

# **Комплекс программ/код VR2/3. Опыт расчет отрывных течений на гибридных сетках**

Исаев С.А.<sup>1</sup>, Усачов А.Е.<sup>2</sup>, Судаков А.Г.<sup>1</sup>, Мазо А.Б.<sup>3</sup>,  
Никущенко Д.В.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

<sup>2</sup> Московский комплекс ЦАГИ

<sup>3</sup> Казанский (Приволжский) федеральный университет

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

# Темы

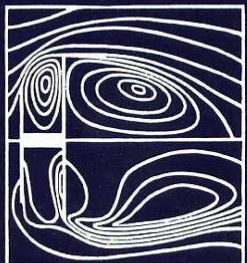
- Характерные черты комплекса VP2/3 (скорость-давление, 2D/3D)
- Верификация на базе URANS + SST-модели с учетом кривизны линий тока, модифицированных многоблочных вычислительных технологий с использованием гибридных сеток на примере обтекания полукругового профиля (эксперимент Гувернюка С.В.)
- Сравнение расчетов на многоблочных с пересечением структурированных фрагментов и гибридных с неструктурированными вставками сетках на примере задачи конвективного турбулентного теплообмена в канале с однорядными наклоненными овальными траншеями

# RANS&URANS. Пакетные технологии (с 1974)

И.А.БЕЛОВ  
С.А.ИСАЕВ  
В.А.КОРОБКОВ

## ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

## ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ



СУДОСТРОЕНИЕ

1989

## УПРАВЛЕНИЕ ОБТЕКАНИЕМ

## ТЕЛ

## С ВИХРЕВЫМИ ЯЧЕЙКАМИ

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

2001-  
2003

### Математические модели. MBT(VP2/3)

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

2

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

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

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

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

$\mu_{to}$  – без учета кривизны;

$C_c = 0.02 - 0.1$

- сочетание метода пристеночных функций и

Министерство образования Российской Федерации  
Балтийский государственный технический университет "Боемех"

И.А. БЕЛОВ, С.А. ИСАЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Учебное пособие

2001

Ю. А. Быстров  
С. А. Исаев  
Н. А. Кудрявцев  
А. И. Леонтьев

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИХРЕВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В ПАКЕТАХ ТРУБ

2005



Сергей Исаев  
Павел Баранов  
Александр Усачов

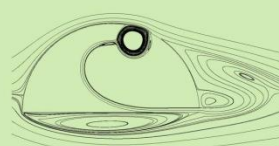
## Многоблочные вычислительные технологии в VP2/3 по аэротермодинамике

Разработка, верификация и применение

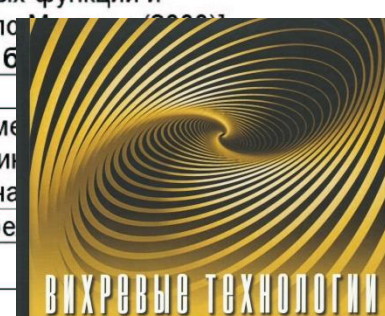
2013

## Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками

(Численное и физическое моделирование)



2016



## ВИХРЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

2017

5 СЕД Уикенда в ИФЭ им.М.В.К  
декабрь 2018 года

# $k$ - $\omega$ 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), апробированная на стационарных и нестационарных 2D/3D задачах

**Прямая коррекция  
турбулентной вязкости**

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

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

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

Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А., Жукова Ю.В., Усачов А.Е. Многоблочные вычислительные технологии применительно к расчету турбулентных отрывных и струйных течений сжимаемого вязкого газа со скачками уплотнения и ударными волнами в рамках модели переноса сдвиговых напряжений. 6 глава в коллективной монографии под редакцией В.А. Левина, Н.А. Фомина, В.Е. Фортова. Физика ударных волн, горения, детонации, взрыва и неравновесных процессов. Часть 2. Минск: ИТМО НАН Беларуси, 2018. С. 216–228.

5 CFD Уикенд в ИПМ им.М.В.Келдыша,

декабрь 2018 года

# Характерные особенности VP2/3

- идея методологии и ее развитие: многоблочные с пересечением разномасштабные структурированные сетки (МС) -> неструктурированные сетки (НС) -> гибридные сетки с заменой в МС зон пересечения неструктурированными вставками (ГС)
- особенности VP2/3 (NS-(U)RANS): линеаризация исходных уравнений и применение SIMPLEC алгоритма на центрированных сетках; обобщение подхода Рхи-Чоу для сжимаемых течений вязкого газа; аппроксимация конвективных слагаемых в источниковых членах линеаризованных уравнений по схемам QUICK и TVD; процедура коррекции давления и среднemasсовой температуры для канальных и трубных течений; периодические граничные условия
- оценка достоверности расчетов турбулентных отрывных течений с использованием модифицированной с учетом влияния кривизны линий тока модели переноса сдвиговых напряжений: перечень рассчитанных физических аналогов и публикаций
- сравнительный анализ расчетов течения и теплообмена в периодической секции канала с наклоненной овальной траншеей

*Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками.  
Численное и физическое моделирование / Под ред. С.А.  
Исаева. СПб. : Изд-во Политех. ун-та, 2016. 215 с.*

Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A., Usachov A.  
Improvement of aerodynamic characteristics of a thick airfoil with  
a vortex cell in sub- and transonic flow // Acta Astronautica. 2017.  
Vol.132. P.204 –220.

Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A., Usachov A.,  
Guvernnyuk S., Sinyavin A., Chulyunin A., Mazo A., Demidov D.  
Ensuring safe descend of reusable rocket stages – numerical  
simulation and experiments on subsonic turbulent air flow around  
a semi-circular cylinder at zero angle of attack and moderate  
Reynolds number // Acta Astronautica. 2018. Vol.150. P.117-136.

# Experiment

Fig. 1. Photographs of the working part of the wind tunnel with an established model of a semicircular profile with a span of  $16L$ , (a) – without washers, (b) – with two washers at a distance  $4L$

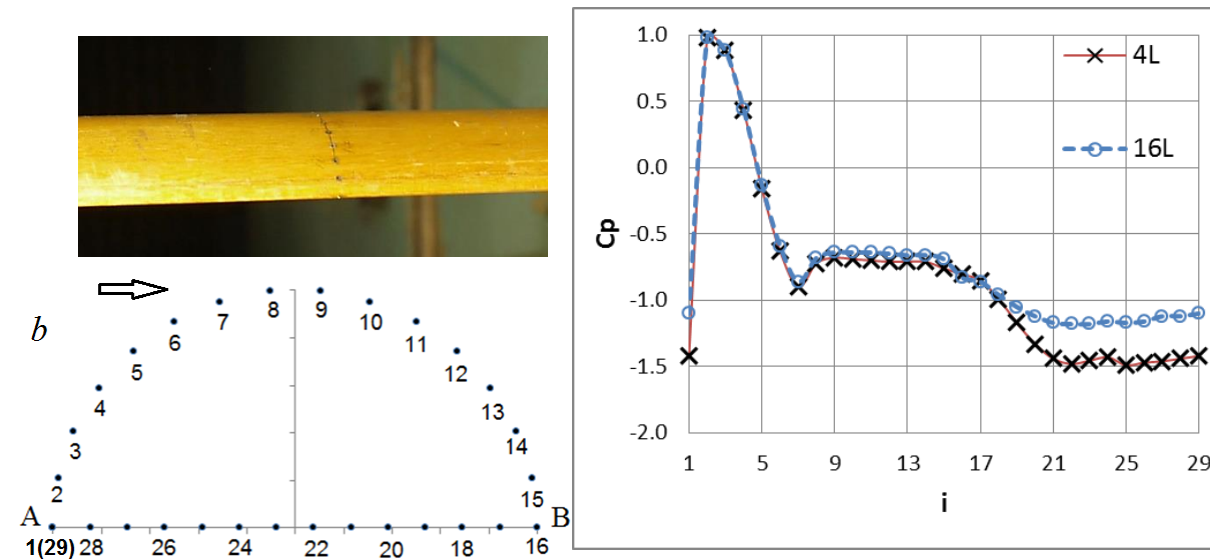
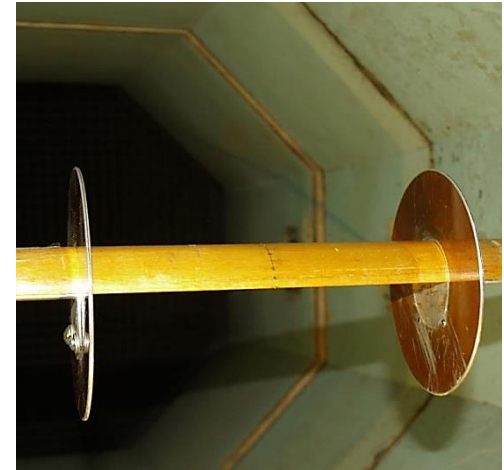
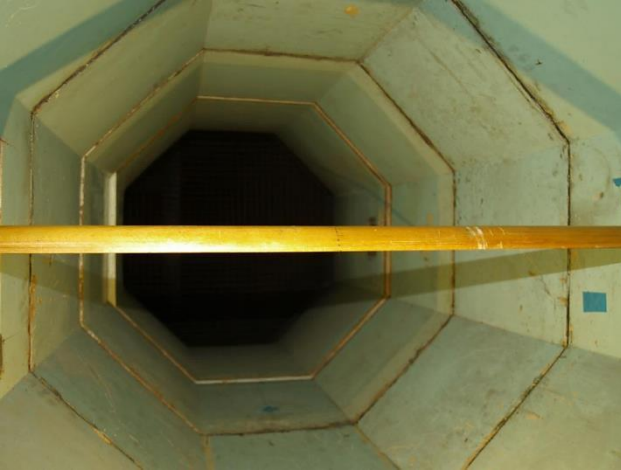
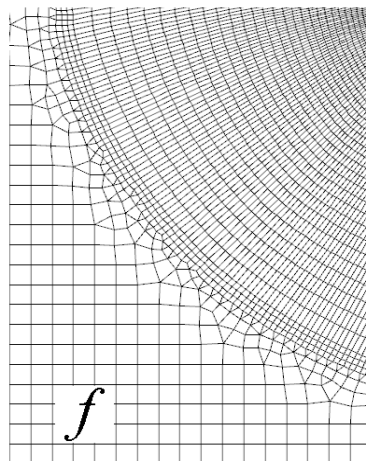
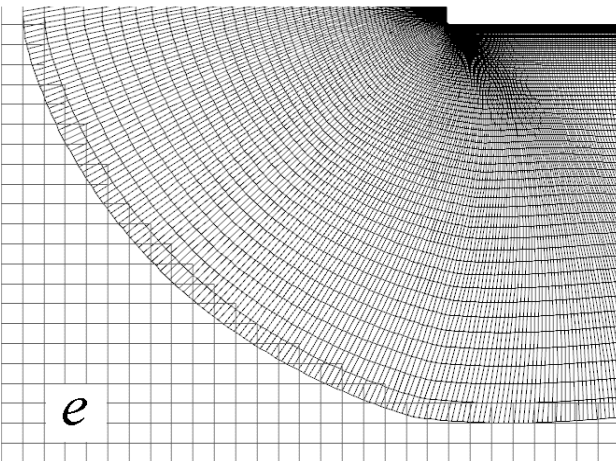
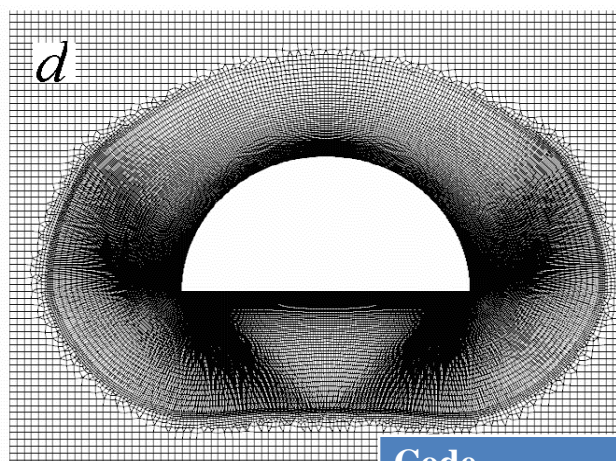
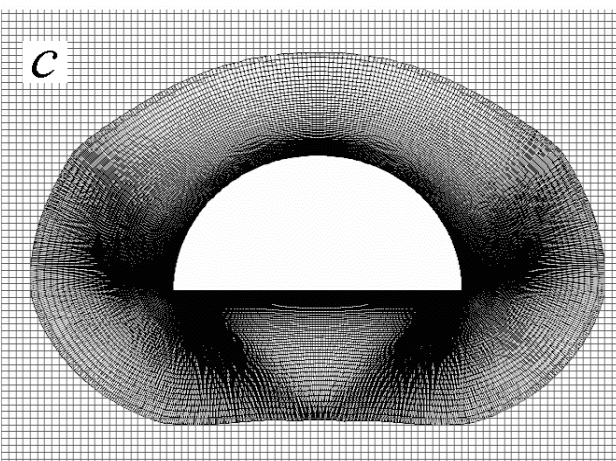
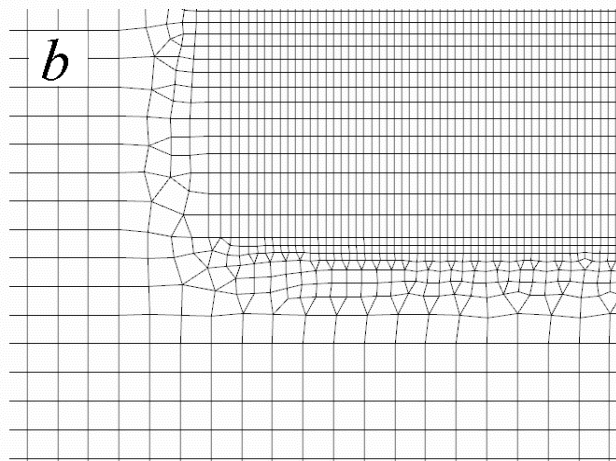
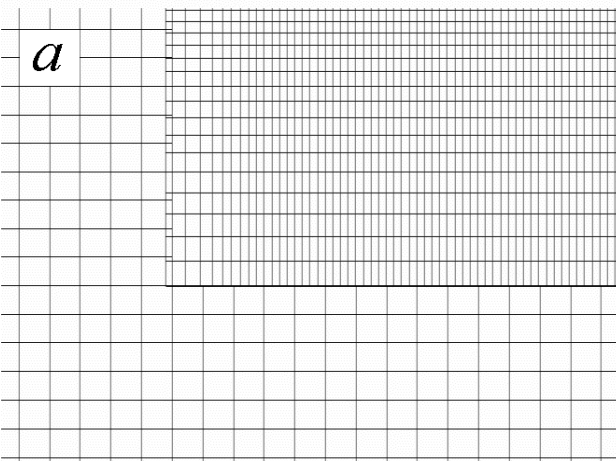


Fig. 2. Location of the numbered drain holes for static pressure measurements along the profile contour in the cross section (a, b). The distributions of the dimensionless pressure coefficient (c).

**Table 1.** Experimental estimates of the integral characteristics of averaged flow around the semi-circular profile at the zero angle of attack.

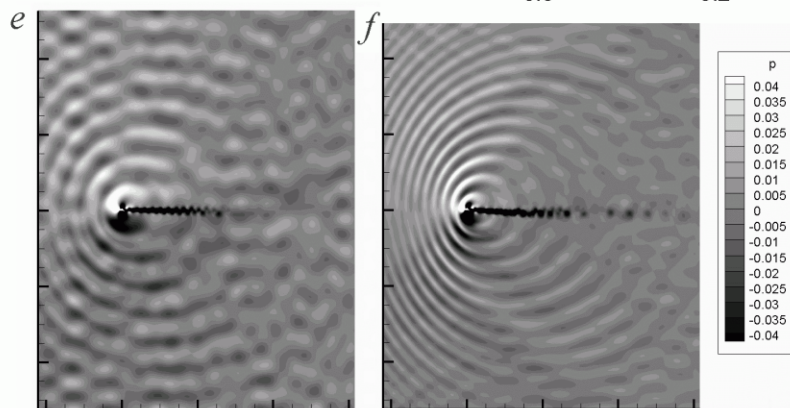
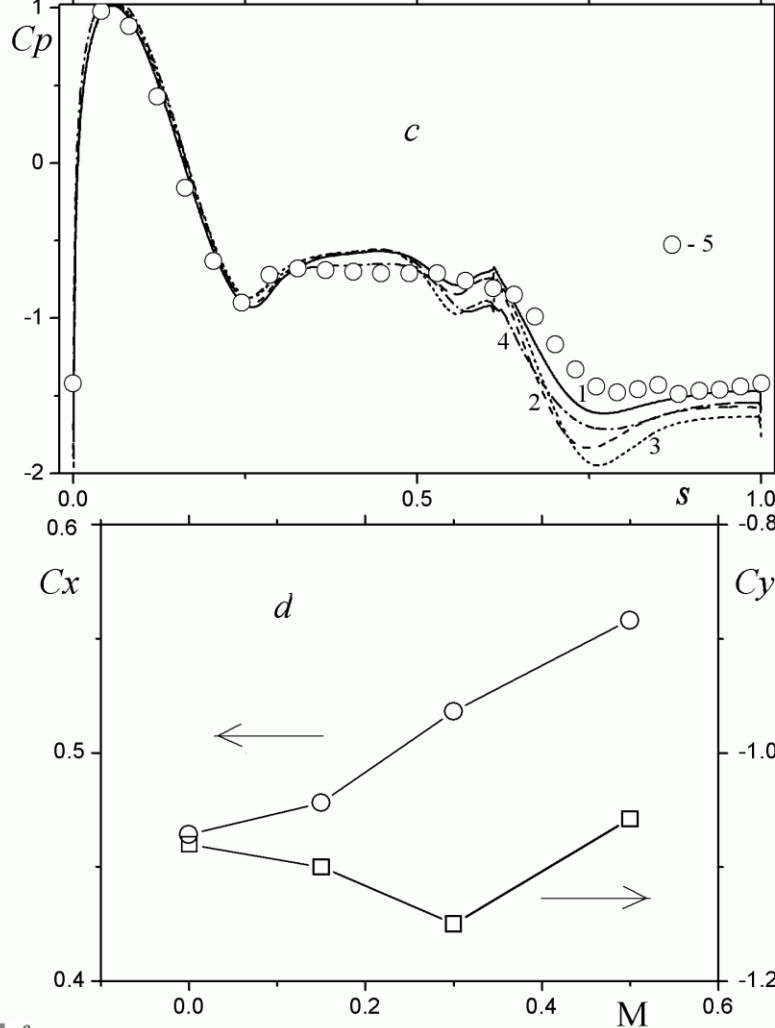
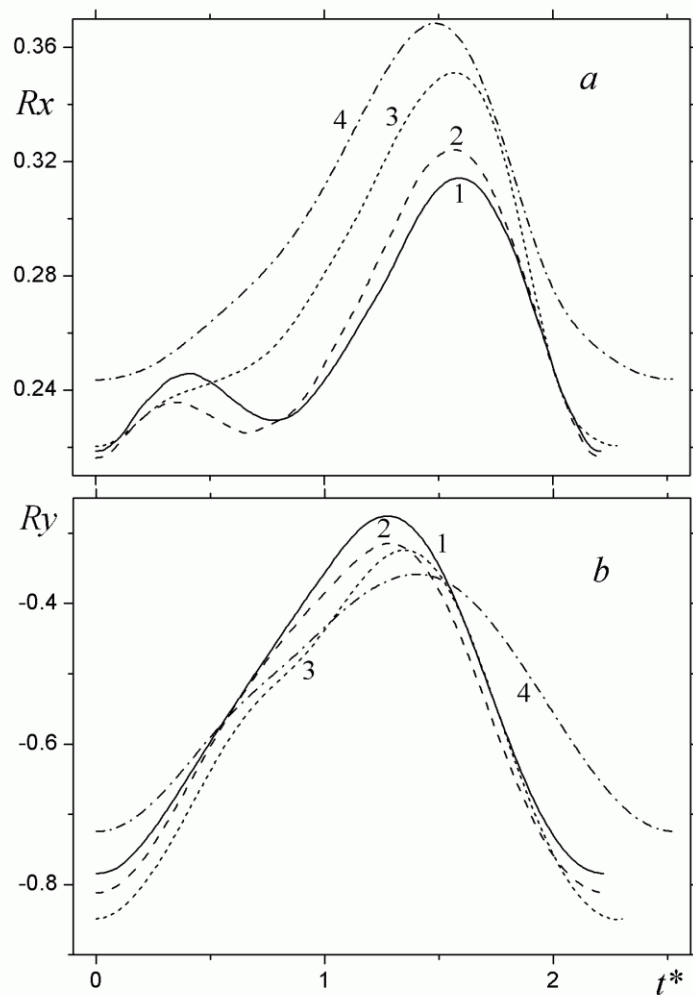
Length of profile model (distance between washers)	$C_x$	$C_y$	Sh
16L	0.467	-0.634	0.410
4L	0.476	-0.816	0.440



**Fragments of the multiblock structured H\*-type grids (*a,c,e*) and the relevant unstructured fragments of the designed composite grid (*b,d,f*): *a,b* – insertion of the additional grid for wake computation into the outer Cartesian grid; *c,d* – connection between the O-type grid surrounding the semi-circular profile and the additional rectangular grid for wake computation and *e,f* – connection (enlarged scale)**

**Standard SST2003**

Code	Grid	$C_x$	$C_y$	Sh
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



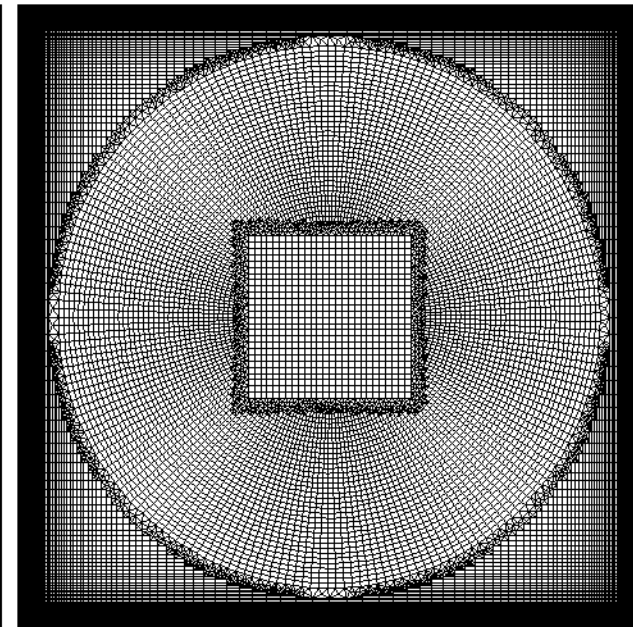
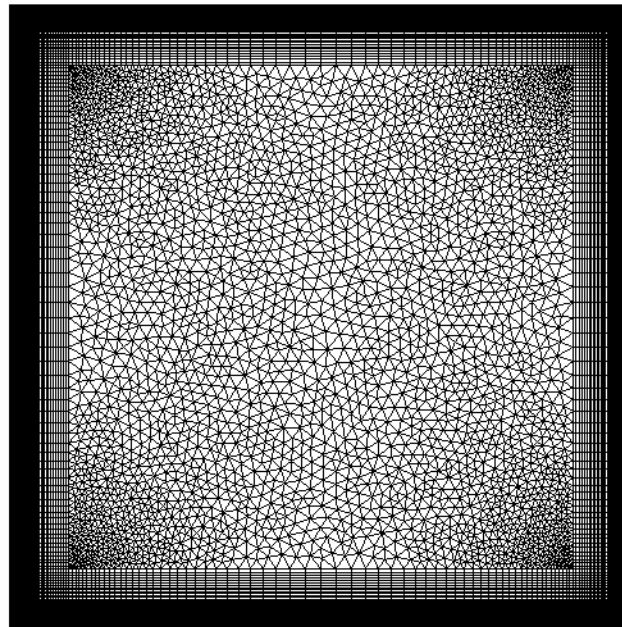
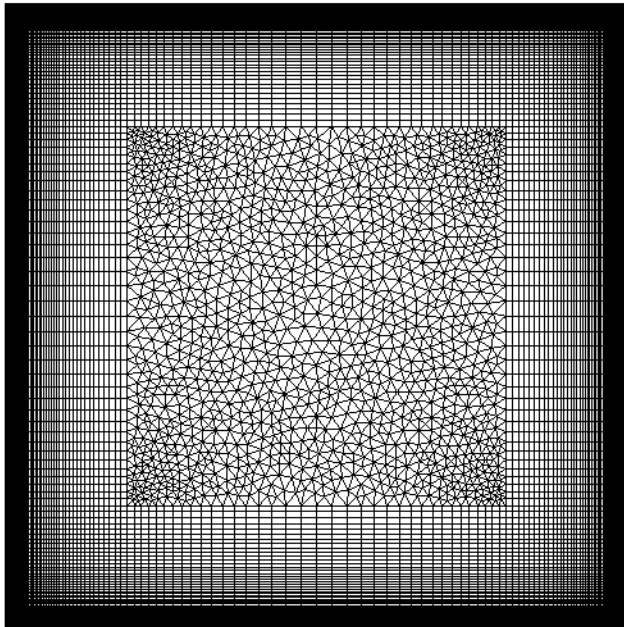
Comparison of the  $t^*$  dependences of  $R_x$  (a) and  $R_y$  (b) during the self-oscillatory period, the  $C_p$  distributions (c) over the semi-circular cylinder, beginning from the leading edge, the time-averaged  $C_x$  and  $C_y$  oscillations (d) within the self-oscillatory regime, and the pressure field patterns at the Mach number ranging from 0 too 0.5. 1 –  $M=0$ ; 2 – 0.15; 3, e – 0.3; 4, f – 0.5. Experimental data: 5 – present work

# Сравнение неструктурированных и композитных сеток по экстремальному значению функции тока в каверне с подвижной крышкой $Re=5000$

NN=42142

51324

49097



-0.11907

-0.11825

-0.12125

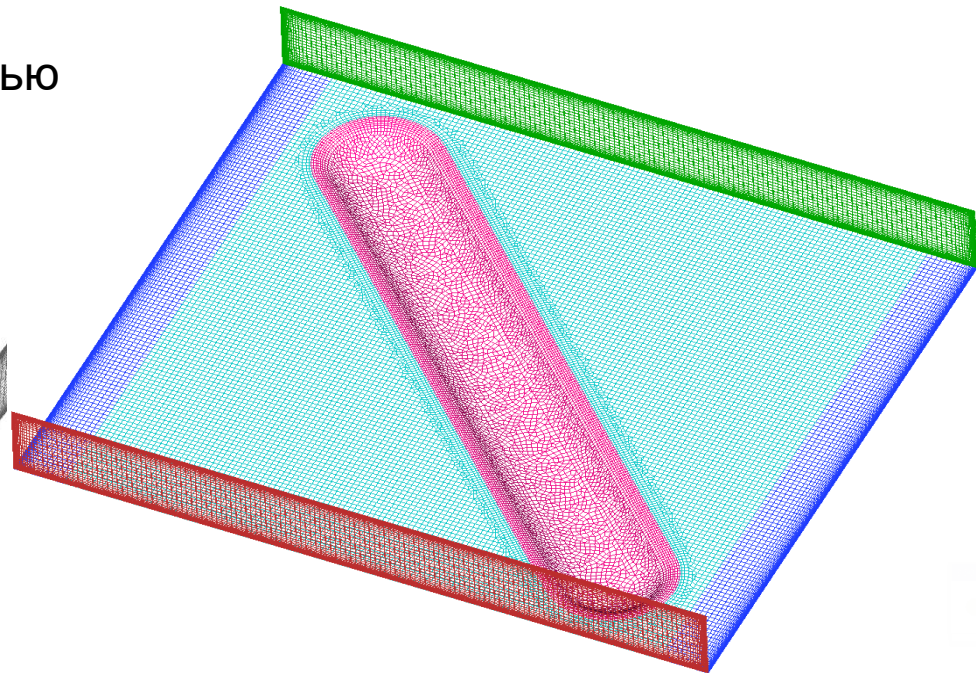
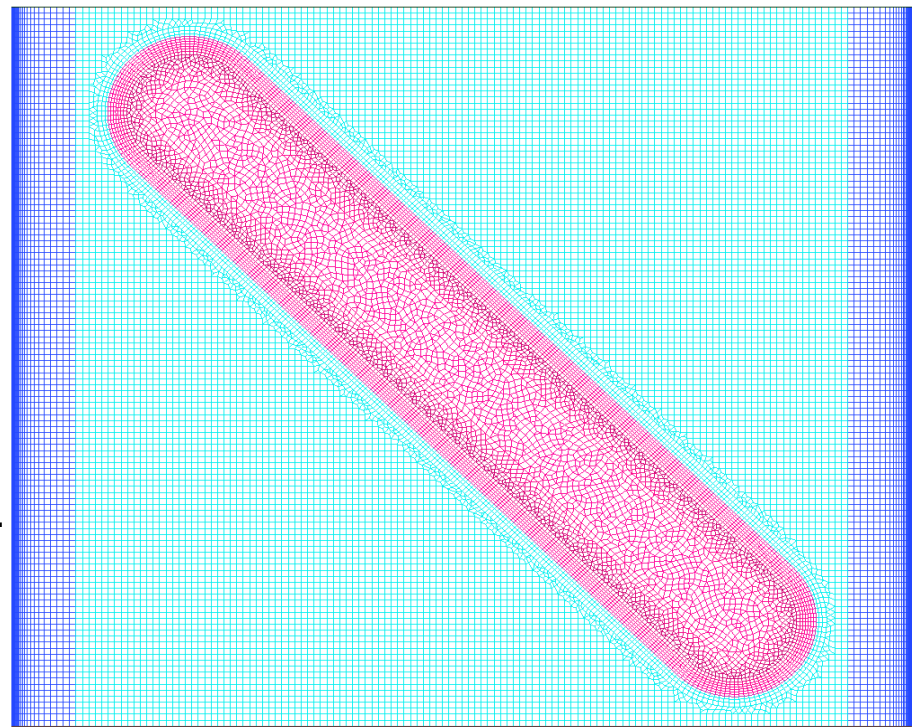
Kalinin E. I., Mazo A. B. and Isaev S. A. Composite mesh generator for CFD problems // 11th International Conference on "Mesh methods for boundary-value problems and applications" IOP Publishing IOP. Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2016. 158. 6p.

# Тестирование на разных сетках

Построение трехмерной сетки в варианте «2.5D». Сначала строится поверхностная сетка на нижней поверхности канала, а затем проводится операция выдавливания (extrude) вдоль вертикального направления.

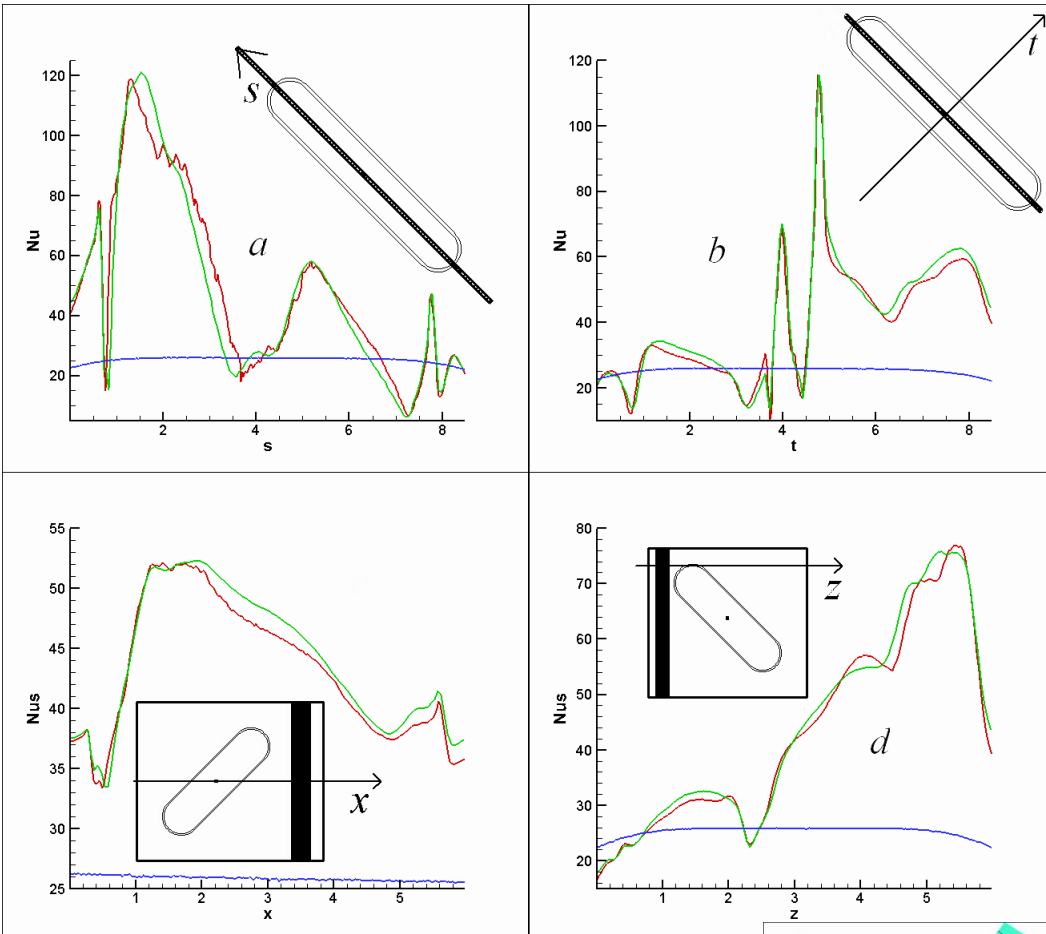
Периодический модуль с наклоненной овальной траншеей на стенке узкого канала

Большинство операций, связанных с генерацией сетки, производится с помощью пакета HybMesh (<https://github.com/kalininei/HybMesh>).



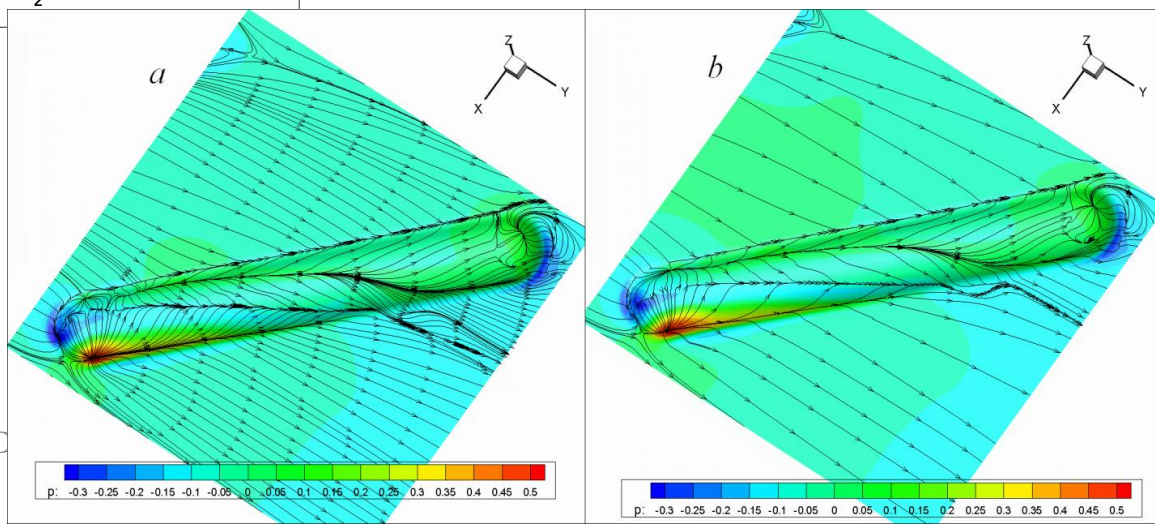
$$\varphi=45^\circ \Delta=0.3 L=7$$

Сравнение локальных  $Nu$  (a,b) и проинтегрированных по поперечным полосам  $Nus$  (c,d) чисел Нуссельта вдоль диагональных направлений (a,b), вдоль (c) и поперек (d) квадратного участка периодического модуля с лункой, полученных с помощью HG (красные линии) и MBT (зеленые линии). Данные для плоскопараллельного канала нанесены синими линиями.  $Re=10^4$

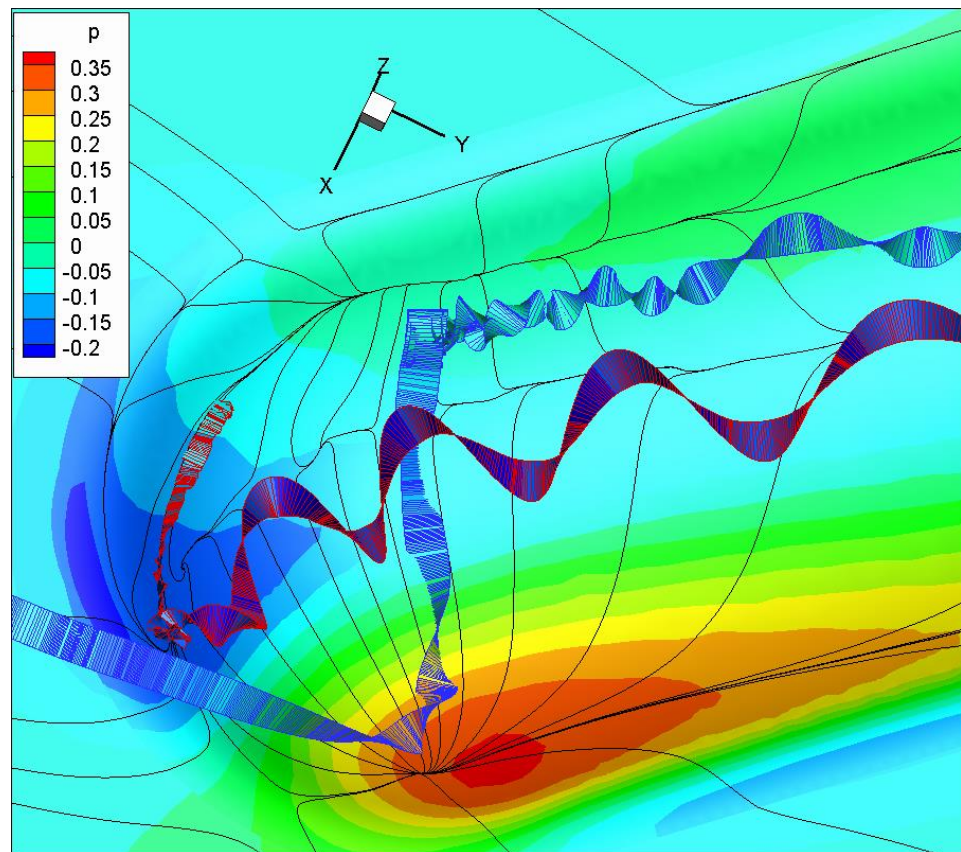
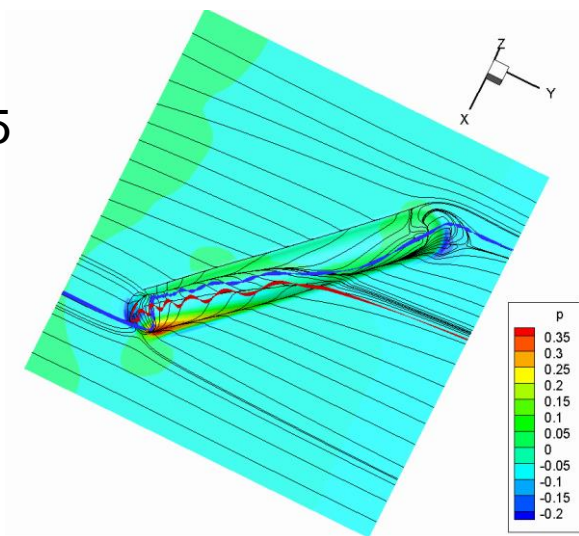


Сравнение полей давления с нанесенными картинками растекания жидкости по поверхности стенки модуля с овально-траншейной лункой, полученных с помощью HG (a) и MBT(b)

5 CFD



$\Delta=0.25$



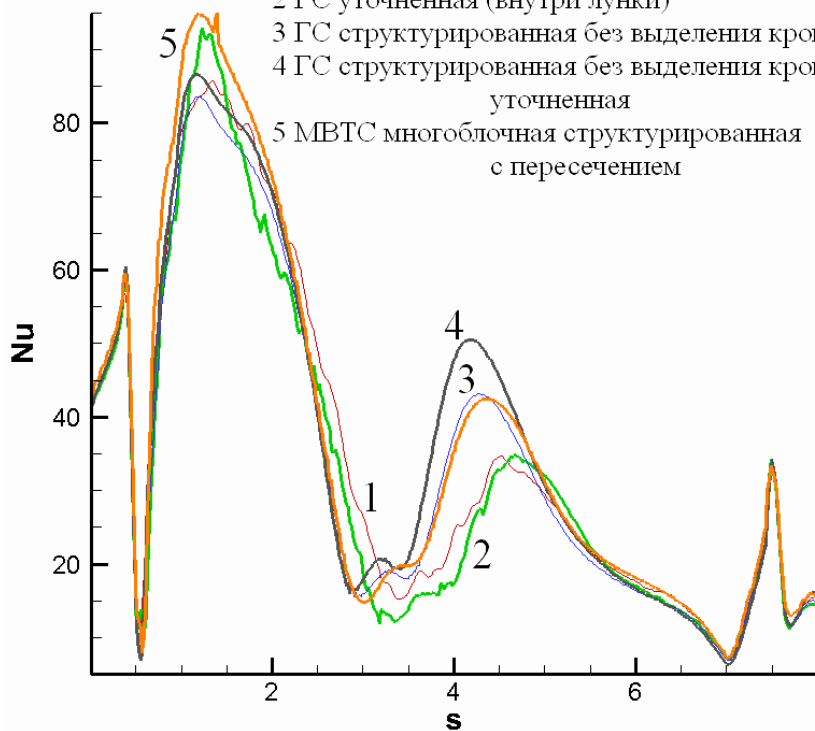
1 ГС базовая – неструктурированная внутри лунки  
с выделением кромок

2 ГС уточненная (внутри лунки)

3 ГС структурированная без выделения кромок

4 ГС структурированная без выделения кромок  
уточненная

5 MBTC многоблочная структурированная  
с пересечением



	$U_{\min}$	$W_{\min}$	$U_{\max}$	$k_{\max}$	$Nu_{\min}$	$\zeta$
1	-0.494	-0.967	1.370	0.0337	32.32	0.0177
2	-0.542	-0.926	1.364	0.0384	32.21	0.0176
3	-0.527	-0.964	1.370	0.0424	32.29	0.0177
4	-0.529	-0.992	1.374	0.0469	32.62	0.01779
5	-0.585	-0.997	1.379	0.0430	33.04	0.01785

# Выводы

1. Обоснована приемлемость модифицированной с учетом поправки на кривизну линий тока SST-модели 2003 года на примере решения двумерной задачи дозвукового обтекания полукругового цилиндра под нулевым углом атаки

2. Результаты расчетов на гибридных сетках хорошо согласуются с прогнозами на разномасштабных многоблочных с пересечением структурированных сетках. Увеличение неструктурированных вставок может приводить к снижению точности прогнозов.

## Благодарности

Исследования выполнены при поддержке Правительства РФ (МЕГА-грант) и РФФИ