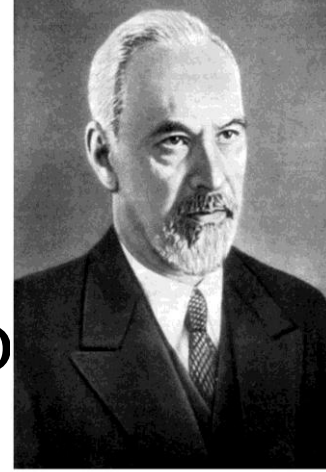


**Развитие и тестирование пакета VP2/3
(скорость-давление, 2D/3D)
с акцентом на сравнение версий SST-модели
турбулентности**

Исаев С.А

Казань, Санкт-Петербург

Темы



Людвиг Прандтль

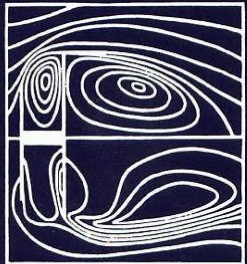
- Продвижения в развитии VP2/3 в 2015 году
- URANS, многоблочные вычислительные технологии и VP2/3 (скорость-давление, 2D/3D)
- Класс задач – отрывные турбулентные течения
- Стандартные версии MSST и коррекции с учетом влияния кривизны линий тока
- Подходы Роди-Лещинера-Исаева и Смирнова-Ментера, константа Исаева-Харченко-Усачова $C_s=0.02$
- Оценка приемлемости комбинированного по Ментеру (CFX) подхода расчета пристеночных течений с пристеночными функциями
- Тесты: каверна с подвижной крышкой, круговая каверна в прямом и поворотном канале, диск-цилиндр минимального сопротивления, полукруговой профиль

Прогресс VR2/3 в 2015 году

- Развитие МВТ в направлении использования КОМПОЗИТНЫХ СЕТОК
- Пилотная версия генератора композитных сеток
- Применение алгебраического многосеточного ускорителя для повышения устойчивости решения уравнения для поправки давления

И.А. БЕЛОВ
С.А. ИСАЕВ
В.А. КОРОБКОВ

ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ



1989

Министерство образования Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет "Военмех"

И.А. БЕЛОВ, С.А. ИСАЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ
ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Учебное пособие

2001

Санкт-Петербург
2001

RANS&URANS. Пакетные технологии (с 1974)

УПРАВЛЕНИЕ ОБТЕКАНИЕМ ТЕЛ 2001- С ВИХРЕВЫМИ ЯЧЕЙКАМИ 2003

В ПРИЛОЖЕНИИ
К ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ
ИНТЕГРАЛЬНОЙ КОМПОНОВКИ
(ЧИСЛЕННОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ)

многоблочные вычислительные технологии



Сергей Исаев
Павел Баранов
Александр Усачов

Многоблочные вычислительные технологии в VP2/3 по аэротермодинамике

Разработка, верификация и применение

2013



Математические модели. MBT(VP2/3)

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

2

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V} - \tau) = -\nabla p + \mathbf{S}_V;$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \bar{u}_j h) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\bar{\mu}_t}{Pr} \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \bar{\tau}_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) (\kappa - 1) M_0^2.$$

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

- учет кривизны линий тока: $\mu_t = \mu_{to} / (1 + C_c Ri_t)$

μ_{to} – без учета кривизны; $C_c = 0.02 - 0.1$

- 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	$0 \div 9$

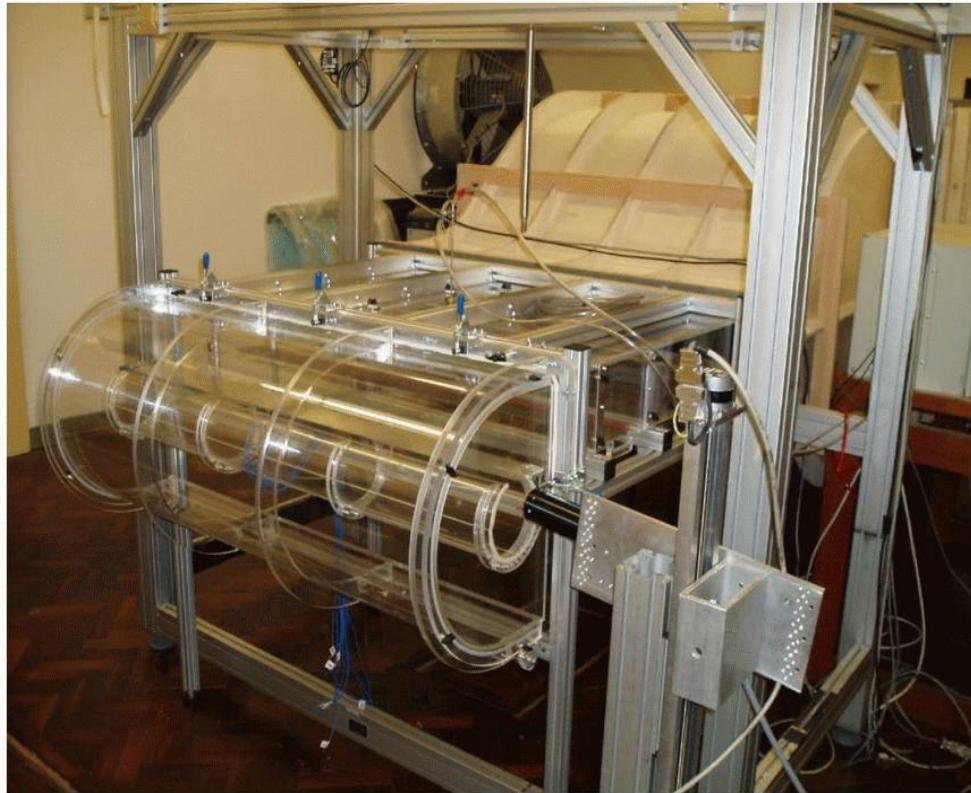
$Pr_t = 0.9$; $T_w = \text{const} (373\text{K})$; $T_{\text{inlet}} = 293\text{K}$;
 $Tu = 1.5\%$

Сравнение моделей.

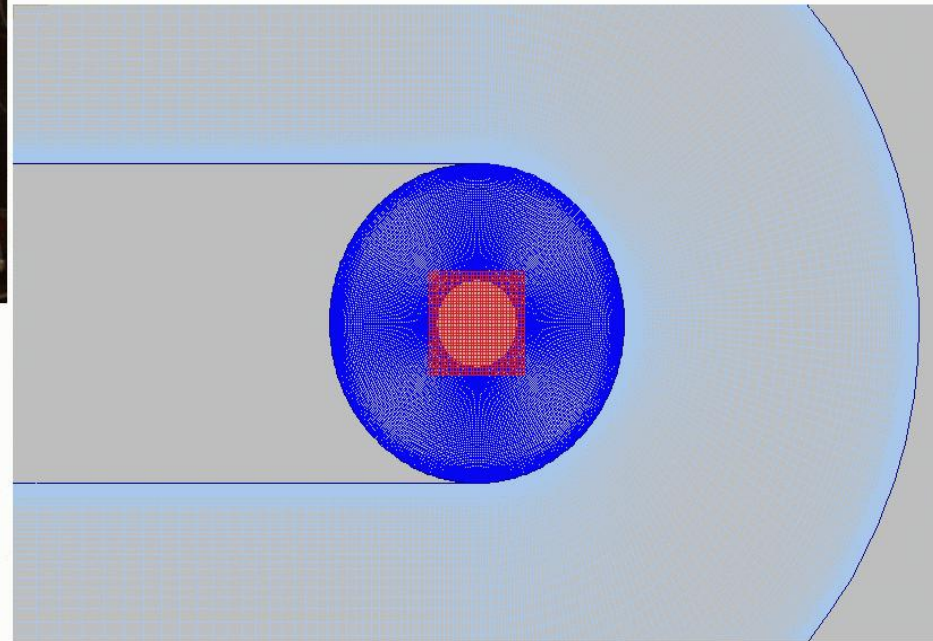
Методические исследования.

- Стандартная низкорейнольдсовая MSST двух типов (1993 и 2003) и модификации модели 2003 года с поправками на кривизну линий тока в рамках подходов Роди-Лешцинера с константой Исаева-Харченко-Усачова ($C_s=0.02$) и Смирнова – Ментера (SM)

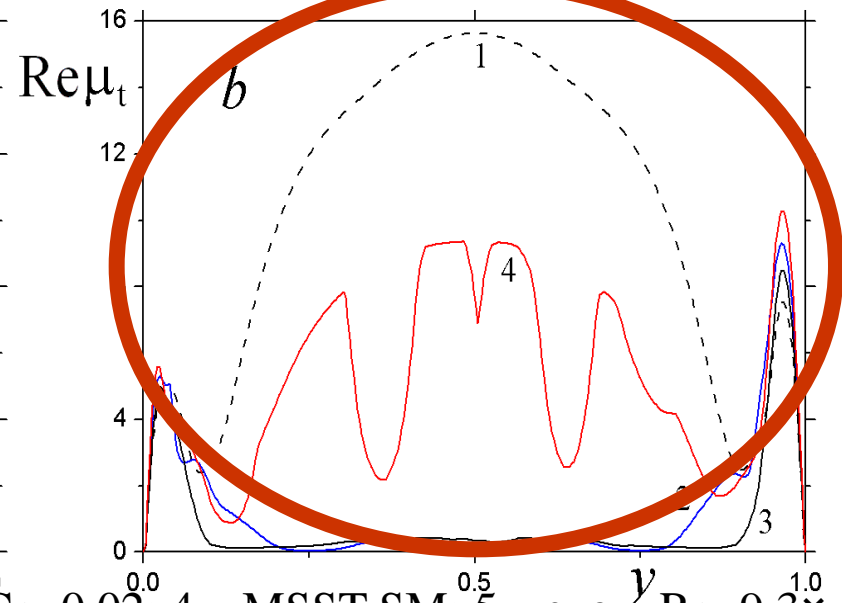
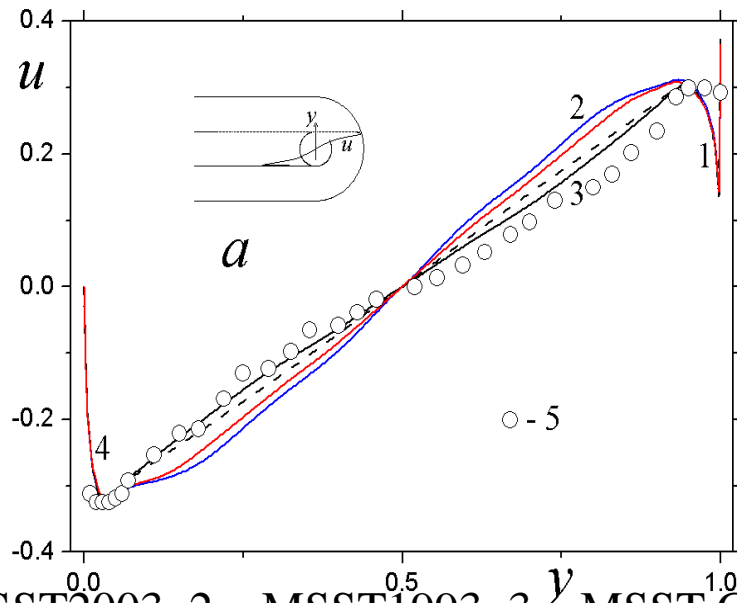
U-образный канал с каверной



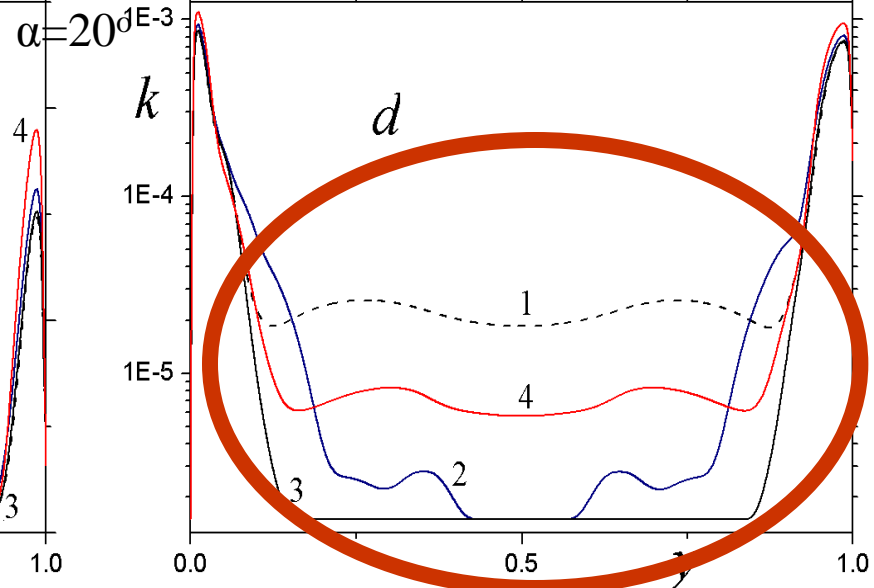
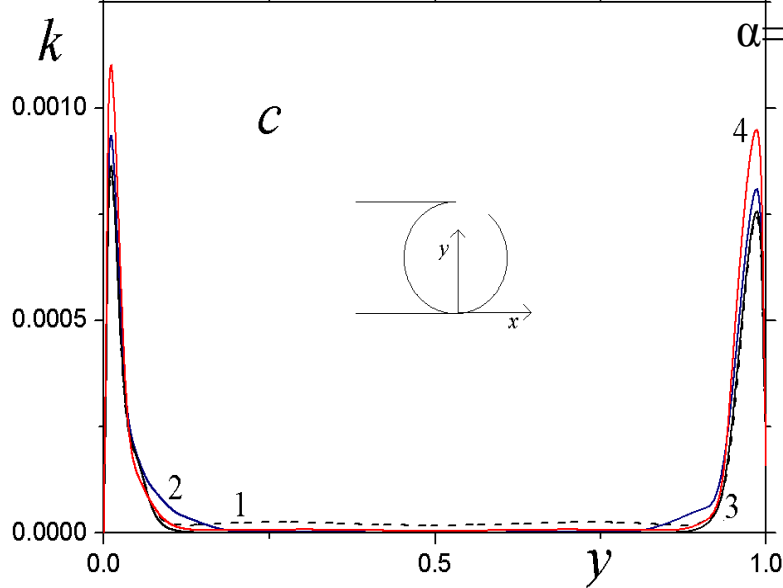
Фотография экспериментальной установки Я.Кастро в Саутгемптоне (a), упрощенная модельная конфигурация установки (b) и фрагмент многоблочной сетки в окрестности круговой каверны



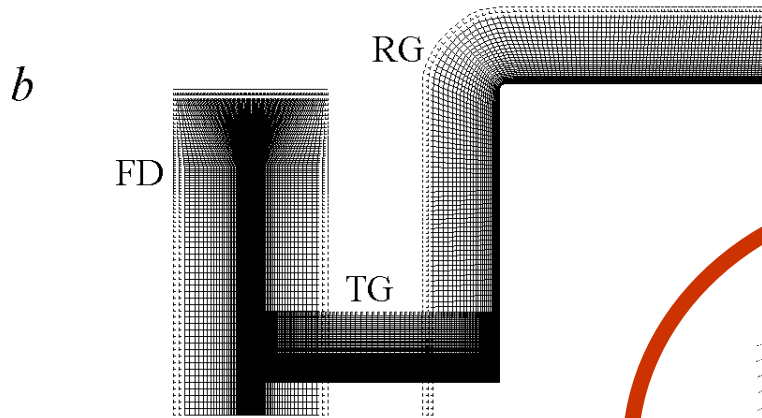
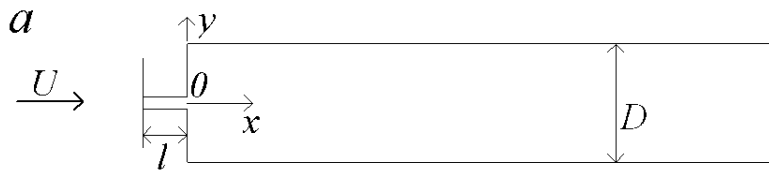
Сравнение u (a), $\text{Re}\mu_t$ (b) и k в линейном (c) и логарифмическом масштабе (d).



1 – MSST2003; 2 – MSST1993; 3 – MSST $C_s=0.02$; 4 – MSST SM; 5 – эксп. $\text{Re}=9.3 \times 10^4$;

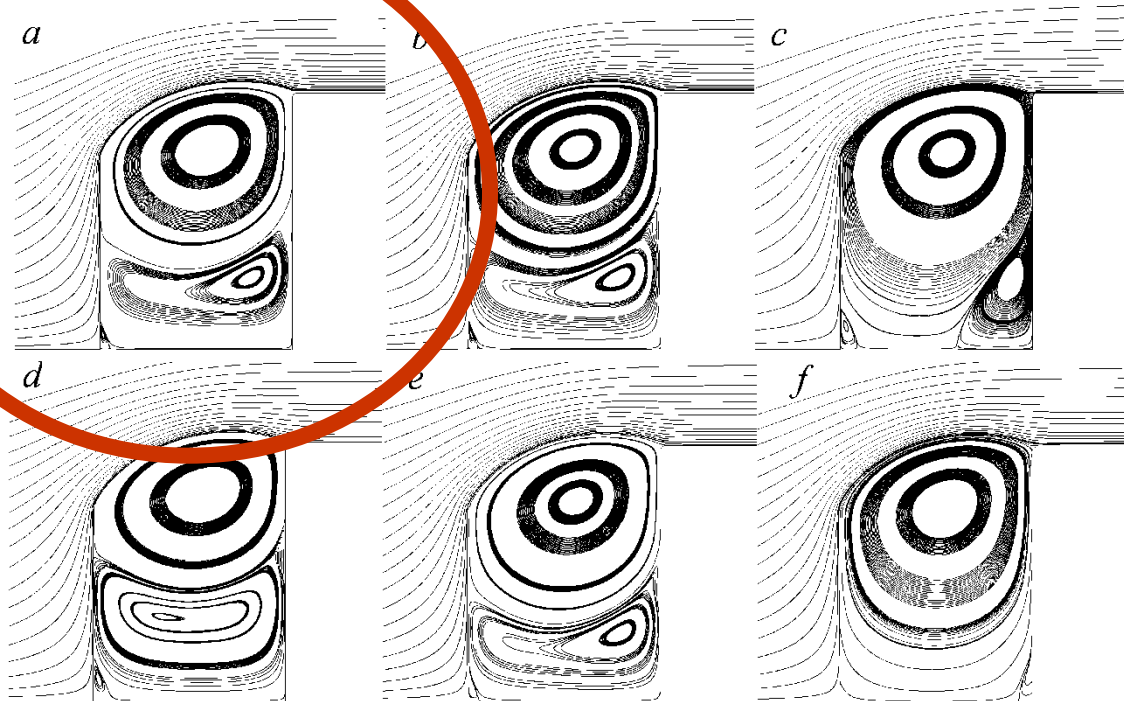
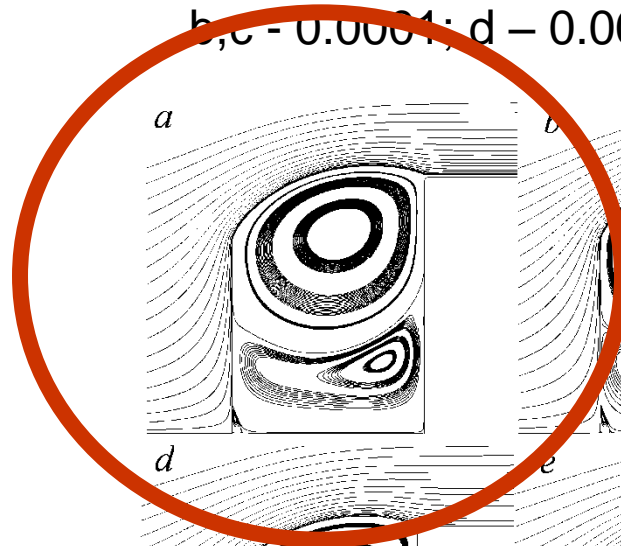


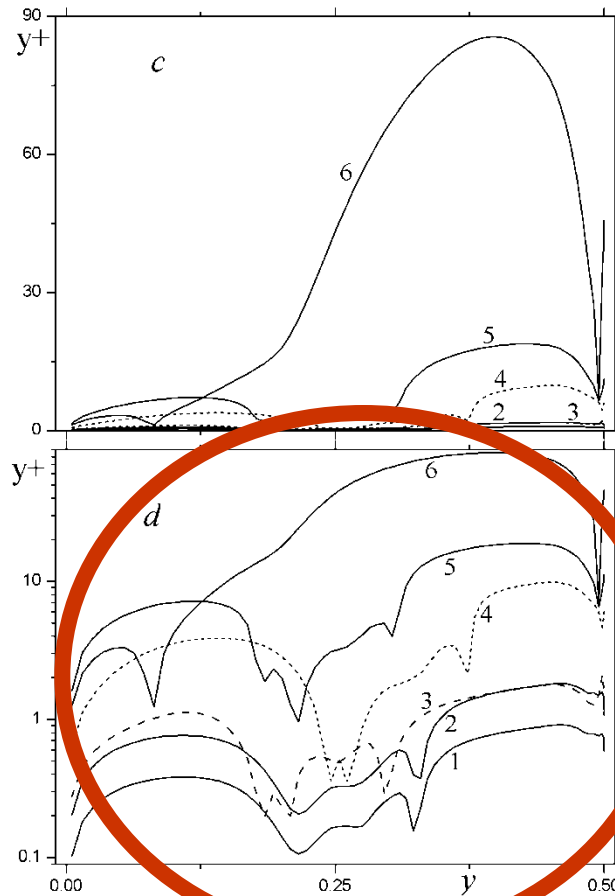
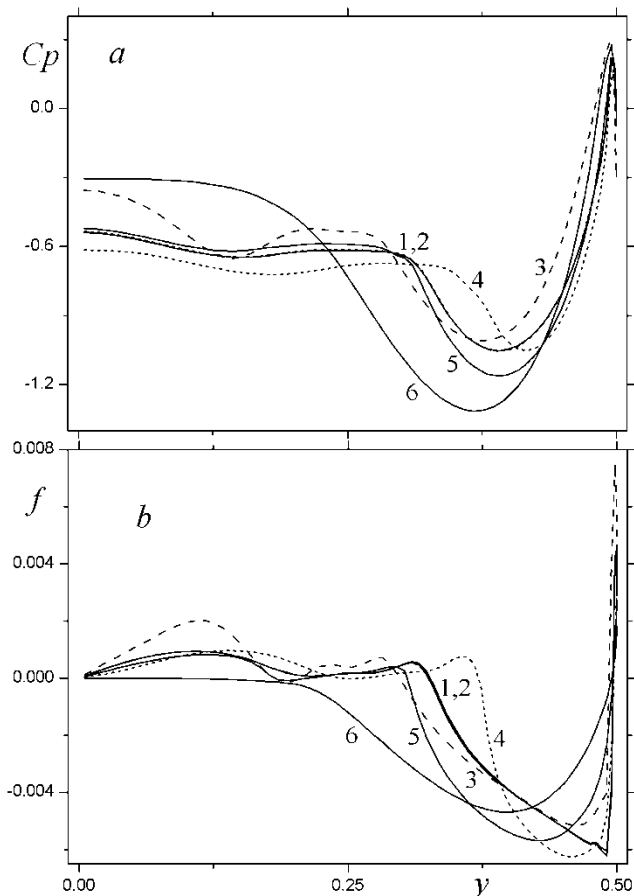
Осесимметричное обтекание оптимальной компоновки диск-цилиндр $d=0.75$; $l=0.375$ при $Re=500000$.



Сравнение картин отрывного обтекания цилиндра с выступающим диском без соединительного стержня при различных размерах пристеночного шага h с использованием схем аппроксимации второго (a-b, d-f) и первого (c) порядков.

a – $h=0.00005$; b, c – 0.0001 ; d – 0.0005 ; e – 0.001 ; f – 0.005 .



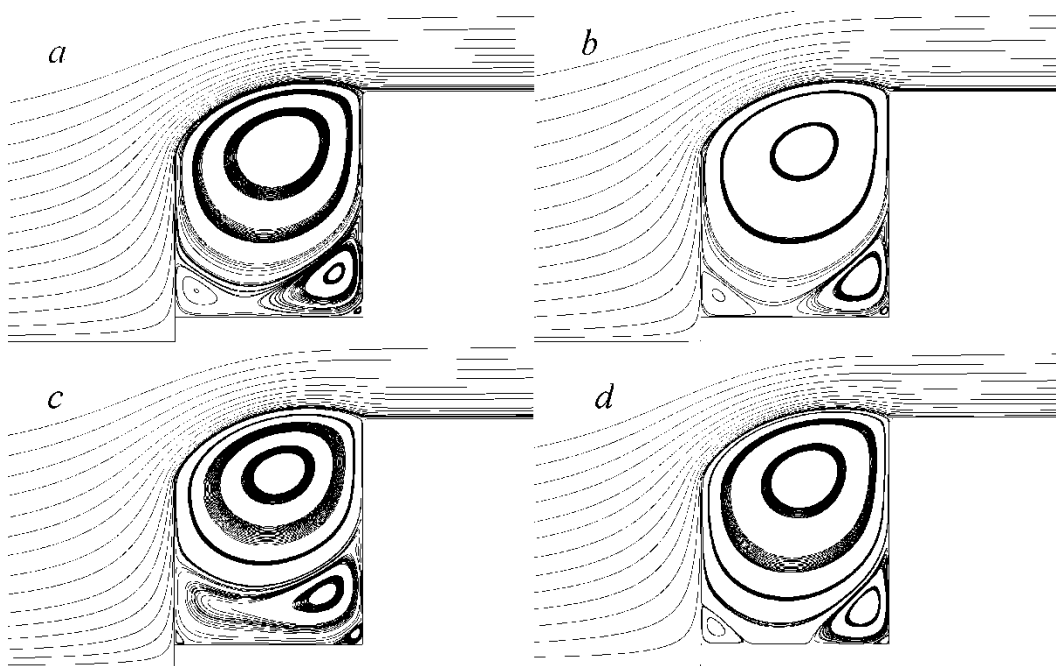


Сопоставление распределений коэффициента давления (a), трения (b) и y^+ (c,d) по переднему торцу цилиндра в зависимости от h и порядков аппроксимации конвективных членов. 1 – $h=0.00005$; 2 - 0.0001 ; 4 – 0.0005 ; 5 – 0.001 ; 6 – 0.005 для второго порядка и 3 – 0.0001 для первого. d – логарифмический масштаб.

Влияние величины пристеночного шага на интегральные силовые характеристики цилиндра удлинением 5 с оптимальными размерами выступающего диска (0.75) и зазора между диском и торцом цилиндра (0.375) при числе Рейнольдса 5×10^5 (без соединительного стержня)

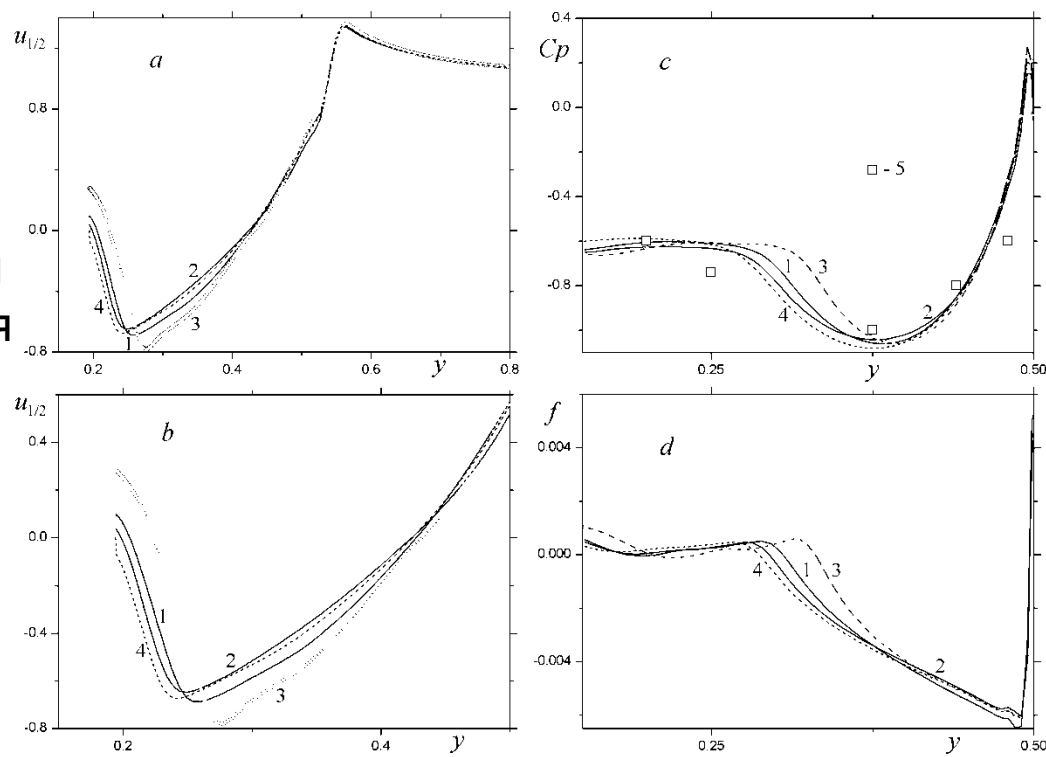
* - расчеты проведены по схеме первого порядка аппроксимации

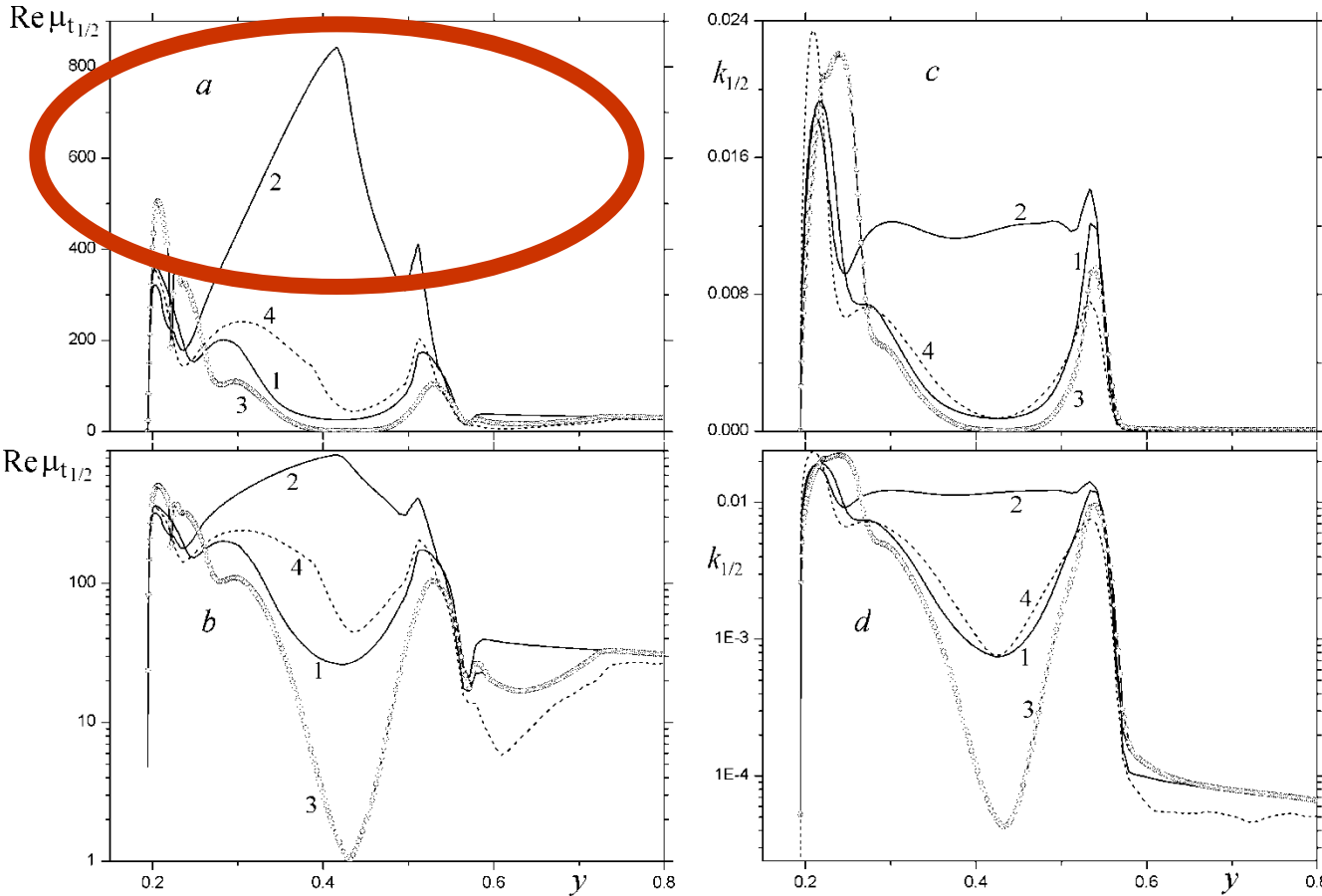
δ_m	C_x	C_{xp}	C_{xf}	C_{xb}
5×10^{-5}	0.2189	0.0346	0.0621	0.1114
10^{-4}	0.2178	0.0339	0.0605	0.1123
10^{-4*}	0.3010	0.1218	0.0417	0.1180
5×10^{-4}	0.2129	0.0238	0.0691	0.1138
10^{-3}	0.1957	-0.0069	0.0757	0.1144
5×10^{-3}	0.2068	-0.0184	0.0772	0.1288



Сравнение картин отрывного обтекания цилиндра с выступающим диском при наличии соединительного стержня для стандартных версий MSST 1993 г (a) и 2003 г (b), а также модификаций MSST 2003 года с учетом влияния кривизны линий тока в рамках подходов Роди-Лешцинера-Исаева (РЛИ) (c) и Смирнова-Ментера (d).

Сопоставление распределений осевой скорости (a,b) в срединном сечении передней срывной зоны и коэффициента давления (c) и трения (d) по переднему торцу цилиндра для различных версий MSST. 1 – MSST 1993 года; 2- MSST 2003 года; 3 – модификация MSST 2003 года в рамках подхода РЛИ; 4 – модификация MSST 2003 года по Смирнову-Ментеру. b – укрупненный фрагмент.



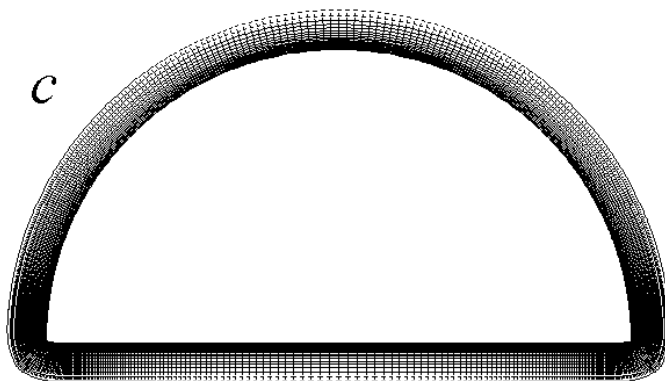
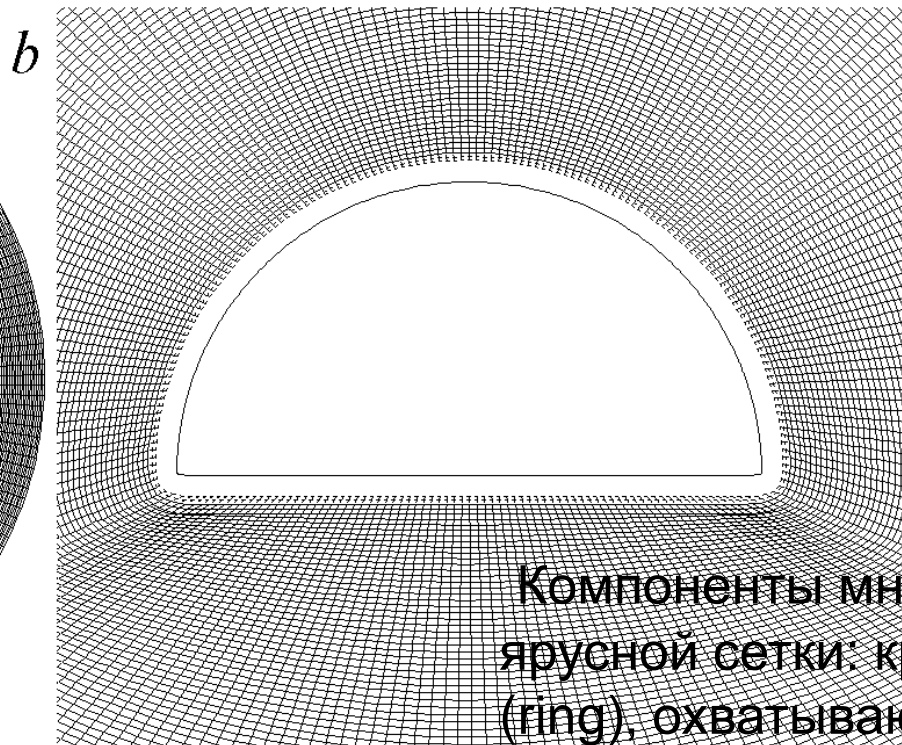
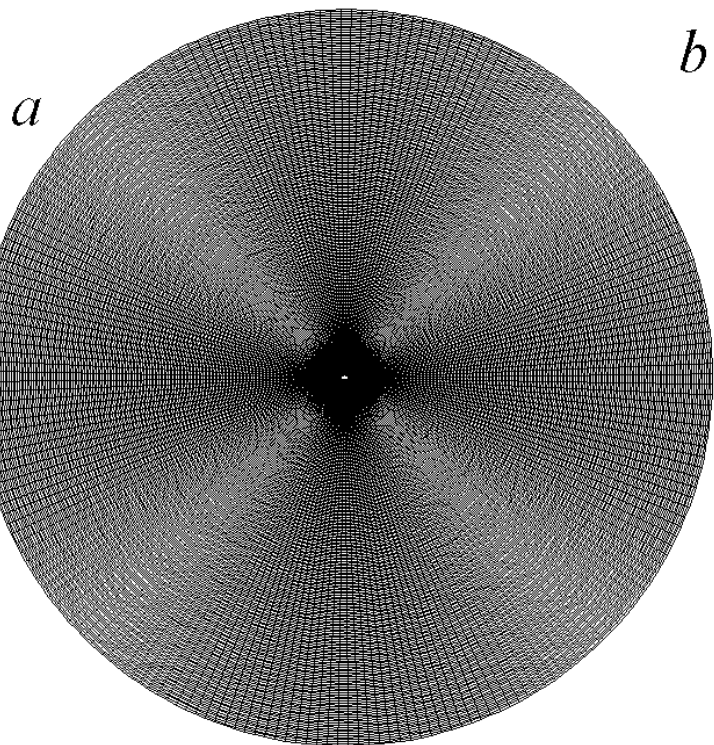


Сравнение распределений масштабированной вихревой вязкости (a,b) и энергии турбулентности (c,d) в срединном сечении передней срывной зоны для различных версий MSST. 1 – MSST 1993 года; 2- MSST 2003 года; 3 – модификация MSST 2003 года в рамках подхода РЛИ; 4 – модификация MSST 2003 года по Смирнову-Ментеру. b,d – логарифмический масштаб.

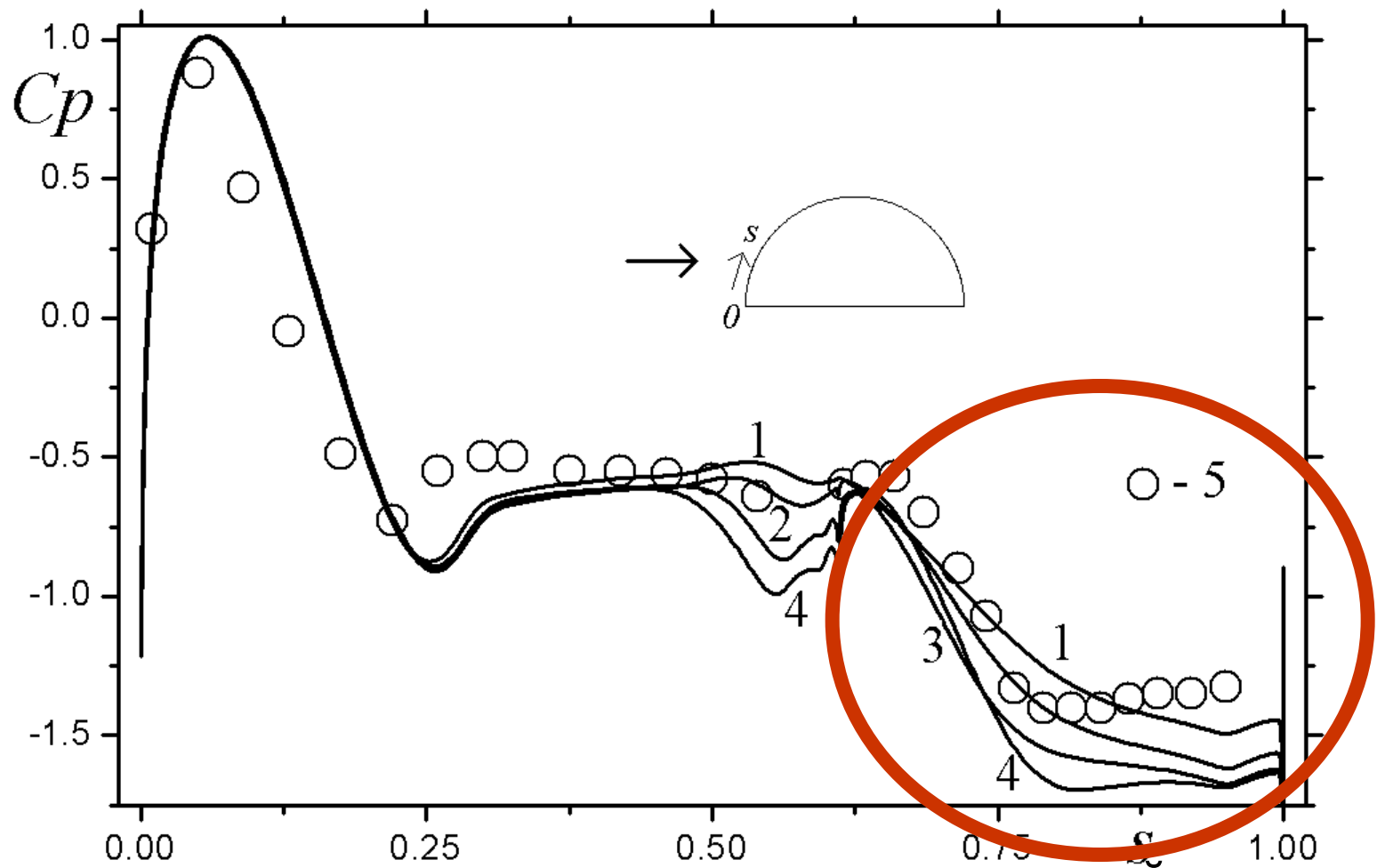
Сравнение стандартных и модифицированных MSST при прогнозировании интегральных силовых характеристик цилиндра удлинением 5 с оптимальными размерами выступающего диска (0.75) и зазора между диском и торцом цилиндра (0.375) при числе Рейнольдса 5×10^5 (с диаметром соединительного стержня 0.1 и $\delta_m = 10^{-4}$)

Версия MSST	C_x	C_{xp}	C_{xf}	C_{xb}
Стандартная 1993	0.2284	0.0382	0.0604	0.1160
Стандартная 2003	0.2307	0.0440	0.0599	0.1168
Модификация RLI $C_c=0.02$	0.2151	0.0298	0.0609	0.1122
Модификация SM	0.2177	0.0324	0.0593	0.1145
Эксперимент	-	0.03	-	-

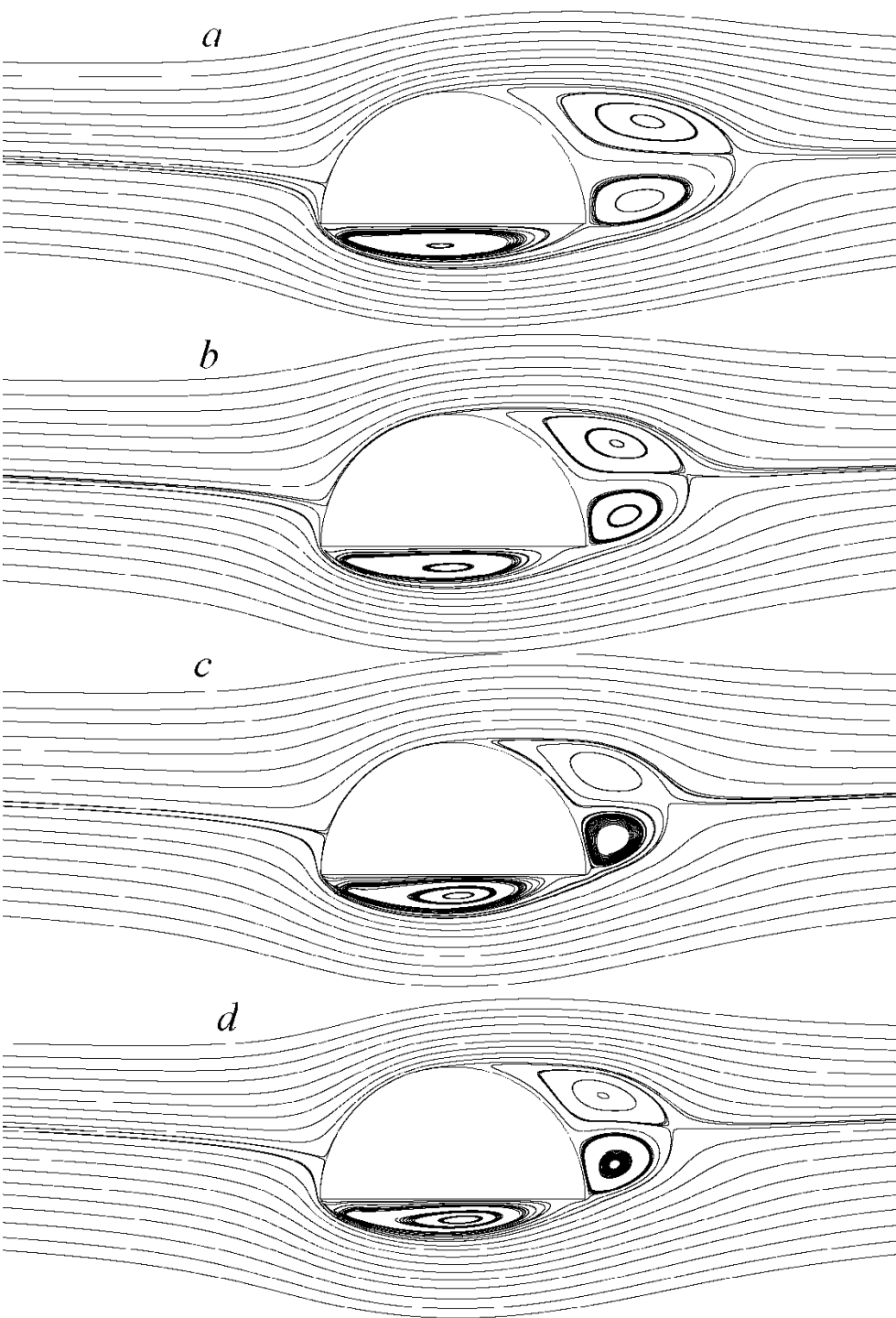
Нестационарное обтекание полуцилиндрического профиля под нулевым углом атаки $Re=45000$



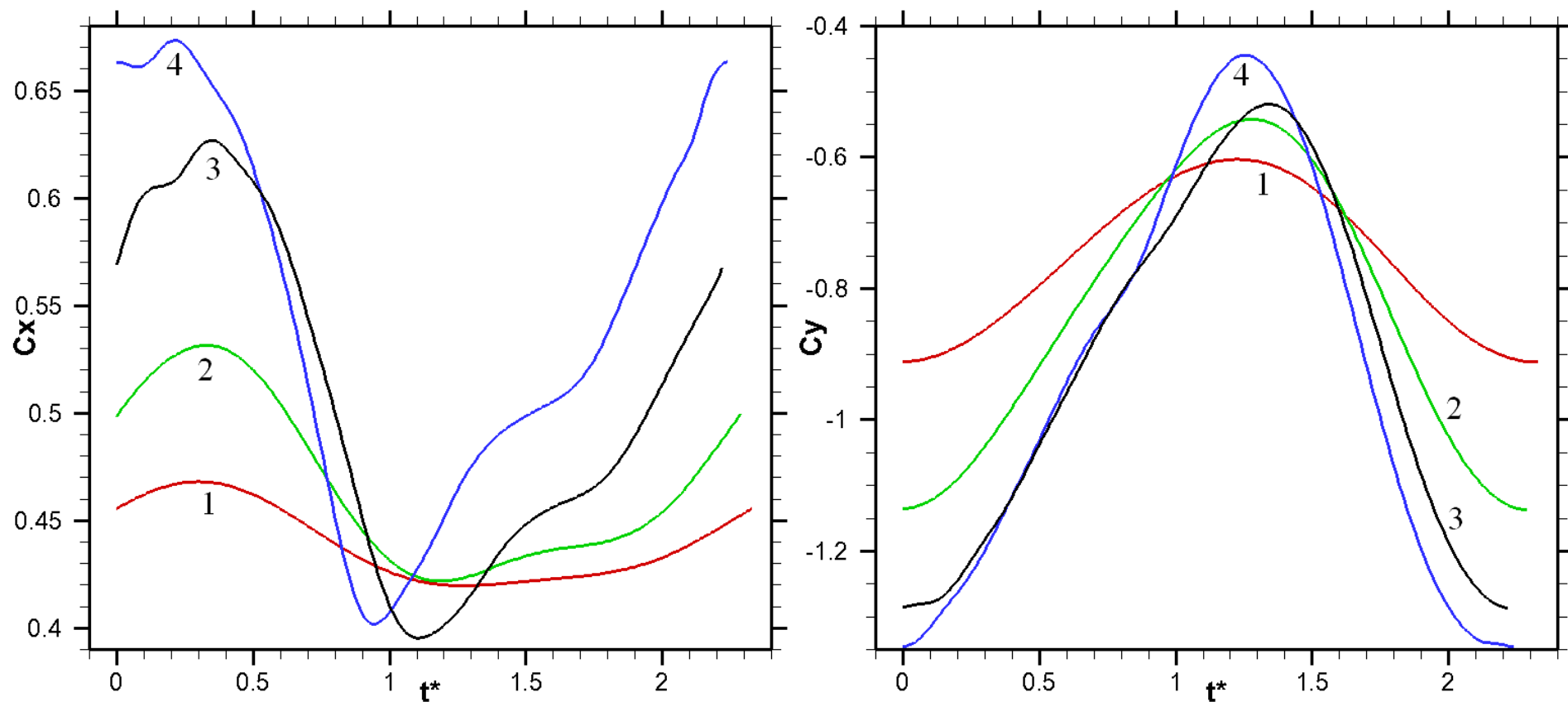
Компоненты многоблочной ярусной сетки: круговая (ring), охватывающая всю расчетную область (a), и ее фрагмент около полуцилиндрического профиля (b), кольцевая околосконтурная, со сгущением к поверхности (c).



Сравнение осредненных расчетных распределений коэффициента давления по периметру от передней кромки полуцилиндра при использовании базовой MSST2003 (1), старой MSST1993 (2), модифицированных MSST2003 в рамках подходов Смирнова-Ментера (3) и ЛПИ (4) в сравнении с экспериментальными данными (5)



Сравнение картин линий тока осредненного по периоду колебаний Su отрывного течения около полуцилиндра при использовании базовой MSST2003 (a), старой MSST1993 (b), модифицированных MSST2003 в рамках подходов ЛРИ (c) и Смирнова-Ментера (d)



Сравнение расчетных распределений на периоде колебаний C_y коэффициентов сопротивления (а) и подъемной силы (б), действующих на полуцилиндр, при использовании базовой MSST2003 (1), старой MSST1993 (2), модифицированных MSST2003 в рамках подходов Смирнова-Ментера (3) и ЛРИ (4)

Влияние типа модели SST на осредненные по периоду колебаний C_x и C_y

Модель SST	C_x	C_y
Новая, образца 2003 года	0.440	-0.758
Старая, образца 1993 года	0.467	-0.829
SM коррекция	0.564	-1.286
РЛИ подход	0.546	-0.932

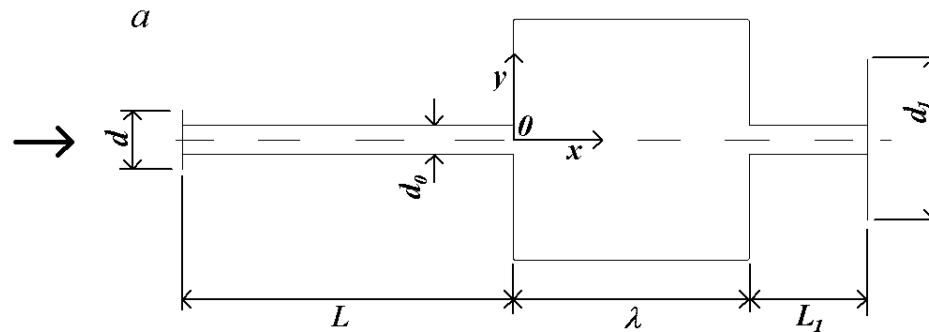
Сходимость численных прогнозов осредненных по периоду колебаний C_x и C_y в рамках РЛИ подхода к коррекции MSST с измельчением сетки

Сетки	C_x	C_y
Базовая	0.546	-0.932
Измельчение по радиальной координате	0.529	-0.959
Измельчение по окружной координате и пристеночного шага	0.510	-0.996

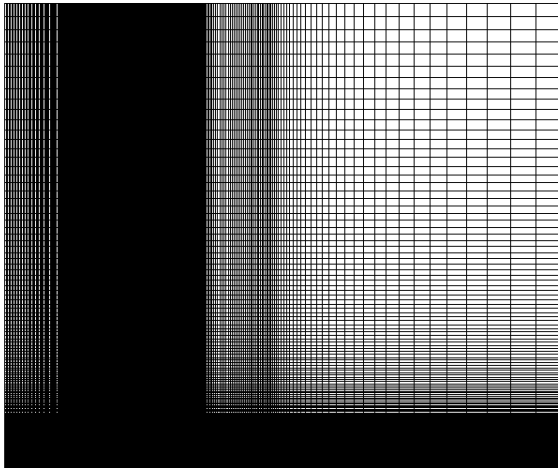
Сравнение экспериментальных данных и численных прогнозов осредненных по периоду колебаний C_x и C_y

	C_x	C_y
Эксперимент	0.5	-1.1
Расчет	0.51	-0.996

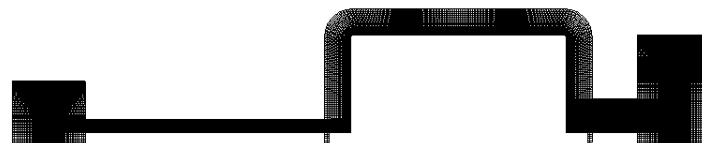
Сверх- и гиперзвуковое обтекание КОМПОНОВКИ ДИСК-ЦИЛИНДР

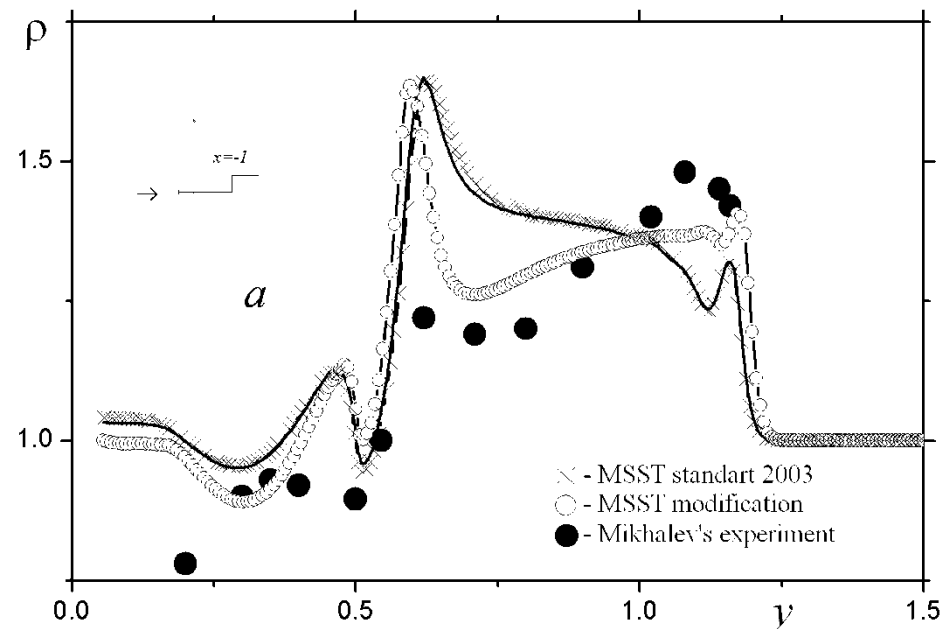
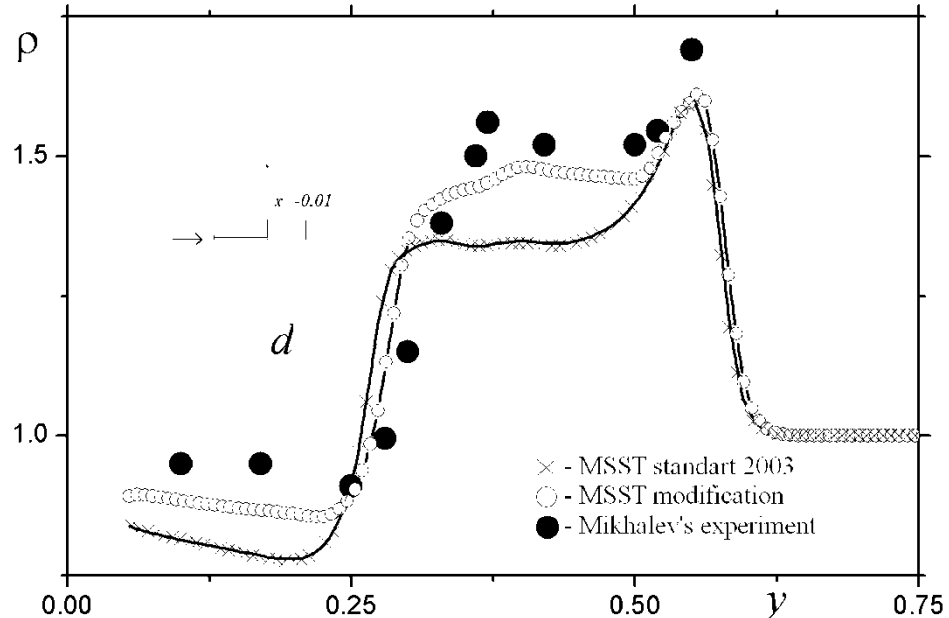
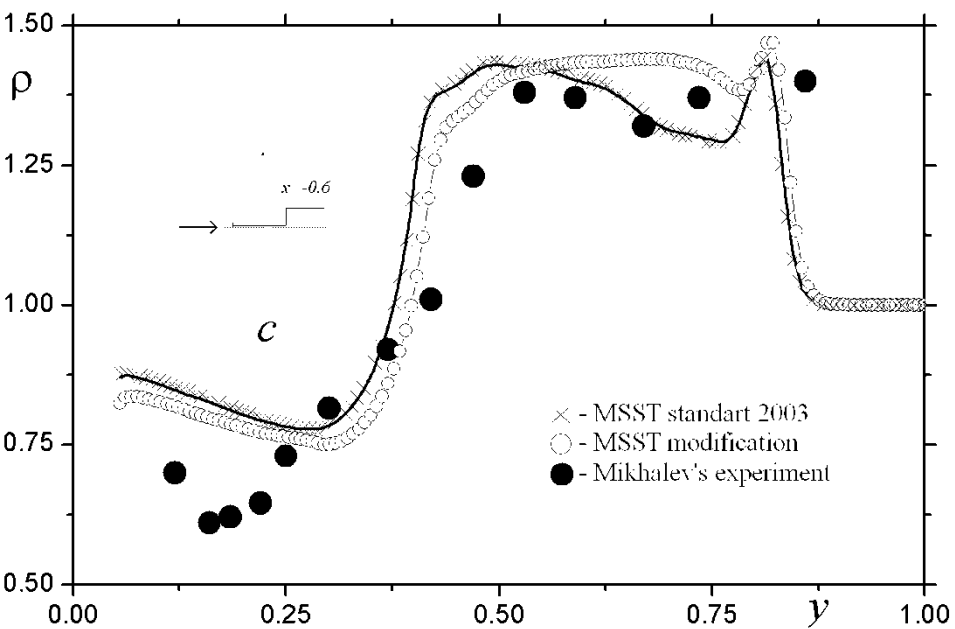
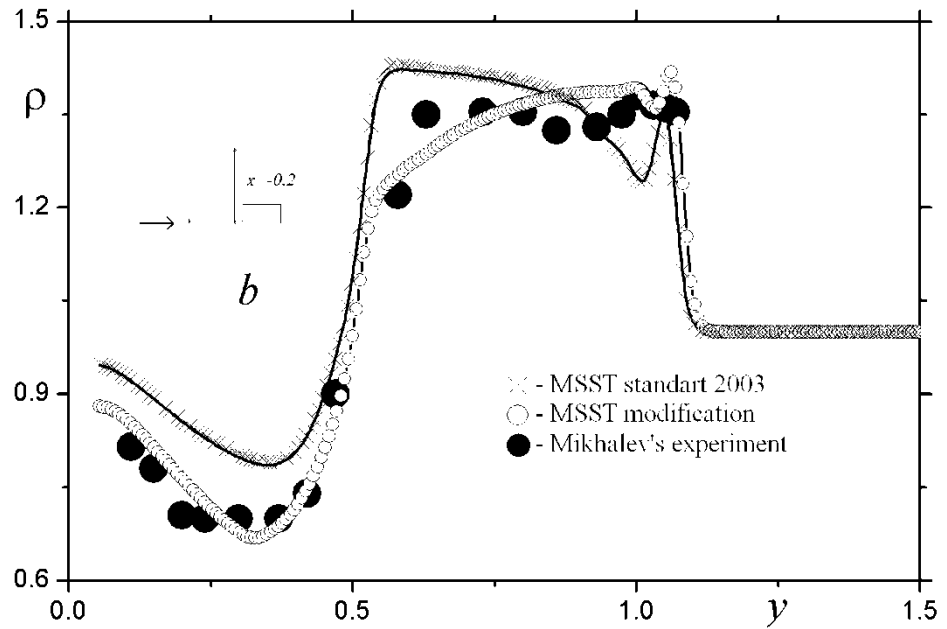


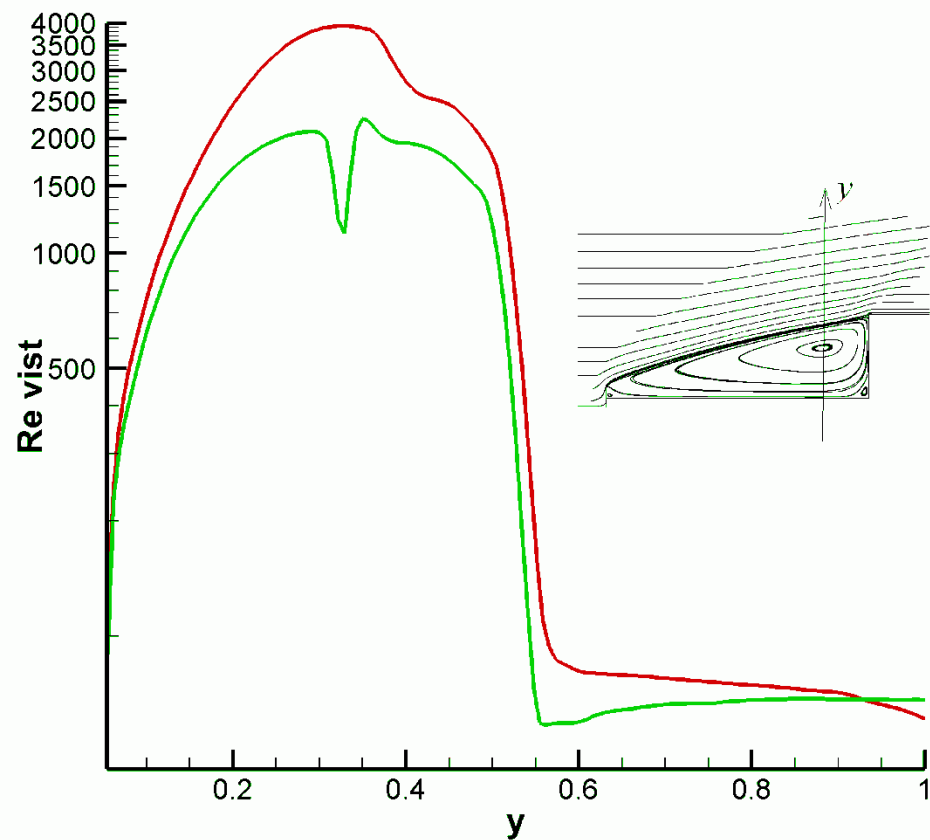
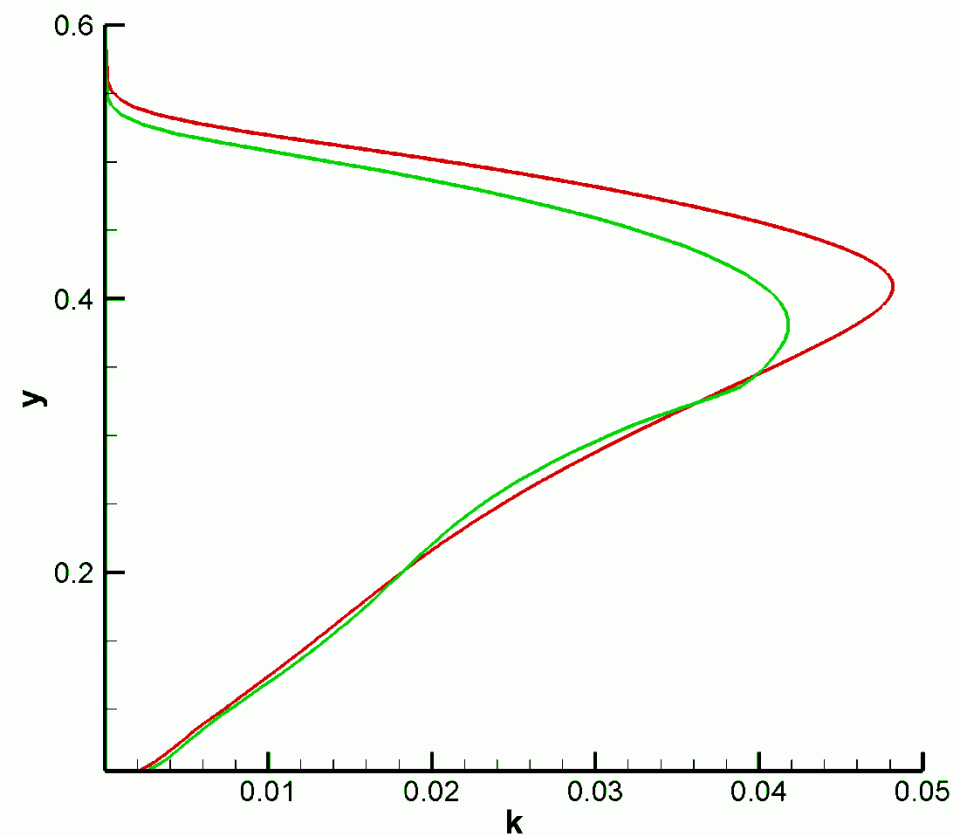
б



в



$M=2.35$  $Re=1000000$ 



SST2003

SST2003 $C_c=0.02$

aeroballistic experiment

tube experiment

$C_{xv}=0.374$

$C_{xv}=0.345$

$C_{xv}=0.36$

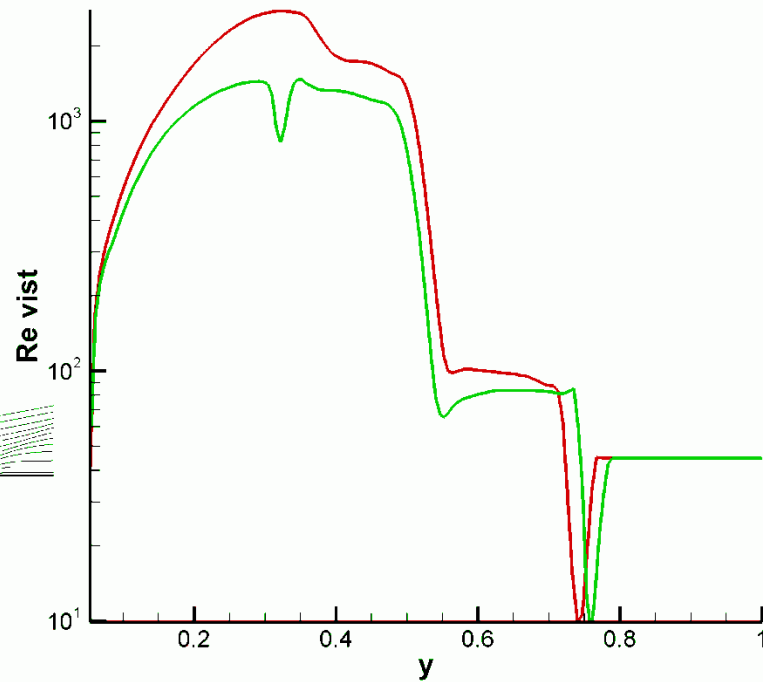
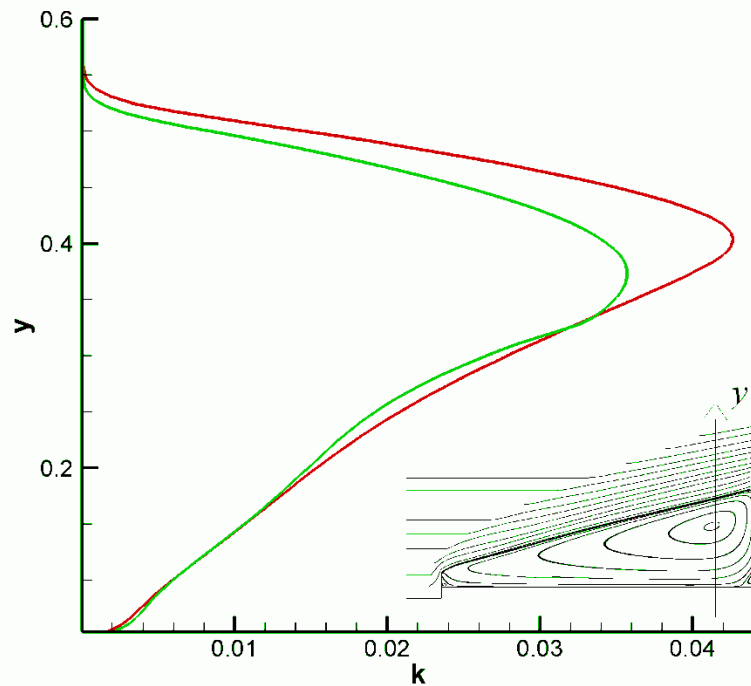
$C_{xv}=0.335$

$C_{xd}=0.142$

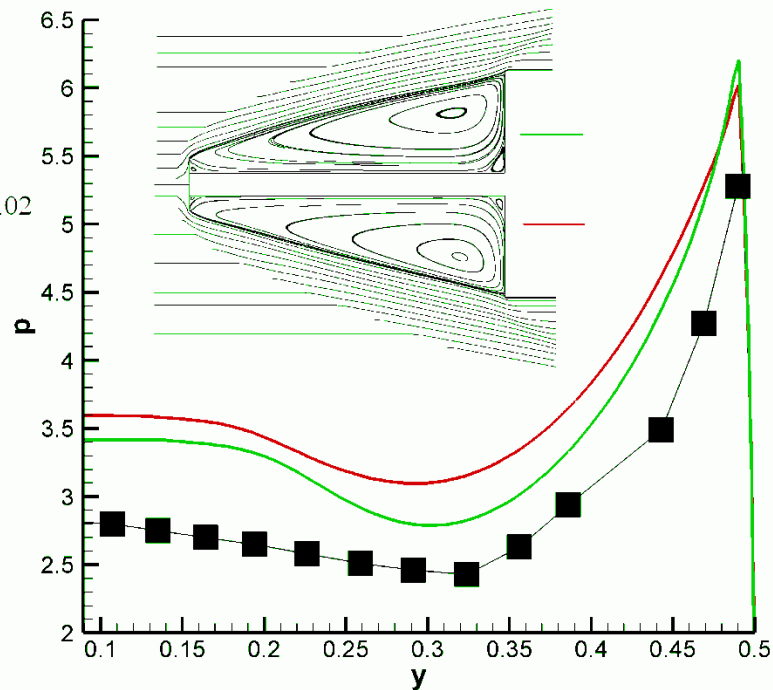
$C_{xd}=0.141$

$C_x=0.53$

$C_x=0.5$



- MSST standart 2003
- MSST modification 2003 $C_c=0.02$
- - Konovalov's experiment (tube)



$M=4.15$

SST2003 $C_{xv}=0.32$

SST2003 modified

$C_{xv}=0.30$

Experiment (tube)

$C_{xv}=0.27$

Выводы

1. Коррекция на кривизну линий тока в моделях, использующих модуль тензора скоростей деформации, представляется необходимой, поскольку реализуется нефизический процесс накачки вихревой вязкости в ядро вихря.
2. Введение обратной линейной корректирующей функции от турбулентного числа Ричардсона с дополнительной полуэмпирической константой $C_c=0.02$ в выражение для вихревой вязкости MSST 2003 позволяет устранить нефизическое поведение вихревой вязкости и получить прогнозы, согласующиеся с приемлемой точностью с экспериментальными данными.
3. Сравнение различных подходов к коррекции MSST 2003 с учетом кривизны линий тока показало близость предсказаний, хотя отмечается некоторая нефизичность результатов, полученных с использованием поправки Смирнова-Ментера
4. В высокоинтенсивных отрывных течениях максимальная величина y^+ у стенки не должна превышать 2, т.е. использование пристеночных функций в этих случаях не вполне корректно.

Благодарности

Правительству РФ (МЕГА проект),
РНФ, РФФИ



*С теплыми воспоминаниями об Ароне Семеновиче Гиневском
(ему было бы сегодня всего лишь 92 года)*