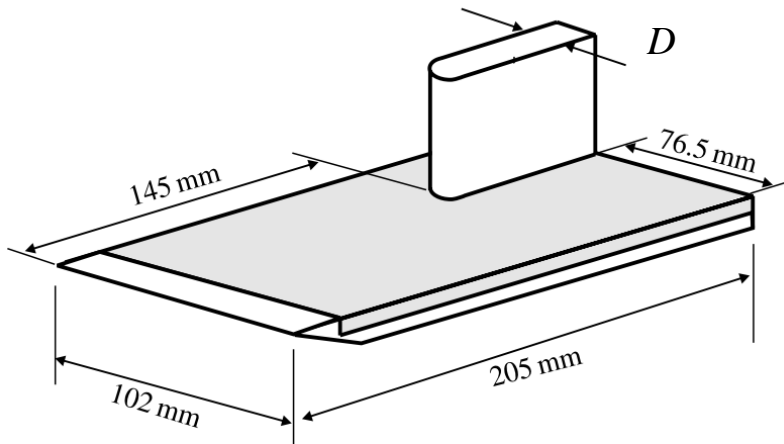
$$M_\infty = 6.7 \quad T_w/T_\infty = 4.75$$

$$Pr = 0.7 \quad \gamma = c_p/c_v = 1.4$$

$$L_{plate} = 145 \text{ (mm)}$$

$$D = 2.5 \text{ mm}; 5 \text{ mm}; 7.5 \text{ mm}$$

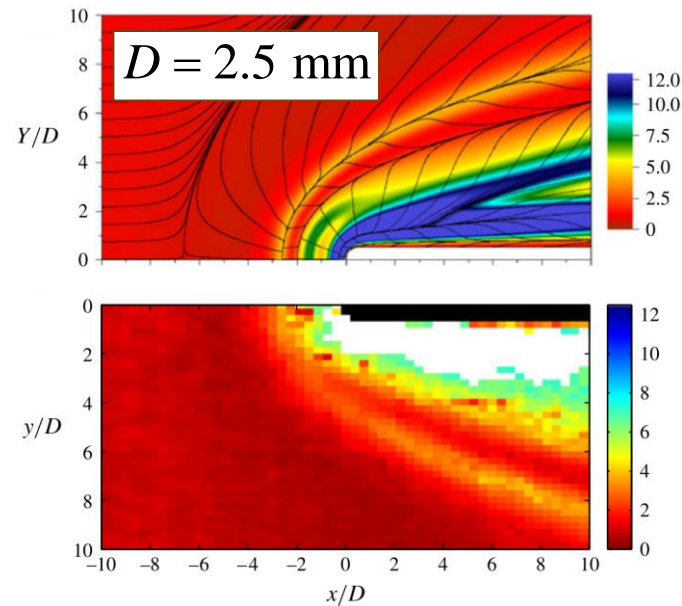
$$Re_D = 1.25 \cdot 10^4; 2.5 \cdot 10^4; 3.75 \cdot 10^4$$



- Шлирен-метод
- Жидкокристаллическая термография
- Масло-сажевая визуализация течения

- Схема HLLC (HS) 2-го порядка точности
- MUSCL, TVD (minmod)
- Метод Рунге-Кутты 2-го порядка
- сетки ~ от 0.6 млн до 28 млн

Тепловой поток на пластине

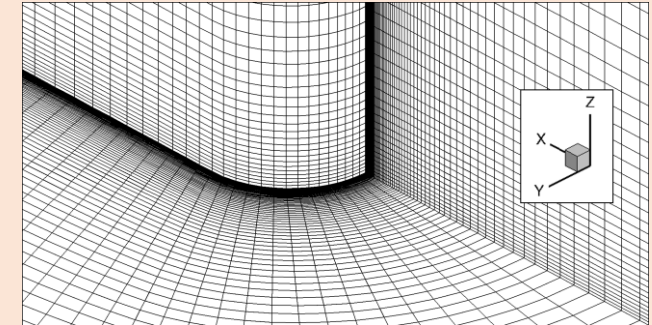


Постановка расчетов по коду SINF/Flag-S

$$D = 1 \text{ mm} \div 4 \text{ mm}$$

$$Re_D = 5.0 \cdot 10^3 \div 2.0 \cdot 10^4$$

Квазиструктурированные сетки



Базовая расчетная сетка:

10 млн ячеек

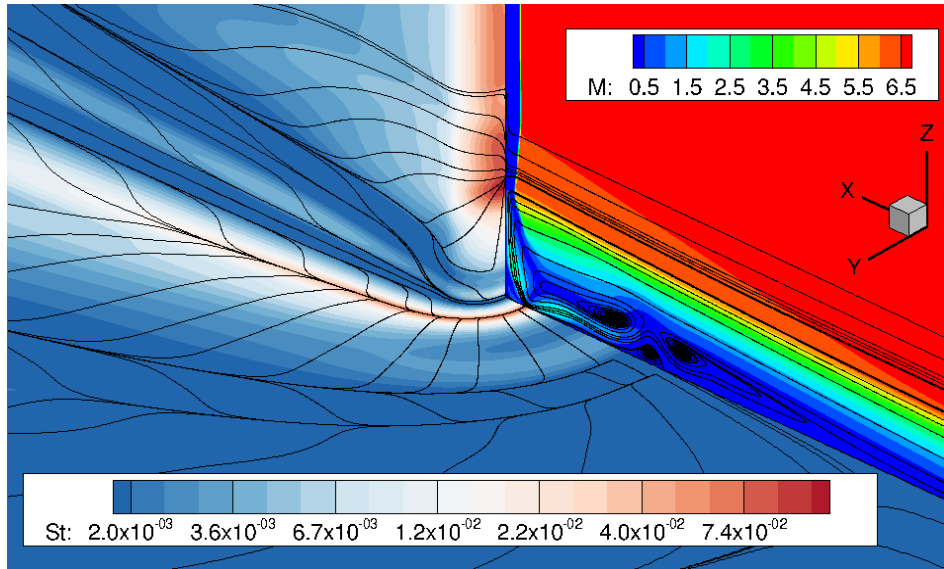
Измельченная сетка:

25 млн ячеек

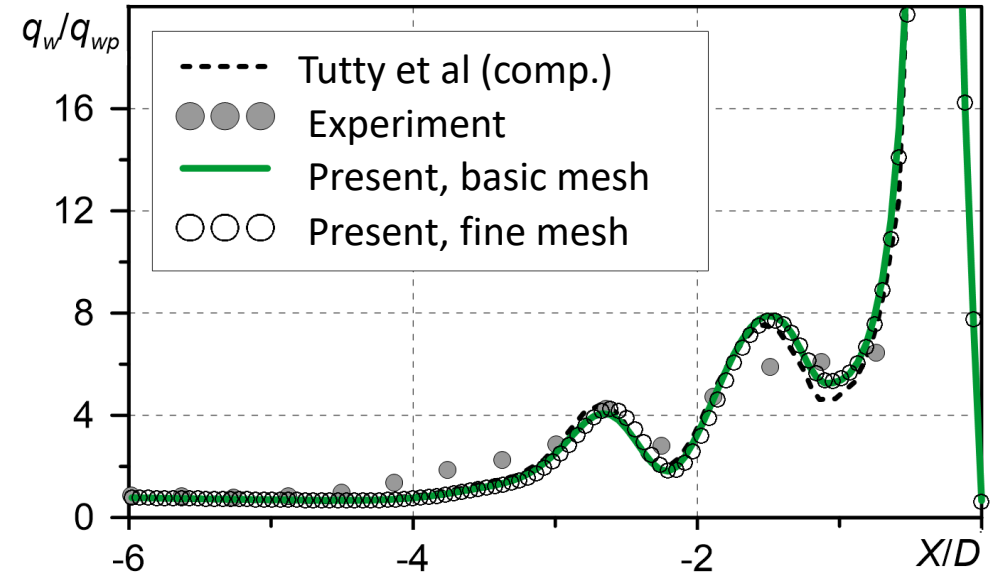
*) Tutty O.R., Roberts G.T., Schuricht P.H. High-speed laminar flow past a fin-body junction // Journal of Fluid Mechanics. – 2013. – Vol. 737. – P. 19-55.

Кросс-верификационный расчет для условий эксперимента Tutty et al (2013)

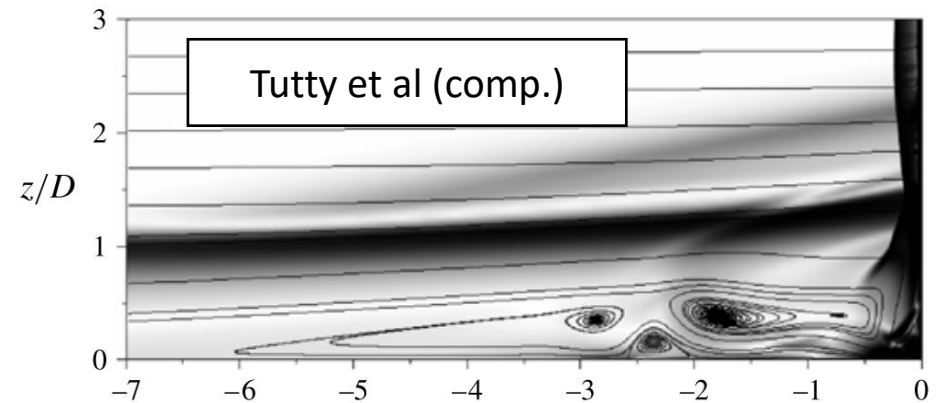
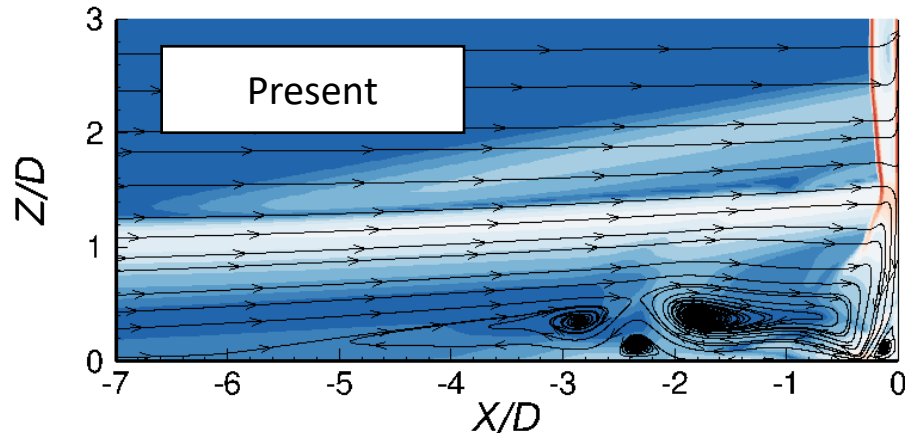
3D структура течения $D = 2.5 \text{ mm}$ $Re_D = 1.25 \cdot 10^4$



Распределение теплового потока вдоль линии симметрии



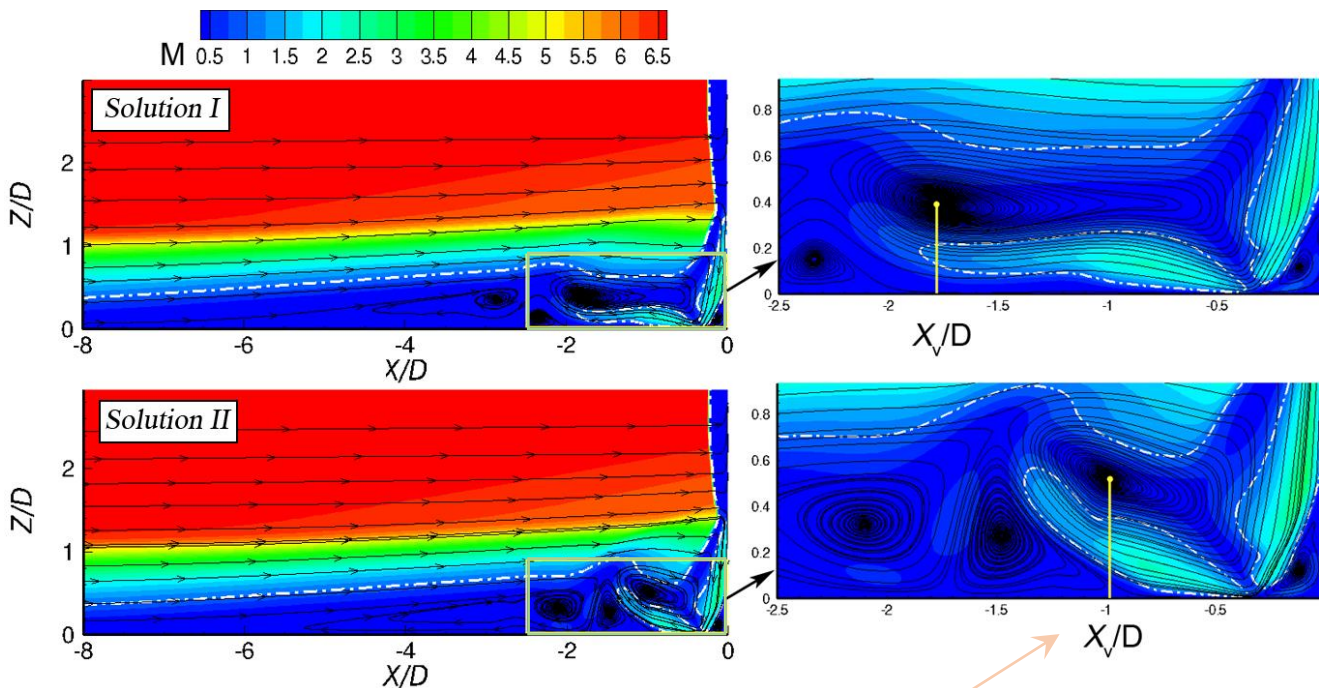
Структура течения в плоскости симметрии





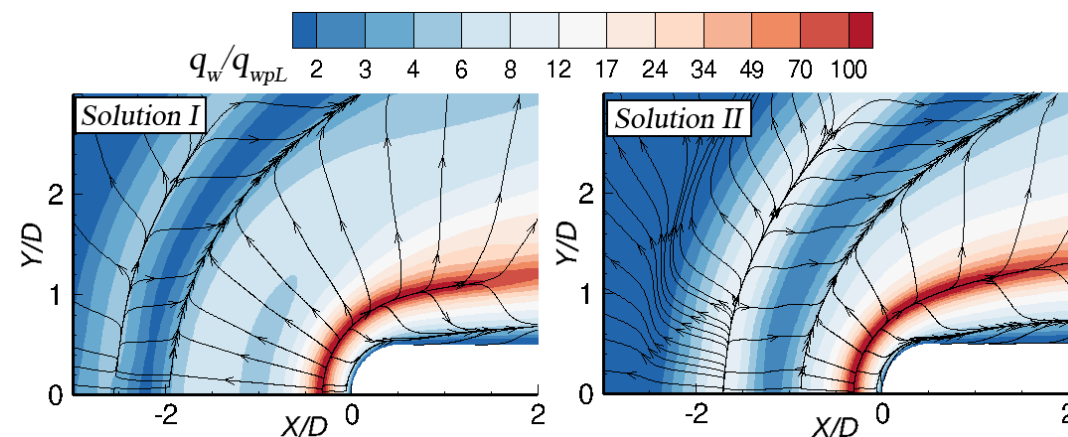
Двойственность стационарного решения для условий эксперимента

Поле числа Маха в плоскости симметрии



Положение центра основного подковообразного вихря

Распределение теплового потока на пластине



Длина отрывной области $L_s^{(I)} > L_s^{(II)}$

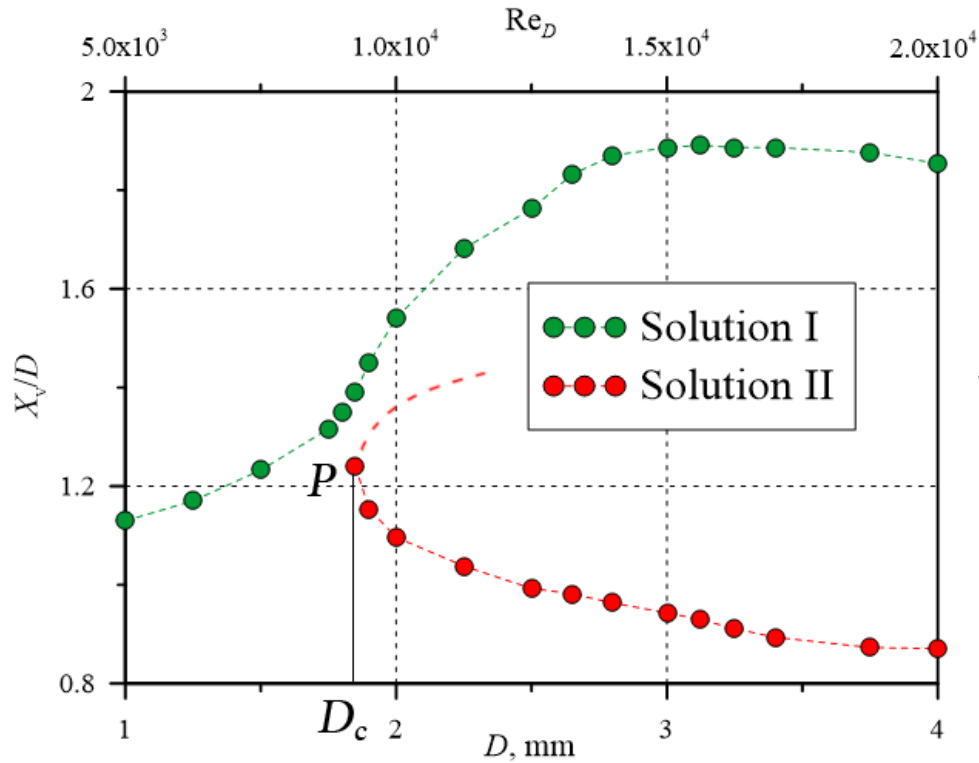
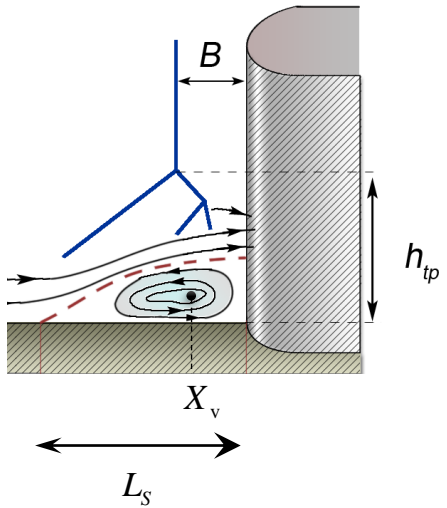
Число явно выраженных вихрей
 Solution I - 4
 Solution II - 5

Два метастабильных решения сохраняют устойчивость:

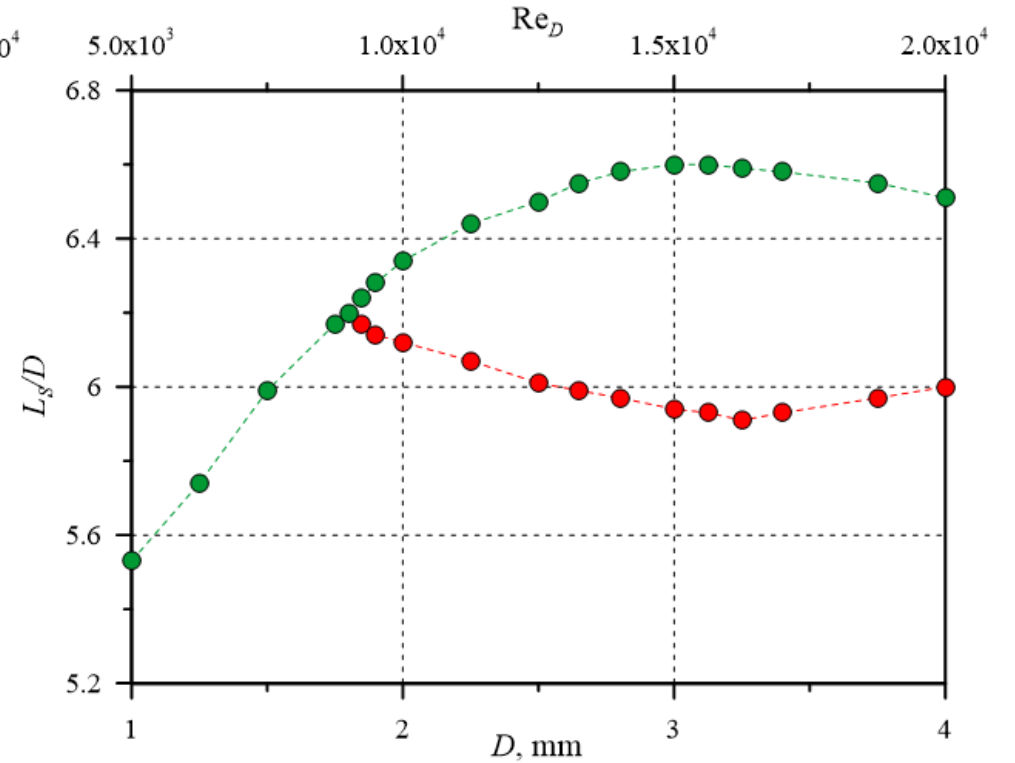
- при измельчении сетки
- при расчете в полной постановке (без наложения условия симметрии)

Бифуркационные диаграммы

Положение центра основного подковообразного вихря



Длина отрывной области



Критические параметры

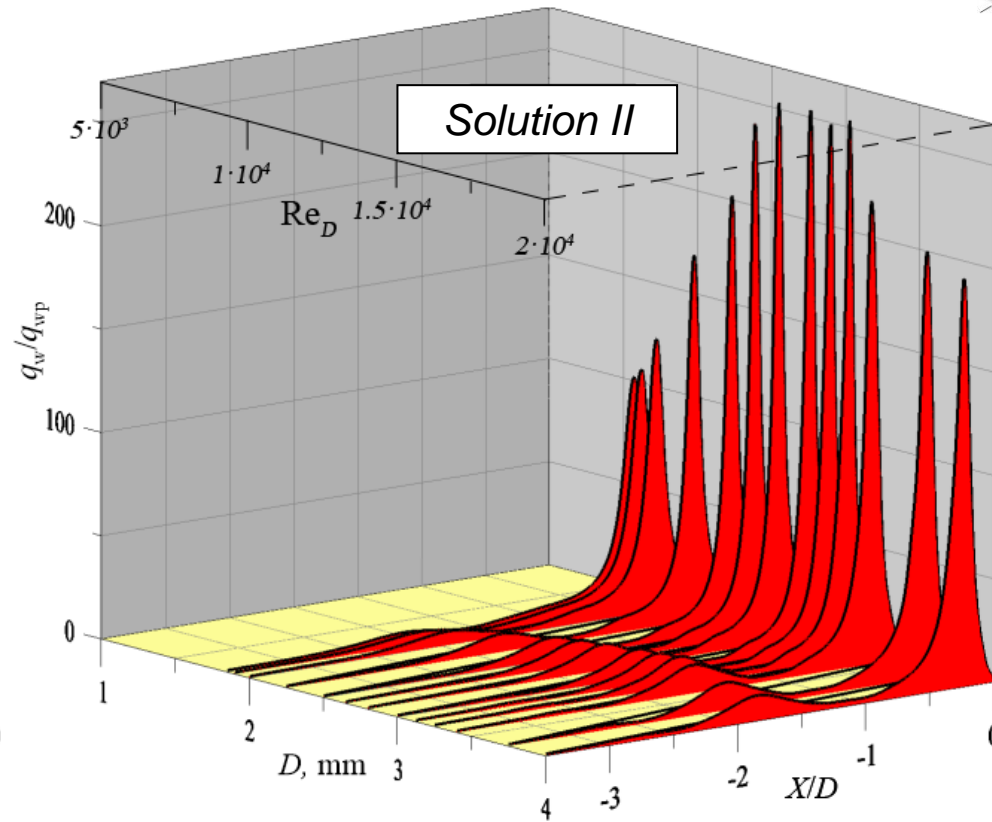
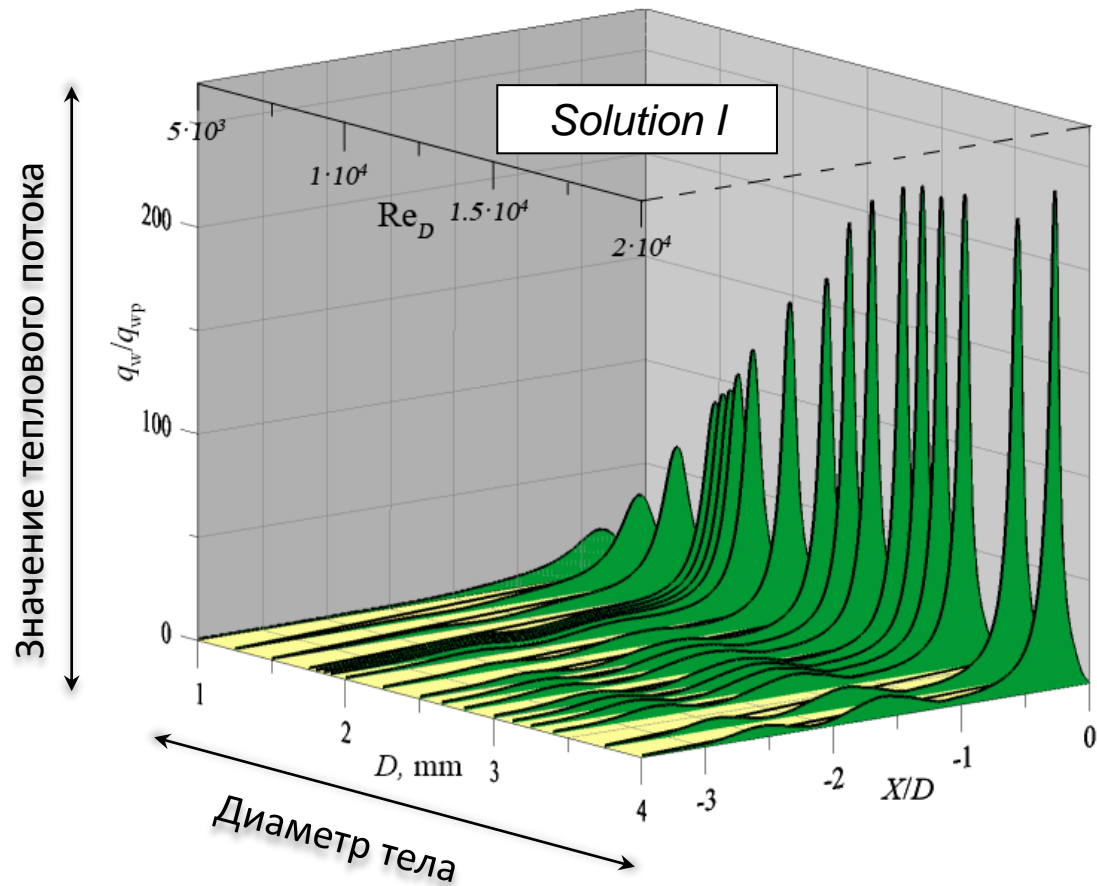
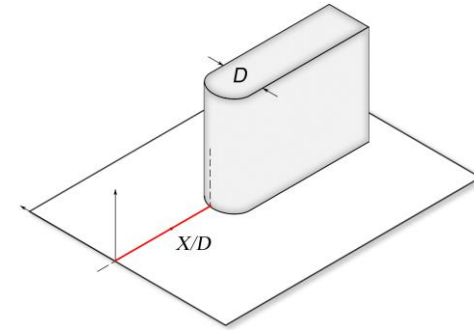
$$Re_{D,crit} \cong 9.25 \cdot 10^3 \quad \delta / D = 1.62$$

$$D_c \cong 1.85 \text{ mm}$$

$$X_v / D = F(Re_D, \delta / D)$$

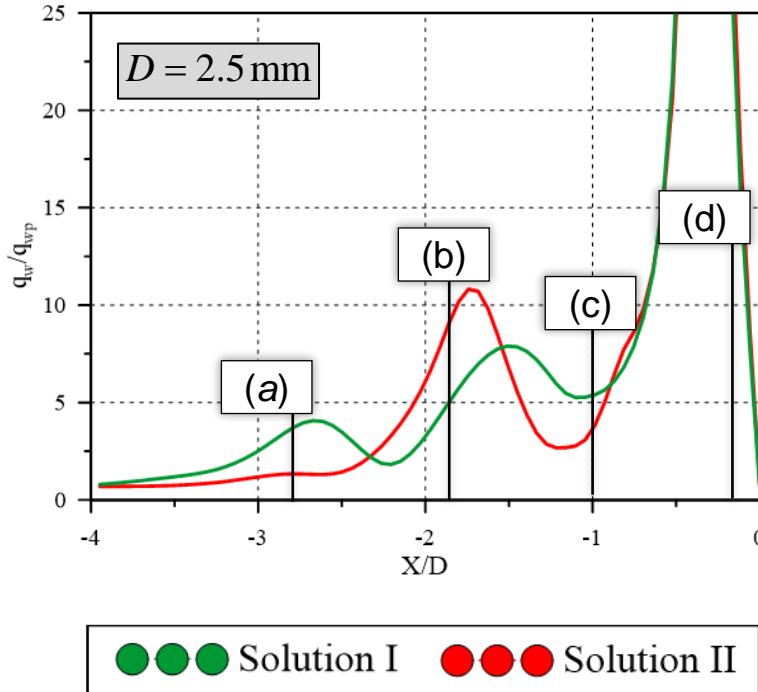
$$Re_{D,crit} = F(\delta / D)$$

Характеристики теплообмена

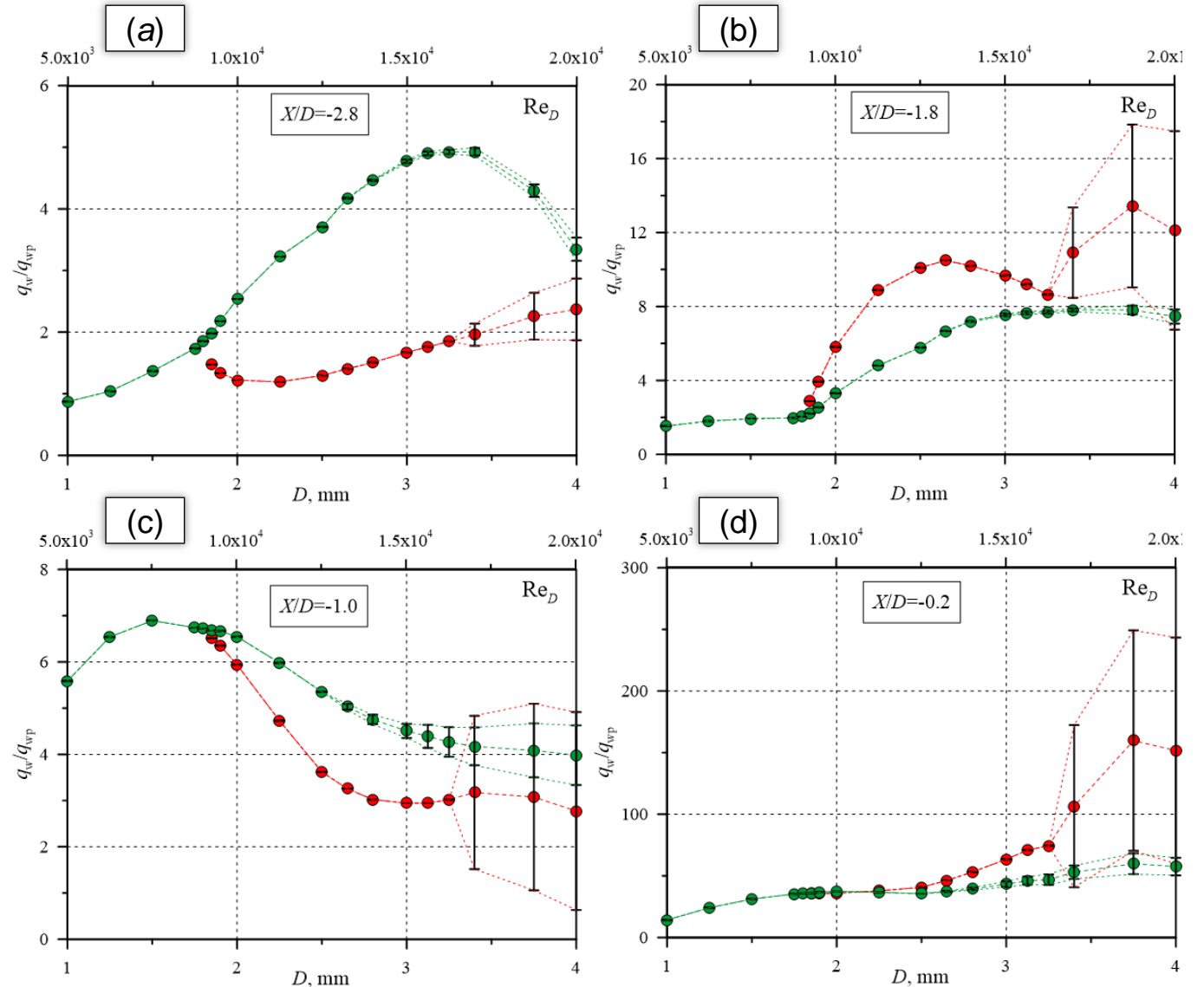


Характеристики теплообмена

Значение теплового потока в отдельных точках на пластине



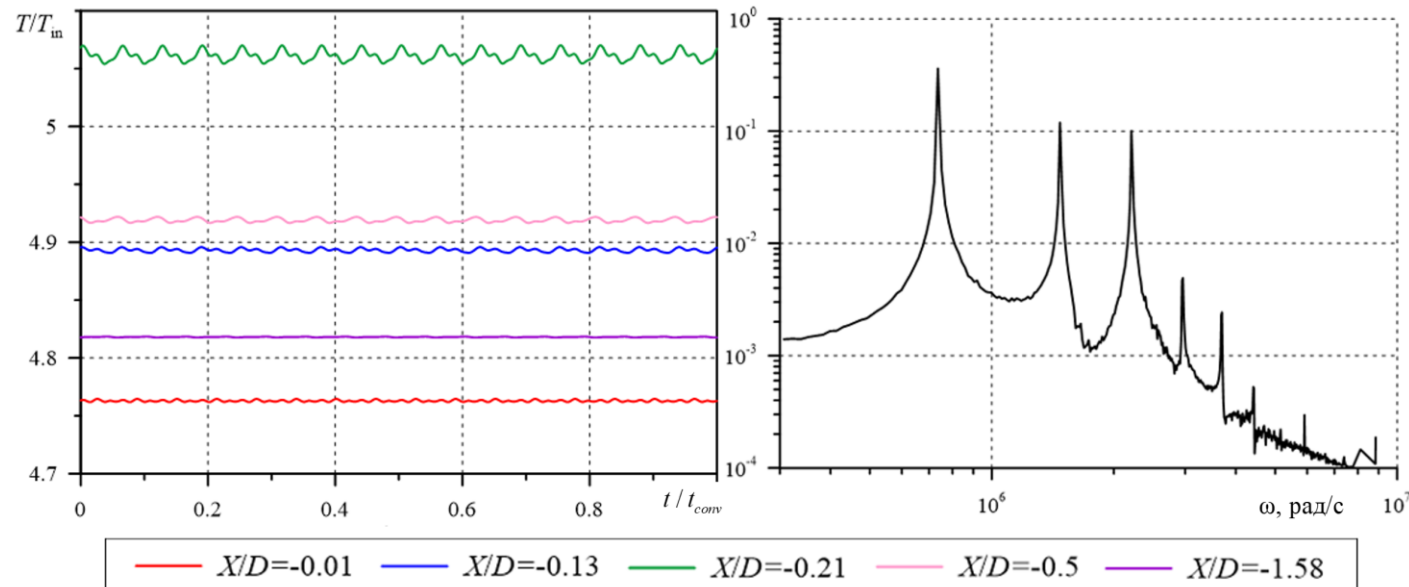
- осредненные по времени значения
- амплитуда пульсаций



Анализ автоколебательных режимов течения: *Solution 1*

Solution 1

Переход к нестационарному течению $Re_D = 1.325 \cdot 10^4$ ($D = 2.65$ мм)

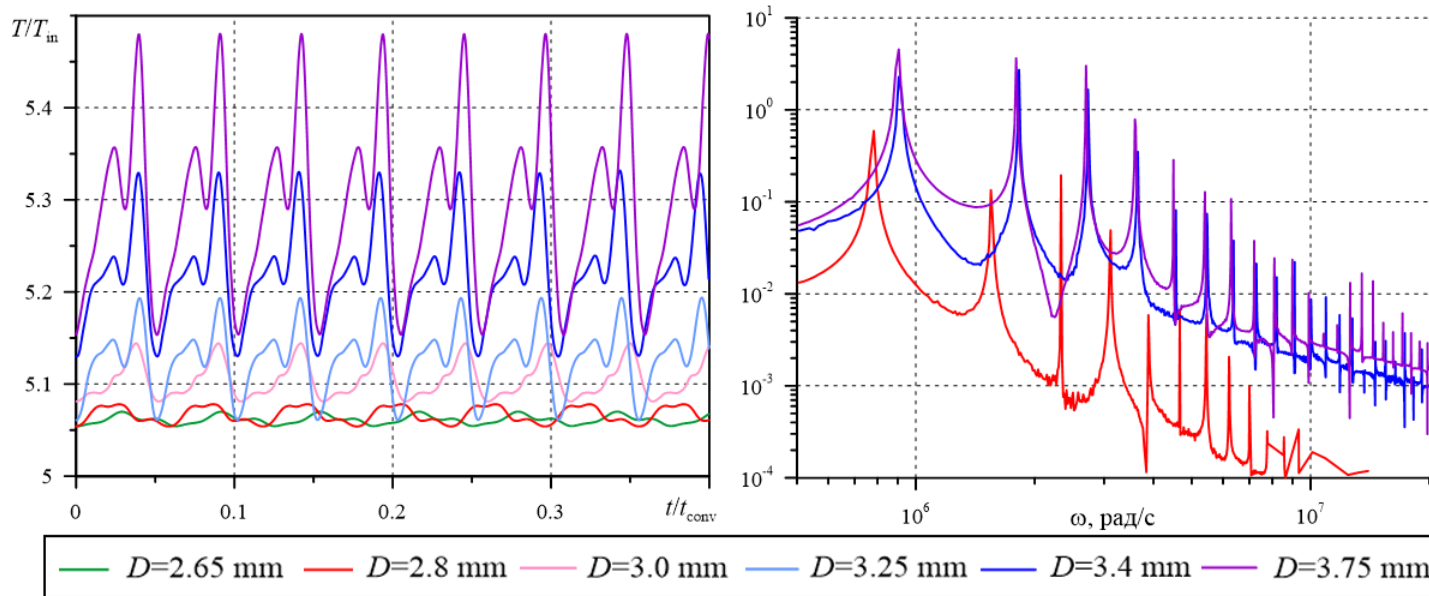


- Спектр имеет «линейчатый» вид
- Колебания содержат несколько частот, которые являются кратными гармониками основной частоты

Анализ автоколебательных режимов течения: *Solution 1*

Solution 1

Влияние числа Рейнольдса

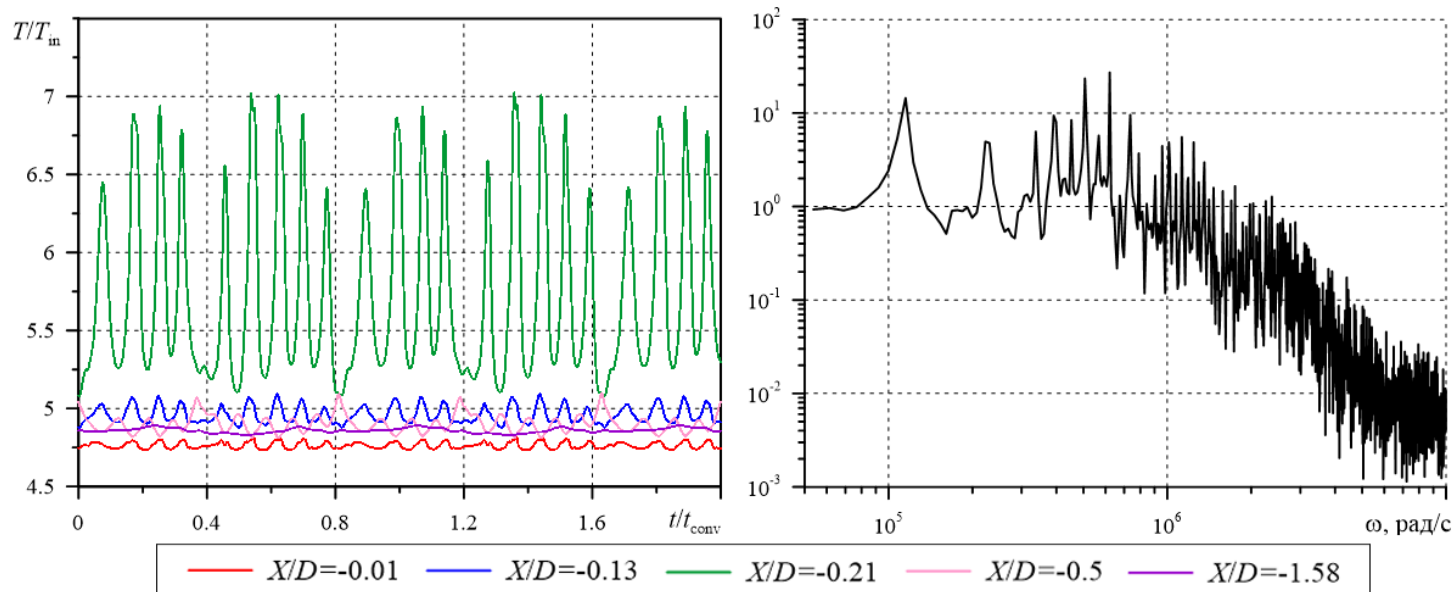


- при увеличении диаметра интенсивность пульсаций постепенно увеличивается
- форма колебаний становится более сложной
- частота основной гармоники немного меняется, при этом спектр колебаний остается «линейчатым»

Анализ автоколебательных режимов течения: *Solution II*

Solution II

Переход к нестационарному течению $Re_D=1.7 \cdot 10^4$ ($D=3.4$ мм)



- реализуется сложный автоколебательный режим течения
- наблюдается сценарий «жесткого» возбуждения автоколебаний

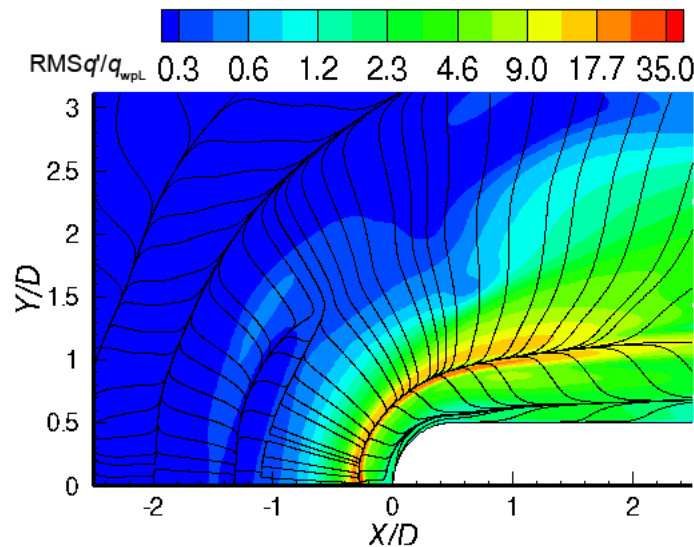
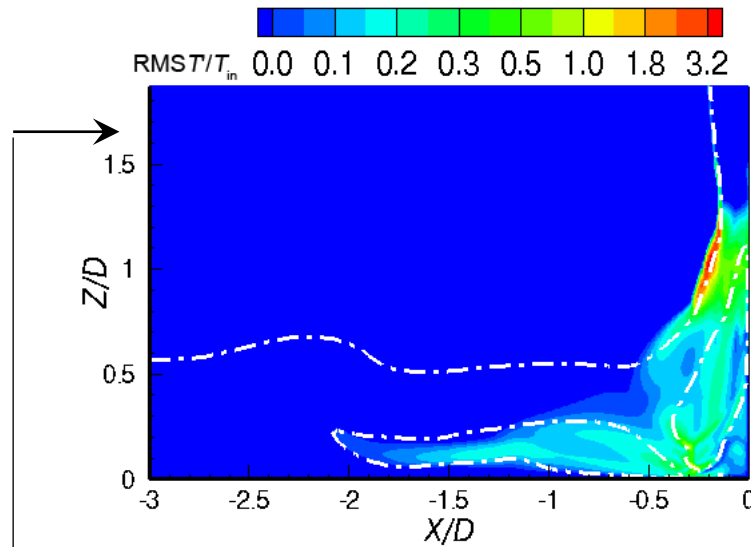
Анализ полей пульсаций

$D = 3.4 \text{ mm}$

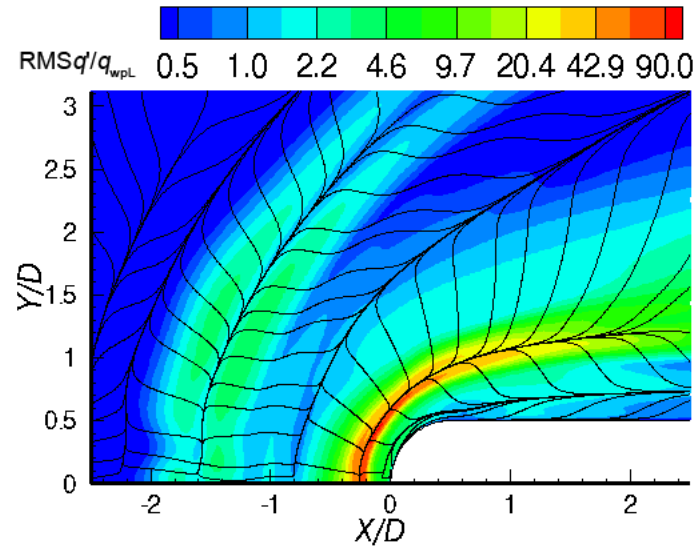
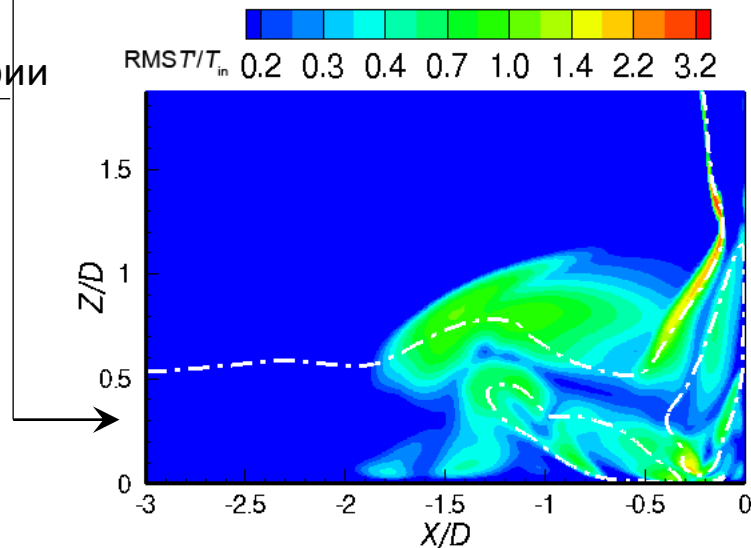
$Re_D = 1.7 \cdot 10^4$

Solution I

Поля пульсаций температуры в плоскости симметрии



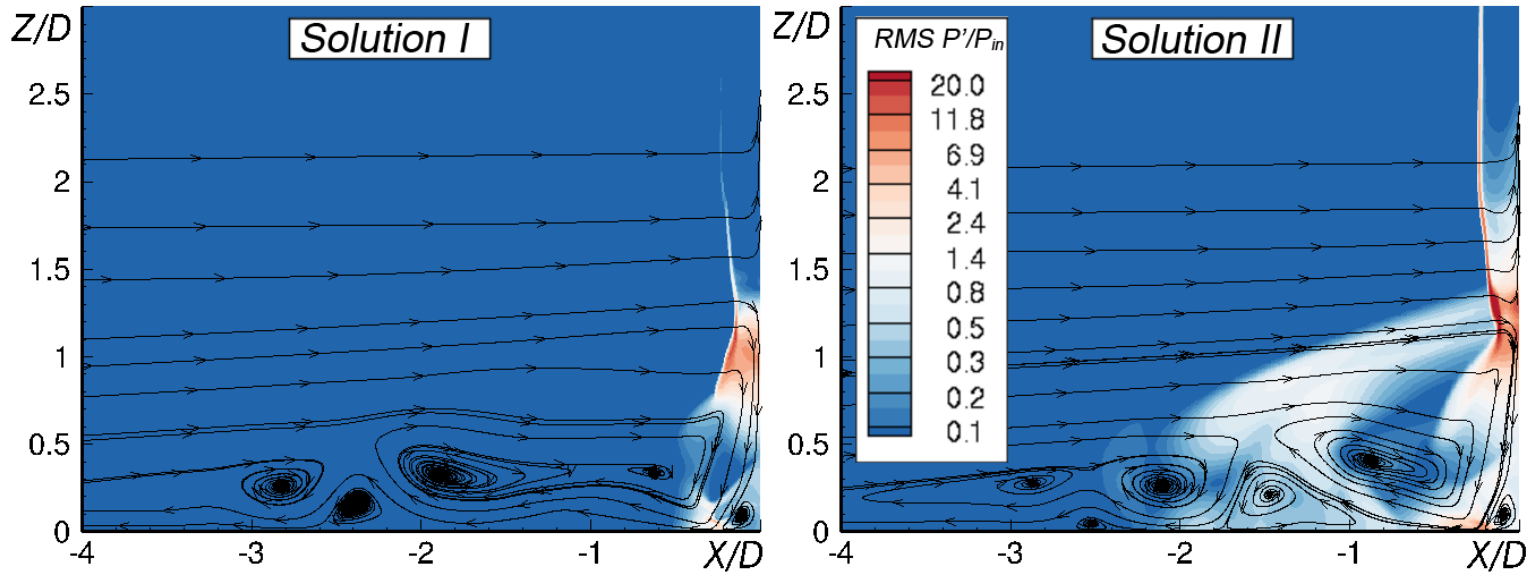
Solution II



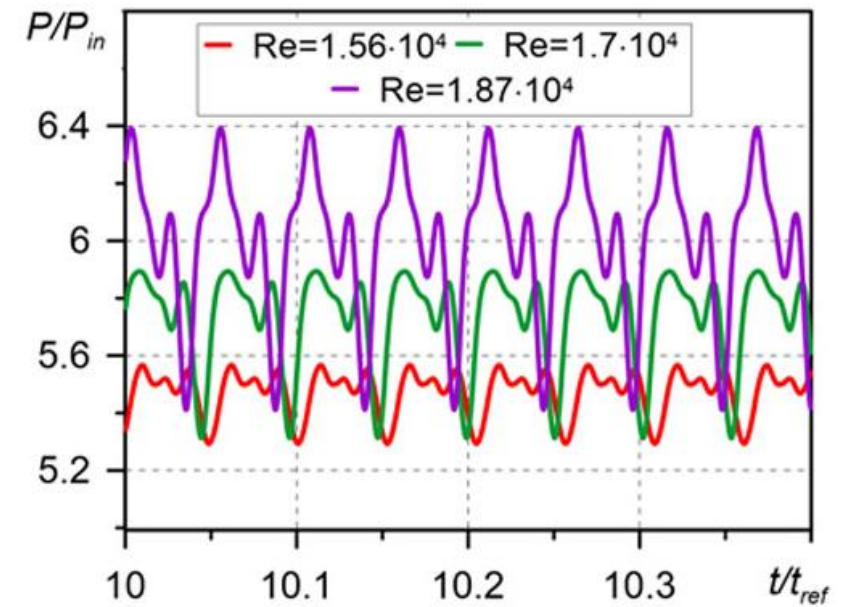
Поля пульсаций теплового потока на пластине

Анализ пульсаций давления

Поля пульсаций давления для $Re_D=1.87 \cdot 10^4$ ($D=3.75$ мм)



Пульсации давления в точке $X/D=-0.21$, *Solution I*



Заключение

- Проведено трехмерное численное моделирование сверхзвукового потока вязкого газа при его взаимодействии с установленным на обтекаемой поверхности затупленным телом. Расчеты при $M=6.7$ выполнены для условий, соответствующих литературным экспериментальным данным.
- Установлено, что при рассматриваемых параметрах существуют два устойчивых стационарных решения задачи с различной конфигурацией вихревой структуры.
- Решения отвечают двум метастабильным состояниям потока и различаются по числу вихрей, формирующихся в передней отрывной зоне, и ее протяженности.
- Проведенные расчеты, в которых варьировался диаметр затупленного тела, показали, что выявленные метастабильные решения существуют в некотором диапазоне значений числа Рейнольдса
- Построены бифуркационные диаграммы и оценено критическое значение числа Рейнольдса, при превышении которого возникает второе (изолированное) решение.
- Оценены значения числа Рейнольдса, при которых происходит переход к нестационарным режимам течения, имеющий разный характер для первого («основного») и второго решения: в первом случае и амплитуда пульсаций с ростом числа Рейнольдса нарастает постепенно, а во втором наблюдается переход с «жестким» возбуждением сложных многочастотных колебаний.