

Комплекс программ/код VP2/3. Обсуждение проблем сеточной сходимости

Исаев С.А.¹, Усачов А.Е.², Судаков А.Г.¹, Мазо А.Б.³,
Никущенко Д.В.⁴, Чулюнин А.Ю.⁵

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

² Московский комплекс ЦАГИ

³ Казанский (Приволжский) федеральный университет

⁴ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

⁵ Институт механики МГУ им.М.В.Ломоносова

⁶ CFD Уикенд в ИПМ РАН, 30.11-1.12.2019

Темы

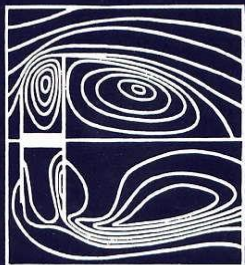
- Сеточная сходимость, подходы к оценке
- RANS + SST-модель с учетом кривизны линий тока, тестовая задача интенсификации отрывного течения и теплообмена в канале с однорядными наклоненными овално-траншейными лунками на участке стабилизации потока; пакеты VP2/3, Star CCM+
- Сравнение результатов расчетов на моноблочных, структурированных и неструктурированных сетках, многоблочных с пересечением разномасштабных структурированных фрагментов сетках
- Сходимость на локальных измельчаемых сетках различной топологии
- Сравнение прогнозов на сетках различной топологии

RANS&URANS. Пакетные технологии (с 1974)

И.А. БЕЛОВ
С.А. ИСАЕВ
В.А. КОРОБКОВ

ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА

ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ



1989

СУДОСТРОЕНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ОБТЕКАНИЕМ

ТЕЛ

С ВИХРЕВЫМИ ЯЧЕЙКАМИ

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

2001-
2003

Математические модели. МВТ(VP2/3)

- допущения: 1) $\bar{\rho} = \frac{1 + \bar{p}kM_0^2}{T}$; 2) подход Рейнольдса

2

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_j h) = \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\tilde{\mu}}{Pr} \right) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \left(\frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{xy} \frac{\partial u_i}{\partial x} \right) (k-1)M_0^2.$$

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: $\mu_t = \mu_{to} / (1 + C_c Ri_t)$

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

• сочетание метода пристеночных функций и

Министерство образования Российской Федерации
Балтийский государственный технический университет "Военмех"

И.А. БЕЛОВ, С.А. ИСАЕВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНЫХ ТЕЧЕНИЙ

Учебное пособие

2001

Санкт-Петербург 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 Усачев

Многоблочные вычислительные технологии в VP2/3 по аэродинамике

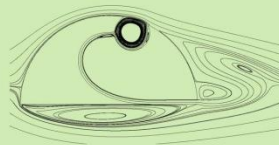
Разработка, верификация и применение

2013

1.12.2019

Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками

(Численное и физическое моделирование)



2016

ВИХРЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

2017

k - ω SST (1993)

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

k - ω SST (2003)

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

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

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

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

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

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

Коррекция SST-модели 2003 года (подход Роди-Лешцинера-Исаева), апробированная на стационарных и нестационарных 2D/3D задачах

Прямая коррекция турбулентной вязкости

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

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

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

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.

Isaev S. A. Experience of application of SST-model-2003 with correction on streamline curvature according to Rodi-Leshziner-Isaev approach for (U)RANS calculations of separated and vortex sub- and supersonic flows // AIP Conference Proceedings, 2018. 2027, P. 020015.1-7.

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 среднемассовой
температуры для канальных и трубных течений;
периодические граничные условия

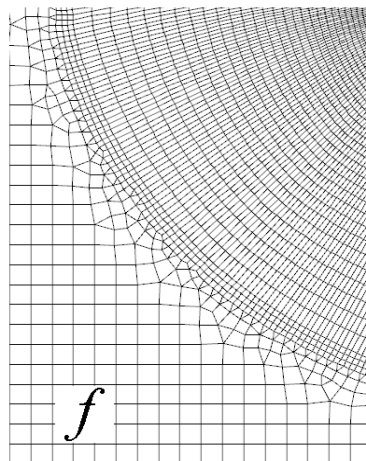
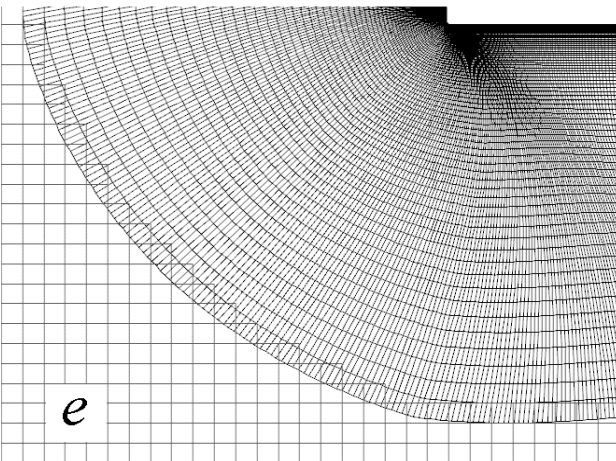
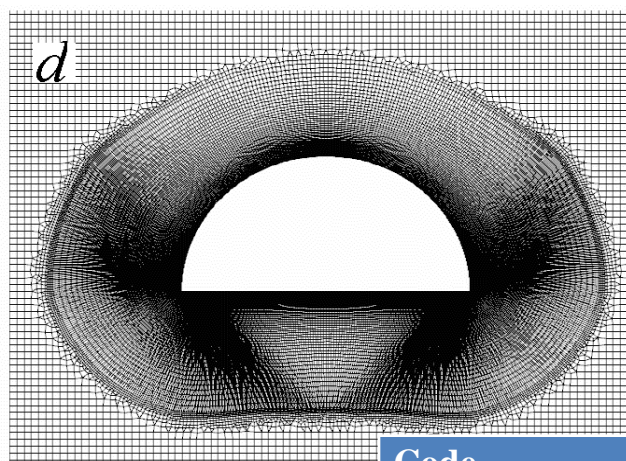
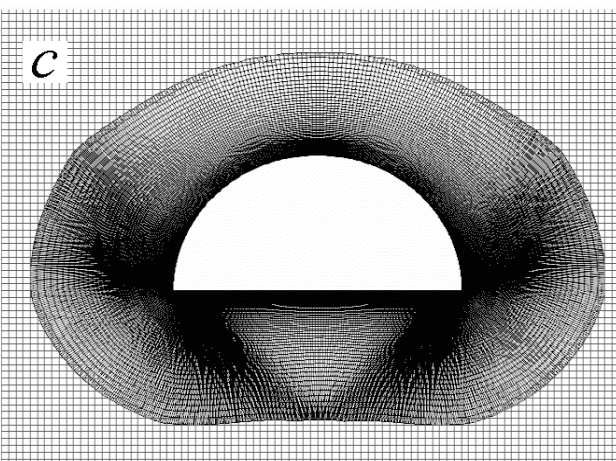
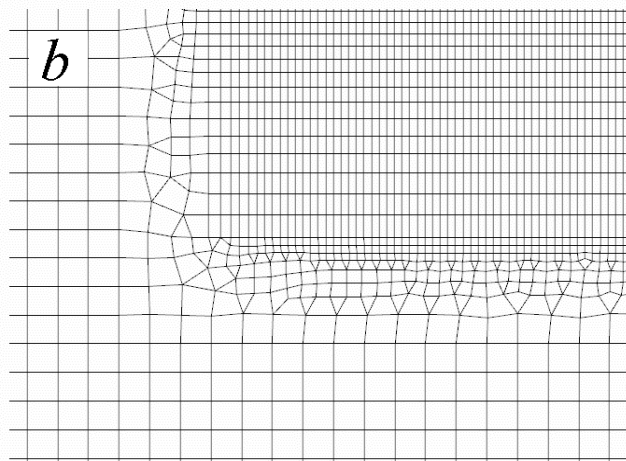
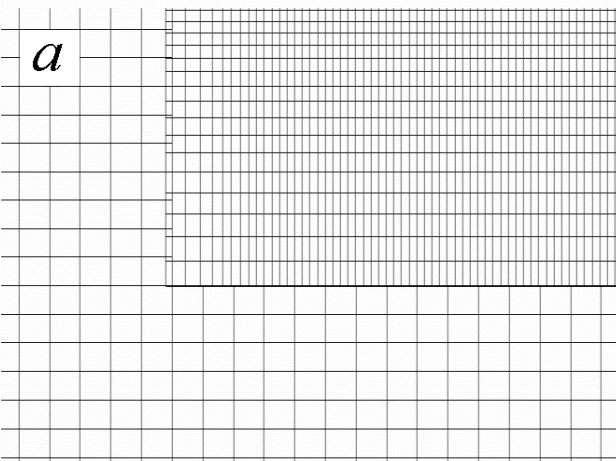
- оценка достоверности расчетов турбулентных отрывных течений с
использованием модифицированной с учетом влияния кривизны линий тока
модели переноса сдвиговых напряжений: перечень рассчитанных физических
аналогов и публикаций

- 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.,
Guvernuyuk 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.**

**Isaev S., Baranov P., Popov I., Sudakov A., Usachov A.,
Guvernuyuk S., Sinyavin A., Chulyunin A., Mazo A., Demidov
D., Dekterev A., Gavrilov A., Shebelev A. Numerical simulation
and experiments on turbulent air flow around the semi-
circular profile at zero angle of attack and moderate
Reynolds number // Computers and Fluids. 2019. Vol.188. 30.
P. 1-17.**



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

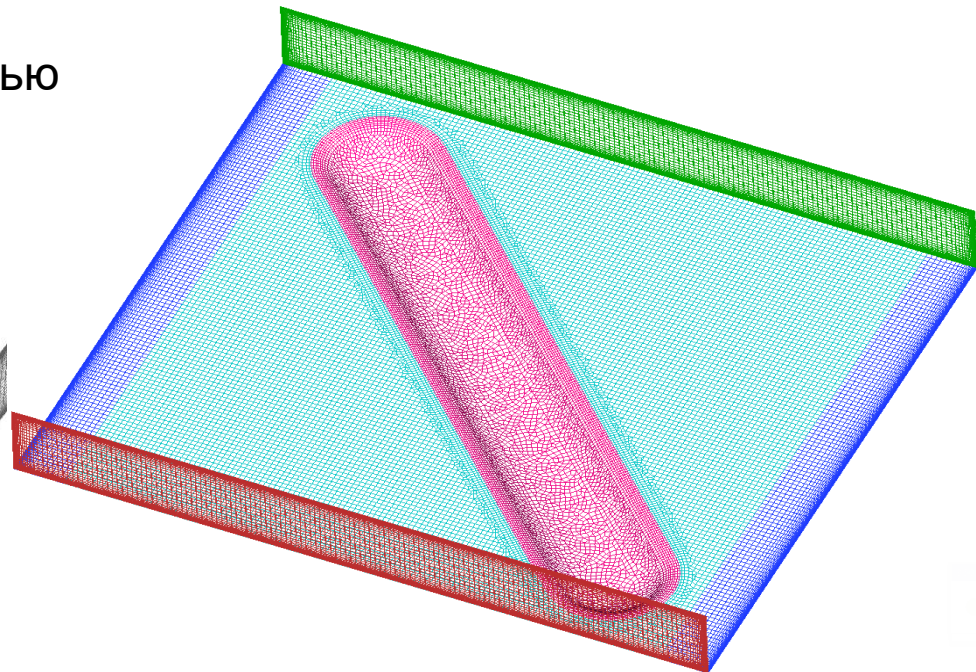
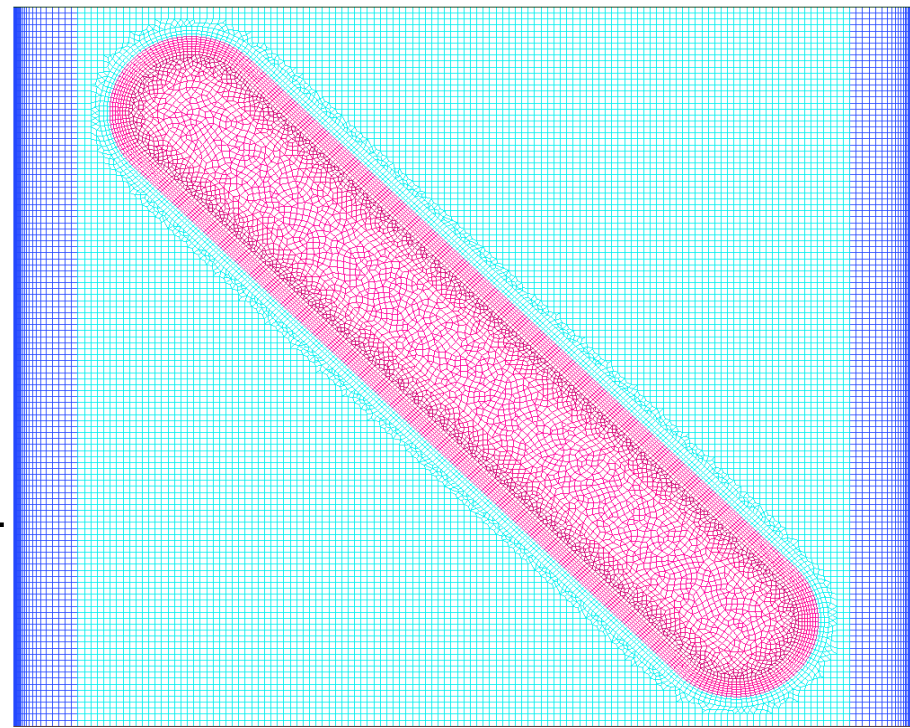
Code	Grid	C_x	C_y	Sh
VP2/3	M1	0.464	-0.756	0.457
	H*k	0.464	-0.786	0.439
	H*	0.454	-0.686	0.435
SigmaFlow	M1	0.460	-0.738	0.459
Fluent	M1	0.480	-0.818	0.472
	H*k	0.484	-0.840	0.463
CFX	M2	0.508	-0.758	0.466
StarCCM+	M3	0.446	-0.690	0.459
OpenFOAM	M1	0.486	-0.826	0.455

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.

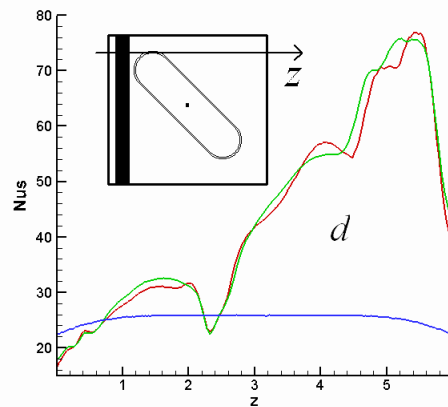
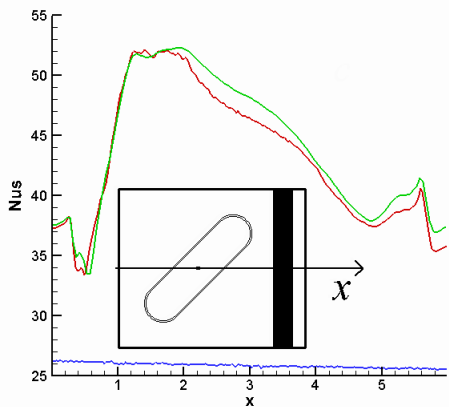
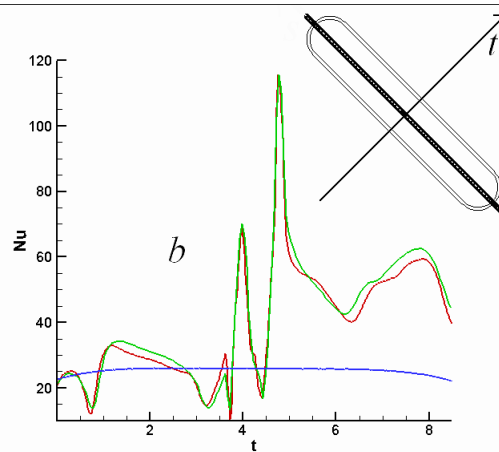
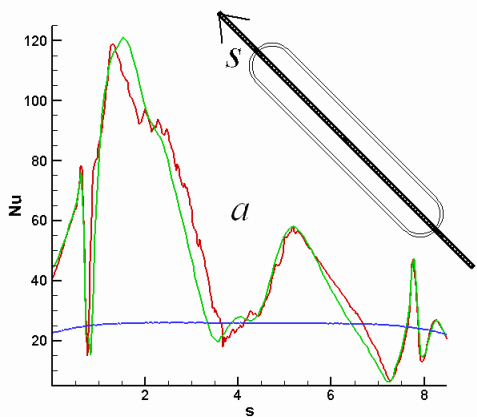
Периодический модуль с наклоненной овальной траншеей на стенке узкого канала

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

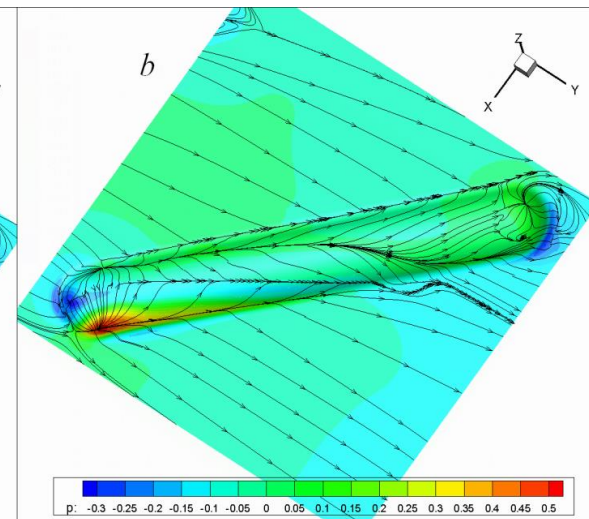
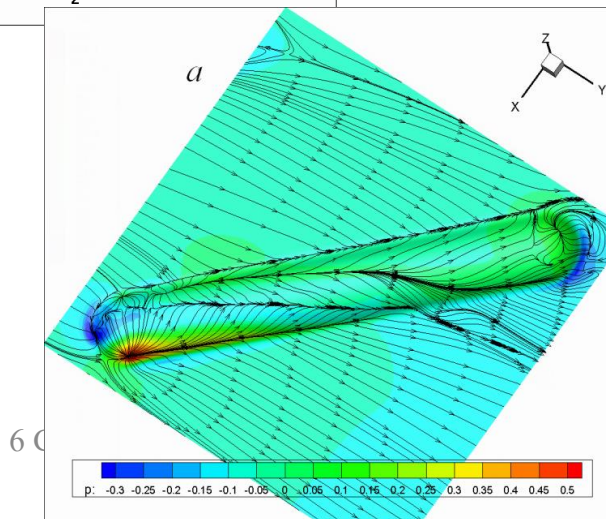


$$\varphi=45 \Delta=0.3 L=7$$

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 НГ (красные линии) и МВТ (зеленые линии). Данные для плоскопараллельного канала нанесены синими линиями. $Re=10^4$



Сравнение полей давления с нанесенными картинами растекания жидкости по поверхности стенки модуля с овально-траншейной лункой, полученных с помощью НГ (a) и МВТ (b)



Открытие

Открыто явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклоненной траншее со сферическими концами в узком канале с однорядными траншейными вихрегенераторами, которое сопровождается многократным увеличением относительного отрицательного трения и локальной теплоотдачи в сравнении с величиной трения и теплоотдачей на плоской стенке

Открыто явление ускорения ламинарного и турбулентного потока в узком канале с однорядными наклоненными траншейными вихрегенераторами глубиной не меньше $\frac{1}{4}$ высоты канала. В ядре потока возникают пятна повышенной скорости в 1.5 раза в случае ламинарного и в 1.4 раза для турбулентного течения воздуха по сравнению с максимальной скоростью в плоскопараллельном канале.

S. Isaev, M. Gritckevich, A. Leontiev, I. Popov, Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall, *Acta Astronautica* 163 (2019) 202-207.

С. А. Исаев, М. С. Грицкевич, А. И. Леонтьев, И. А. Попов, А. Г. Судаков, Аномальная интенсификация турбулентного отрывного течения в наклоненных однорядных овально-траншейных лунках на стенке узкого канала, *ТВТ* 57(5) (2019) 797–800.

С.А. Исаев, М.С. Грицкевич, А.И. Леонтьев, О.О. Мильман, Д.В. Никущенко, Ускорение турбулентного потока в узком облуненном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклоненных овально-траншейных лунок на стенке, *Теплофизика и аэромеханика* 26 (5) (2019) 697-702.

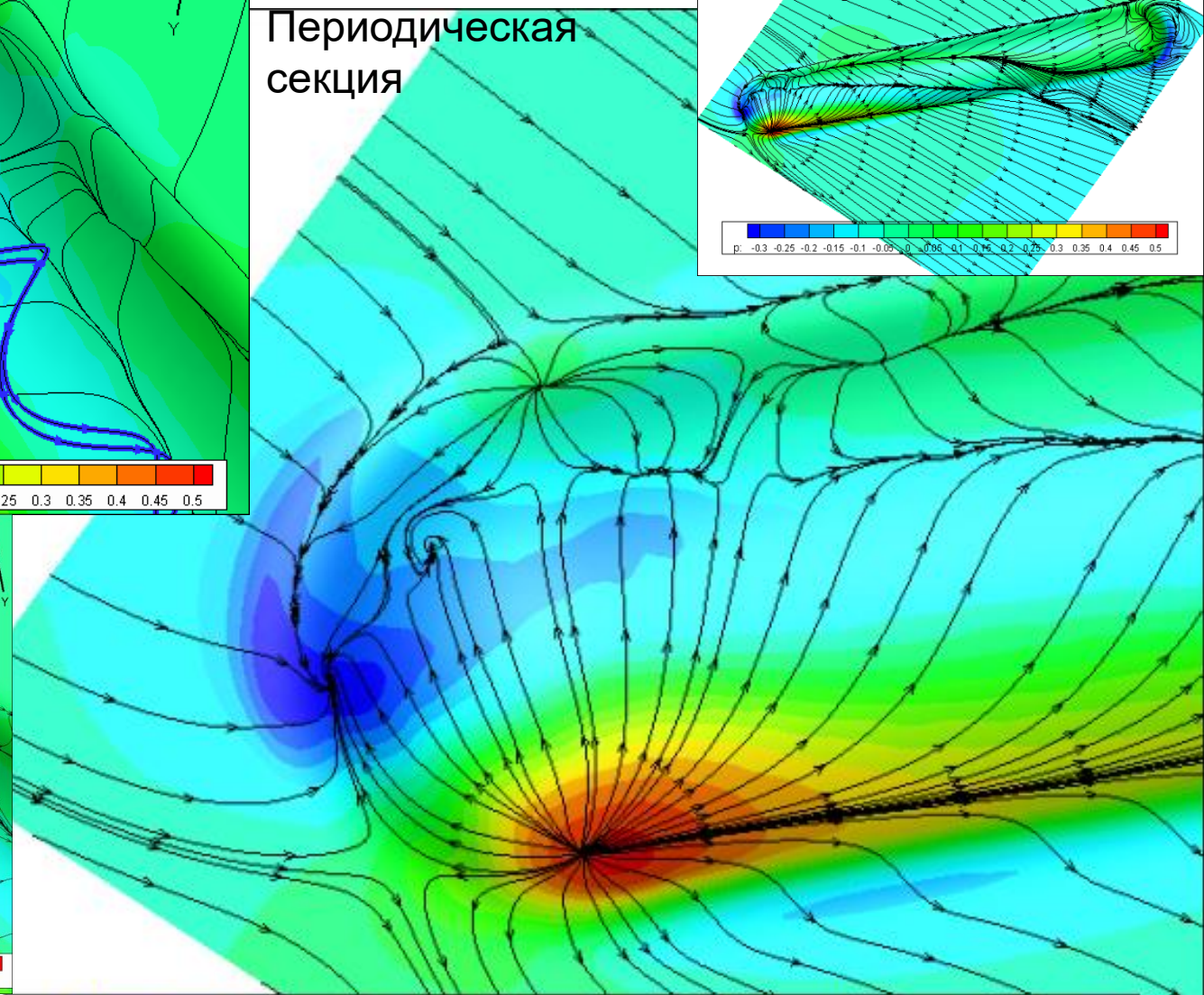
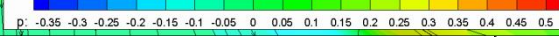
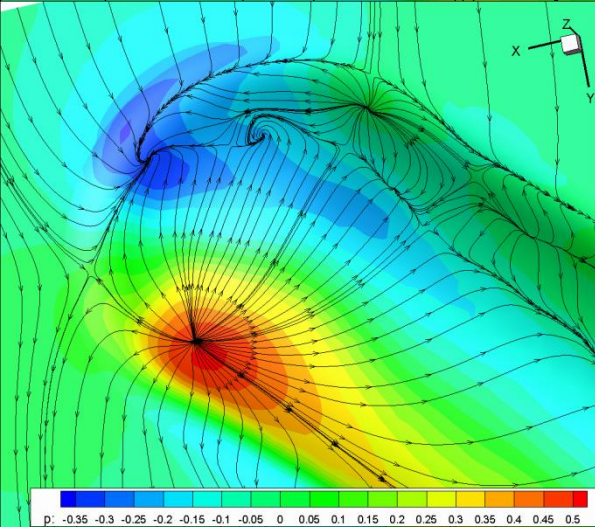
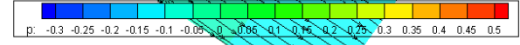
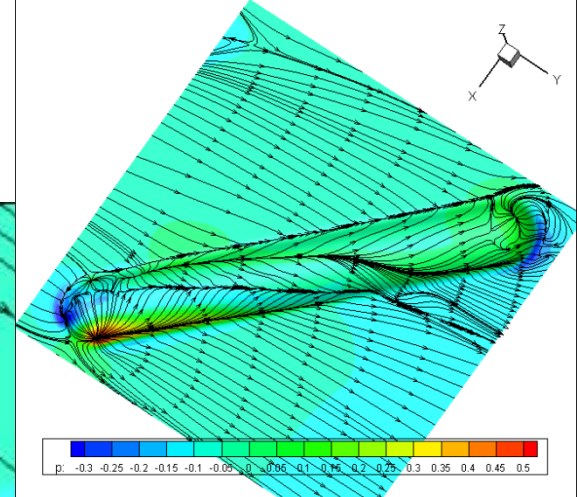
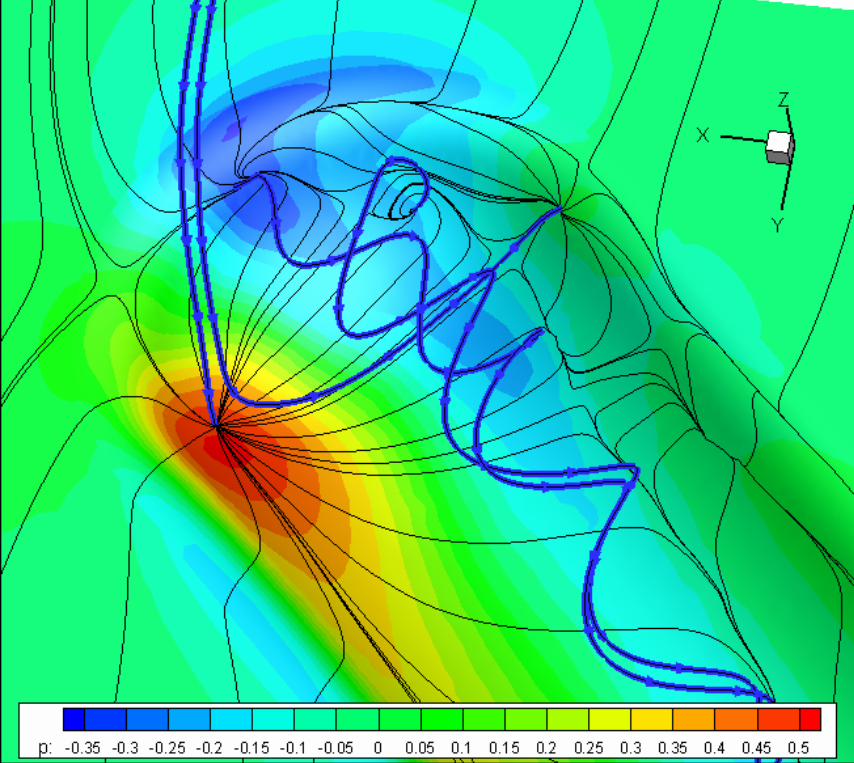
S.A. Isaev, M.S. Gritckevich, A.I. Leontiev, O.O. Milman, D.V. Nikushchenko, Vortex enhancement of heat transfer and flow in the narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples, *Int.J.Heat and Mass Transfer* 145 (2019) 118737

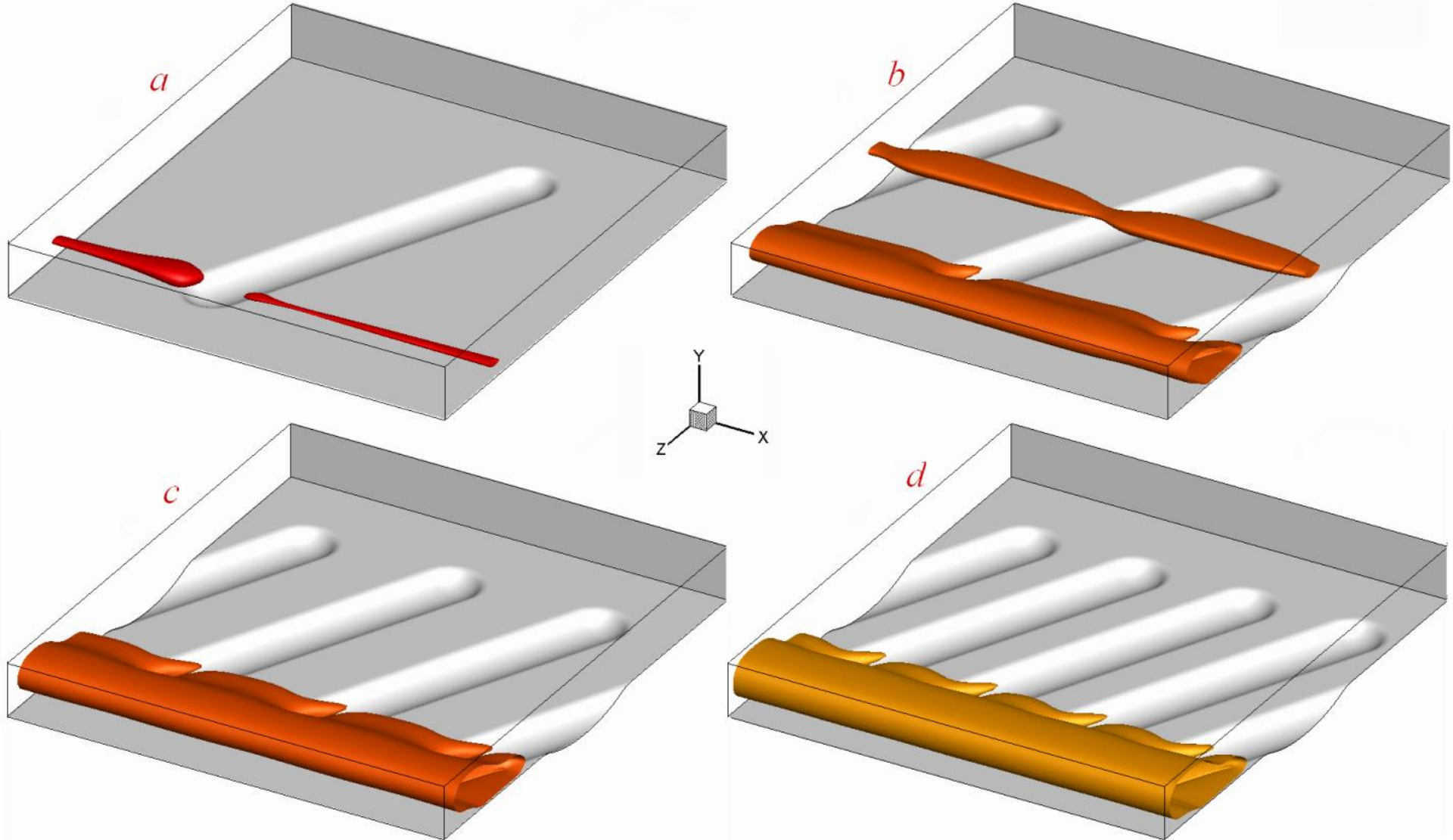
Угол наклона 45 гр.

$\delta=0.3$

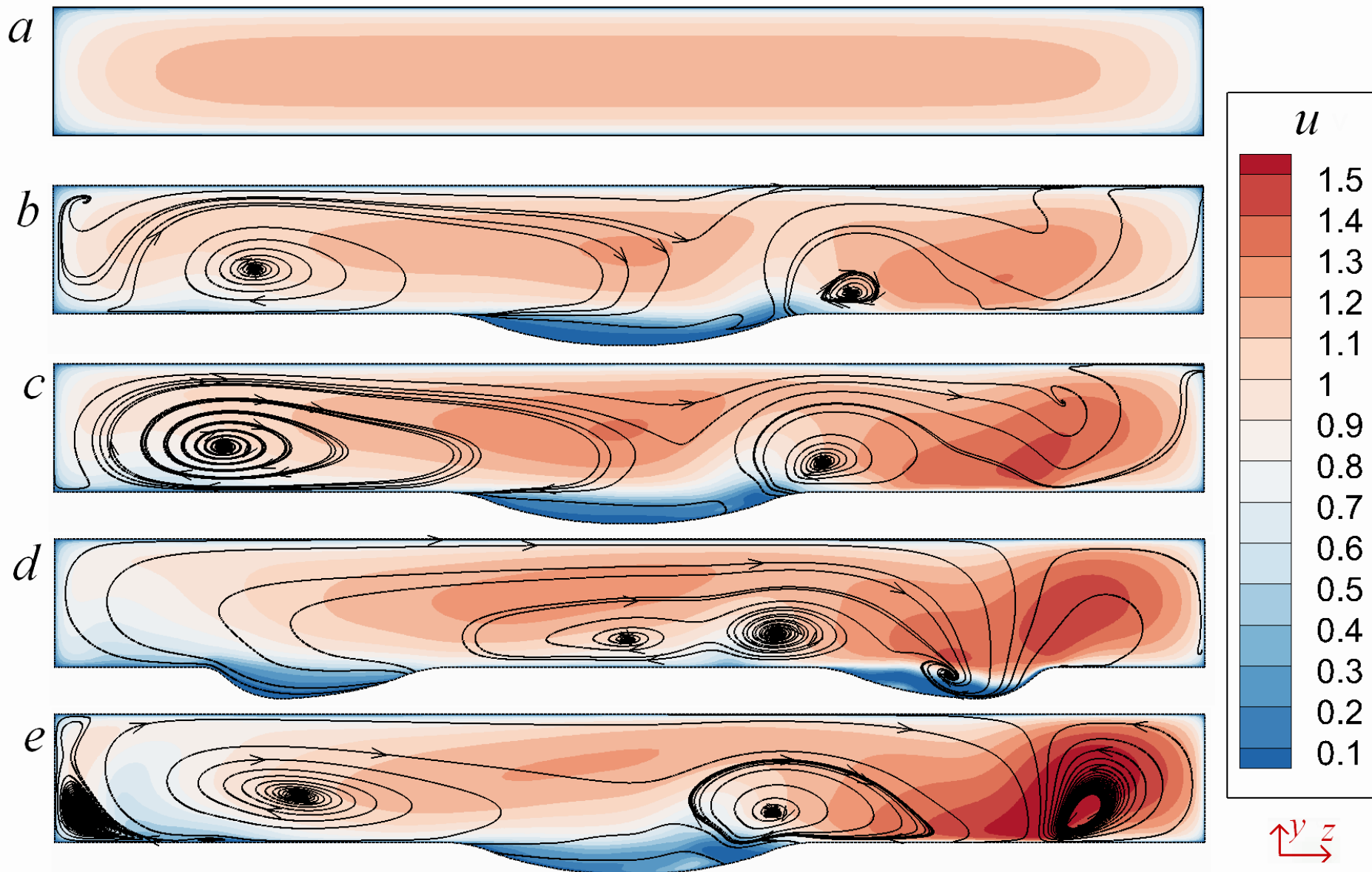
$Re=10000$

Периодическая
секция

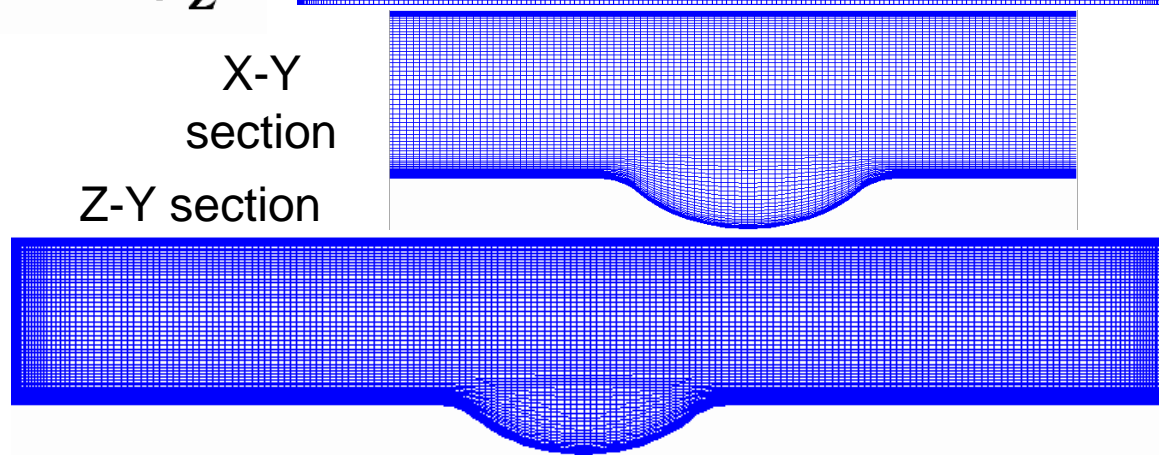
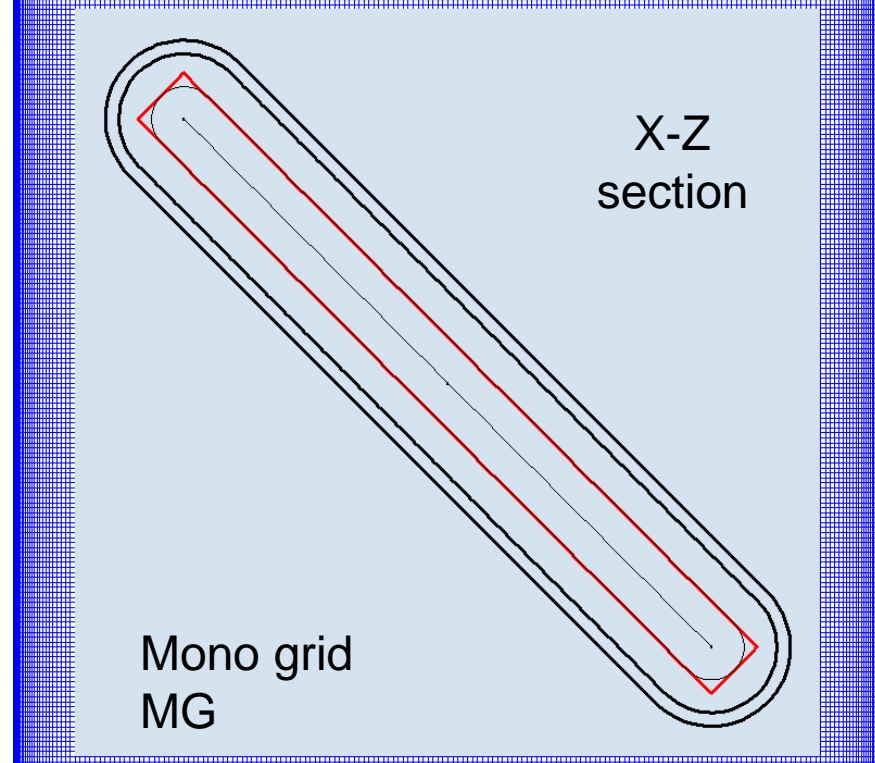
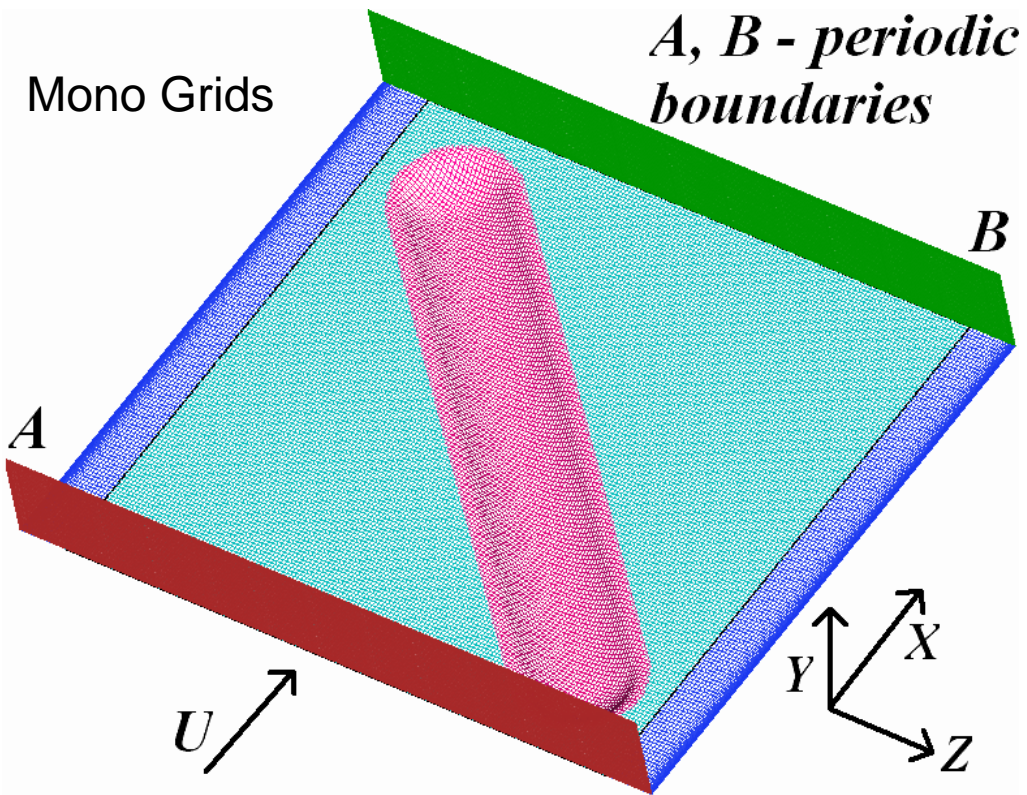




Сравнение изополей продольной составляющей скорости u , равной 1.3, в периодической секции облученного канала при $H = 8$ (*a*); 4 (*b*); 2.667 (*c*); 2 (*d*).

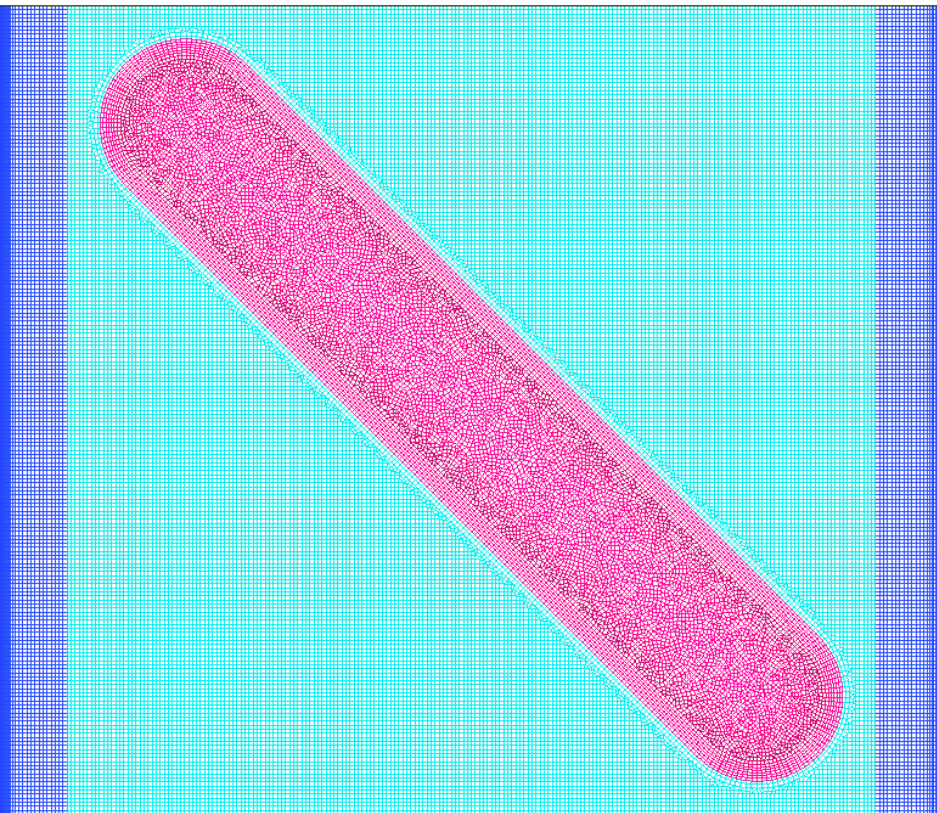


Сравнение изополей продольной составляющей скорости u в срединном поперечном сечении периодической секции гладкого (a) и облученного канала при $N = 8$ (b); 4 (c); 2.667 (d); 2 (e) с нанесенной структурой вторичного течения.

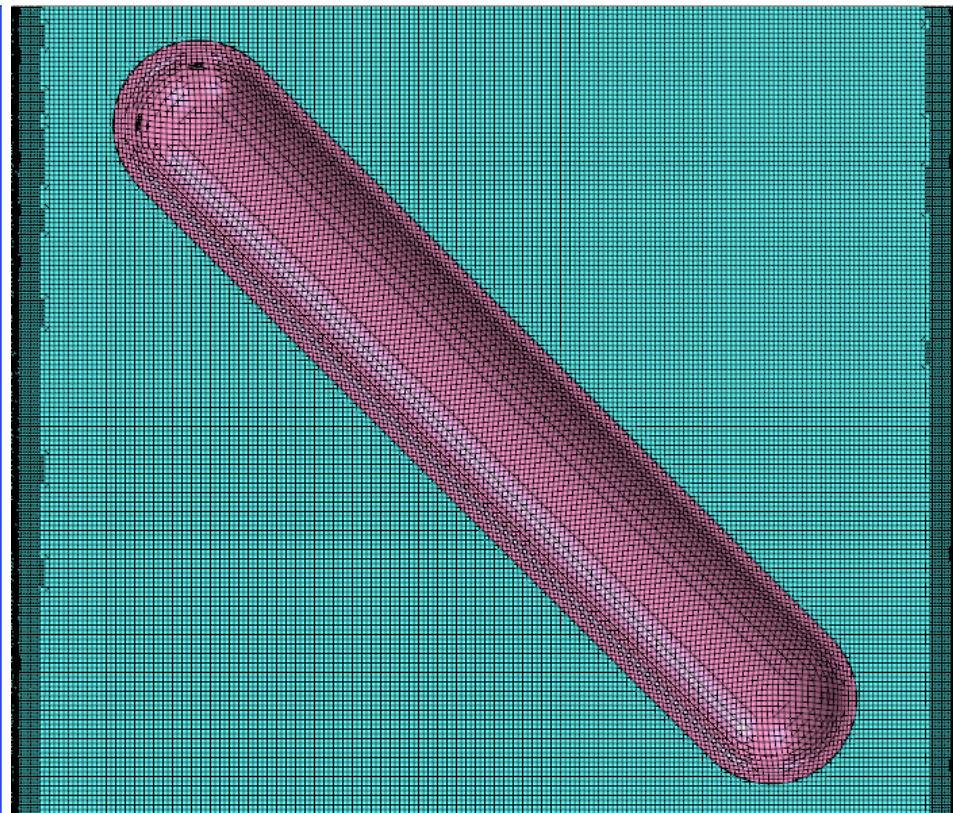


Сетки	NNN	Δxzm
MG - Mono	3.16	0.04
MNG - MonoNew	3.85	0.04

Hybrid triangular grid - HTG



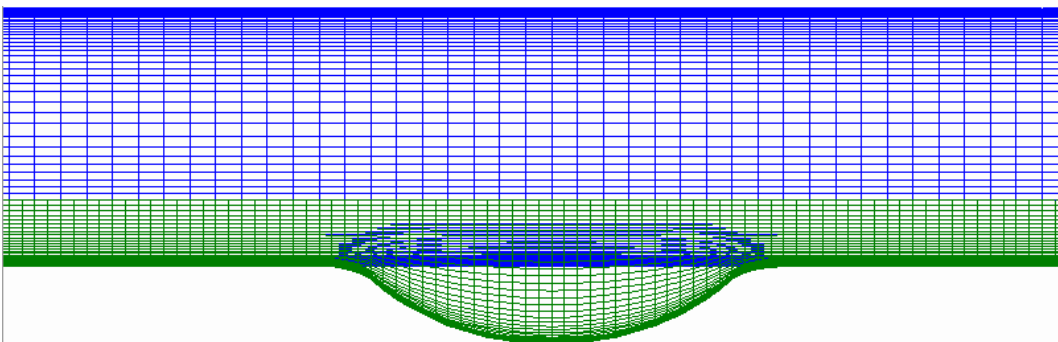
Hybrid hexagon grid - HHG



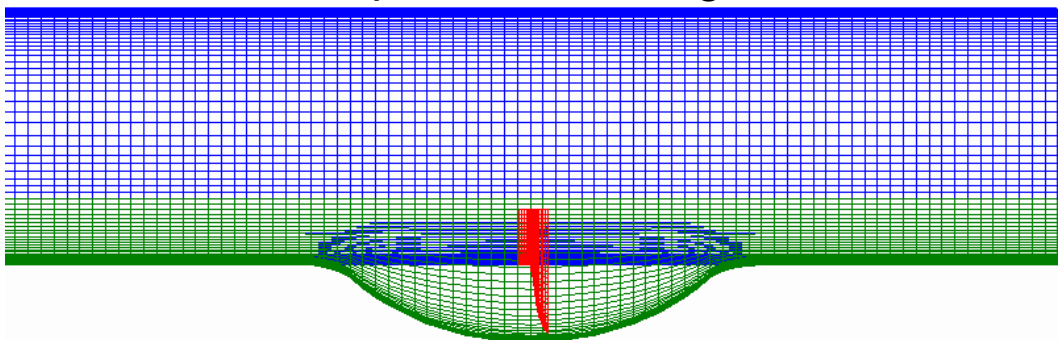
Сетки	NNN	Δx_{zm}
MG - Mono	3.16	0.04
MNG - MonoNew	3.85	0.04
HTG - Hybrid триангуляр	5.28	0.03
HHG - Hybrid гексагонал	3.50	0.035

Многоблочные разномасштабные структурированные сетки с наложением

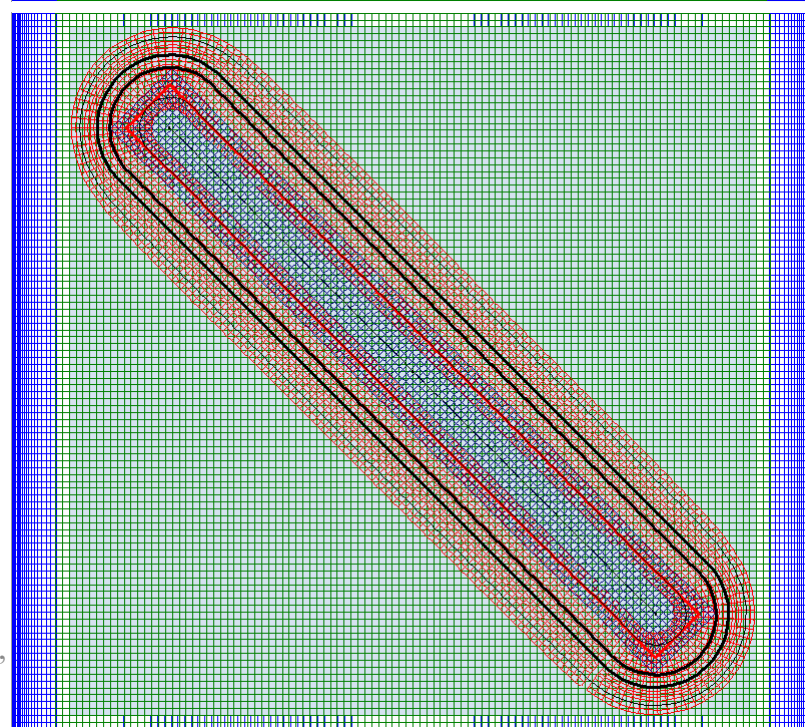
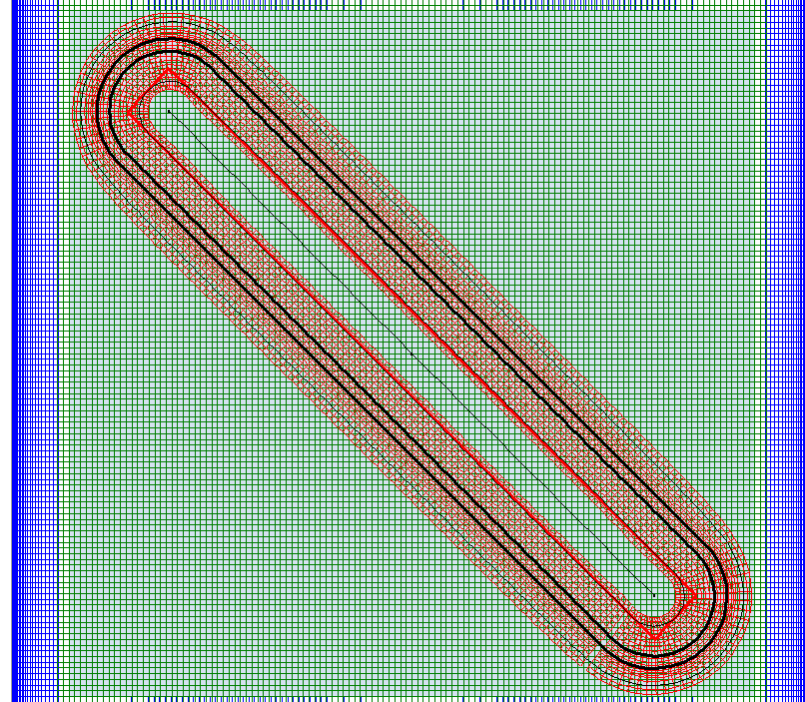
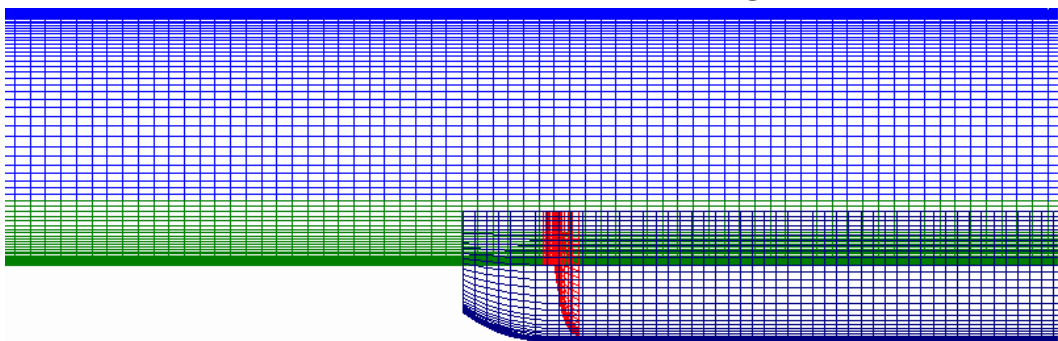
Двухсеточные 2grids



Трехсеточные 3grids



Четырехсеточные 4grids

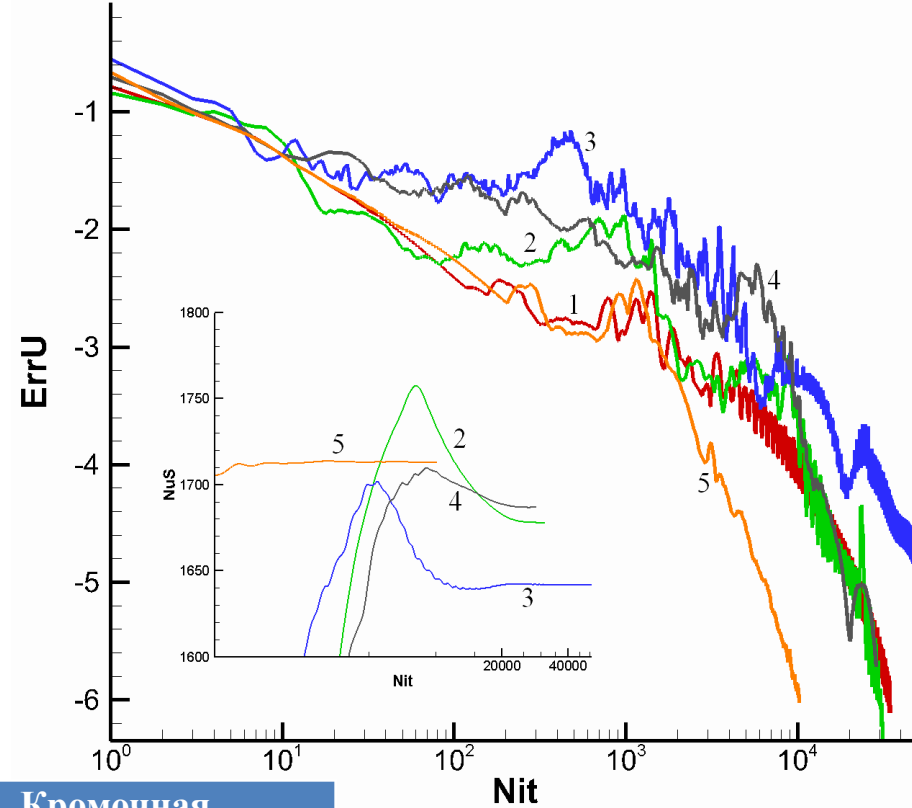


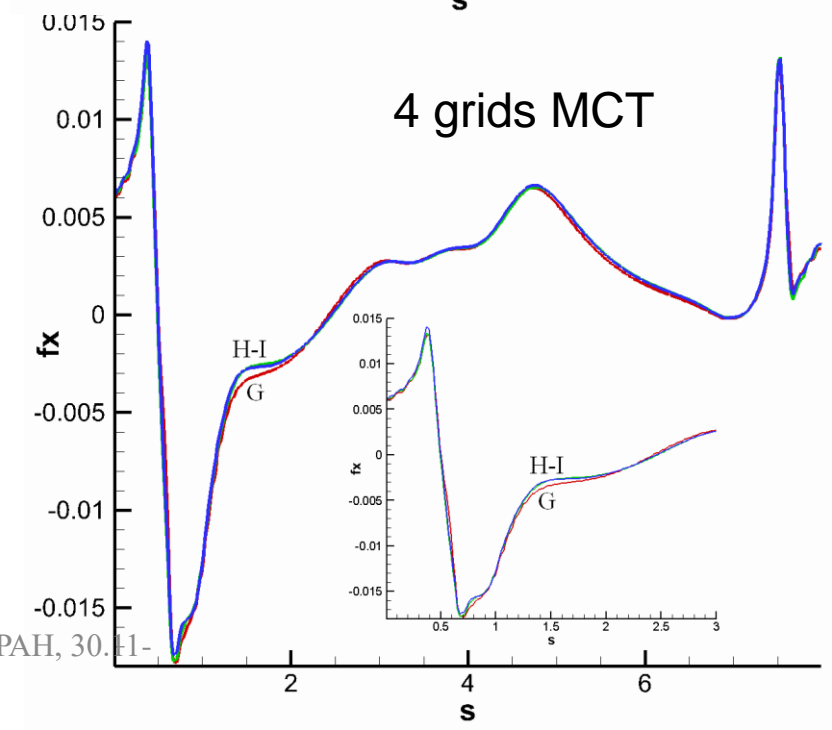
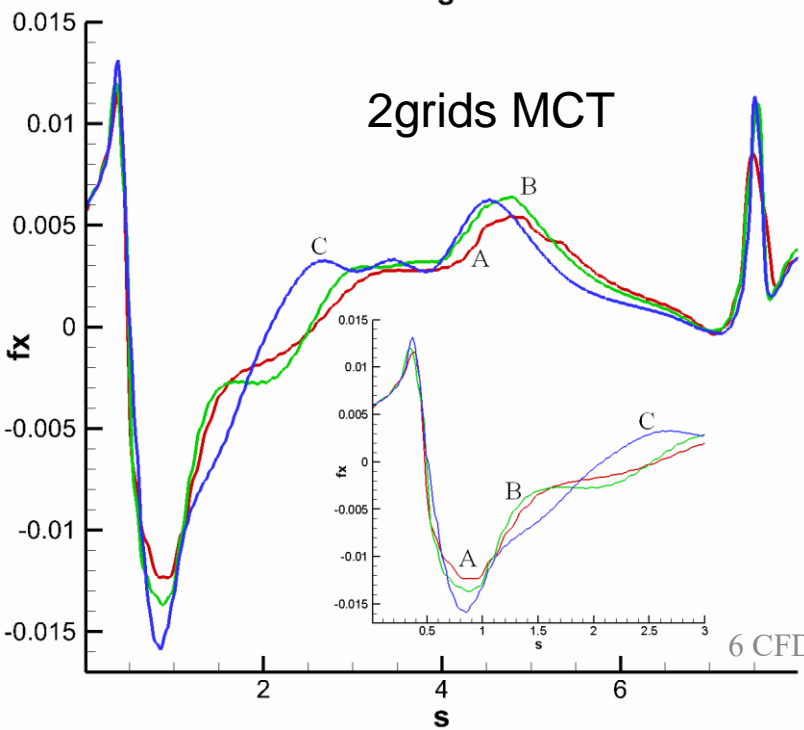
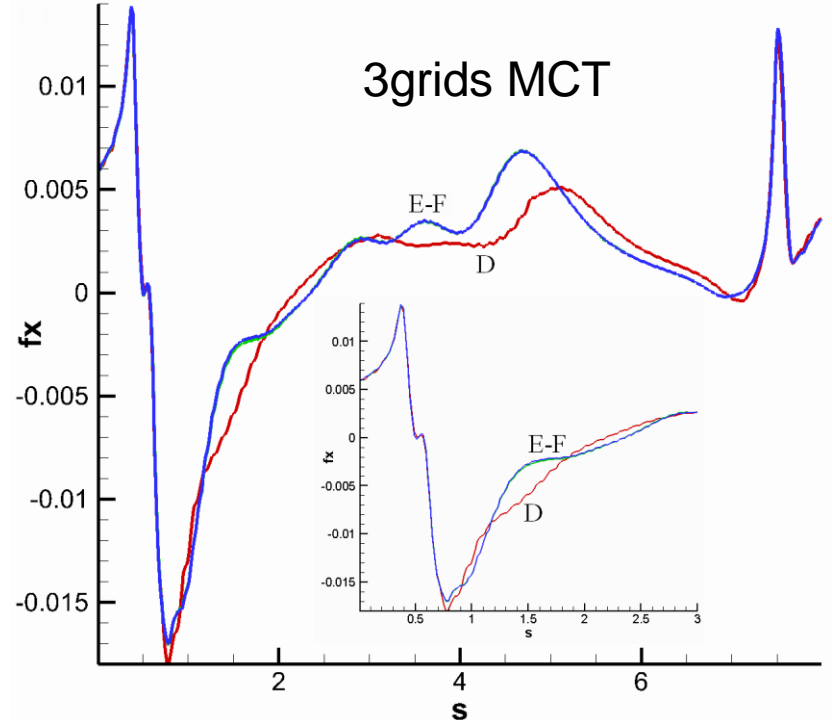
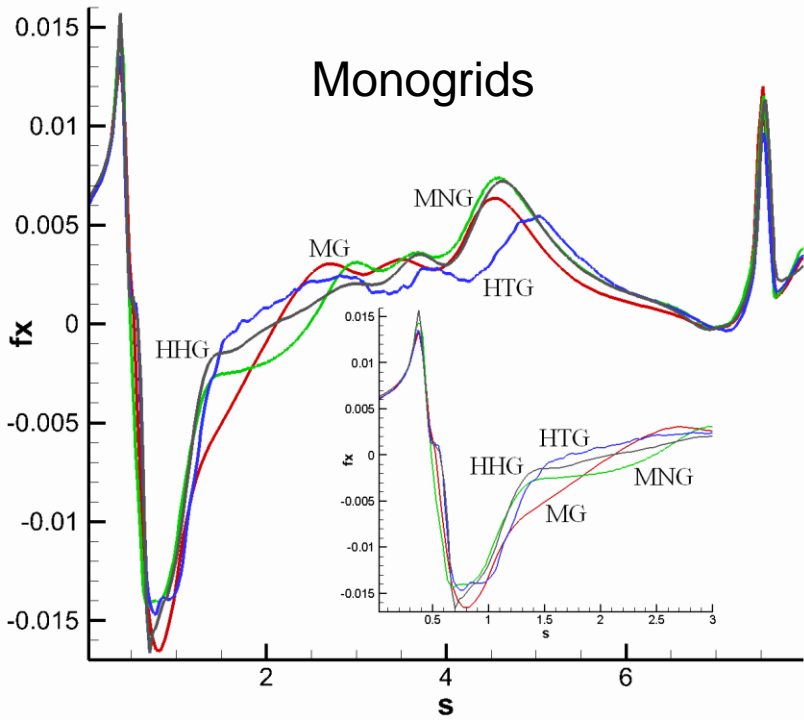
Многоблочные сетки:

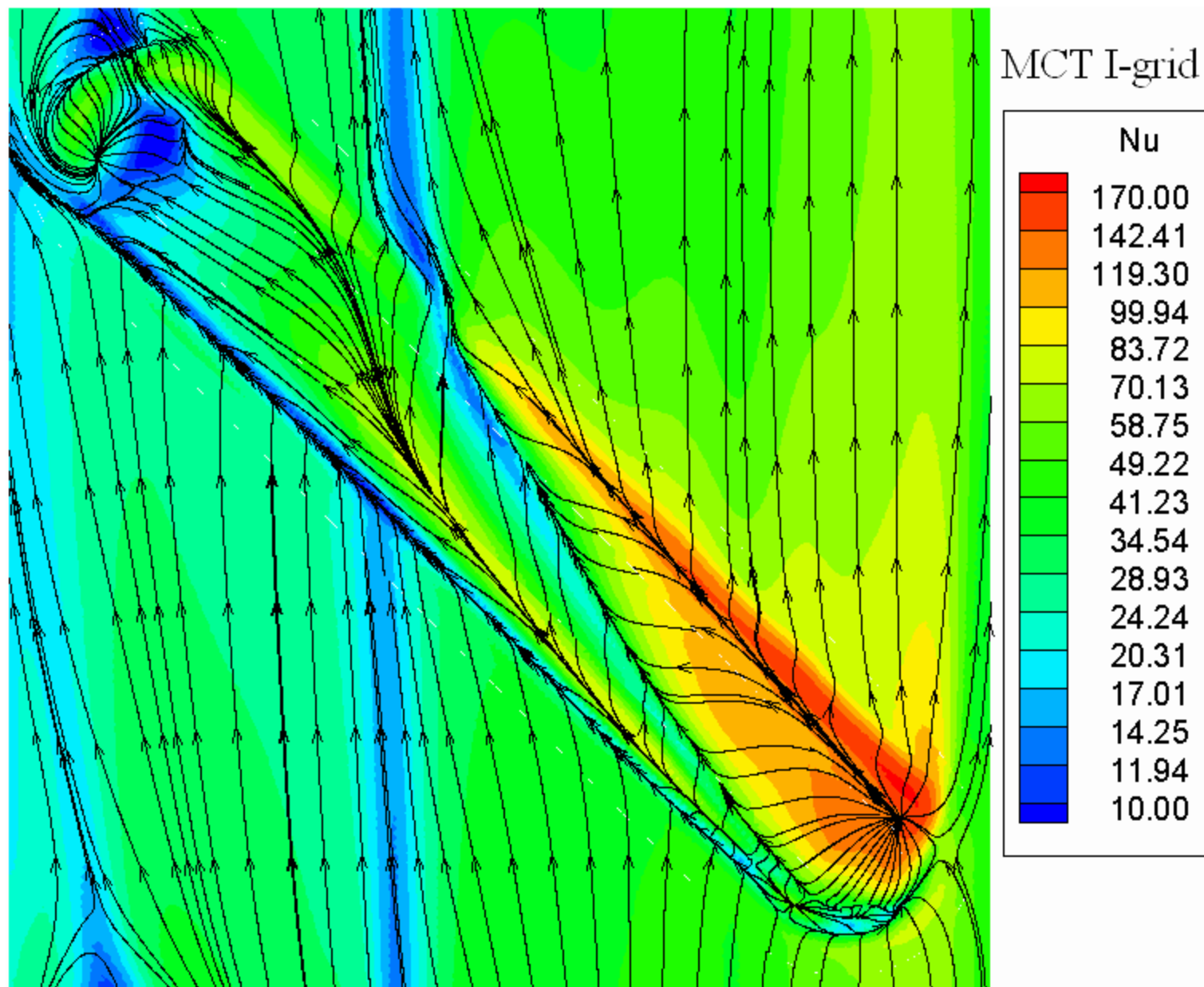
Сетки 2grids Index, NNN	Канальная $m \times n \times l, \Delta x z m$	Над лункой $m \times n \times l, \Delta x z m$
A, 0.46	0.31, 0.2	0.17, 0.1
B, 0.68	0.41, 0.15	0.3, 0.075
C, 1.34	0.75, 0.1	0.65, 0.05

Сетки 3grids Index, NNN	Канальная $m \times n \times l, \Delta x z m$	Над лункой $m \times n \times l, \Delta x z m$	Кромочная $m \times n \times l, \Delta s r m$
D, 0.87	0.41, 0.15	0.3, 0.075	0.24, 0.05/0.025
E, 2.28	1.49, 0.065	0.65, 0.05	0.24, 0.05/0.025
F, 3.12	2.33, 0.05	0.65, 0.05	0.24, 0.05/0.025

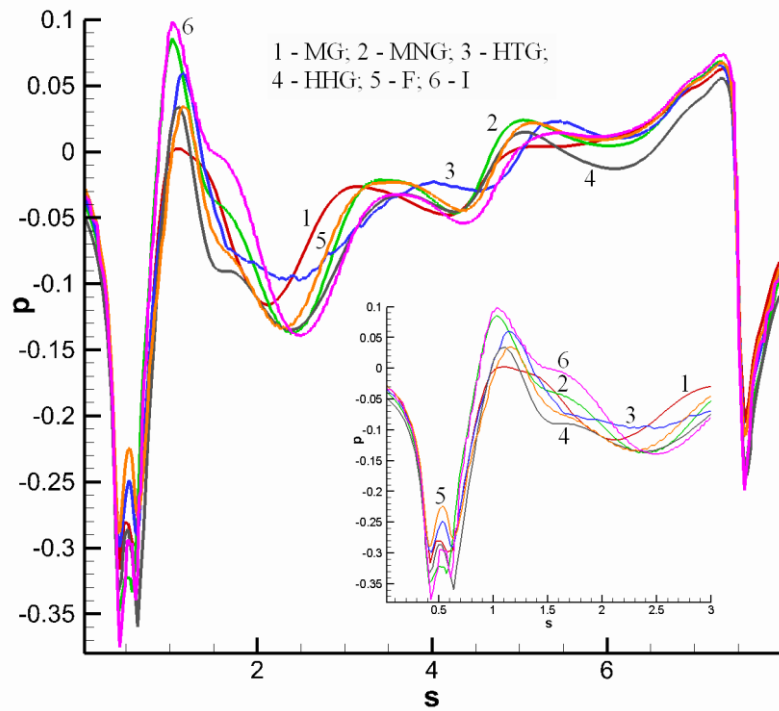
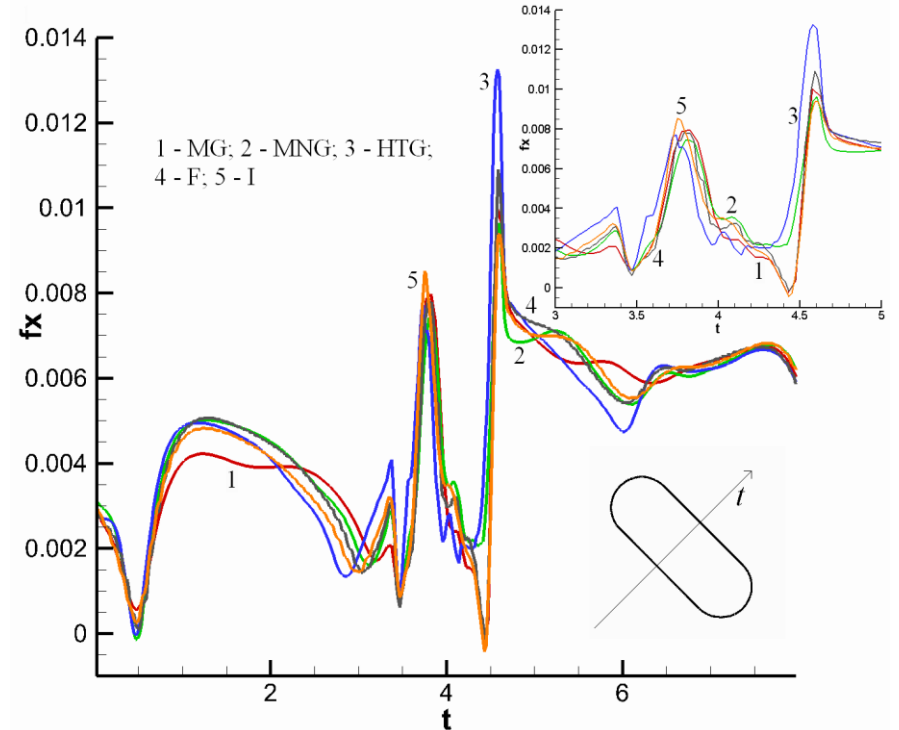
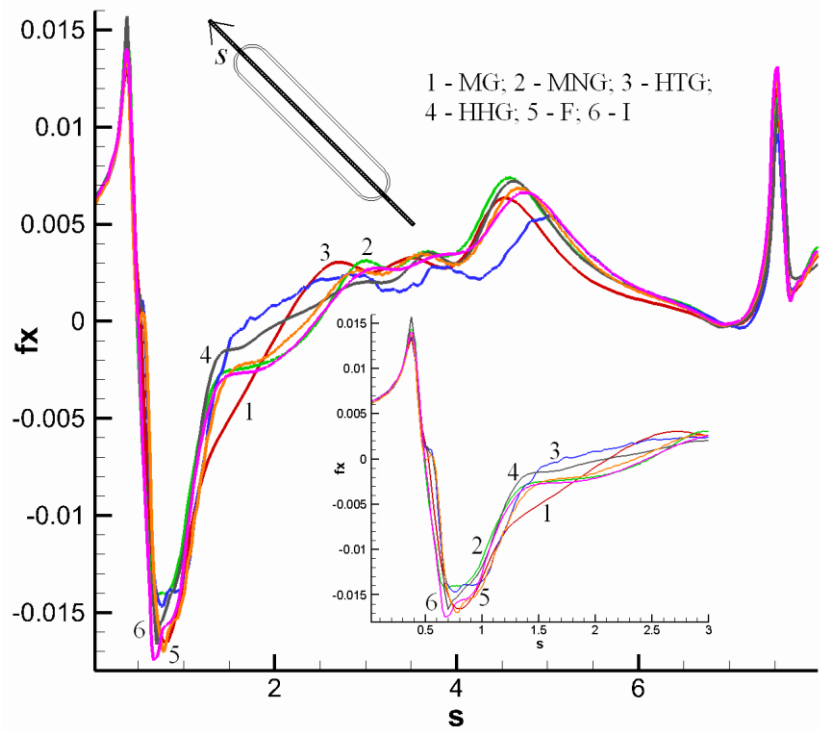
Сетки 4grids Index, NNN	Канальная $m \times n \times l, \Delta x z m$	Над лункой $m \times n \times l, \Delta x z m$	Окружающая лунку $m \times n \times l, \Delta s r m$	Заплата $m \times n \times l$
G, 1.08	0.72, 0.1	0.28, 0.075	0.11, 0.075/0.05	0.00051
H, 1.60	1.19, 0.075	0.28, 0.075	0.16, 0.06/0.05	0.00063
I, 2.30	1.72, 0.05	0.43, 0.05	0.19, 0.05/0.05	0.00076



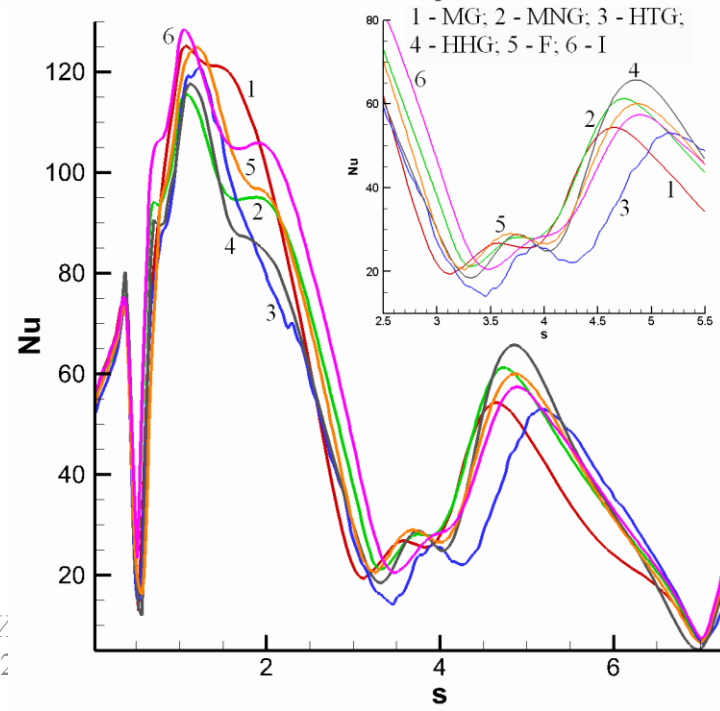


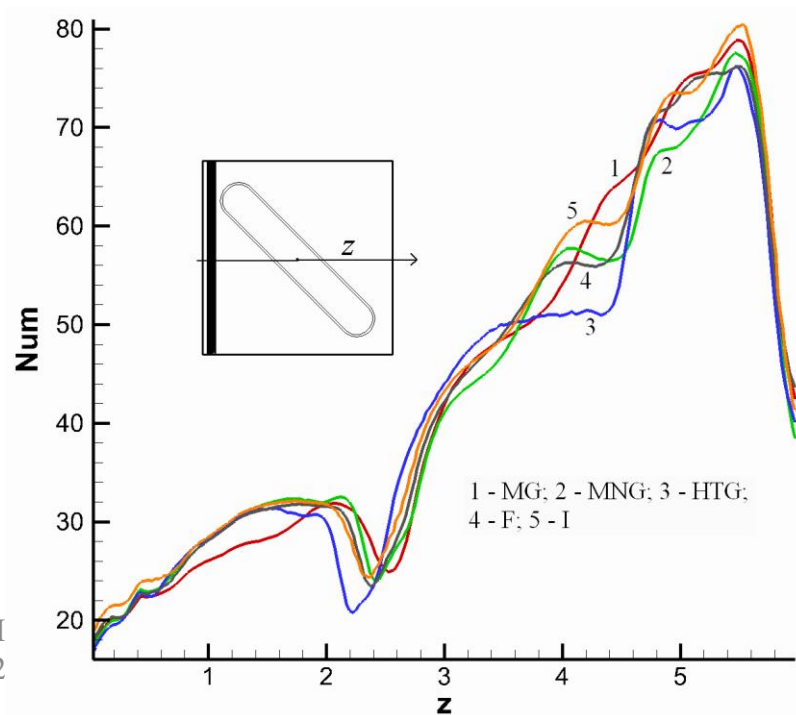
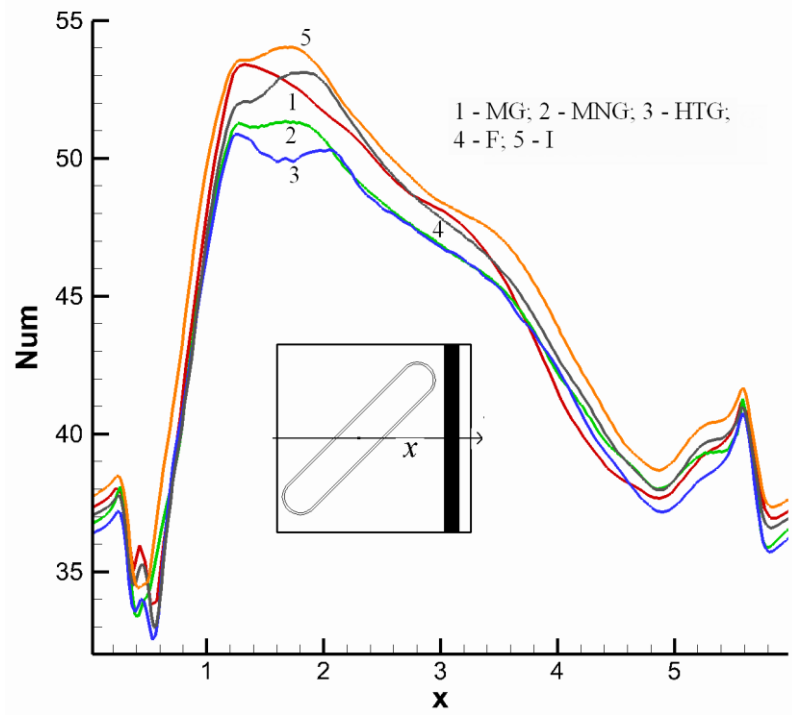
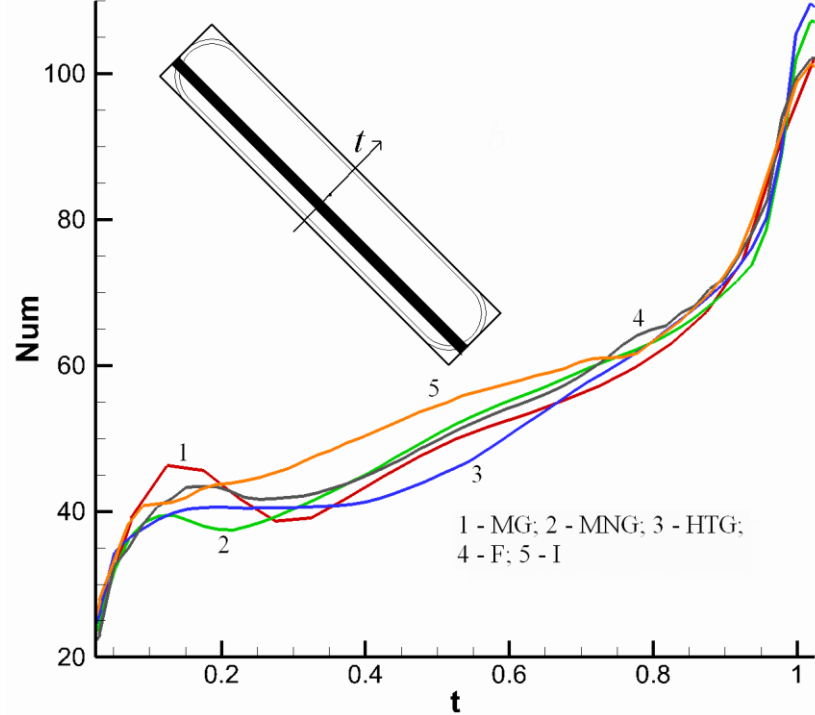
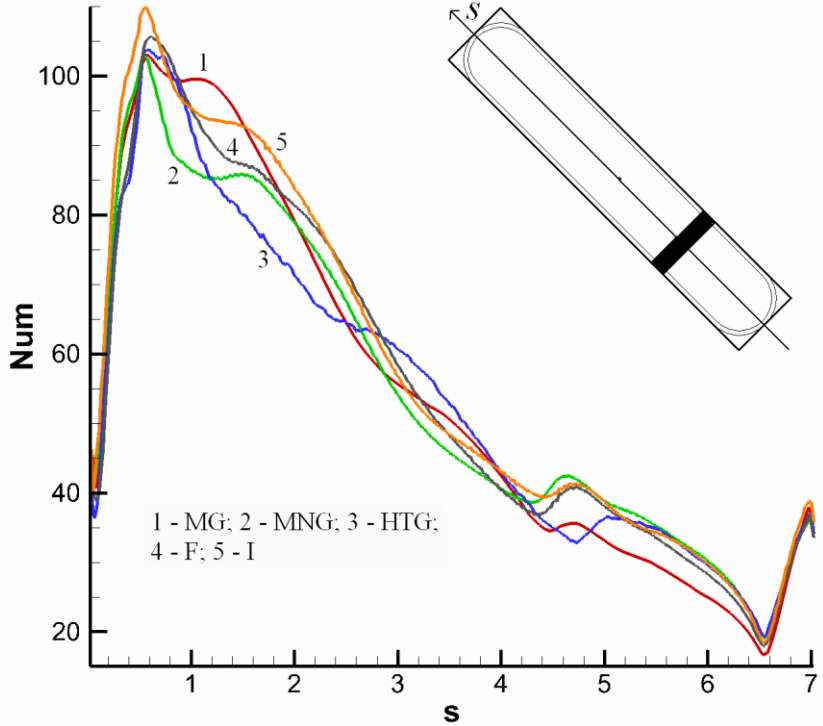


6 CFD Уикенд в ИПМ РАН, 30.11-
1.12.2019



ЭНД В У
1.12.2





Экстремальные и интегральные характеристики течения и теплообмена на различных сетках

No Umx, Um, Vmx, Vm, Wmx, Wm, Kmx, Mum, Etam, Numm, Nummd

A	1.472	-0.568	0.576	-0.462	0.354	-1.25	0.0321	0.00507	0.022566	43.73	53.40
B	1.451	-0.617	0.684	-0.497	0.387	-1.251	0.0415	0.00506	0.022447	44.27	55.10
C	1.453	-0.723	0.795	-0.563	0.392	-1.234	0.0570	0.00515	0.021748	43.68	54.15
D	1.468	-0.760	0.729	-0.527	0.457	-1.241	0.0616	0.00517	0.023519	43.45	55.85
E	1.454	-0.785	0.739	-0.544	0.459	-1.232	0.0551	0.00515	0.022882	44.01	55.41
F	1.456	-0.784	0.729	-0.543	0.461	-1.230	0.0542	0.00517	0.022870	44.08	55.46
G	1.449	-0.702	0.633	-0.532	0.407	-1.238	0.0442	0.00503	0.022902	44.59	56.76
H	1.458	-0.687	0.633	-0.532	0.439	-1.247	0.0453	0.00504	0.022941	44.95	57.29
I	1.460	-0.681	0.636	-0.530	0.441	-1.248	0.0454	0.00504	0.022989	45.07	57.35
MG	1.455	-0.726	0.699	-0.574	0.384	-1.227	0.0522	0.00513	0.021811	44.00	54.60
MNG	1.449	-0.618	0.638	-0.549	0.474	-1.222	0.0509	0.00497	0.022680	43.45	54.59
HTG	1.445	-0.648	0.670	-0.499	0.388	-1.164	0.0421	0.00500	0.022460	43.05	53.99

Экстремальные и интегральные характеристики течения и теплообмена на различных сетках

Grids	Nu_{mm}	$10^2 \zeta$	u_{max}	u_{min}	w_{min}	w_{max}	$10^2 k_{max}$	$10^3 \mu_{tmax}$
MG	44.00	2.18	1.455	-0.726	-1.227	0.384	5.22	5.13
MNG	43.45	2.27	1.449	-0.618	-1.222	0.474	5.09	4.97
HG	43.05	2.25	1.445	-0.648	-1.164	0.388	4.21	5.00
HGM2	43.34	2.26	1.46	-0.661	-1.200	0.42	4.86	5.02
MCT3G	44.08	2.29	1.456	-0.784	-1.230	0.461	5.42	5.17
MCT4G	45.07	2.30	1.460	-0.681	-1.248	0.441	4.54	5.04
Plate	25.59	1.59	1.19	0	-0.0002	0.0002	1.00	4.30

Выводы

Достигнута сходимость на локально измельчающихся топологически одинаковых сетках

Результаты расчетов на моноблочных сетках хорошо согласуются с прогнозами на разномасштабных многоблочных с пересечением структурированных сетках: MNG-HHG-F-I.

Обнаружено хорошее согласие прогнозов на мелких (порядка 3.5млн и выше) сетках при расчете на различных пакетах (VP2/3, Star CCM+).

Неструктурированные сетки с треугольными ячейками приводят к снижению точности прогнозов.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке РФФ и РФФИ