



ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕЧЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ВИХРЕВЫХ ЯЧЕЕК

С.А. Исаев

Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет



Посвящение

ГИНЗБУРГ ИЦКЕ-ГЕРШЕН ФАЙВИЧЕВИЧ (ИСААК ПАВЛОВИЧ) – основатель кафедры аэродинамики и динамики полета в Ленинградском механическом (военно-механическом) институте (1910-1979).





M.-y. Tsay, C.-h. Lai, A scientometric study of heat transfer journal literature from 1900 to 2017, International Communications in Heat and Mass Transfer, 98 (2018) 258-264.

Дрейцер Генрих Александрович



M.-y. Tsay, C.-h. Lai

International Communications in Heat and Mass Transfer 98 (2018) 258-264

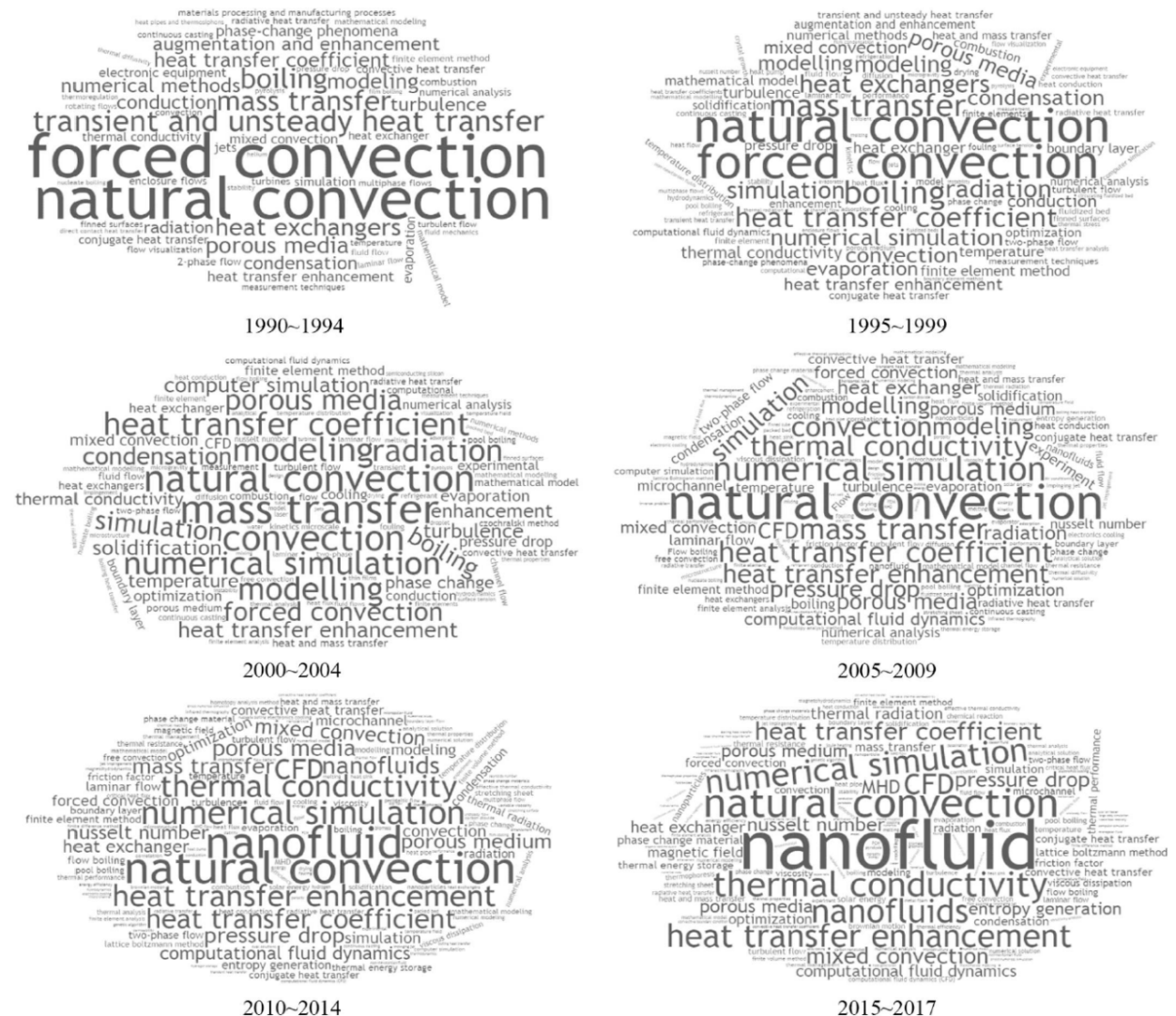


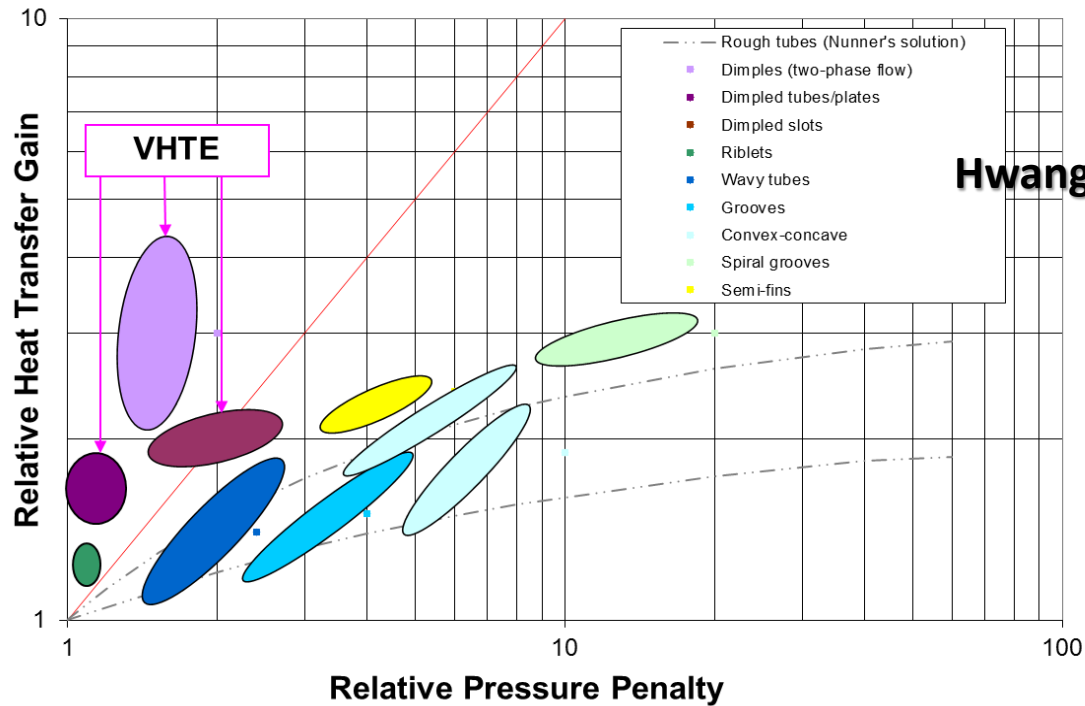
Fig. 2. The evolution of “word cloud” of heat transfer literature, 1900–2017.

Фундаментальные проблемы: ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ, ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ, УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИМИ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ



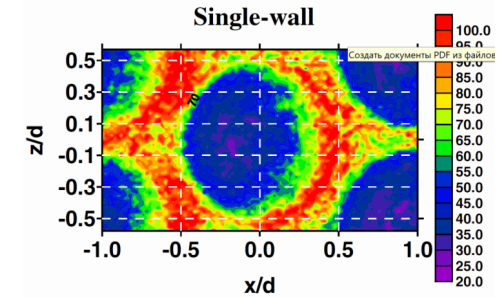
Их решение – структурированные поверхности с вихрегенераторами. От металлообработки к 3D-принтеру.

Benchmarking – Сравнение традиционных методов пассивной интенсификации теплообмена



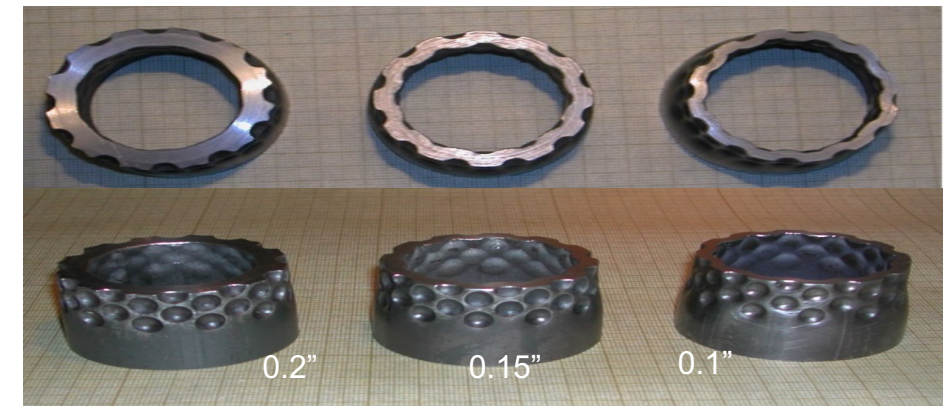
Пакет сферических лунок

$\sigma=60-70\%$



(a) $Re_{Dh} = 10,000$

Луночные технологии



Лунки – альтернатива выступам: Опережающий рост теплоотдачи по сравнению с увеличением гидравлических потерь

Классификация лунок по формам



Критерий отбора: поверхностные генераторы спиралевидных вихрей, технология нанесения.

Известны:

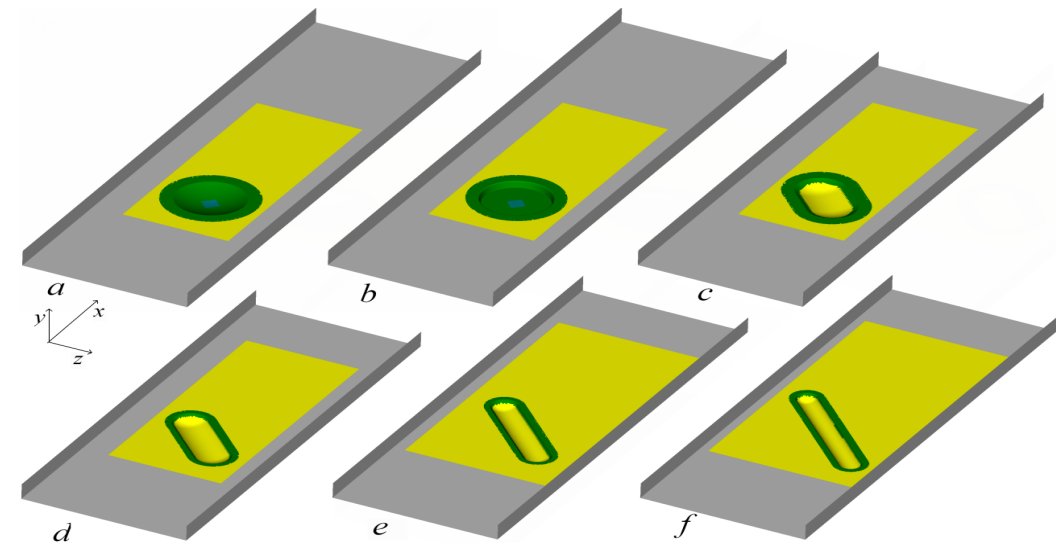
- Сферические
- Цилиндрические
- Конические каплевидные
- (диффузорные)
- Эллиптические
- Траншейные
- Овальные
- Удлиненные овально-траншейные
- Дуговые овально-траншейные

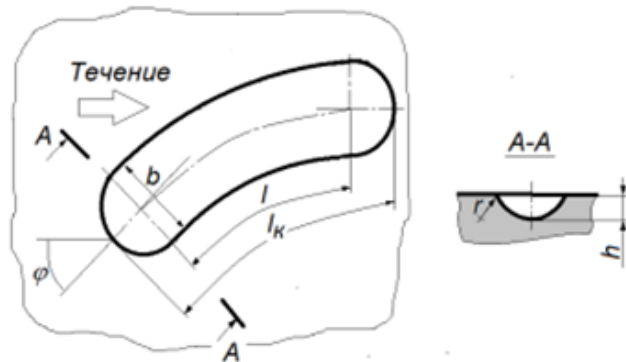
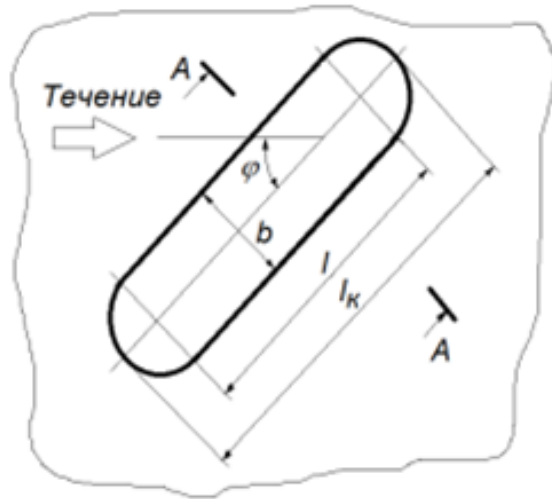
Предложены

- **НАКЛОНЕННЫЕ** (ориентированные под углом к потоку) **ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫЕ** лунки (ОТЛ) – цилиндрические канавки с полусферическими концами!



НОВЫЕ ТИПЫ УНИВЕРСАЛЬНОГО ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОГО
КОМПАКТНОГО ТЕПЛООБМЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ





Поверхностные вихрегенераторы

Геометрические характеристики:

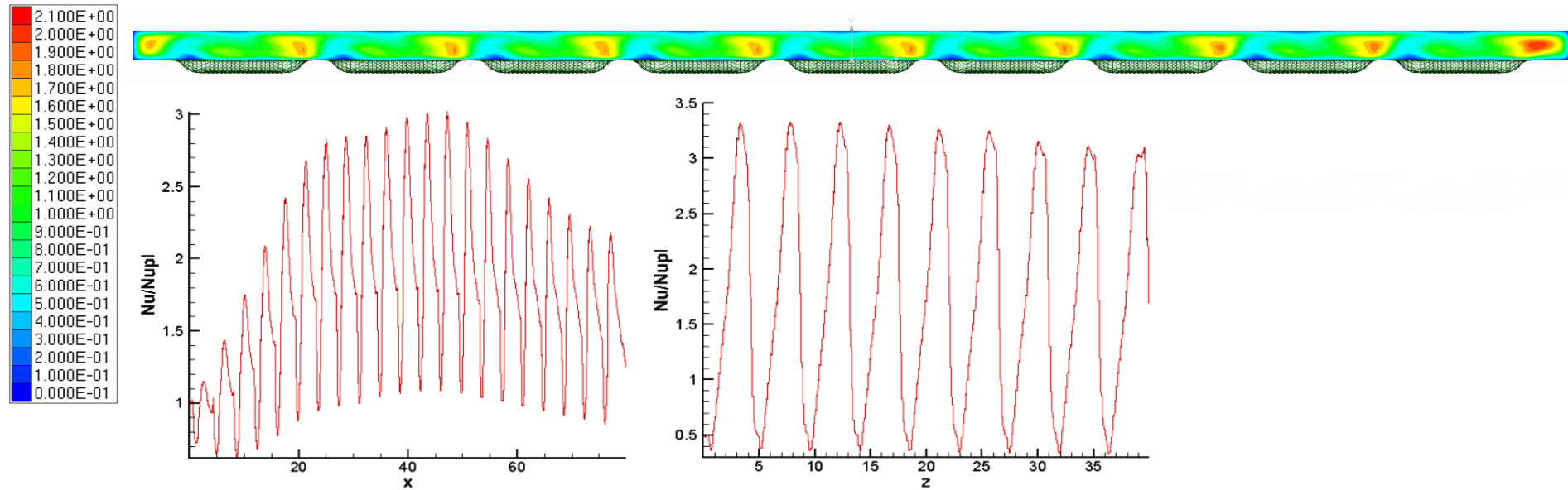
Глубина h – аналог шероховатости, как часть высоты канала, относительная глубина в отношении к ширине – объемный фактор, влияющий на интенсивность формирующихся вихревых структур, порядка 0.2-0.4.

относительное удлинение l по отношению к ширине – важнейший фактор, влияющий на интенсивность формирующихся вихревых структур.

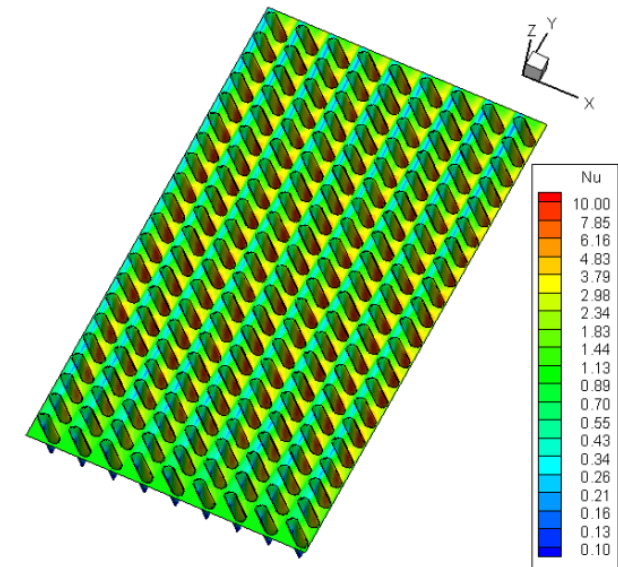
радиус скругления кромок r (по отношению к ширине) – фактор, влияющий на гидравлические потери.

угол наклона ϕ ОТЛ – важнейший фактор, определяющий эффект интенсификации отрывного течения и теплообмена.

Зазор в ГТУ (задача А.Халатова). $Re=1000$



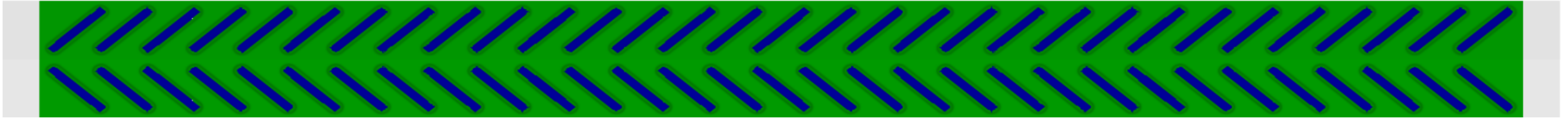
- $80 \times 1 \times 40$ – размер пятна + предвключенный и выравнивающий плоские участки;
- 21×9 канавок под углом 45 градусов, равномерно распределенных по участку;
- Глубина лунки 0.42 ; Длина цилиндрической части – 3.5 ; Ширина – 1.2 ; Радиус скругления кромок – 0.24 ;
- Общая длина – 4.7 ; Сигма – 0.42 ;
- 75% роста теплоотдачи;
- 60% увеличение гидравлических потерь.





Коридорные и шахматные ансамбли, однорядные рельефы, интерференция вихревых структур, интенсификация теплообмена по потоку по мере увеличения количества лунок.

Шаг между лунками в отношении к высоте канала – важнейший фактор интенсификации теплообмена, формирующий сигму – относительную площадь лунок.



Теплоноситель - Воздух, вода, масло
Воздушные конденсаторы ЗАО «ТУРБОКОН»

Турбулентные и ламинарные режимы течения. Числа Рейнольдса 10^4 и выше, 1000-1500 и ниже.

RANS&URANS. Пакетные технологии (с 1974)



МЕТОДОЛОГИЯ

Математические модели. МВТ(VP2/3)

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

2

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

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

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

SA	Спаларт-Аллмарес (1992)
RNG -k-ε	(1986)
Realizable-k-ε	(1988)
k-ω - MSST	Ментер (1993, 2003)
V2F	Дурбин (1995)

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

μ_{t0} – 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
среднемассовая скорость	ширина траншеи, каверны
	длина хорды

Диазоны изменения режимных параметров:

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

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

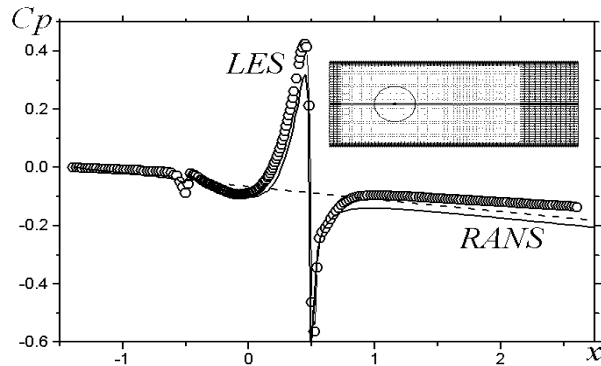


Характерные особенности пакета VP2/3 (скорость-давление 2D/3D)



- 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 симплекс 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.

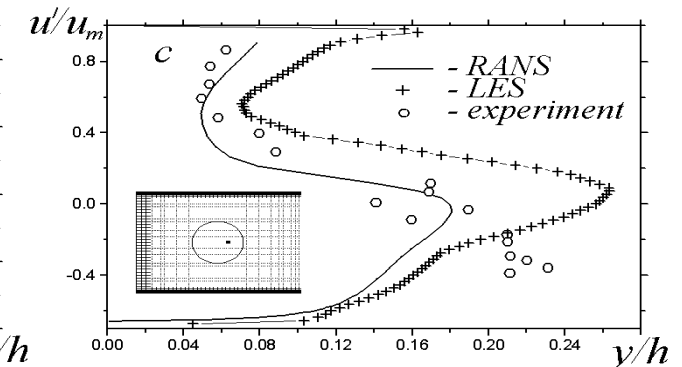
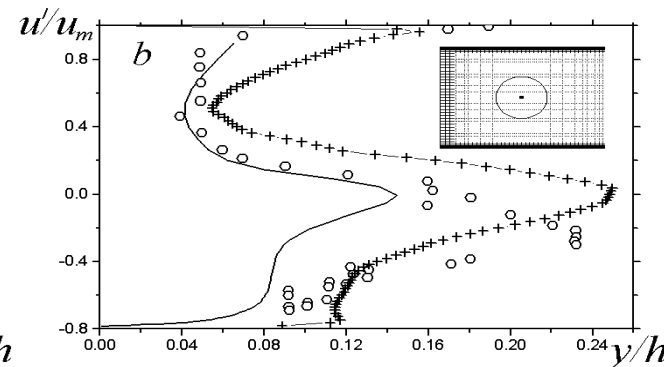
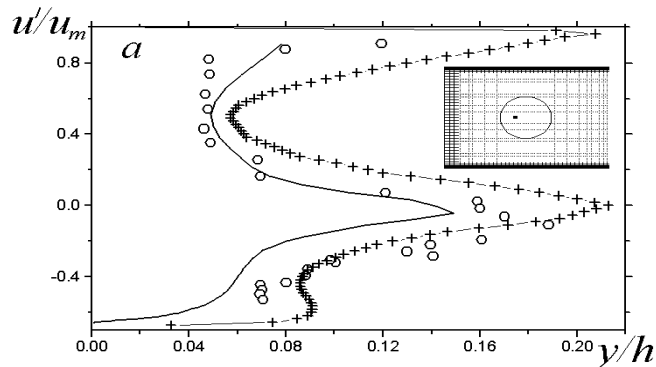
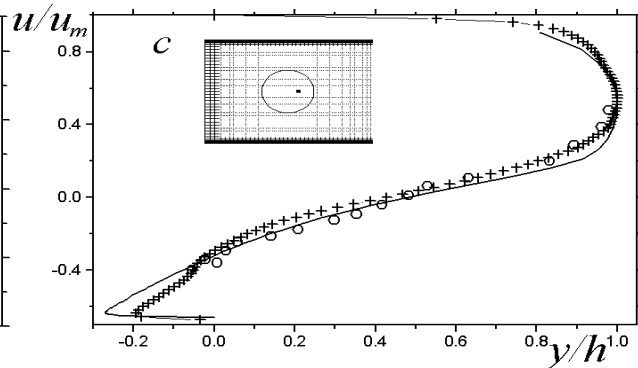
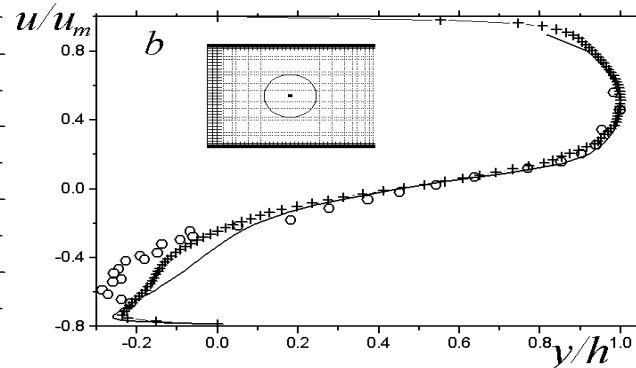
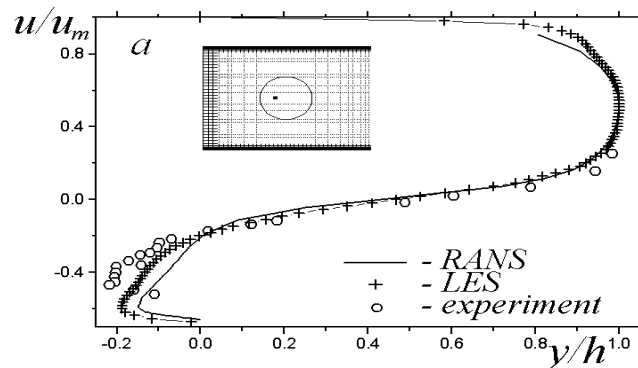
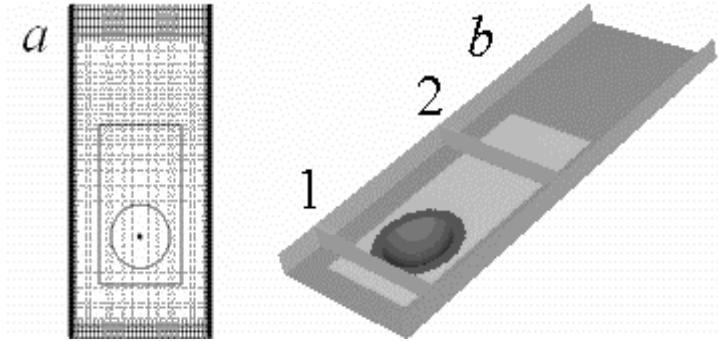
Сравнение результатов по LES (OPEN FOAM) и (U)RANS (VP2/3) для глубокой сферической лунки



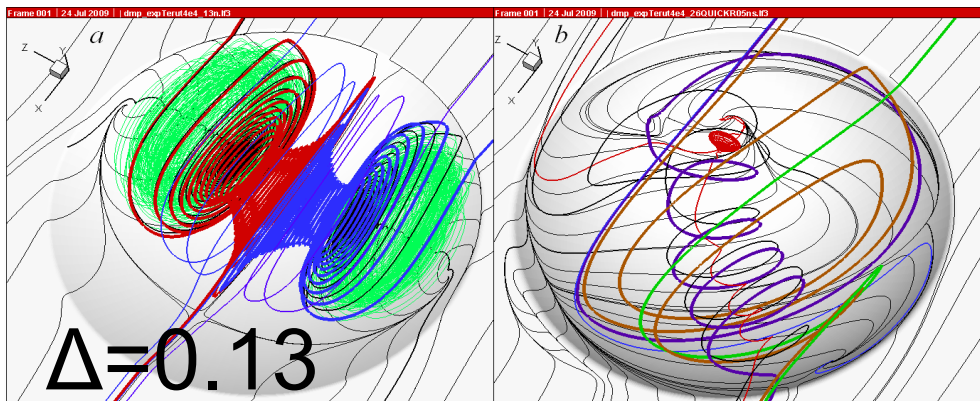
$\Delta=0.26$

$Re=40000$

Heat and hydraulic efficiency is evaluated on bounded area (a) and cross sections of a channel 1 and 2 are used for hydraulic losses evaluation (b).

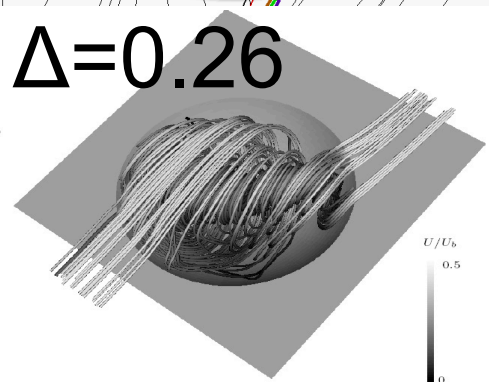
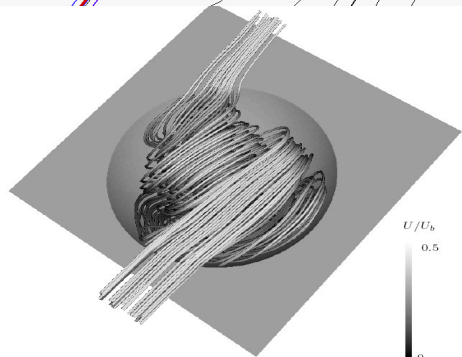


Finding: Observation of dominating asymmetric Vortex Structure | $Re=40000$



$\Delta=0.13$

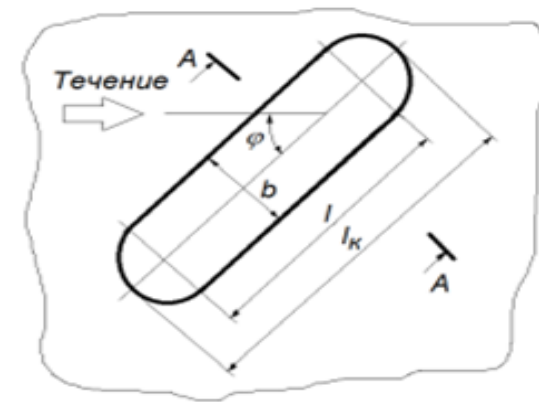
$\Delta=0.26$



URANS: steady asymmetric vortex inclined at ± 45 deg (Isaev, Kornev, Leontiev, Hassel (2010) Int. J. Heat and Mass Transfer)

ГЕНЕЗИС ОВАЛЬНО-ТРАНШЕЙНЫХ ЛУНОК

**LES: unsteady asymmetric vortex switching between ± 45 deg
 $Sh=0.005$**



Геометрические характеристики:

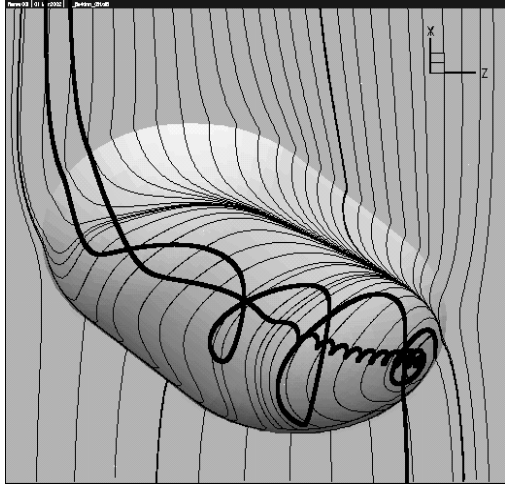
Глубина h – аналог шероховатости, как часть высоты канала, относительная глубина в отношении к ширине – объемный фактор, влияющий на интенсивность формирующихся вихревых структур, порядка 0.2-0.4

относительное удлинение l по отношению к ширине – важнейший фактор, влияющий на интенсивность формирующихся вихревых структур

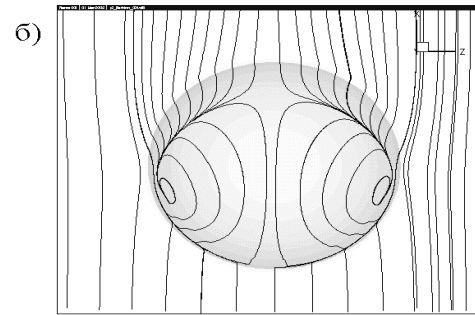
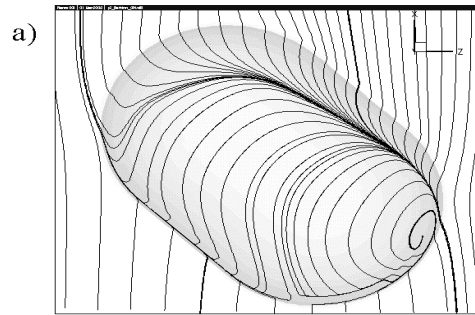
радиус скругления кромок r (по отношению к ширине) – фактор, влияющий на гидравлические потери

угол наклона ϕ ОТЛ – важнейший фактор, определяющий эффект интенсификации отрывного течения и теплообмена

Интегральные коэффициенты относительной теплоотдачи от выделенного элемента поверхности с овальной лункой $\Delta=0.14$; $L=0.5$; $Re=23500$

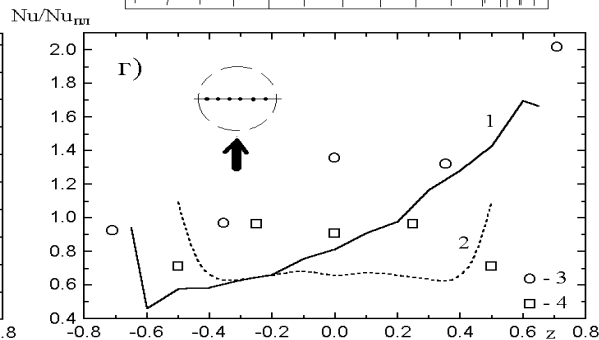
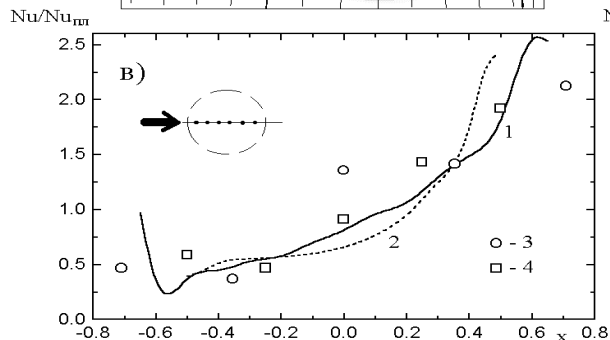


Тип элемента	Сферическая лунка	Асимметричная лунка	Прямоугольная область (2×1.5) за сферической лункой	Прямоугольная область (2×1.5) за асимметричной лункой
Эксперимент	0.975	1.073	-	лункой
Расчет	1.0	1.11	1.056	1.17



ИФЖ, 2003

Сравнение картин растекания жидкости по поверхности сферической лунки с цилиндрической вставкой (а) и без нее (б), а также расчетных (1,2) и экспериментальных (3,4) зависимостей локальной относительной теплоотдачи $Nu/Nu_{пл}$ в продольном (в) и поперечном (г) сечениях лунок. Данные 1,3 относятся к сферической лунке со вставкой, 2,4 – к сферической лунке без вставки. $T_w = \text{const}$.

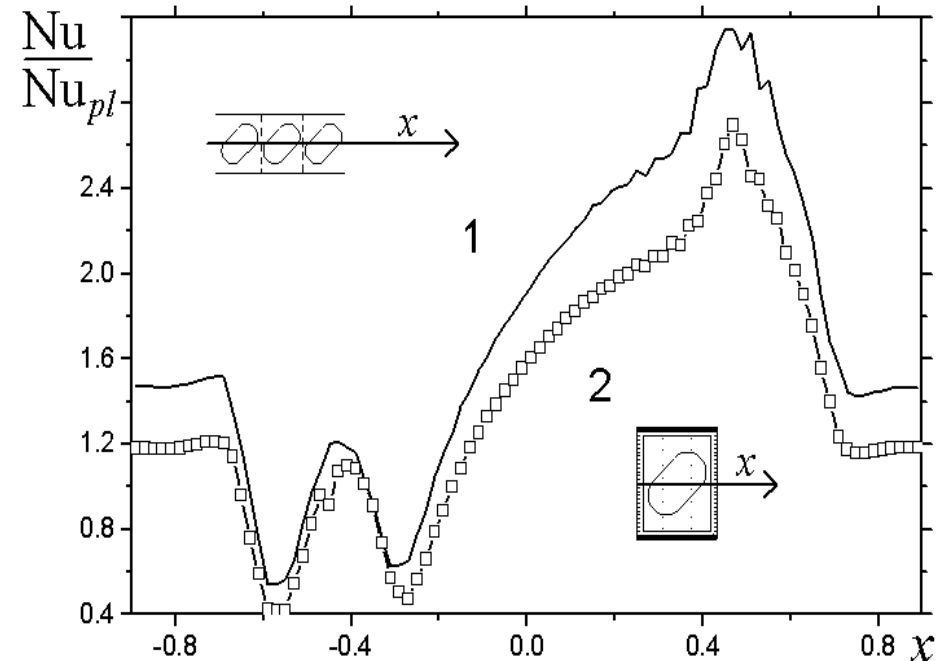


К обоснованию постановки задачи: Periodic section with an oval dimple at the narrow channel wall (a) with its upper wall taken off; b – channel with 22 oval dimples



Re	2500			20000		
	ζ/ζ_{pl}	Nu_m/Nu_{mpl}	$(Nu_m/Nu_{mpl})/(\zeta/\zeta_{pl})$	ζ/ζ_{pl}	Nu_m/Nu_{mpl}	$(Nu_m/Nu_{mpl})/(\zeta/\zeta_{pl})$
Full channel	1.25	1.45	1.16	1.66	1.47	0.88
21 dimples	1.31	1.61	1.23	1.73	1.52	0.88
Module	1.27	1.41	1.11	1.72	1.41	0.82

Исаев С.А., Леонтьев А.И., Корнев Н.В., Хассель Э., Чудновский Я.П.
 Интенсификация теплообмена при ламинарном и турбулентном течении в узком канале с однорядными овальными лунками // Теплофизика высоких температур. 2015. Т.53. №3. С.390-402.





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.



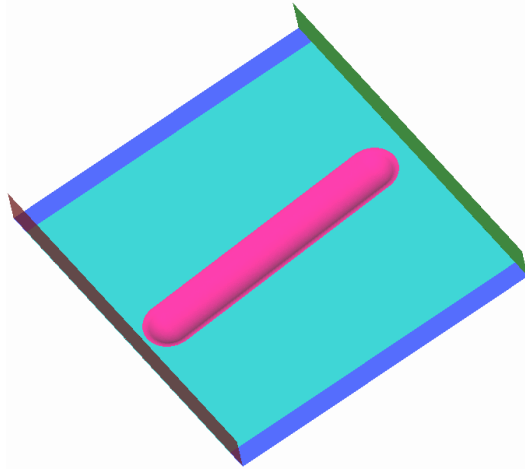
S. Isaev, M. Gritckevich, A. Leontiev, I. Popov, Abnormal enhancement of separated turbulent air flow and heat transfer in inclined single-row oval-trench dimples at the narrow channel wall, *Acta Astronautica* 163 (2019) 202-207.

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.

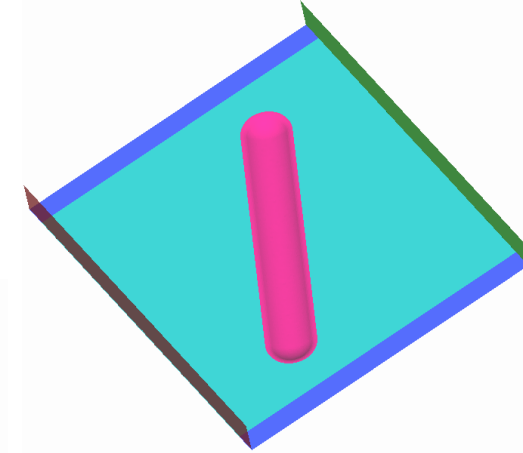
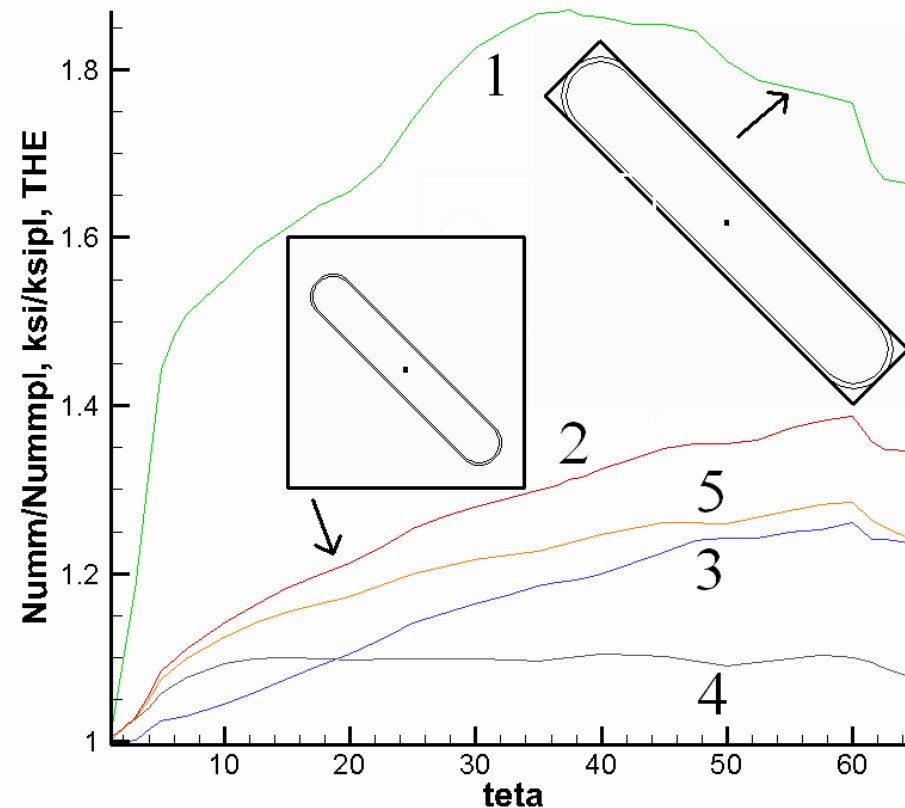
С.А. Исаев, М.С. Грицкевич, А.И. Леонтьев, О.О. Мильман, Д.В. Никущенко, Ускорение турбулентного потока в узком облуненном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклоненных овально-траншейных лунок на стенке, *Теплофизика и аэромеханика* 26 (5) (2019) 697-702.

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.

Влияние угла наклона цилиндрической канавки на интегральные характеристики

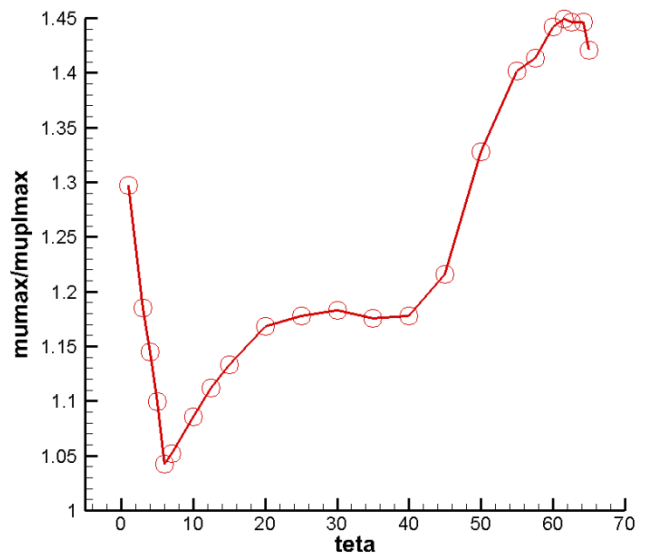
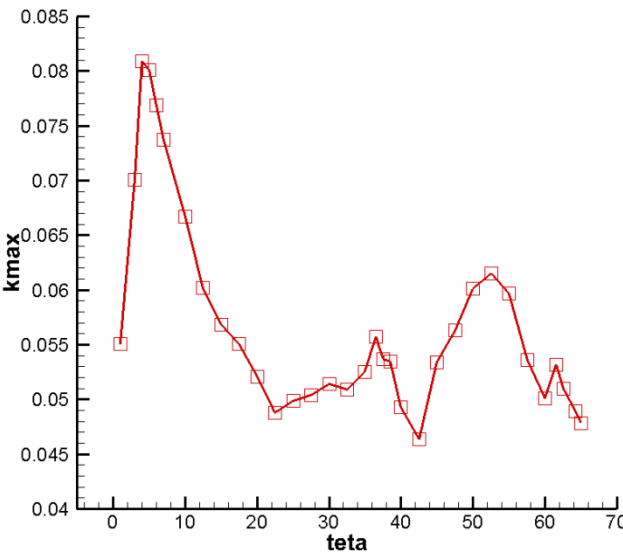
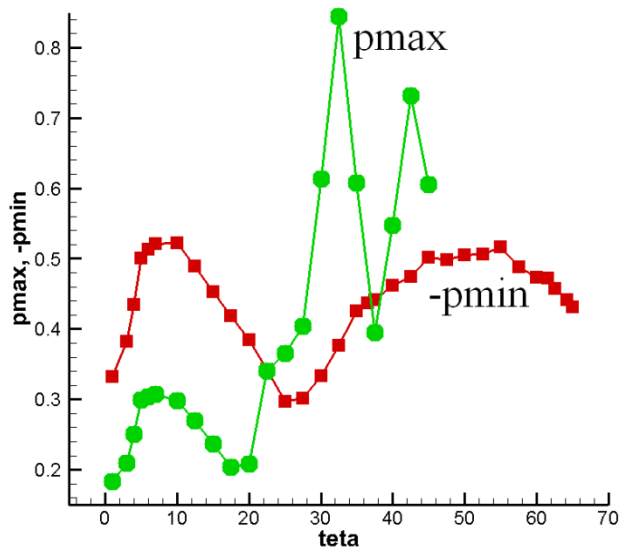
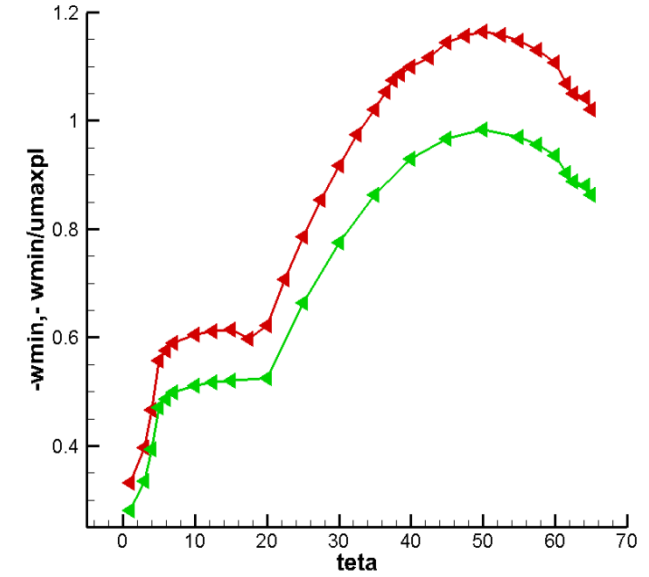
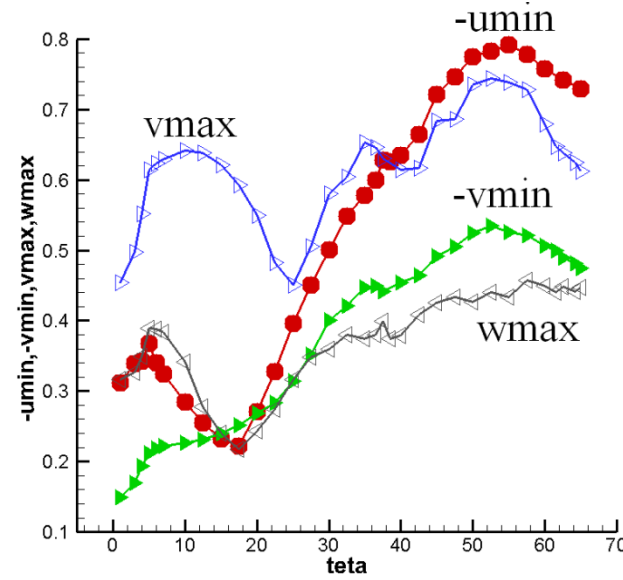
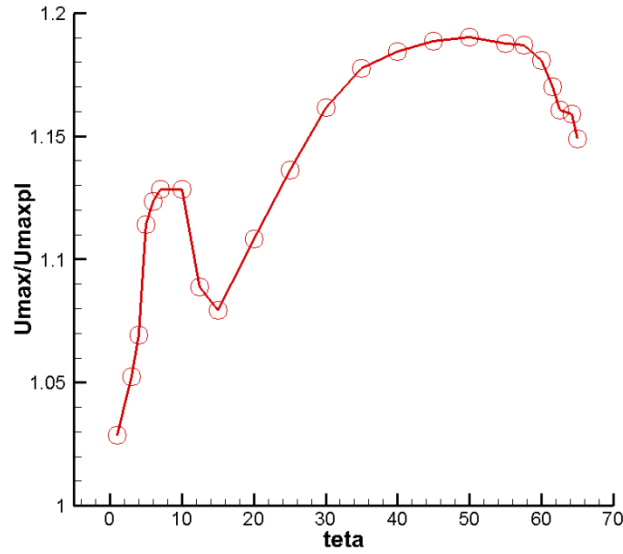


Re=10000
Pr=0.7 (воздух)
Секция 8x1x9
Глубина канавки – 0.30
Ширина – 1.05
Длина – 7.05
Радиус скругления
кромки – 0.21.

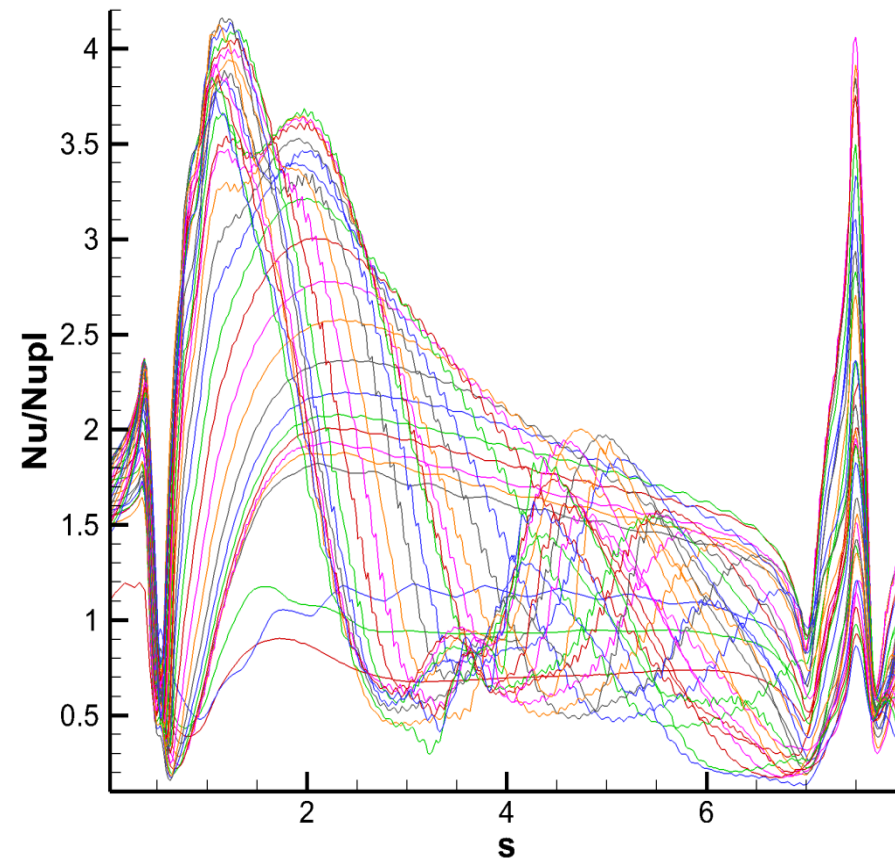
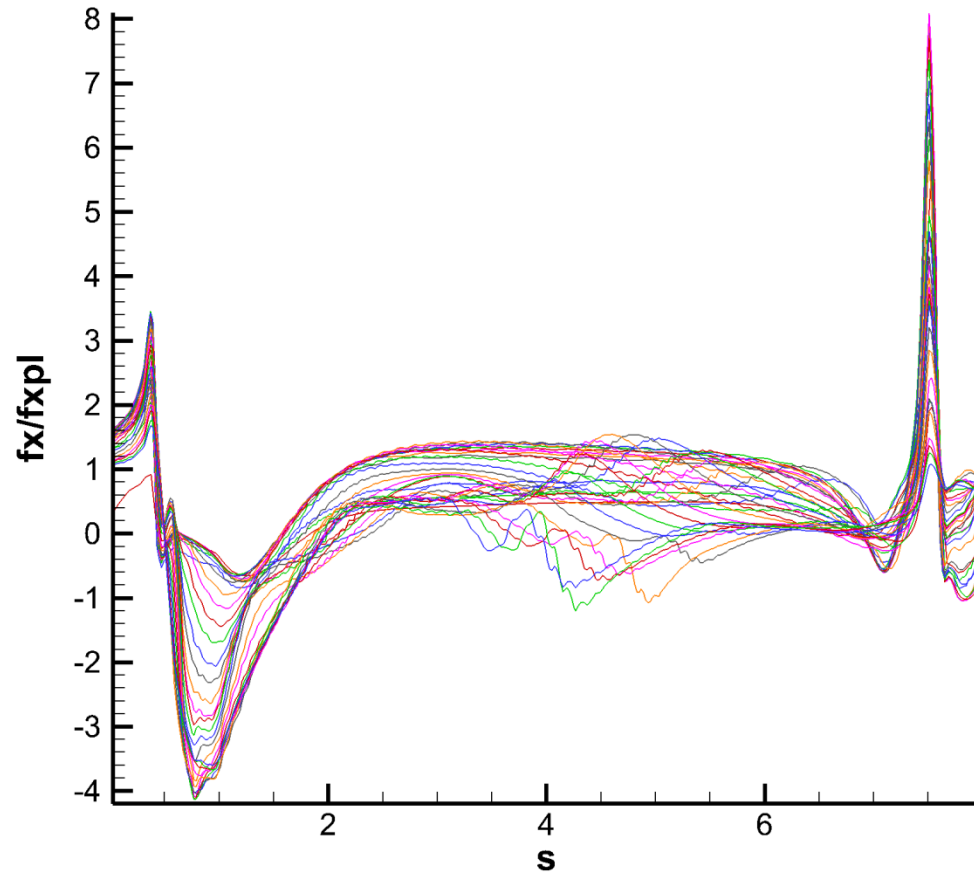


Участок стабилизированного течения и теплообмена – периодическая секция канала с периодическими граничными условиями.

Влияние угла наклона лунки на экстремальные характеристики



Влияние угла наклона лунки на распределения относительных характеристик в срединном сечении лунки

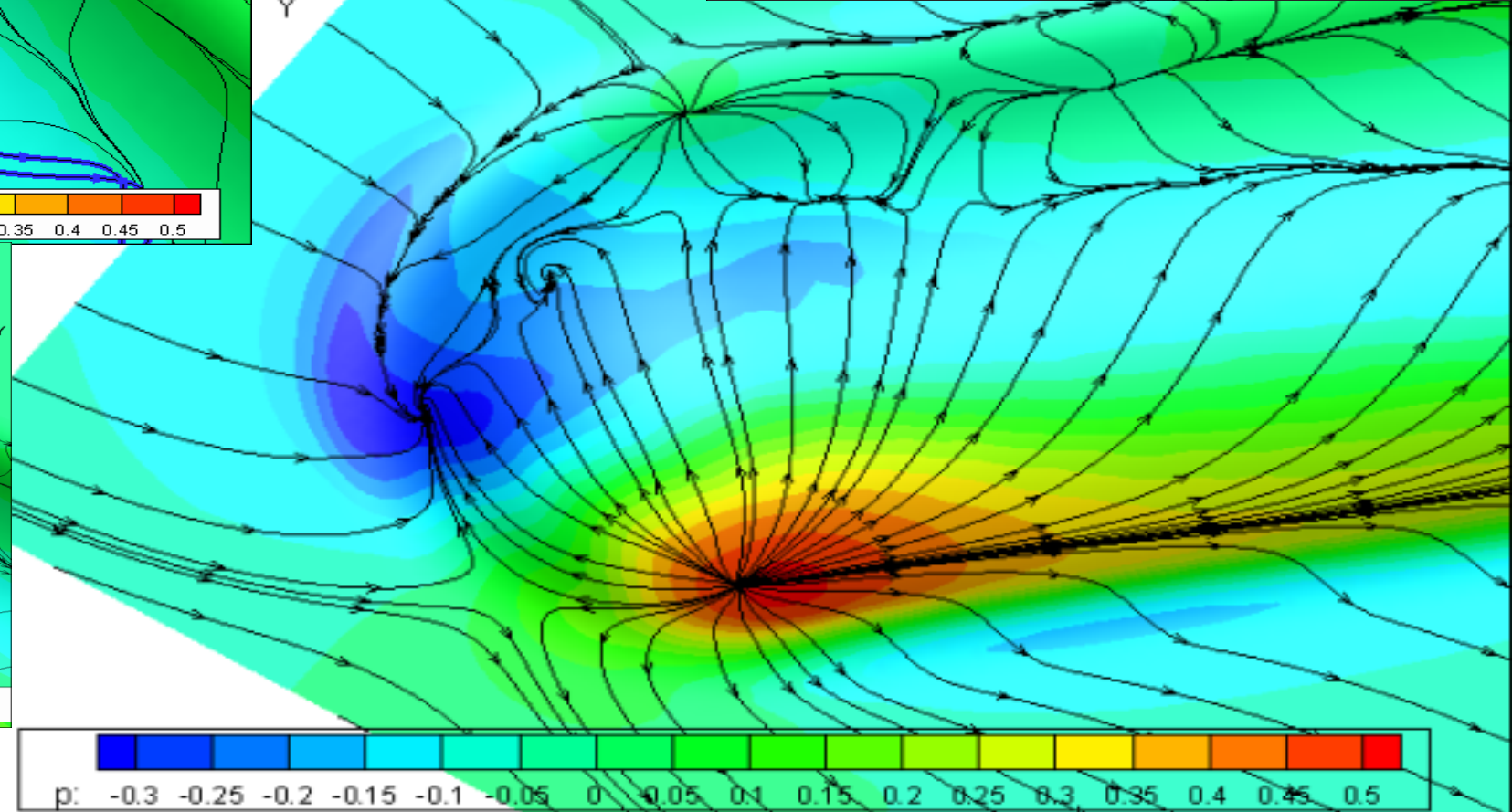
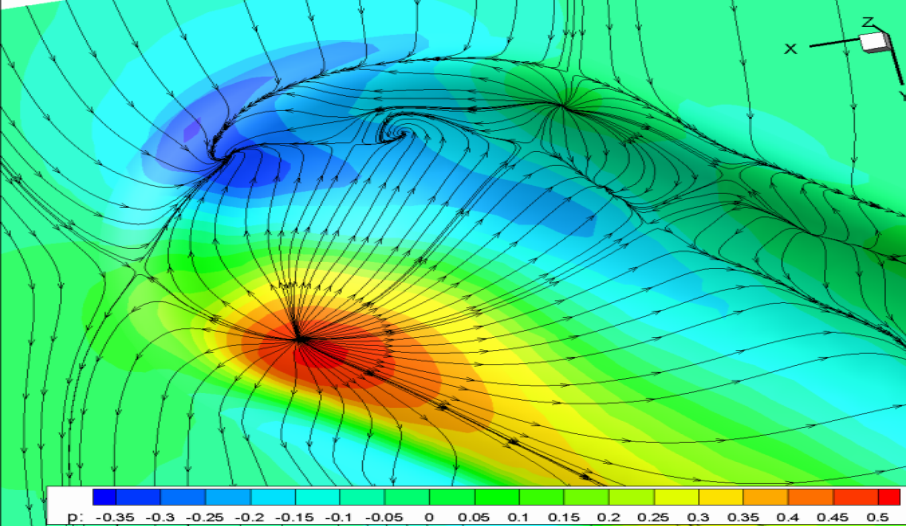
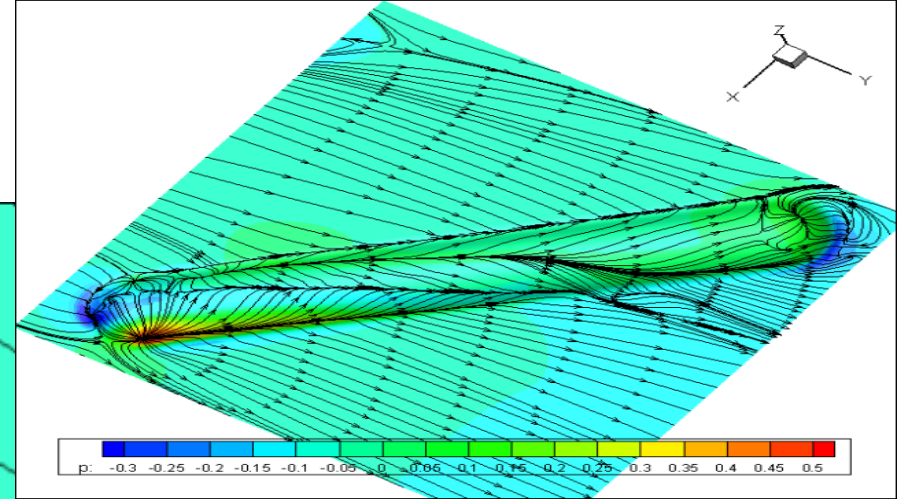
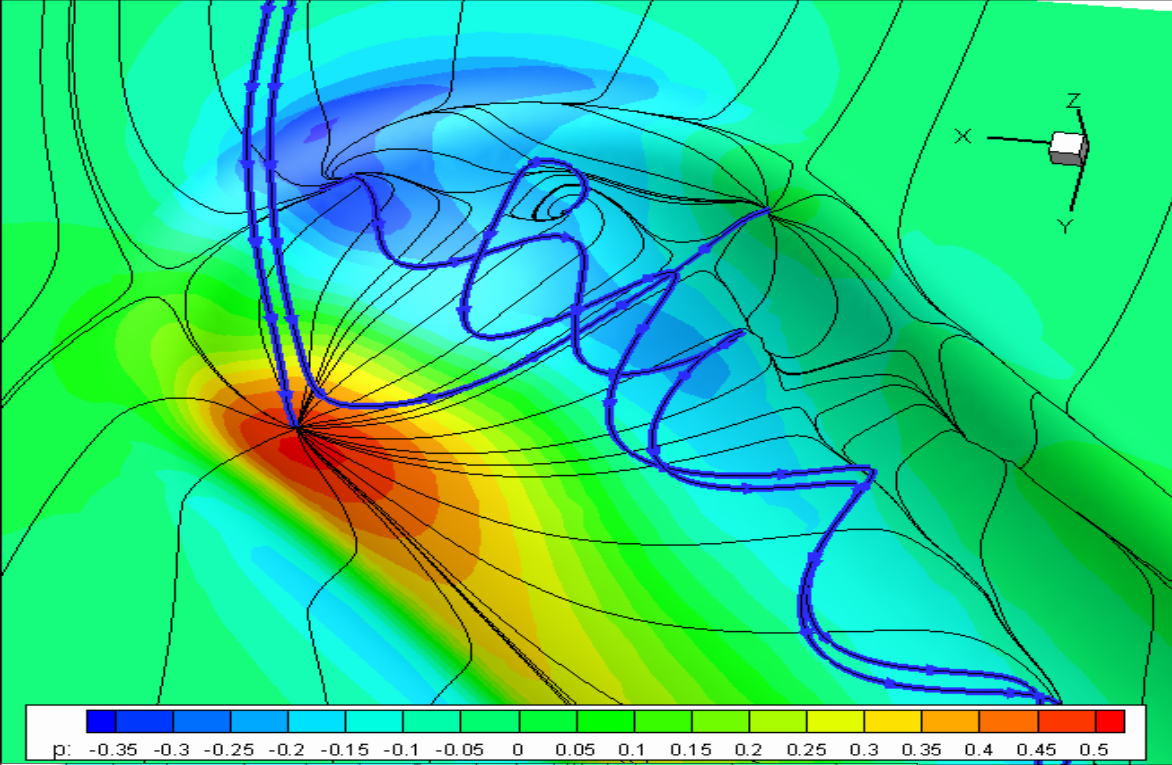


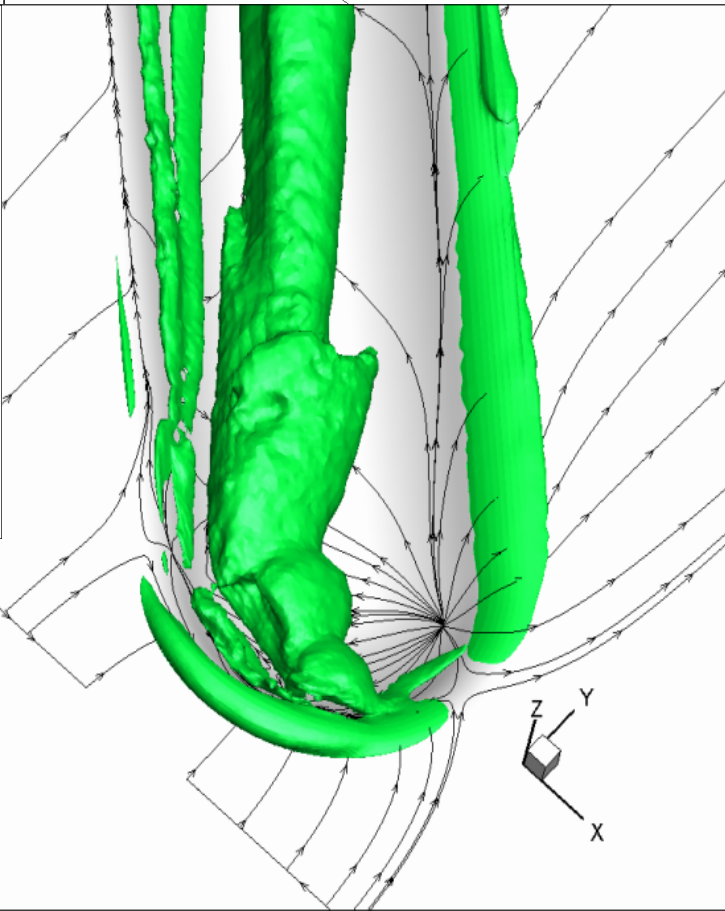
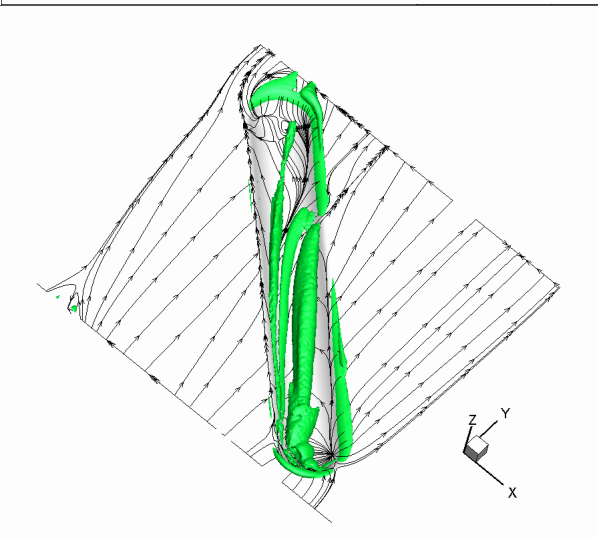
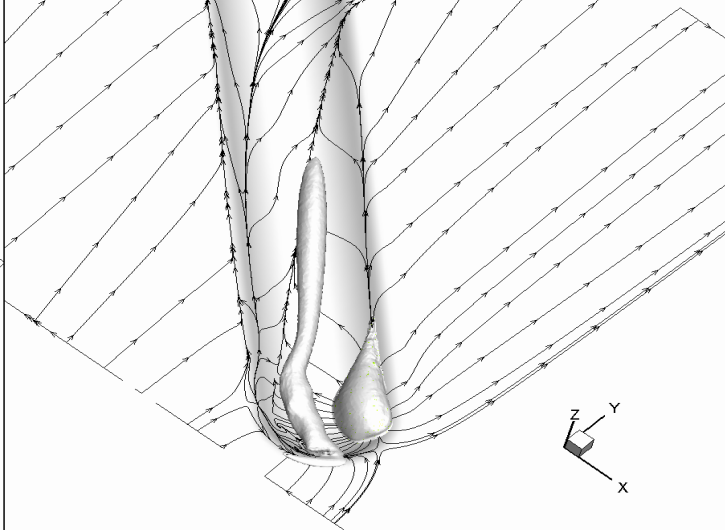
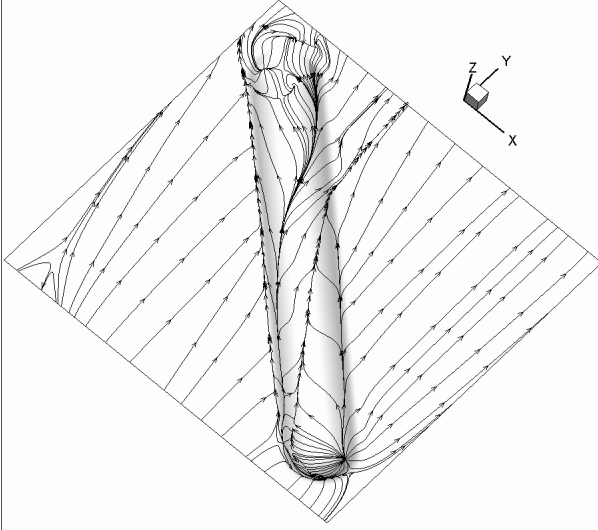
Угол наклона 45 гр.

$\delta=0.3$

$Re=10000$

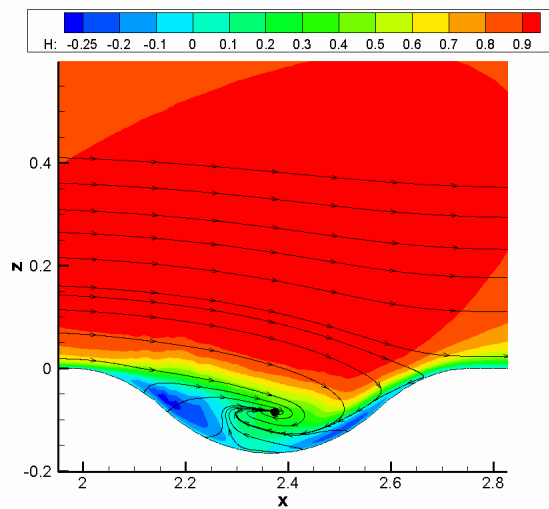
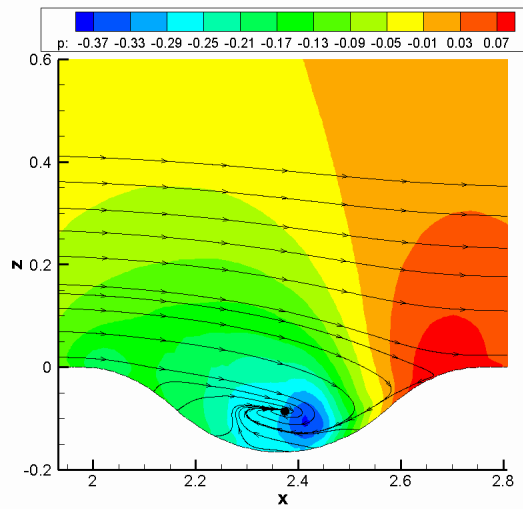
Периодическая
секция

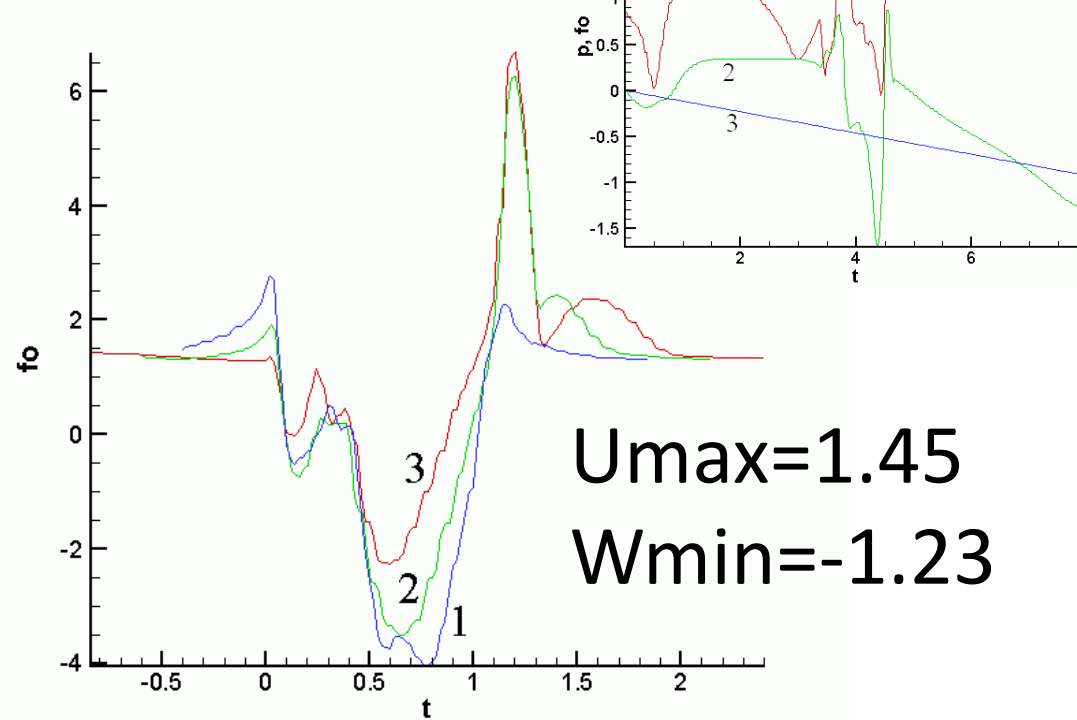
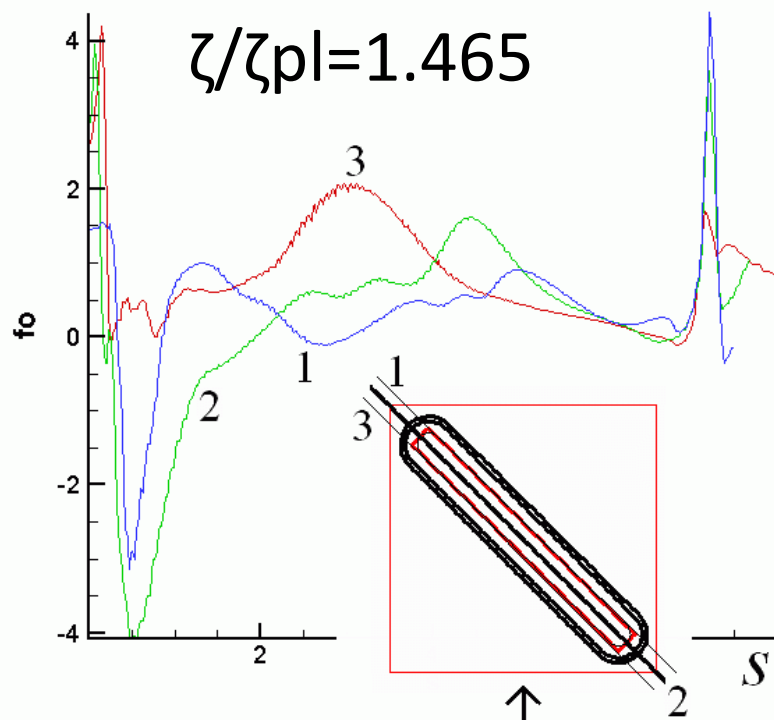
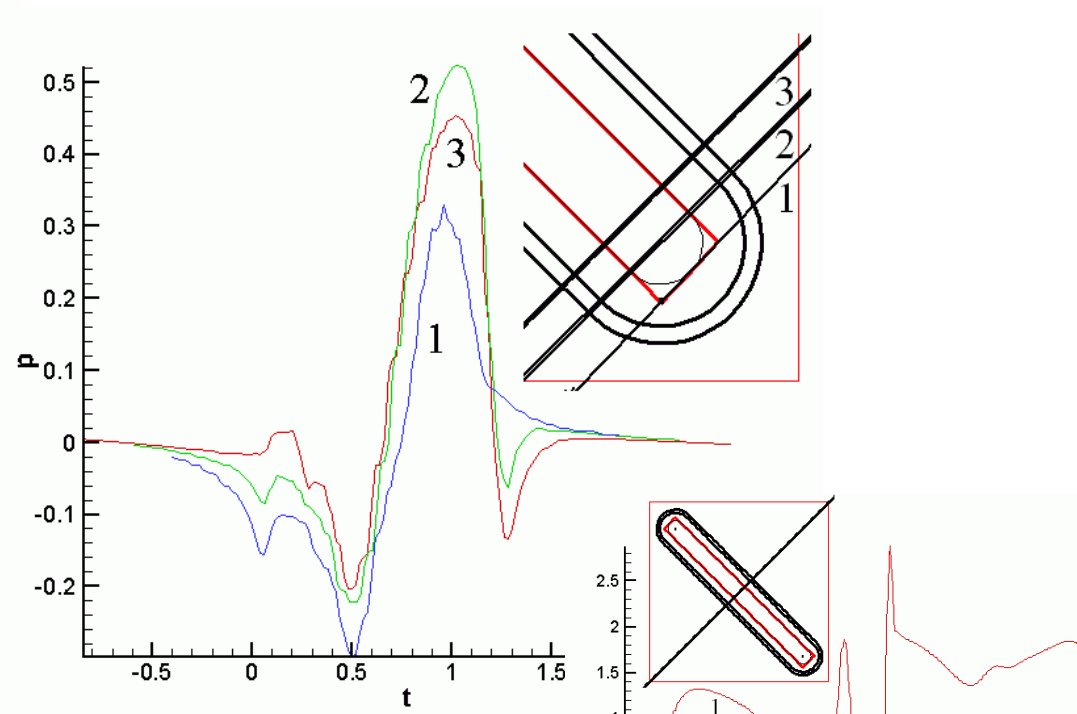
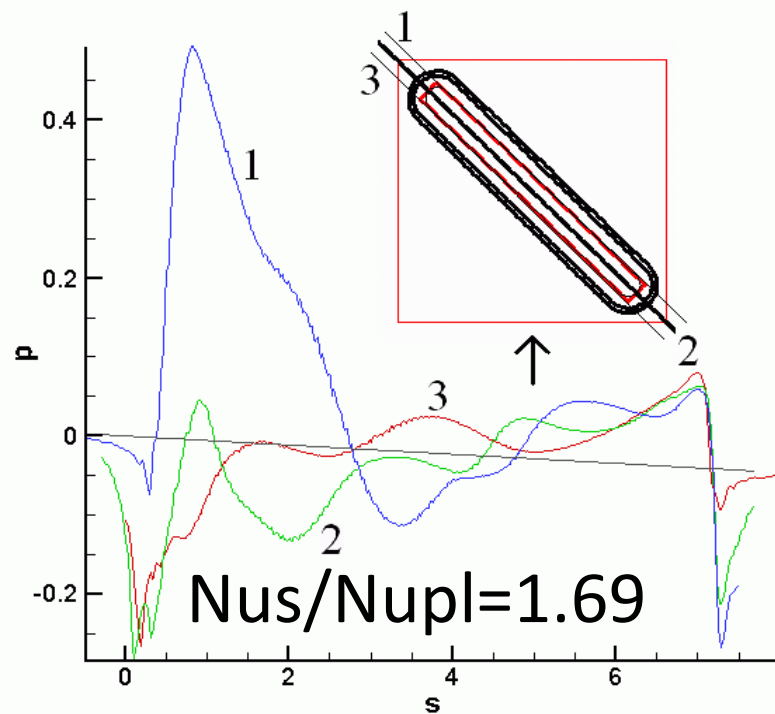


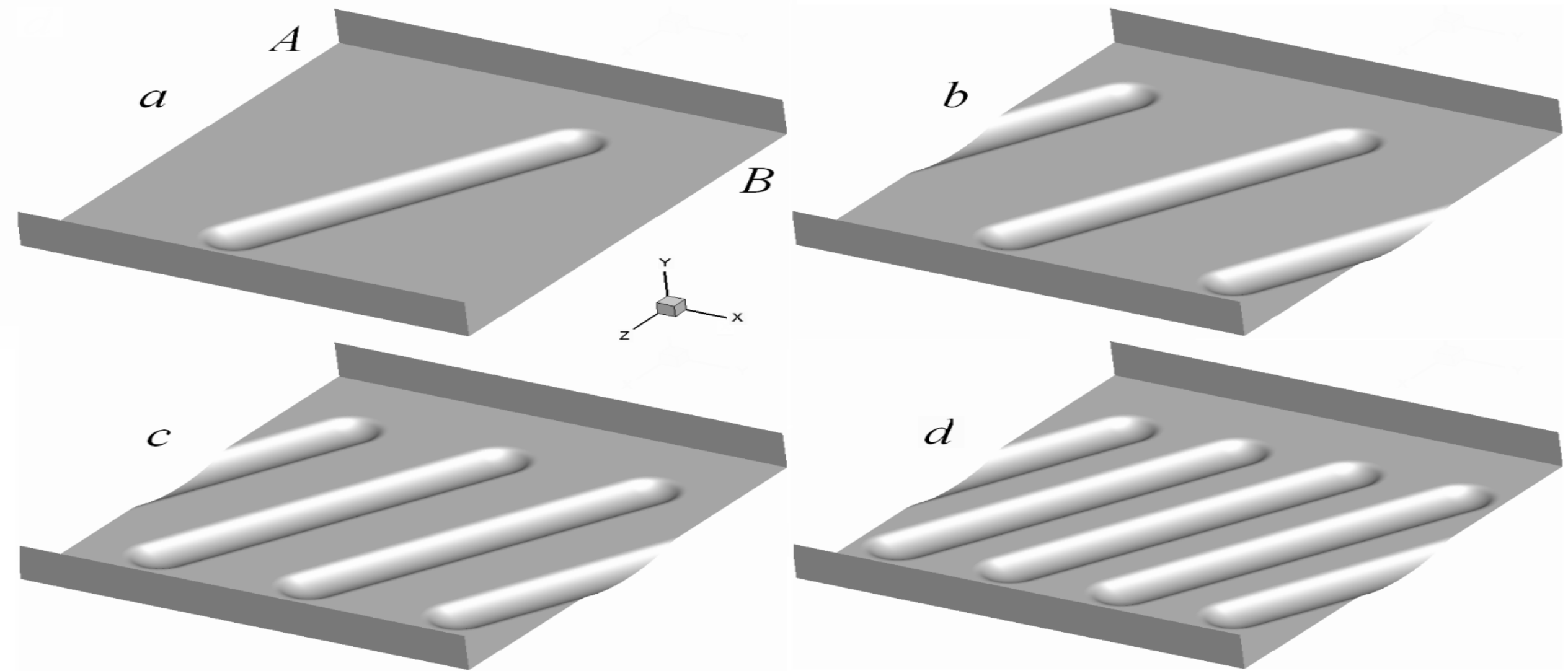


Q2

pressure

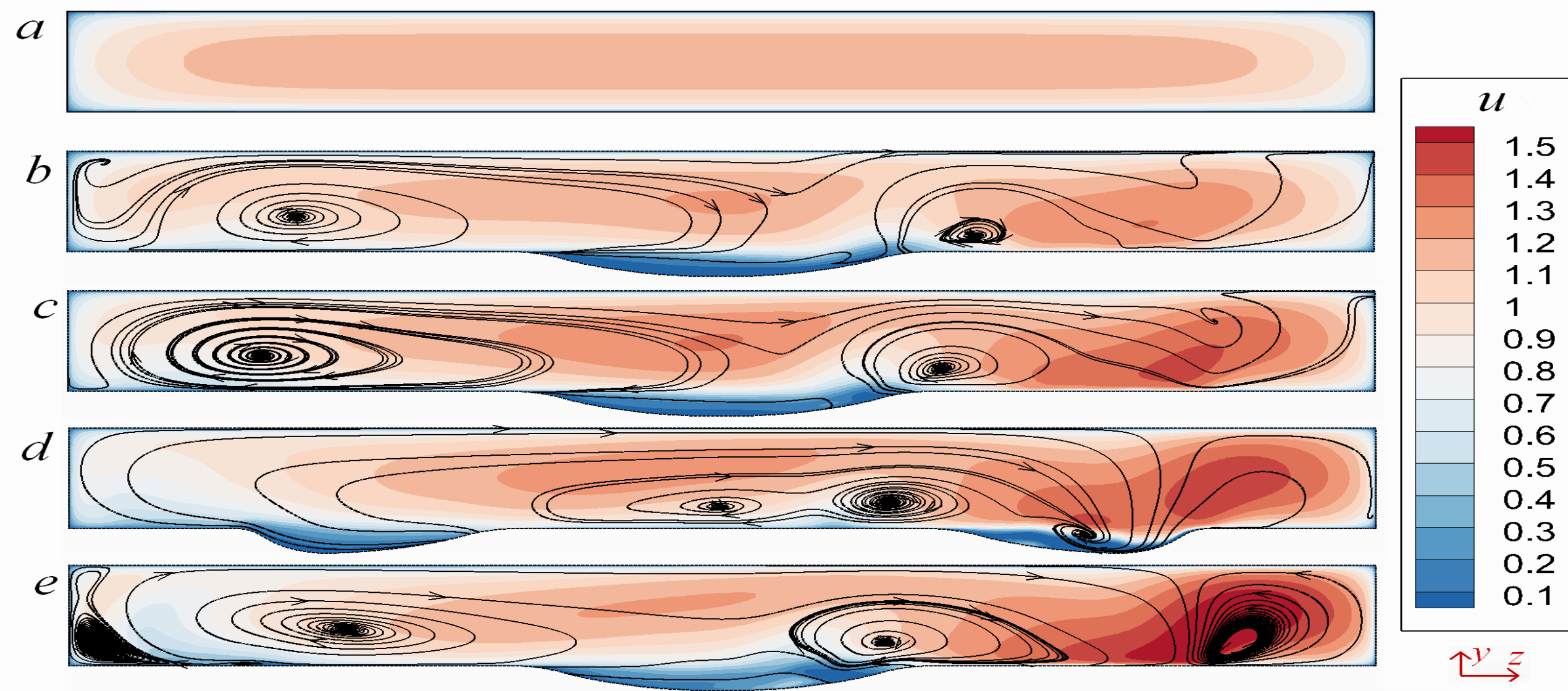




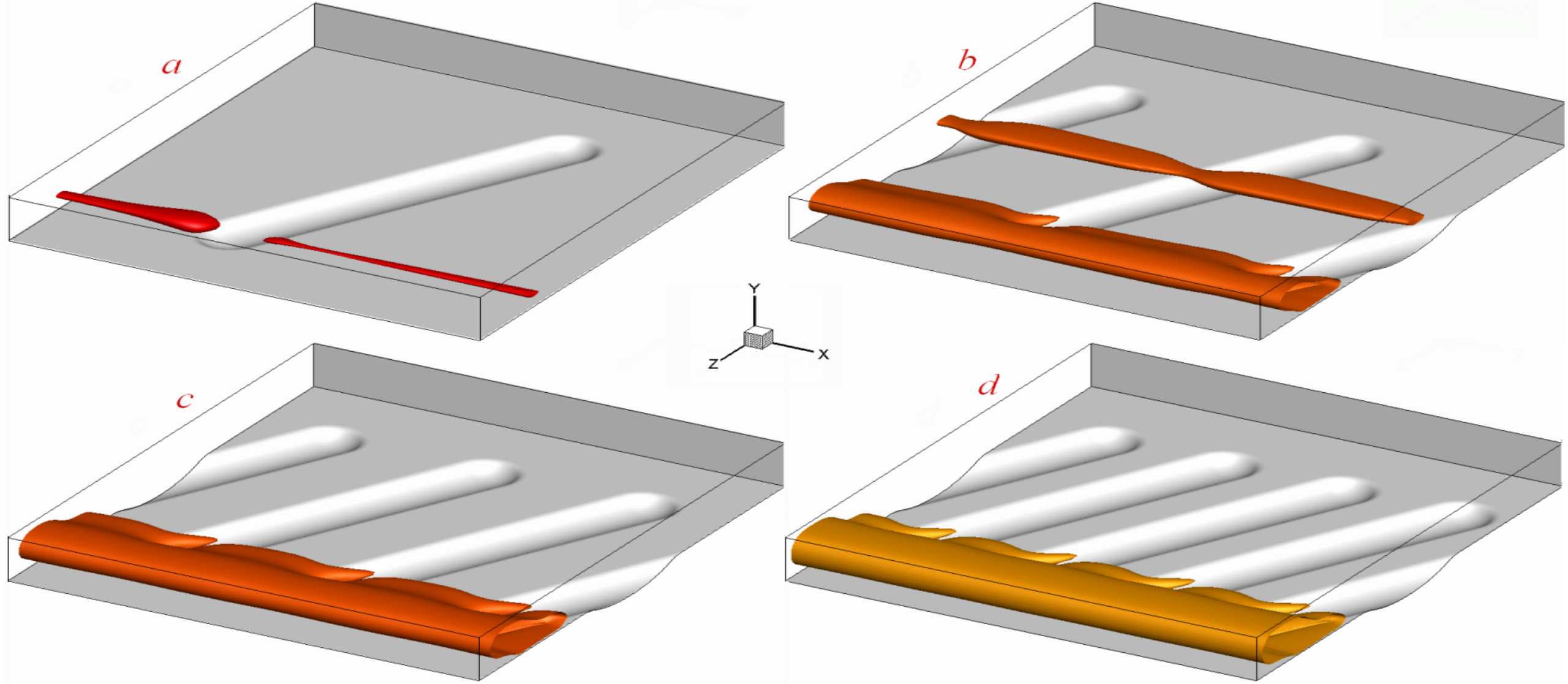


Периодические сечения канала с однорядными наклоненными овально-траншейными лунками ($\theta=65^\circ$) глубиной 0.25 на нижней стенке (верхняя стенка снята) при различных шагах между лунками.

$a - H=8$; $b - 4$; $c - 2.667$; $d - 2$. $Re=10000$.



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

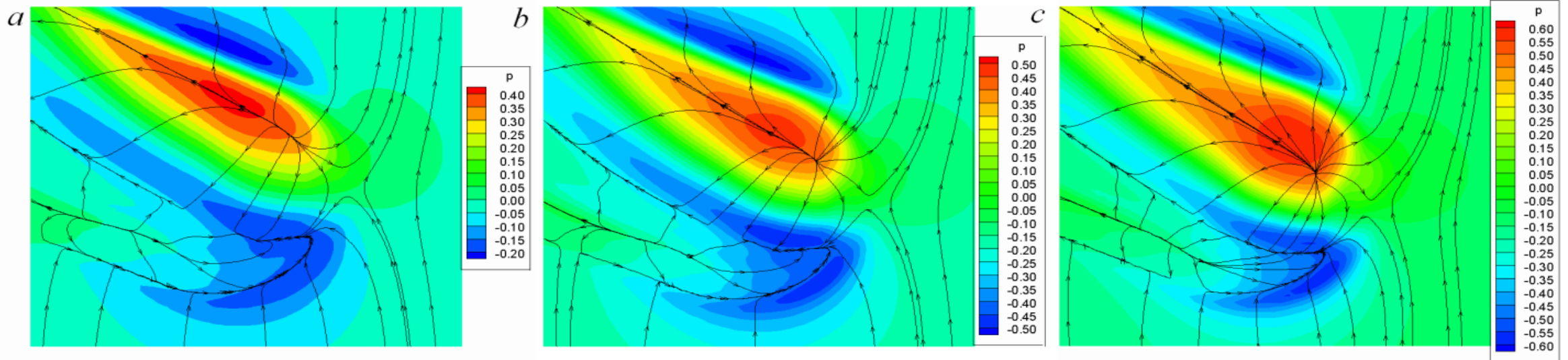


Сравнение изополей продольной составляющей скорости u , равной 1.3, в периодической секции облученного канала при $N = 8$ (*a*); 4 (*b*); 2.667 (*c*); 2 (*d*).

Таблица 2. Экстремальные величины параметров потока и характеристик турбулентности в зависимости от шага между лунками при угле наклона 65°



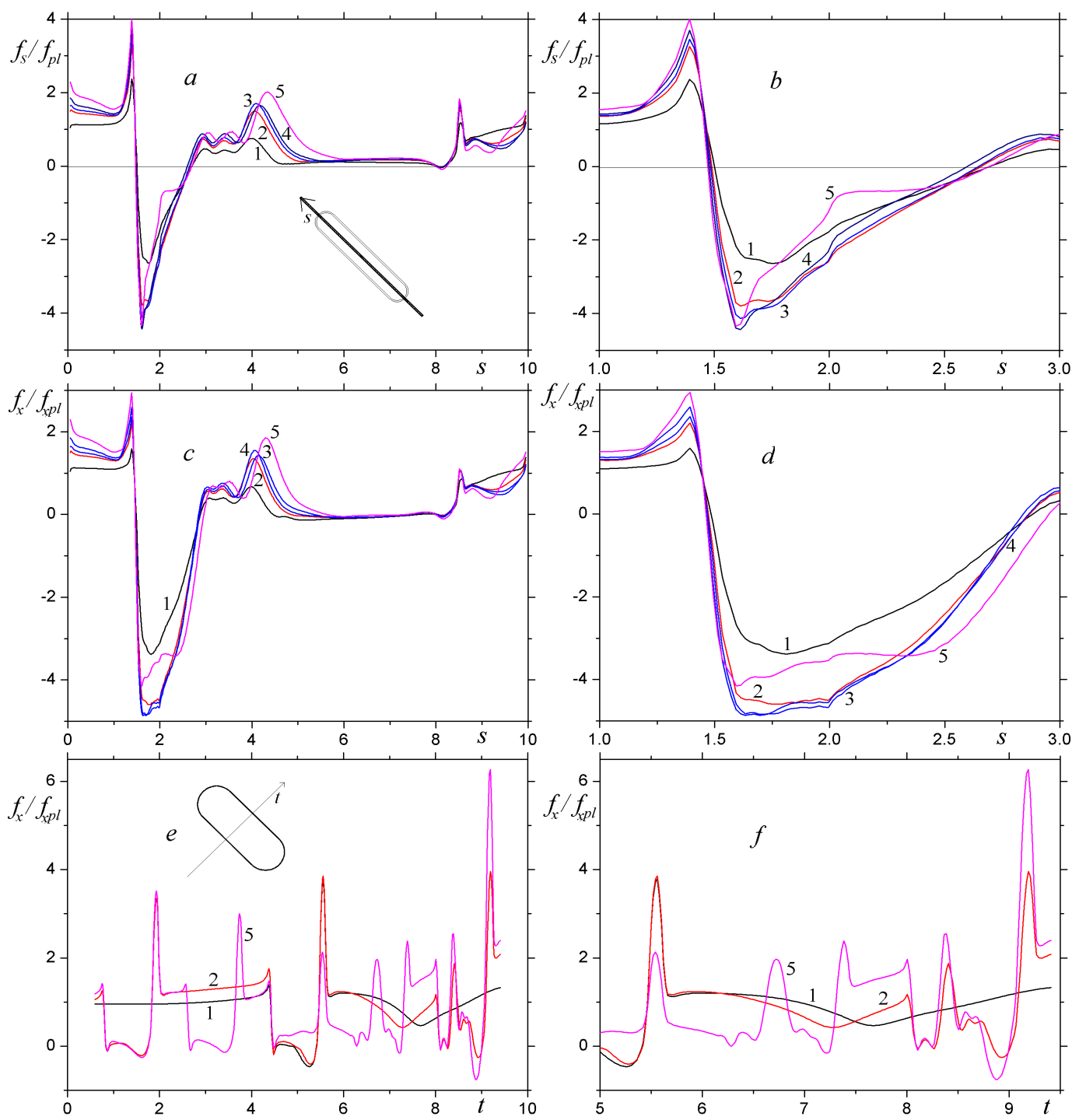
H	u_{\max}	u_{\min}	v_{\max}	v_{\min}	w_{\max}	w_{\min}	$10^2 k_{\max}$	$10^3 \mu_{t\max}$
8	1.336	-0.639	0.494	-0.400	0.317	-0.915	4.75	5.50
4	1.491	-0.811	0.655	-0.537	0.434	-1.145	6.38	7.00
3.3	1.527	-0.847	0.697	-0.577	0.477	-1.193	6.89	7.20
2.667	1.579	-0.876	0.743	-0.623	0.531	-1.251	7.19	7.60
2	1.643	-0.862	0.751	-0.655	0.587	-1.272	7.64	7.70



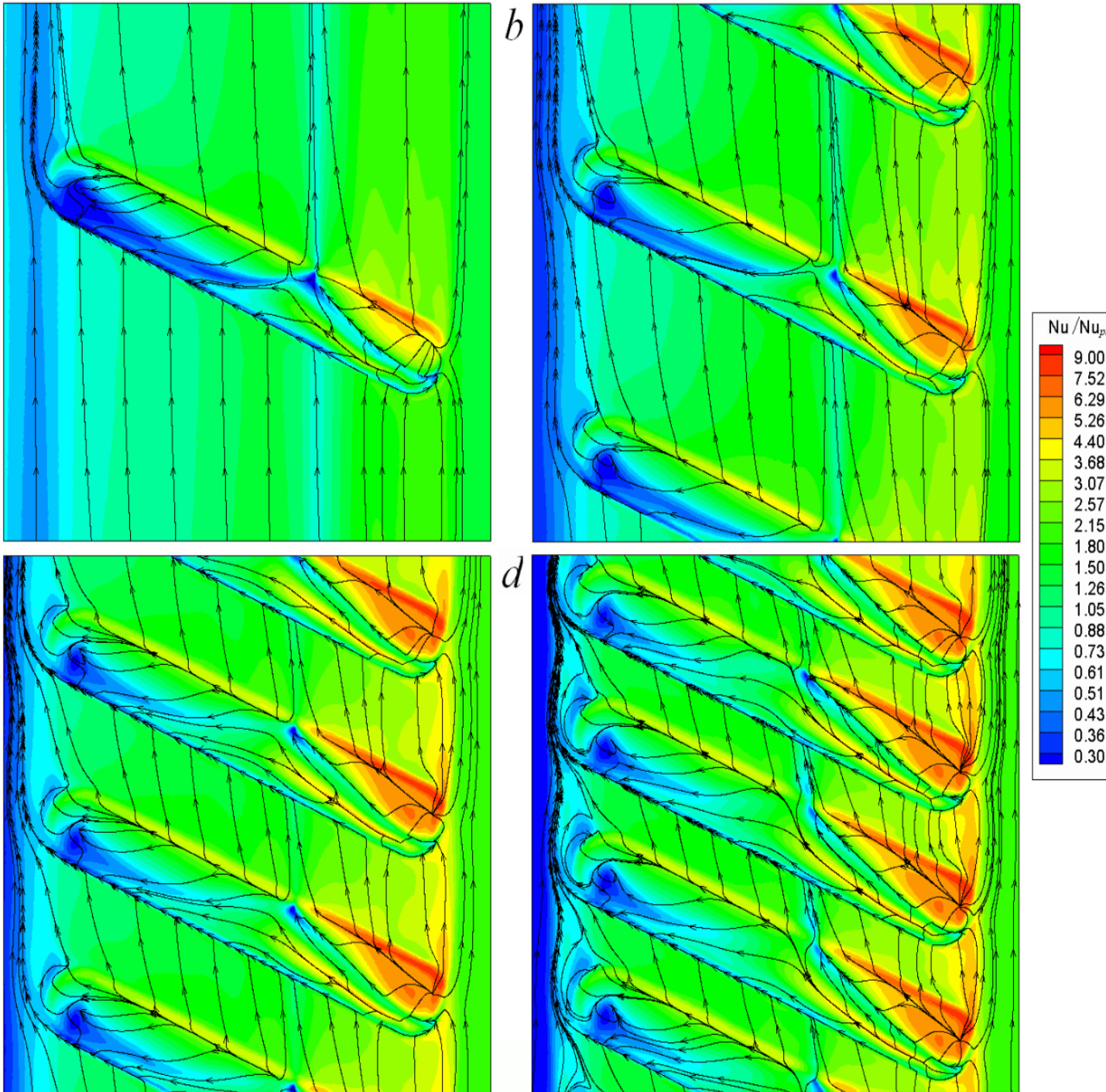
Сравнение полей статического давления на стенке периодической секции облуненного канала с нанесенными картинками растекания при различных шагах между лунками. *a* – $H=8$; *b* – 4 ; *c* – 2 .



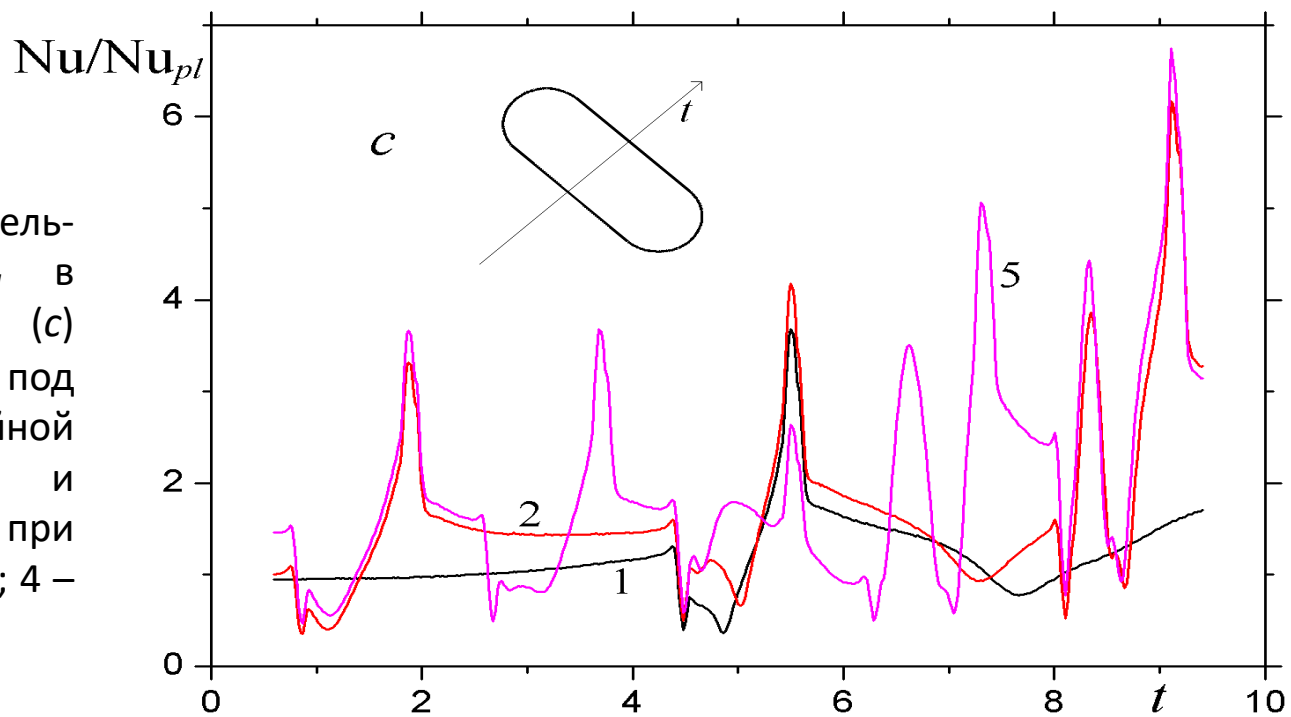
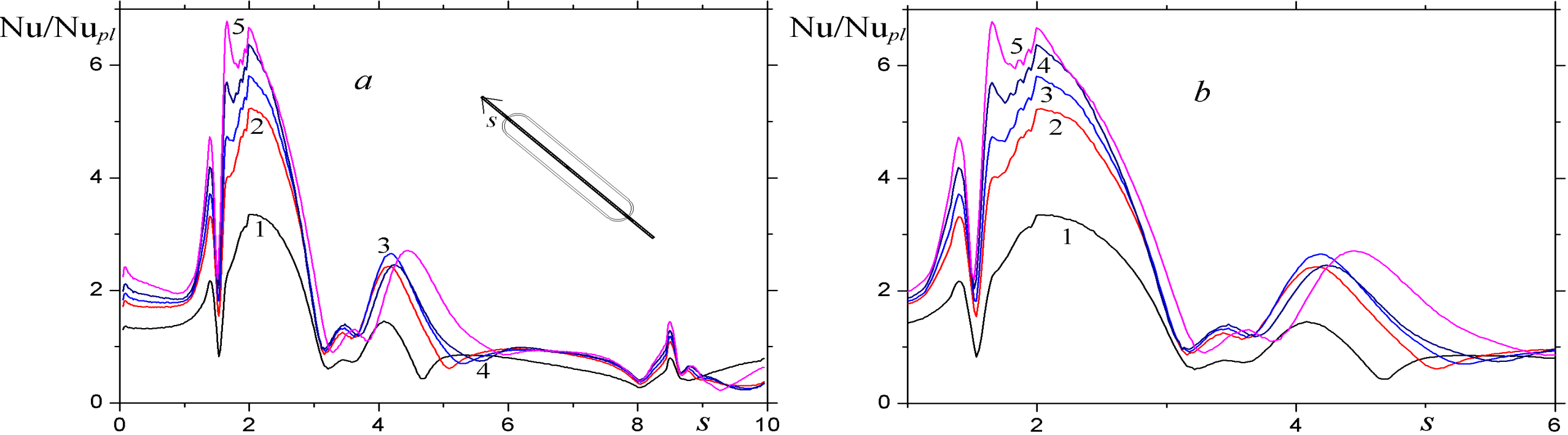
Причина аномальной интенсификации отрывного турбулентного течения и теплообмена во входной части наклоненной под углом 65° ОТЛ заключается в растущем с уплотнением лунок гигантском перепаде статического давления между близкими зонами высокого (доходит до величины порядка 0.6) и низкого давления (полученная минимальная величина -0.6), возникающих при торможении входящего в лунку потока на наветренной части кромки и в месте зарождения спиралевидного вихря на входном подветренном сферическом сегменте.



Сравнение распределений составляющих относительного трения f_s (*a, b*) и f_x (*c, d, e, f*) в продольном (*a, b, c, d*) и поперечном (*e, f*) срединных сечениях наклоненной под углом $\theta=65^\circ$ овально-траншейной лунки в нормальном (*a, c, e*) и укрупненном (*b, d, f*) масштабах при различных *N*. 1 – *N*=8; 2 – 4; 3 – 3.3; 4 – 2.667; 5 – 2.



Сравнение полей относительных чисел Нуссельта Nu/Nu_{pl} на стенке периодической секции облученного канала с нанесенными картинами растекания при различных шагах между лунками. $a - N=8$; $b - 4$; $c - 2.667$; $d - 2$.

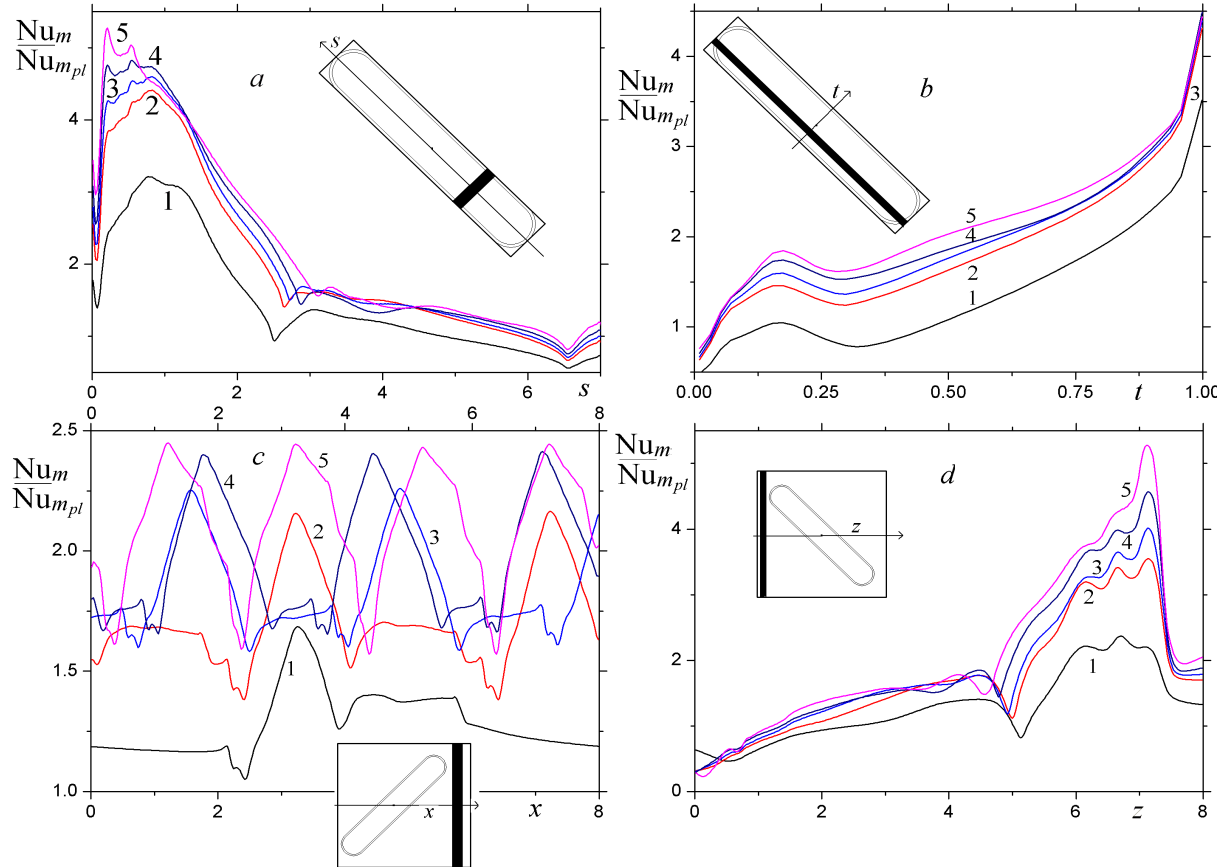


Сравнение распределений относительных чисел Нуссельта Nu/Nu_{pl} в продольном (a, b) и поперечном (c) срединных сечениях наклоненной под углом $\theta=65^\circ$ овально-траншейной лунки в нормальном (a, c) и укрупненном (b) масштабах при различных H . 1 – $H=8$; 2 – 4; 3 – 3.3; 4 – 2.667; 5 – 2.

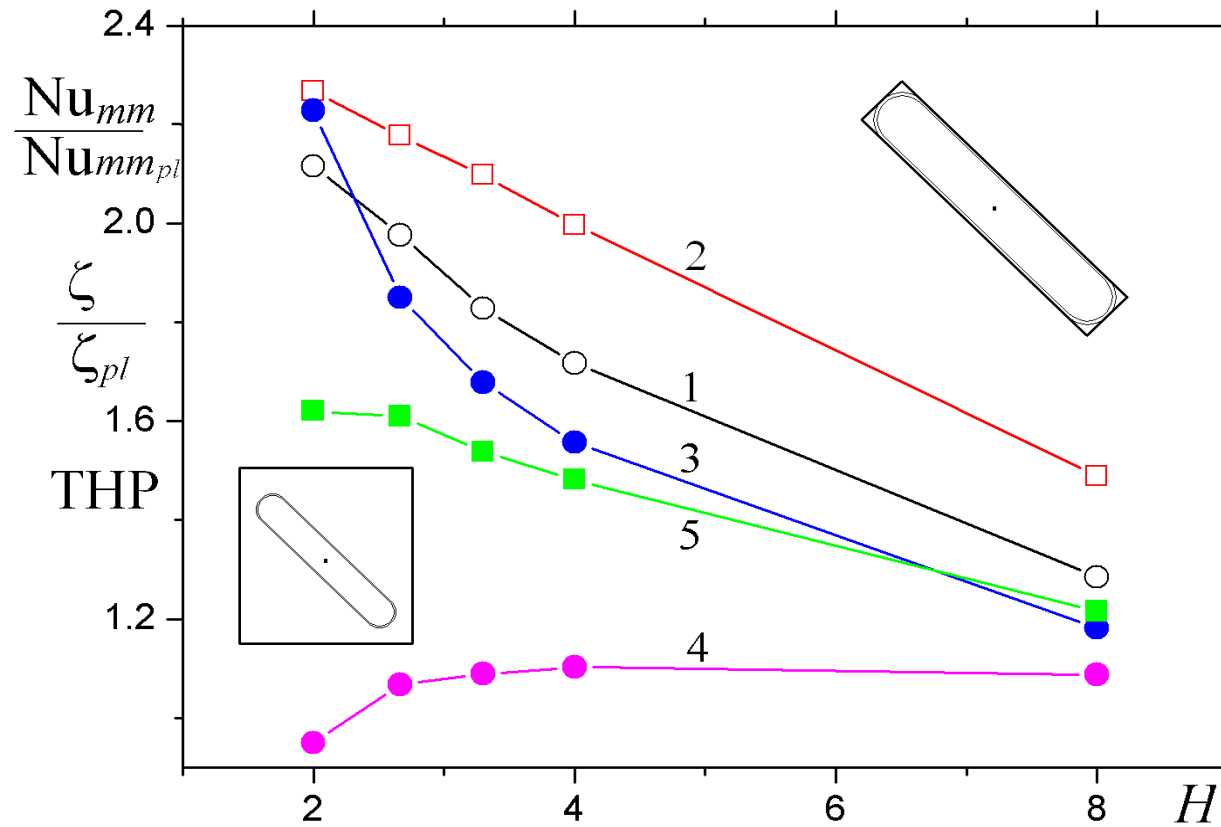


Уплотнение однорядных лунок значительно усилило аномальную интенсификацию отрывного турбулентного течения и теплообмена во входной части наклоненной под углом 65° ОТЛ на нагретой стенке периодического модуля узкого канала, которое при $N=2$ характеризуется четырехкратным увеличением максимальной абсолютной величины относительной проекции трения на направление срединного сечения ОТЛ и почти 6.5-кратным ростом относительной теплоотдачи (по отношению к параметрам в плоскопараллельном канале).

Максимальная абсолютная величина скорости вторичного (поперечного) течения примерно на 10% превосходит величину максимальной скорости потока в плоскопараллельном канале. Максимальная абсолютная величина скорости рециркуляционного течения почти втрое превышает аналогичную скорость возвратного течения в сферической лунке, доходя до 0.89 от среднемассовой скорости в канале.



Сравнение осредненных по поперечным (a,b) и продольным (c,d) полосам продольных (a,c) и поперечных (b,d) распределений относительных чисел Нуссельта $Nu_m/Nu_{m,pl}$ в срединных сечениях участка, ограниченного контуром наклоненной под углом $\theta=65^\circ$ овально-траншейной лунки (a,b), и участка стенки периодической секции канала (c,d) при различных N . 1 – $N=8$; 2 – 4; 3 – 3.3; 4 – 2.667; 5 – 2.



Зависимости от шага между лунками H суммарной относительной теплоотдачи Nu_{mm}/Nu_{mmpl} на участке облученной стенки периодической секции канала (1) и на участке, ограниченном контуром лунки (2), относительных гидравлических потерь ζ/ζ_{pl} (3) и теплогидравлической эффективности $THER$, определенной по формулам $(Nu_{mm}/Nu_{mmpl})/(\zeta/\zeta_{pl})$ (4) и $(Nu_{mm}/Nu_{mmpl})/(\zeta/\zeta_{pl})^{-1/3}$ (5).



Проинтегрированная по поперечным полосам наклоненной под углом 65° ОТЛ при $N=2-2.667$ относительная теплоотдача в отрывной зоне на входе в лунку растет примерно в 5 раз по сравнению с плоскопараллельным каналом.

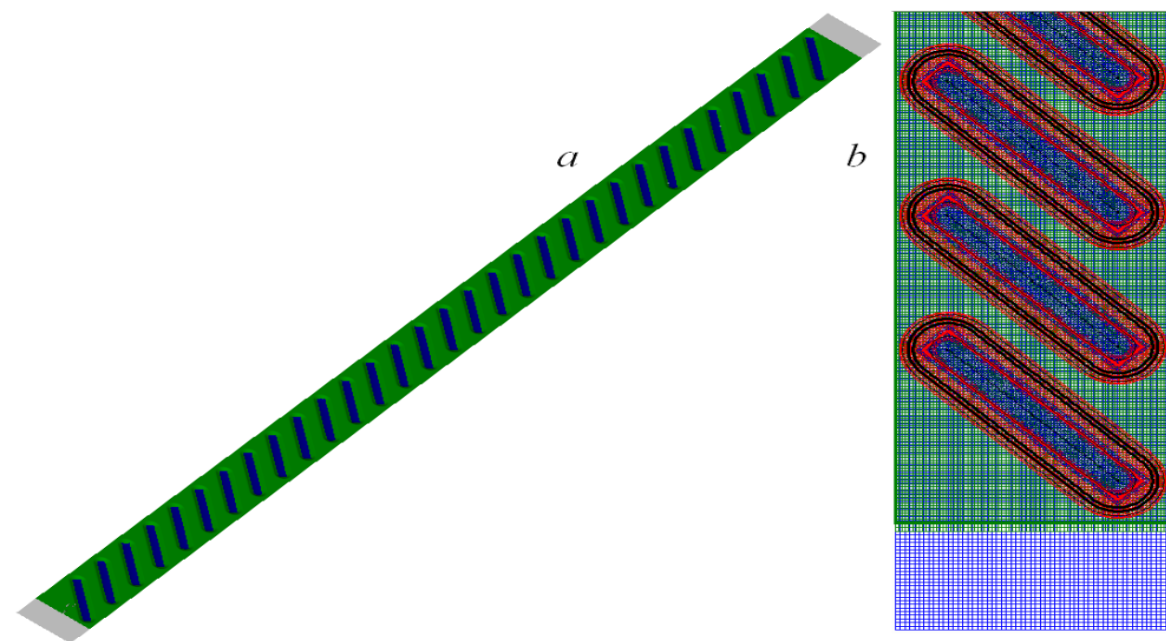
Тепловая эффективность контрольного участка периодической секции узкого канала при этом превышает 2, а теплогидравлическая эффективность, оцененная с учетом коэффициента гидравлических потерь в степени $(-1/3)$, равняется величине порядка 1.6.

Re=10000

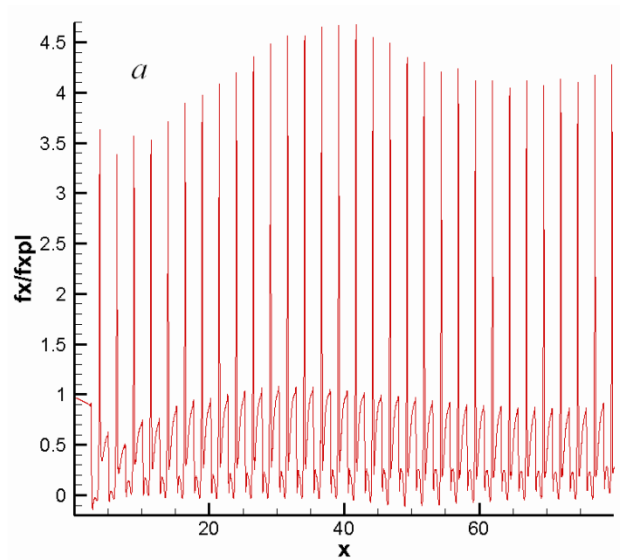
Pr=0.7

Delta=0.2

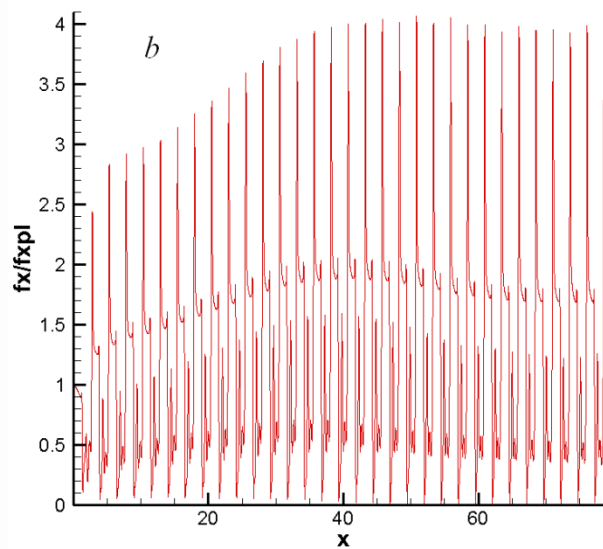
H=2.53



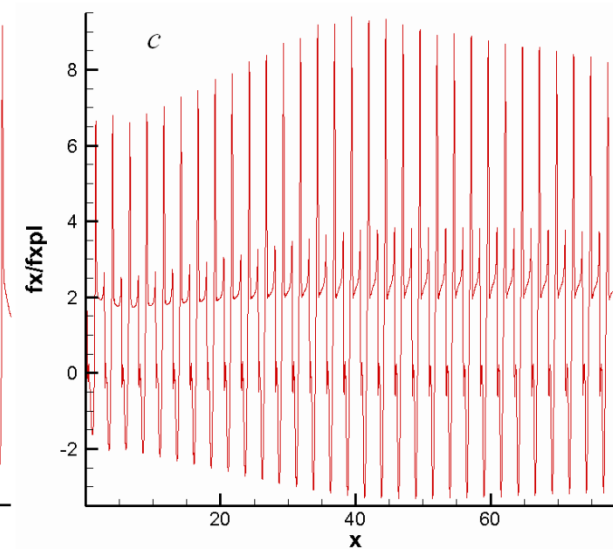
Z=-1.25

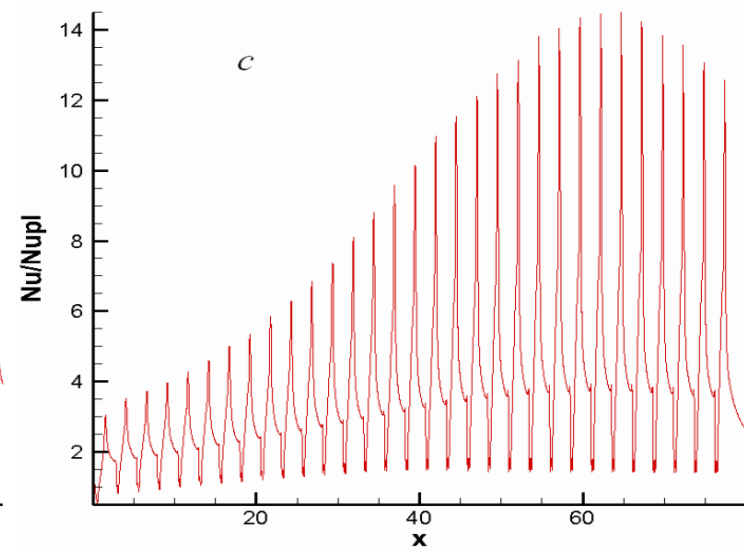
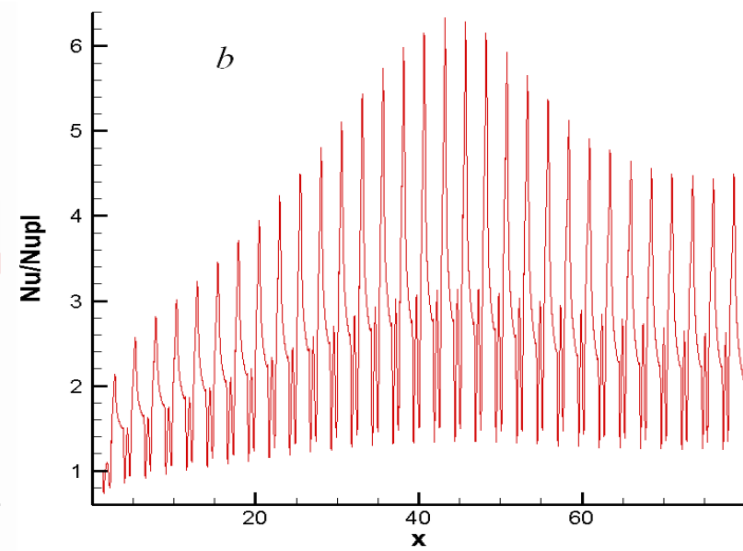
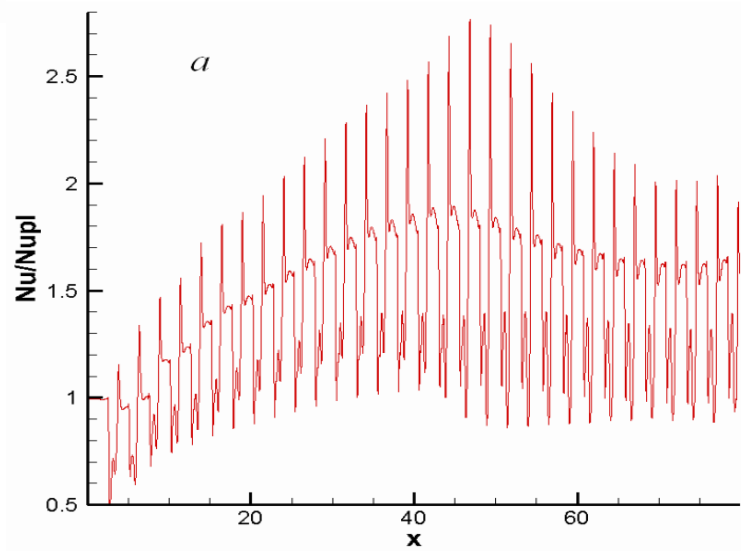
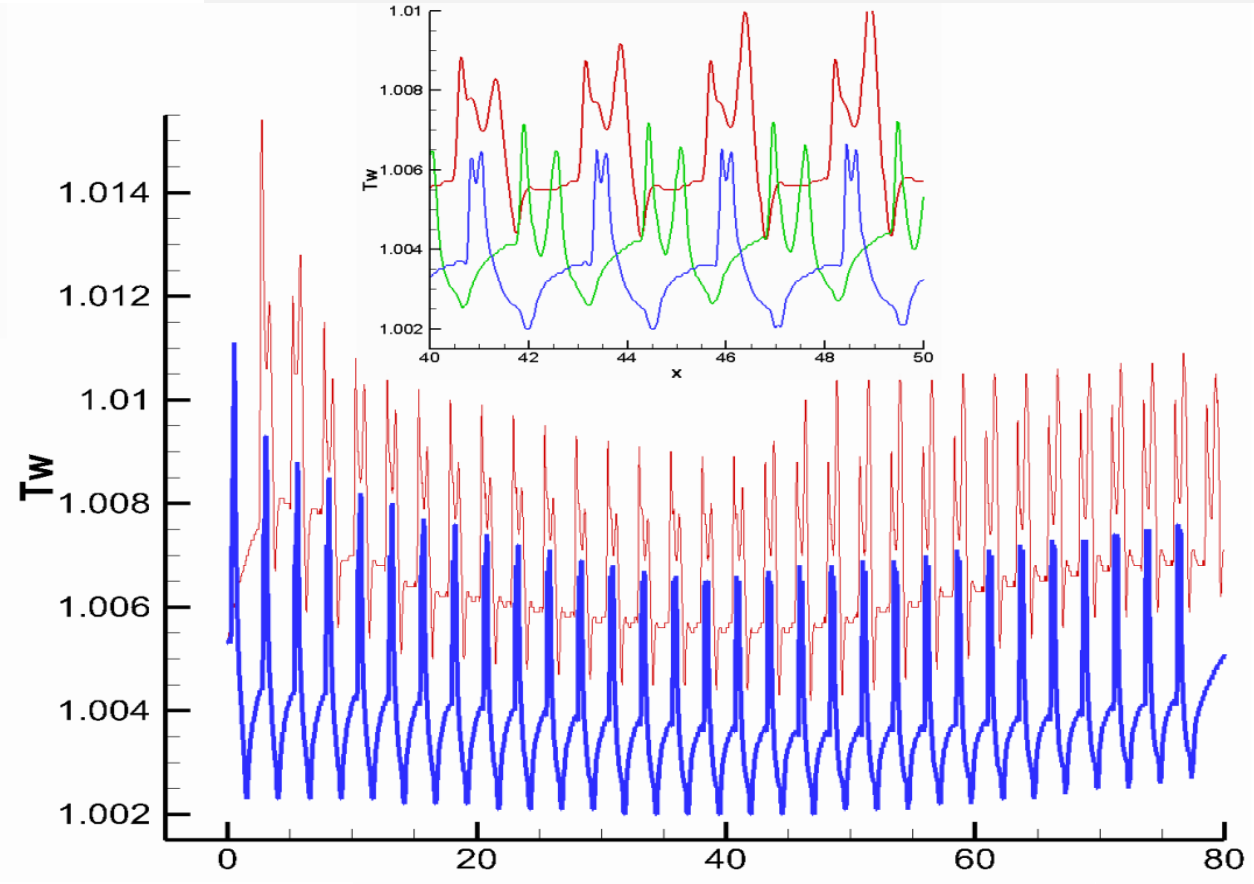
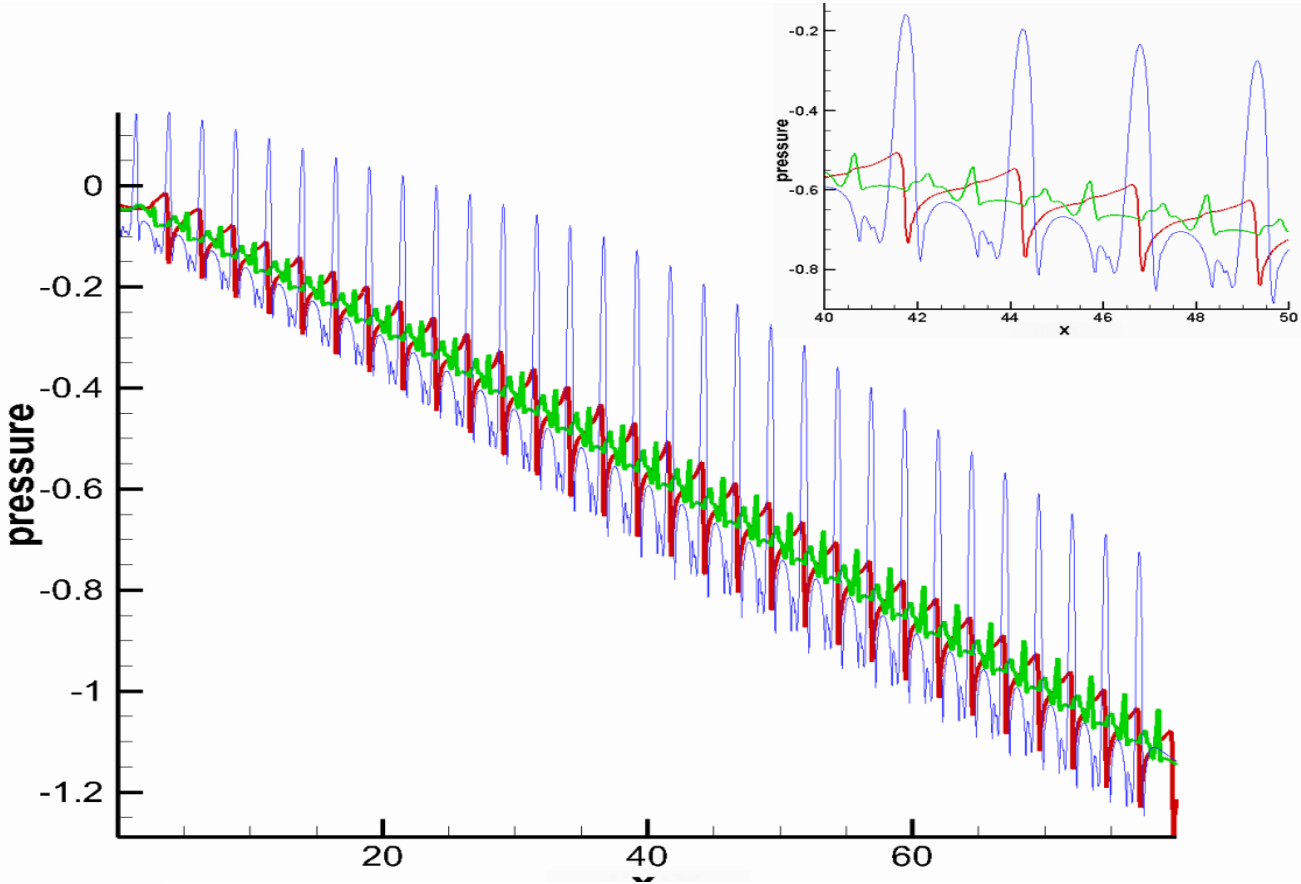


Z=0

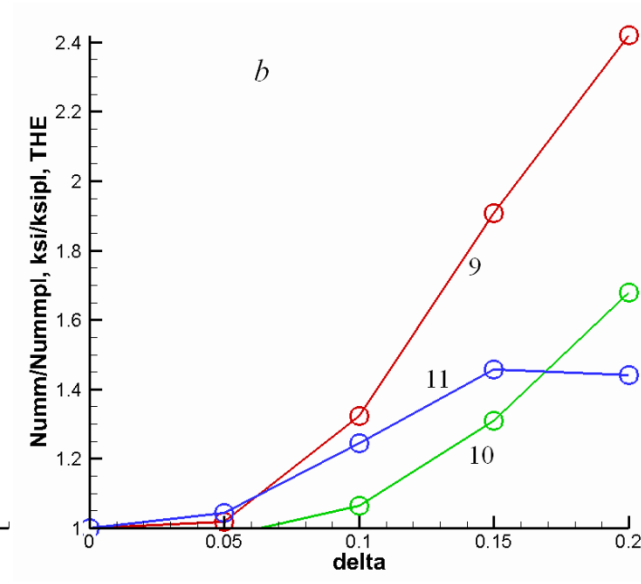
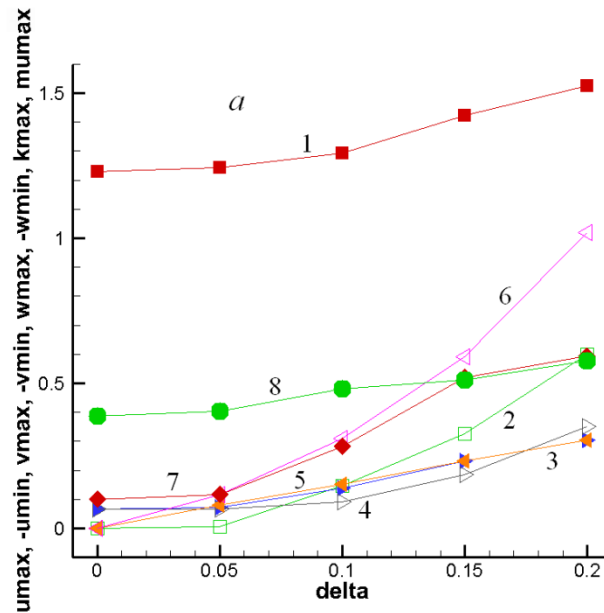
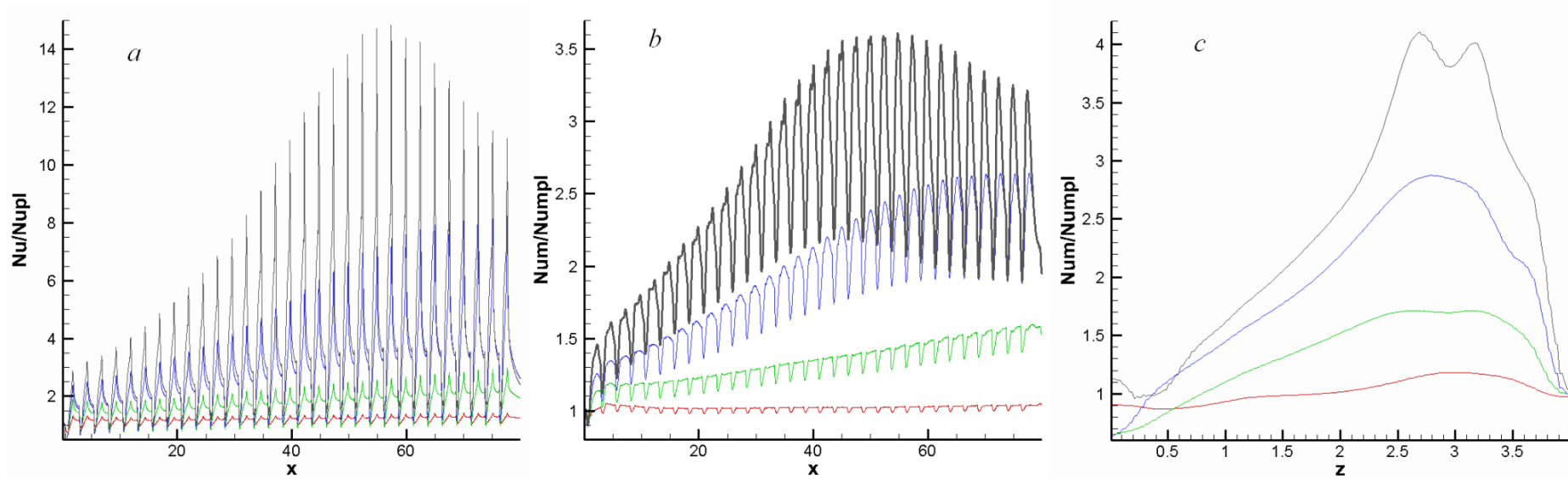


Z=1.25





Влияние $\delta = 0.05, 0.1, 0.15, 0.2$





- 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.



СПАСИБО за ВНИМАНИЕ

Материалы подготовлены при поддержке Российского фонда
фундаментальных исследований и Российского научного Фонда