

ПАКЕТ VP2/3

velocity – pressure, 2D/3D

Код VP2/3 как отражение развития и
применения многоблочных вычислительных
технологий

Исаев С.А., Баранов П.А.

Судаков А.Г., Усачов А.Е.

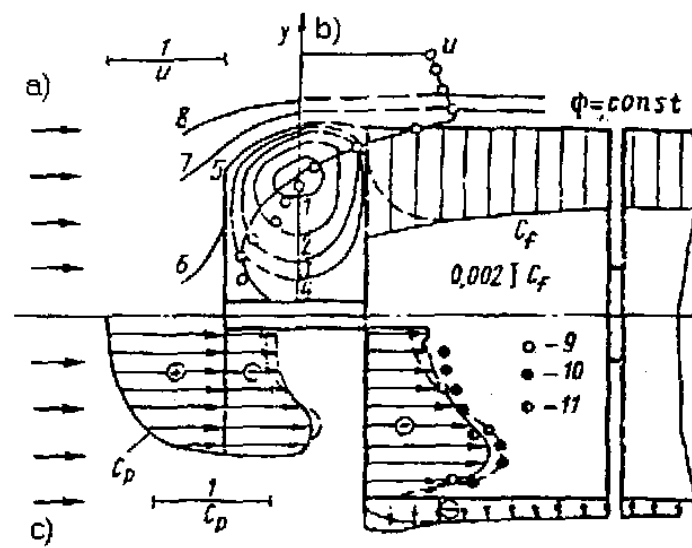
Темы

- Почему возник пакет?
- История: от моноблока к MBT
- MSST – тесты и продвижения
- Распараллеливание
- Что дальше?

Почему??

- Обтекание тел с передней срывной зоной (дозвук и сверхзвук)
- Вихревые ячейки с отсосом и дросселирующий эффект с использованием вентилятора
- Поверхностные вихрегенераторы на пластинке, на плоскости крыла и в трубах (турбулентные и ламинарные режимы) – вихревая интенсификация теплообмена

- Организация отрывного обтекания тел с помощью преднамеренного формирования циркуляционных зон

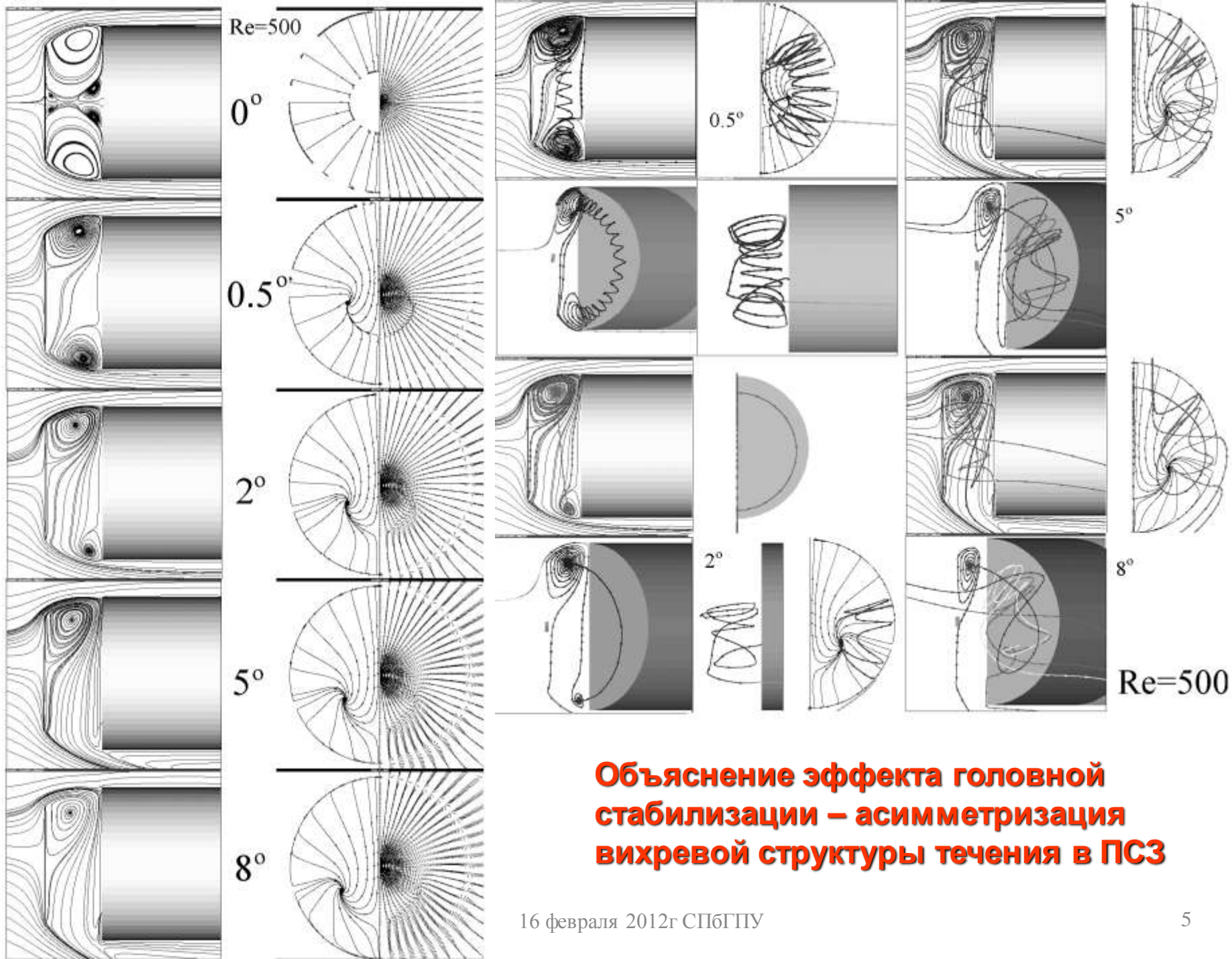


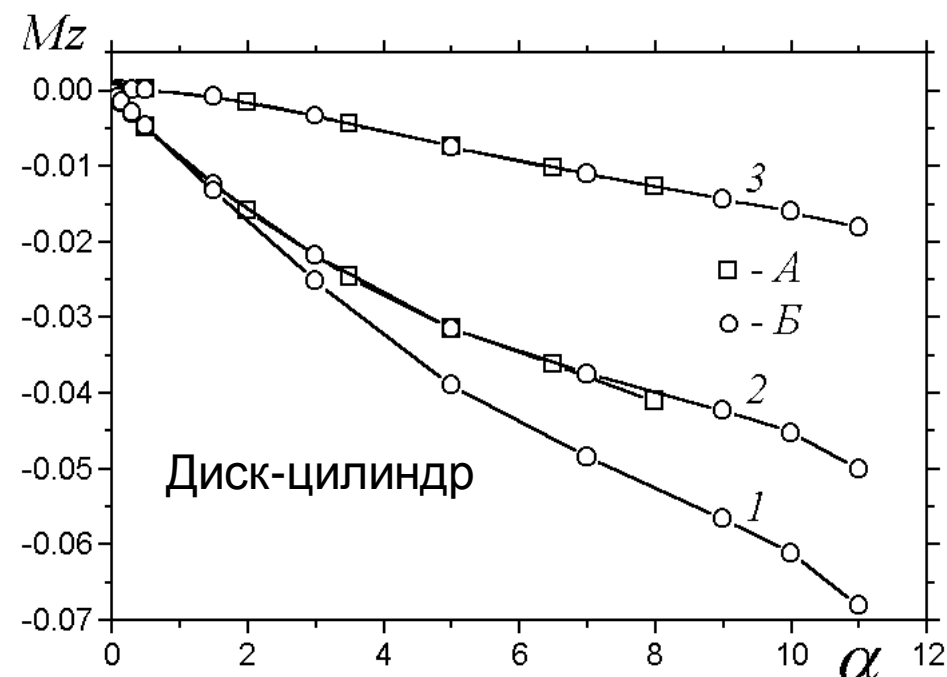
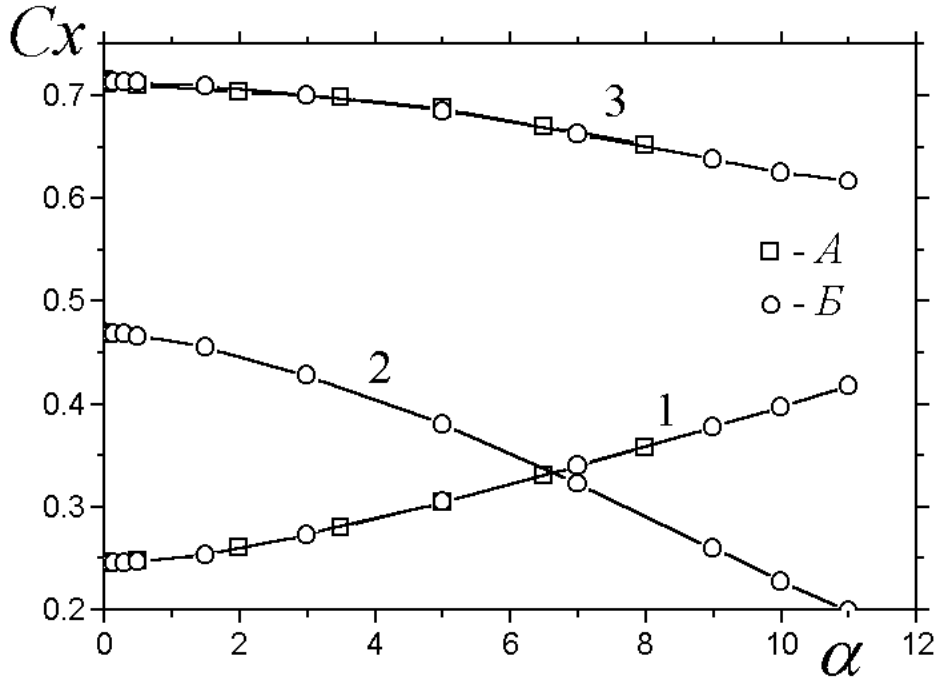
Streamline pattern of average flow (a), the profile of the axial velocity component u in the middle section of the cavern between the disk and the cylinder endface (b) and surface distributions of the pressure coefficient C_p on the disk and cylinder (c) for $Tu=0,5\%$; 1) $\psi=-0,09$; 2) $(-0,05)$; 3) $(-0,03)$; 4) $(-0,01)$; 5) $0,0$; 6) $0,001$; 7) $0,1$; 8) $0,25$; 9) experimental data for u [2]; 10) experimental data for C_p [3]. The dashed computed curve corresponds to $Tu=0,05\%$.

МЖГ (с 1973). Концепция управления отрывом - снижение сопротивления, головная стабилизация (защита в политехе в 1991)

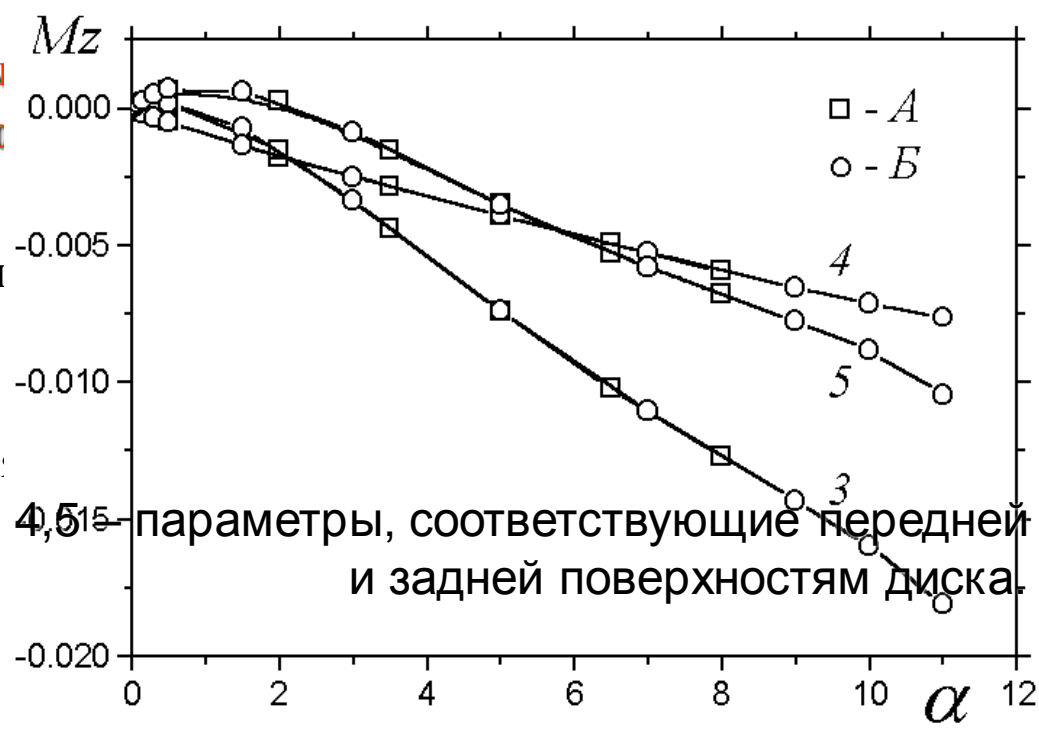


Предшественники исследований по строительной аэродинамике

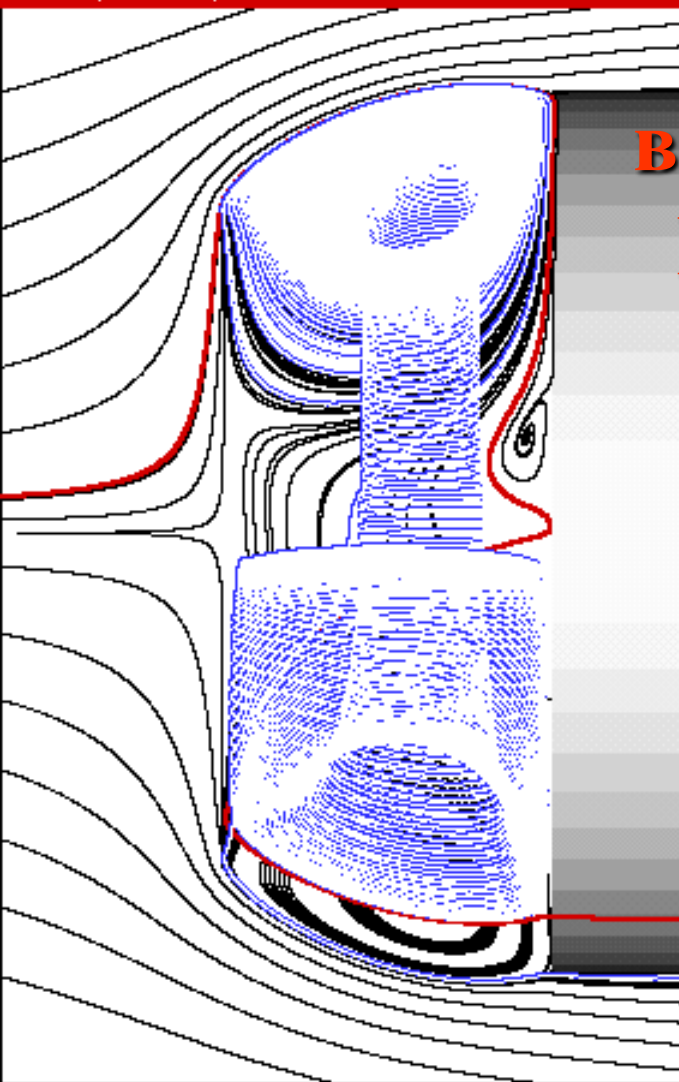




- Влияние на интегральные силовые характеристики цилиндра с диском (0.75) при зазоре 0.375 угла α
- Цифрами 2 и 3 обозначены кривые относящиеся к торцу цилиндра и выступающему диску, причем сопротивление торца определяется с противоположным знаком; 1 – суммарные силовые характеристики тела

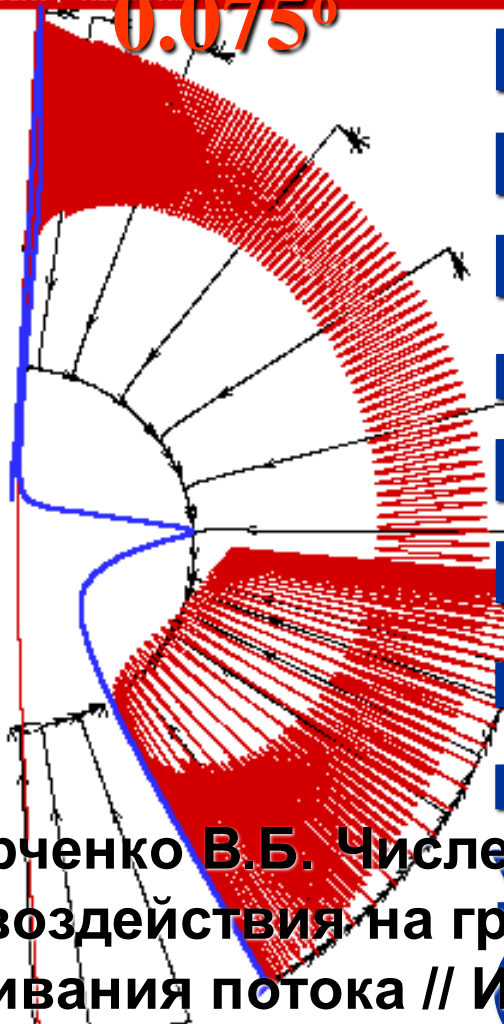


Визуализация вихревой структуры в ПСЗ при угле атаки



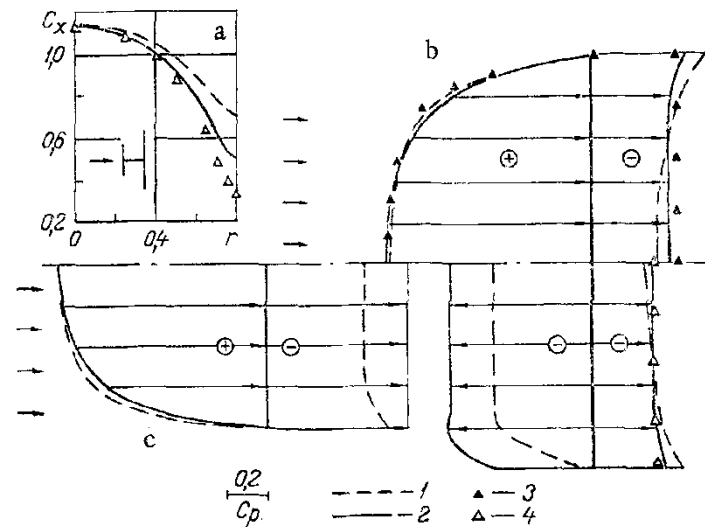
Frame 001 | 15 Feb 2003 | 5c2c 0070c.I13

0.075°



Проекты
РФФИ с
Институтом
механики
МГУ,
Институтом
гидромехани
ки НАН
Украины
(Київ)

Бунгов В.В., Исаев С.А., Харченко В.Б. Численное моделирование ветрового воздействия на градирню при наличии устройств выравнивания потока // Инженерно-физический журнал, 1998. Т.71. N5. С.866-871.



illustrations
(1983)

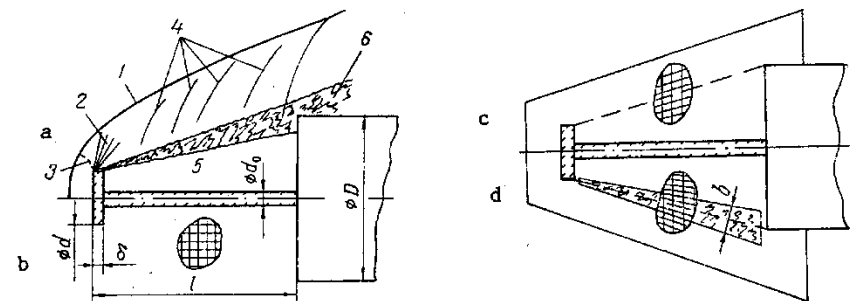


Fig. 1. Physical pattern of flow about a cylinder with a cylinder with a disk (a) (the main structural elements: 1) leading shock wave; 2) rarefaction sheafs; 3) Mach line; 4) compression waves; 5) separation zone; 6) turbulent shear layer) and theoretical regions with a rectangular grid (b), an oblique grid (c), and an oblique grid with a superimposed turbulent shear layer (d).

$$v_f = \frac{\sqrt{2}}{4} \sin \left(\frac{\pi}{4} + \theta \right) q \Delta \sin(2\theta).$$

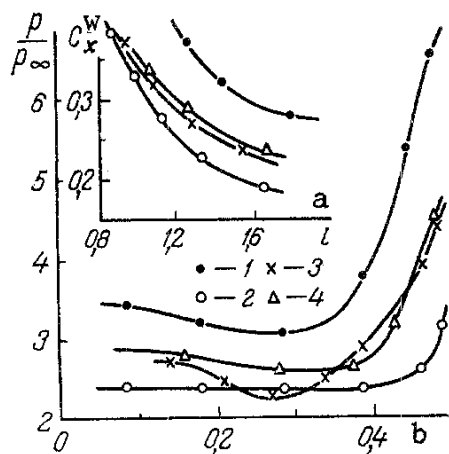
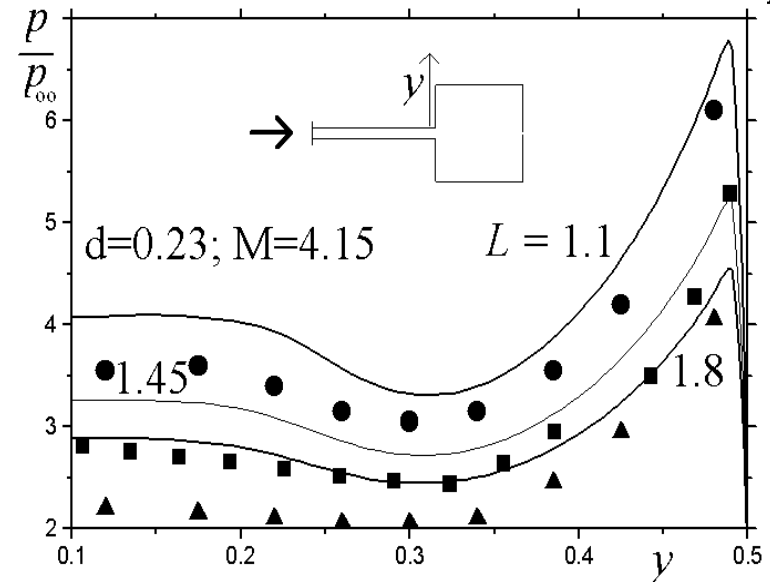
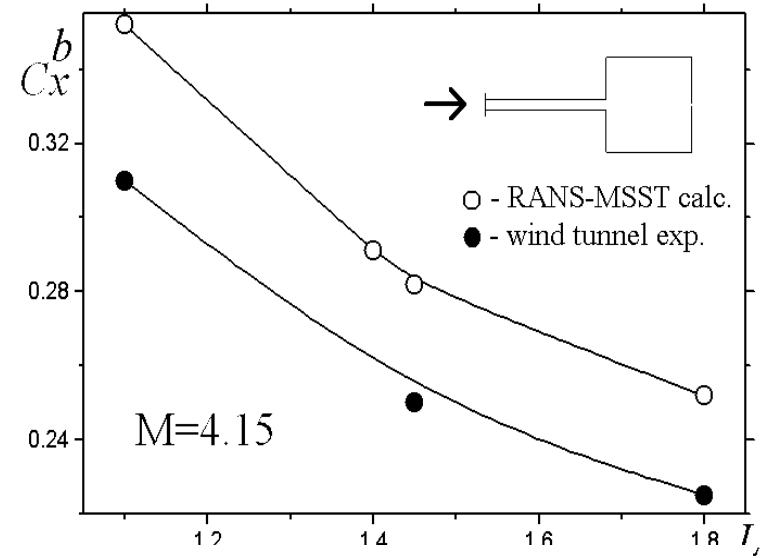
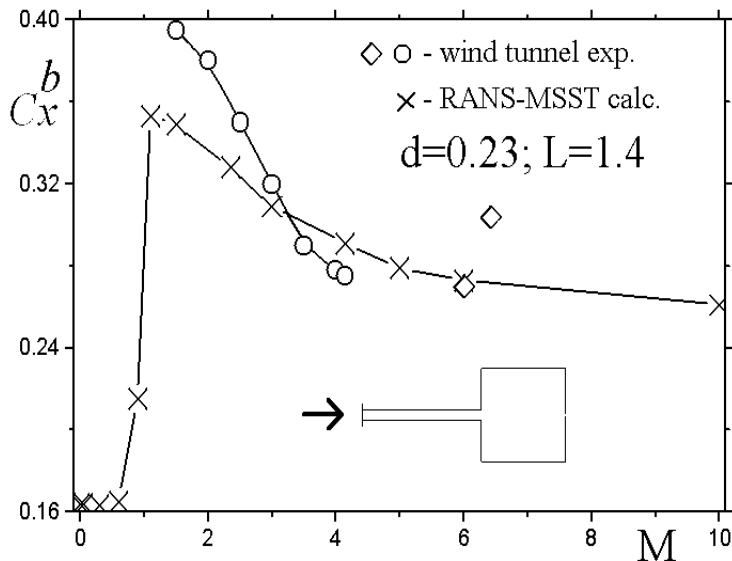
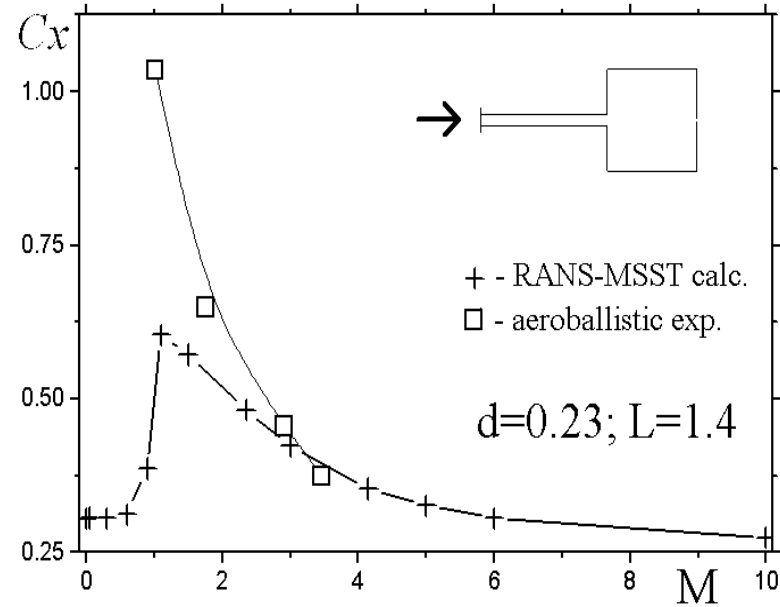
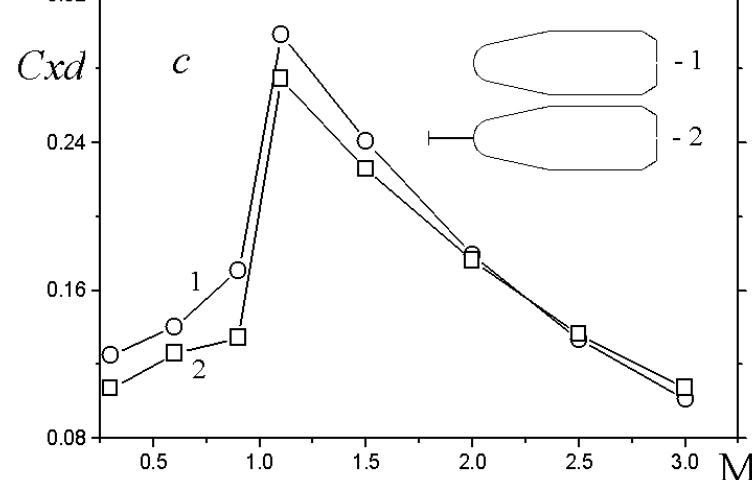
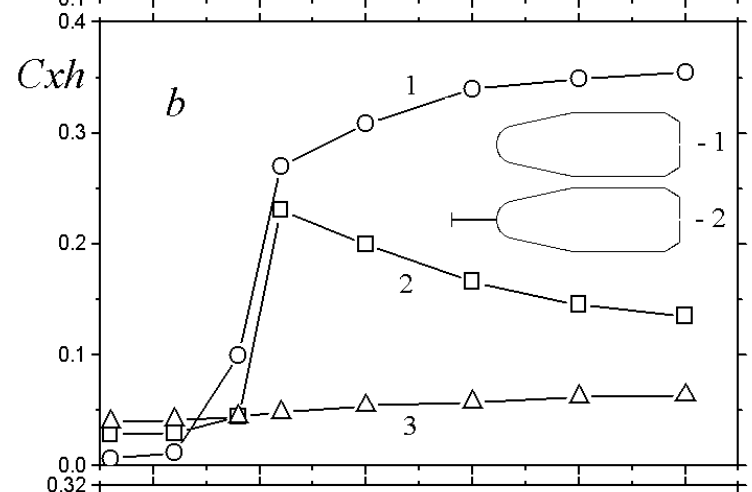
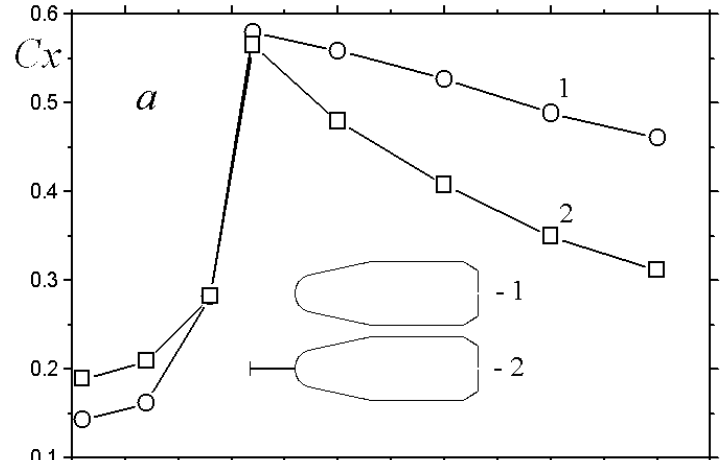
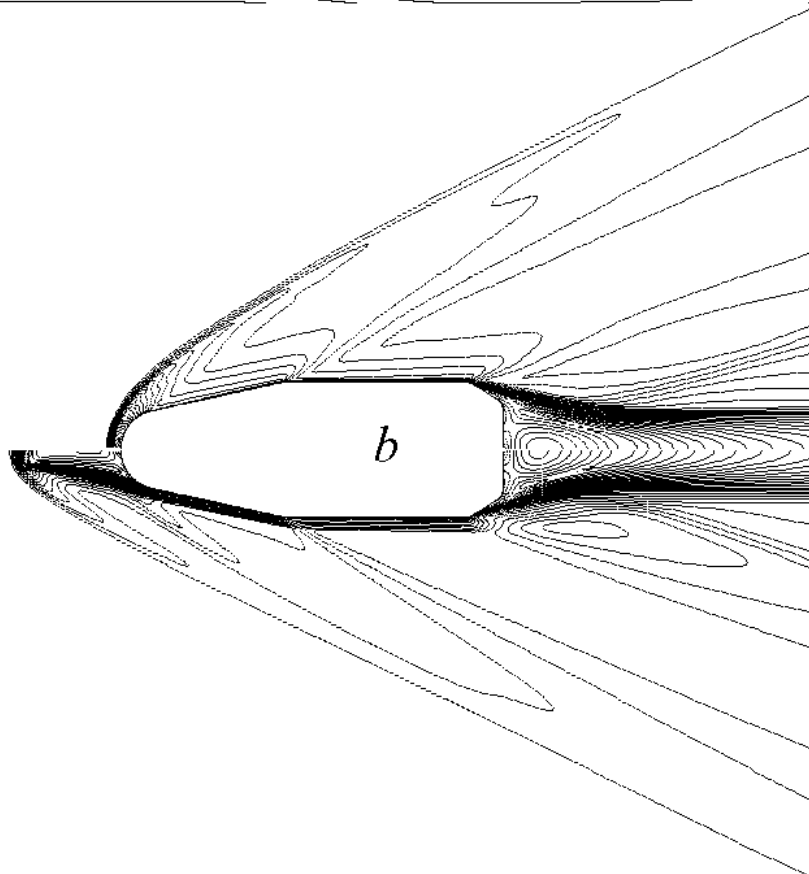
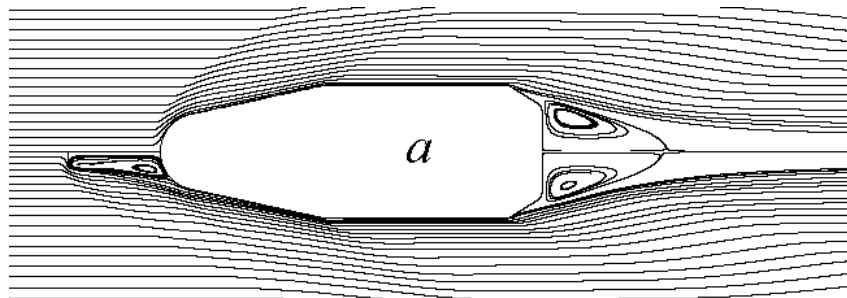


Fig. 2. Dependence of the coefficient of wave resistance C_x^w of the body on the projection of the disk l (a) and profiles of static pressure on the end surface of the cylinder for $l = 1.45$ (b): 1, 2) calculations on rectangular and oblique grids; 3) experiment; 4) calculation with a superimposed shear layer.

Тестовая задача осесимметричного обтекания цилиндра с диском (новые результаты – сравнение с аэробаллистическим экспериментом и трубными испытаниями)



Обтекание РН типа СОЮЗ (M=3)



Task 4.1. Slot suction with a fan in

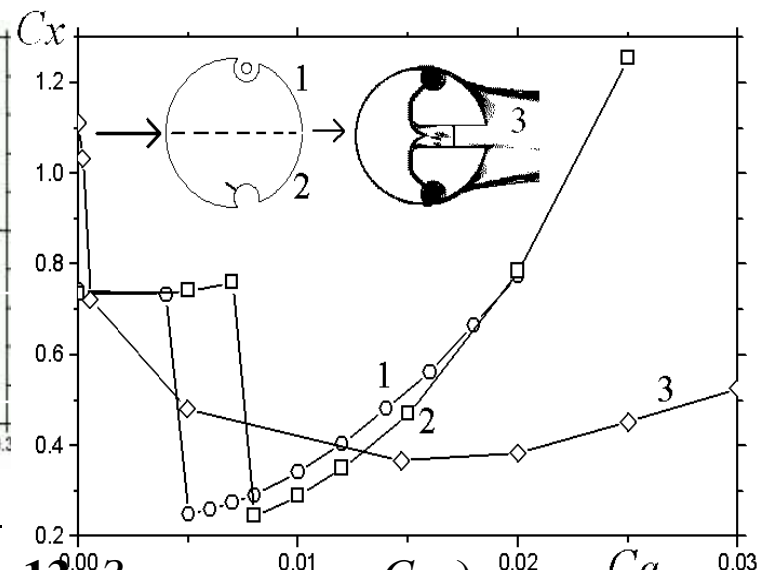
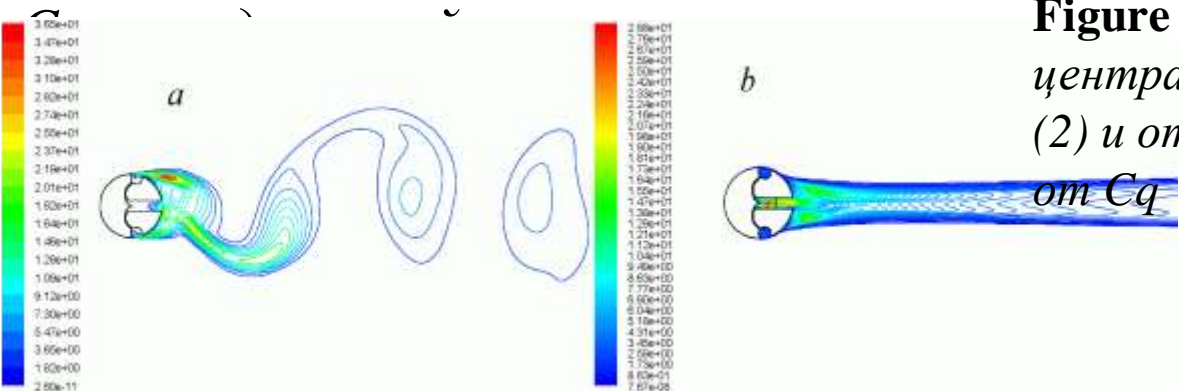
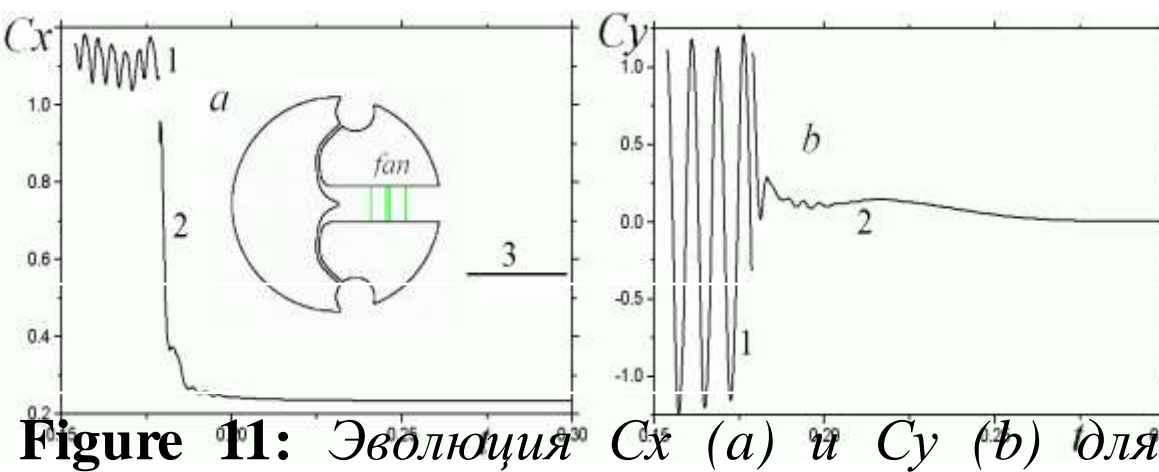
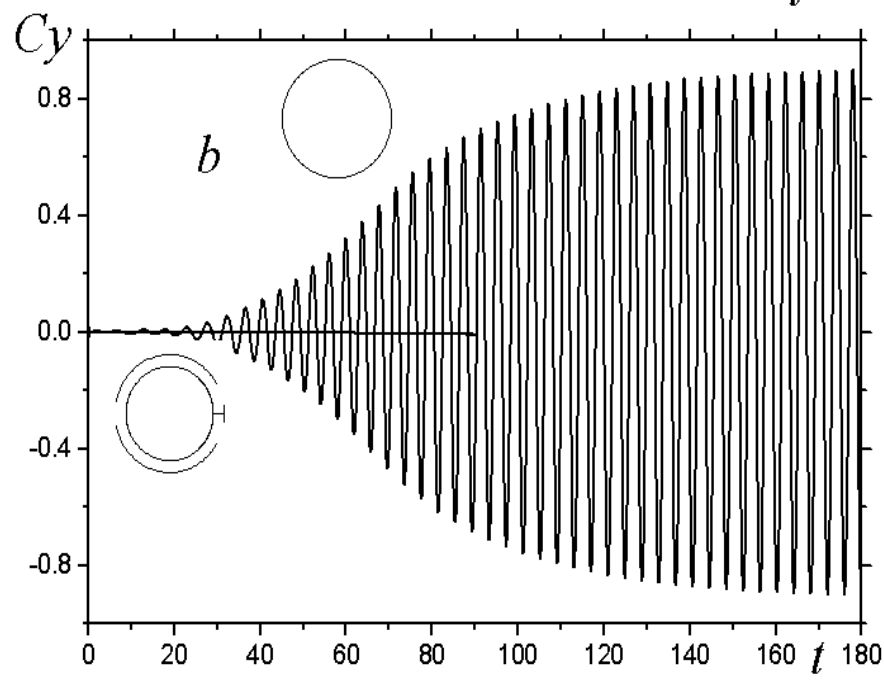
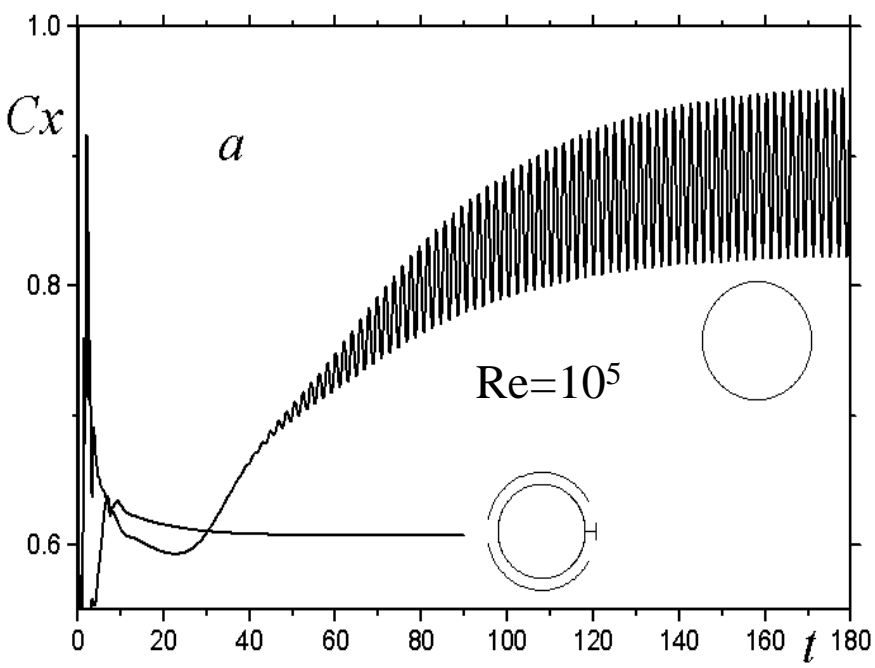
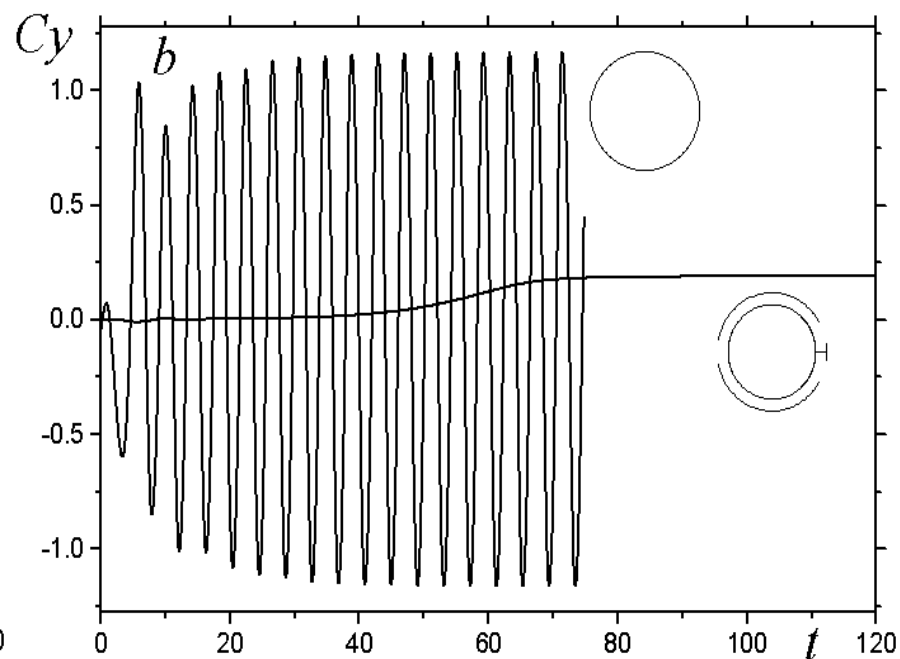
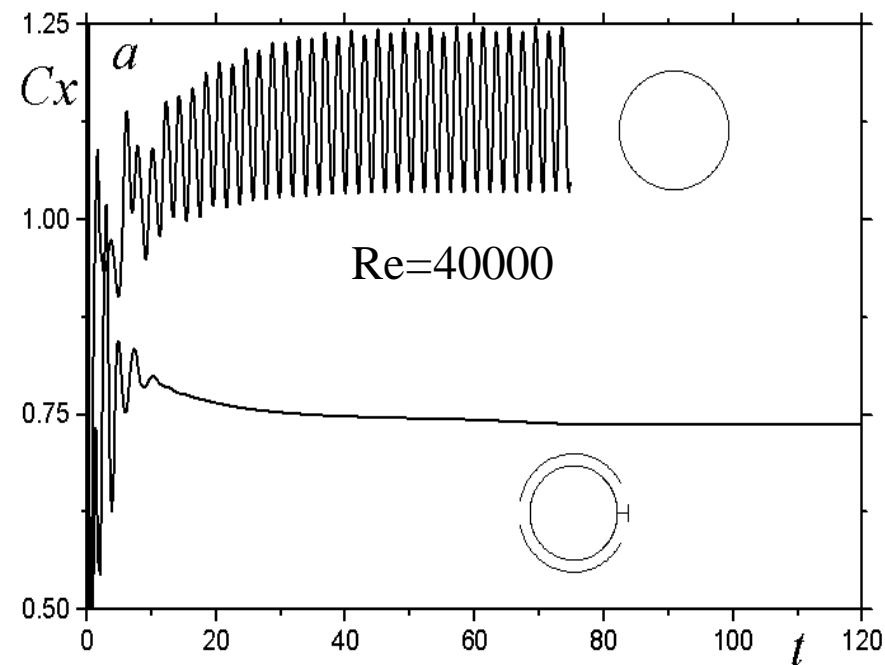
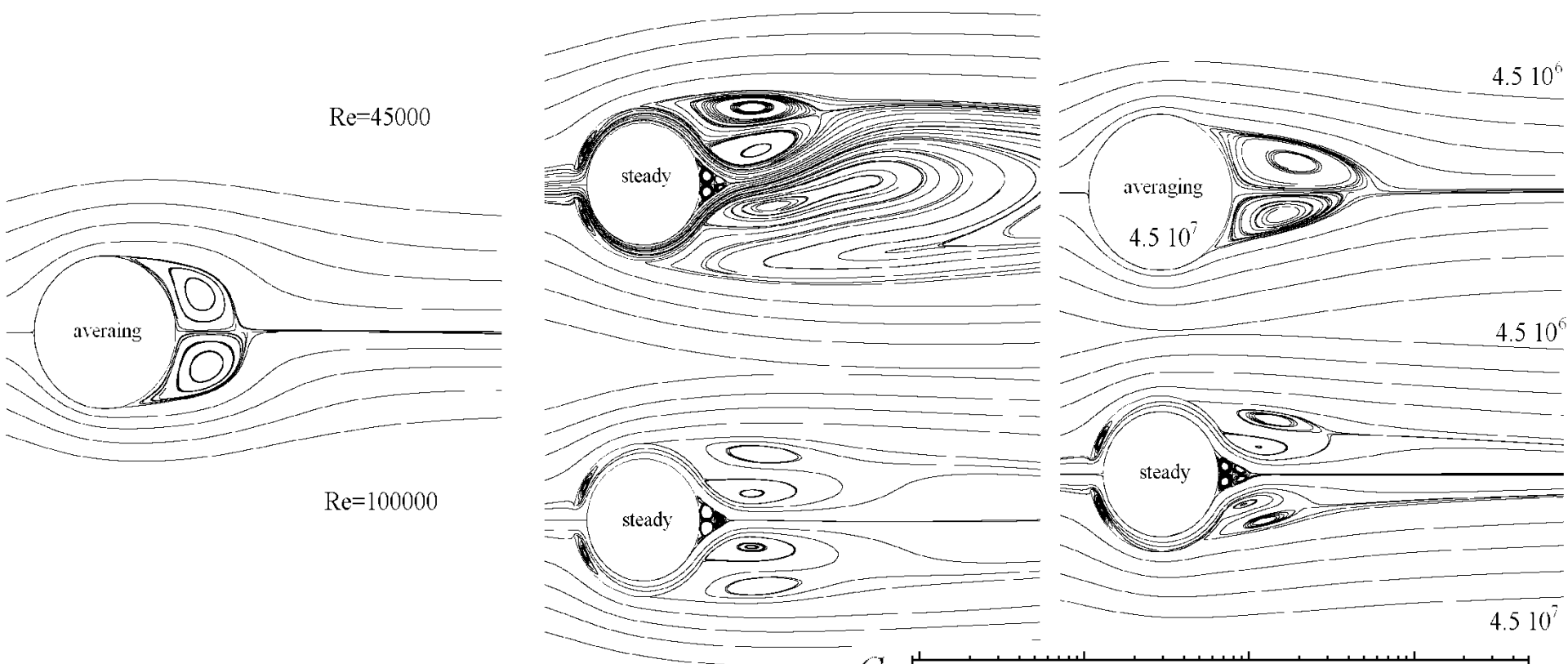


Figure 13: Зависимость C_x для отсоса с центрального тела (1), щелевого отсоса (2) и отсоса с помощью вентилятора (3)

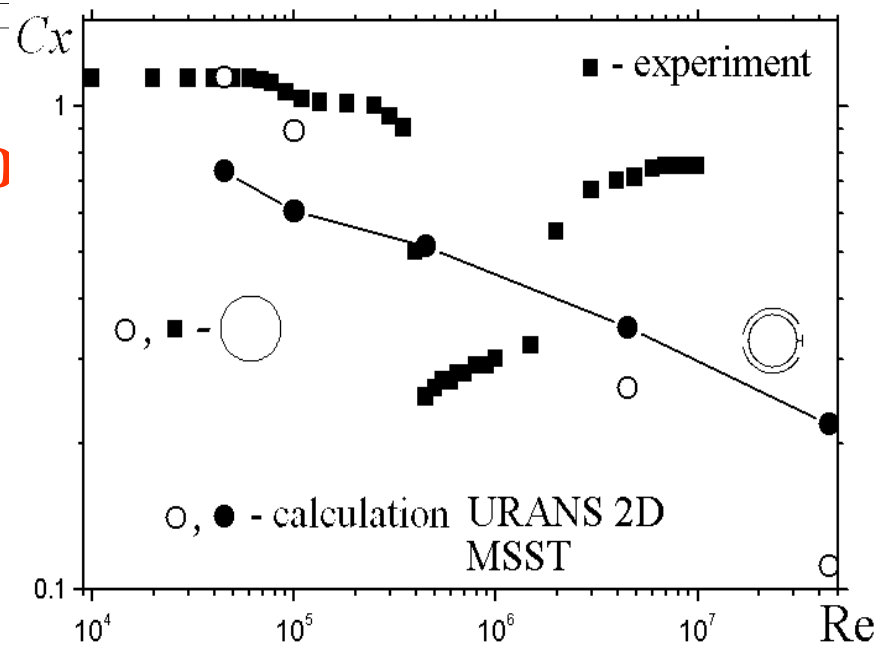
• Впервые поставлены и решены задачи обтекания цилиндра с вихревыми ячейками с щелевым отсосом, трактами и вентилятором, как энергетическим устройством для создания отсоса. Показана приемлемость упрощенной методики оценки энергетического вклада в лобовое сопротивление (Figure 13).

Турбулентное обтекание





Стабилизация турбулентно следа за цилиндром

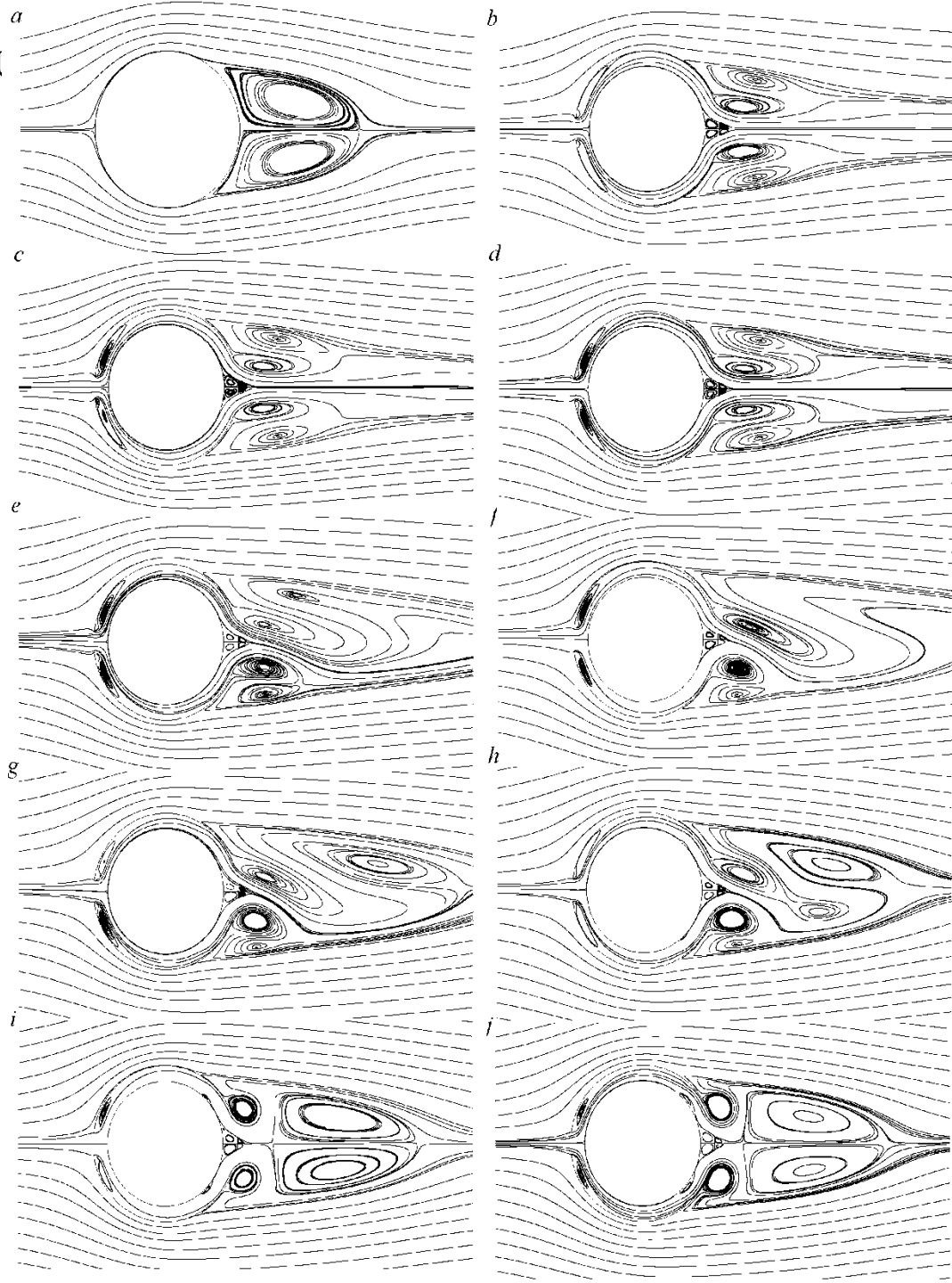


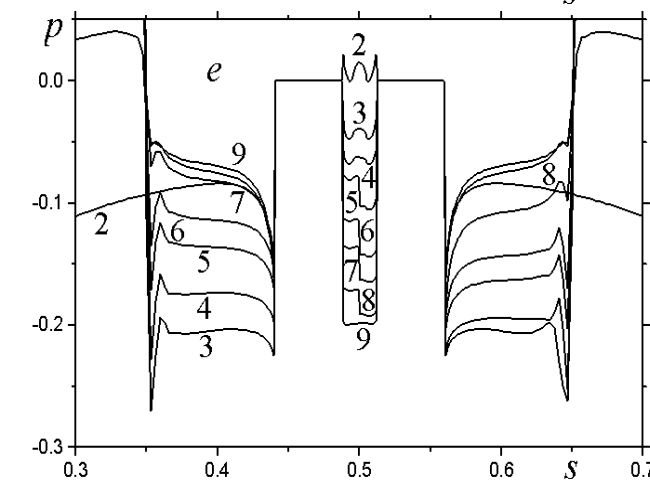
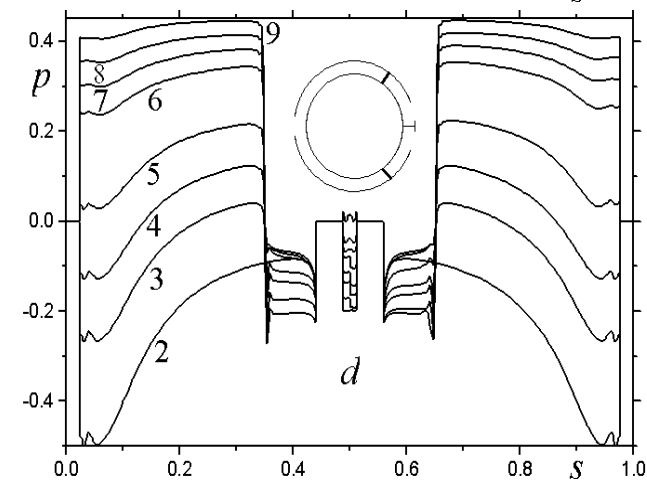
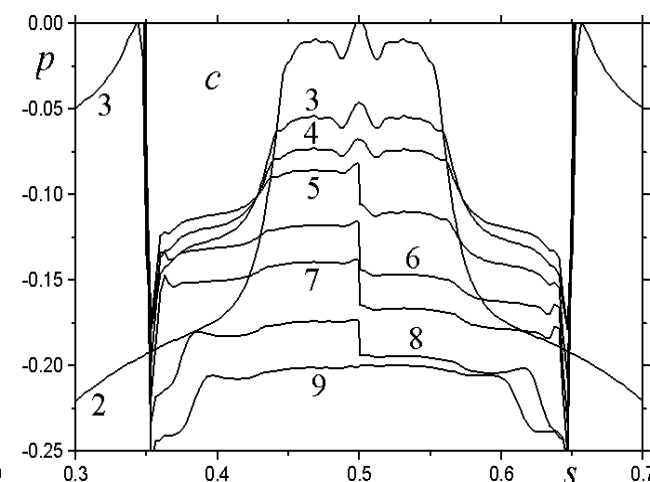
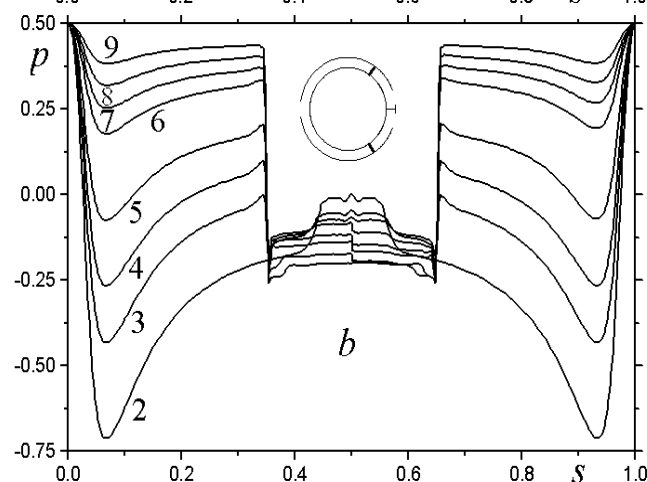
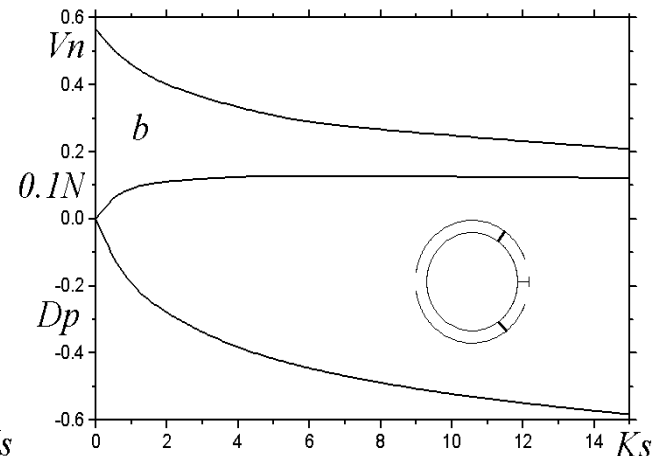
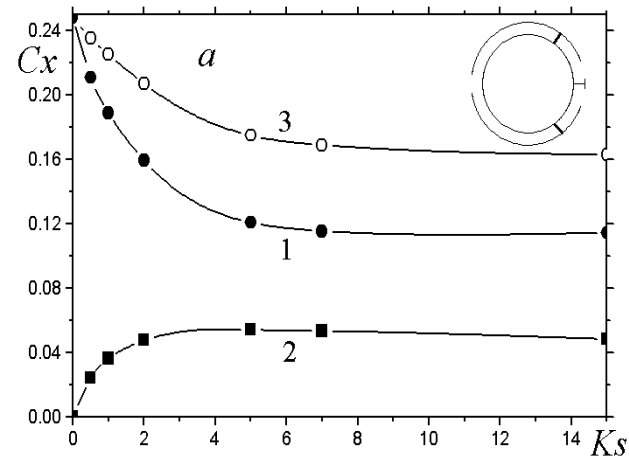
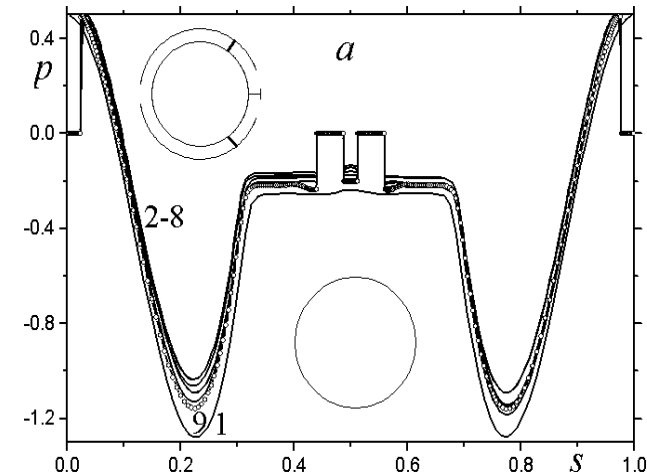
Вентилятор в отвод канале

$$\Delta p = c_0 - c_1 V_n - c_2 V_n |V_n|$$

$$C_0=0; C_1=0; C_2=Ks$$

Осредненные спектры обтекания
кругового цилиндра (a) и цилиндра в
футляре с окнами (b-j). $Ks=0$ (b), 0.5(c),
1(d), 2(e), 5(f), 7(g), 10(h), 15(i), 20(j)

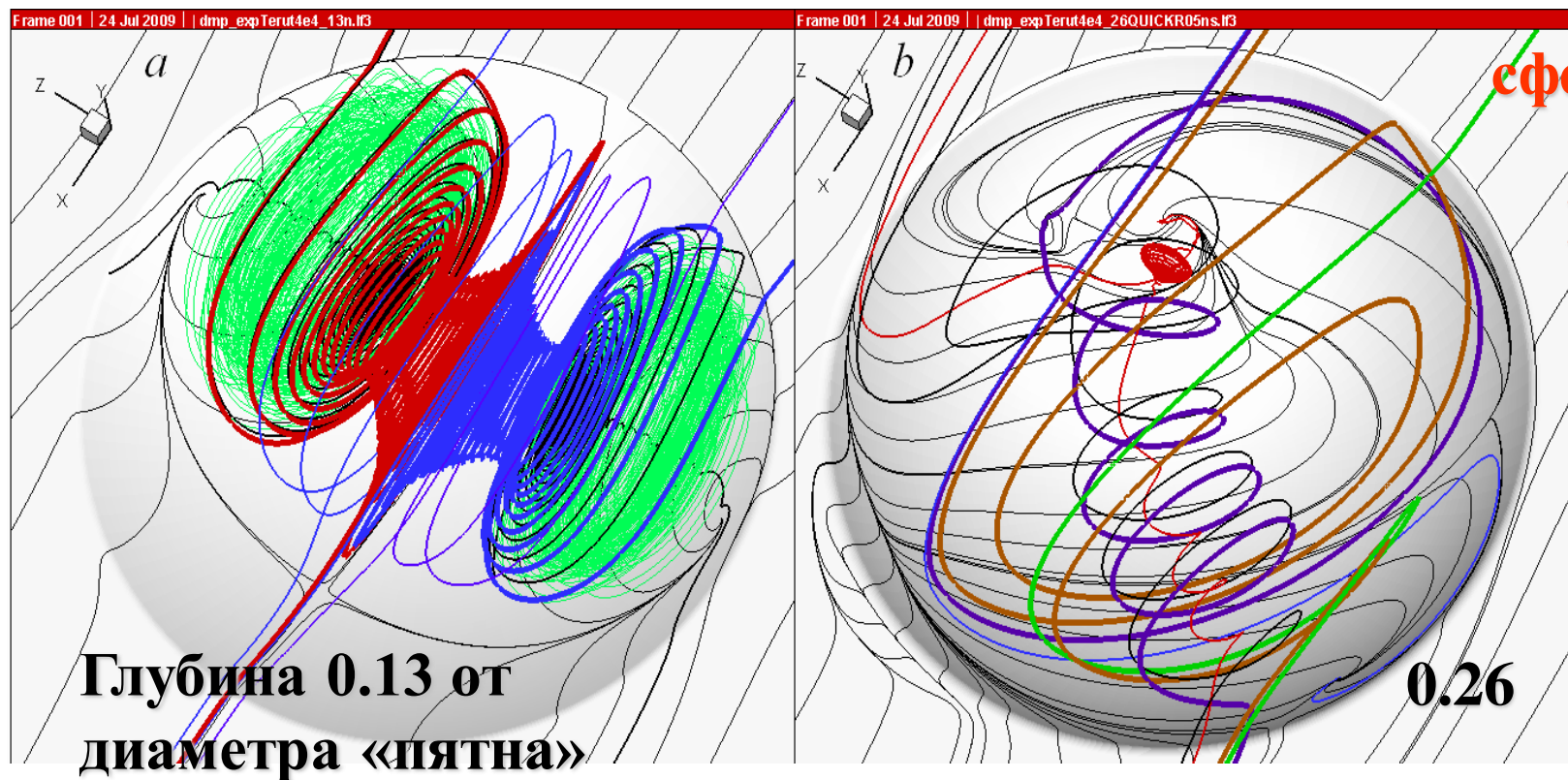




Сравнение
поверхностных
распределений
давления по внешней
стенке (1, a), стенке
внутреннего
цилиндра (b,c) и
внутренней стенке
футляра с окнами
(d,e). 2 - $Ks=0$; 3 - 0.5;
4 - 1; 5 - 2; 6 - 5; 7 -
7; 8 - 10; 9 - 15

Рельефы. Поверхностные вихрегенераторы. Лунки

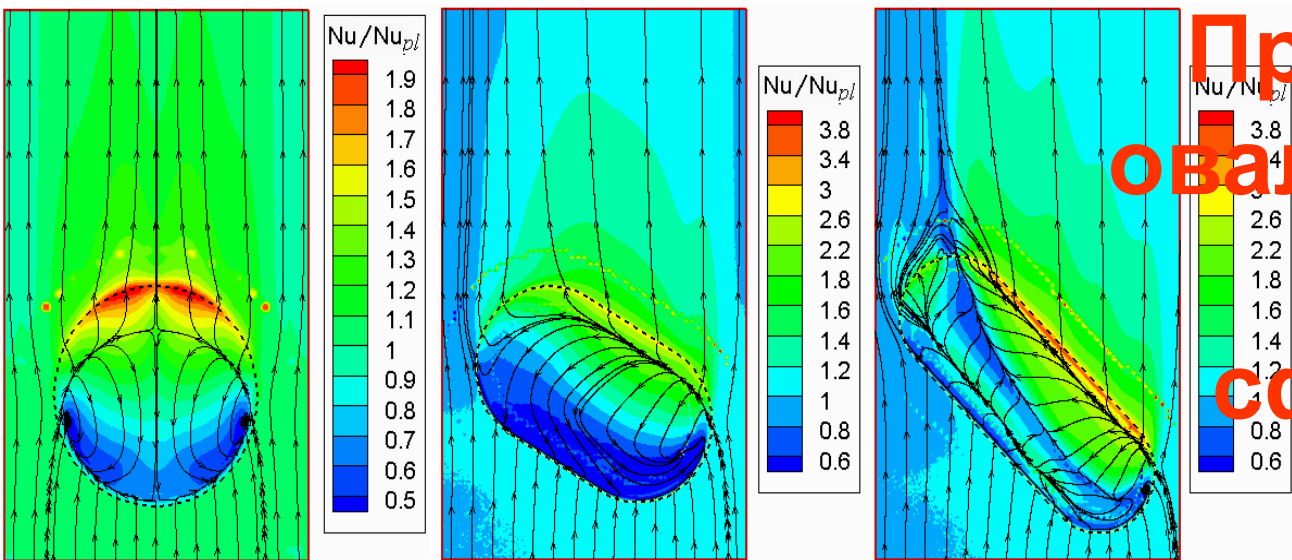
Интенсификация тепло- и массообменных процессов (с 1992г)



сферическая
лунка,
 $Re=40000$,
 $Pr=0.72$

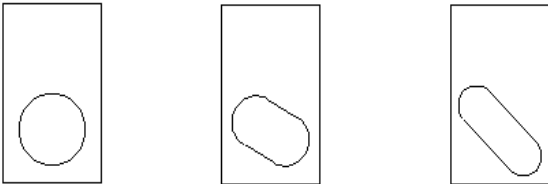
раскрыт механизм смерчевой интенсификации теплообмена при обтекании луночных рельефов и предложены формы лунок, существенно превосходящие сферические аналоги; даны рекомендации по применению луночных технологий в теплообменных аппаратах, энергетических установках (трактах двигателей), при охлаждении устройств электроники (в том числе, в микроканалах)

Лунка на стенке узкого канала (вода, $q=\text{const}$)

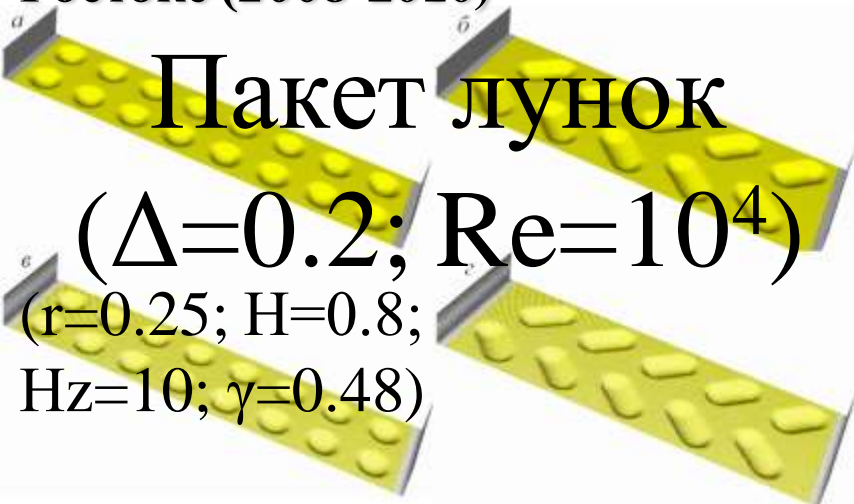


**Превосходство
овальных лунок
над
сферическими**

Проекты с МАИ, ЦКТИ, ИТ СО РАН,
ИТМО АНБ, ИТТФ НАНУ, КГТУ, КПИ,
кафедра термодинамики Университета в
Ростове (2008-2010)



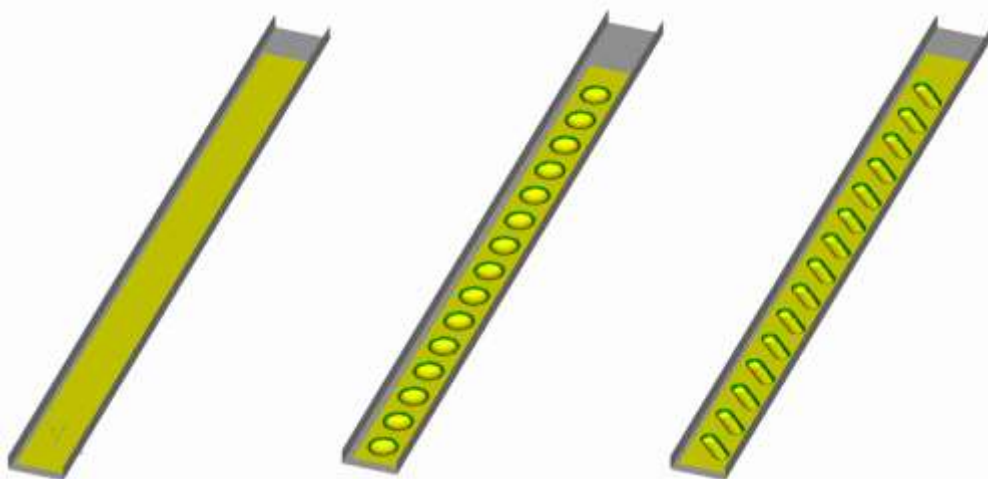
| | | | |
|------------------------------------|-------|-------|-------|
| $\overline{Nu}/\overline{Nu}_{pl}$ | 1.089 | 1.166 | 1.293 |
| ζ/ζ_{pl} | 1.070 | 1.090 | 1.113 |



Пакет лунок
($\Delta=0.2$; $Re=10^4$)
($r=0.25$; $H=0.8$;
 $H\zeta=10$; $\gamma=0.48$)

| Формы лунок | Сферич | Овальные | | |
|--|--------------|----------|---------|---------------|
| | | зигзаг | лесенка | Эксцент р. |
| Расположен ие | Коридо р. | | | |
| Nu_m/Nu_{mpl} | 1.38 | 1.20 | 1.96 | 2.47 |
| ζ/ζ_{pl} | 1.42 | 1.24 | 2.00 | 2.22 |
| $HNE=$ $(Nu_m/Nu_{mpl})/$ (ζ/ζ_{pl}) | 0.97 | 0.97 | 0.98 | 1.11 |

Интенсификация теплообмена лунками на стенке микроканала в масляной среде

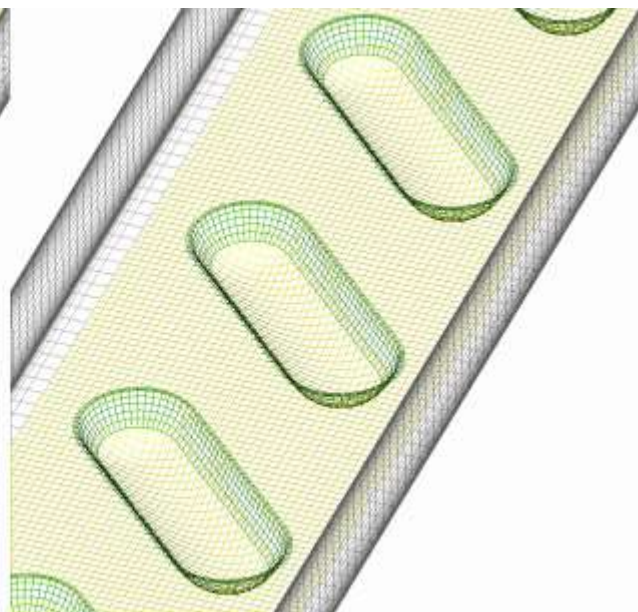
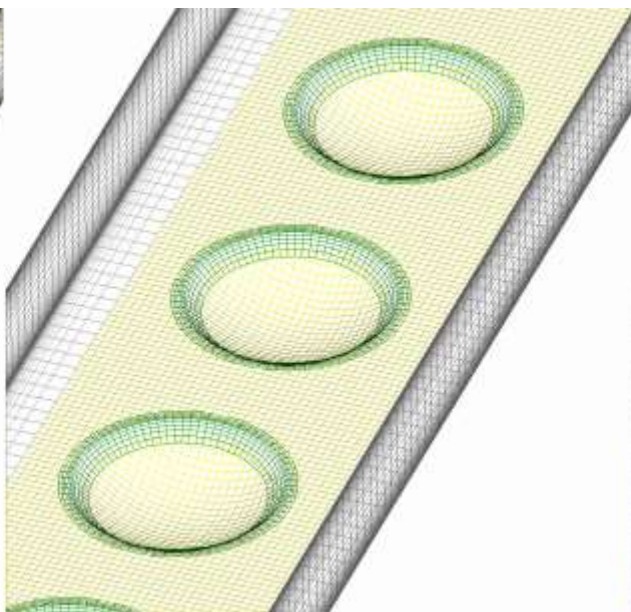
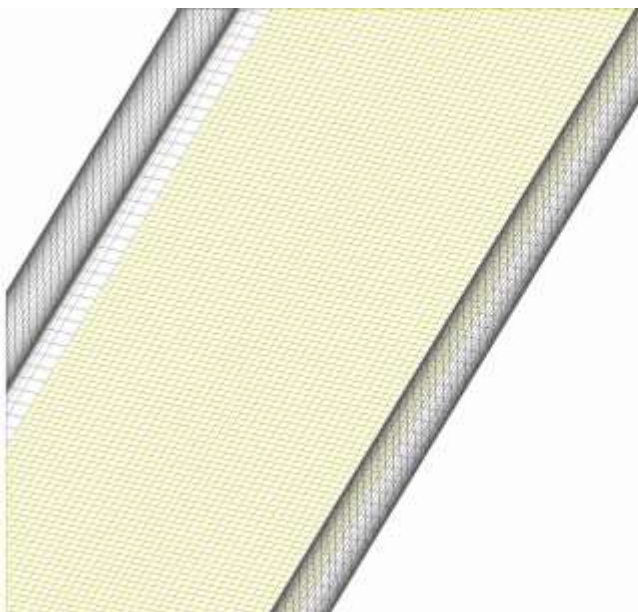


4-х секционный канал

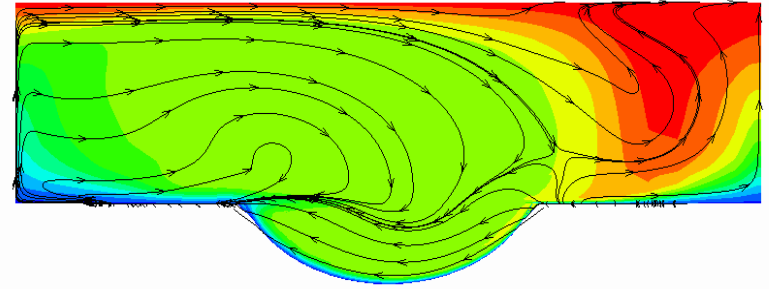
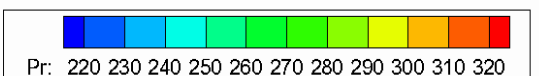
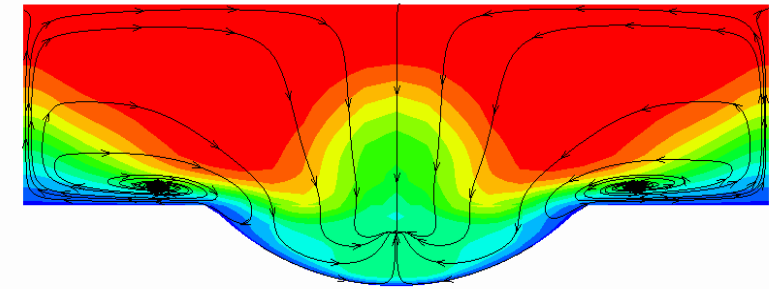
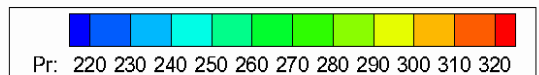
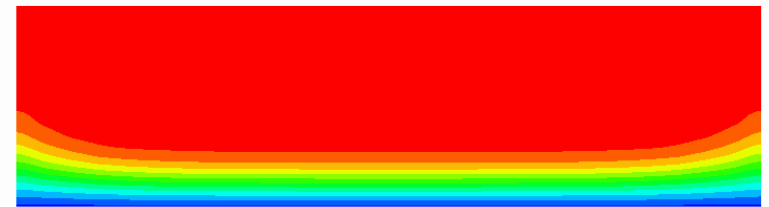
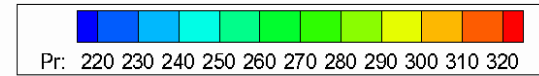
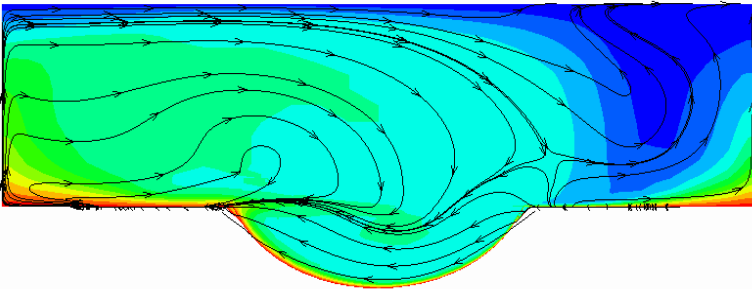
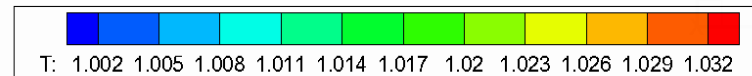
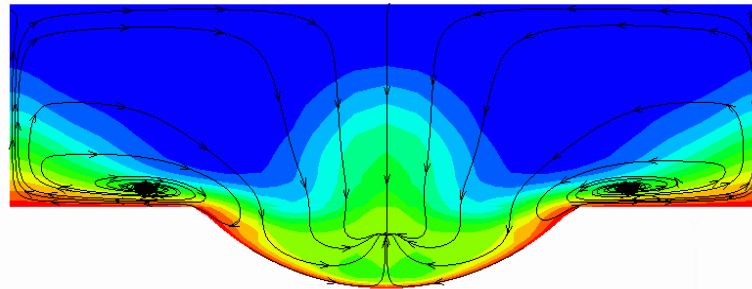
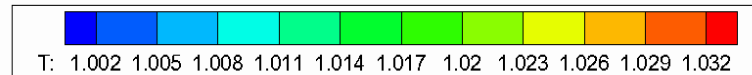
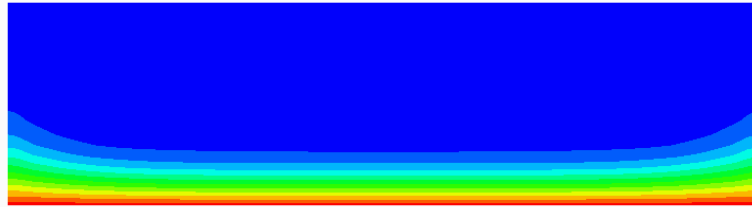
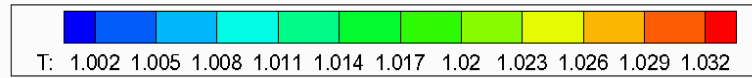
**Рабочая среда – трансформаторное
масло**

Глубина лунок 0.2

$Re=308$

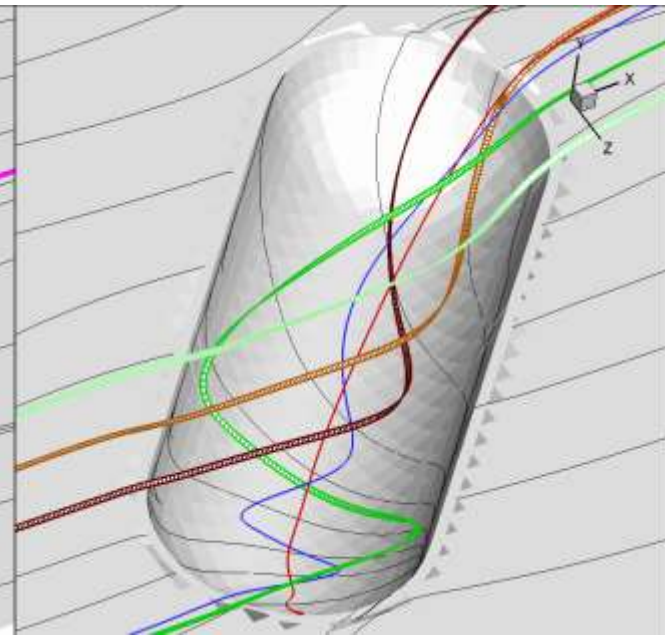
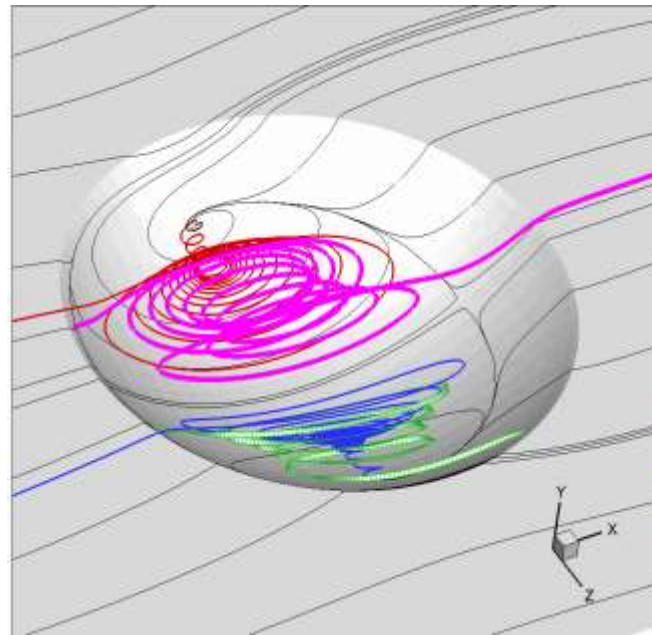
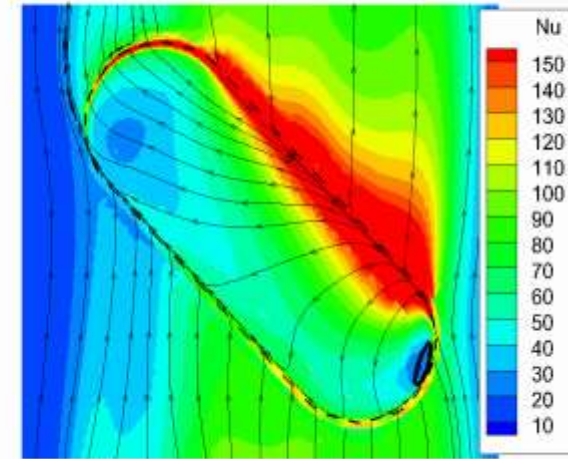
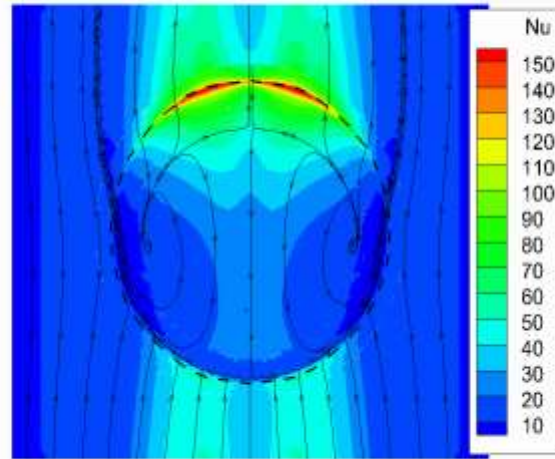
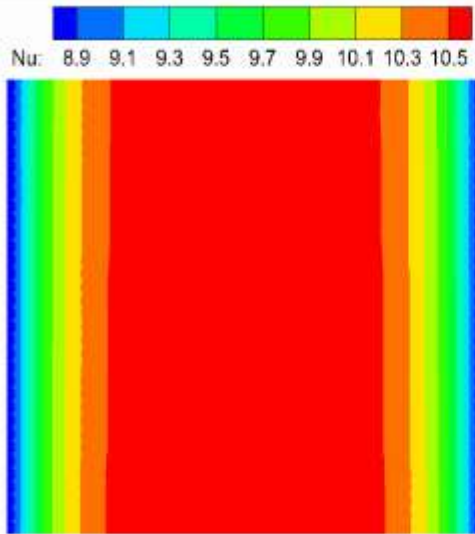


Сравнение полей температуры и числа Прандтля



134
лунка

Увеличение теплоотдачи и интенсификация вихревых структур



1 – $\zeta=0.3293$, $Nu=10.3$

2 – 0.3066, 25.4

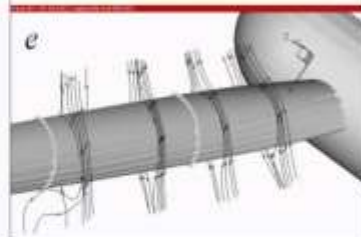
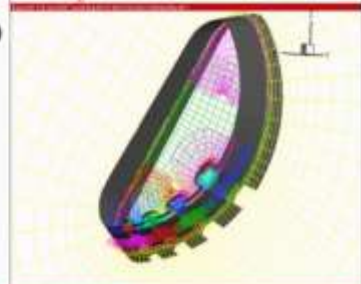
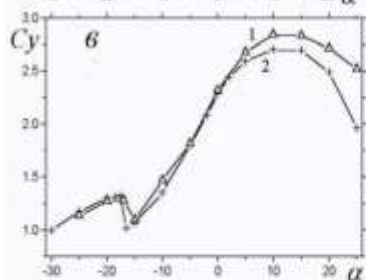
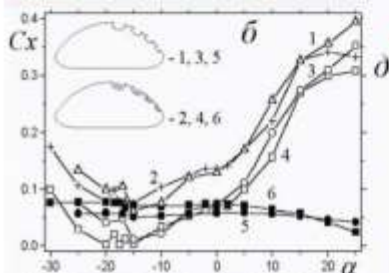
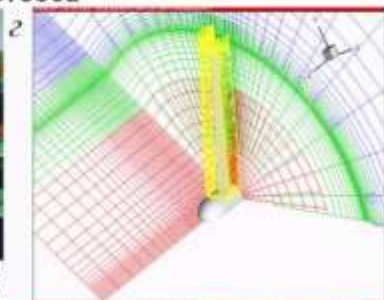
3 – 0.3225, 86.6

2013г - итоги и перспективы

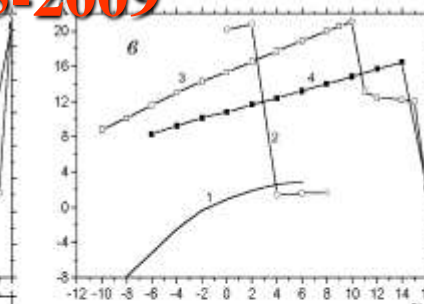


Вихревые технологии : обоснование аппарата ЭКИП с вихревыми ячейками (с 1995), проект Еврокомиссии VortexCell2050 2005-2009

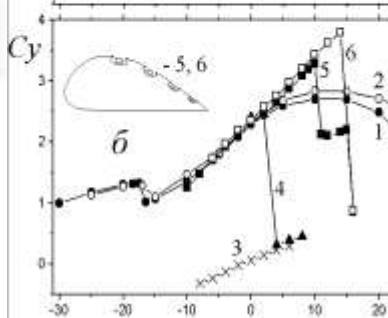
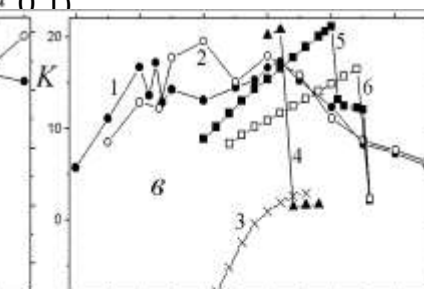
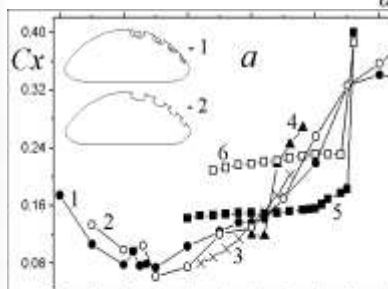
Управление с помощью вихревых ячеек при интенсификации циркулирующих потоков за счет отсоса



1,3,5 - шелевой и 2,4,6 - распределенный по центральному телу отсос при коэффициенте суммарного расхода $c_q=0.0212$, $Re=10^5$
3,4 - C_x без учета энергетических затрат; 5,6 - дополнительное сопротивление из-за организации отсоса в вихревых ячейках



Зависимости от угла атаки α интегральных силовых характеристик толстого профиля с вихревыми ячейками: а - C_x , б - C_y , в - K . 1 - для профиля без в/я; 2 - $s_1=0.7$ (0.05, 0.05, 0.075, 0.1); 3 - $s_1=0.5$ (0.05, 0.05, 0.075, 0.1 соответственно); 4 - $s_1=0.5$ (0.075, 0.075, 0.075, 0.1)



Влияние угла атаки на аэродинамические характеристики толстых профилей (а - C_x , б - C_y) и аэродинамическое качество (в - K). 1 - ЭКИП ($c_q=0.02$ на ЦТ); 2 - ЭКИП ($c_q=0.02$ через щели); 3 - геттингеновский профиль (ГП); 4 - ГП $s_1=0.7$ ($V_n=0.05; 0.05; 0.075; 0.1$); 5 - ГП $s_1=0.5$ ($V_n=0.05; 0.05; 0.075; 0.1$); 6 - ГП $s_1=0.5$ ($V_n=0.075; 0.075; 0.075; 0.1$).

Практические разработки прогнозы

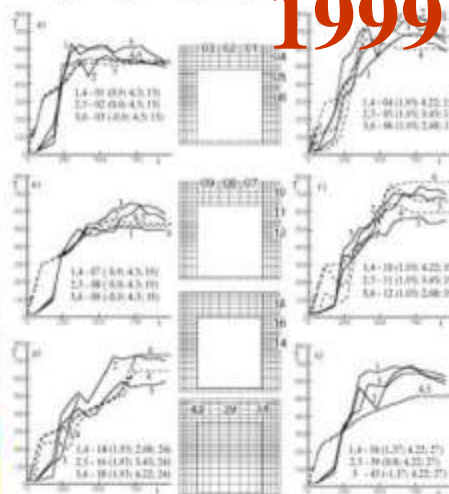
24

- прогностические системы:
- а) прогнозирование опасного сдвига ветра;
- б) прогнозирование задымления тоннеля метрополитена при пожаре в вагоне поезда.

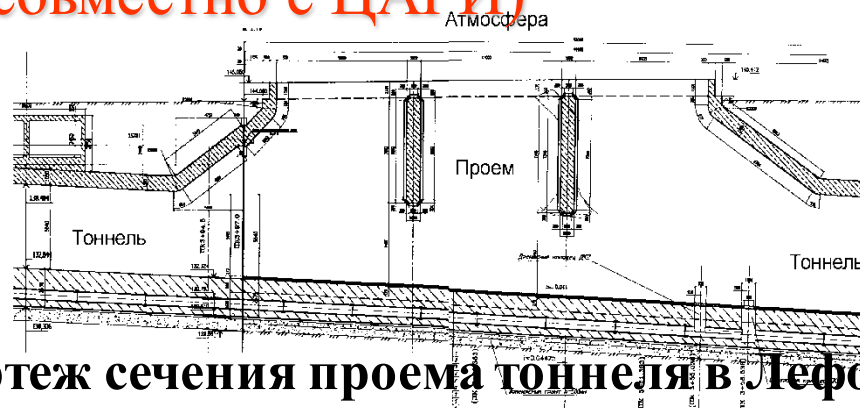
залов метрополитена

1999

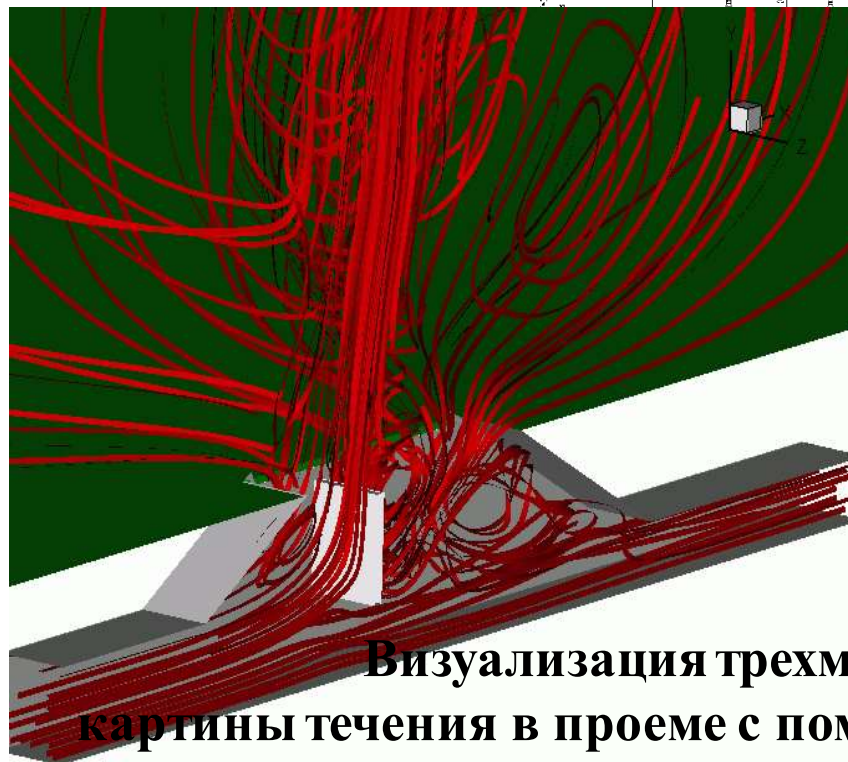
Эксперимент ВНИИ ПО



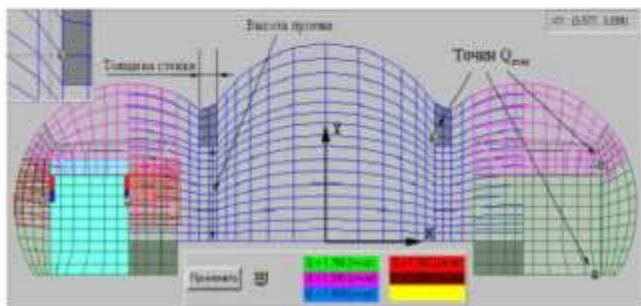
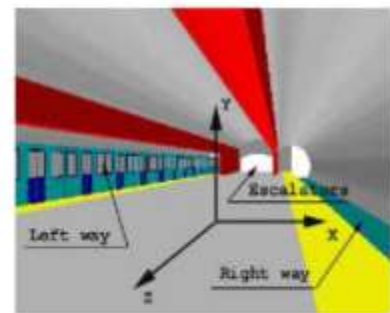
ВЕНТИЛЯЦИЯ АВТОДОРОЖНЫХ ТОННЕЛЕЙ (совместно с ЦАГИ)



Чертеж сечения проема тоннеля в Лефорто



Визуализация трехмерной картины течения в проеме с помощью траекторий меченных частиц



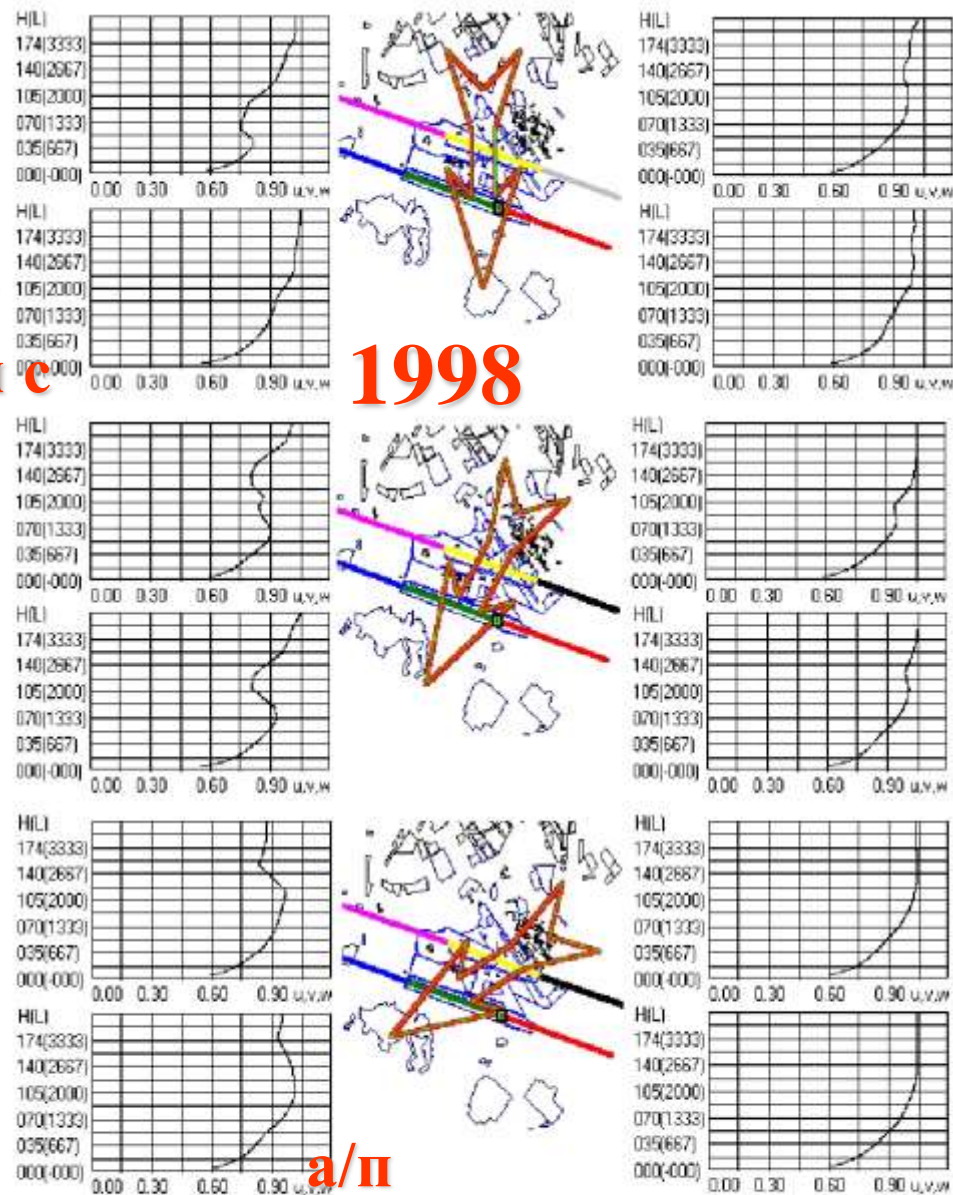
В.В. Бабаскин, С.А. Исаяев, Х.Т. Метов,
И.А. Пышный, В.Е. Чепига

СДВИГ ВЕТРА
В
ЛЕТНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

2002

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ
МЕЗОМАСШТАБНЫХ
МОДЕЛЕЙ
АЭРОДИНАМИКИ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ,
НАЧИНАЯ С 1994Г

Авиационная
метеорология с
1994г

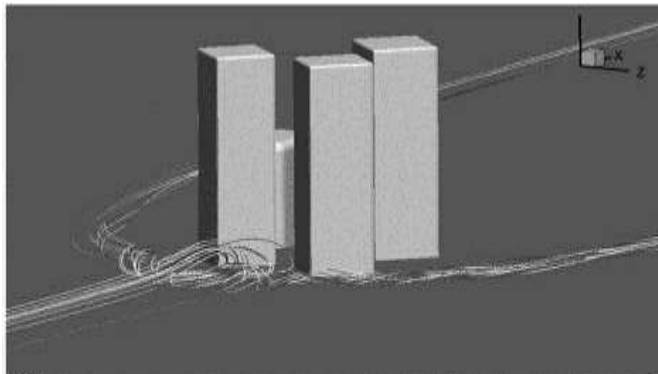


Dynamics of local wind profile in the beginning and the end of two glissades in the airport
«PULKOVO» in vicinity of Sankt-Petersburg for various wind directions

Строительная аэродинамика

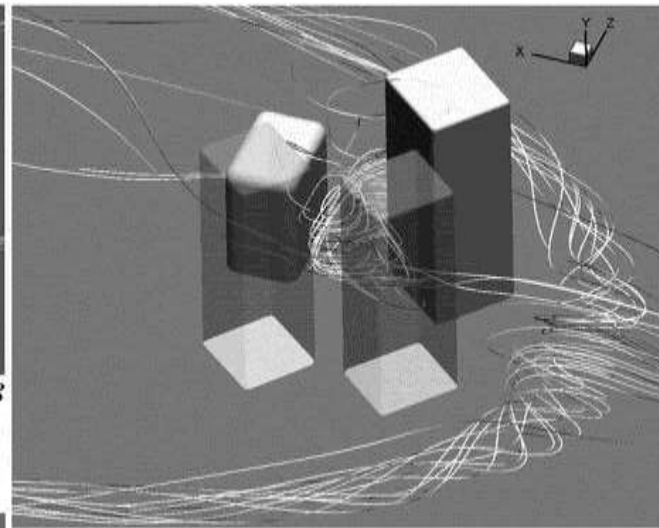
– 3D Unsteady RANS

$Re=10^6$

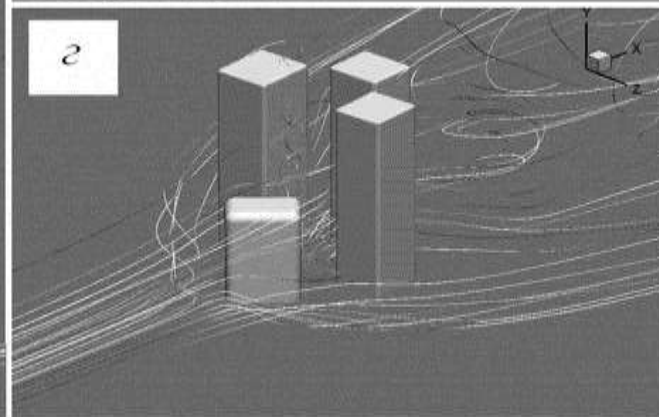
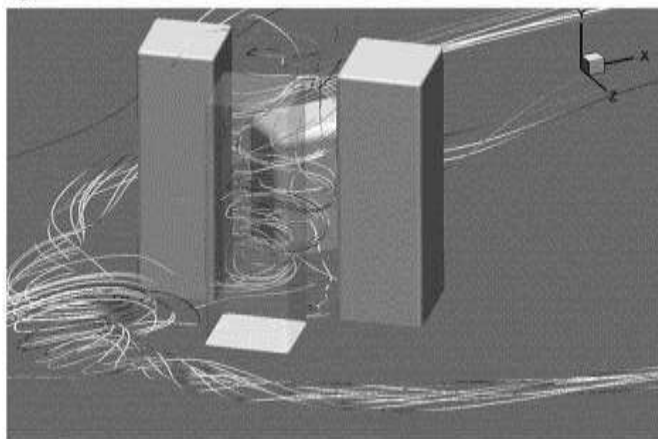


a

б



б



з

RANS&URANS. Пакетные технологии (с 1974)



1989



2001-
2003

Математические модели. MBT(VP2/3)

- допущения: 1) $\bar{\rho} = \frac{1 + \bar{p} \kappa M_0^2}{T}$; 2) подход Рейнольдса

2

$$\nabla \cdot \rho \vec{V} = 0;$$

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V} - \tau) = -\nabla p + S_v;$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \tilde{u}_j h) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\tilde{\mu}}{Pr} \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \left(\frac{\partial p}{\partial t} + \tilde{u}_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{0j} \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x} \right) (\kappa - 1) M_0^2$$

| | |
|----------------|--|
| SA | Спаларт-Аллмарес (1992) Лауиндер-Спаларт (1992) |
| RNG -k-ε | (1986) |
| Realizable-k-ε | (1986) |
| k-ω - MSST | Ментер (1993, 2003) |
| V2F | Дурбин (1995) |

- учет кривизны линий тока: $\mu_t = \mu_{t0} / (1 + C_\kappa Ri_t)$,

μ_{t0} – без учета кривизны; $C_\kappa = 0.02-0.1$ ✓

- сочетание метода пристеночных функций и низкорейнольдсовых моделей [по Ментеру (2003)]

Масштабы

| скорость U | длина d |
|--------------------------|--|
| скорость внешнего потока | диаметр цилиндра, лунки ширина траншеи, каверны |
| среднемассовая скорость | длина хорды |

Диапазоны изменения режимных параметров:

| | |
|-------|------------------|
| Re | $10^2 \div 10^7$ |
| Pr | $0.7 \div 4000$ |
| M_0 | $0 \div 9$ |

$Pr_t = 0.9$; $T_w = \text{const} (373\text{K})$; $T_{\text{inlet}} = 293\text{K}$;
 $Tu = 1.5\%$

2001

Принципиальные особенности MBT и пакета VP2/3 (скорость – давление – 2D и 3D)

Новизна алгоритма в пакете VP2/3

- уравнения в приращениях: $\delta\phi^{m+1} = \phi^{m+1} - \phi^m$; 3

$$L(\phi) = F \rightarrow L_1^h(\delta\phi^{m+1}) = -L^h(\phi^m) + F^m$$

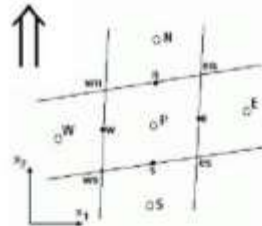
- SIMPLEC** (обобщение на случай $\rho \neq 0$):

$$\left(\frac{k}{\Delta t} \Omega + \sum_f \left(d_f + \frac{-c_f + |c_f|}{2} \right) + \text{Max} \left(\sum_f c_f, 0 \right) \right) p_p' - \left(\sum_f \left(d_f + \frac{-c_f + |c_f|}{2} \right) \right) p_f' =$$

$$-Q_n' - \omega \sum_f c_f \text{Corr}_f^{\text{old}}(c_f) - p_p^{\text{old}} \text{Min} \left(\sum_f c_f, 0 \right), k=1/(RT).$$

РХН-Чоу: $C_{rch} = 0.1$;

$$V_n^* = (V_n^*) - C_{rch} \left(\frac{1}{A_e} \right) [S_e(p_E - p_P) - \Omega_e(\nabla p)_e \cdot \vec{n}_e]$$



- управление сходимостью: грубые схемы и демпфирование в неявной части

- уменьшение численной диффузии (схема Леонарда)

- повышение устойчивости:
 - TVD – схема (UMIST) в уравнениях для $k-\omega$
 - упрощенная версия SIP

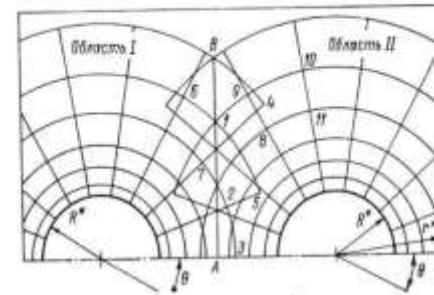
- согласованные профили, рассчитанные параболизированной процедурой вместо фиксированных входных профилей (типа Польгаузена или «1/7»), устраняют скачки в решении

- MBT**: связанные и расчетные ячейки

Установление связей между сетками



MBT развиваются с конца 70-х гг.



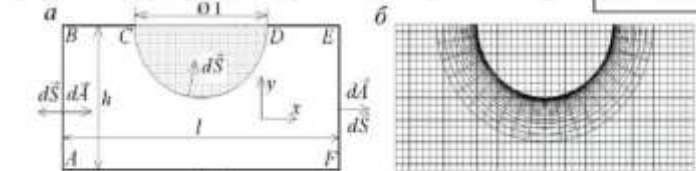
- линейная интерполяция в связанных ячейках эквивалентна консервативной

$$F_p = \sum_{i=1}^4 F_i h_i$$

$$h_i = \text{vol}(P, P_w, P_n, P_k) / \text{vol}(P_1, P_2, P_3, P_4)$$

- новые процедуры коррекции перепадов давления и среднемассовой температуры для задач с

периодическими граничными условиями (ПГУ): $\beta = \Delta p / l$; $\beta_T = \Delta T^* / l$.



$$\Delta T^* = \frac{1}{\text{RePr}} \int_{\text{wall}} \frac{\partial T}{\partial n} ds$$

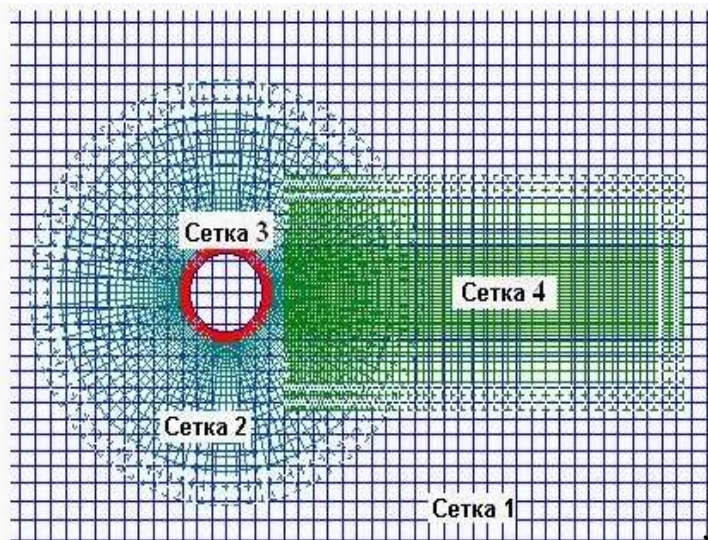
$$T^*(x) = \frac{\int T(r) \vec{v} \cdot d\vec{A}}{\int \vec{v} \cdot d\vec{A}}$$



2005

Развиваемый подход на основе многоблочных вычислительных технологий (MBT). С конца 90-х гг.

*Блоки пересекающихся
разномасштабных сеток вблизи
круглого цилиндра*

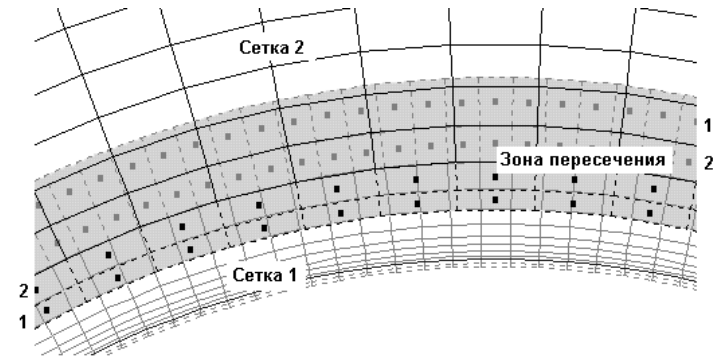


*Совокупность сеток относительно простой топологии,
линейные масштабы которых согласованы с
масштабами улавливаемых характерных структурных
элементов задачи*

Сетки, как правило, близки к ортогональным

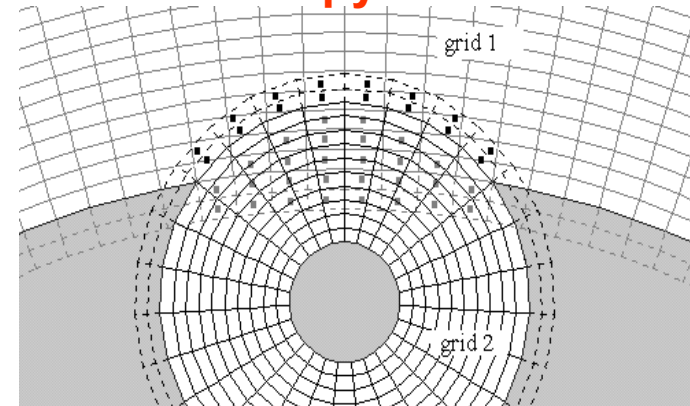


Многоярусные сетки



Многоблочные сетки вблизи твердой поверхности

Частично погруженные сетки



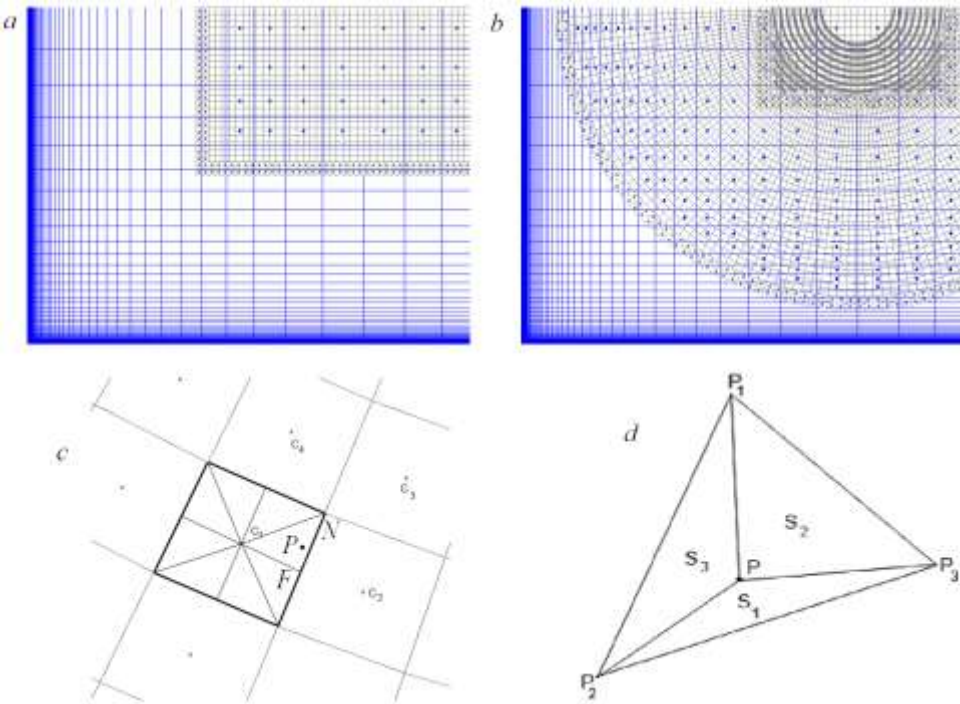
*Многоблочные сетки на твердой поверхности с
каверной*

*Многоблочная вычислительная технология реализована в специализированном пакете VP2/3.
Пакет VP2/3 представляет собой библиотеку задач, объединенных общим решателем.*

Принципиальные особенности МВТ и пакета VP2/3

Обмен данными между сетками

Консервативная квадратичная интерполяция



$$\Phi(\xi, \eta) = c_0 + c_1\xi + c_2\eta + c_3\xi^2 + c_4\eta^2$$

ξ, η - обобщенные координаты

Для нахождения неизвестных коэффициентов используются значения переменной в углах ячейки, а также соотношение

$$\int_S \Phi ds = \Phi_C S$$

Φ_C - значение переменной в центре ячейки

S - площадь ячейки

Искомое значение переменной в точке P Сетки 2 можно представить в виде:

$$\Phi_P = \frac{1}{S_P} \sum_k \int_{D_k} \Phi ds$$

$$F_P = \sum_{i=1}^4 F_i h_i \quad h_i = \frac{\text{vol}(P, P_m, P_n, P_k)}{\text{vol}(P_1, P_2, P_3, P_4)}$$

Кусочно-постоянное распределение переменных. В этом случае интегрирование сводится к значительно более простой задаче определения площадей пересечения ячеек :

$$\Phi(\xi, \eta) = \Phi_C \quad \Phi_P = \frac{1}{S_P} \sum_k \Phi_{C_k} S_k$$

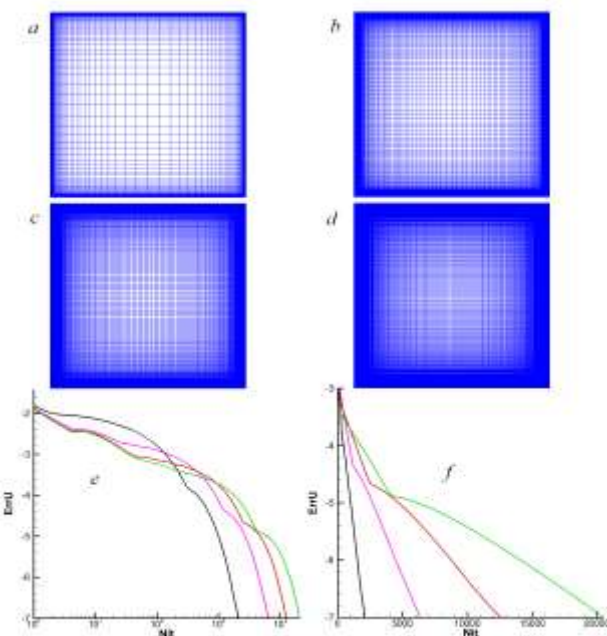
Достижения

- Защита докторской Усачовым А.Е. в ИПМ им.М.В.Келдыша РАН на тему *«Разработка и верификация многоблочных вычислительных технологий в пакете VR2/3 с приложениями к фундаментальным и прикладным задачам аэромеханики и теплофизики»*, по специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

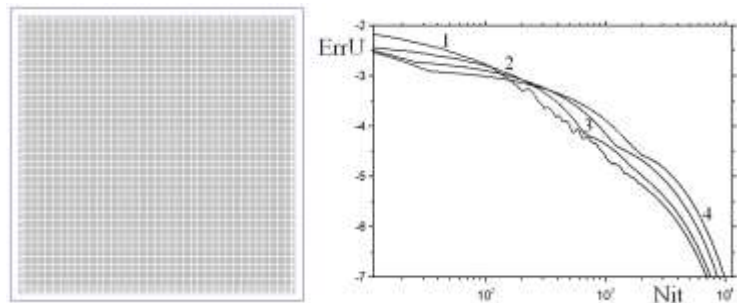
Тестовые расчеты: верификация моделей, алгоритмов и программ

- Классические примеры: каверна с подвижной крышкой и круговой цилиндр поперек потока
- Примеры из базы экспериментальных данных ERCOFTAC
- Специальные эксперименты в аэродинамических трубах, на аэро - и теплофизических стендах и аэробаллистической трассе
- Натурные испытания

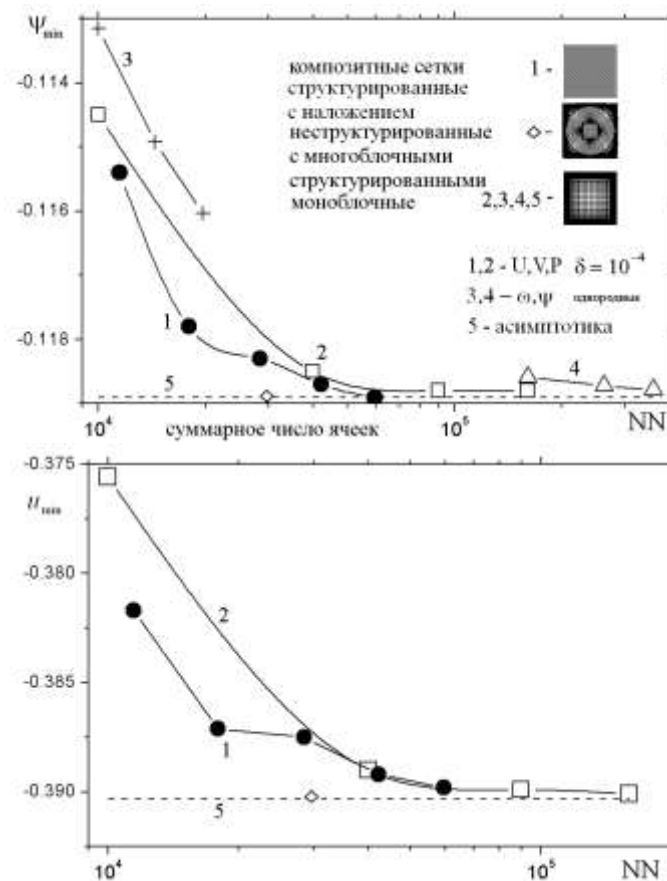
Сопоставление результатов расчетов циркуляционных течений в каверне, полученных на сетках разной топологии, в том числе композитных $Re=1000$



Моноблочные расчетные сетки с различной плотностью 100×100 (a), 200×200 (b), 300×300 (c), 400×400 (d) с фиксированным пристеночным шагом и траектории сходимости с логарифмическим (e) и линейным (f) масштабе. В качестве начальных приближений взяты решения при $Re=10^2$.

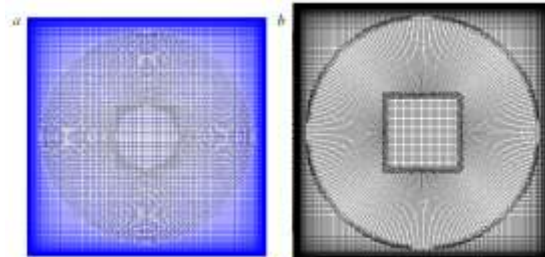


Траектории сходимости при расчетах на композитных сетках, сочетающих : фиксированную внутреннюю равномерную сетку 100×100 , покрывающую квадратную зону размером 0.95×0.95 , и внешние сетки различной плотности. 1 – $N=100$; 2 – 150; 3 – 200; 4 – 250. В качестве начальных приближений взяты решения при $Re=10^2$.



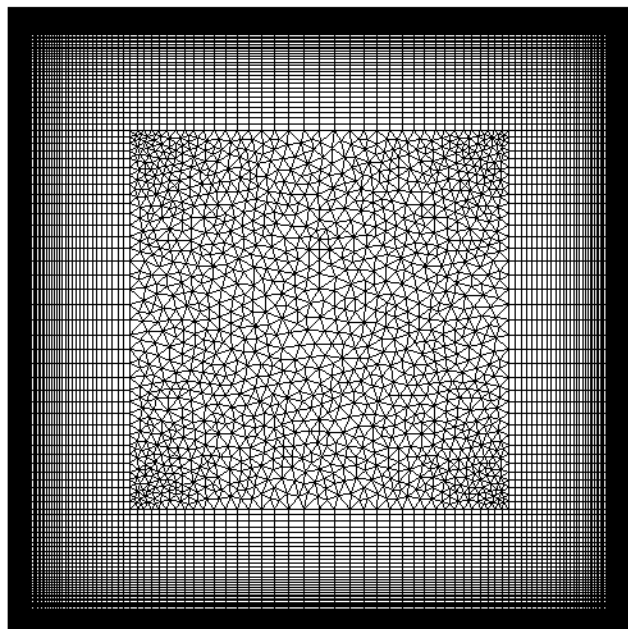
Сравнение зависимостей минимальных величин функции тока и продольной скорости от суммарного числа расчетных ячеек для композитных неструктурированных и структурированных и моноблочных сеток.

Многоблочные структурированные с наложением (a) и композитные неструктурированные (b)



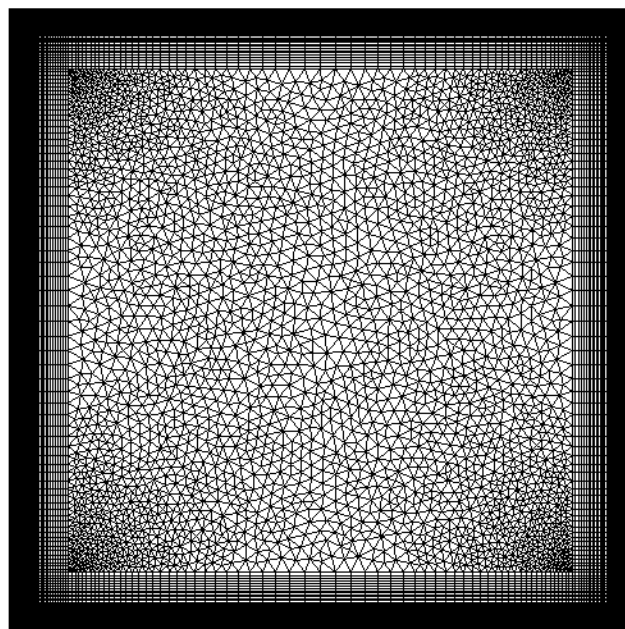
Сравнение неструктурированных и композитных сеток

NN=42142



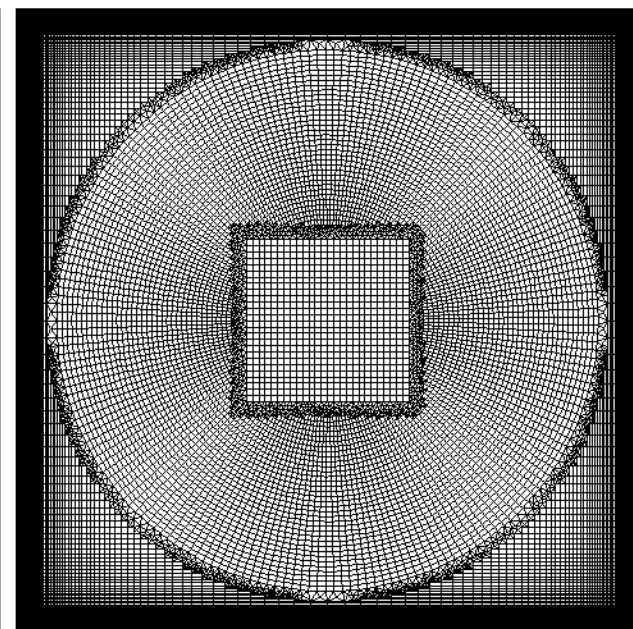
-0.11907

51324



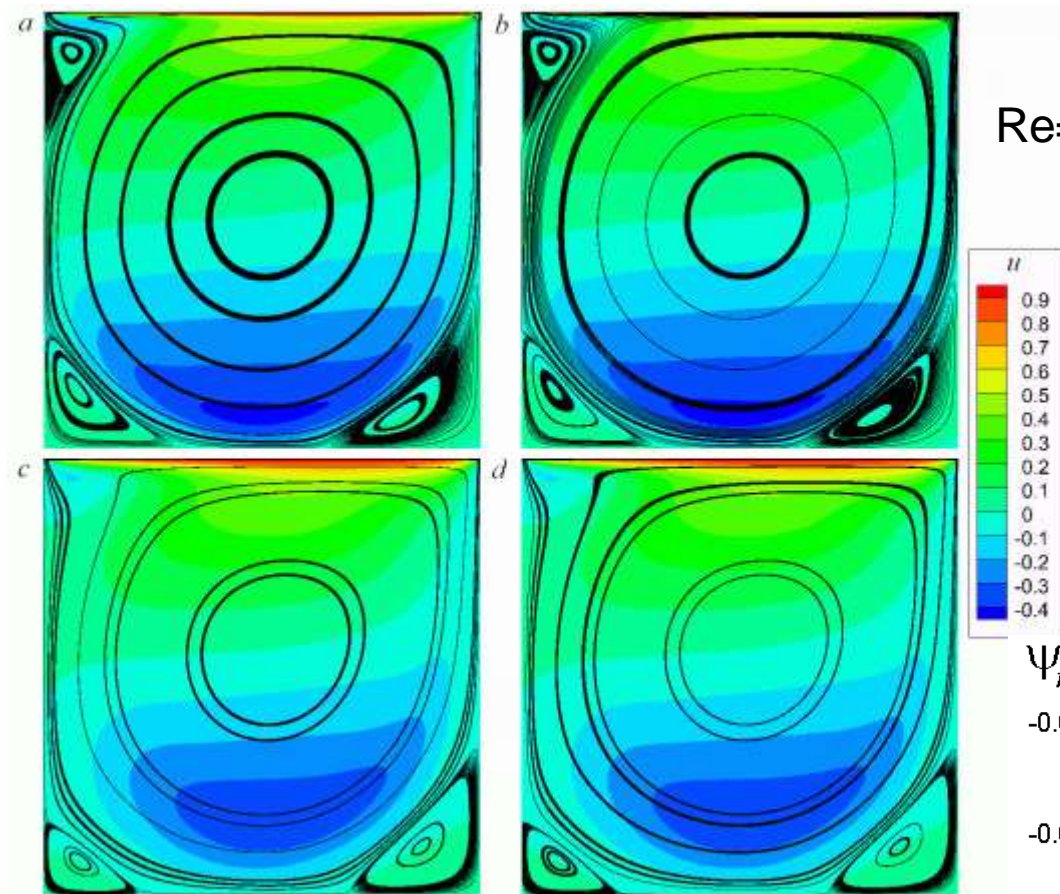
-0.11825

49097



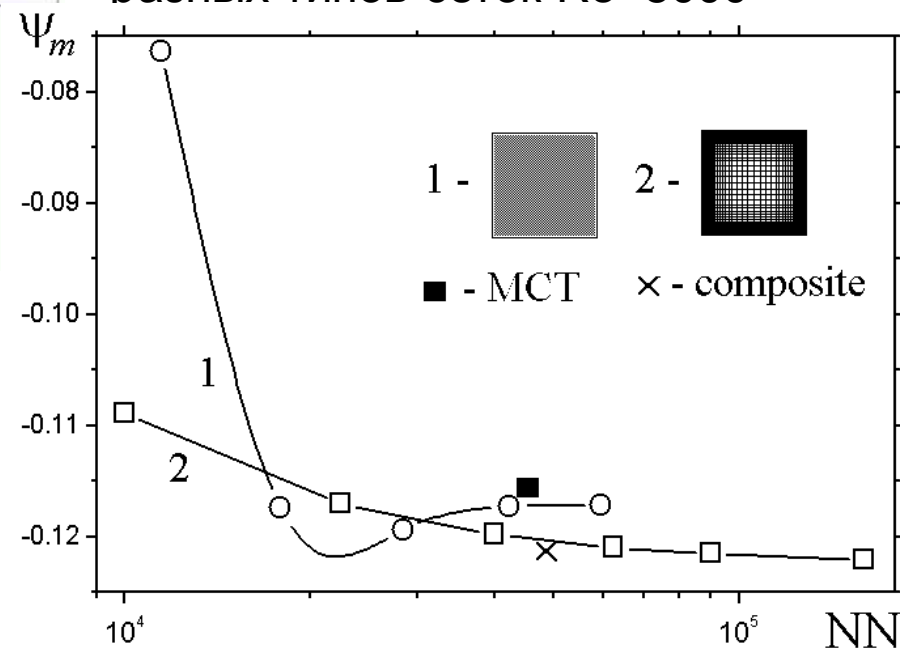
-0.12125

Сопоставление результатов расчетов циркуляционных течений в каверне, полученных на сетках разной топологии, в том числе композитных



$Re=5000$

Зависимость минимальной функции тока от общего количества расчетных ячеек для разных типов сеток $Re=5000$



$Re=1000$

Сравнение картин изополей продольной компоненты скорости u : слева - MBT, справа – композитные неструктурированные сетки с примерно равным количеством ячеек

Верификация MBT – VP2/3 - ЛР

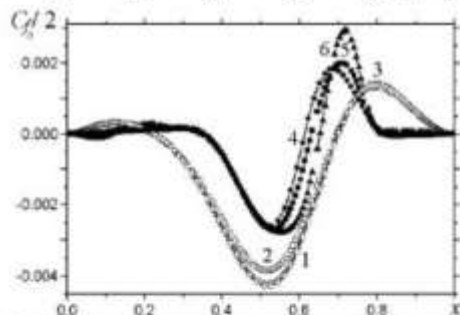
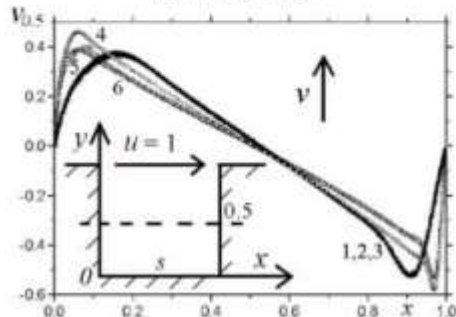
Тестирование и верификация MBT (VP2/3)

1. Ламинарный режим

Течение в каверне с подвижной крышкой

2D

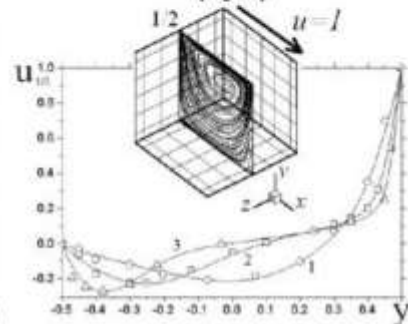
1-3 – $Re=10^3$; 4-6 – 10^4
(квадрат)



| Сетки | |
|-----------|---------------------|
| 1,2,4,5 | Структурированные |
| 3,6 | Неструктурированные |
| Пакеты | |
| 1,4 | VP2/3 |
| 2,3,5,6,9 | FLUENT |

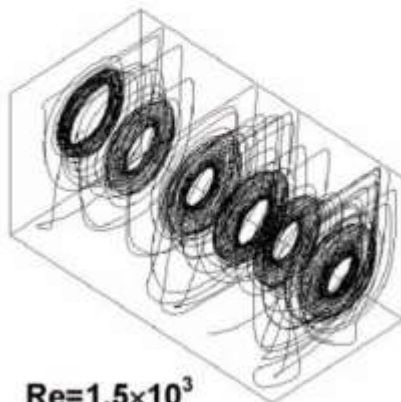
(Сетка 400×400; шаг у стенки 10^{-5})

1 – $Re = 10^2$; 2– 4×10^2 ; 3– 10^3
(куб)



Точки – данная работа;
сплошные линии – расчеты
В.Похилко

траншея



$Re=1.5 \times 10^3$

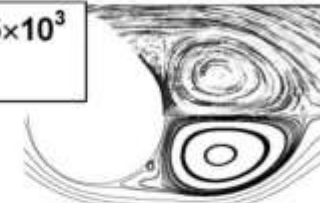
5

Развитие следа за цилиндром

$Re=1.5 \times 10^3$
 $t=1$



$Re=1.5 \times 10^3$
 $t=3$



$Re=5 \times 10^3$
 $t=1$



$Re=5 \times 10^3$
 $t=3$



6

FLUENT

a

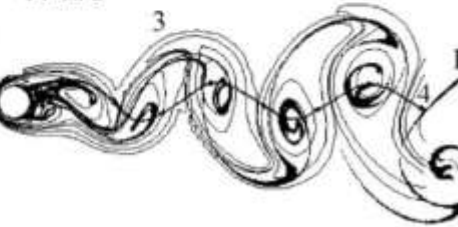


$Re=140$

a – концентрации дыма;
б – завихренность.

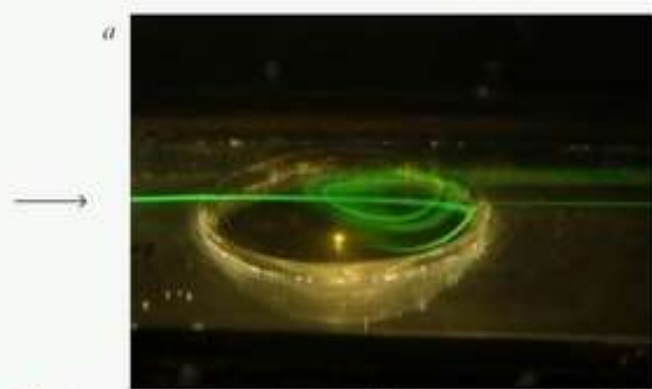
VP2/3

б

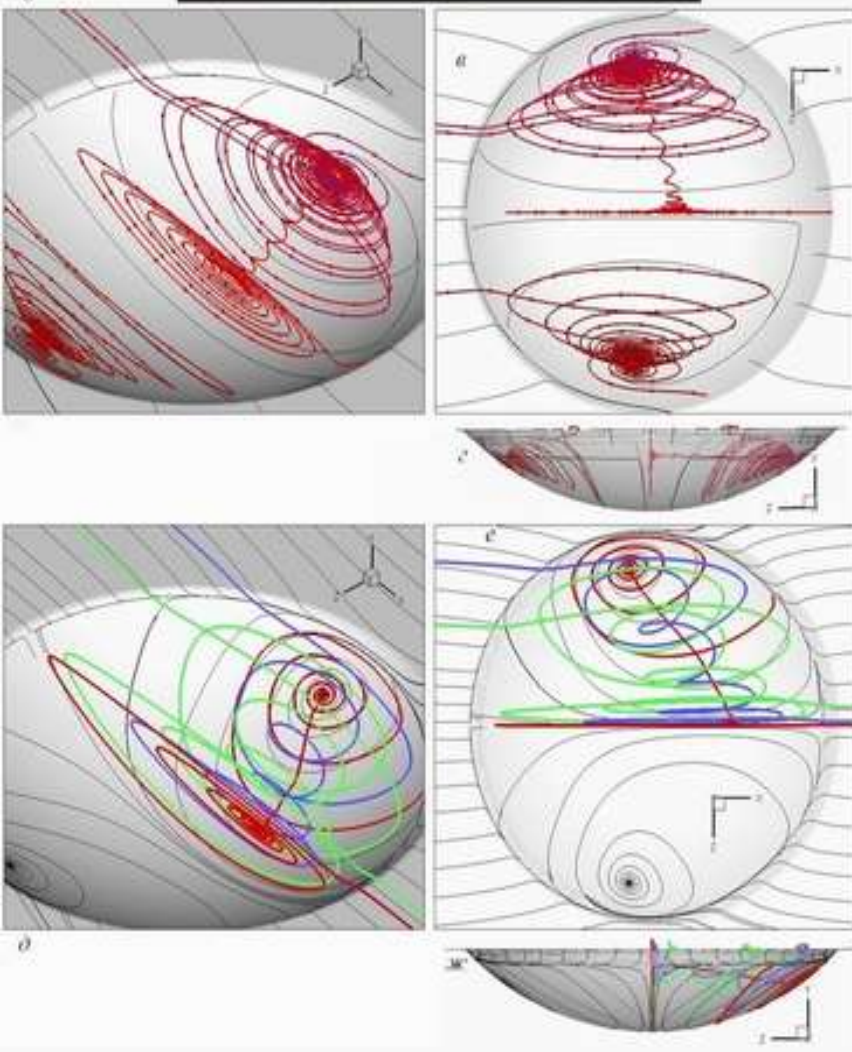


1 – опыт (из атласа М.Ван-Дайка);
расчет:
2 – FLUENT;
3 – VP2/3 ;

4 – траектории жидких частиц, введенных в окрестности места отрыва на цилиндре

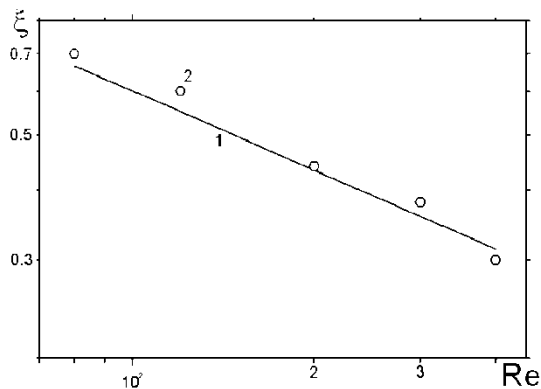


Картина визуализации структуры течения в лунке при Re порядка 1000-2500(*а*) и сравнение компьютерных картин вихревых структур в лунке при $Re=1000$ (*б-г*) и 2500 (*д-ж*).
 Эксп.- ЦНИИ им.акад. А.Н.Крылова

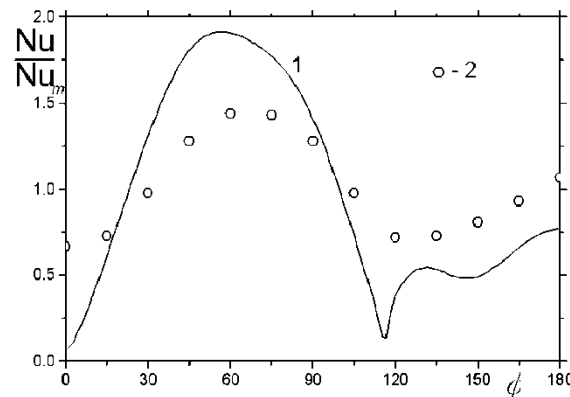


**Пространственные
 ламинарные
 отрывные течения
 в гидроканале с
 лункой и при
 обтекании
 цилиндра с диском**

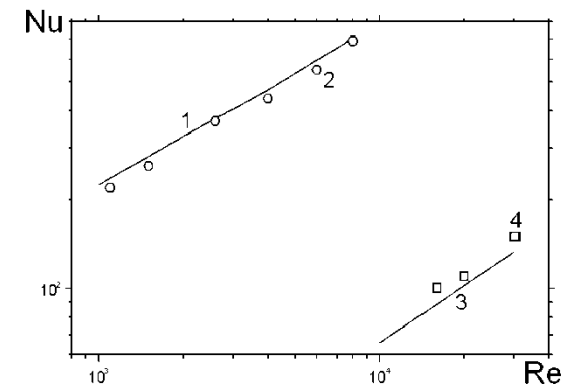
РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА В ПАКЕТЕ ЦИЛИНДРОВ В ВОЗДУШНОЙ И МАСЛЯНОЙ СРЕДАХ (эксп. Жукаускаса)



Сравнение расчетных (1) и экспериментальных (2) гидравлических потерь в шахматном пакете труб 1.5×1.5 Эксперимент Жукаускаса.



Сравнение расчетного (1) и экспериментального (2) относительной местной теплоотдачи по контуру цилиндра в коридорном пучке труб 1.3×1.3 . 1,2 – пучке при $Re=236$ (отсчет ТМ; 3,4 – воздух от передней критической точки)

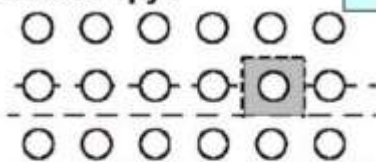
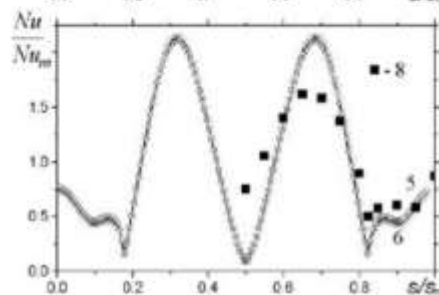
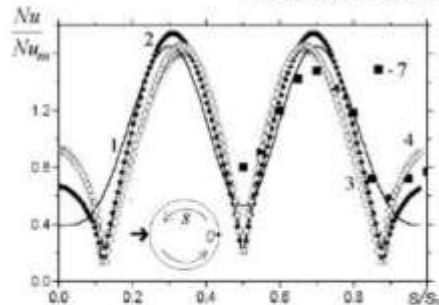


Сравнение расчетной (1,3) и экспериментальной (2,4) теплоотдачи от удаленного цилиндра в шахматном пакете труб 1.5×1.5 . 1,2 – масло, 3,4 – воздух

Верификация МВТ – VP2/3

Теплообмен в пакете труб

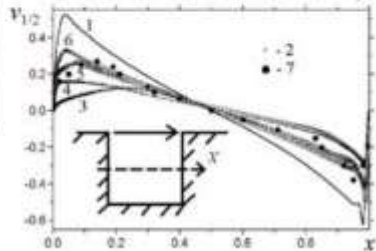
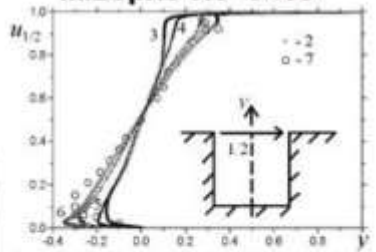
7



| | Re | Pr |
|-----|--------|------|
| 1 | 60 | 0.73 |
| 2 | 60 | 321 |
| 3,4 | 60 | 4000 |
| 5,6 | 10^3 | 57 |
| 7 | 57 | 3947 |
| 8 | 1140 | 321 |

1-3,5 – сетки с шагом 0.01 и
4,6 – с шагом 0.02 (расчет)
7,8 – Жукаускас и др.
(опыт, 1986)

Течение в двумерной каверне $Re=5 \times 10^4$



$$\overline{Nu} = \int Nuds; \quad Nu_m = \overline{Nu} / s_m.$$

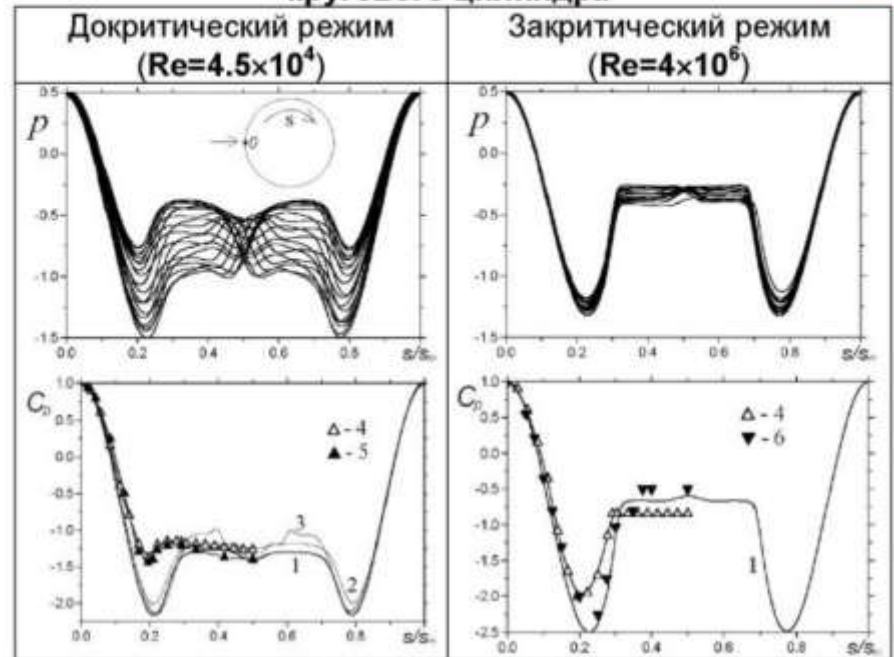
2. Турбулентный режим

| | Модель турбулентности |
|---|-------------------------|
| 2 | SA |
| 3 | RNG $k-\epsilon$ |
| 4 | Realizable $k-\epsilon$ |
| 5 | SST $k-\omega$ |
| 6 | V2F |

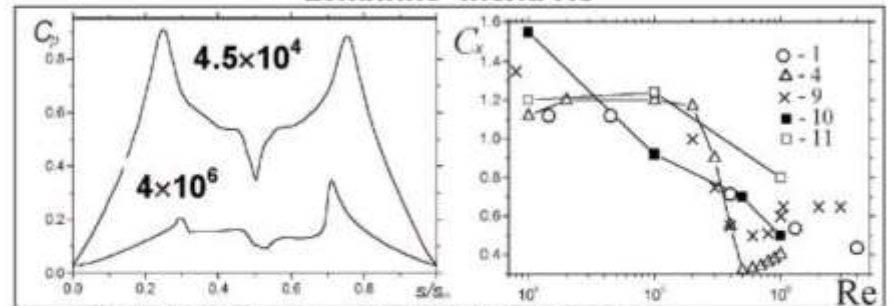
1 - ламинарный режим;
7 - опыт Майлза;
1,2,5 - VP2/3; 3,4,6 - FLUENT.

Нестационарное двумерное обтекание кругового цилиндра

8



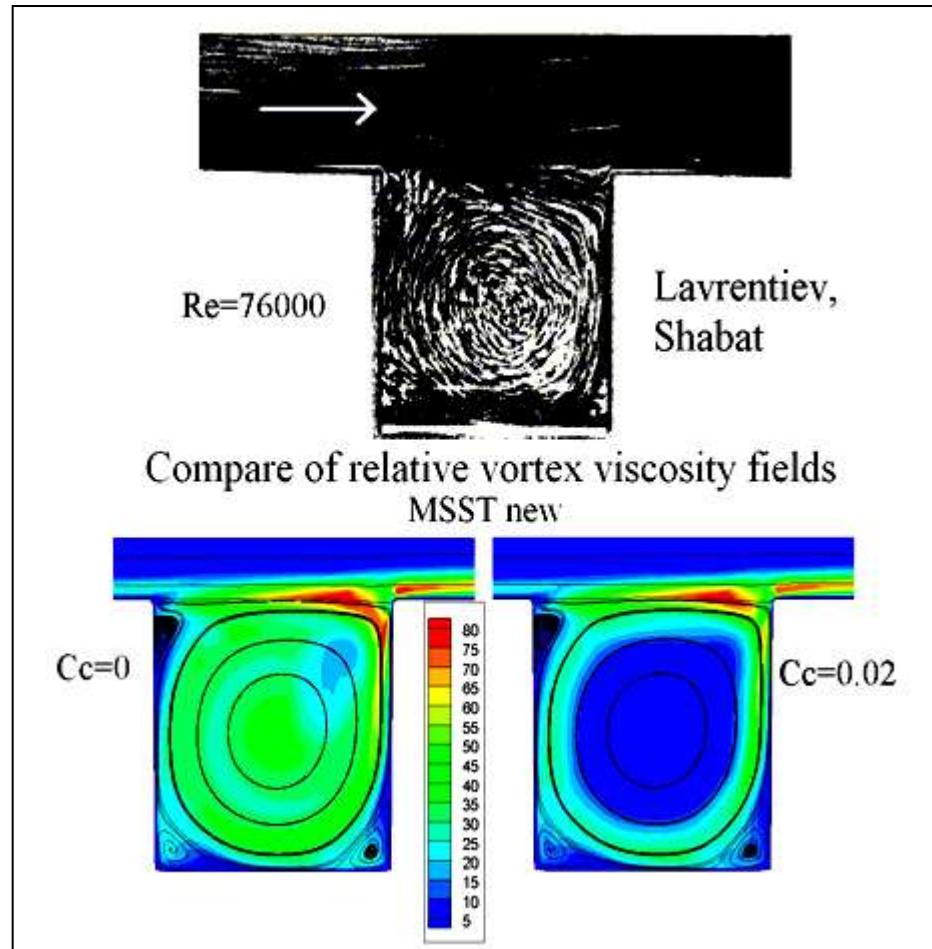
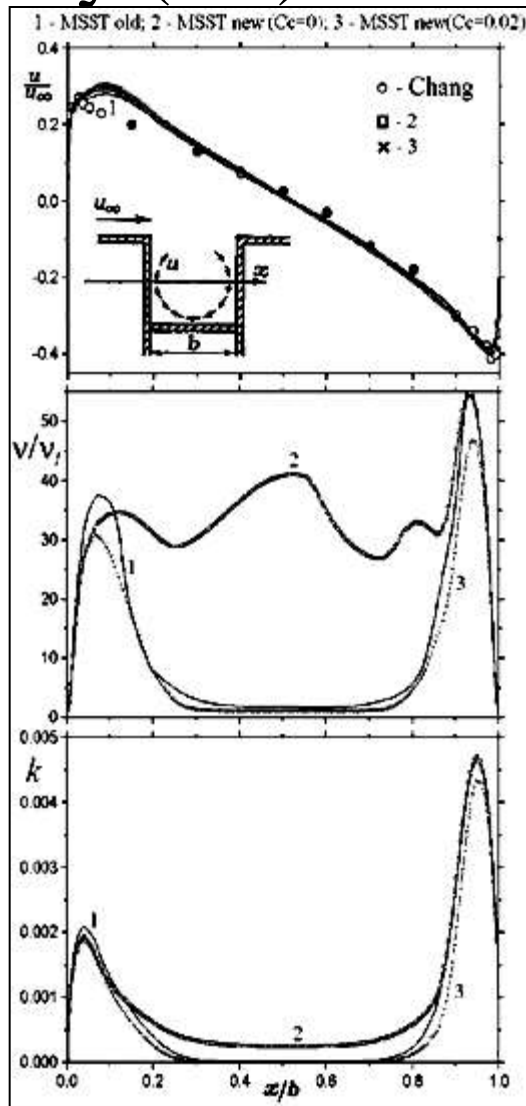
Влияние числа Re



1 – VP2/3 (MSST); 2,3 – FLUENT (MSST, SA): расчеты.
4 – Рошко(1961); 5 – Игараши(1978); 6 – Бычков(1986);
9 – Гуштин(1994); 10 – Сельван(1997); 11 – Тамура и Игараши
(1990); опыты. $p = \bar{p}/(\rho U^2)$.

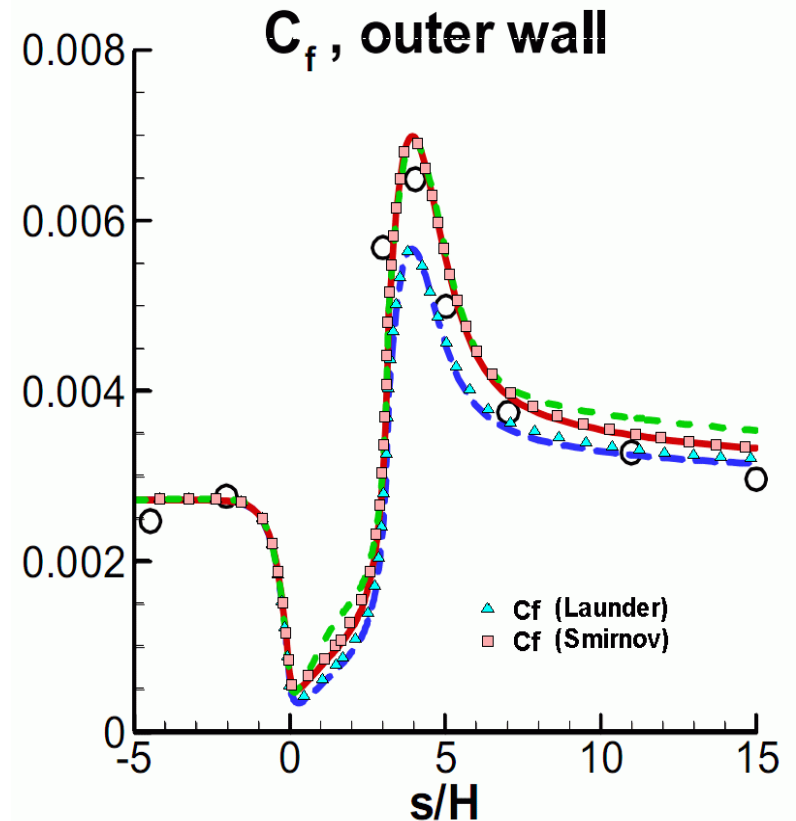
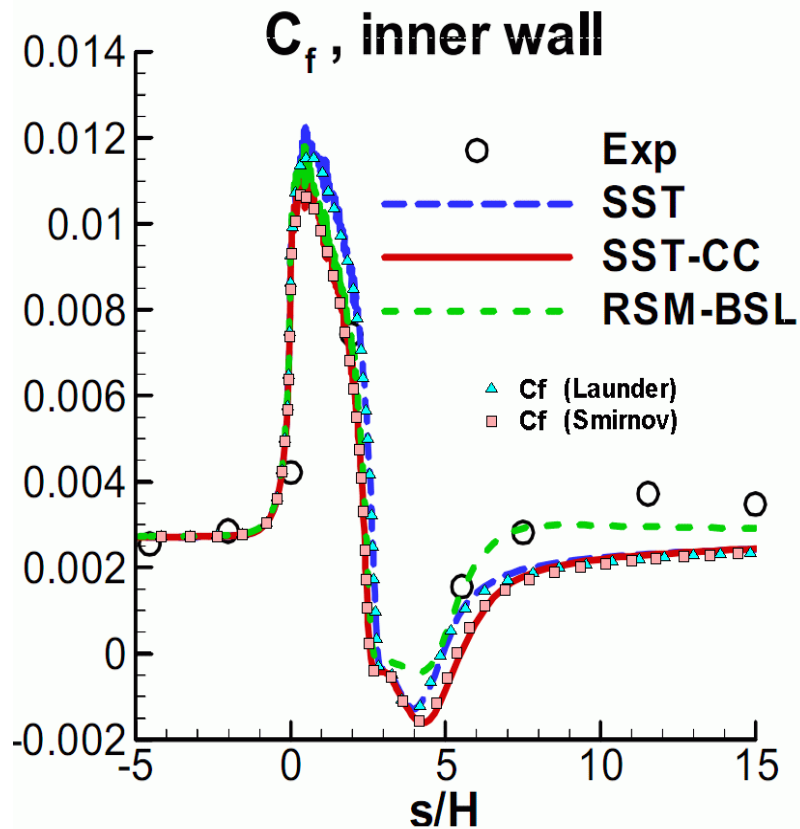
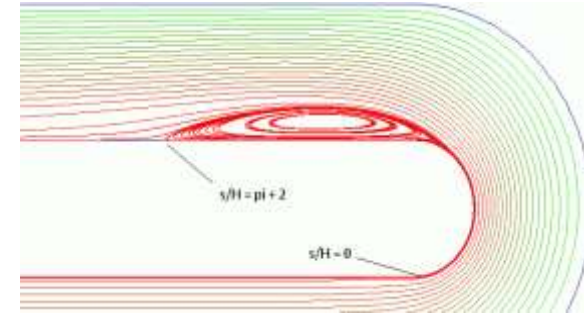
VC RANS Modelling

- VP2/3 Verification and validation studies: lid-driven cavity (2D) MSST validation



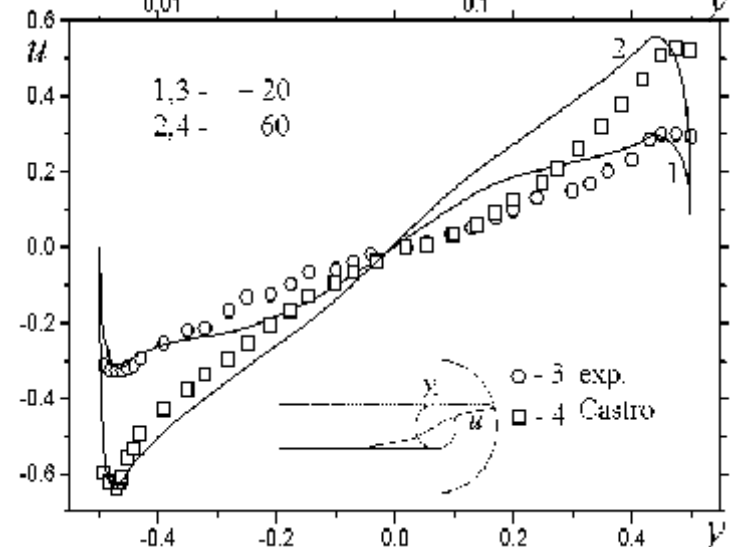
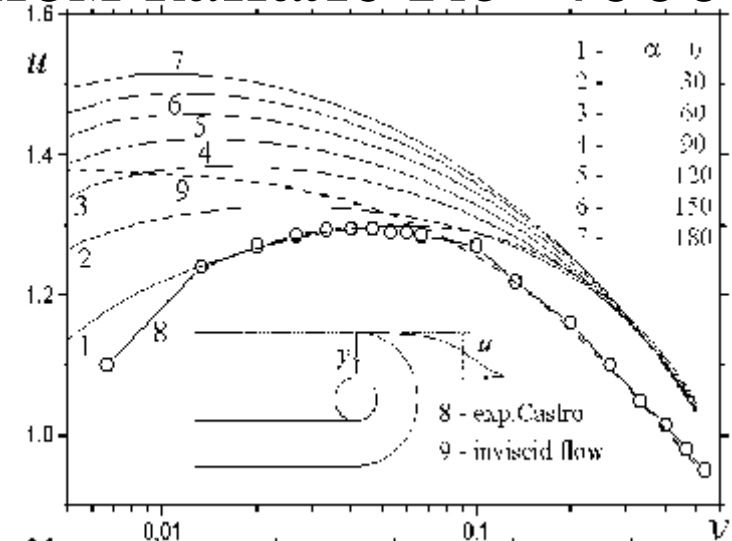
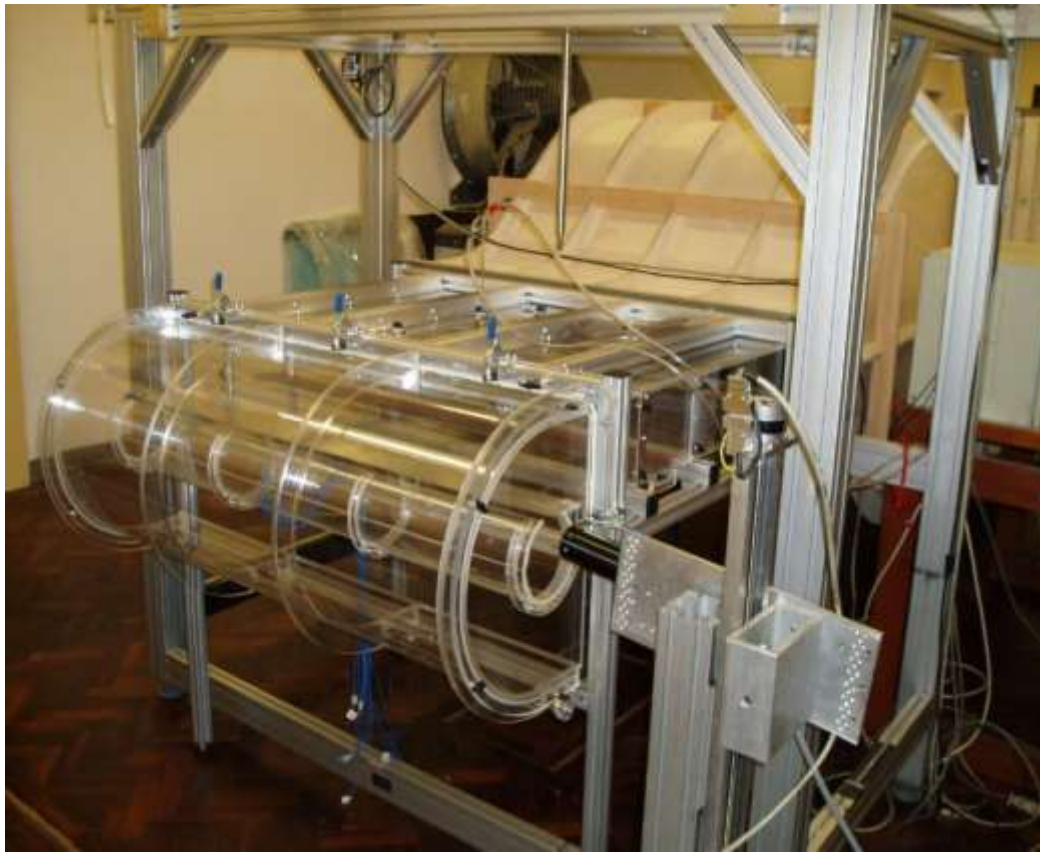
Верификация MBT – VP2/3

- Поворотный канал



MBT – VP2/3

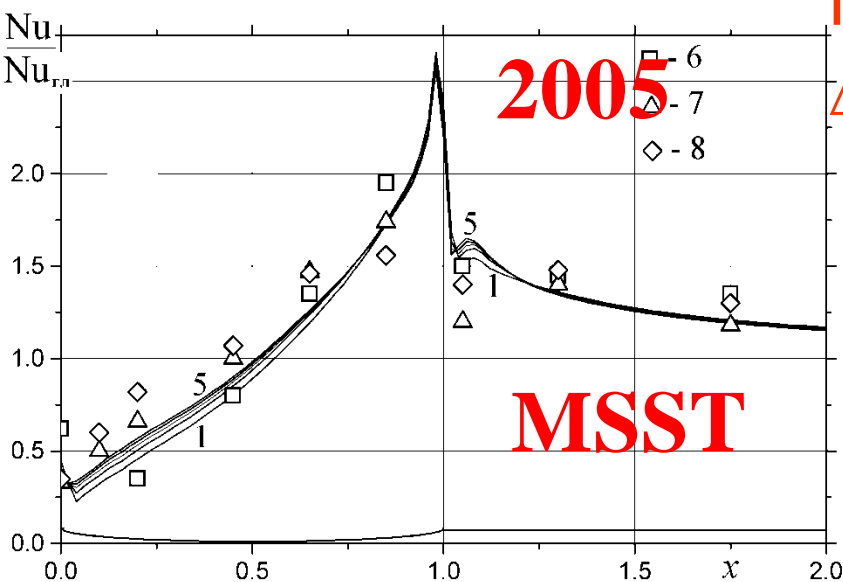
- Круговая каверна в поворотном канале $Re=40000$ – 150000 – 2D



Установка Я.Кастро в ун-те
Саутгемптона

Верификация MBT – VP2/3

Теплообмен при
обтекании траншеи на
стенке $\Delta = 0.13$

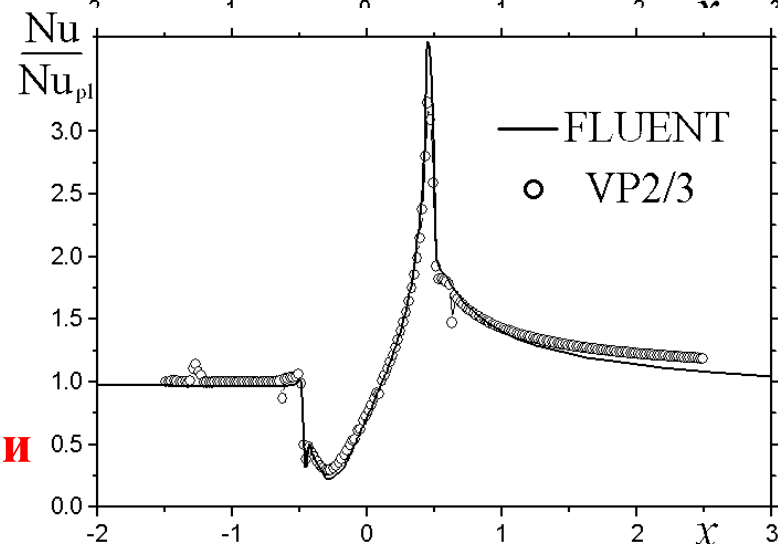
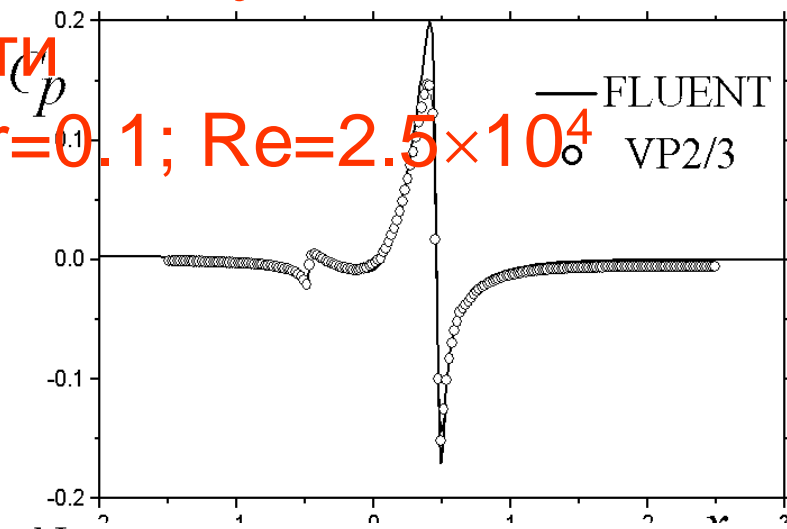


Расчет: 1-5, соответствующие $Re=(2.5-6.5)\times 10^4$,
нанесены с шагом 10^4 . Опыт: 6 – $Re= 2.5\times 10^4$;
7 – 4.5×10^4 ; 8 – 6.5×10^4 (Митяков, Сапожников и
др.). **Градиентные датчики теплового потока**

**MBT и адаптивные сетки
(2005)**

Сравнение расчетов по VP2/3
и FLUENT
сферическая лунка на
плоскости

$\Delta = 0.2$; $r=0.1$; $Re=2.5\times 10^4$



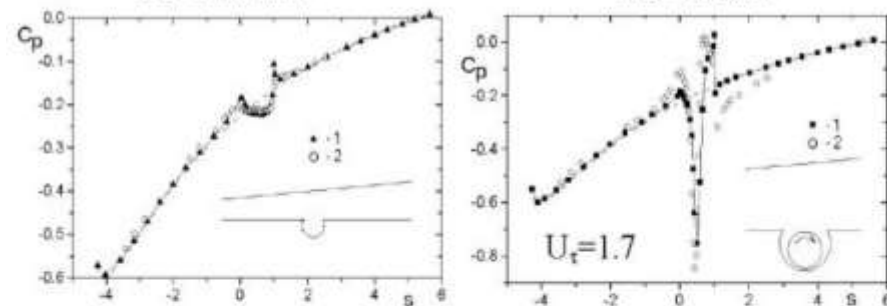
Верификация МВТ – VP2/3

Циркуляционное течение в круговой каверне на стенке расширяющегося канала с вращающимся цилиндром ($\rho = \text{const}$)

11

$Re = 1.35 \times 10^5$

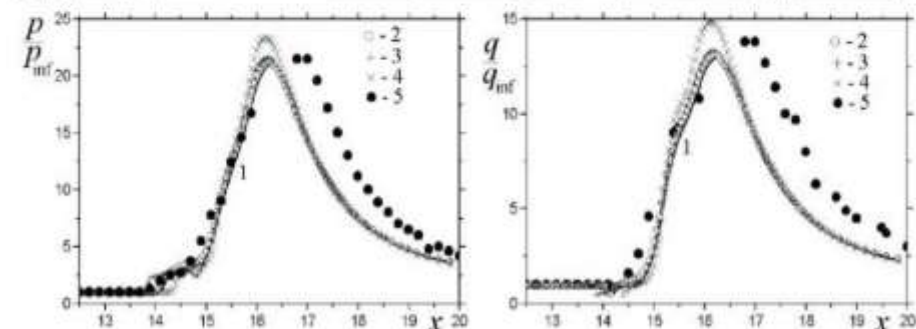
$Re = 6.4 \times 10^4$



Расчет (VP2/3): 1 – MSST. Опыт: 2 – Гувернюк и др. (2002)

Взаимодействие падающего скачка уплотнения с пограничным слоем ($M = 8.2$; $\Theta = 10^\circ$)

Поле изомахов

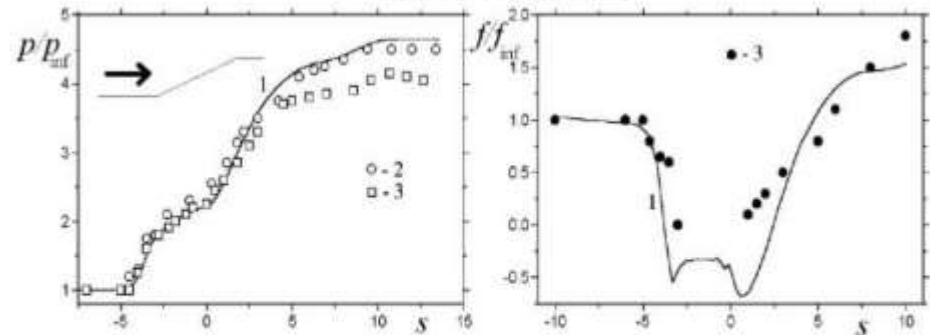


Расчет (VP2/3): 1-4 – MSST. Опыт: 5 – Хорстмен (1992)

- 1 – верхняя стенка изотермическая ($T_w/T_o = 0.28$);
- 2 – верхняя стенка теплоизолированная;
- 3 – введена поправка на кривизну линий тока;
- 4 – схема superbee вместо схемы Ван-Лира.

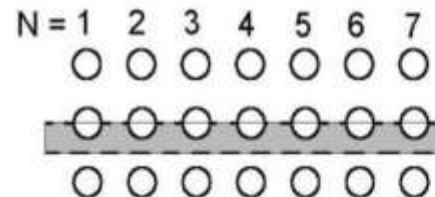
Сверхзвуковое обтекание угла сжатия ($M = 2.85$; $\Theta = 24^\circ$)

12

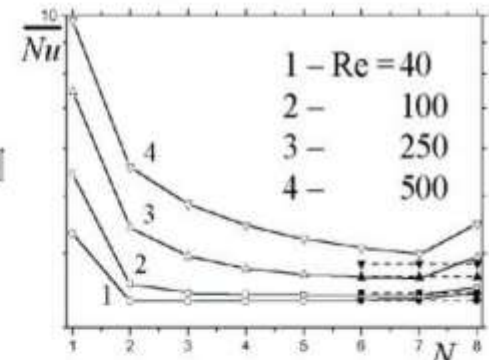


Расчет (VP2/3): 1 – MSST. Опыт: 2,3 – Хорстмен (1992)

Теплообмен около 8-рядного пакета



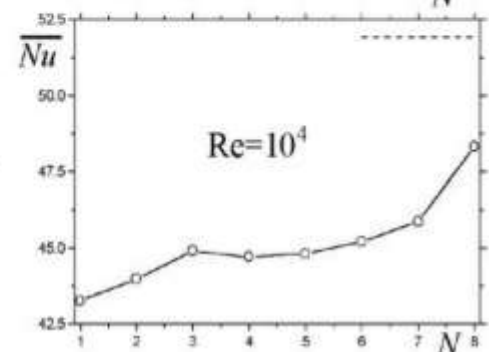
Ламинарный режим



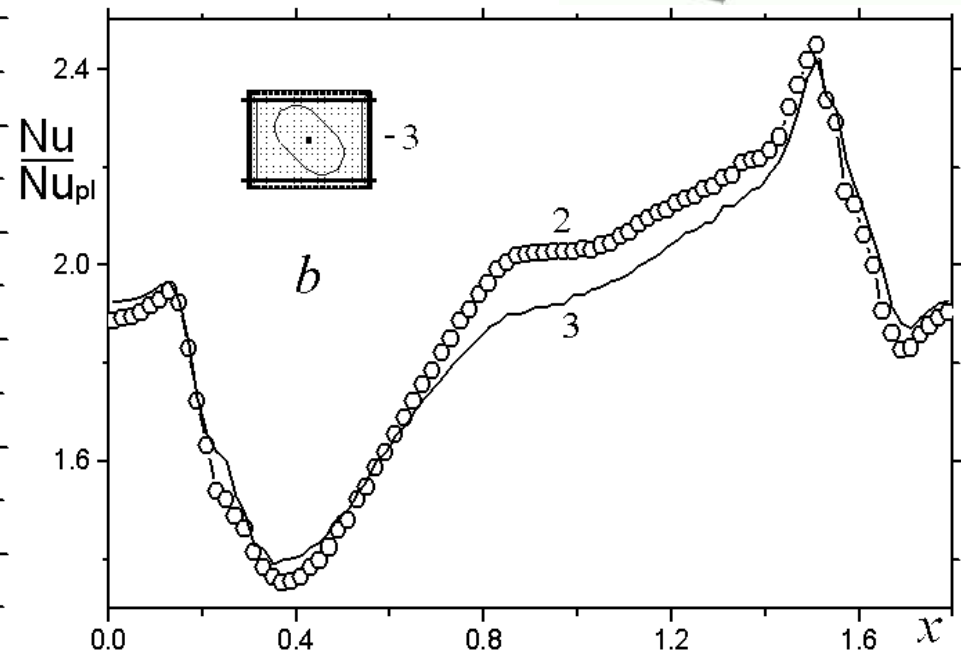
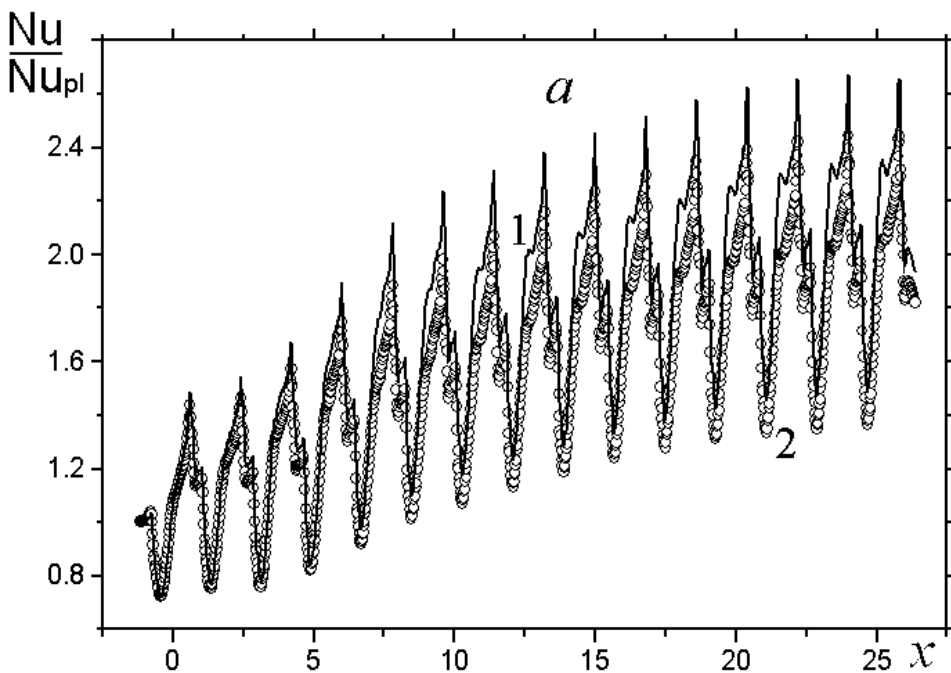
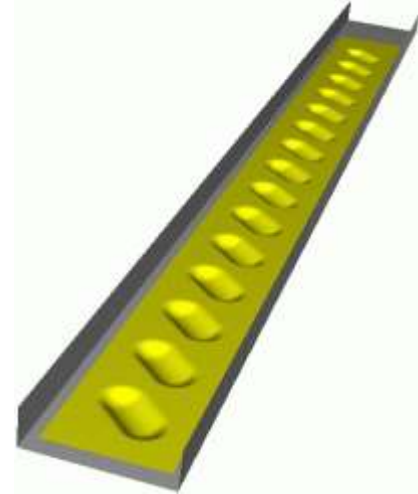
Турбулентный режим



----- - цилиндр с ПГУ



Обоснование применимости периодических граничных условий



Осредненные по полосе с лунками относительные тепловые нагрузки в продольном направлении для пакета из 15 овальных лунок для однородного (1) и полностью развитого (2) профиля на входе (а), а также для периодического модуля (3) и ареала 14-ой овальной лунки

Supersonic separated flows

Figure 7. *Supersonic flow around sphere ($Re = 10^5$, $M = 1.53$ and 3): experiment (top) and simulated pressure field (bottom)*

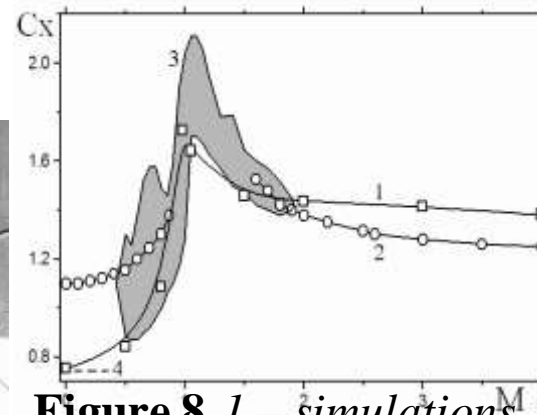
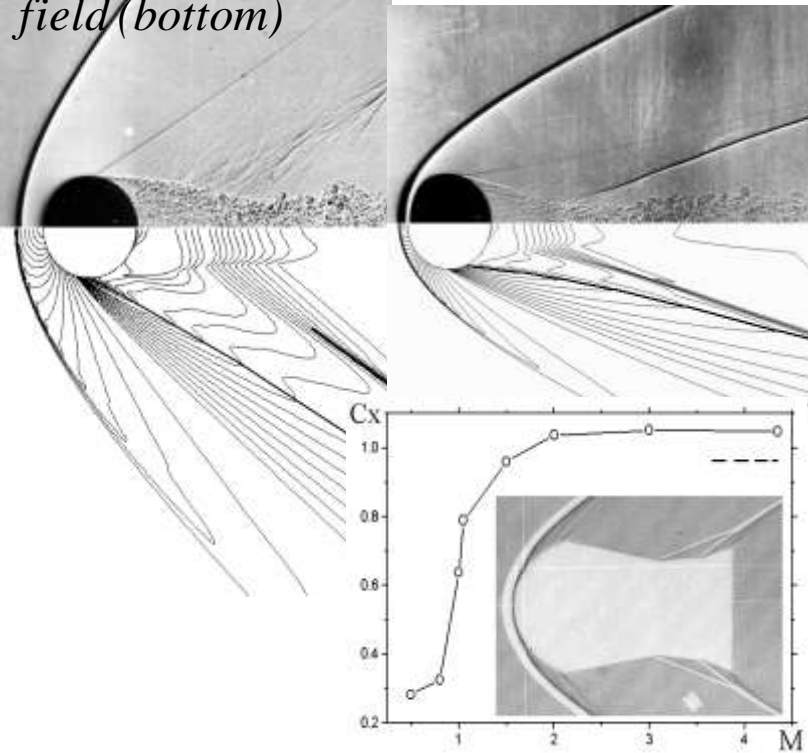


Figure 8 *1 – simulations, 2 and 3 – TsAGI experiments, 4 – data by Roshko for the cylinder with the separating plane*

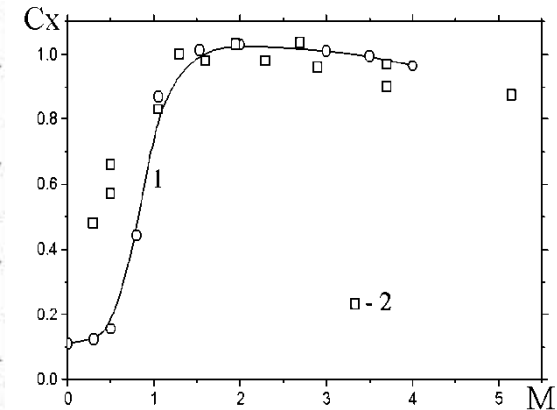
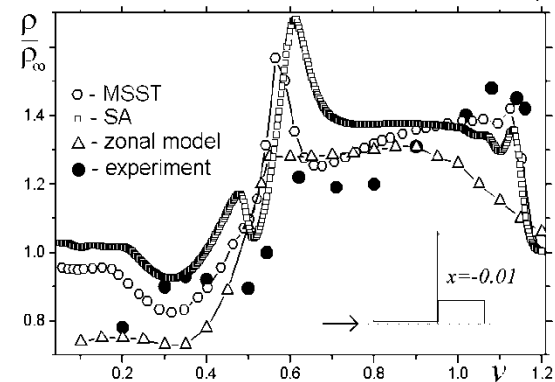
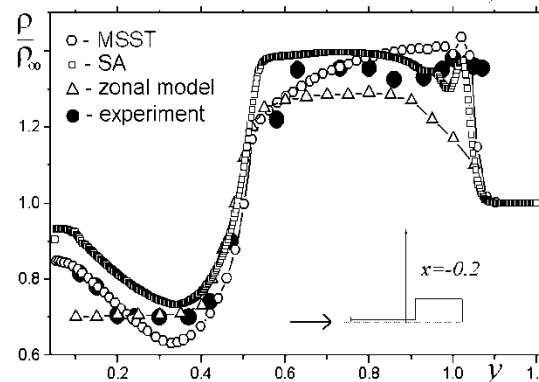
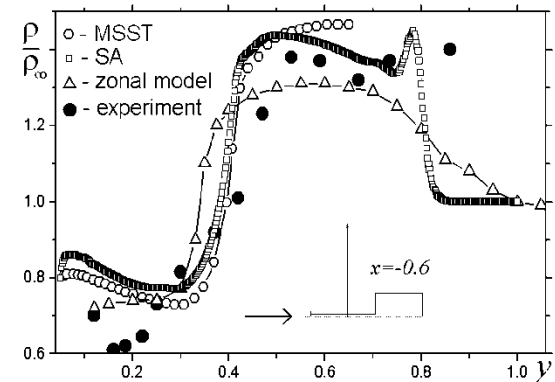
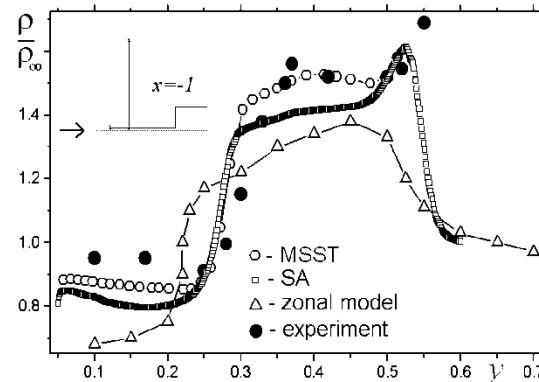
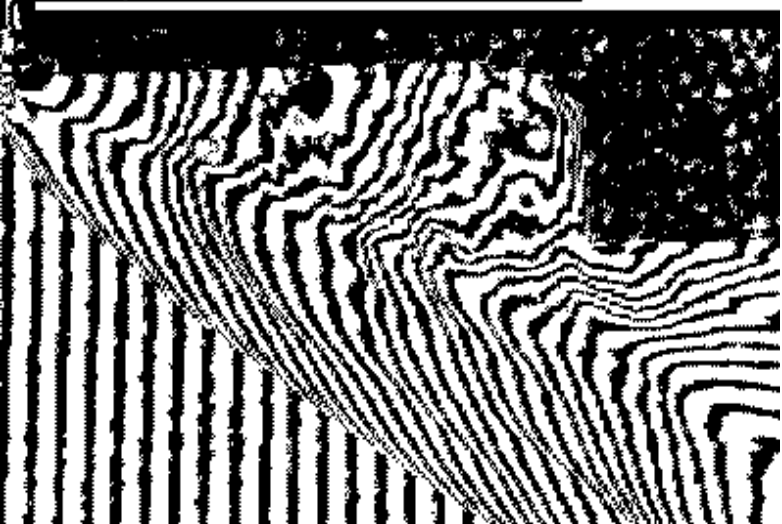


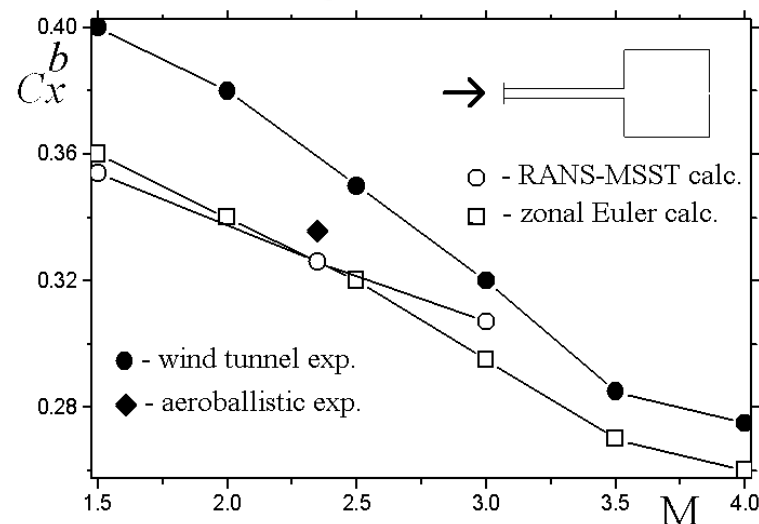
Figure 9. *The effect of the Mach number on drag coefficient of the sphere: 1 – simulations, 2 – experiment*

Figure 10. *The predicted dependence $C_x(M)$ (solid line) and the shadow image of the flow. Dashed line – measured value for $M = 4.35$, $Re = 3 \cdot 10^6$.*

Calculations of subsonic and supersonic flows past a cylinder, sphere, and droplet (wind tunnel and ballistic experiments in TsAGI, IMMSU, and PTI Ioffe – Figures 7-10) allowed to estimate the applicability of the Reynolds stress transport model, initially developed for incompressible flows. As part of these tests, some preliminary calculations of the test-bed airfoil (CIRA) were also conducted.



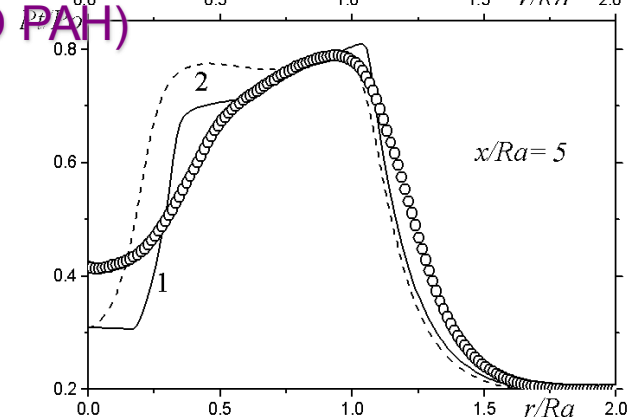
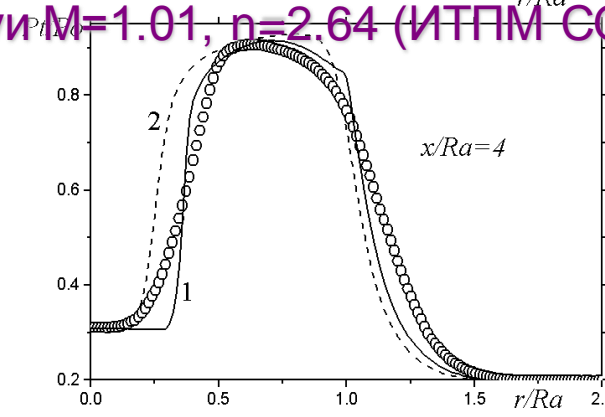
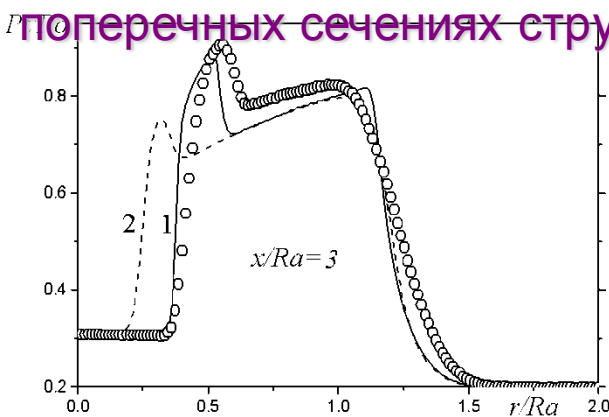
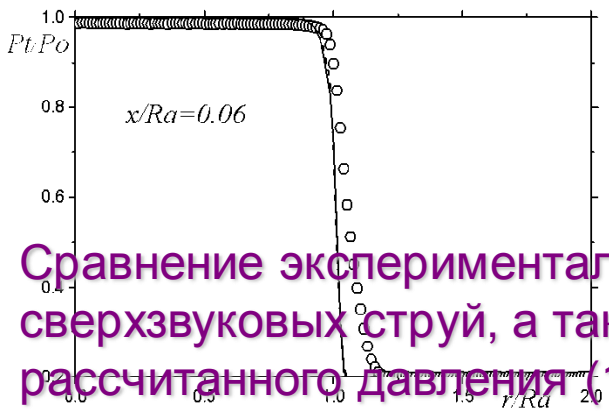
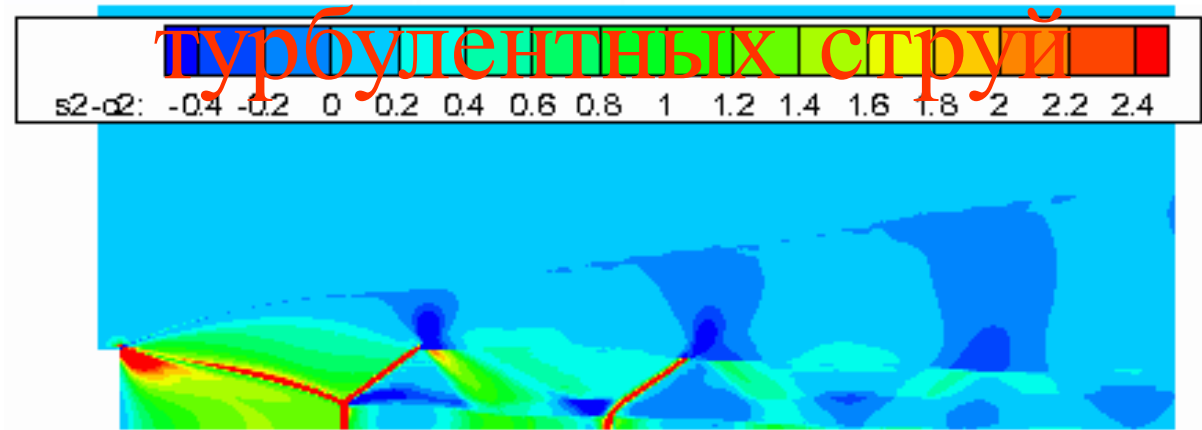
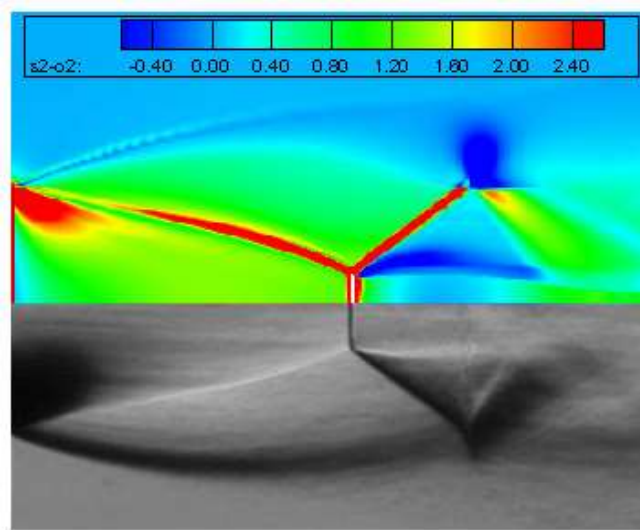
Сравнение методов физического и численного моделирования



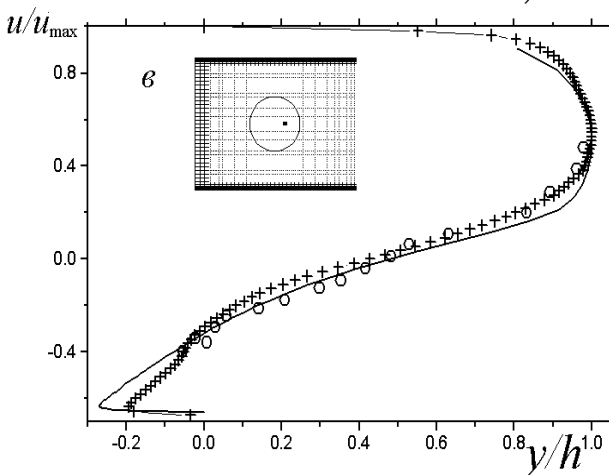
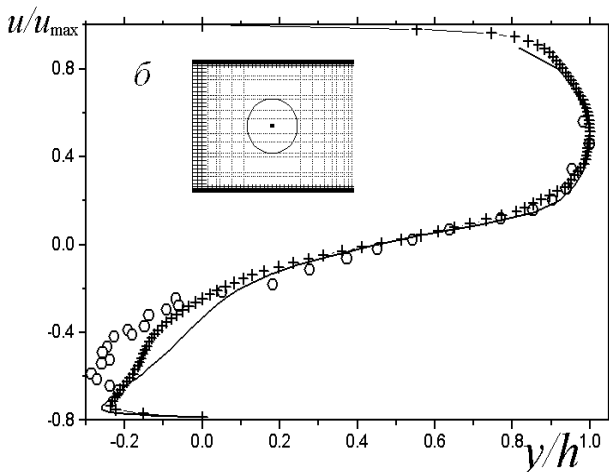
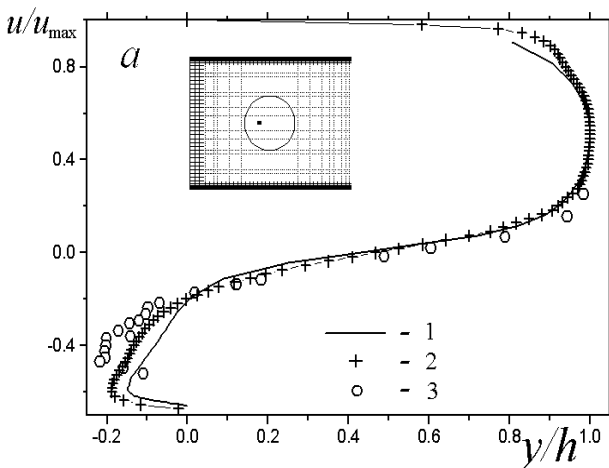
Эксперимент ФТИ $C_{xp}=0.334$

Расчет сверхзвуковых

турбулентных струй



Сравнение экспериментальных и расчетных картин полей числа Маха для сверхзвуковых струй, а также распределений замеренного трубкой Пито и рассчитанного давления (1 – второй; 2 – первый порядок аппроксимации) в поперечных сечениях струи $M=1.01$, $n=2.64$ (ИТПМ СО РАН)



Сравнение моделей турбулентности



Глубокая (0.26) сферическая лунка на стенке узкого канала (0.33).
 $Re=40000$

Эксперимент В.Терехова

Сравнение профилей $u(y)$ в области лунки на стенке канала. *a*- $x=-0.1$; *б* -0; *в*-0.1. 1 – RANS; 2 – LES; 3 – экс.

2/3D URANS

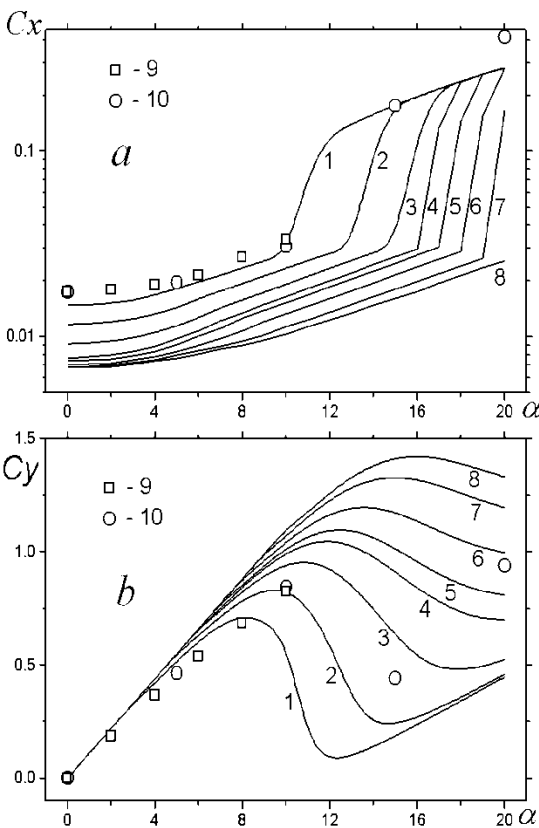


Figure 14: Effect of α and Re on C_x (a) and C_y (b) NACA0015: 1 – $Re = 8 \times 10^4$; 2 – 1.6×10^5 ; 3 – 3.6×10^5 ; 4 – 7×10^5 ; 5 – 10^6 ; 6 – 2×10^6 ; 7 – 5×10^6 ; 8 – 10^7 . Calculations: 9 – $Re = 8 \times 10^4$; 10 – 10^5

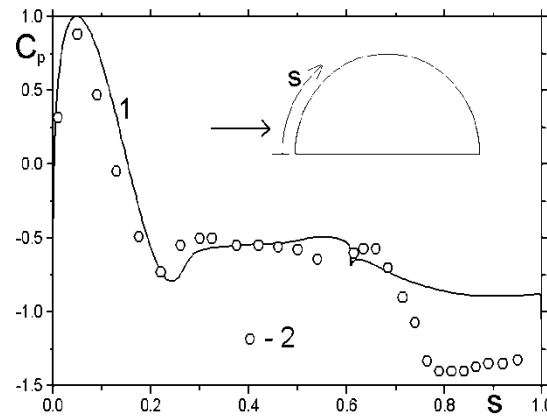
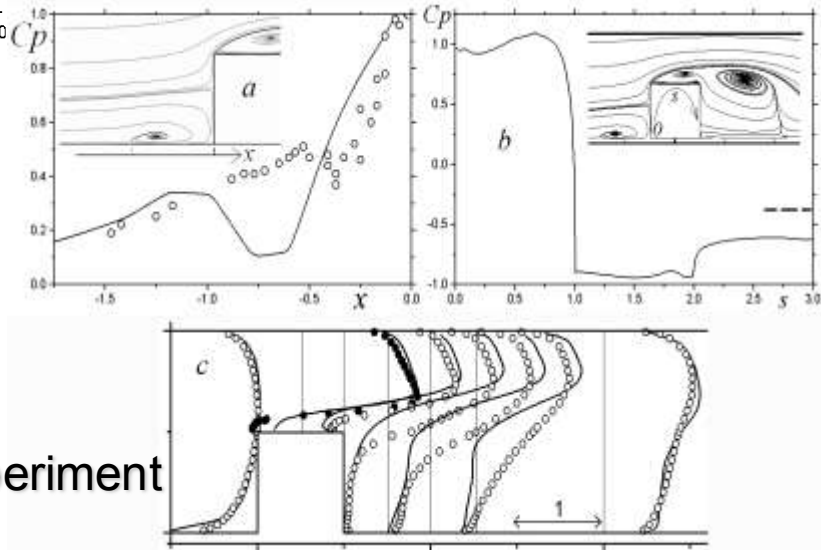


Figure 15: Predicted (1) and measured (IM MSU) (2) semi-cylinder perimeter distributions of C_p at the zero angle of attack

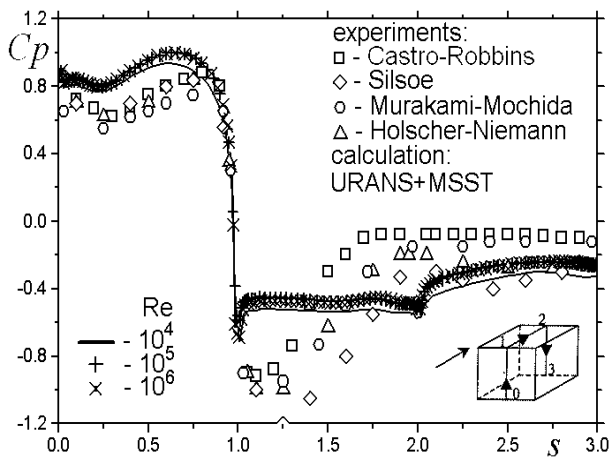
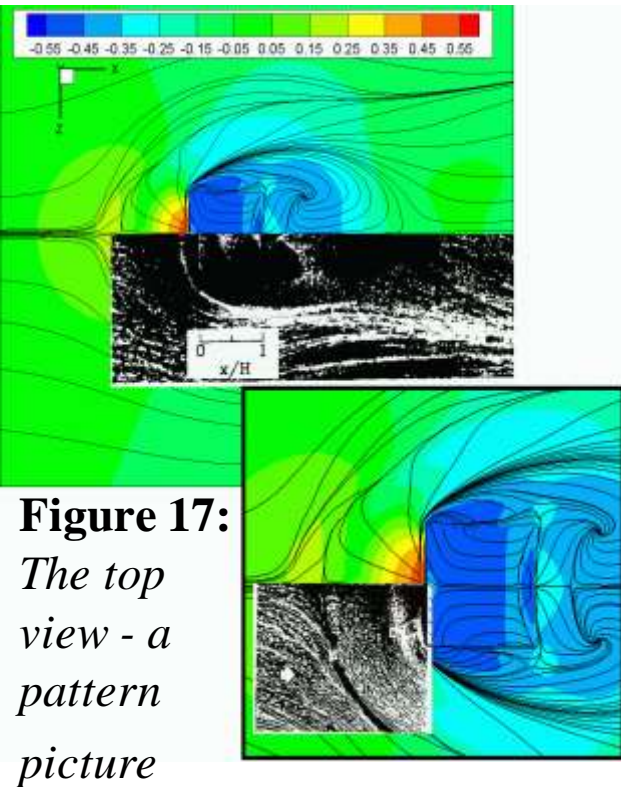
- Calculations of the unsteady flow past NACA0015 airfoil (experimental data available on the Web) and past a semi-cylinder (experiment at IMMSU) validated the two-dimensional model of periodic vortex shedding (Fig.14-15)



Martinuzzi's experiment

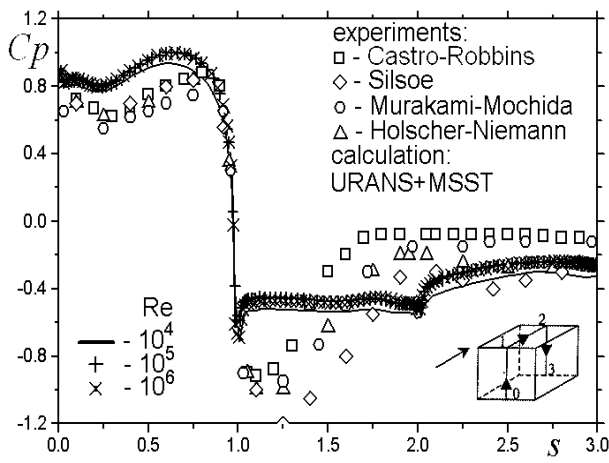
Figure 16: Comparison of numerical predictions of the distributions of the static pressure coefficient averaged over the period Rz in front of the cube (a) and over the contour (b) and of the longitudinal velocity component across the channel (c) in the mid-section with the experimental data

3D URANS



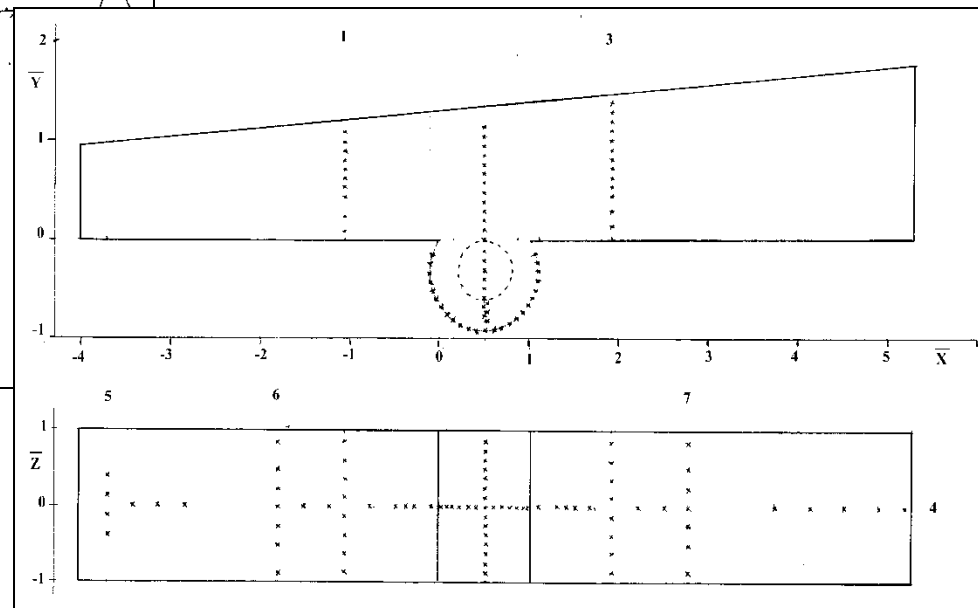
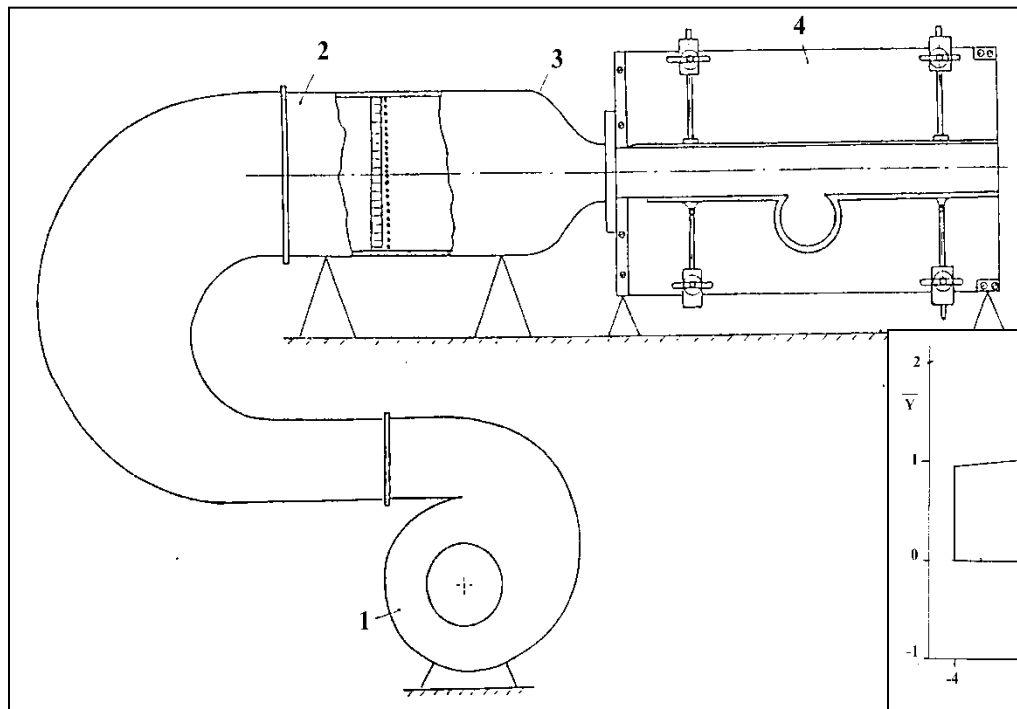
- Then three-dimensional unsteady flows were calculated, for the case of a cube in a channel (experiment by V. Martinucci – Figures 16-18) and cube on a plane (experiment by I.P Castro – Figure 19).

Figure. 19: Comparative analysis of numerical predictions of the distributions of the averaged over the C_z oscillation period pressure coefficient over the perimeter s in the cube mid-section at different Re with the experimental data



IM MSU expanding channel

- 1998 – experimental setup assembled
- 2004 – 2005 – new experimental data for VC flows with CB suction



3D URANS

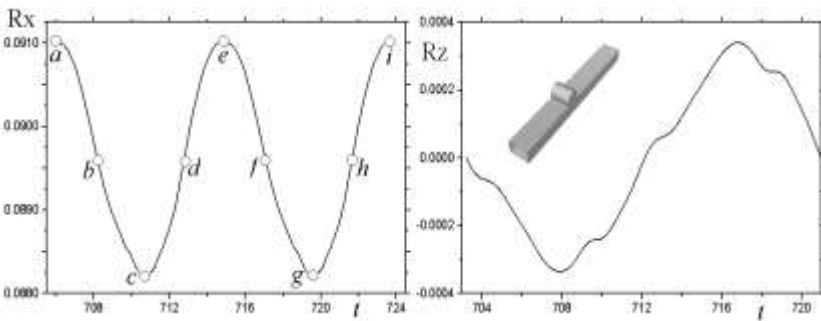


Figure 20:
Зависимость R_x и R_z от t на периоде колебаний R_z . $a - i$ – выбранные моменты

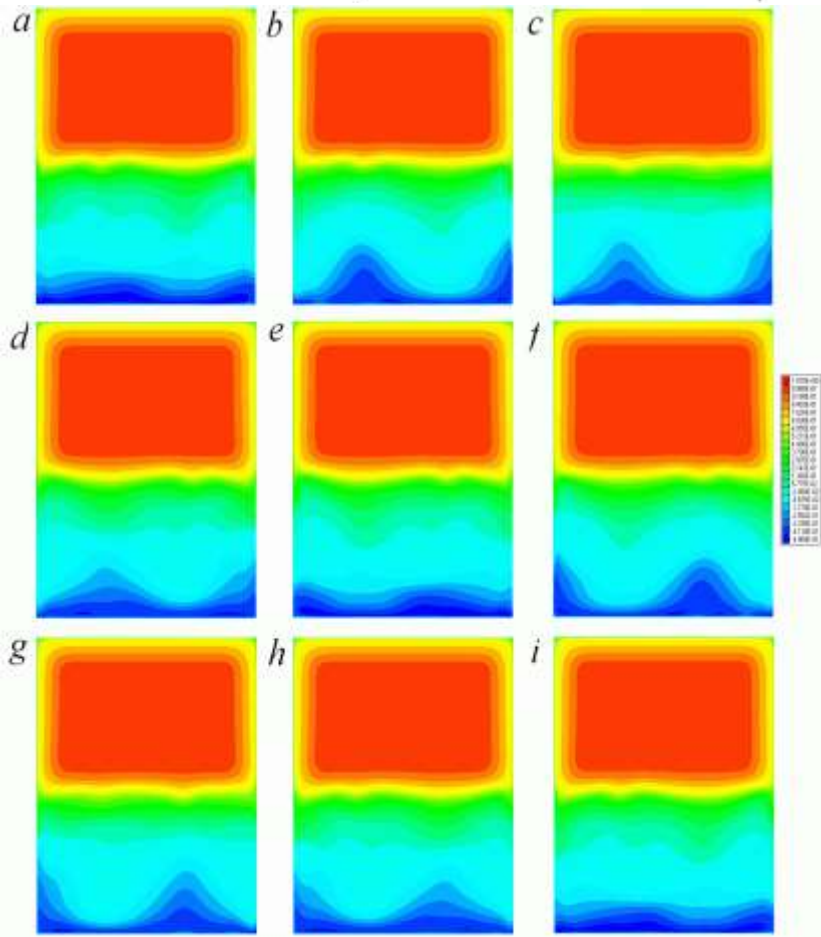


Figure 21:
Колебания $u(z, y, t)$ -поля при $x=0$.

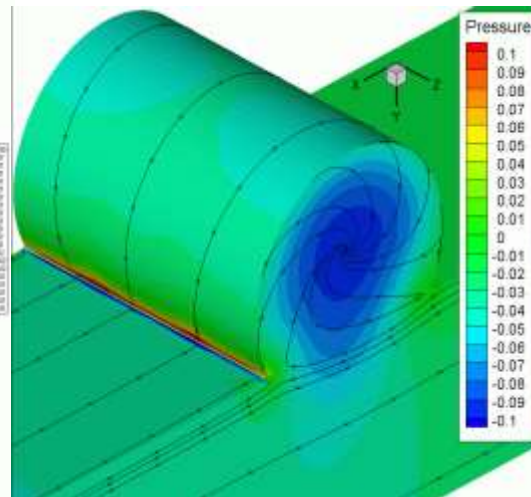


Figure 22: *Картина растекания по стенке канала*

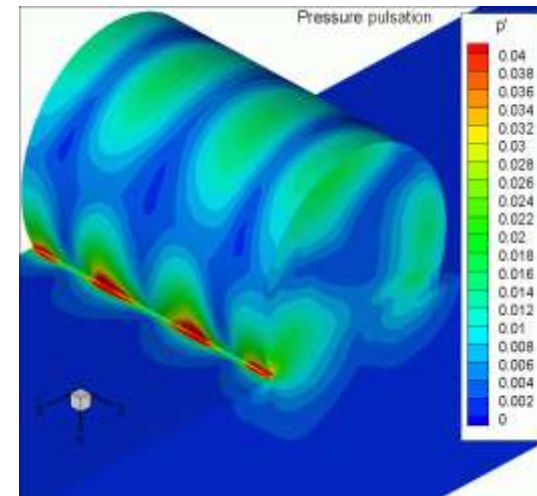


Figure 23: *Поле пульсаций давления*

- Детальный анализ выполнен для течения в канале с круговой каверной с акцентом на колебания в отрывном течении и периодических изменений ниже по потоку от каверны (эксперимент Guvern'yik&Zubin – Figures 20-24).

URANS

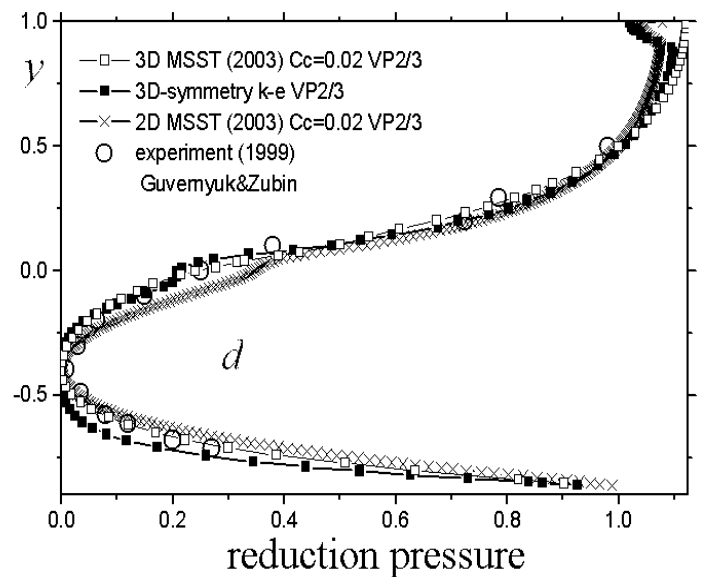
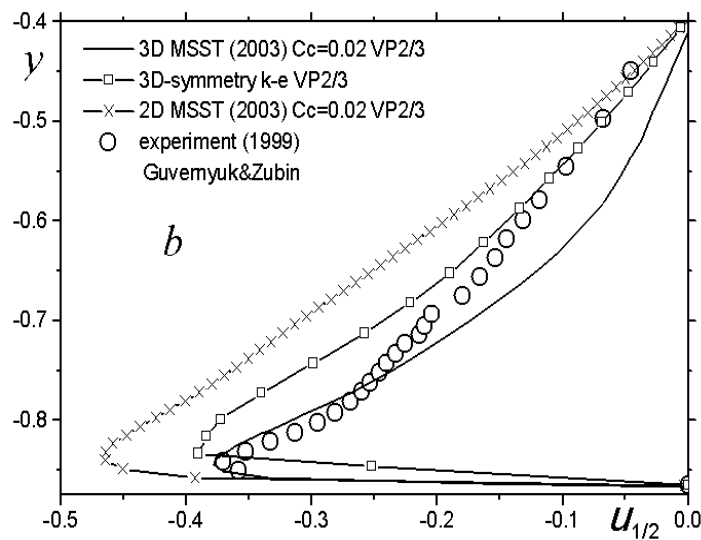
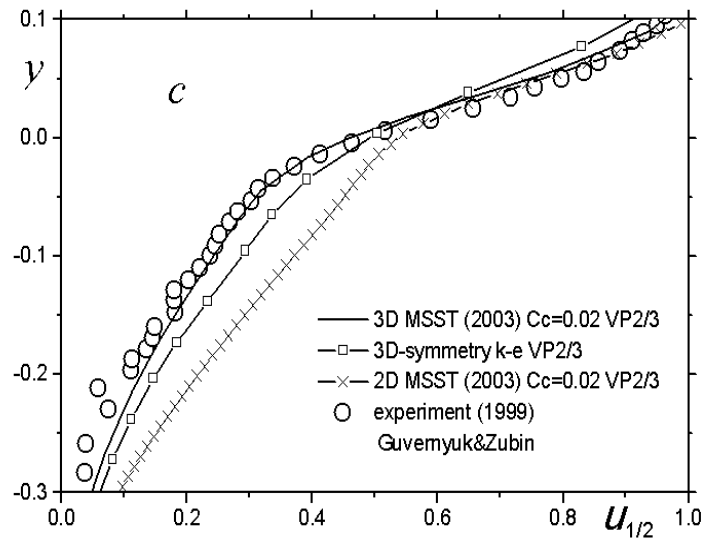
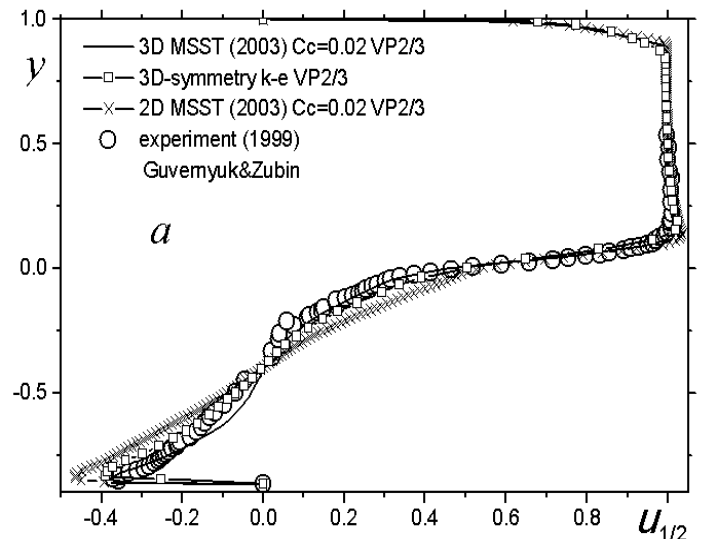


Figure 24: Сравнение численных предсказаний $u(y)$ (a-c) и падения давления (d) в срединном сечении с экспериментальными данными: a – весь канал; b – около дна каверны; c – область сдвигового слоя

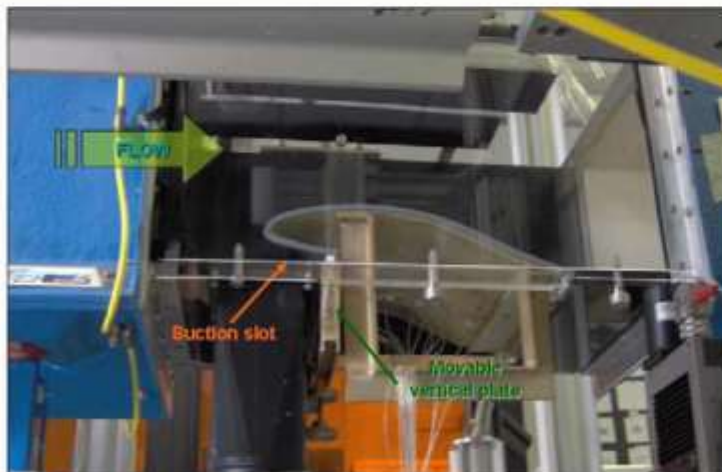
РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ О ДВИЖЕНИИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА В УСТАНОВКЕ CIRA 2007 ($Re=1300000$)

Donnelli и др.

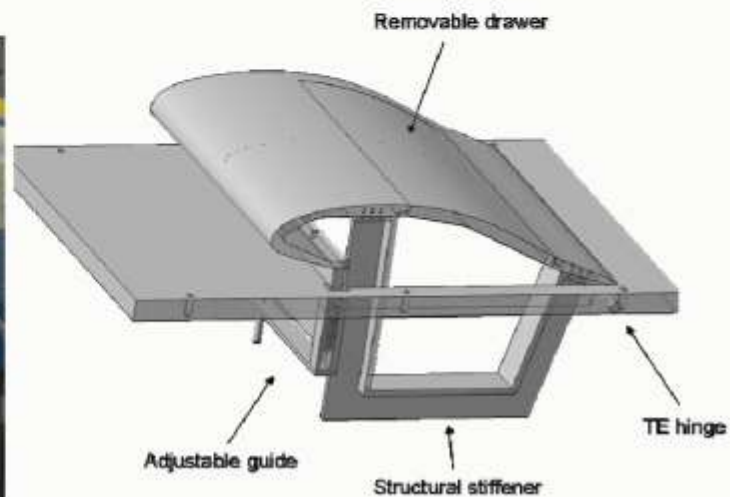
VortexCell2050



CT-1 wind tunnel facility at CIRA

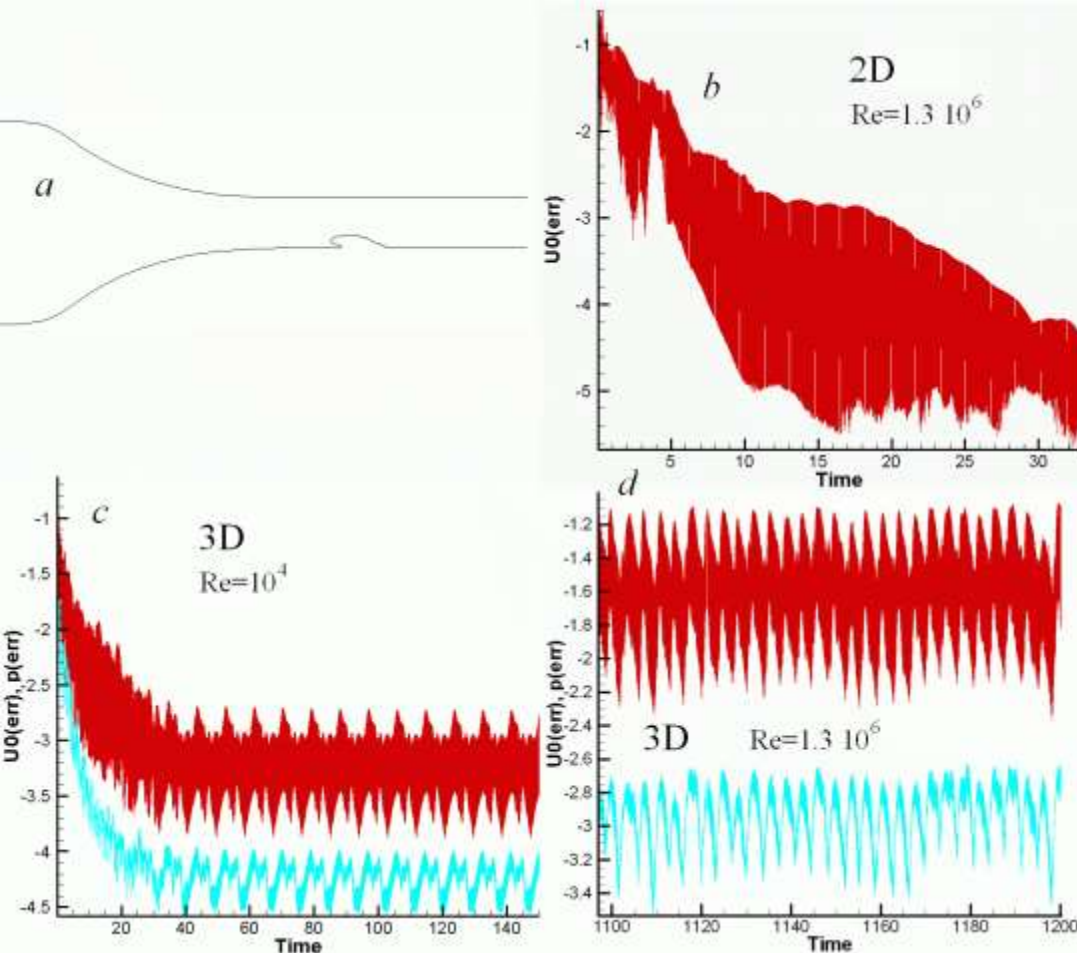


a)



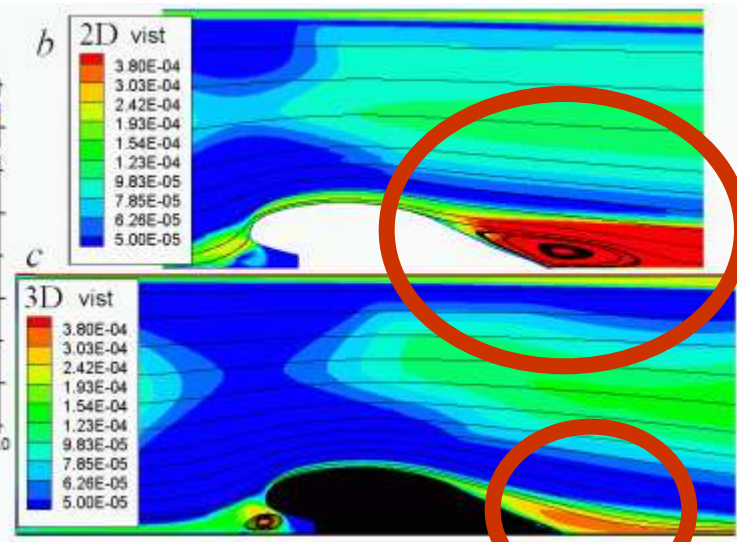
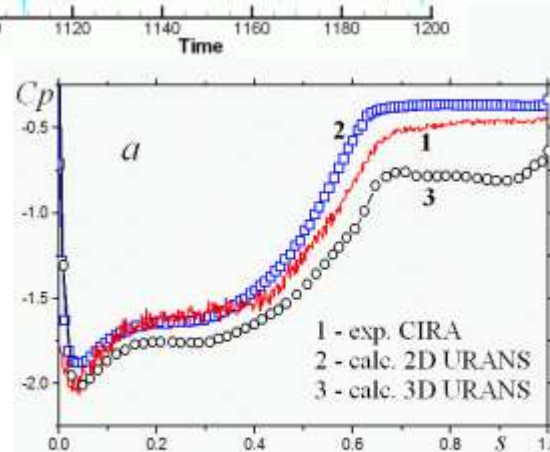
b)

The test-bed installed inside the CT-1 test chamber (a) and the test bed schematic (b).



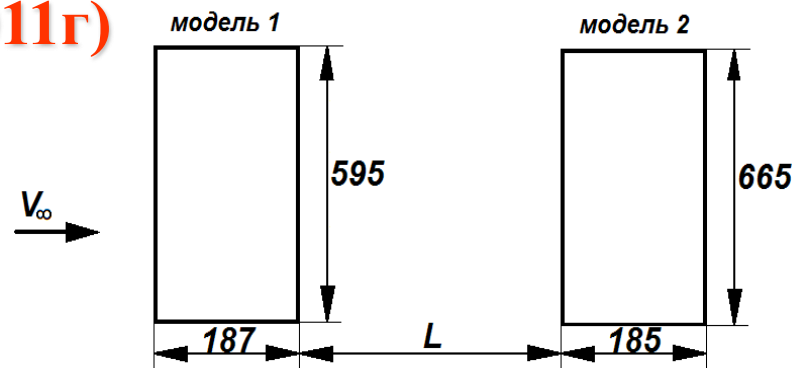
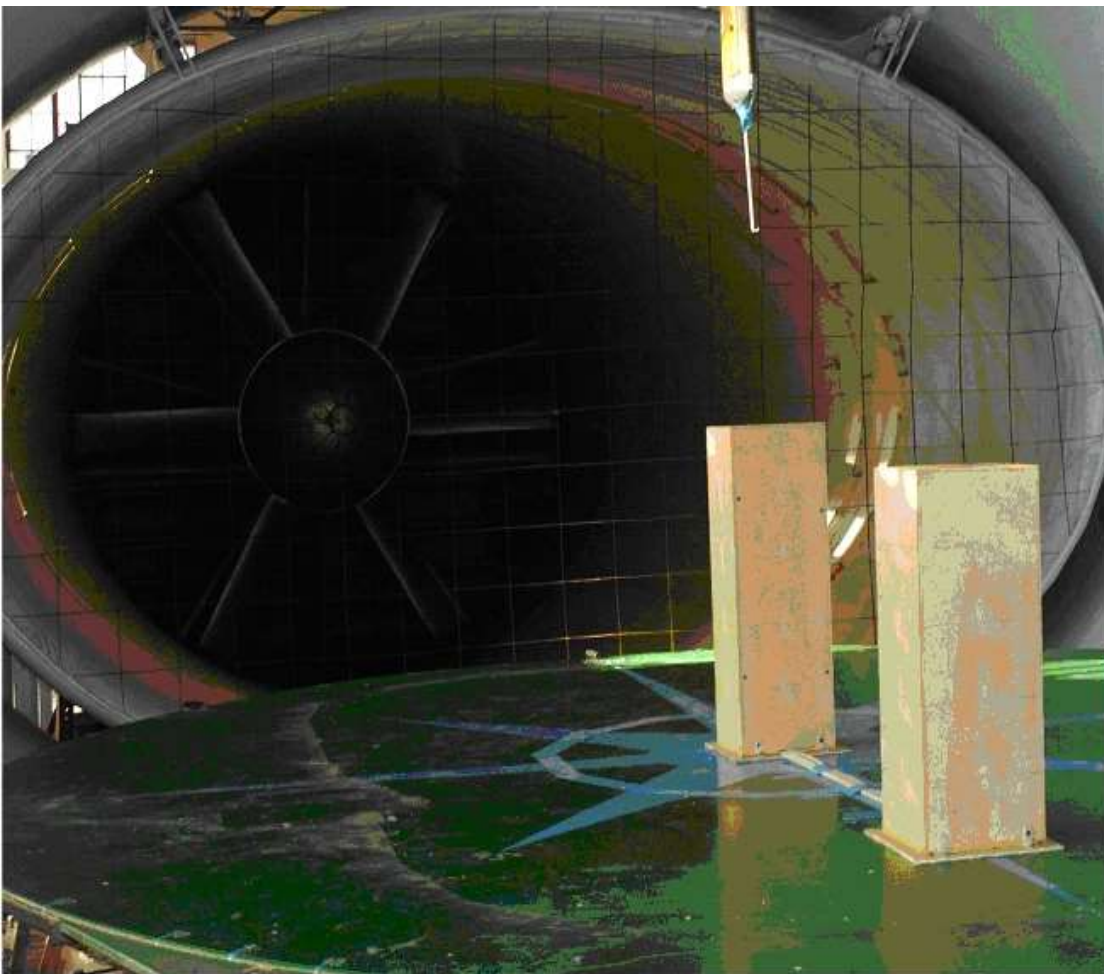
Контур канала с профилем (а), траектории сходимости решения двумерной задачи (b), формирование автоколебательного режима обтекания профиля в канале при $Re=10^4$ (c) и 1.3×10^6 (d)

Сравнение C_p по контуру (а), картин вихревой вязкости 2D (b) и 3D (c) при $Re=1.3 \times 10^6$

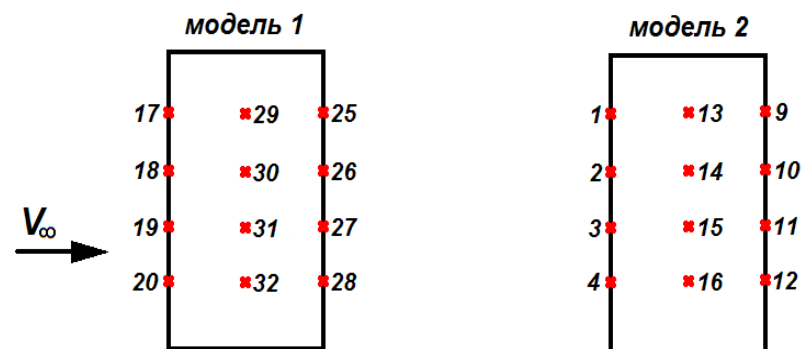


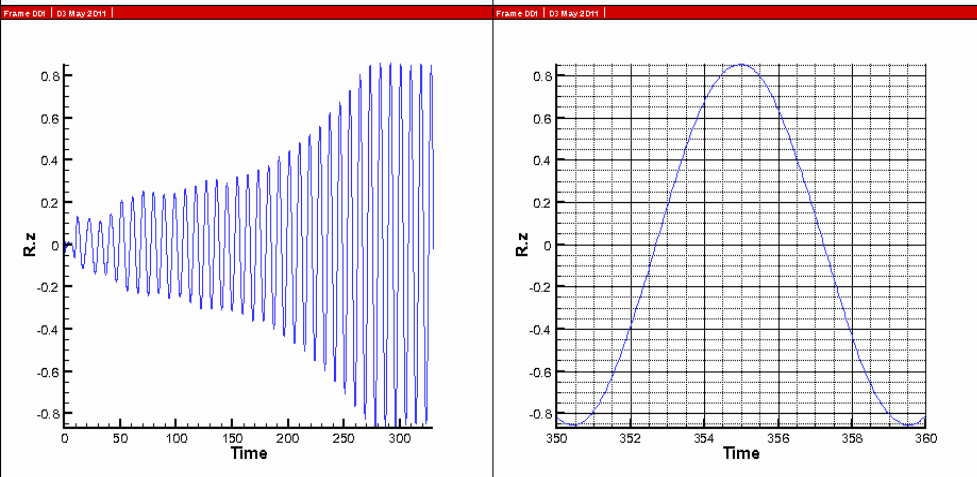
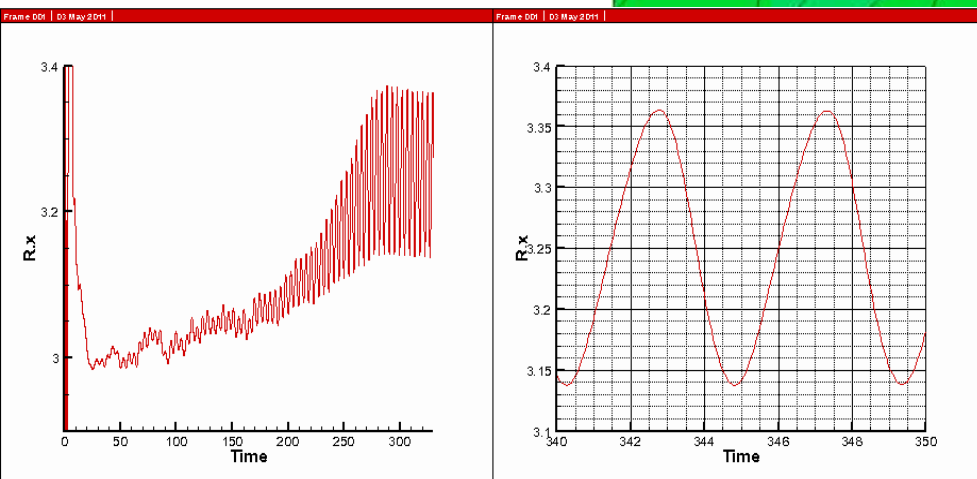
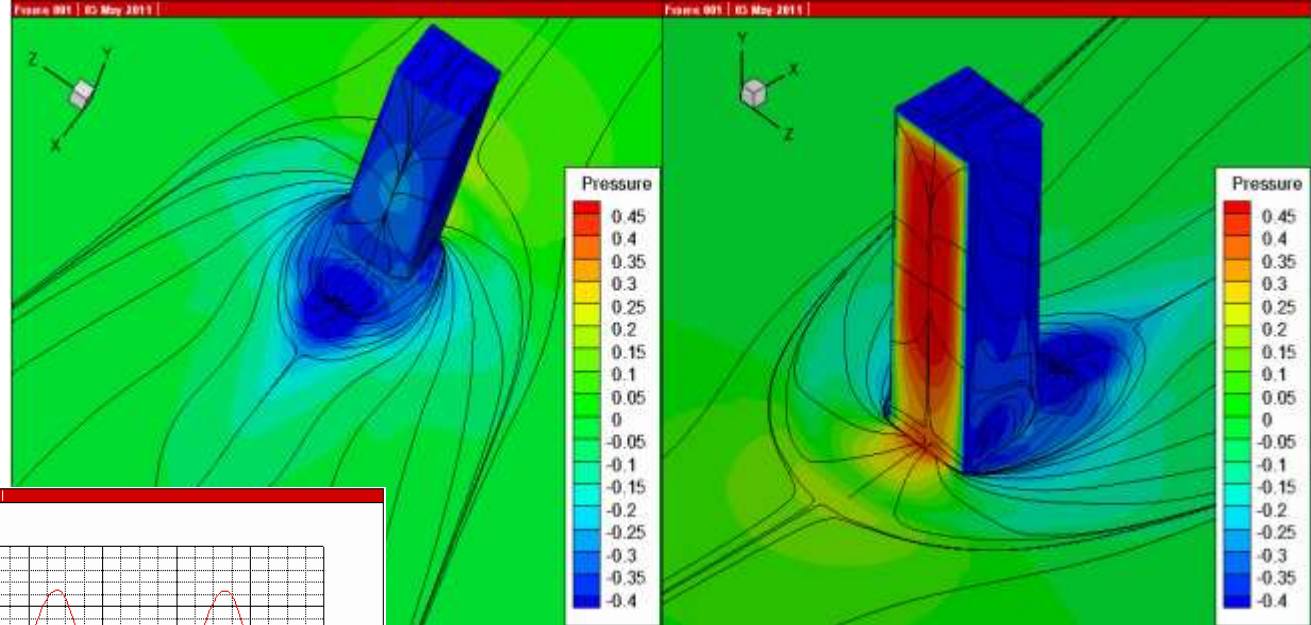
Осредненные и пульсационные нагрузки на сооружения

Эксперимент в ИМех МГУ (март 2011г)

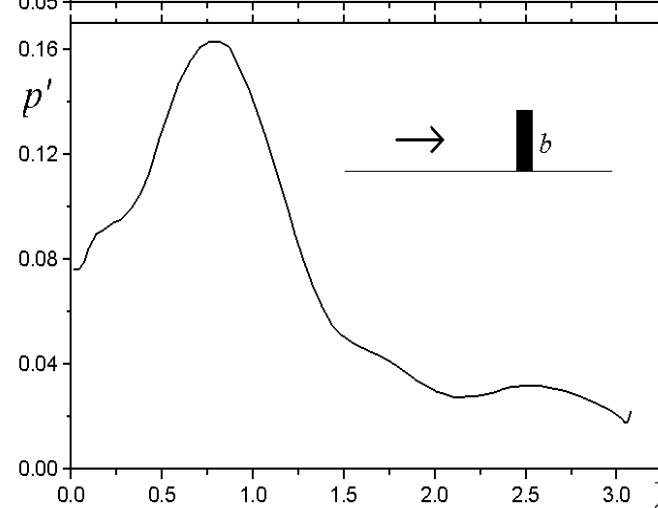
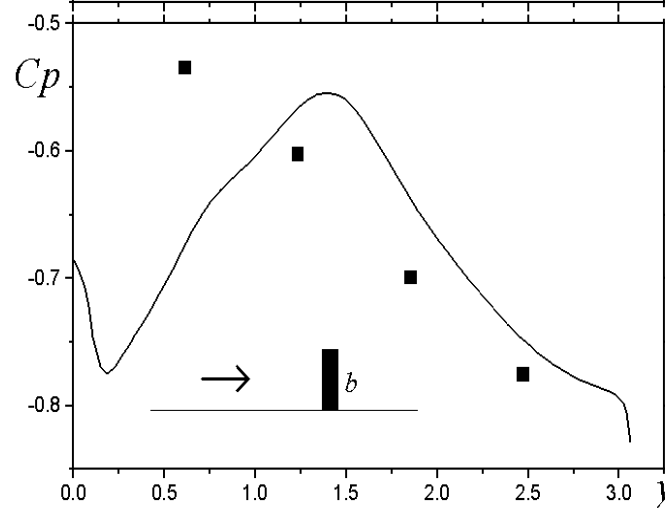
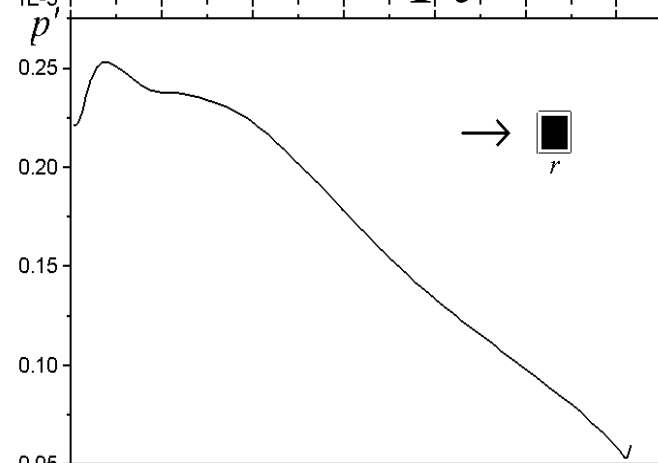
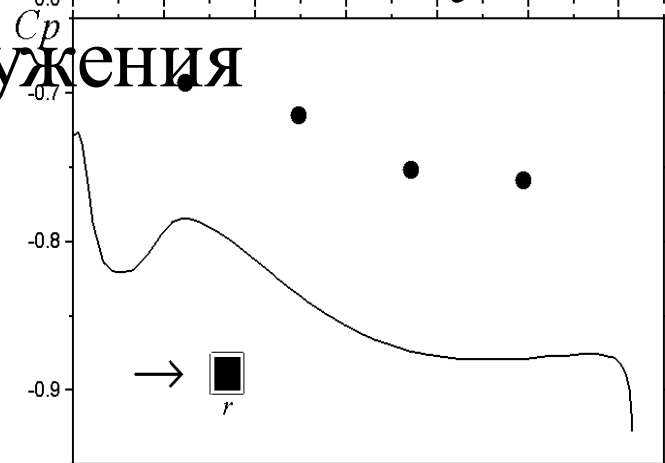
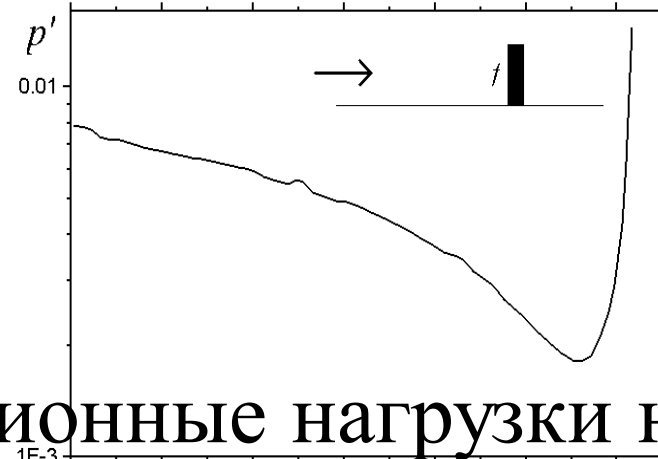
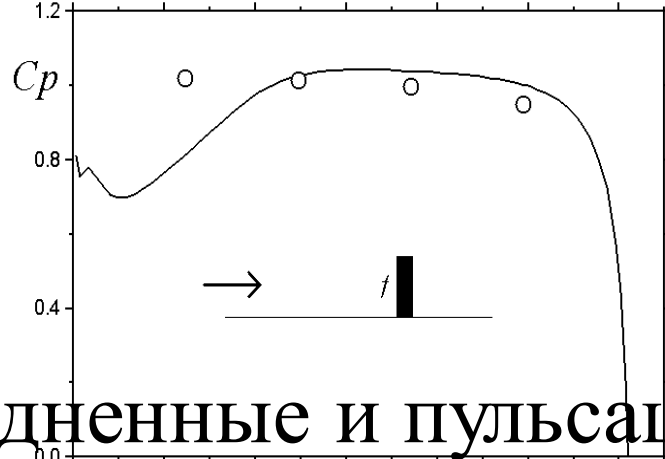


Re порядка 10^5

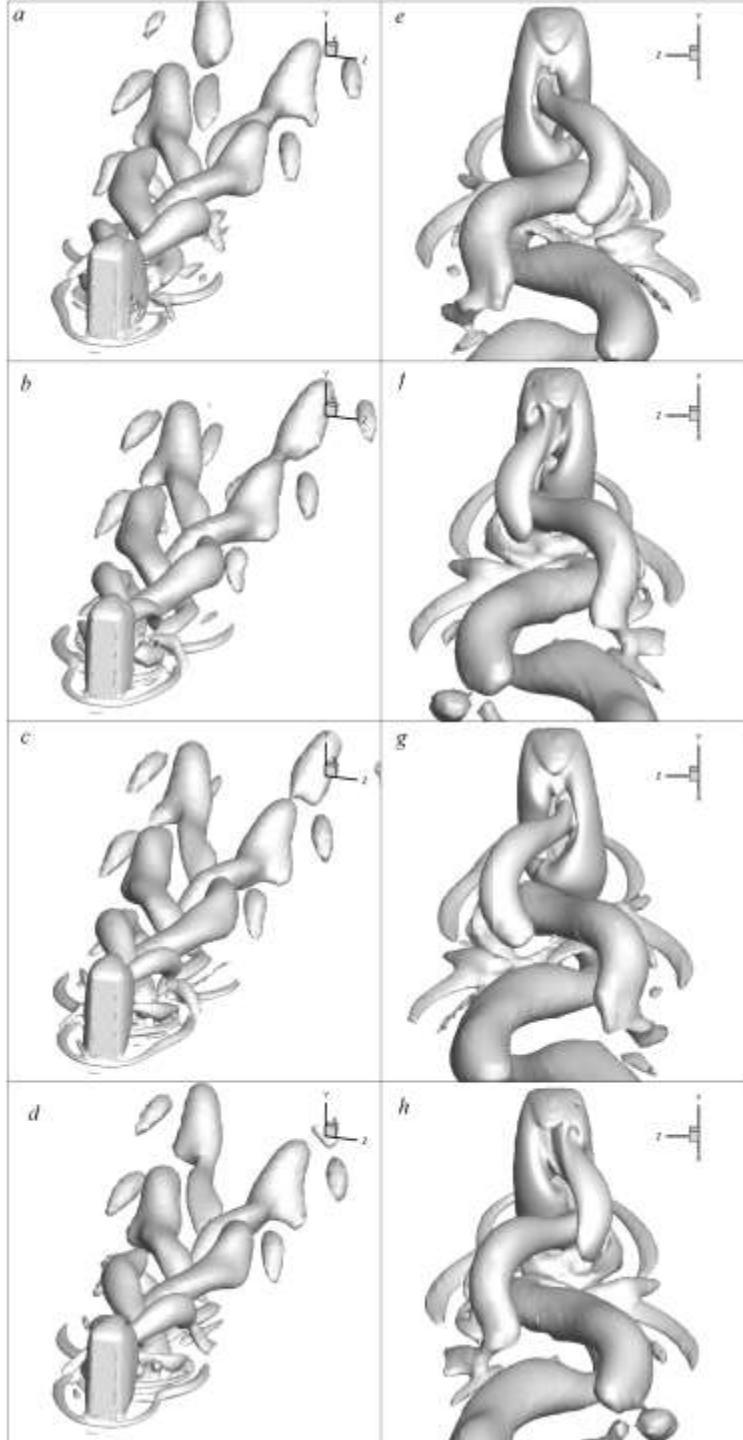
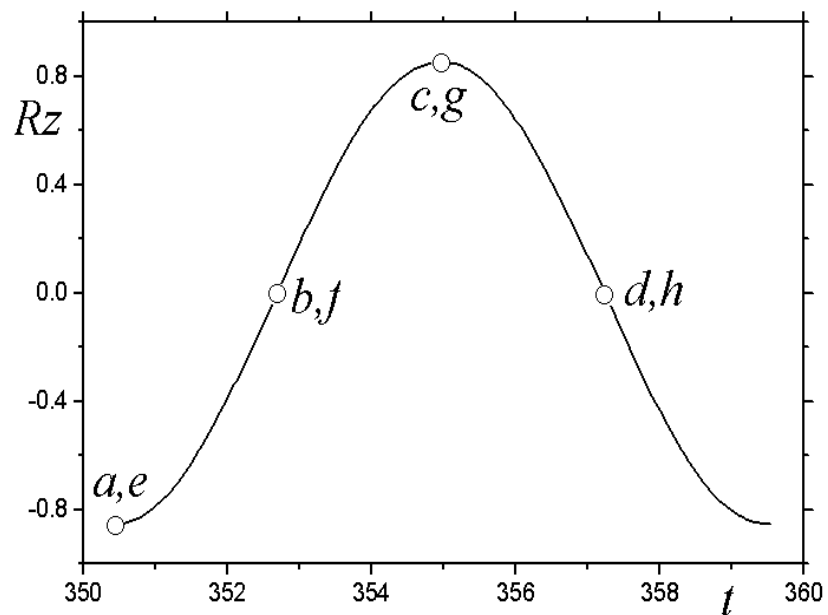




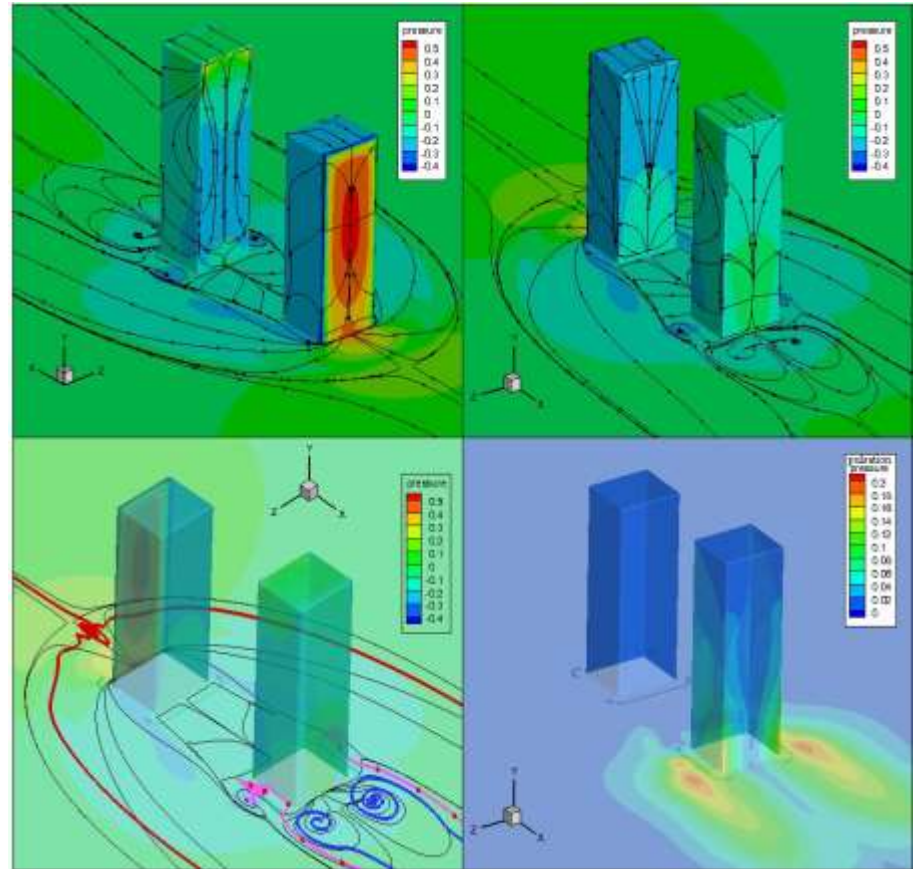
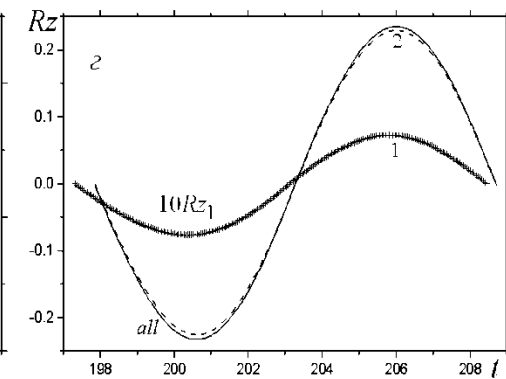
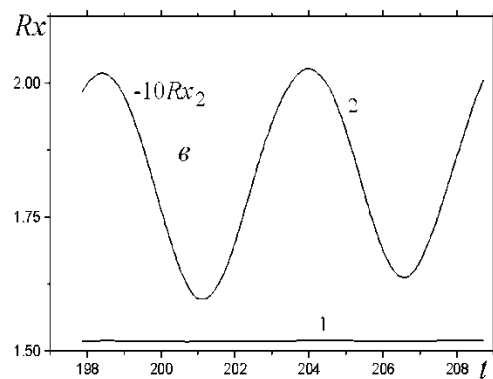
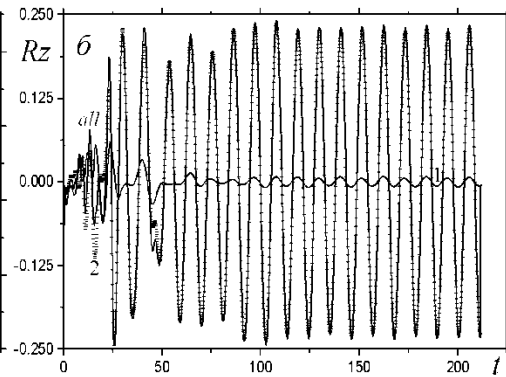
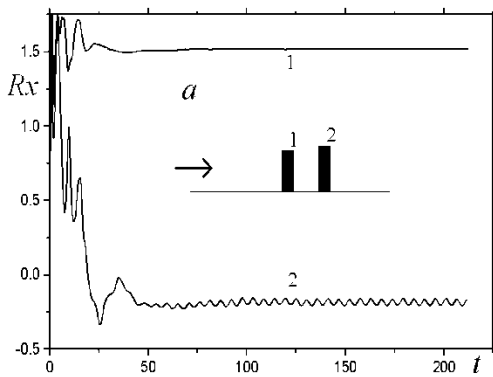
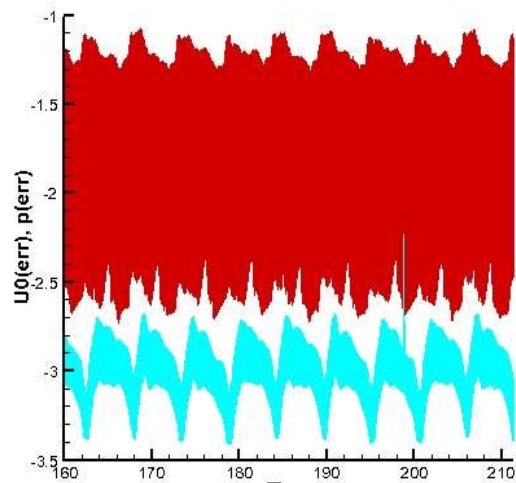
Осредненные и пульсационные нагрузки на сооружения



Визуализация вихревых структур

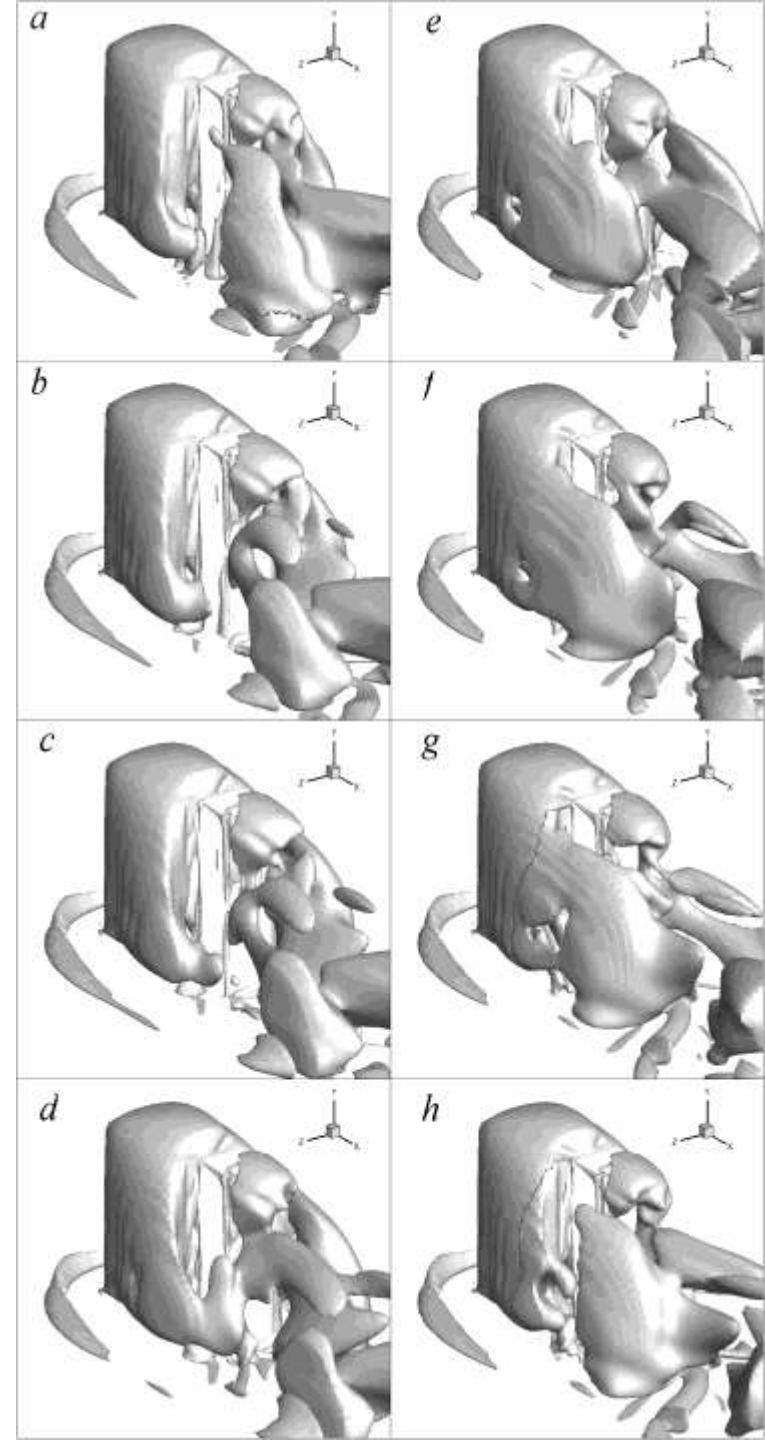
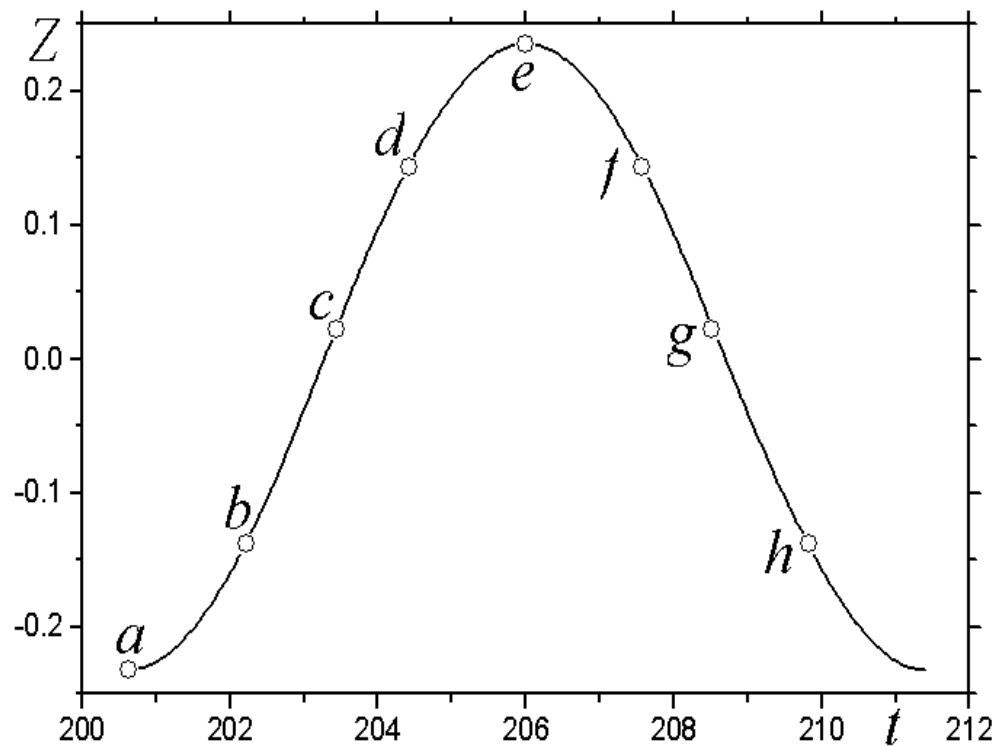


Осредненные и пульсационные нагрузки на сооружения



Осредненные и пульсационные нагрузки на сооружения

Визуализация
пространственных вихревых
структур



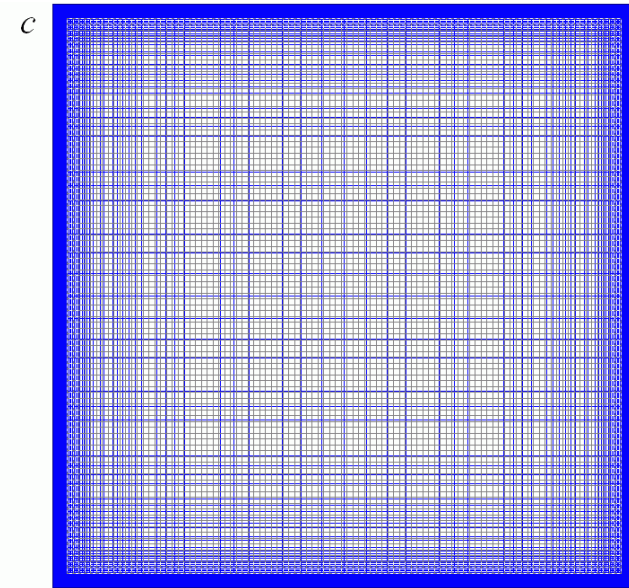
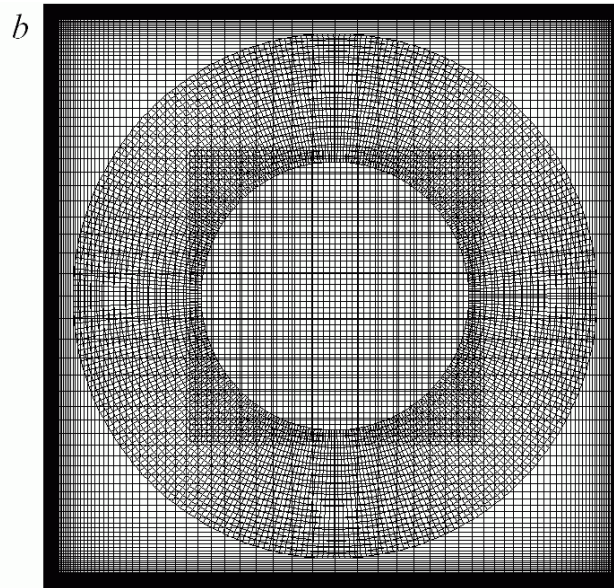
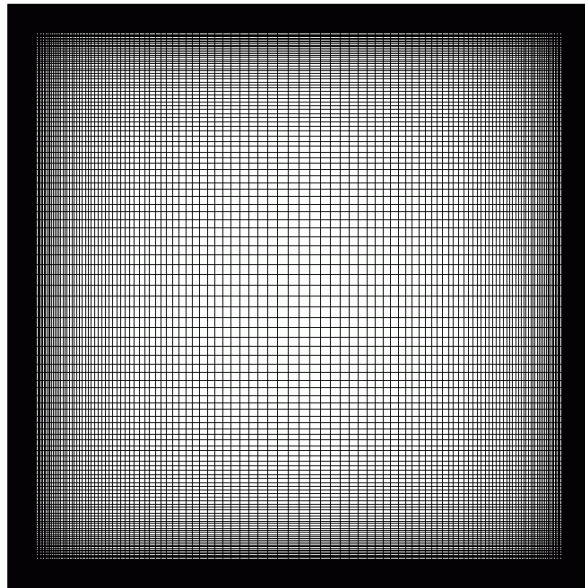
РАЗВИТИЕ МВТ

Эталон 400x400

NN порядка 50000

Основа 211x211

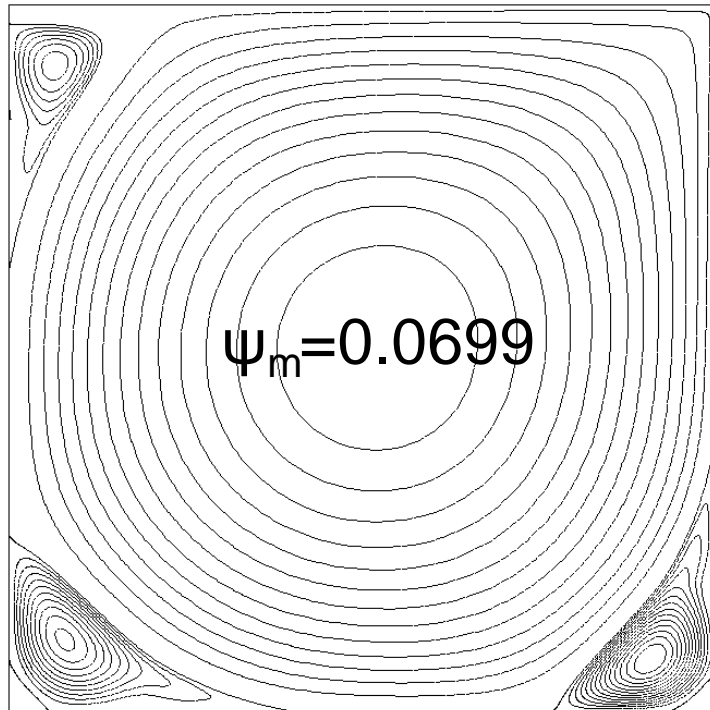
Пристеночный шаг 10^{-5}



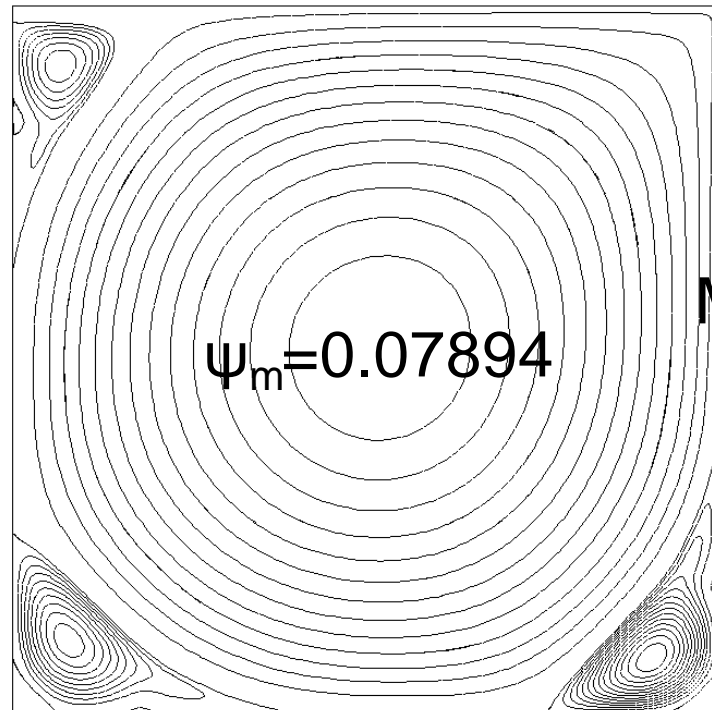
A- эталон (Ω); B- b (CC=0.02) C- b (Ω); D- c (Ω)

a

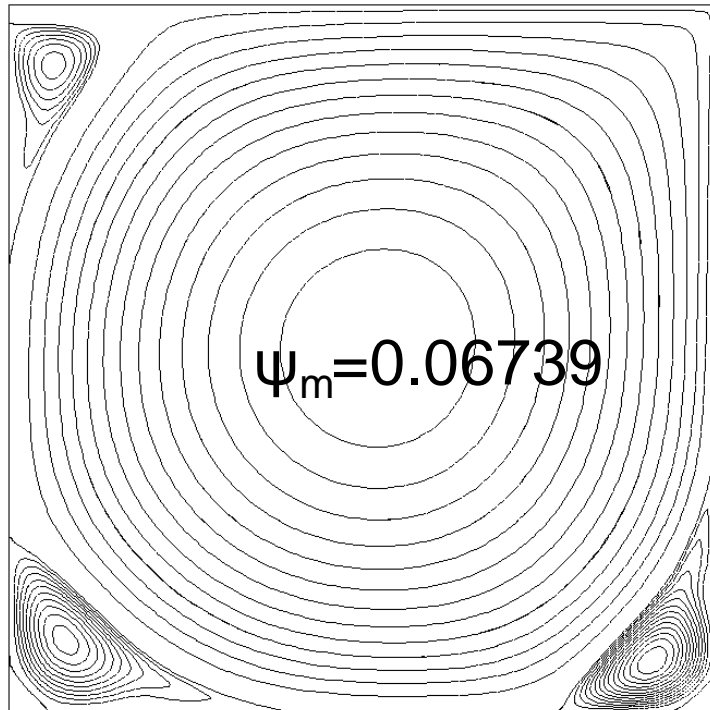
MSST
1993
400x
400

*b*

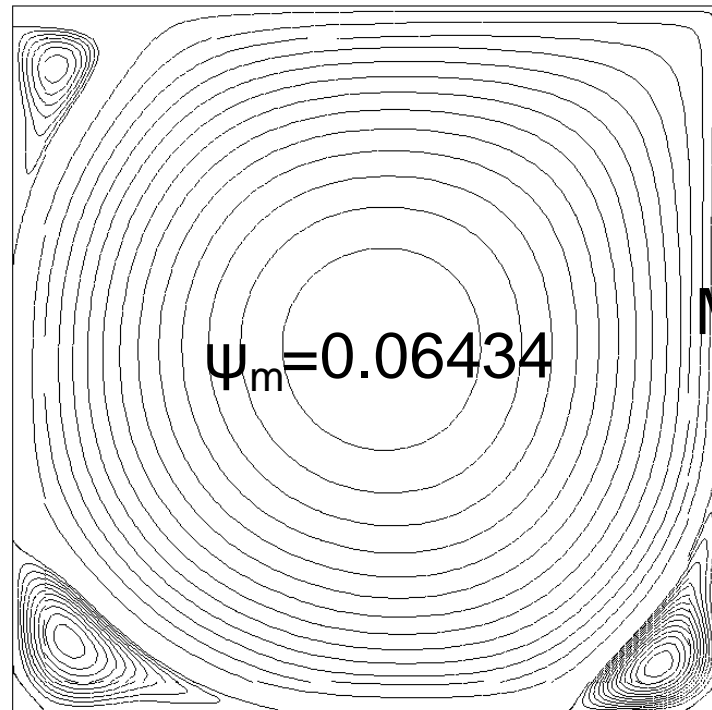
MSST
2003
Cc=
0.02
Bgrid

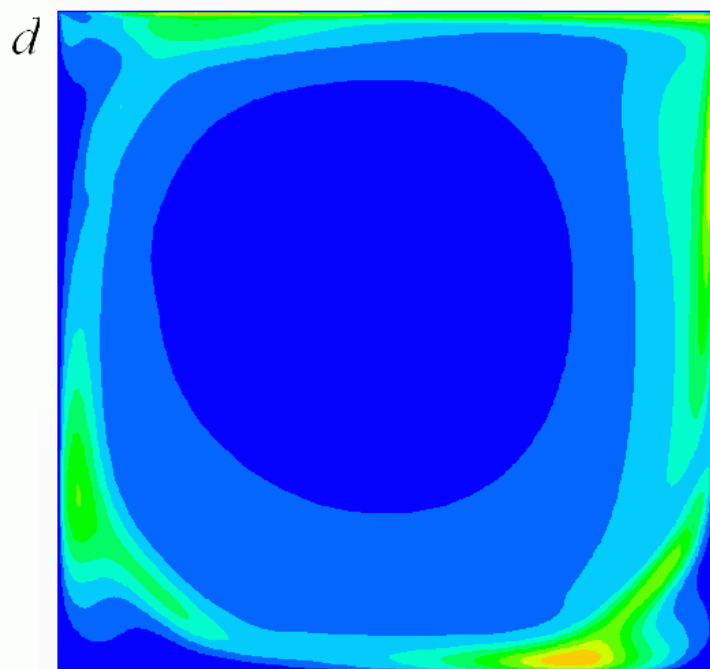
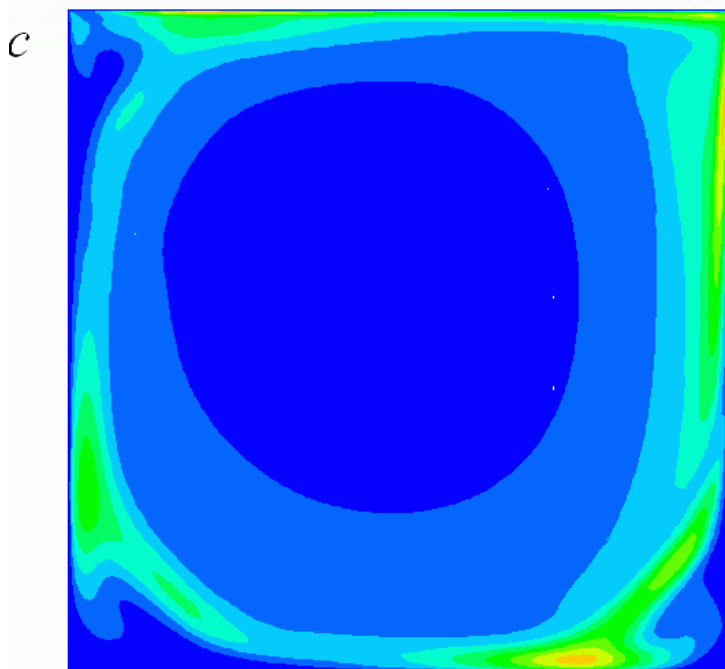
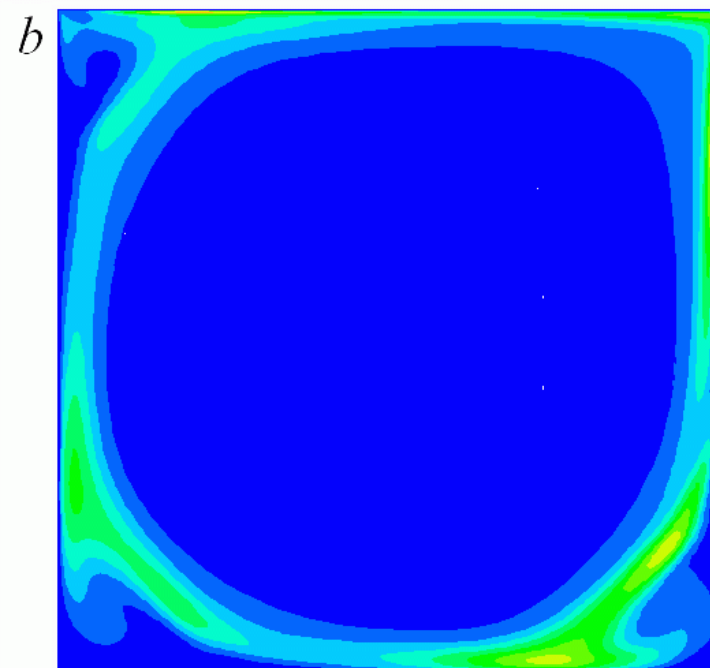
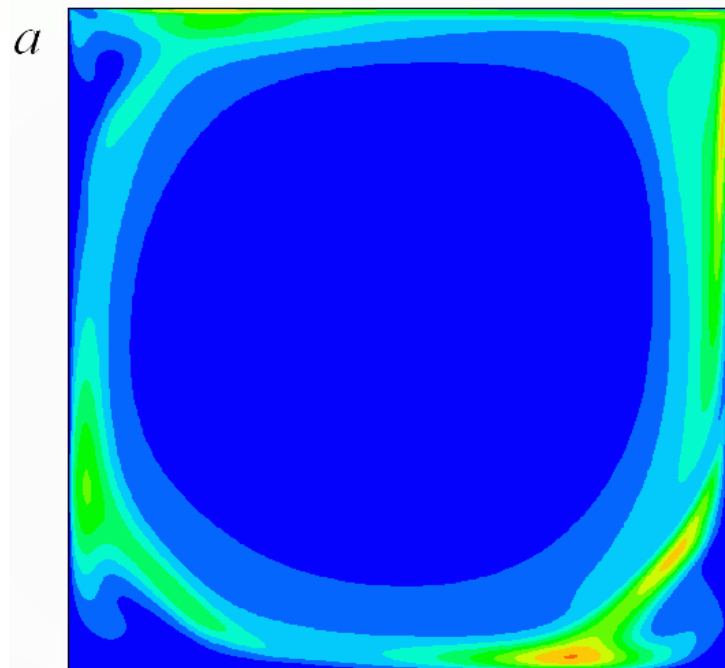
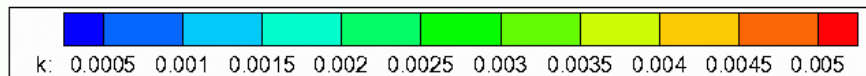
*c*

MSST
1993
Bgrid

*d*

MSST
1993
Cgrid



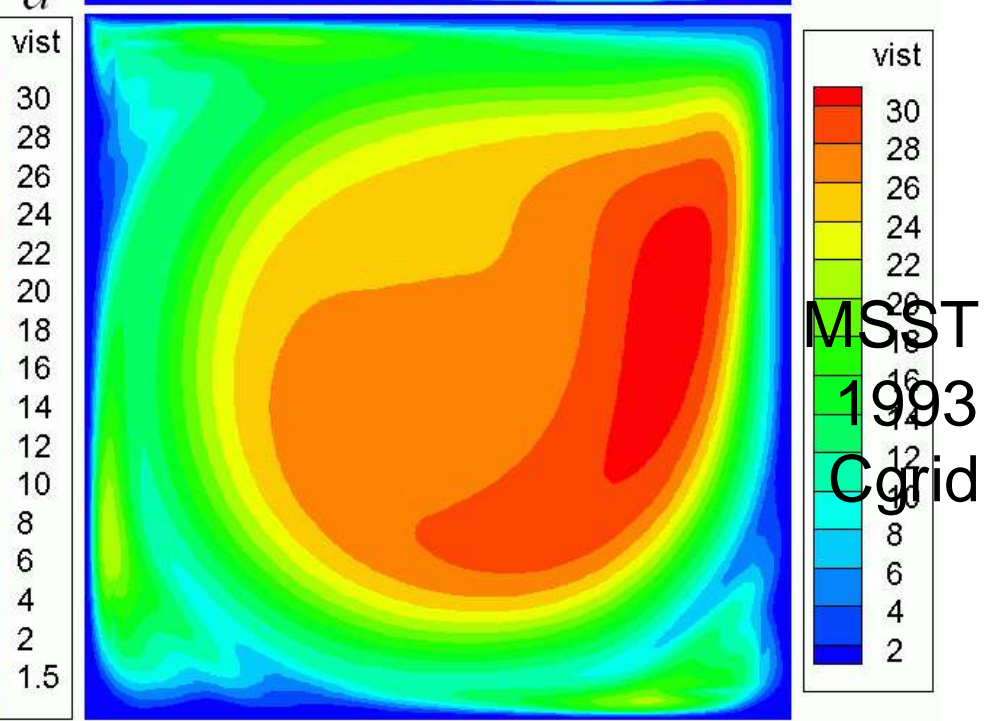
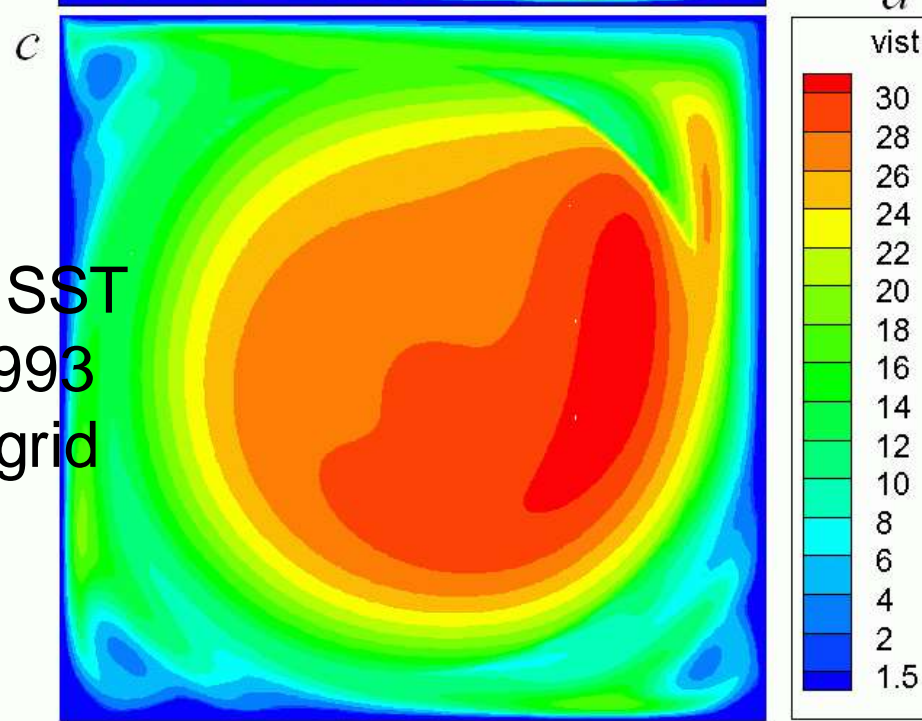
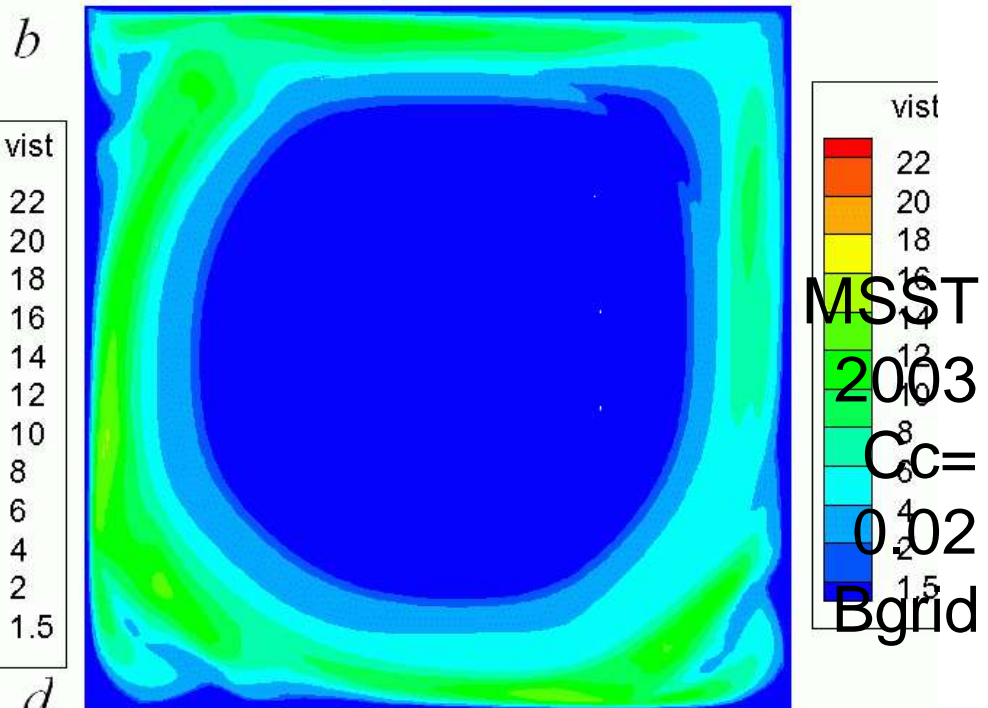
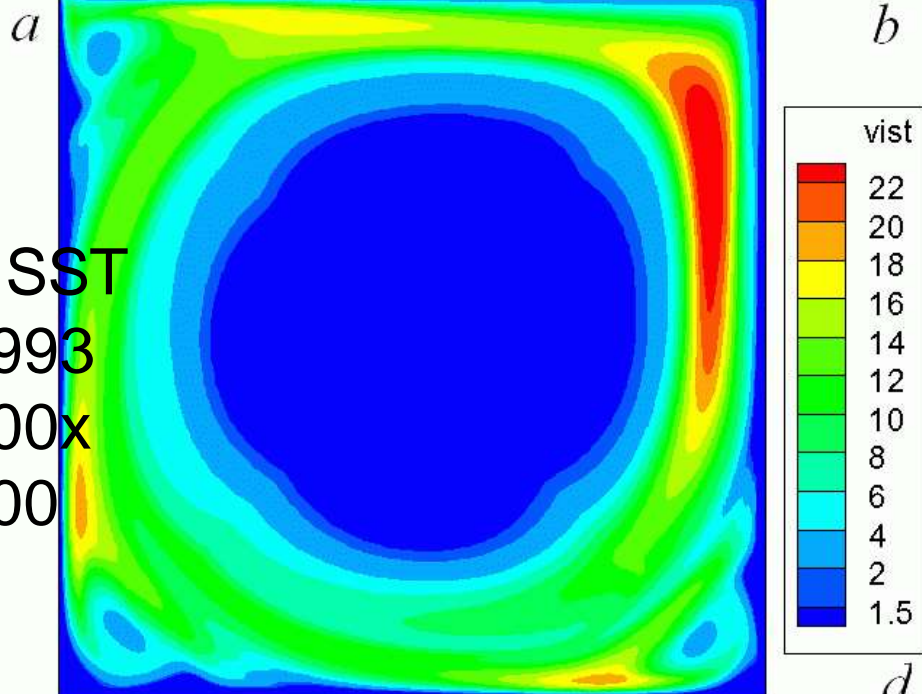


MSST
1993
400x
400

MSST
2003
 $C_c=$
0.02
Bgrid

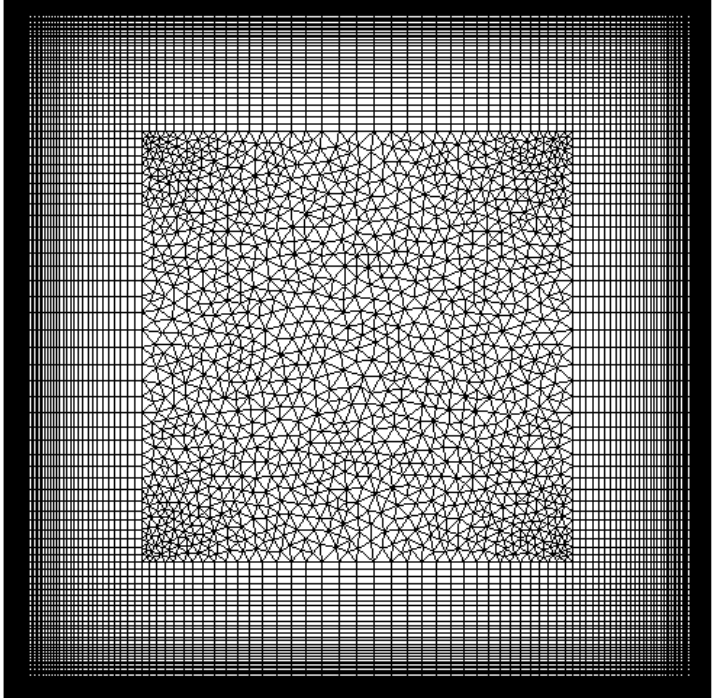
MSST
1993
Bgrid

MSST
1993
Cgrid

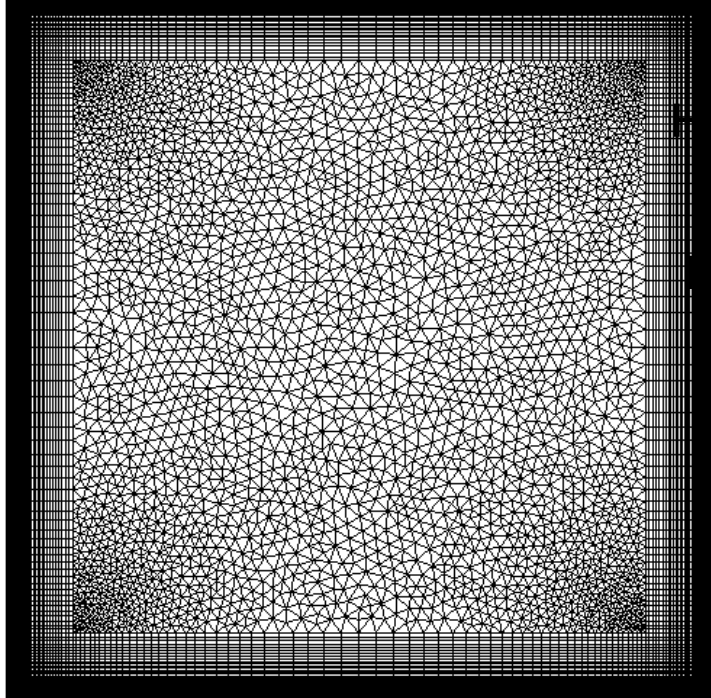


Гибридные,
неструктурир
ованные и
компоЗИТная
сетки

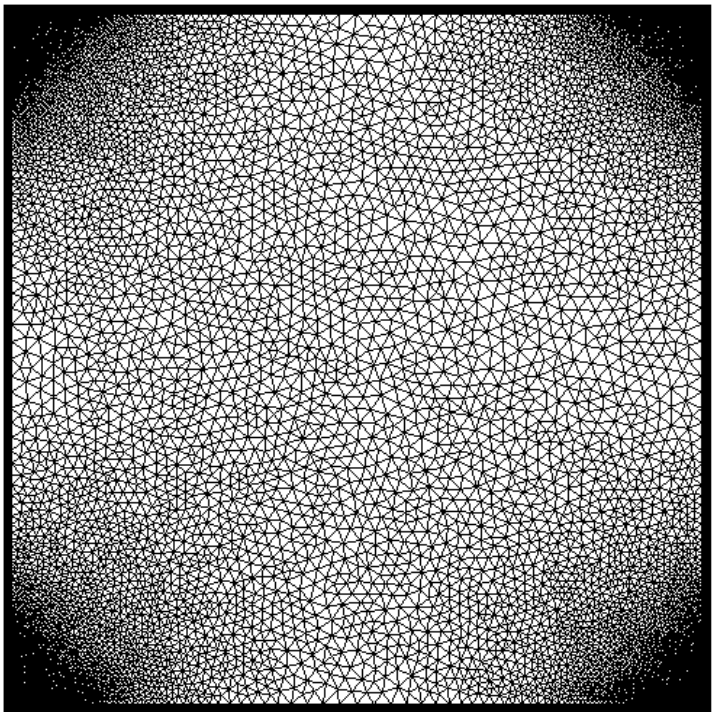
a



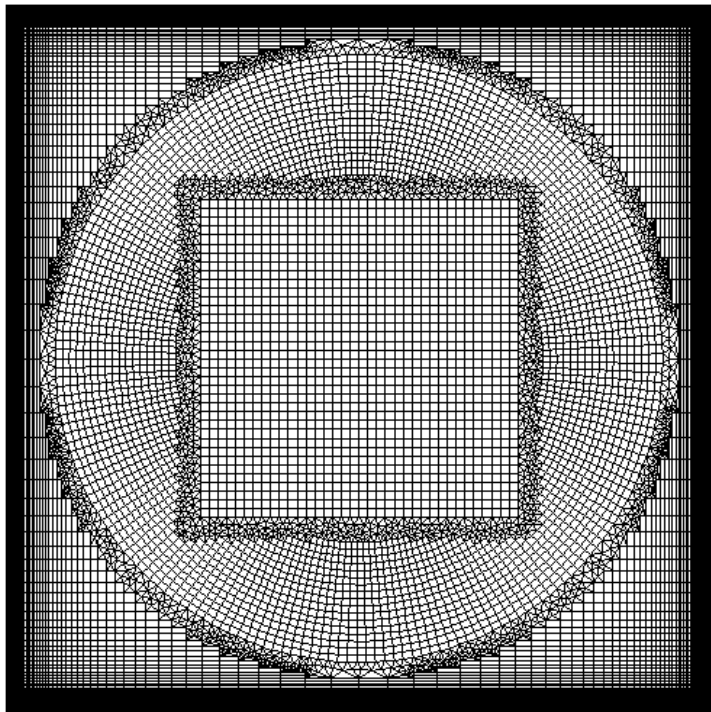
b



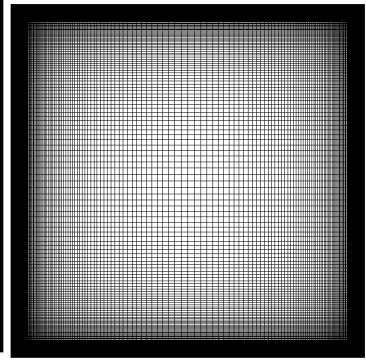
c

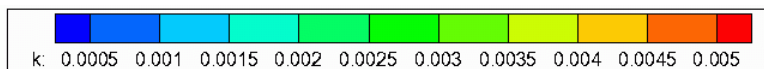


d

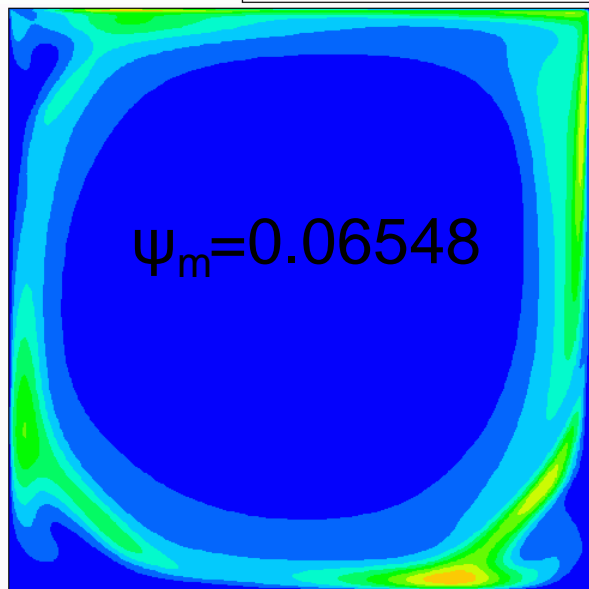


эталон

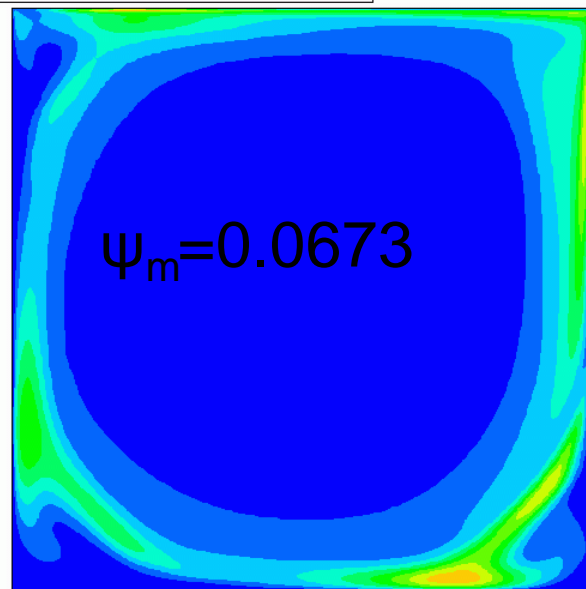




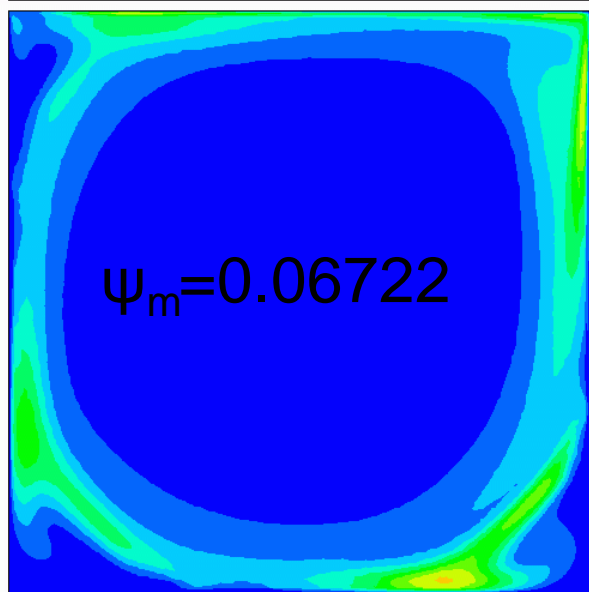
a



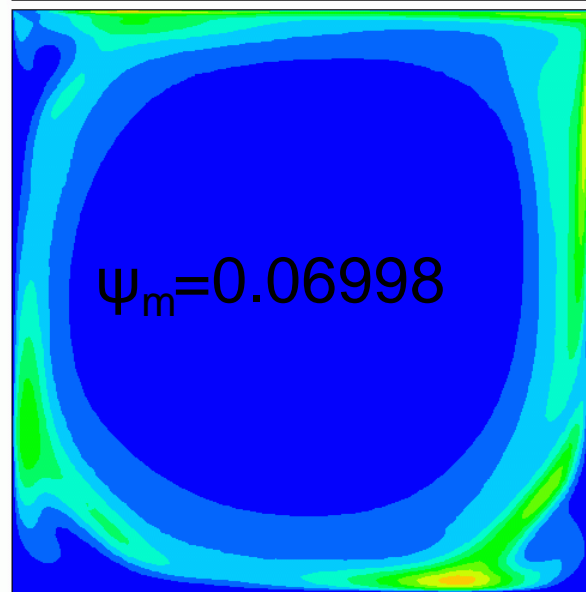
b



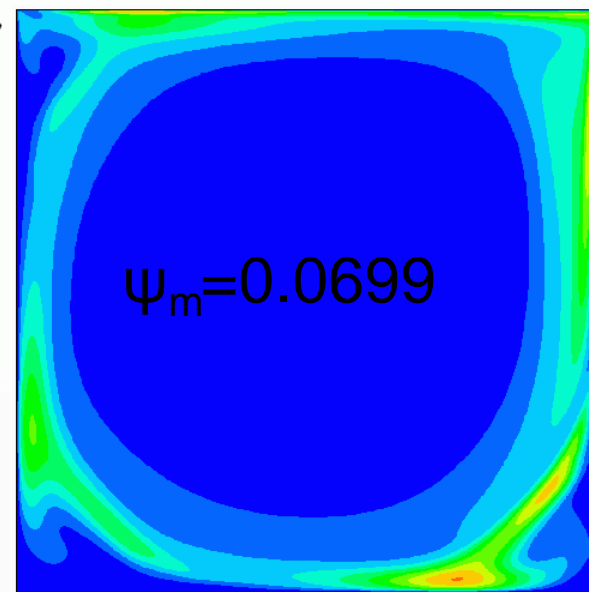
c

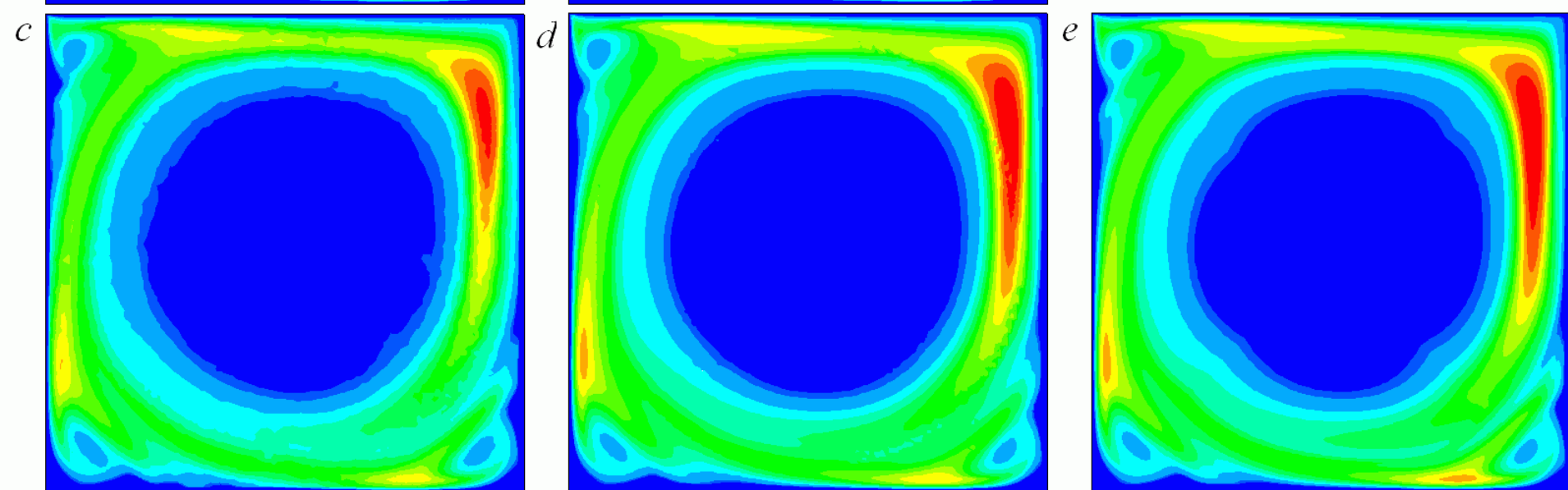
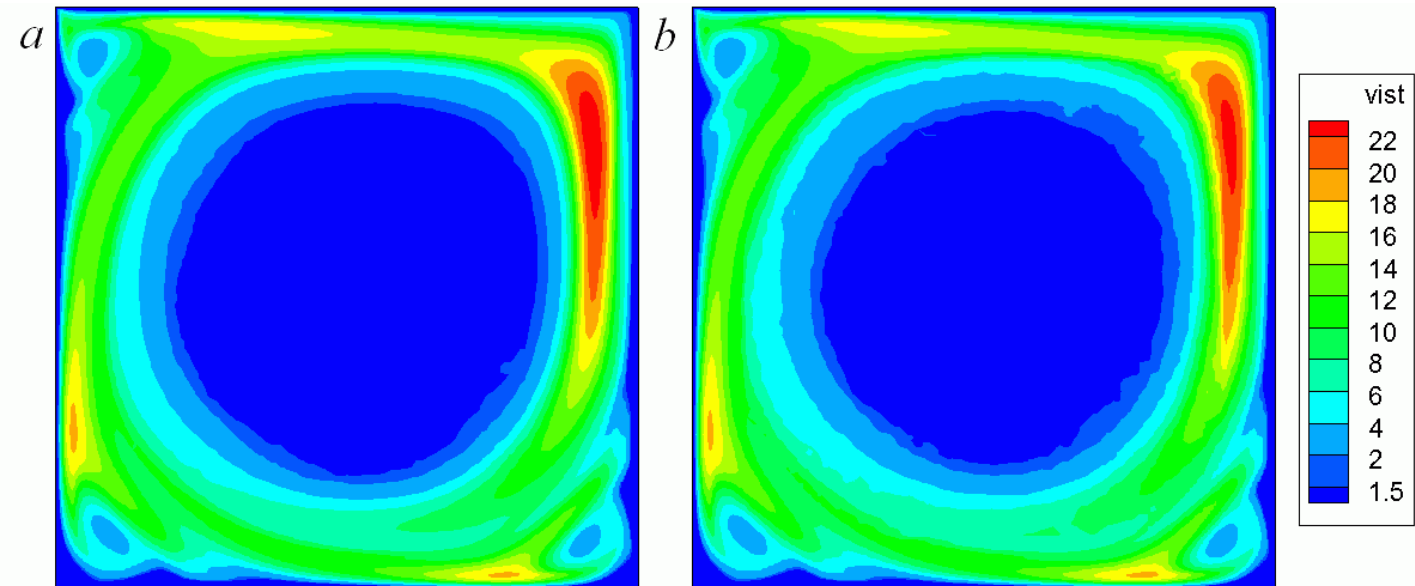


d



e





Выводы

- 1. MBT на различных пересекающихся структурированных сетках дает погрешность в прогнозах с использованием MSST1993 порядка 3-9%.
- 2. Прогнозы на неструктурированных сетках дают ошибку порядка 3-7%.
- 3. Композитные сетки с структурированными блоками и неструктурированными вставками дают прогнозы, близкие к эталонным.

ВЫВОДЫ

- 1. Разработаны и реализованы оригинальные специализированные пакеты программ VP2/3 на базе решения исходных уравнений Навье-Стокса и осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса с замыканием последних дифференциальной моделью турбулентности, записанных в приращениях зависимых переменных.**
- 2. Предложены, обоснованы, верифицированы и применены оригинальные многоблочные вычислительные технологии (МВТ), основанные на использовании разномасштабных пересекающихся сеток сравнительно простой топологии.**
- 3. Апробирован широкий круг математических моделей**
- 4. Получены важные фундаментальные и прикладные результаты.**

- **Проекты РФФИ 2013 года:**
 - 13-08-00322, 13-08-90468
- **Проекты РФФИ 2014 года:**
 - 14-08-00045, 14-01-00043
 - 14-08-92002 (Тайвань)
 - *Численное и экспериментальное исследование ветрового воздействия на городские высотные сооружения в прибрежной зоне «море-суша»*
- **Проекты РНФ 2014 года:**
 - *Аэромеханика утолщенных несущих поверхностей и тел вращения с вихревыми ячейками*
- **МЕГА-ПРОЕКТ с КАИ: 2014-2016**
 - *Моделирование физико-технических процессов в аэромеханике и теплофизике большегрузных автомобилей*