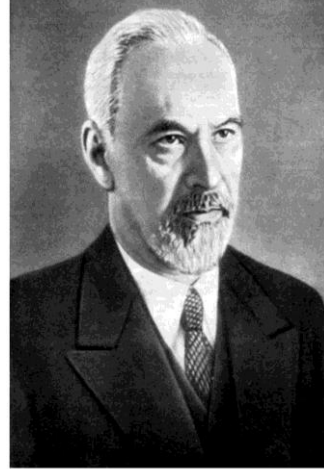


# **Развитие и тестирование пакета VP2/3 (скорость-давление, 2D/3D)**

**Исаев С.А., Баранов П.А.,  
Судаков А.Г., Усачов А.Е.**

**Казань, Санкт-Петербург**

# Темы



Людвиг Прандтль

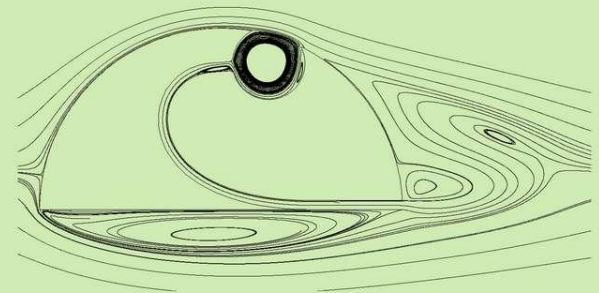
- Продвижения в развитии VP2/3 в 2016 году
- URANS, многоблочные вычислительные технологии и VP2/3 (скорость-давление, 2D/3D)
- Класс задач – отрывные турбулентные течения
- Стандартные версии MSST и коррекции с учетом влияния кривизны линий тока
- Подходы Роди-Лещинера-Исаева и Смирнова-Ментера, константа Исаева-Харченко-Усачова  $C_s=0.02$
- Тесты: сравнение пакетов

# Прогресс VR2/3 в 2016 году

- Развитие МВТ в направлении использования КОМПОЗИТНЫХ СЕТОК
- Глубокая переработка комплекса

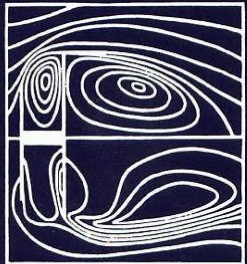
Аэродинамика  
утолщенных тел  
с вихревыми  
ячейками

(Численное и физическое моделирование)



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



ИИМ им.М.В.Келдыша, декабрь 2016

года

## Математические модели. MBT(VP2/3)

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

2

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

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

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

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

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

$\mu_{to}$  – 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)

# $k$ - $\omega$ SST (1993)

$$\mu_t = \rho a_1 k / \max(a_1 \omega, F_2 \Omega)$$

# $k$ - $\omega$ SST (2003)

$$\mu_t = \rho \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, F_2 S)}$$

$$\rho \frac{dk}{dt} = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + \tilde{P}_k - \beta^* \rho k \omega$$

$$\rho \frac{d\omega}{dt} = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega$$

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{\omega y^2} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right] \right\}^4 \right\} \quad \phi = \phi_1 F_1 + \phi_2 (1 - F_1)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-10} \right) \quad F_2 = \tanh \left\{ \left[ \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{\omega y^2} \right) \right]^2 \right\}$$

$$\text{Генерация ограничивается сверху} \quad \tilde{P}_k = \min(P_k, 10\beta^* \rho k \omega)$$

# Коррекция SST-модели 2003 года (подход Роди-Лещинера-Исаева)

Прямая коррекция турбулентной вязкости

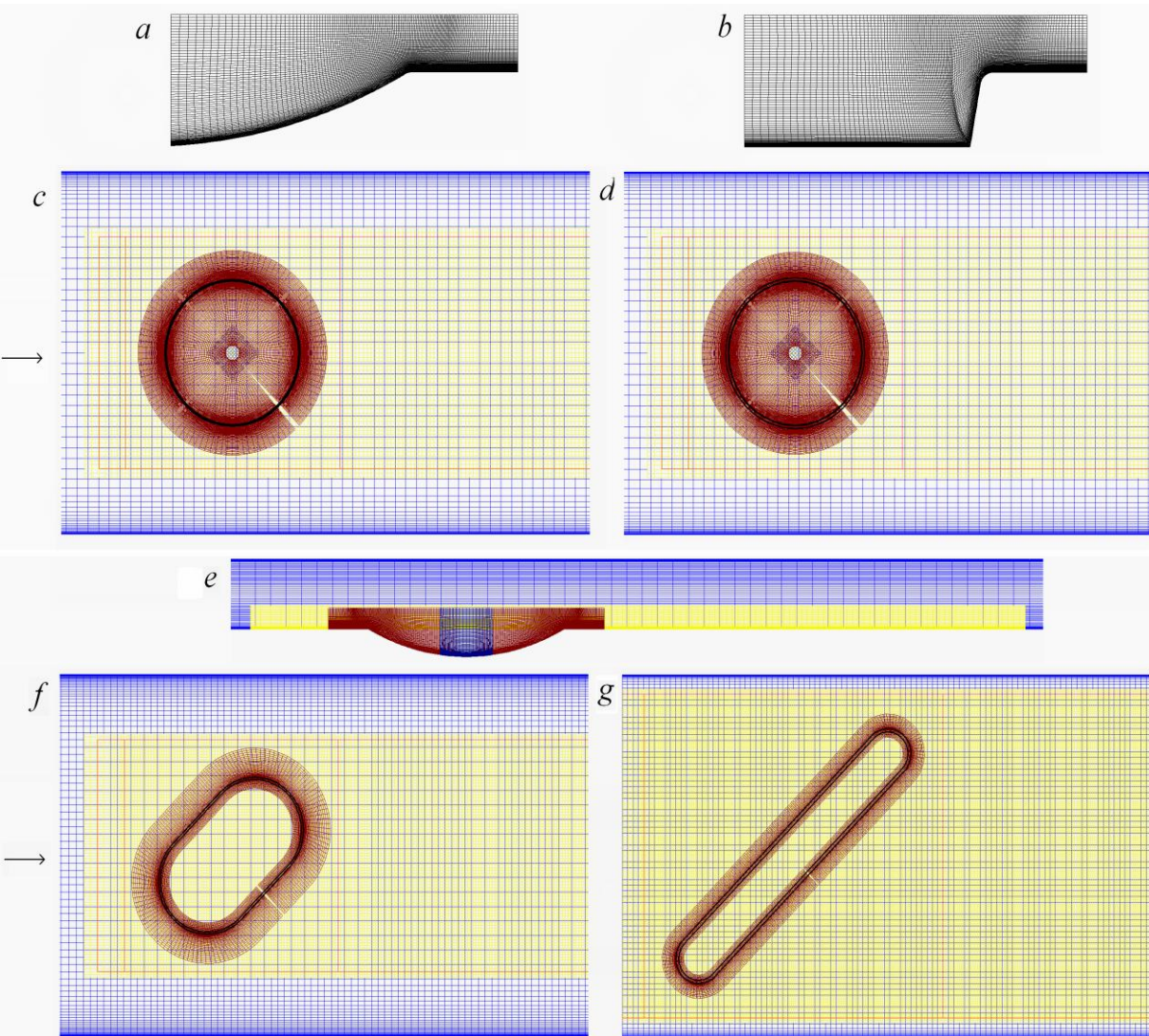
$$\tilde{\mu}_t = f_\mu \mu_t$$

$$f_\mu = \frac{1}{1 + c_r} \quad c_r = c_c Ri_t; \quad c_c = 0.02 \quad -0.4 < c_r < 3.5$$

$$Ri_t = \left( \frac{k}{\varepsilon} \right)^2 \left( \frac{U}{r^2} \frac{\partial(Ur)}{\partial n} \right) \quad \text{-----} \rightarrow \quad Ri_t = \left( \frac{1}{c_\mu \omega} \right)^2 \frac{\vec{\Omega} \cdot \vec{b}_{qk}}{|\vec{V}|^2}$$



# Канал В.И.Терехова. Иллюстрация многоблочных вычислительных технологий решения **RANS**

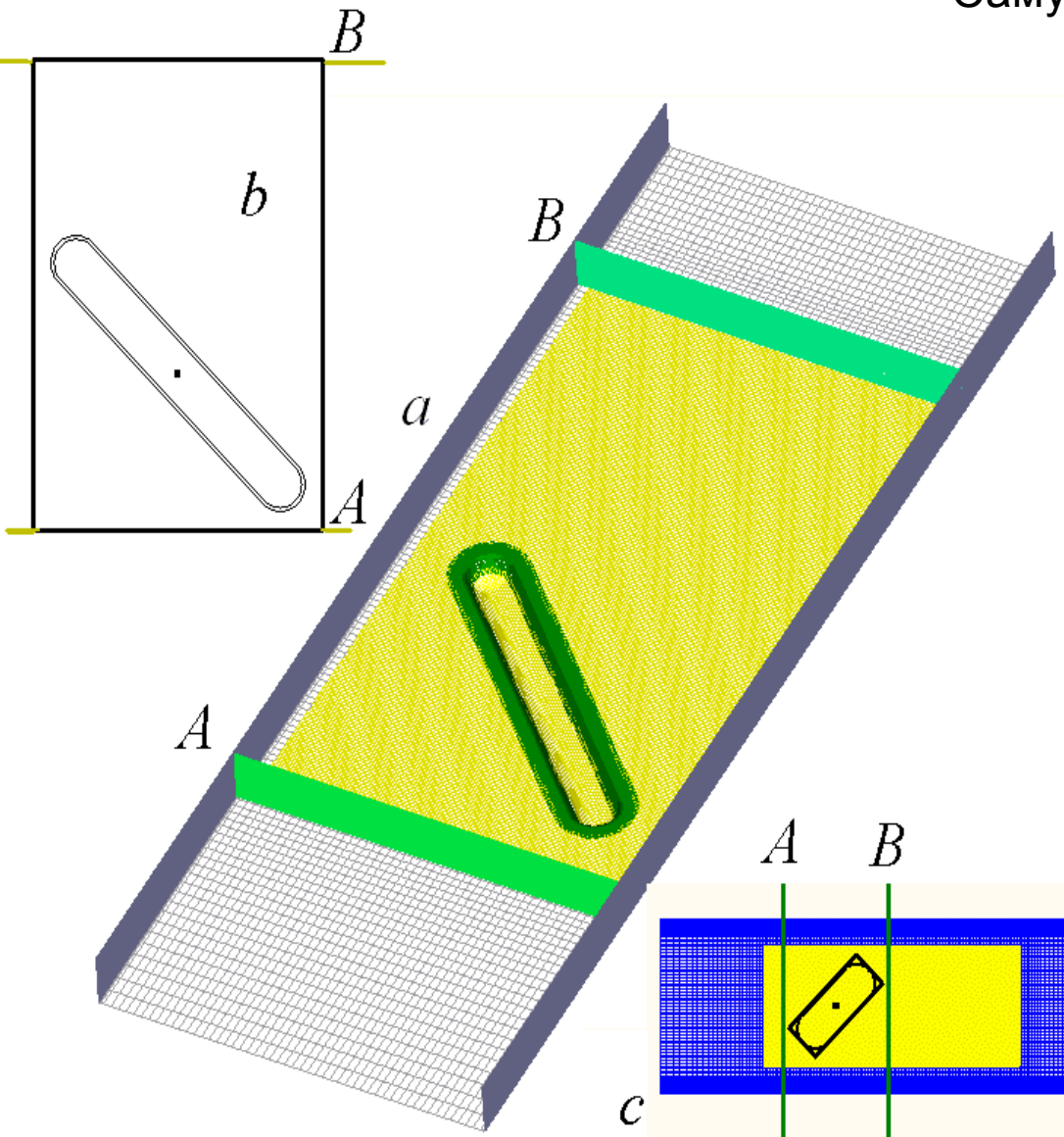


Осесимметричные  
сферическая (a) и 10°-  
коническая (b) вставки в  
многоблочные  
структурированные сетки в  
узком канале с одиночными  
сферической (c,e),  
конической (d), овальными  
(f,g) лунками различной  
топологии и ширины. c,d,f,g  
– вид со стороны нагретой  
стенки; e – срединное  
сечение канала; f –  $b = 0.731$ ;  
g –  $0.346$ .

$$\Delta = 0.13,$$
$$\text{Re} = 10000$$



# Анализ на компаундах (вспоминая Михаила Самуиловича Иванова)



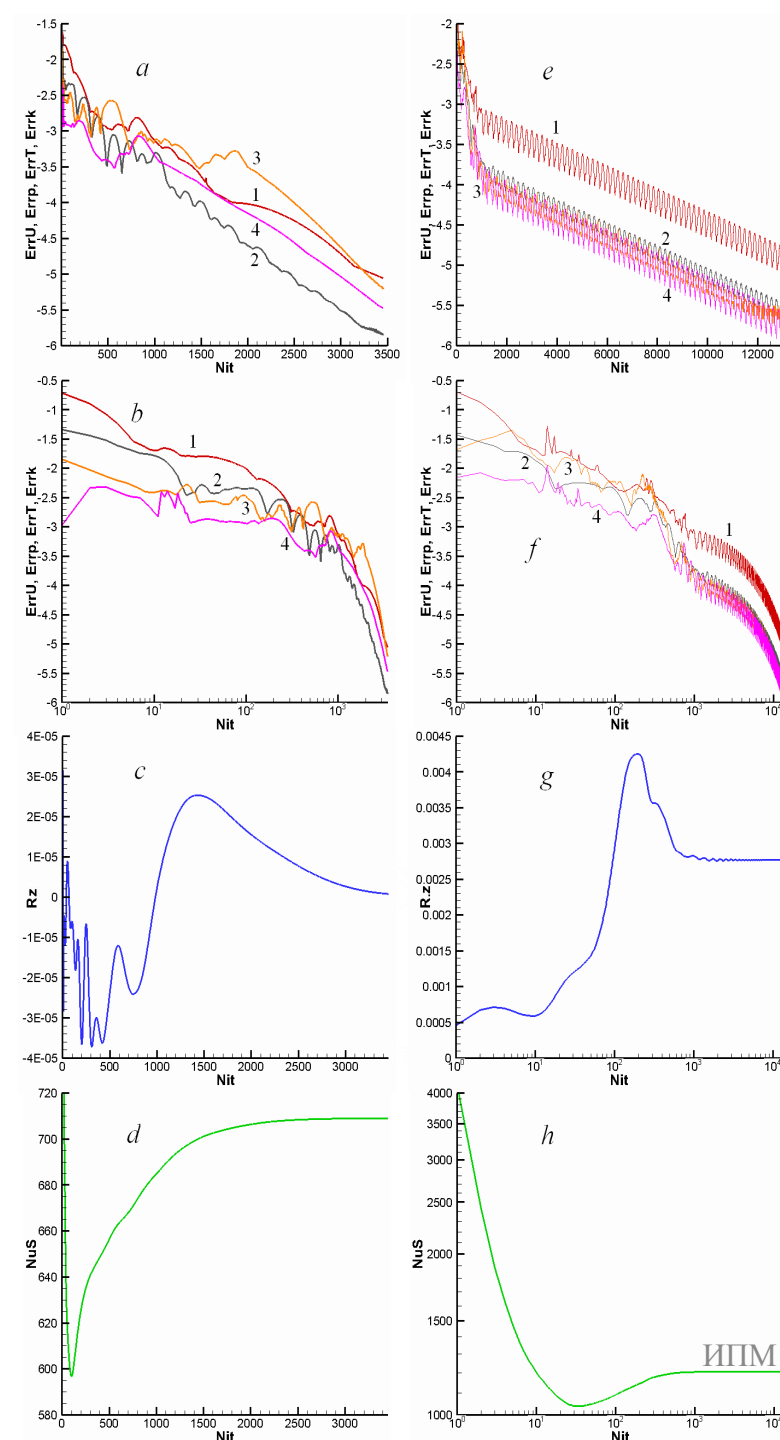
Многоблочная сетка для узкого канала с удлиненной овальной лункой с подробной сеткой в области лунки и с выделением кромки (a), участок размером  $3 \times 2$  с лункой (b) и выделенная прямоугольником окрестность овальной лунки (c). Поперечные сечения канала A-B служат для определения гидравлических потерь по методике:

Isaev S.A., Kornev N.V., Leontiev A.I. and Hassel E., Influence of the Reynolds number and the spherical dimple depth on the turbulent heat transfer and hydraulic loss in a narrow channel, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 53 (1-3) (2010) 178–197

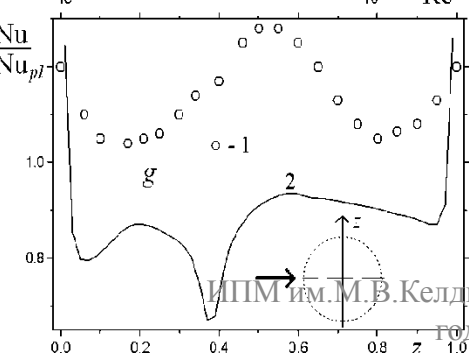
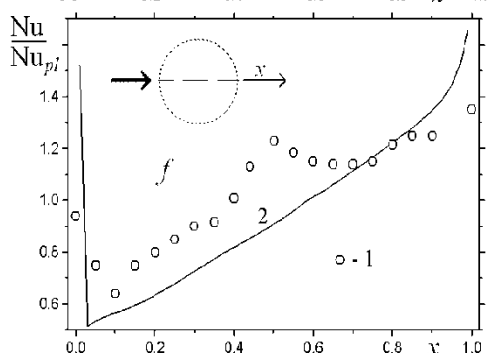
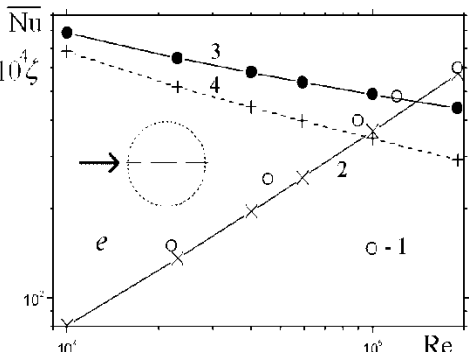
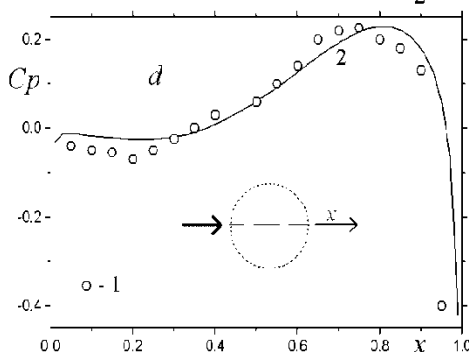
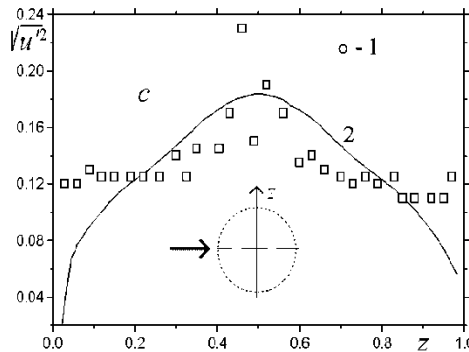
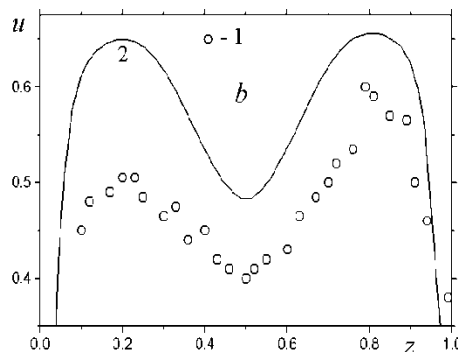
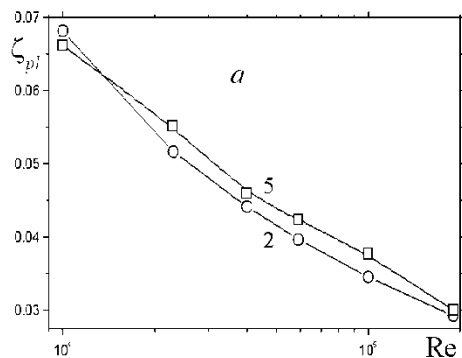
# Сходимость при решении стационарной задачи

Сравнение траекторий сходимости в линейном (а,е) и логарифмическом (b,f) масштабах, зависимостей поперечной силы  $R_z$  (с,g) и числа Нуссельта  $Nus$  (d,h) в области лунки. Нумерованные кривые 1 – ErrU; 2 – Errp; 3 – ErrT; 4 – Errk.

**Для овальной лунки выход на сошедшееся решение по интегральным характеристикам происходит быстрее, чем для конической лунки.**

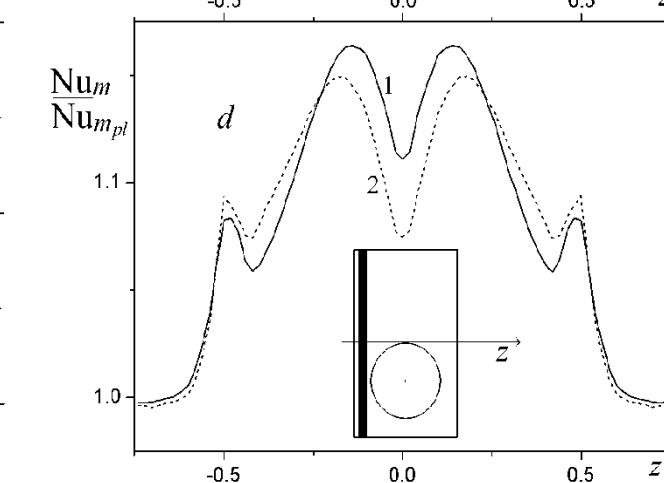
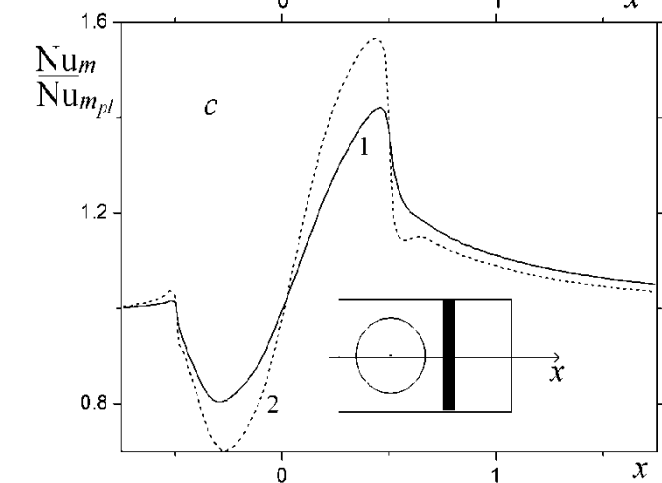
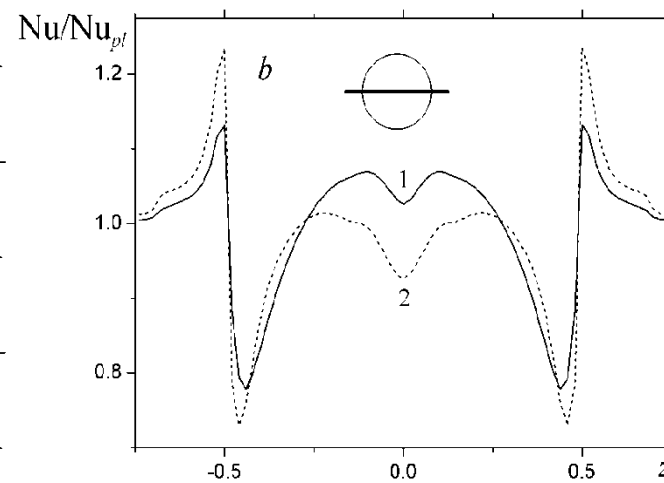
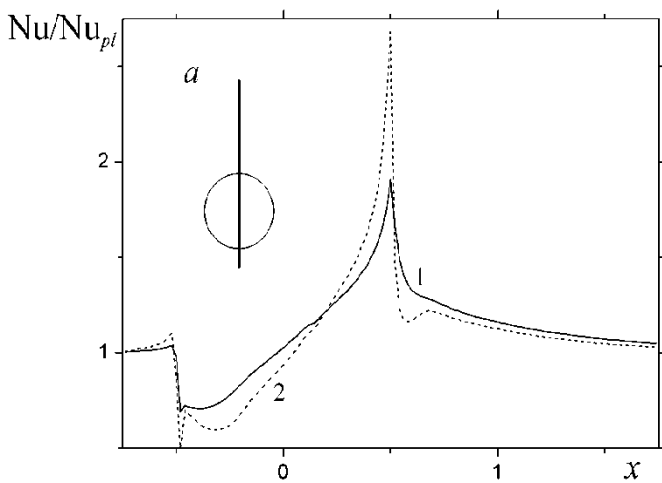


# Верификация: сравнение с экспериментом В.И.Терехова (нагрев при $q=\text{const}$ пятна сферической лунки)

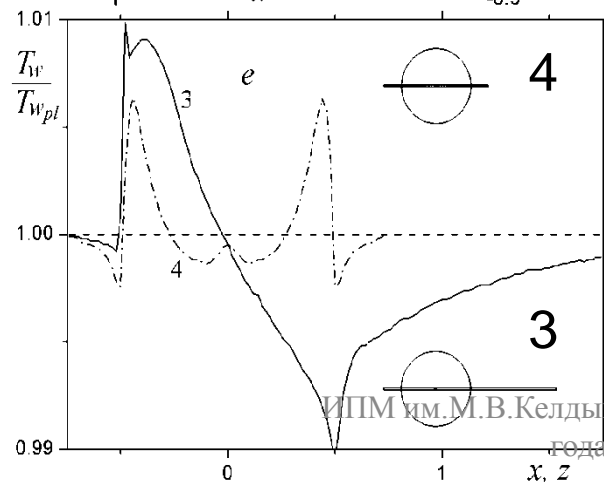


МВТ, пакет VP2/3 и базовая модель переноса сдвиговых напряжений (MSST) в версии 2003 года с введением коррекции на кривизну линий тока в рамках подхода Роди-Лешцинера-Исаева (RLI)

1,3 – эксперимент Терехова  
2,4 – расчет  
3,4 – гидравлические потери  
5 – Идельчик (справочник)



1 -  $q=\text{const}$   
2 -  $T=\text{const}$



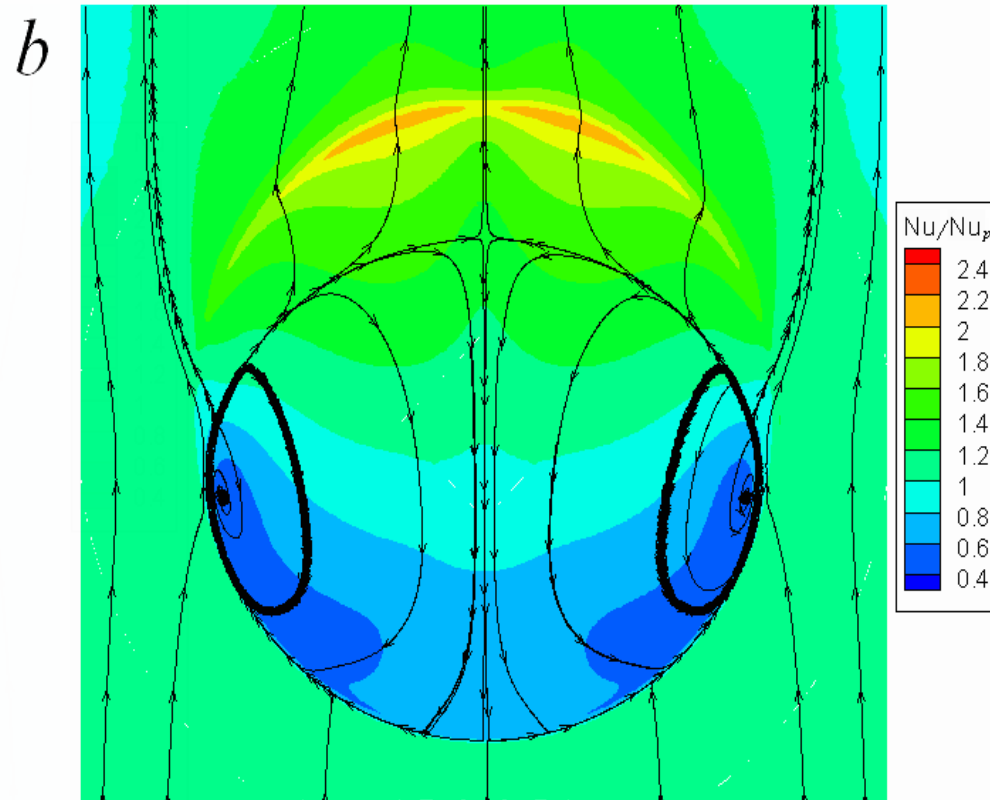
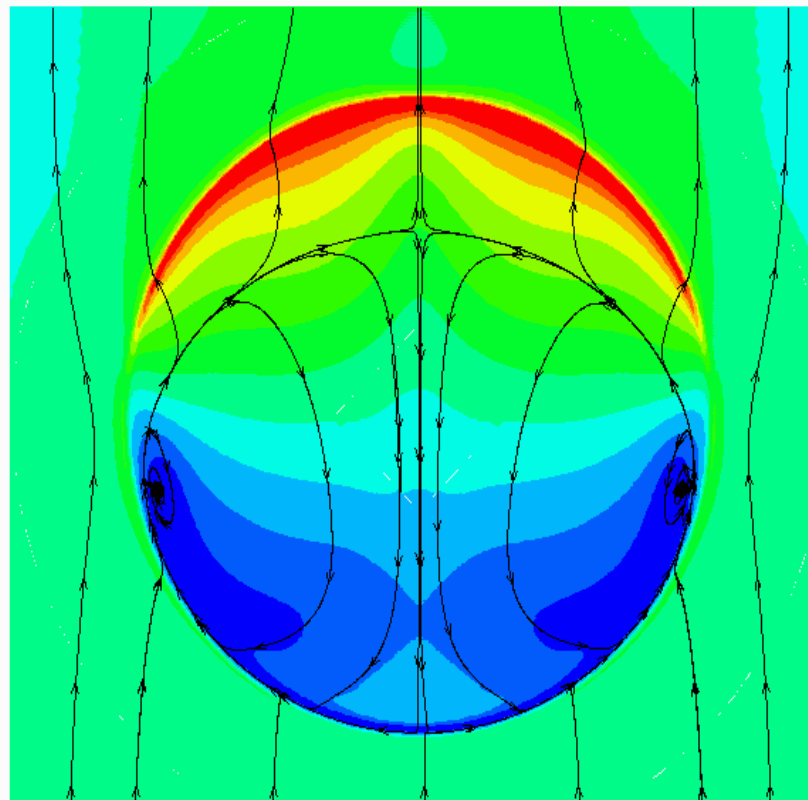
$q=\text{const}$

$Re=10000$   
 $Pr=7$   
 $\Delta=0.13$

Сравнение  
граничных  
условий  
 $T=\text{const}$  и  
 $q=\text{const}$  на  
нагретой стенке  
узкого  
тереховского  
канала

**Таблица.** Сравнение тепловых и теплогидравлических характеристик трех участков узкого канала со сферической лункой при граничных условий  $q=\text{const}$  и  $T=\text{const}$

Тип граничных условий	$Nu_{10}/Nu_{pl10}$	$\zeta_{10}/\zeta_{pl10}$	$Nu_{20}/Nu_{pl20}$	$\zeta_{20}/\zeta_{pl20}$	$Nu_{30}/Nu_{pl30}$	$\zeta_{30}/\zeta_{pl30}$
$q=\text{const}$	1.098 (1.083)	1.072	1.138 (1.083)	1.16	1.085	1.010
$T=\text{const}$	1.094 (1.08)	1.071	1.17 (1.11)	1.16	1.064	1.008



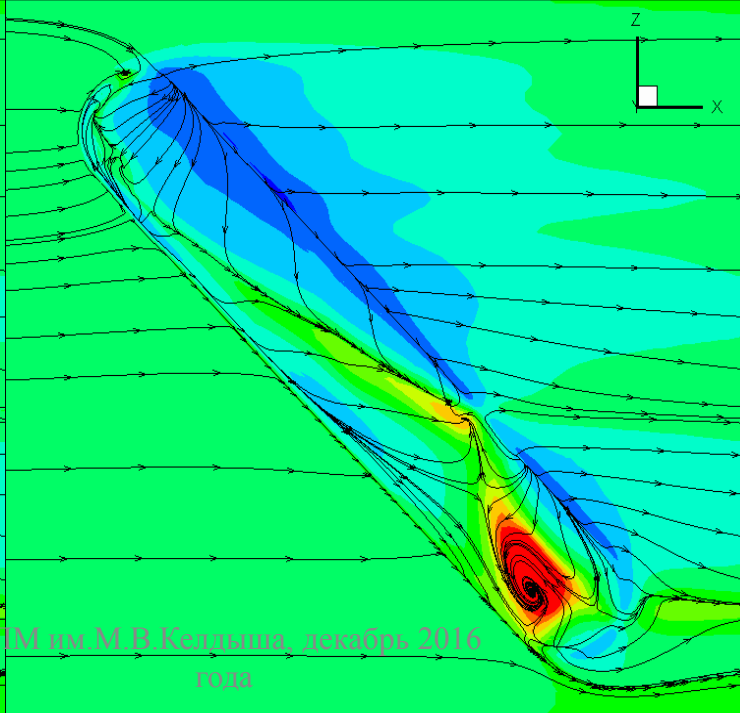
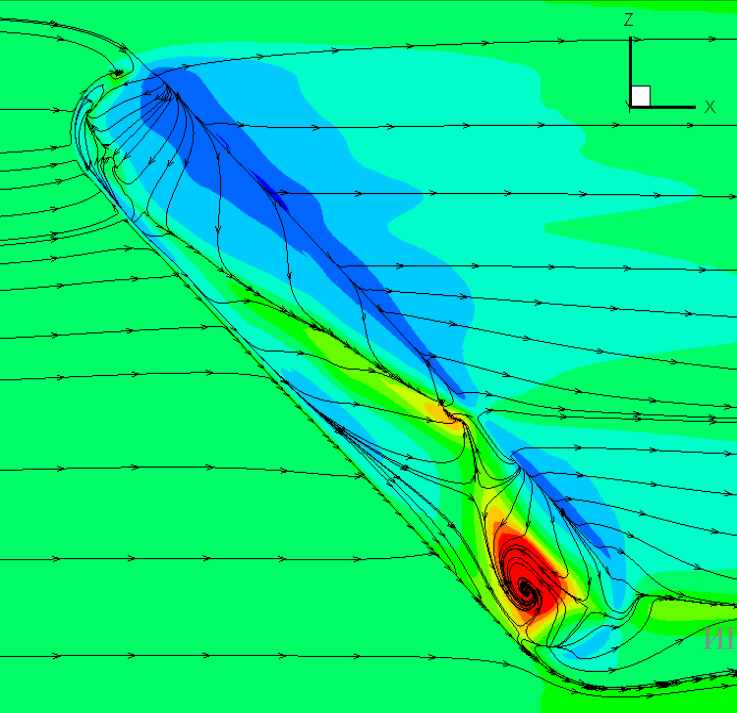
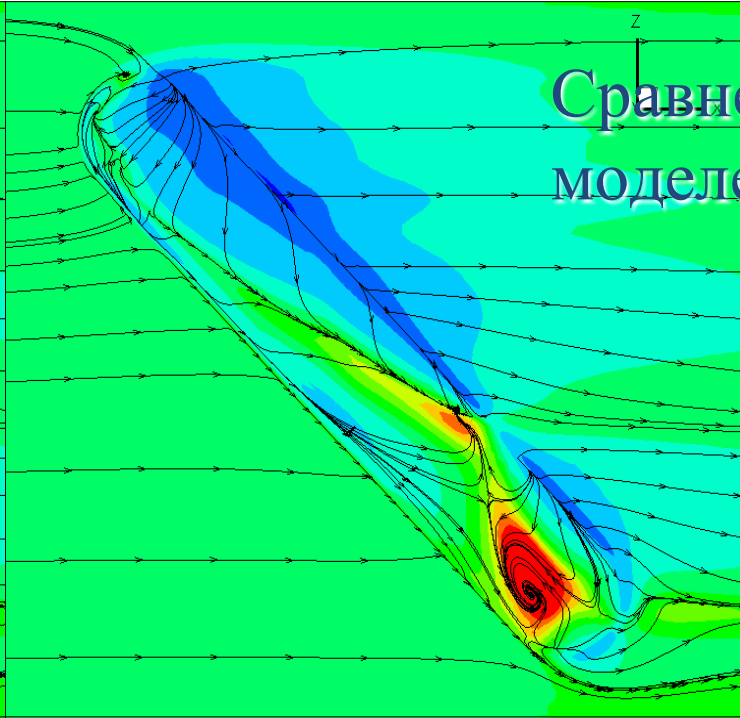
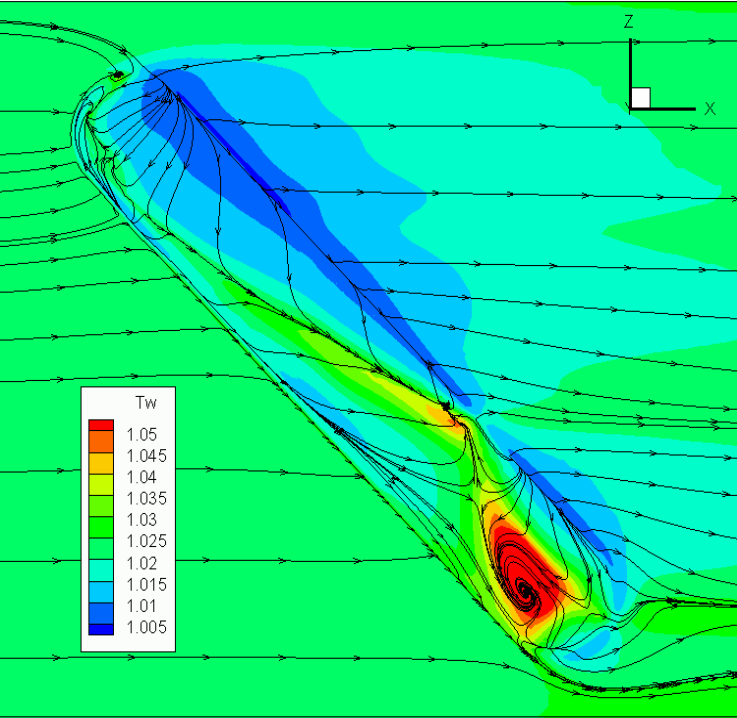


## Методический результат

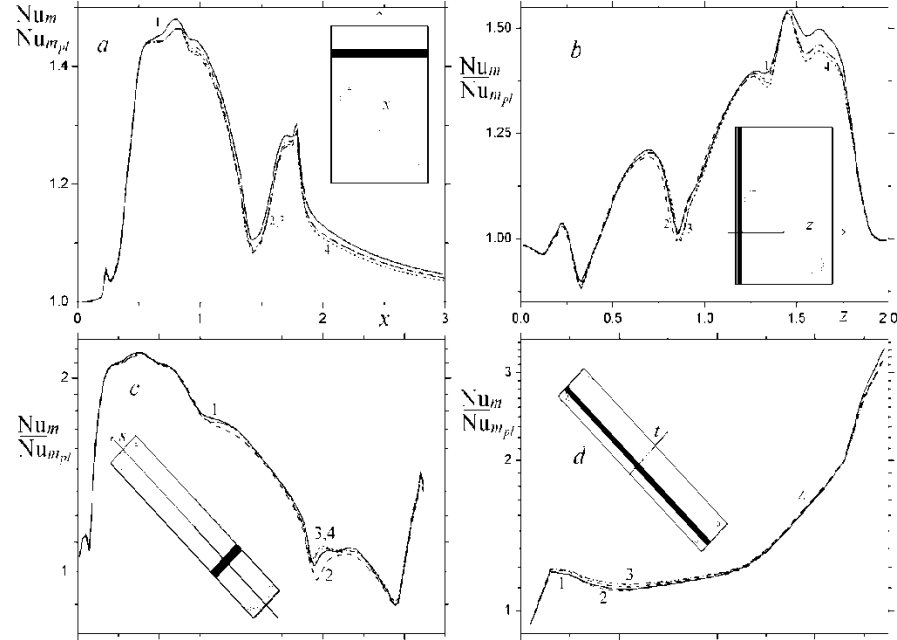
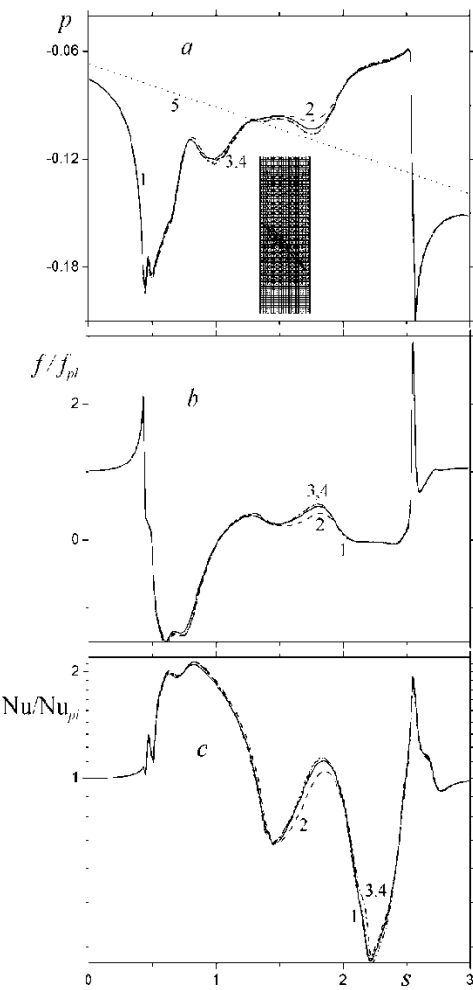
**Сравнение граничных условий  $T=\text{const}$  и  $q=\text{const}$  на задаче о теплообмене около сферической неглубокой лунки в узком канале показало, что интегральные тепловые и гидравлические характеристики канала со сферической лункой практически не зависят от типа граничных условий по теплообмену при турбулентном режиме течения.**

**Однако локальные распределения различаются значительно в прикромочной зоне и в центре лунки. Максимальное отличие в максимумах относительной локальной теплоотдачи составляет величину порядка 1.5, причем при  $T=\text{const}$  нагрузки на кромочную область заметно выше, чем при  $q=\text{const}$ .**

# Сравнение SST- моделей

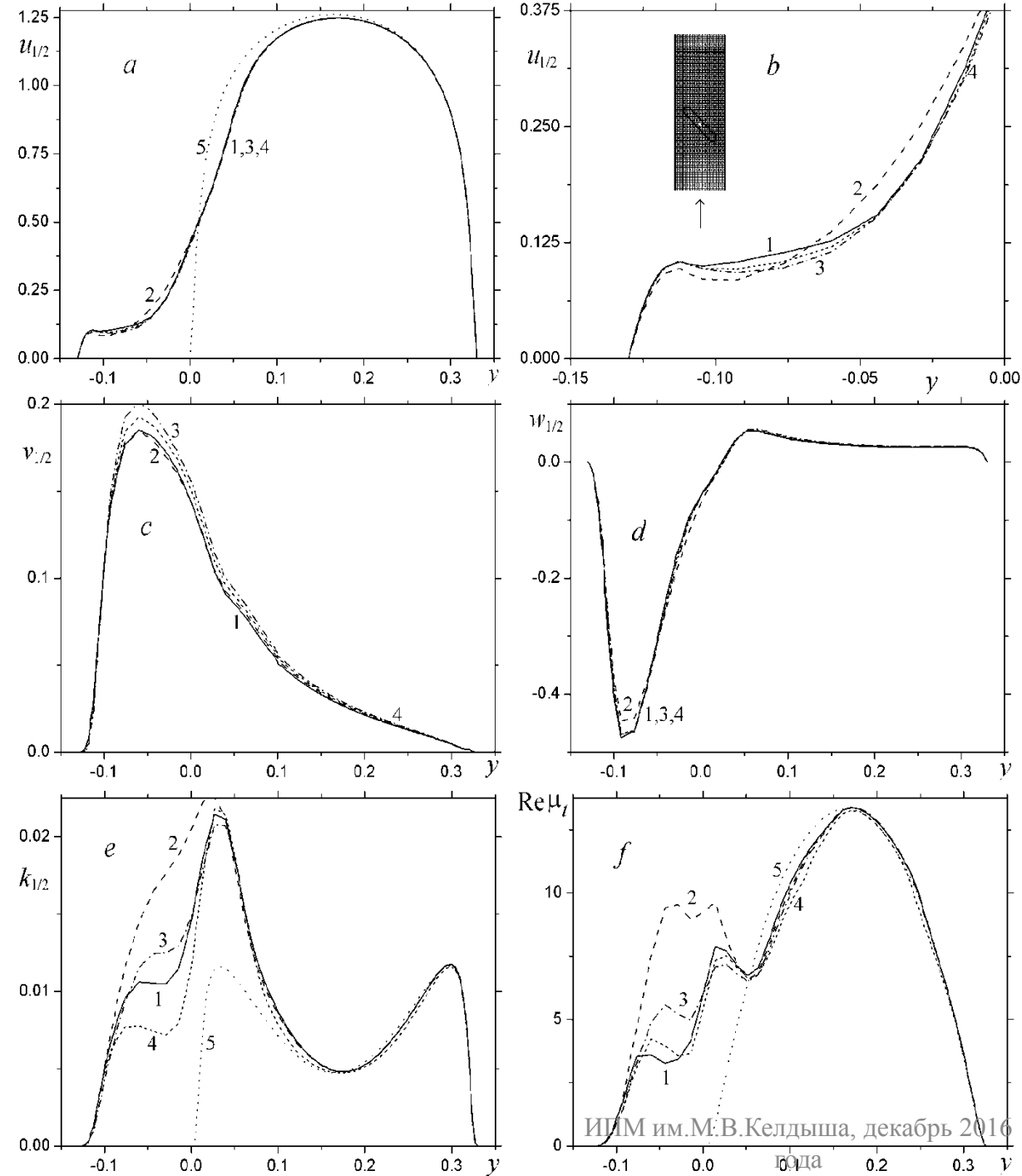


- a* – MSST1993
- b* – MSST 2003
- c* – MSST 2003  
RLI correction
- d* – MSST 2003  
SM correction



**Таблица.** Сравнение прогнозов тепловых и теплогидравлических характеристик двух участков узкого канала с овальной лункой шириной 0.383 по различным версиям SST-модели и на разных сетках (\* - сетка 3 млн.ячеек)

Версия модели	$Nu_{n1}/Nu_{npl1}$	$\zeta_1/\zeta_{pl1}$	$(Nu_{n1}/Nu_{npl1})/(\zeta_1/\zeta_{pl1})$	$Nu_{n2}/Nu_{npl2}$	$\zeta_2/\zeta_{pl2}$	$(Nu_{n2}/Nu_{npl2})/(\zeta_2/\zeta_{pl2})$
Стандартная 1993 года	1.242 (1.196)	1.079	1.151 (1.108)	1.953 (1.518)	1.150	1.698 (1.320)
Стандартная 2003 года	1.231 (1.185)	1.069	1.152 (1.109)	1.933 (1.502)	1.134	1.705 (1.325)
Модификация версии 2003 по RLI	1.233 (1.187)	1.068	1.155 (1.111)	1.949 (1.515)	1.132	1.726 (1.338)
Модификация версии 2003 по SM	1.228 (1.183)	1.064	1.154 (1.112)	1.950 (1.516)	1.127	1.730 (1.345)
Модификация версии 2003 по RLI*	1.222 (1.177)	1.082	1.129 (1.088)	1.836 (1.427)	1.144	1.605 (1.247)



1 – MSST 1993  
 2 – MSST 2003  
 3 – MSST 2003 поправка  
 РЛИ  
 4 – MSST 2003 поправка  
 CM

## Методический результат

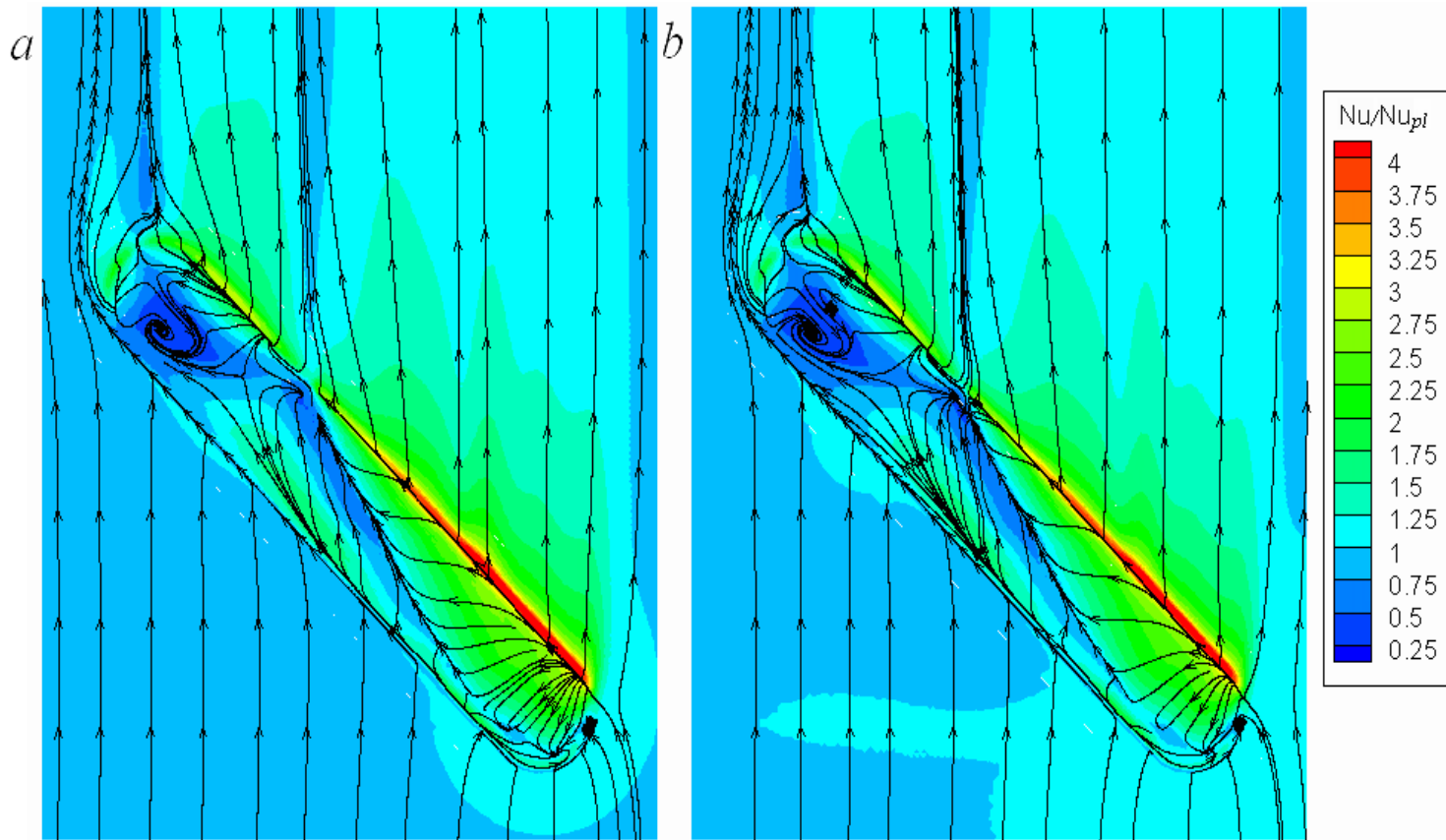
Сопоставление стандартных версий MSST 1993 и 2003 с модифицированной с учетом кривизны линий тока MSST 2003 в рамках подхода RLI и Смирнова-Ментера (SM) показало довольно хорошую близость численных прогнозов интегральных характеристик по всем версиям MSST. Некоторые отличия MSST 2003 невелики, но заметны в особенности в зонах локальных экстремумов.

Однако отмечено завышение  $k$  и  $Re v_t$  в ядре спиралевидного вихря, что указывает на присутствие погрешности в стандартной модели MSST 2003 года при расчете пространственных отрывных интенсивных течений.



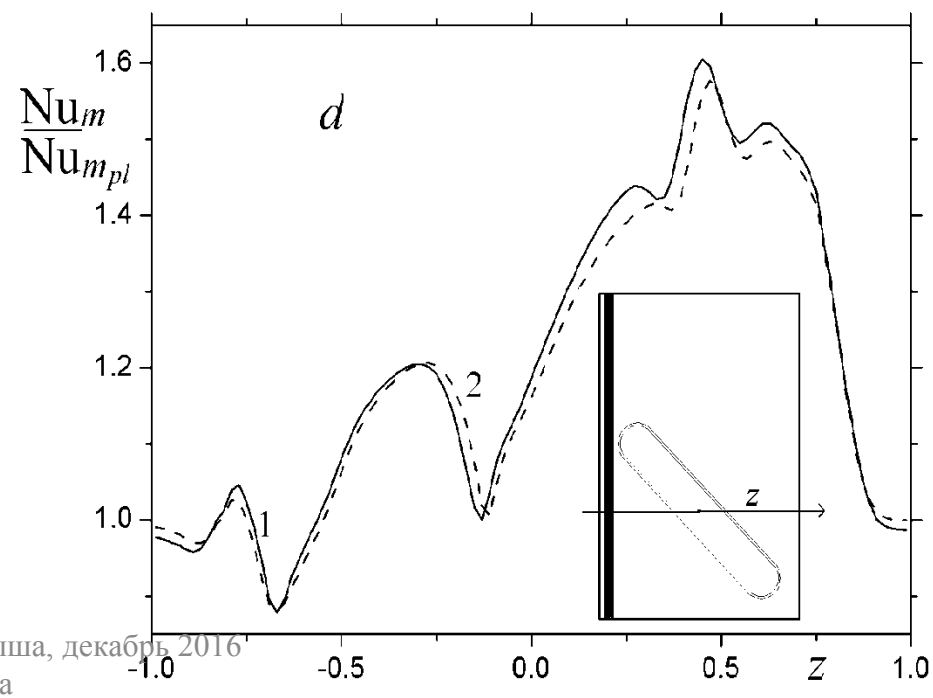
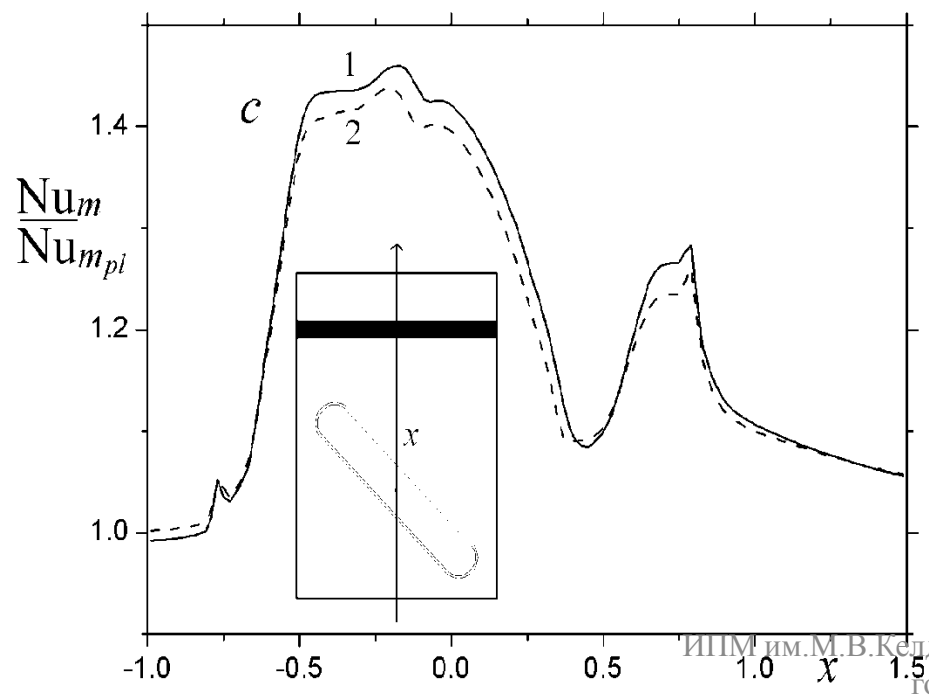
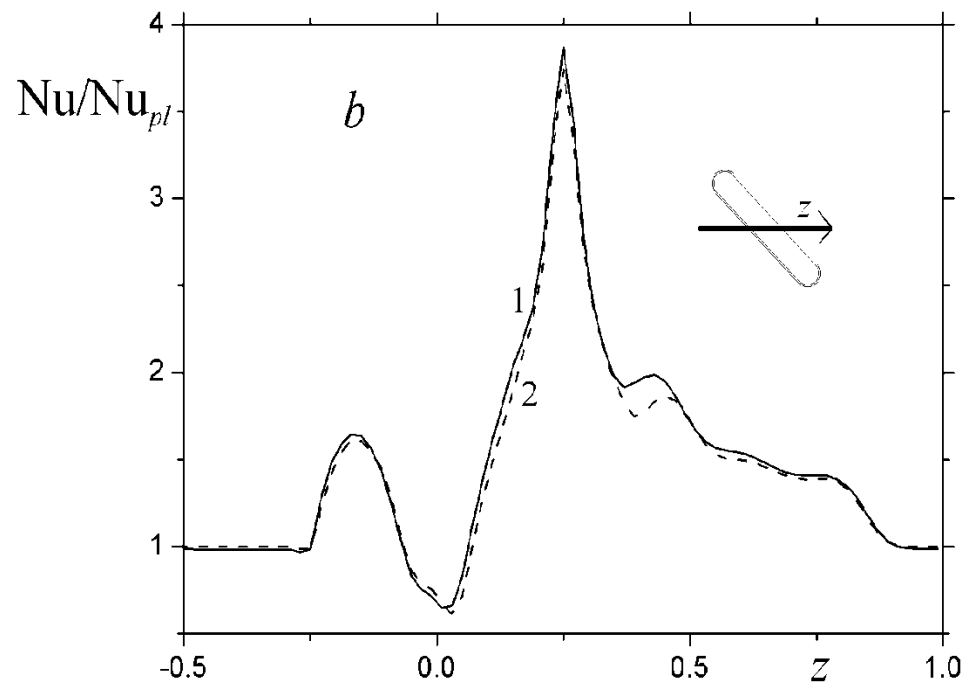
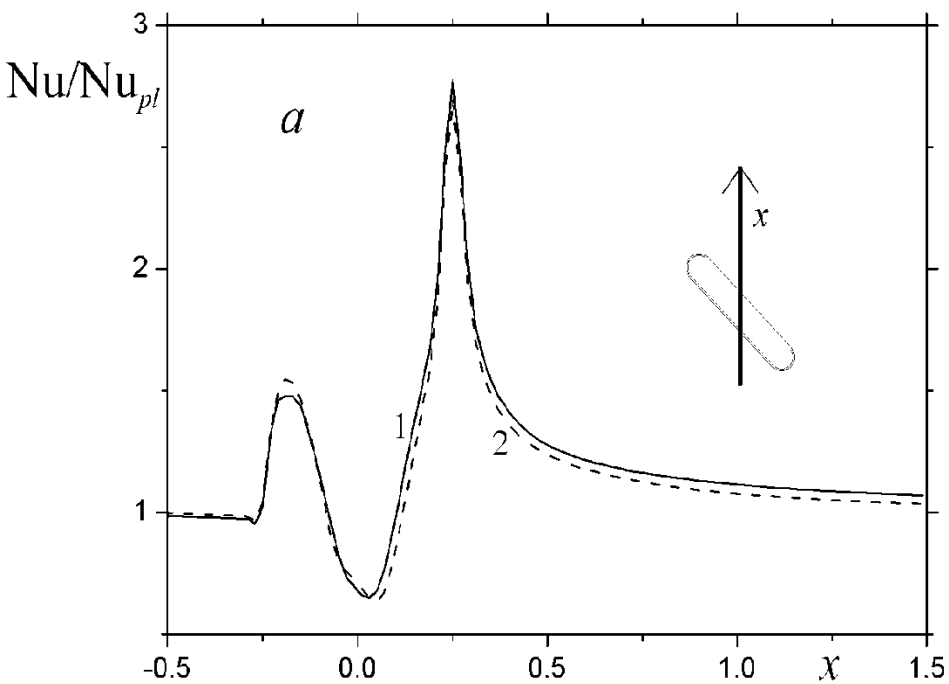
# Валидация: сравнение прогнозов на сетках в 1.5 (a) и 3

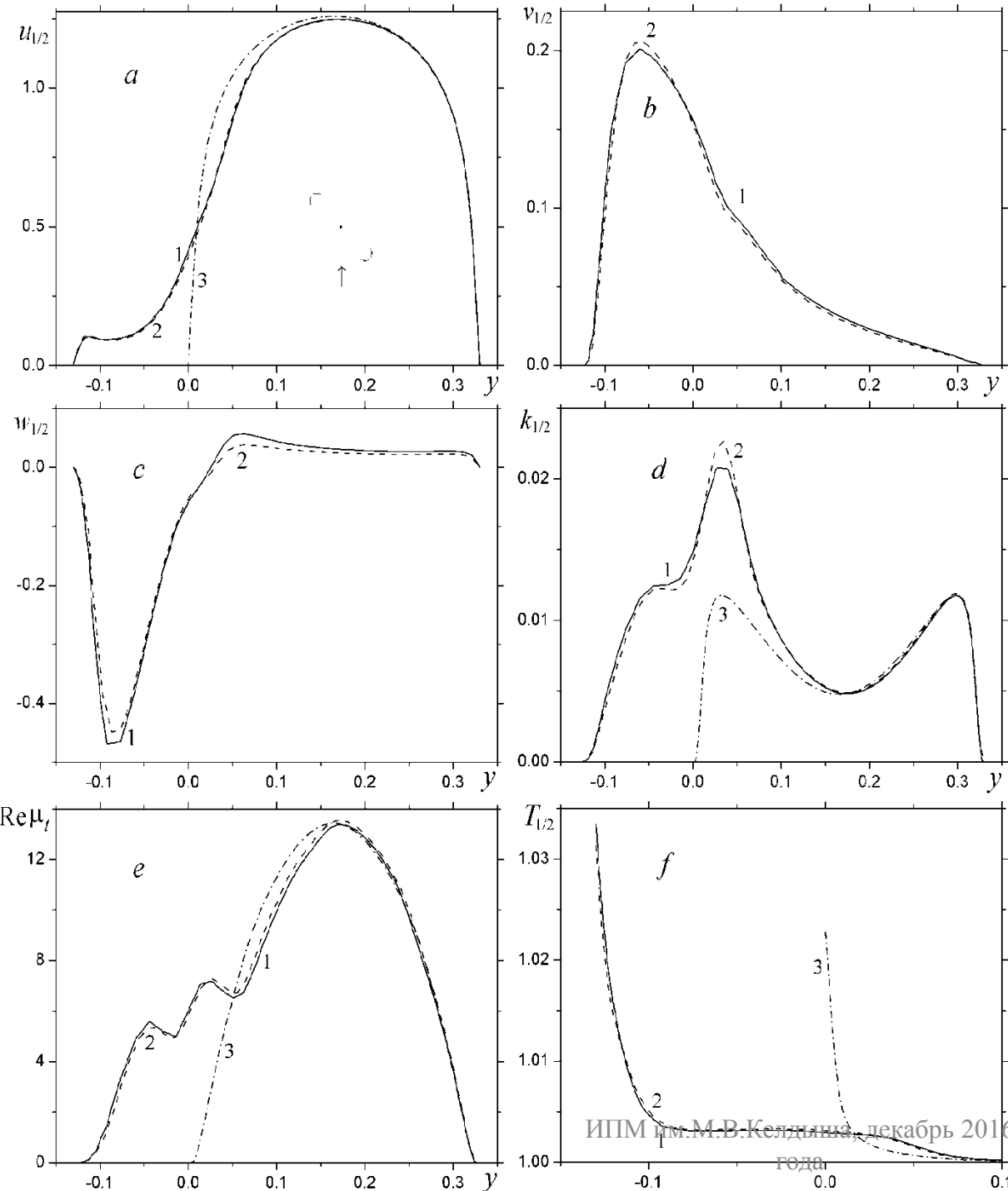
(b) млн. ячеек ( $Re=10000$ ,  $Pr=7$ ,  $L=1.75$ )



Валидация пакета VP2/3 при сравнении прогнозов экстремальных характеристик течения, теплообмена и турбулентности для узкого канала с овальной лункой шириной 0.383

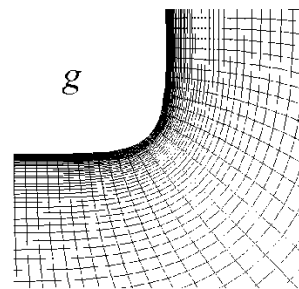
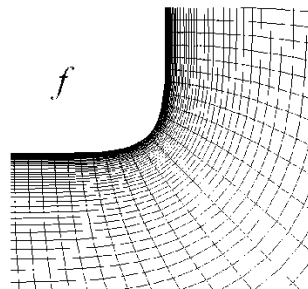
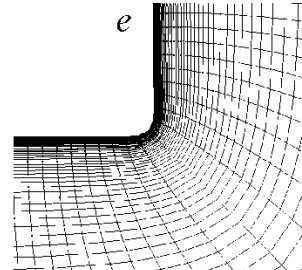
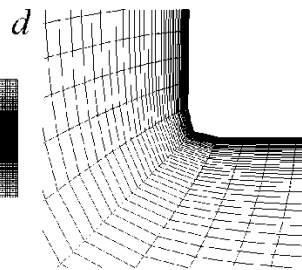
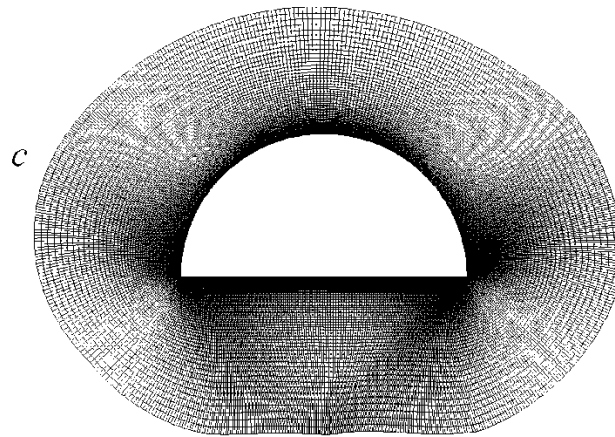
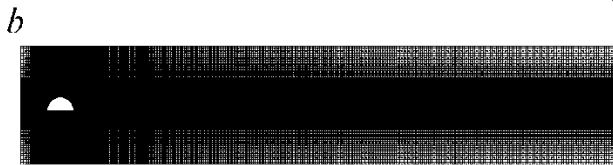
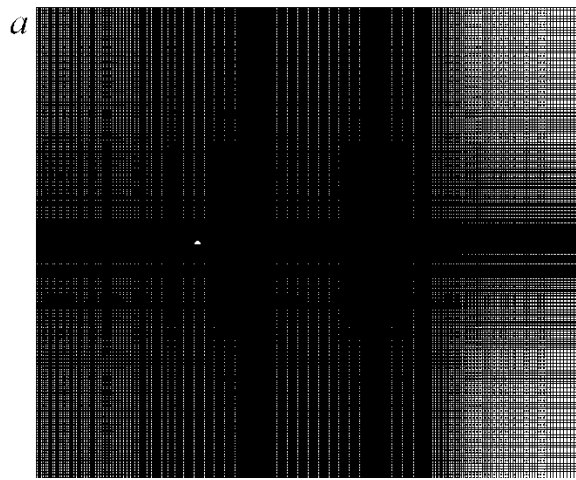
	$u_{min}$	$v_{min}$	$v_{max}$	$w_{min}$	$w_{max}$	$k_{max}$	$\nu_{tmax}$	$T_{turbmax}$
Сетка А	-0.473	-0.349	0.526	-0.847	0.331	0.0412	0.00141	1.083
Сетка В	-0.472	-0.337	0.508	-0.818	0.377	0.0405	0.00142	1.085





1 – исходный вариант  
2 – уточнение  
3 – плоскопараллельный канал

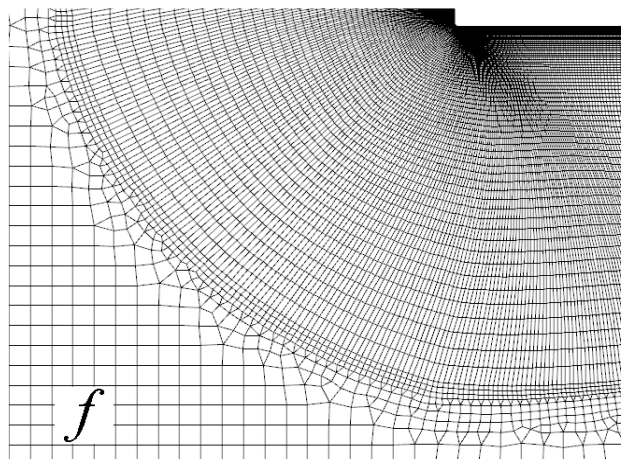
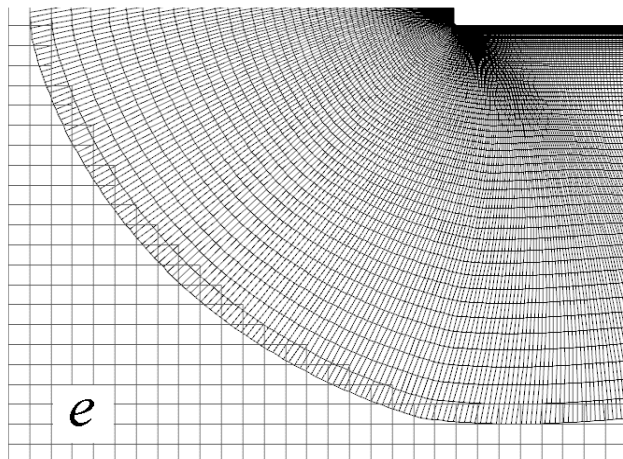
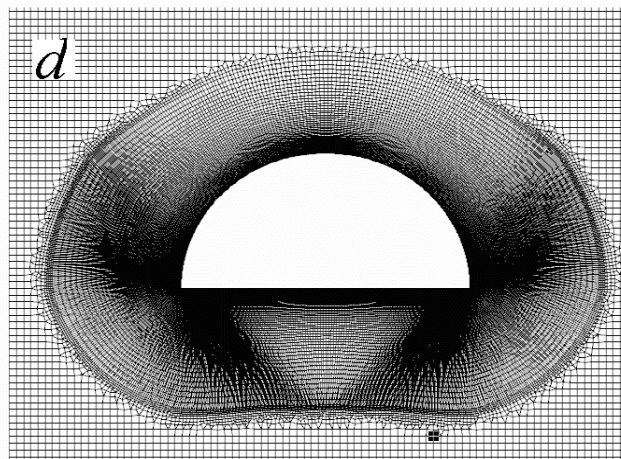
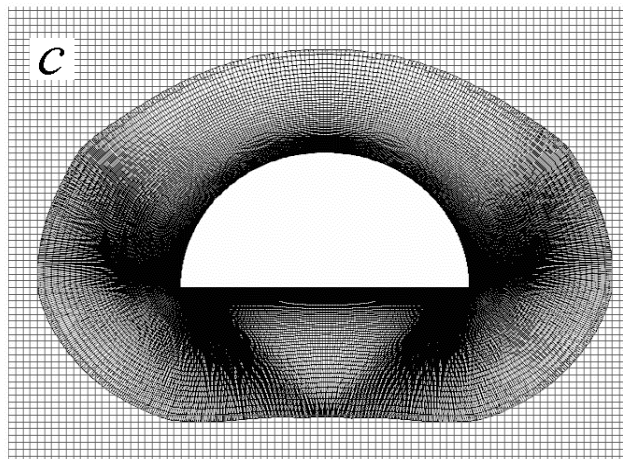
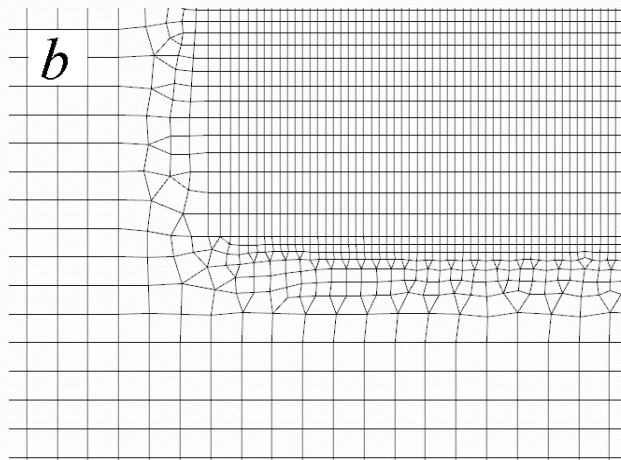
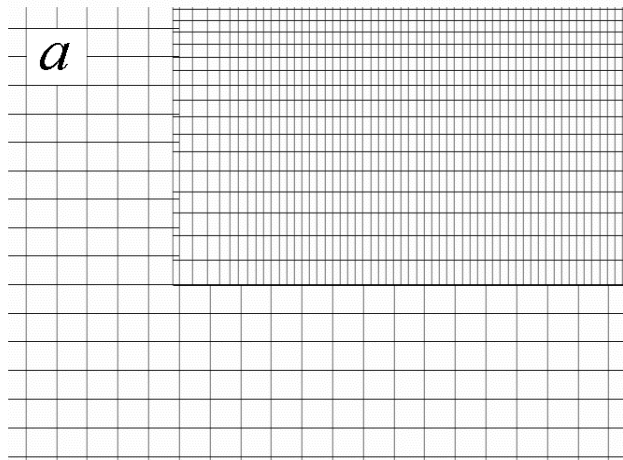
Выполнена валидация на основе сравнения численных прогнозов для локальных и интегральных характеристик течения и теплообмена в канале с овальной удлиненной лункой, полученных на сетках с количеством ячеек 1.6 млн. и около 3 млн. **Их близость показывает, что данные на умеренной сетке являются вполне приемлемыми по точности.**



Сетки содержат 200-350 тыс. ячеек

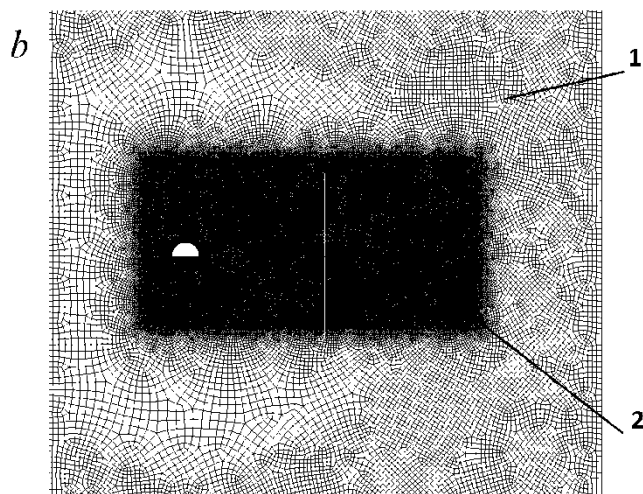
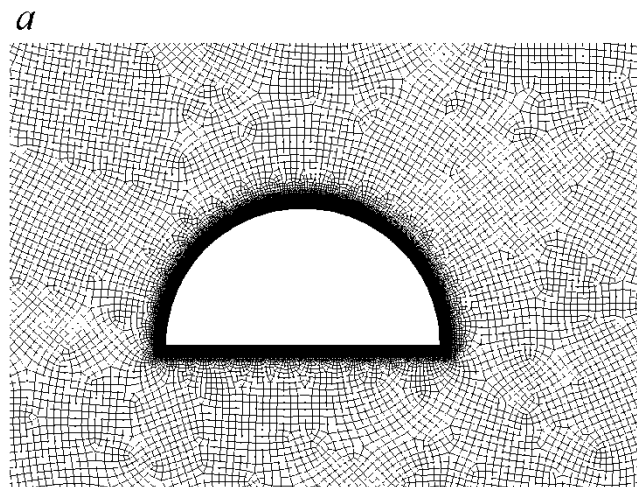
Пристеночный шаг –  $10^{-5}$  -  $10^{-4}$ ;  
Шаг сетки в следе – 0.025 - 0.05  
Размер b-сетки – 20-40

Многоблочные сетки с перекрытием. *a* – декартова сетка Н-типа, покрывающая расчетную область; *b* - дополнительная декартова сетка Н –типа для лучшего разрешения вихревой дорожки; *c* – цилиндрическая сетка О-типа, согласованная с контуром полукругового цилиндра со скруглением  $R=0.002$ . Фрагменты О- сеток в районах скругленной передней (*d*) и задней (*e*, *f*, *g*) кромок с различным радиусом скругления. *d, e* –  $R=0.002$ ; *f* – 0.003; *g* – 0.005.

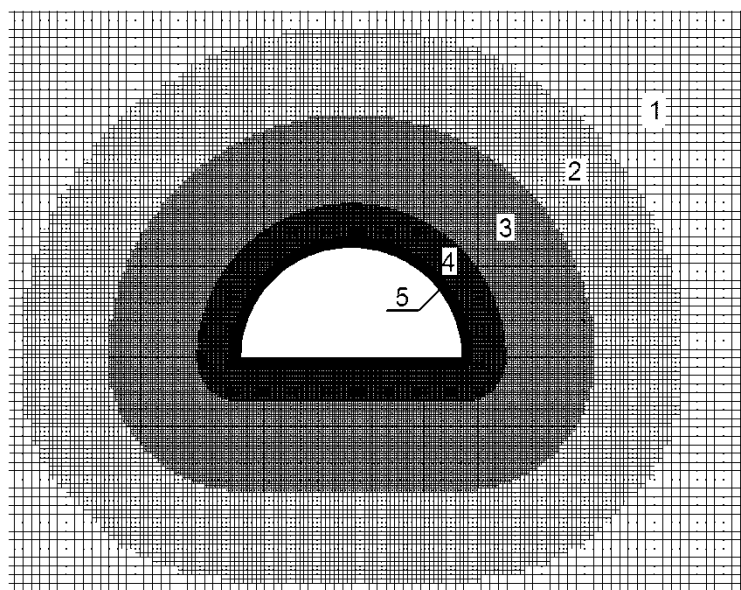


Фрагменты структурированных сеток многоблочной сеточной структуры  $H^*$  (a,c,e) и соответствующие неструктурированные вставки сконструированной композитной сетки (b,d,f): a,b – встраивание дополнительной следовой сетки во внешнюю декартову сетку; c,d – соединение О-образной сетки, окружающей полукруговой цилиндр, с дополнительной прямоугольной следовой сеткой и e,f – укрупненный масштаб этого соединения.

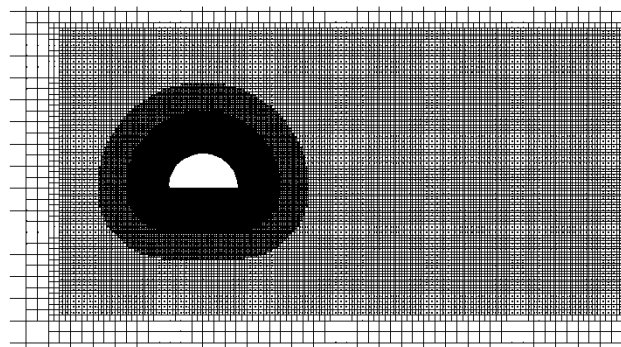




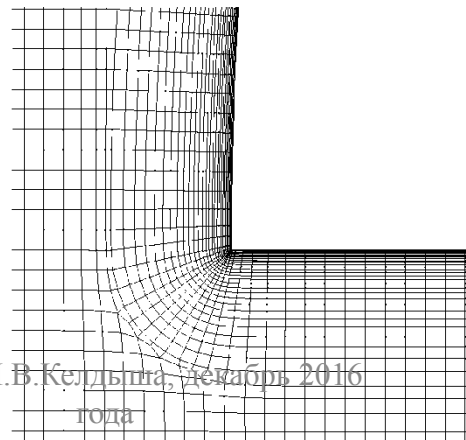
*c*



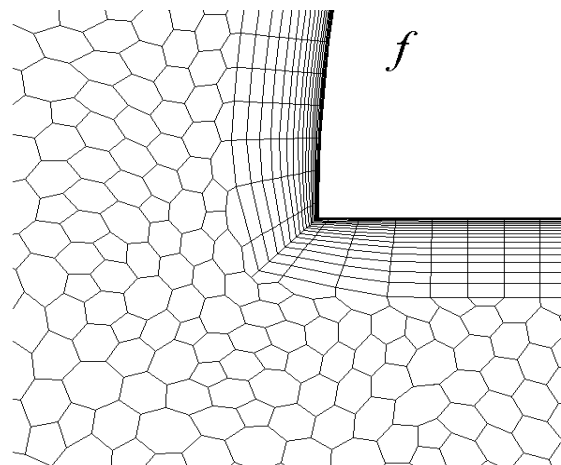
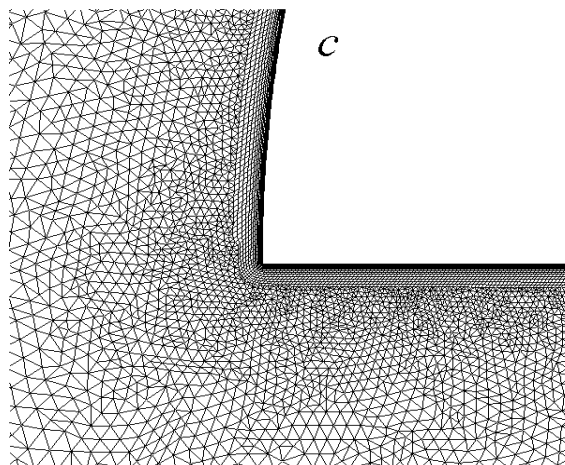
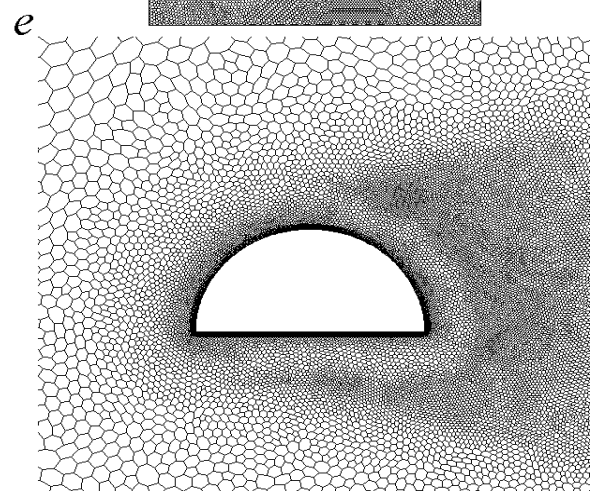
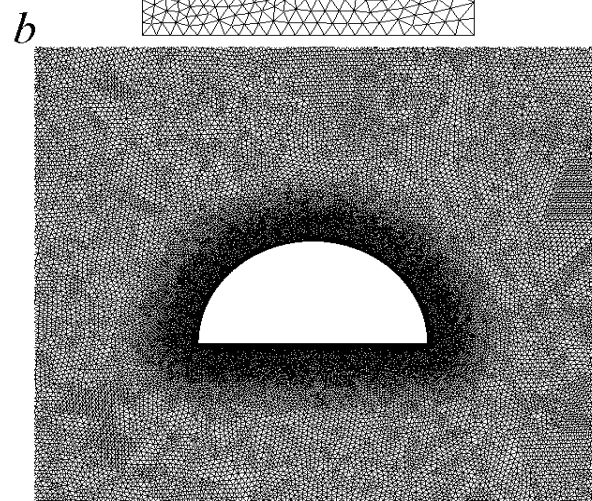
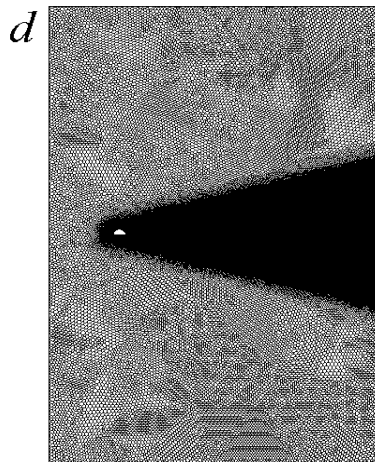
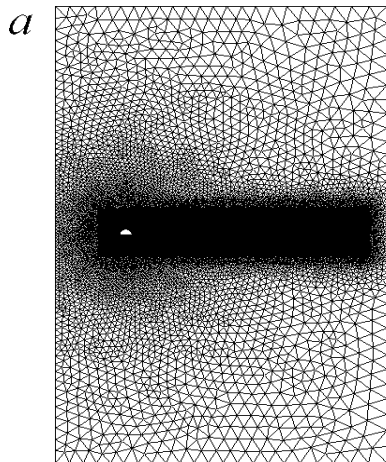
*d*



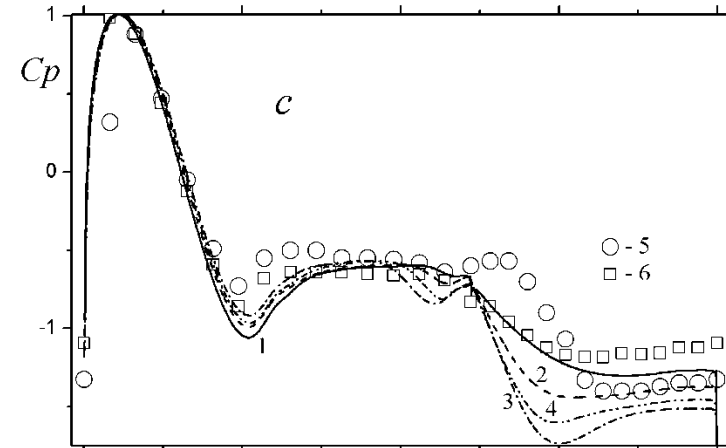
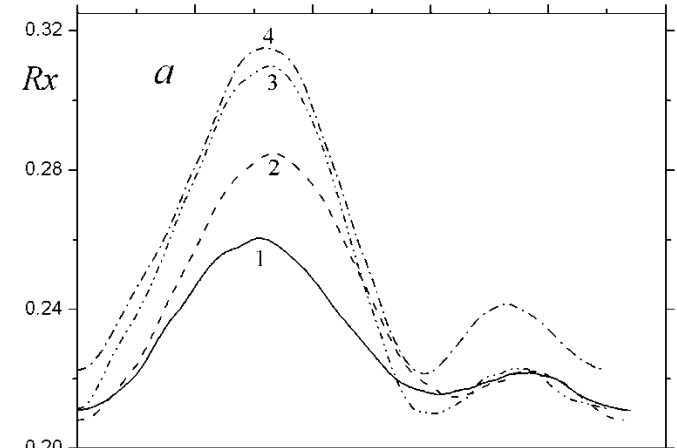
*e*



Фрагменты неструктурированных сеток: типовой (из произвольных разноразмерных четырехугольных ячеек) MF (*a,b*) и композитной (из квадратных и близких к прямоугольным ячеек различного размера) М1 (*c,d,e*) для полукругового профиля с острыми кромками. *a,c* – одно- и многоярусные концентрические сетки вокруг контура; *b,d* – зональные измельченные сетки для лучшего разрешения вихревой дорожки; *e* – сетка вблизи передней кромки профиля.

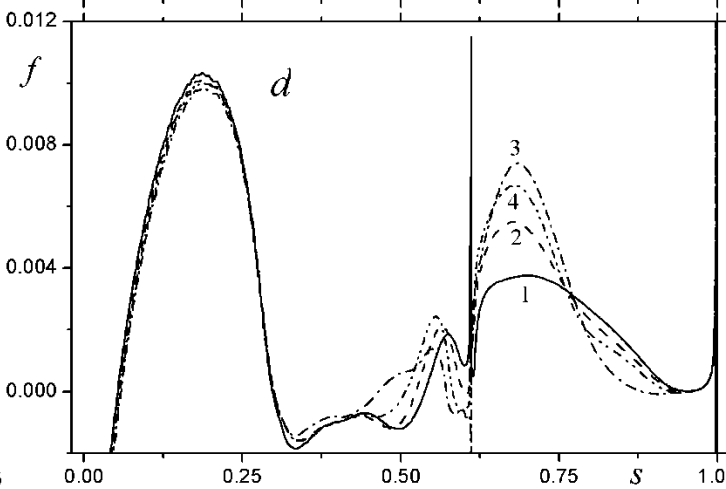
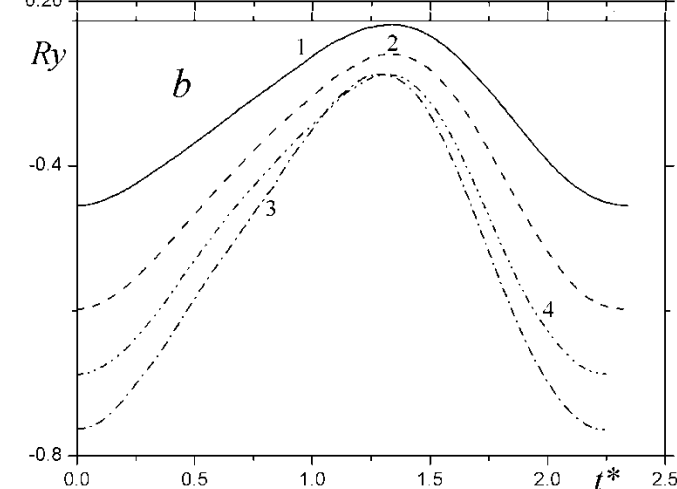


Неструктурированные сетки M2 (a) и M3 (d), а также их фрагменты для пакетов CFX (b,c) и Star CCM+(e,f) соответственно. b,e – окружающие контур фрагменты M2,M3; c,f – прикромочные участки сеток M2,M3

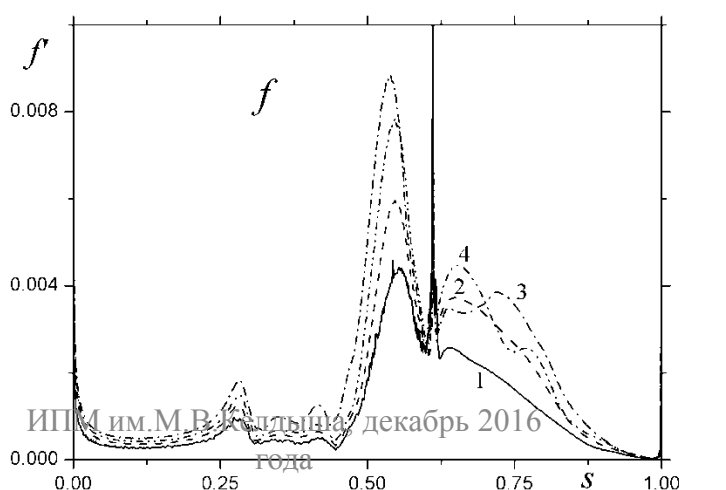
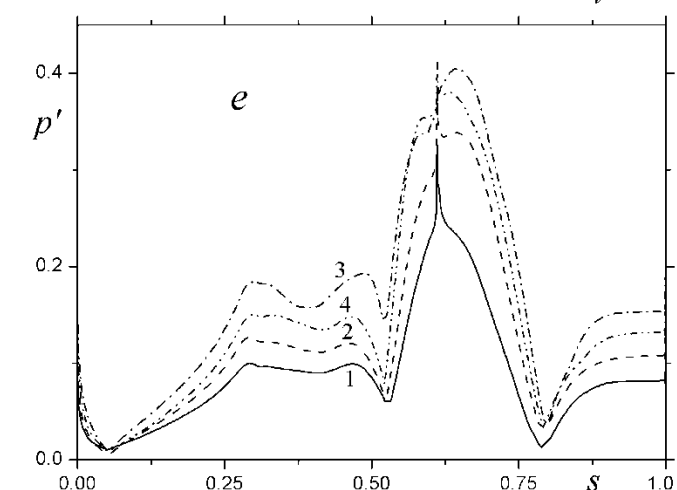


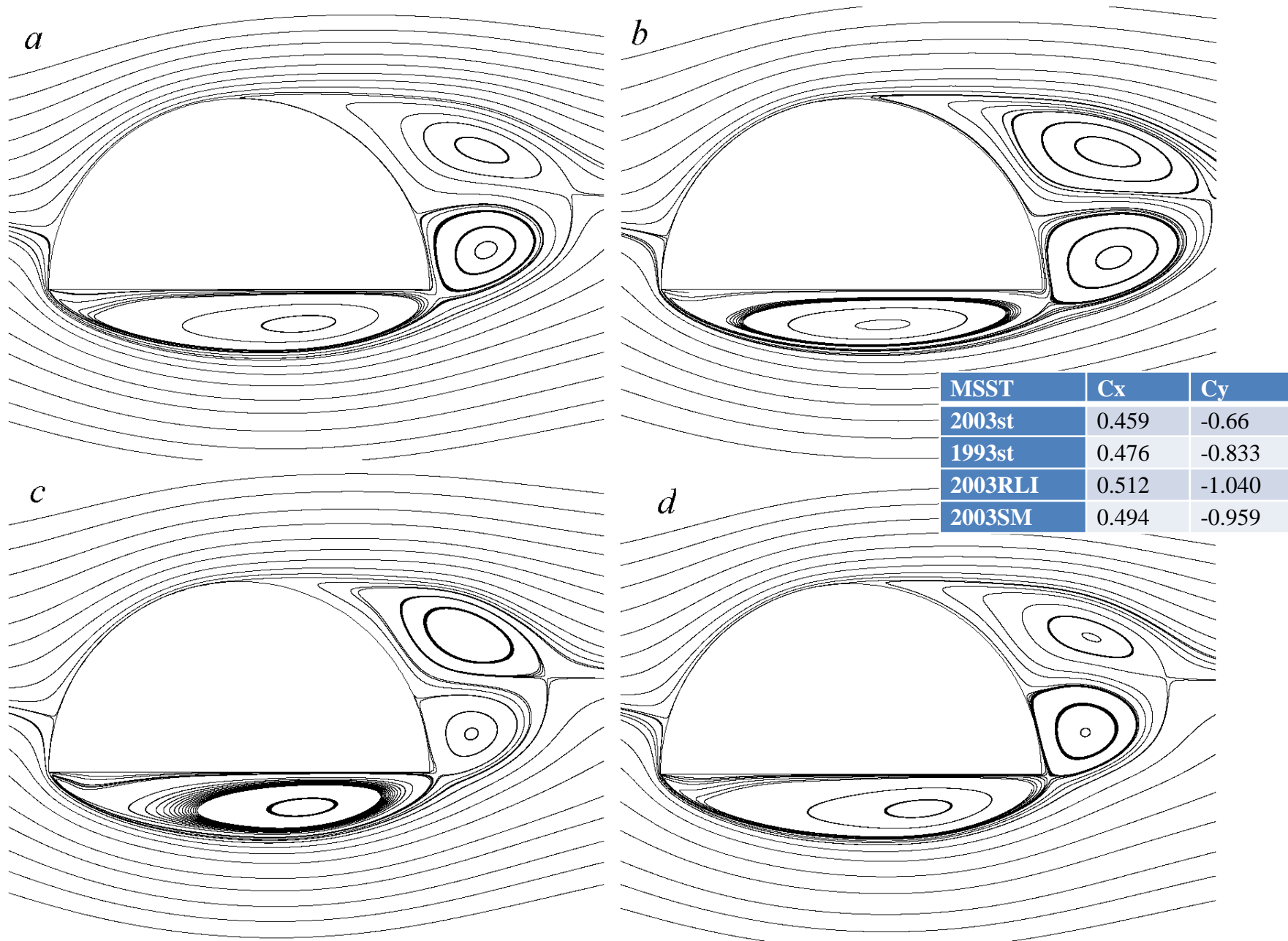
Влияние выбора  
версии MSST и  
коррекции MSST  
2003 на кривизну  
линий тока

Пакет VP2/3.

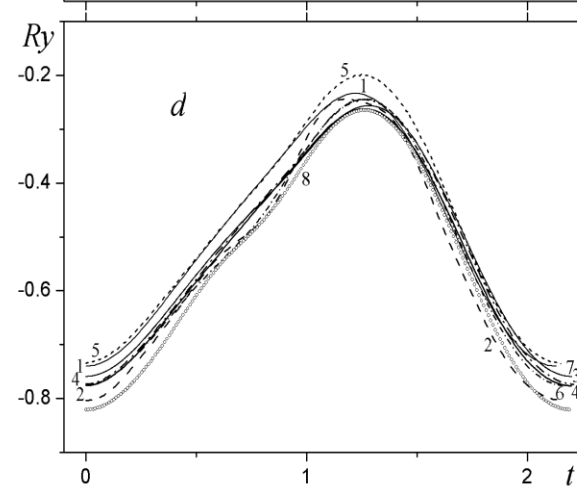
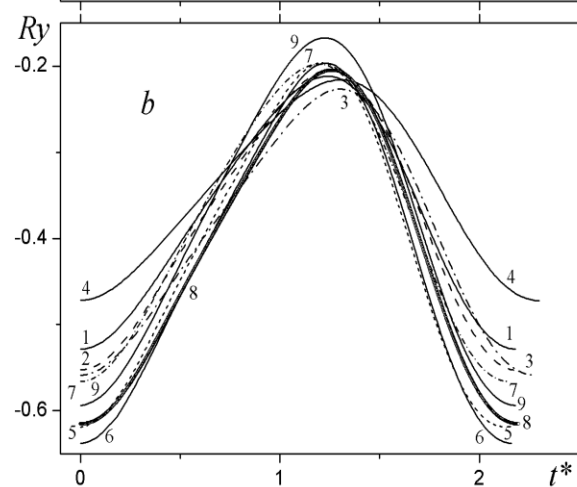
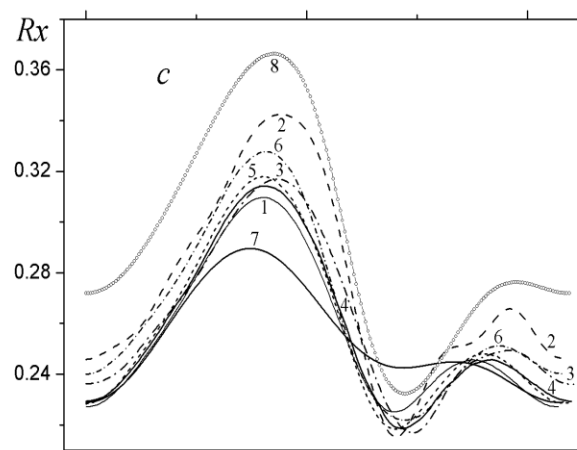
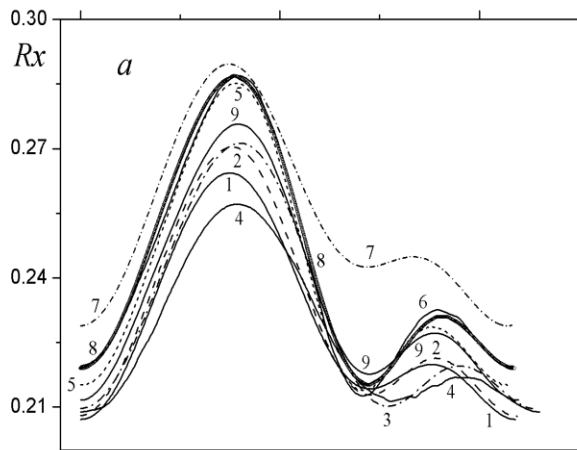


1 – SST-модель  
2003 года;  
2- SST-модель 1993  
года;  
3 - MSST 2003 года  
с модификацией по  
Роди-Лешцинеру-  
Исаеву;  
4- MSST 2003 года  
с коррекцией по  
Смирнову-Ментеру.  
5 – эксп. данные  
Случановской З.П.  
6 – эксперимент  
Гувернюка С.В.





Стандартные SST-моделей турбулентности 2003 (a) и 1993(b) года, а также модифицированные с учетом влияния кривизны линий тока версии SST-модели 2003 года в рамках подходов Роди-Лешцинера-Исаева (c,e,f) и Смирнова-Ментера (d). Пакет VP2/3.



No.	Пакет	Сетка
1	SigmaFlow	M1
2	VP2/3	M1
3		H*k
4		H*
5	Fluent	M1
6		H*k
7	CFX	M2
8	StarCCM+	M3
9	OpenFOAM	M1

Интегральные характеристики  
осредненного обтекания полукругового  
цилиндра на автоколебательном режиме,  
рассчитанные по стандартной SST-  
модели 2003 года на различных пакетах  
и сетках

ИПМ им.М.В.Келдыша, де  
года

Пакет	Сетка	Cx	Cy	St
VP2/3	M1	0.464	-0.756	0.457
	H*k	0.464	-0.786	0.439
	H*	0.454	-0.686	0.435
SigmaFlow	M1	0.460	-0.738	0.459
Fluent	M1	0.480	-0.818	0.472
	H*k	0.484	-0.840	0.463
CFX	M2	0.508	-0.758	0.466
StarCCM+	M3	0.446	-0.690	0.459
OpenFOAM	M1	0.486	-0.826	0.455

Интегральные характеристики осредненного обтекания полукругового цилиндра на автоколебательном режиме, рассчитанные по модифицированной SST-модели 2003 года на различных пакетах и сетках, а также с помощью моделей  $\zeta f$  и  $\zeta a$  на пакете SigmaFlow

Пакет	Поправка к SST-модели 2003 года	Сетка	Cx	Cy	St
VP2/3	RLI	MF	0.514	-0.880	0.467
	RLI	M1	0.550	-1.072	0.465
	RLI	H*k	0.522	-1.032	0.453
	RLI	H*	0.514	-1.048	0.455
SigmaFlow	RLI	MF	0.488	-0.886	0.469
	RLI	M1	0.514	-0.982	0.468
Fluent	SM	MF	0.514	-0.920	0.472
	SM	M1	0.516	-0.952	0.457
	SM	H*k	0.530	-1.048	0.463
CFX	SM	M2	0.526	-0.995	0.458
StarCCM+	Durbin	M3	0.528	-1.100	0.457
	4x-параметрические модели				
SigmaFlow	$\zeta$ -a	MF	0.526	-1.015	0.452
		M1	0.541	-1.092	0.440
	$\zeta$ -f	MF	0.541	-0.962	0.413
		M1	0.522	-0.794	0.393

# Выводы

1. Наблюдается значительное количественное различие результатов по стандартной и модифицированным версиям MSST 2003. Более высокие значения лобового сопротивления и низкие значения подъемной силы характерны для модификаций MSST 2003.
2. Основанные на многоблочных с наложением сетках МСТ с использованием стандартной MSST2003 (кривые 4 на Рис., а, б) хотя и позволяют получить двугорбый характер зависимости  $R_x(t^*)$ , однако количественные отличия от других зависимостей велики.
3. Прогнозы  $R_x(t^*)$ ,  $R_y(t^*)$ , полученные на различных по структуре композитных сетках М1 и Н\*к при использовании близких по применяемым вычислительным технологиям пакетов VP2/3 и SigmaFlow для стандартной MSST2003, оказываются весьма близкими.



4. Наиболее высокую точность результатов по  $R_x(t^*)$ ,  $R_y(t^*)$  показали расчеты на пакетах Fluent, Star CCM+, OpenFOAM, выполненные на весьма подробных сетках. Большое различие от средних распределений  $R_x(t^*)$  получено для пакета CFX.

5. Анализ приведенных в Таблице осредненных по времени  $C_x$  и  $C_y$ , рассчитанных на основе стандартной MSST 2003, показывает, что средние величины нагрузок, оцененные по всем пакетам, отличаются от ожидаемых примерно на 10% по  $C_x$  и на 25-30% по  $C_y$ . Интересно отметить, что самые низкие (по модулю) прогнозы ( $C_x=0.45$ ;  $C_y=-0.69$ ) оказались одинаковыми для VP2/3 (многоблочная с наложением сетка  $H^*$ ) и для StarCCM+ (довольно мелкая неструктурированная сетка M3). Пакеты Fluent и OpenFOAM продемонстрировали близкие прогнозы с наибольшими (по модулю) величинами, а пакет CFX предсказал наиболее высокий  $C_x$ .

6. В Таблице помимо результатов методических расчетов по различным модифицированным версиям MSST с использованием разнообразных сеток (многоблочных с наложением, композитных и неструктурированных) представлены прогнозы осредненных по времени аэродинамических коэффициентов полукругового цилиндра при его обтекании в режиме автоколебаний, выполненные по четырехпараметрическим моделям  $\zeta_f$ ,  $\zeta_a$ , причем последняя описывается в данной работе.

- 6.1. С улучшением сеточных характеристик на примерах применения пакетов VP2/3, SigmaFlow, Fluent повышается точность численных прогнозов, которые приближаются к ожидаемым величинам  $C_x=0.52-0.54$  и  $C_y=-1.04-1.08$ .
- 6.2. Интересно отметить близость численных прогнозов, полученных на разных пакетах при использовании одних и тех же сеток (VP2/3, SigmaFlow, Fluent, сетка MF).
- 6.3. На многоблочной с наложением сетке  $H^*$  и построенной на ее основе композитной сетке  $H^*k$  получены близкие результаты с применением пакета VP2/3. Они хорошо коррелируют с численными прогнозами по модели  $\zeta$ -а.
- 6.4. Наиболее близкие к экспериментальным данным находятся численные результаты по  $C_x$  и  $C_y$ , полученные с помощью пакетов CFX, StarCCM+ на исключительно подробных сетках.
- 6.5. Решения двумерной тестовой задачи автоколебательного режима обтекания полукругового цилиндра по  $\zeta$ -f уступают аналогичным прогнозам по  $\zeta$ -а.