

Комплекс программ/код VR2/3. Сравнение прогнозов для различных пакетов и сеток с экспериментальными данными

Исаев С.А.¹, Усачов А.Е.², Судаков А.Г.¹,
Михеев Н.И.³, Никущенко Д.В.⁴, Гувернюк С.В.⁵,
Зубин М.А.⁵, Чулюнин А.Ю.⁵

¹ Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации

² Московский комплекс ЦАГИ

³ Казанский научный центр РАН

⁴ Санкт-Петербургский государственный морской технический университет

⁵ Институт механики МГУ им.М.В.Ломоносова

7 CFD Уикенд в ИПМ РАН, 28.11-29.11.2020

Темы

- Проект тестирования кодов, в основном отечественных на задачах вихревой динамики и теплофизики
- Обоснование открытия аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных овално-траншейных лунках (ОТЛ) и ускорения потоков в каналах с облуненными стенками
- RANS + SST-модель с учетом кривизны линий тока, измерения полей давления в наклонной ОТЛ на пластине и на стенке канала (НИИ механики МГУ), пакеты VP2/3, Star CCM+
- VP2/3, многоблочные вычислительные технологии, измерения профилей продольной скорости SIV методом в районе 22 лунки в канале с 26-ю двухрядными ОТЛ

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. MBT(VP2/3)

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

2

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

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

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

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

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

2005

Сергей Исаев
Павел Баранов
Александр Усачев

Многоблочные вычислительные технологии в VP2/3 по аэротермодинамике

Разработка, верификация и применение

2013

Аэродинамика утолщенных тел с вихревыми ячейками

(Численное и физическое моделирование)

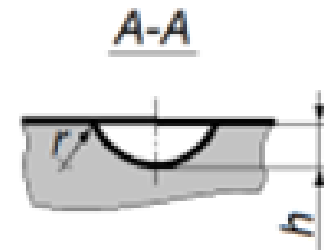
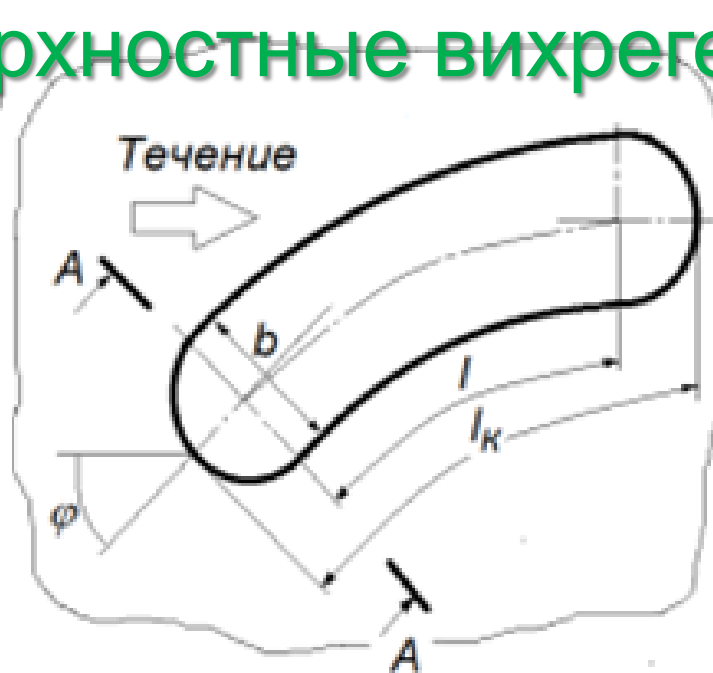
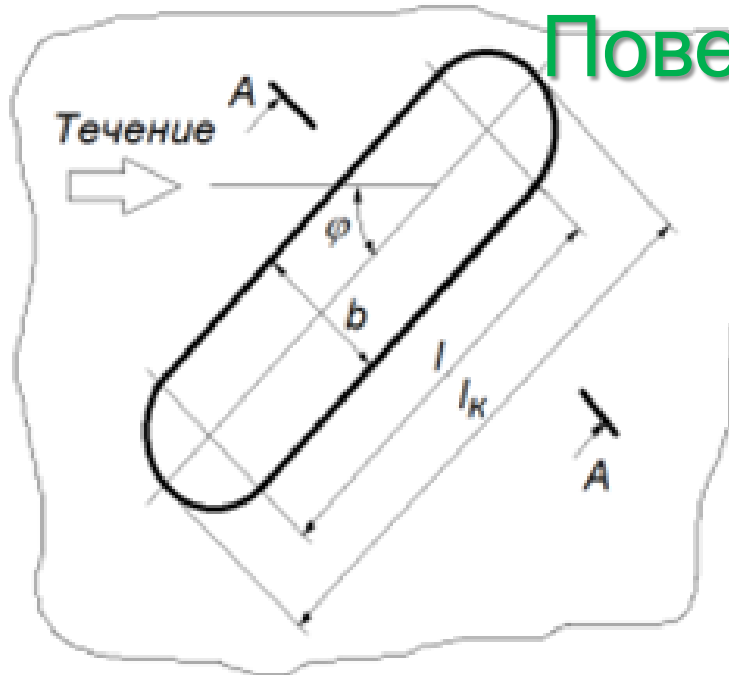
2016

ВИХРЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИКИ

2017

CFD УМКЕНД ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЙ РАИ, 2
29.11.2020

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

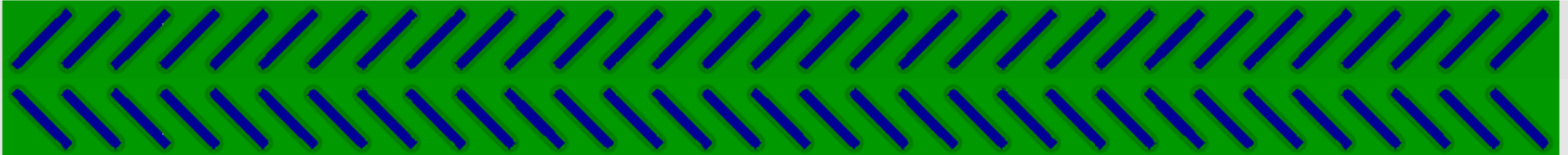
относительное удлинение l по отношению к ширине – важнейший фактор, влияющий на интенсивность формирующихся вихревых структур

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.

РЕЛЬЕФЫ

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



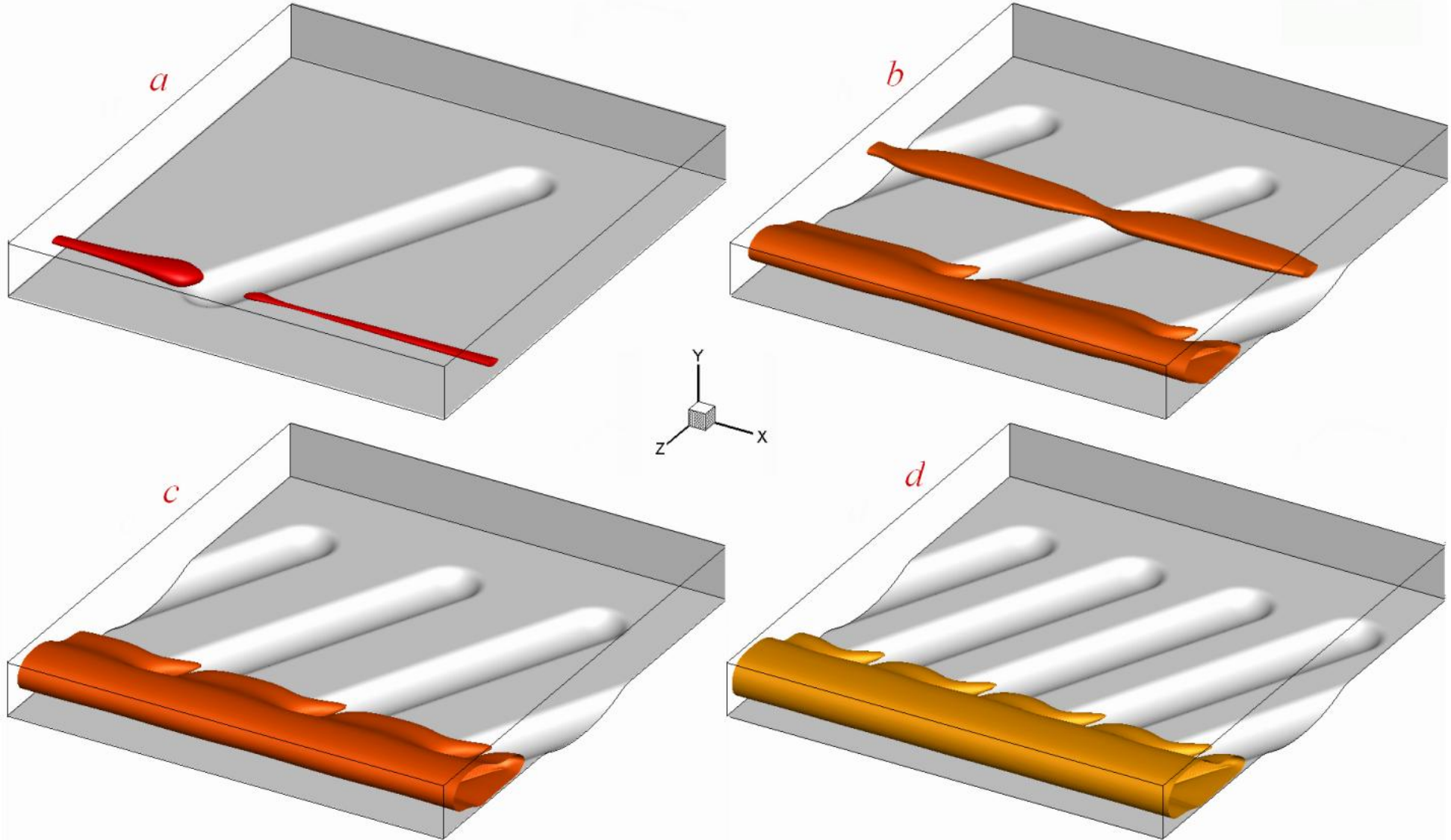
Теплоноситель
Воздух, вода, масло

Воздушные конденсаторы
ЗАО «ТУРБОКОН»

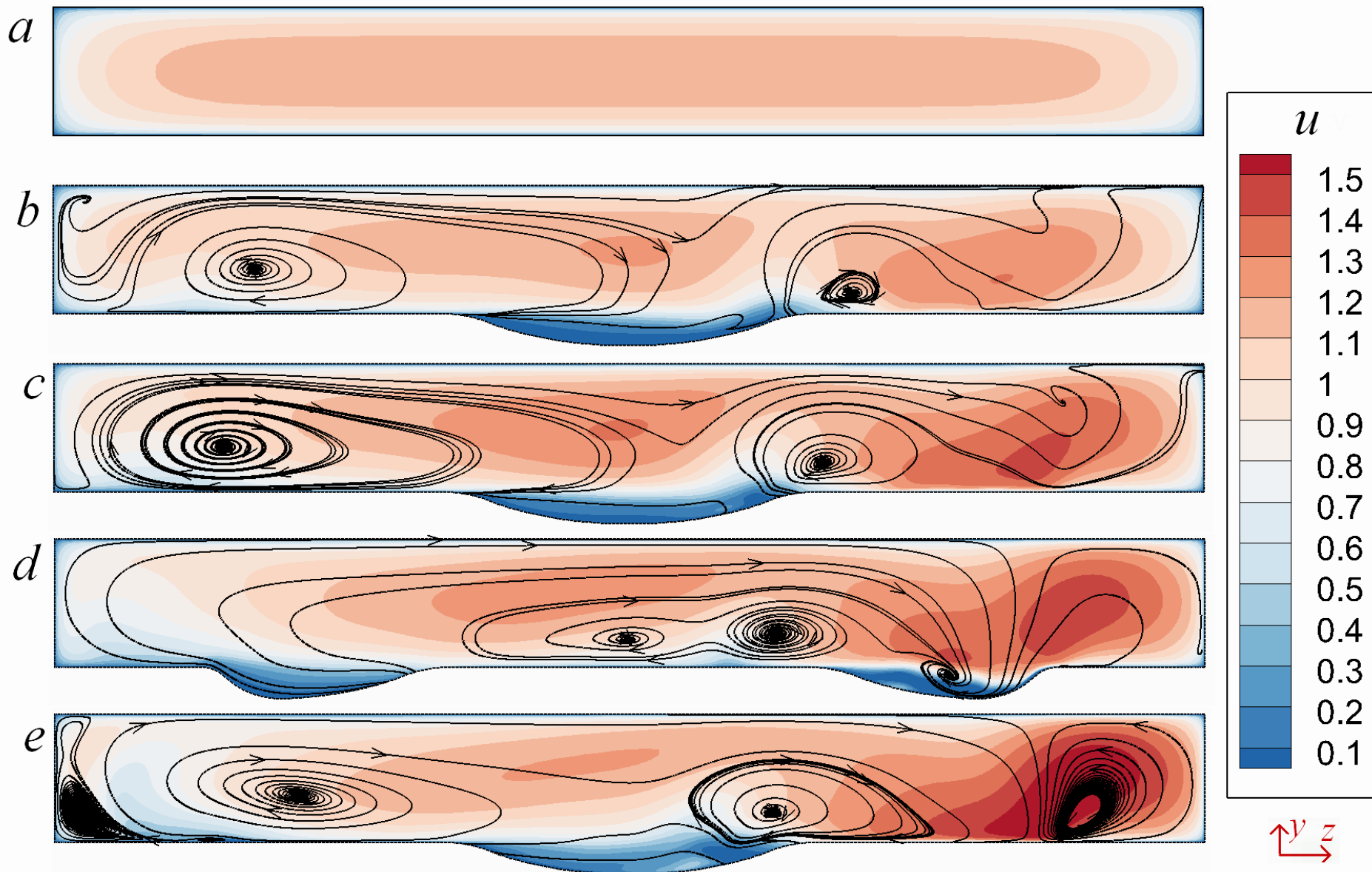
Турбулентные и ламинарные режимы течения
Числа Рейнольдса 10^4 и выше, 1000-1500 и ниже.

Открытие

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.



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*).



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.

Открытие

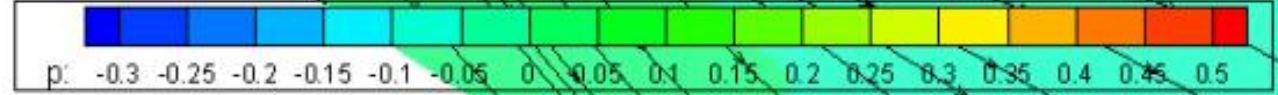
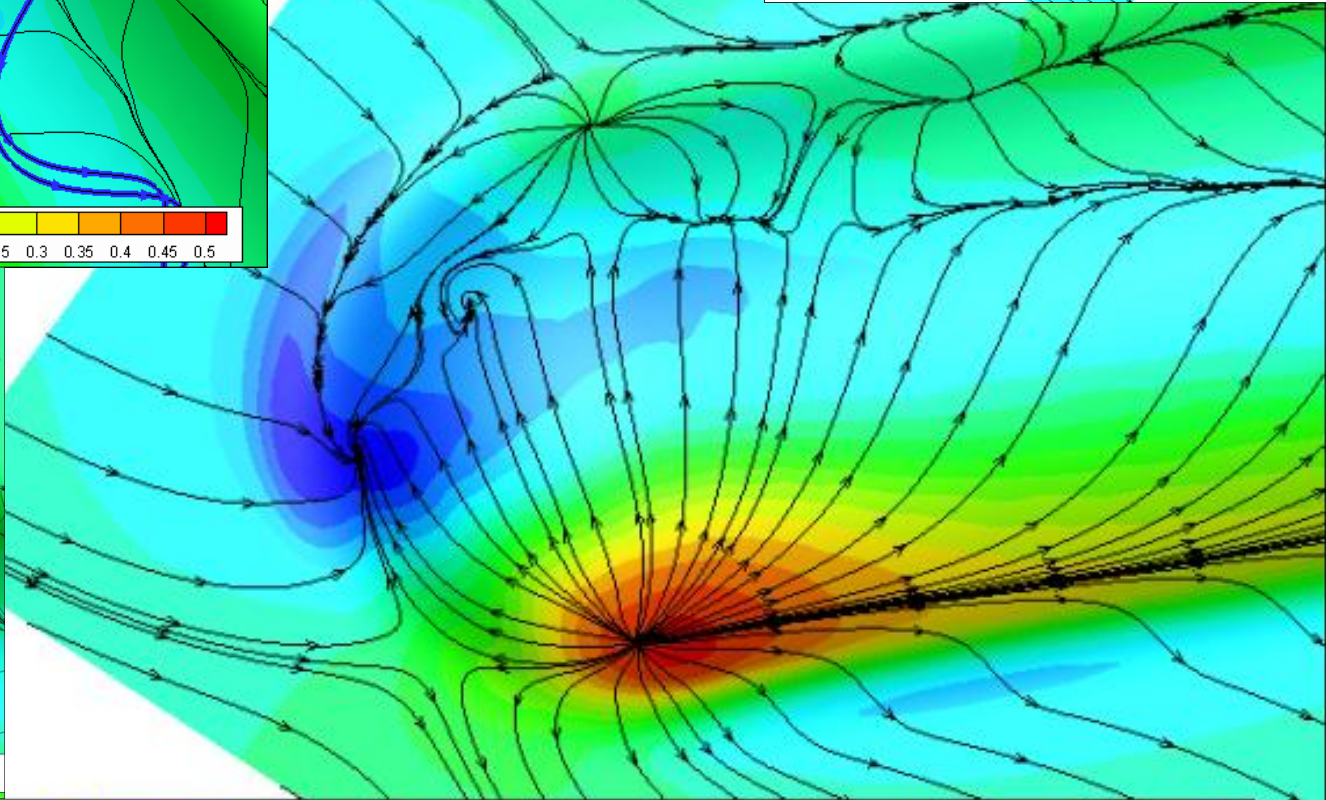
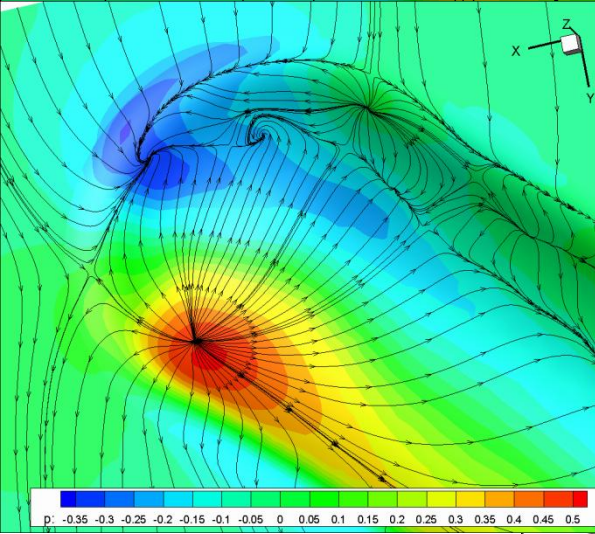
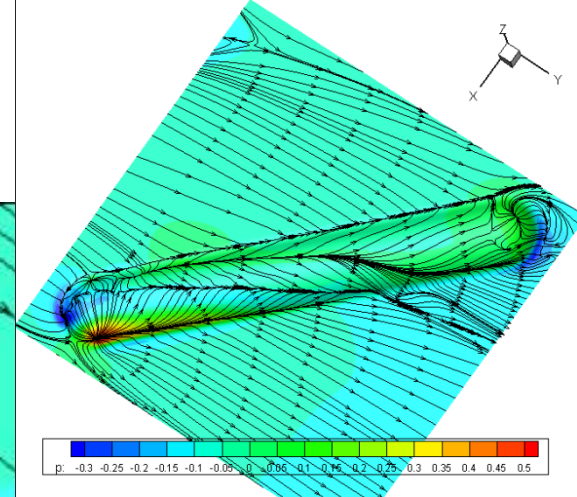
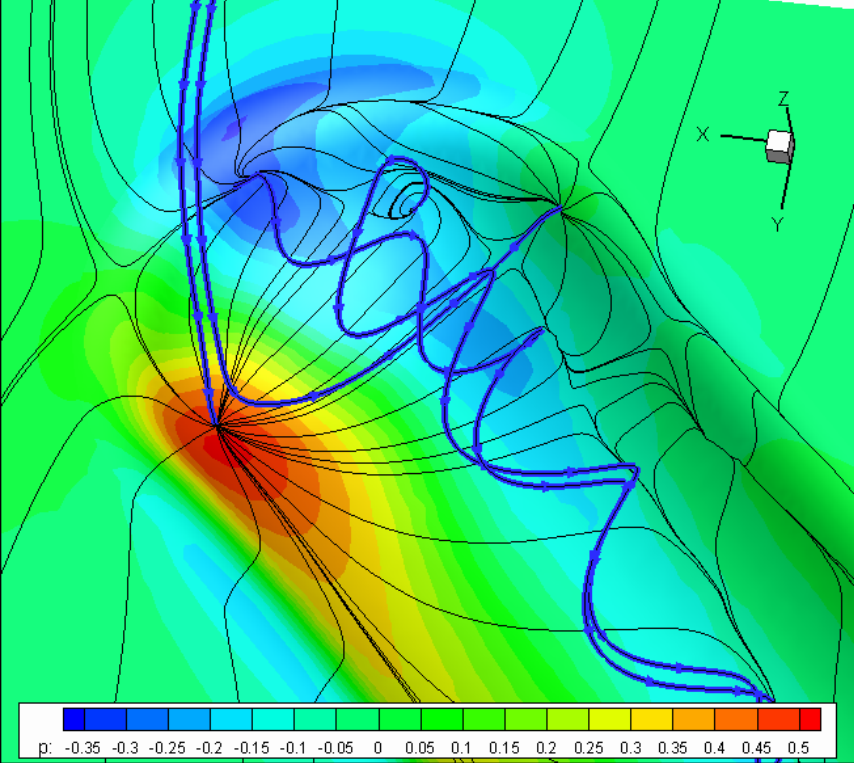
Открыто явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклоненной траншее со сферическими концами в узком канале с однорядными траншейными вихрегенераторами, которое сопровождается многократным увеличением относительного отрицательного трения и локальной теплоотдачи в сравнении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

Угол наклона 45 гр.

$\delta=0.3$

$Re=10000$

Периодическая секция



Объяснение (поверхностное)

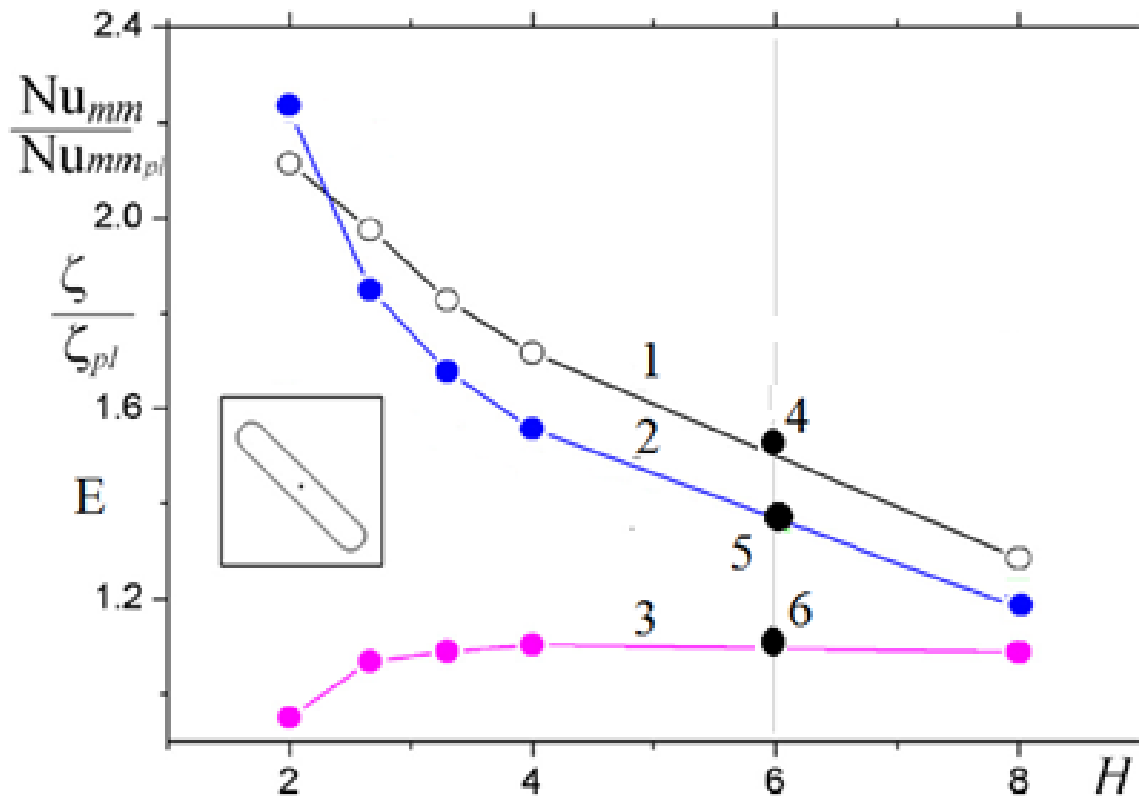
Причина аномальной интенсификации турбулентного отрывного течения и теплообмена в наклоненной овально-траншейной лунке в пакете лунок на стенке узкого канала, сопровождающейся местными скоростями возвратного и вторичного течения, сравнимыми с характерной скоростью и сопоставимыми с максимальной скоростью в плоскопараллельном узком канале, многократным превышением величин относительного отрицательного трения и локальных чисел Нуссельта над аналогичными характеристиками для плоскопараллельного канала, заключается в экстремально большом перепаде статического давления между близко расположенными зонами торможения втекающего в лунку внешнего потока и разрежения в месте генерации спиралевидного вихря!!!

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.

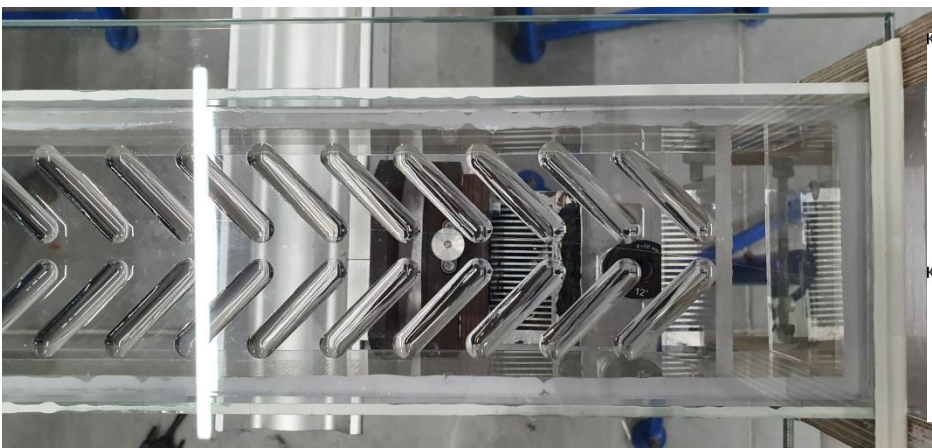
С.А. Исаев, М.С. Грицкевич, А.И. Леонтьев, О.О. Мильман, Д.В. Никущенко, Ускорение турбулентного потока в узком облуненном канале и интенсификация отрывного течения при уплотнении однорядных наклоненных овально-траншейных лунок на стенке, Теплофизика и аэромеханика 26 (5) (2019) 697-702.

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). P. 1-13.

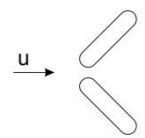


Зависимость относительной теплоотдачи Nu_{mm}/Nu_{mmpl} (1), относительного прироста гидравлического сопротивления ζ/ζ_{pl} (2) и теплогидравлической эффективности $E=(Nu_{mm}/Nu_{mmpl})/(\zeta/\zeta_{pl})$ (3) по длине периодической секции с овално-траншейными выемками от относительного шага нанесения выемок H . Точки 4,5,6 – соответственно относительная теплоотдача, прирост гидравлического сопротивления и теплогидравлическая эффективность, полученная в ходе эксперимента (КНИТУ-КАИ). Индекс pl соответствует характеристикам плоскопараллельного канала.

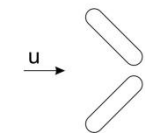
Экспериментальная установка в КазНЦ РАН (Михеев Н.И., Душин Н.С.)



клин навстречу потоку

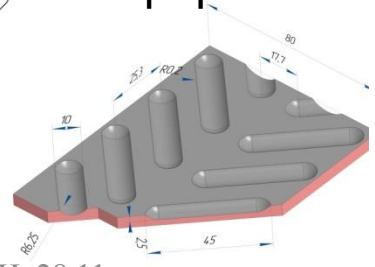


клин по потоку

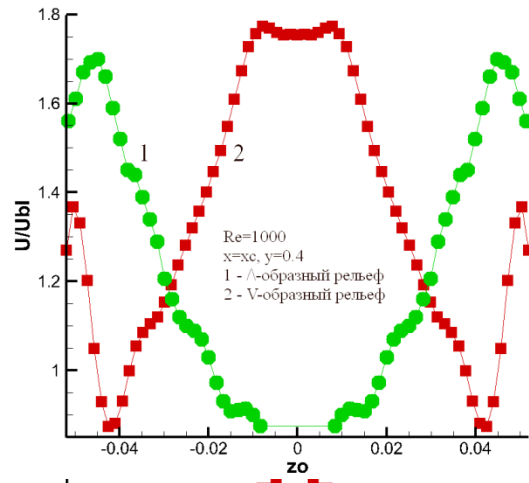


V-форма

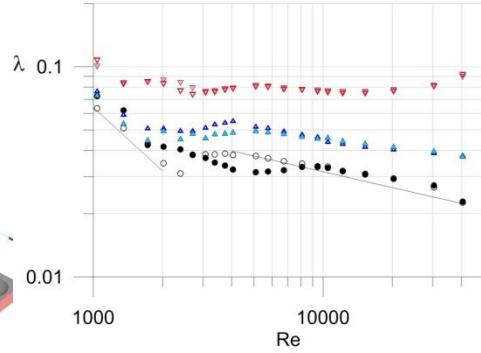
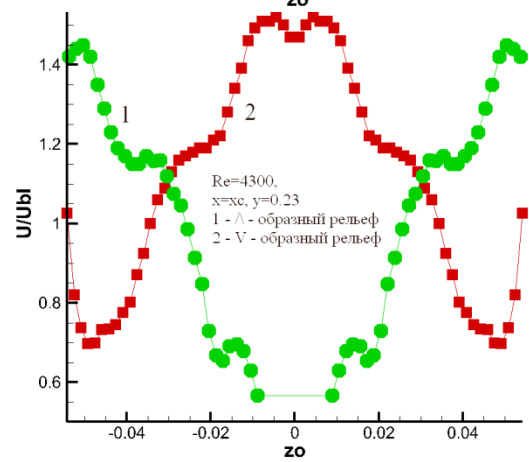
Л-форма



Л.р.



Т.р.

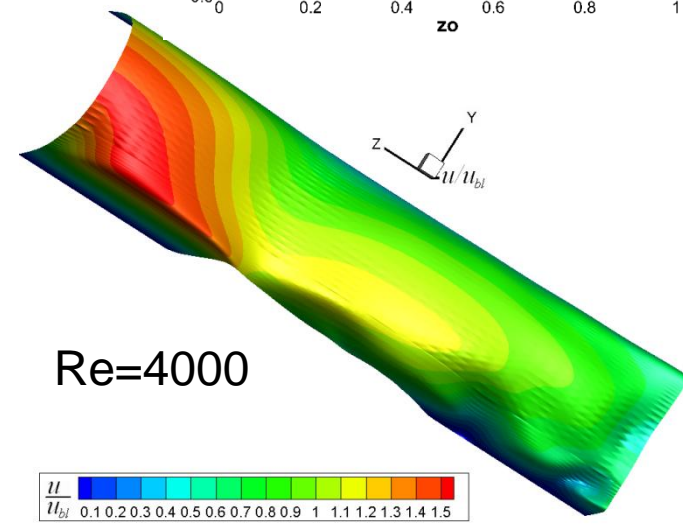
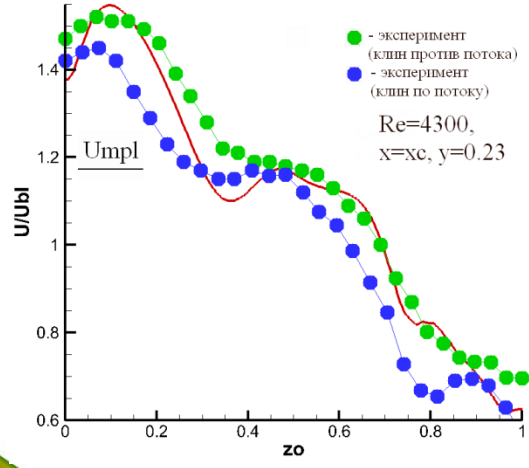
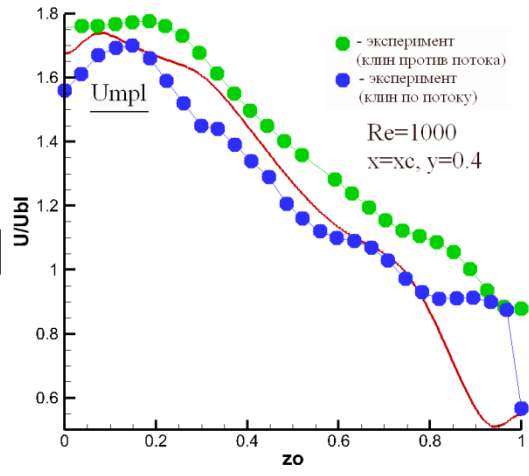
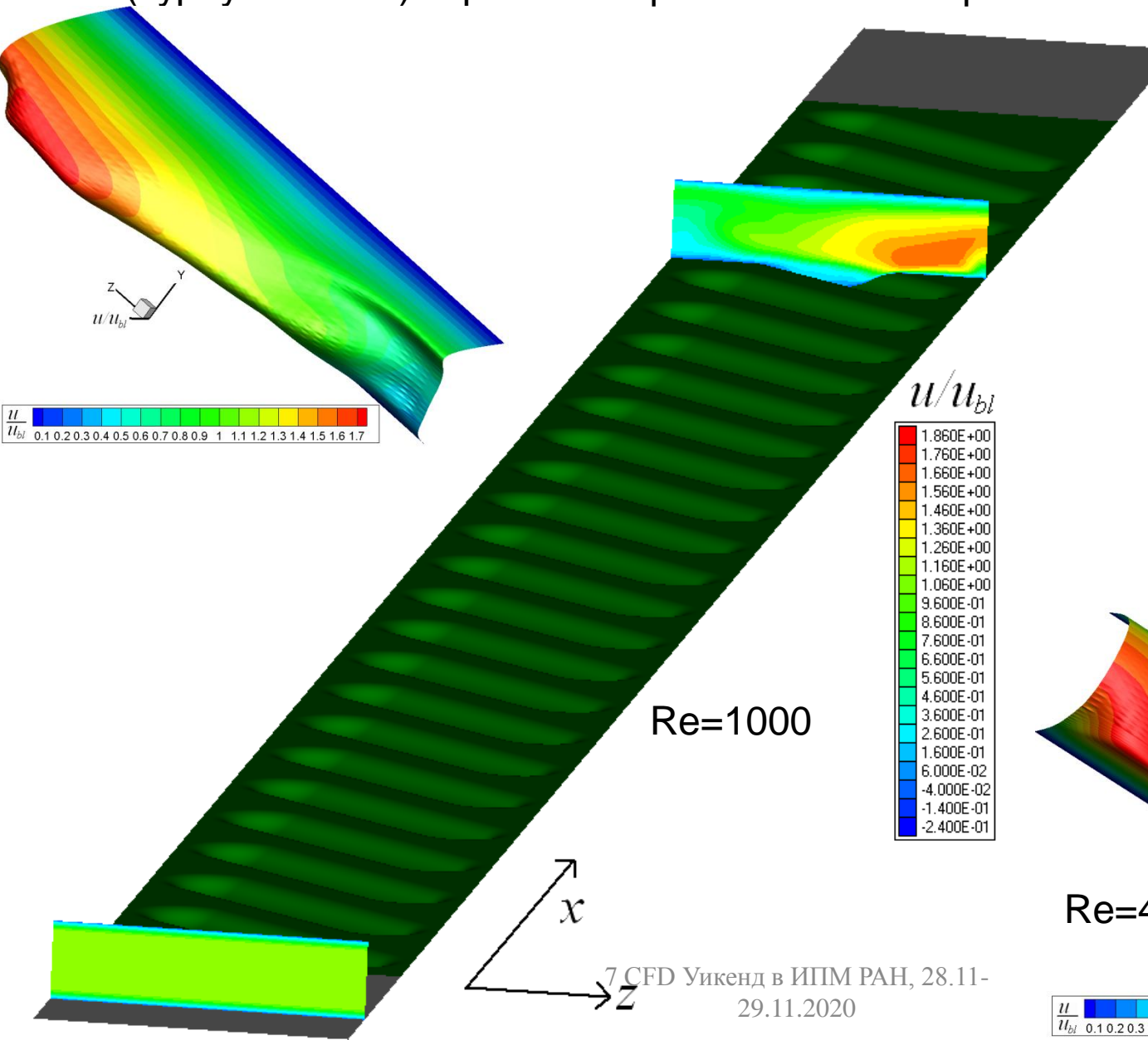


- гладкий канал с плавным входом
- гладкий канал без плавного входа
- △ лунки без плавного входа (клин навстречу потоку)
- ▲ лунки с плавным входом (клин навстречу потоку)
- ▽ лунки без плавного входа (клин по потоку)
- ▼ лунки с плавным входом (клин по потоку)

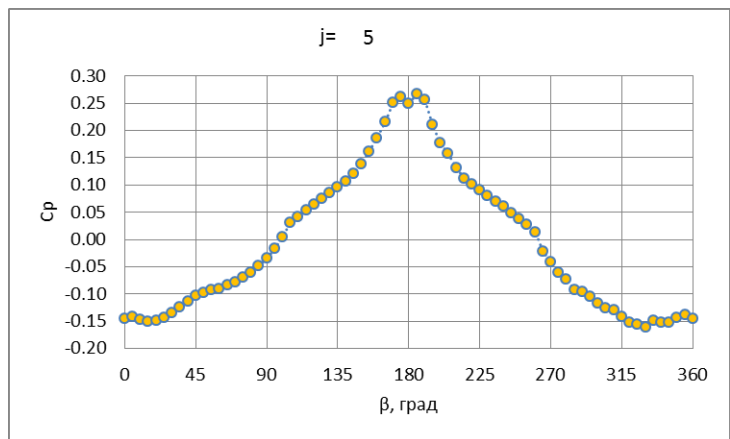
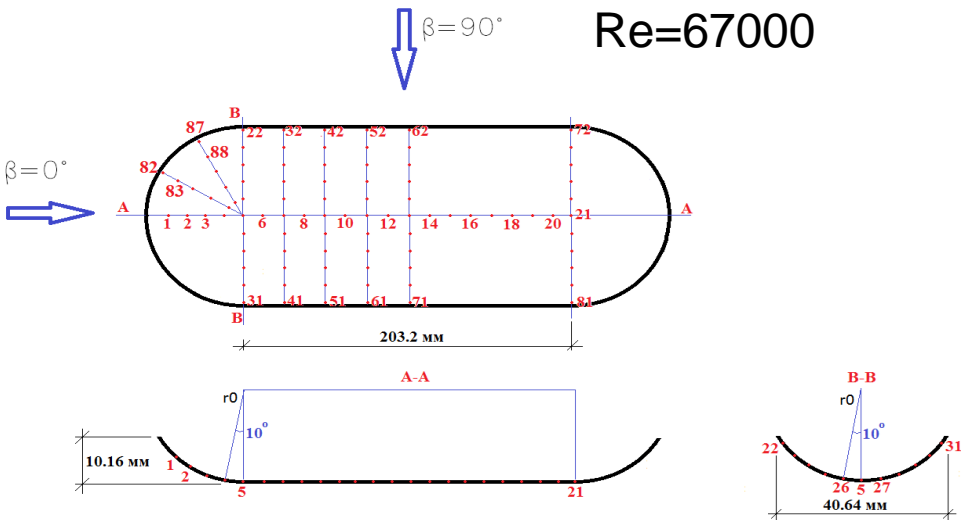
Диагностика полей осредненных и пульсационных составляющих скорости SIV методом (22 лунка)

7 CFD Уикенд в ИПМ РАН, 28.11-29.11.2020

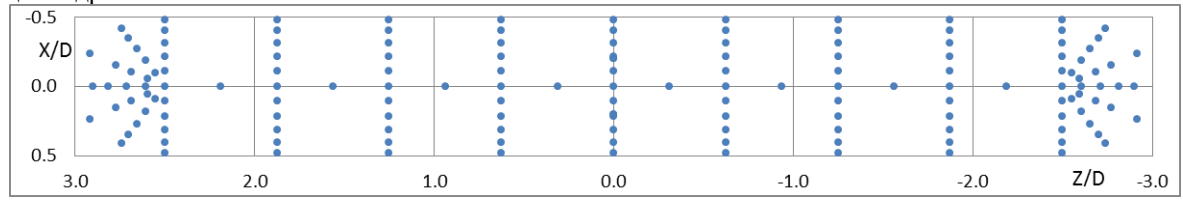
Компьютерный аналог установки (упрощенный): канал с боковыми гранями симметрии. $Re=1000$ (ламинарный) и 4000 (турбулентный). Сравнение расчетов и экспериментов

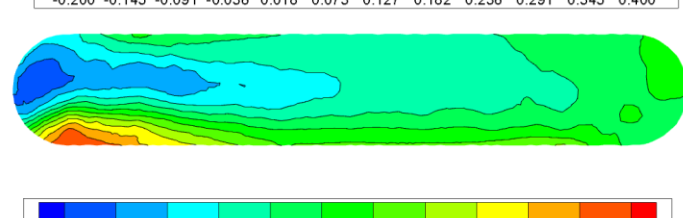
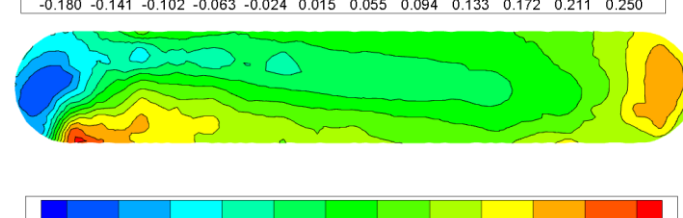
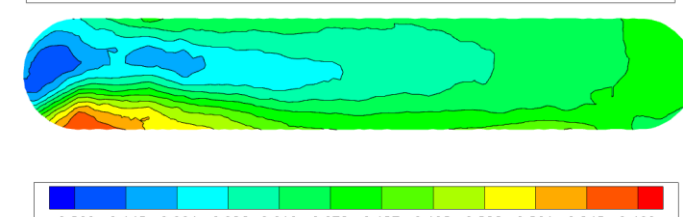
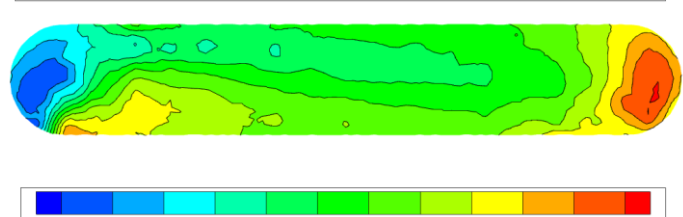
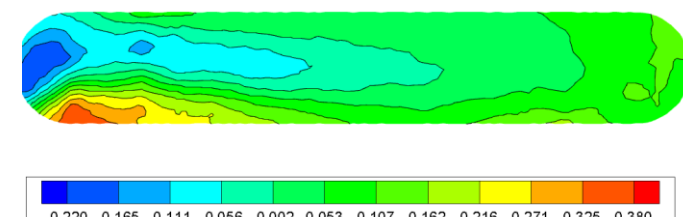
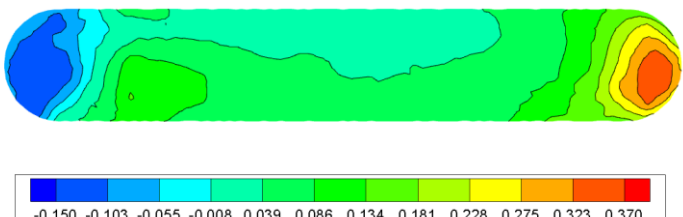
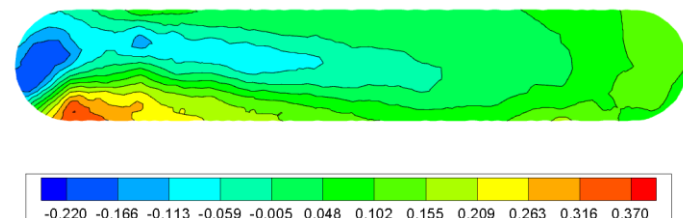
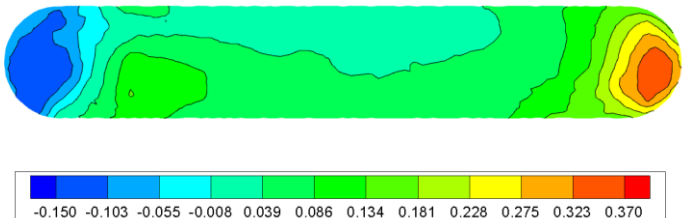
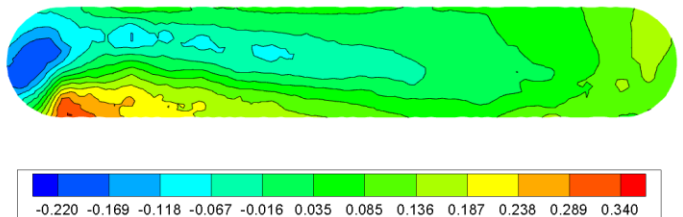
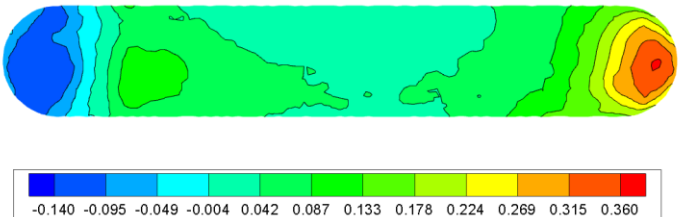
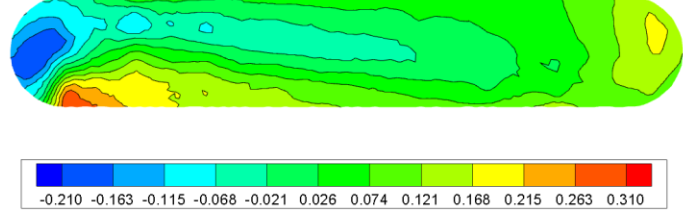
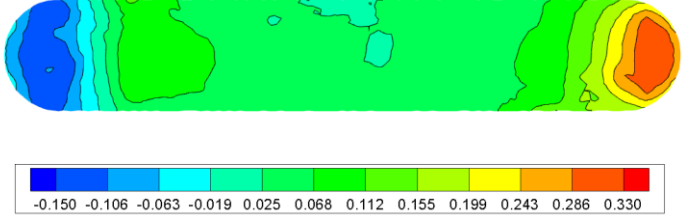


Экспериментальное и расчетное исследование влияния угла скольжения на интенсивность отрывного течения внутри наклонной овально-траншейной лунки умеренной глубины 0.25 в трубе А-4 НИИ механики МГУ



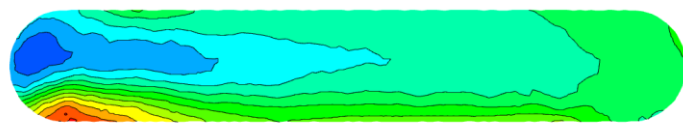
Контрольная точка №5 на стыке сферического скругления и цилиндрической вставки в продольной плоскости симметрии ОТЛ



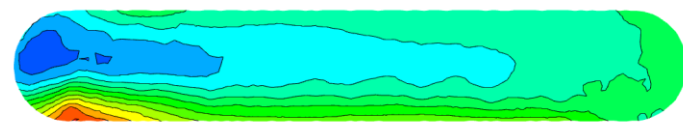
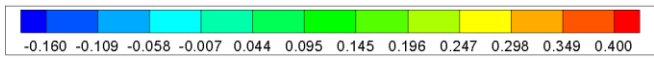


7 CFD

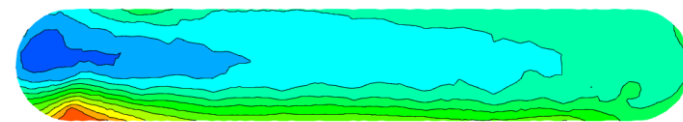
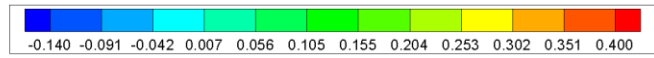
29.11.2020



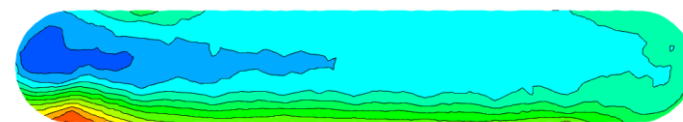
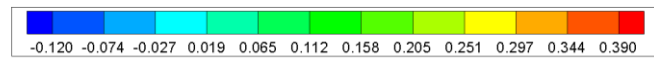
$\varphi = 60^\circ$



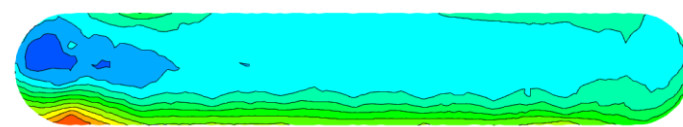
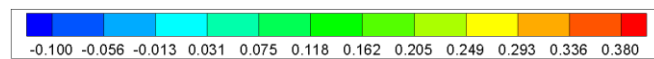
$\varphi = 65^\circ$



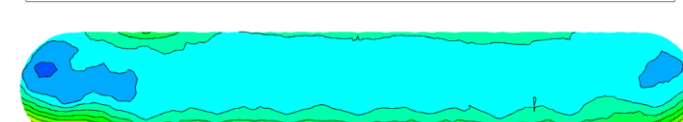
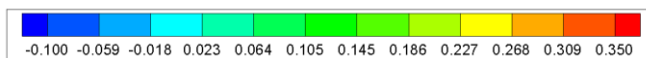
$\varphi = 70^\circ$



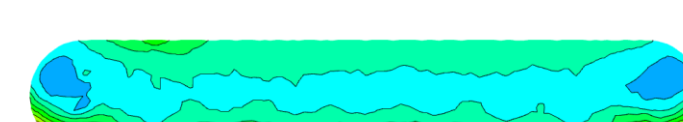
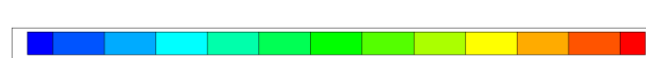
$\varphi = 75^\circ$



$\varphi = 80^\circ$



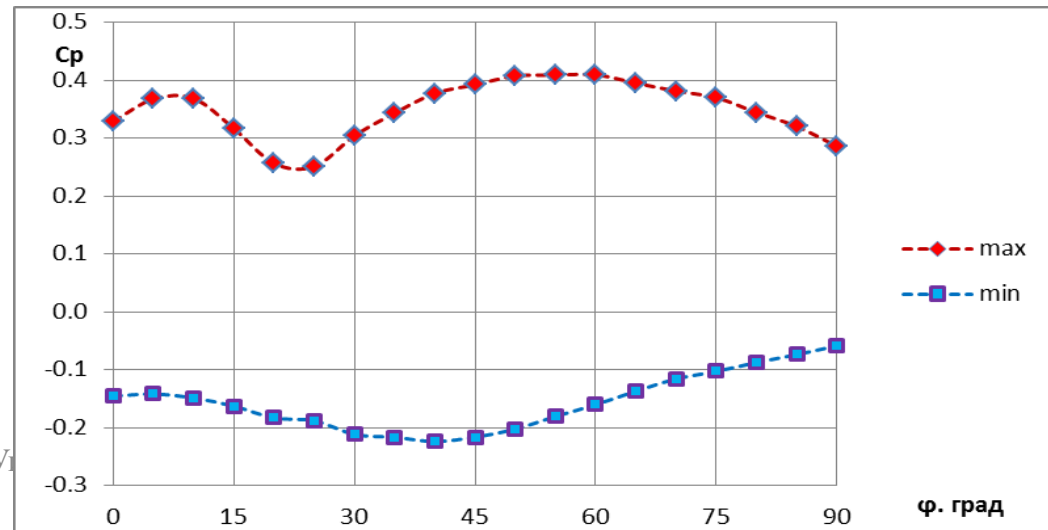
$\varphi = 85^\circ$



$\varphi = 90^\circ$



Выводы: Значительный перепад давления наблюдается в диапазоне $25^\circ < \varphi < 85^\circ$

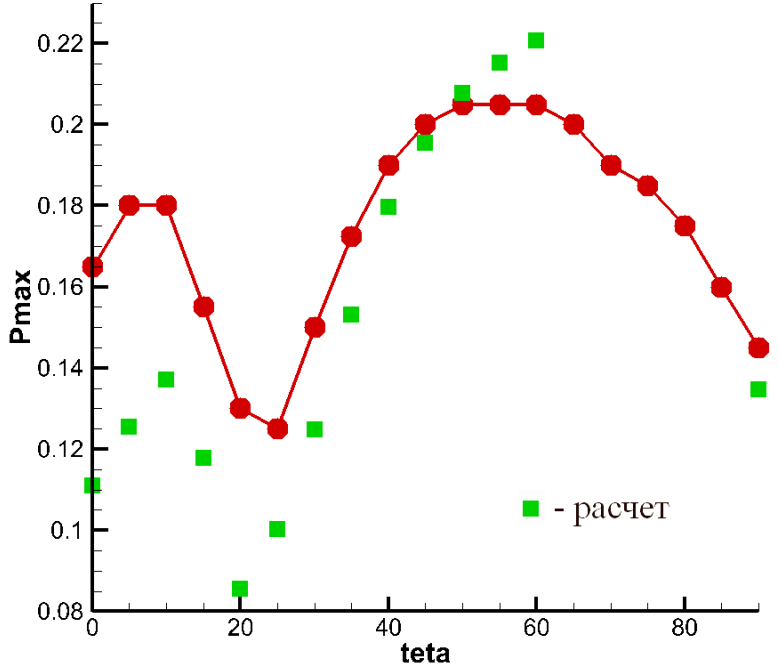
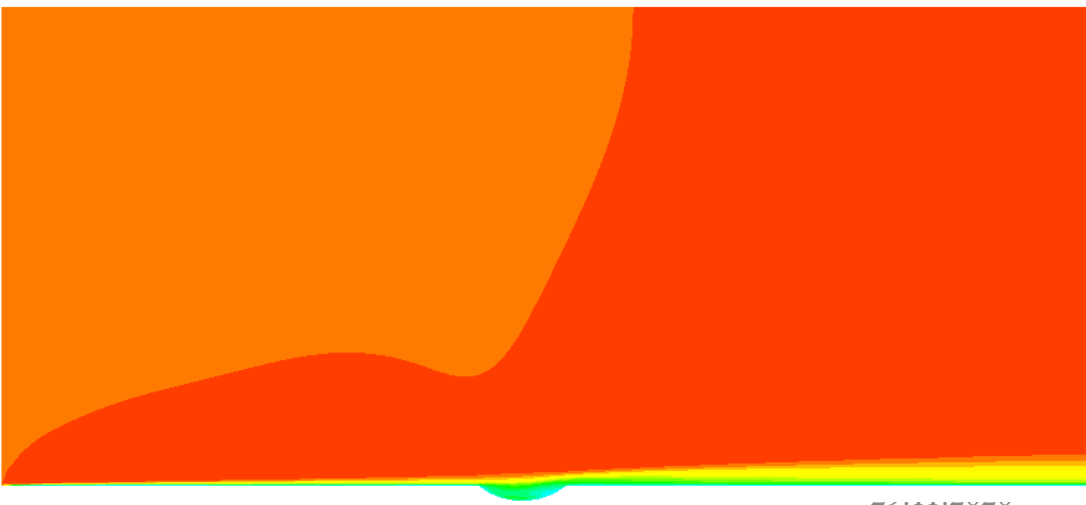
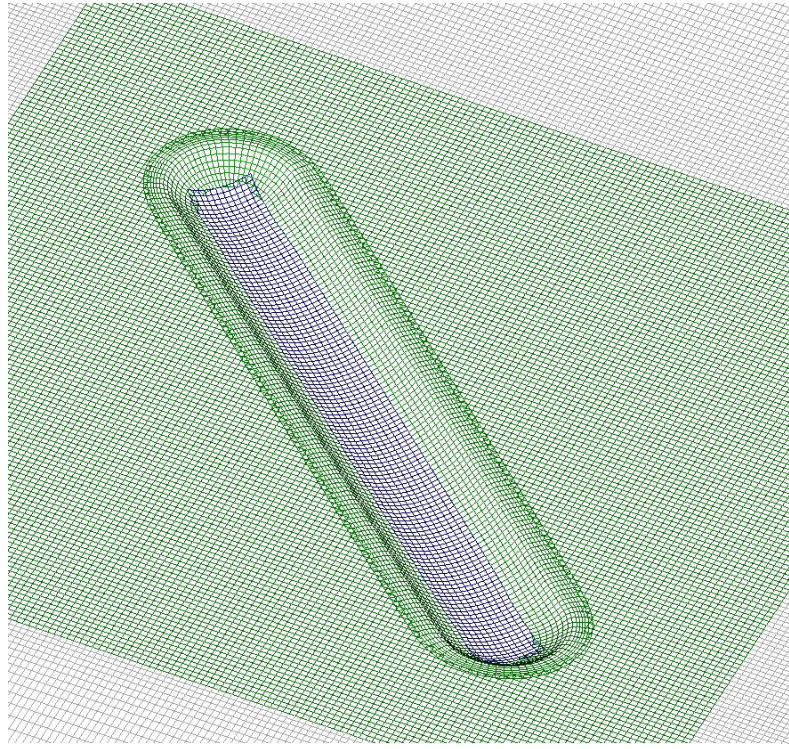
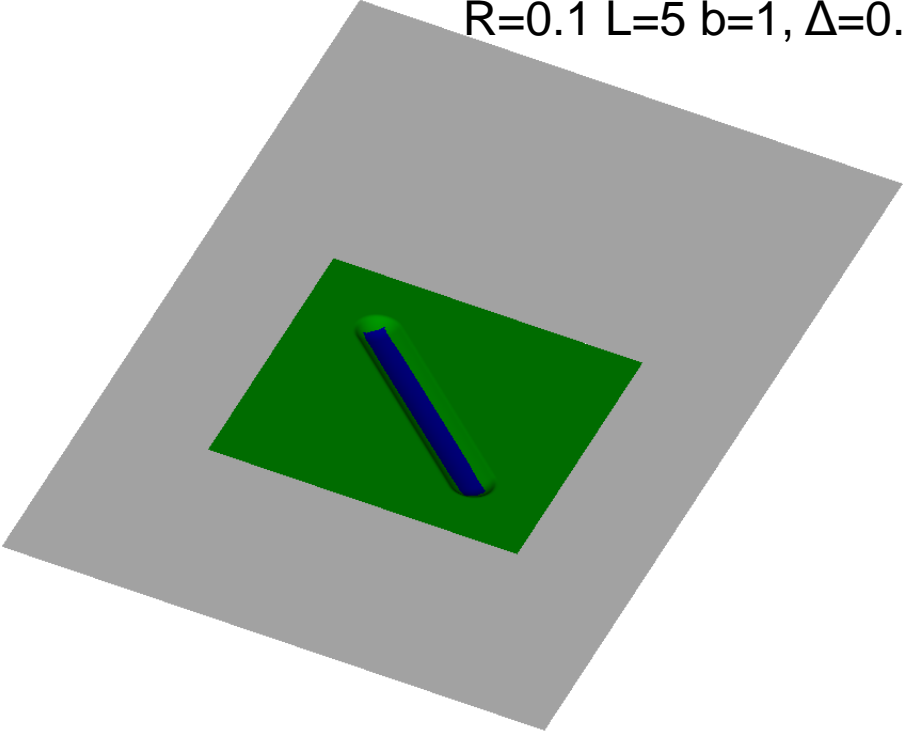


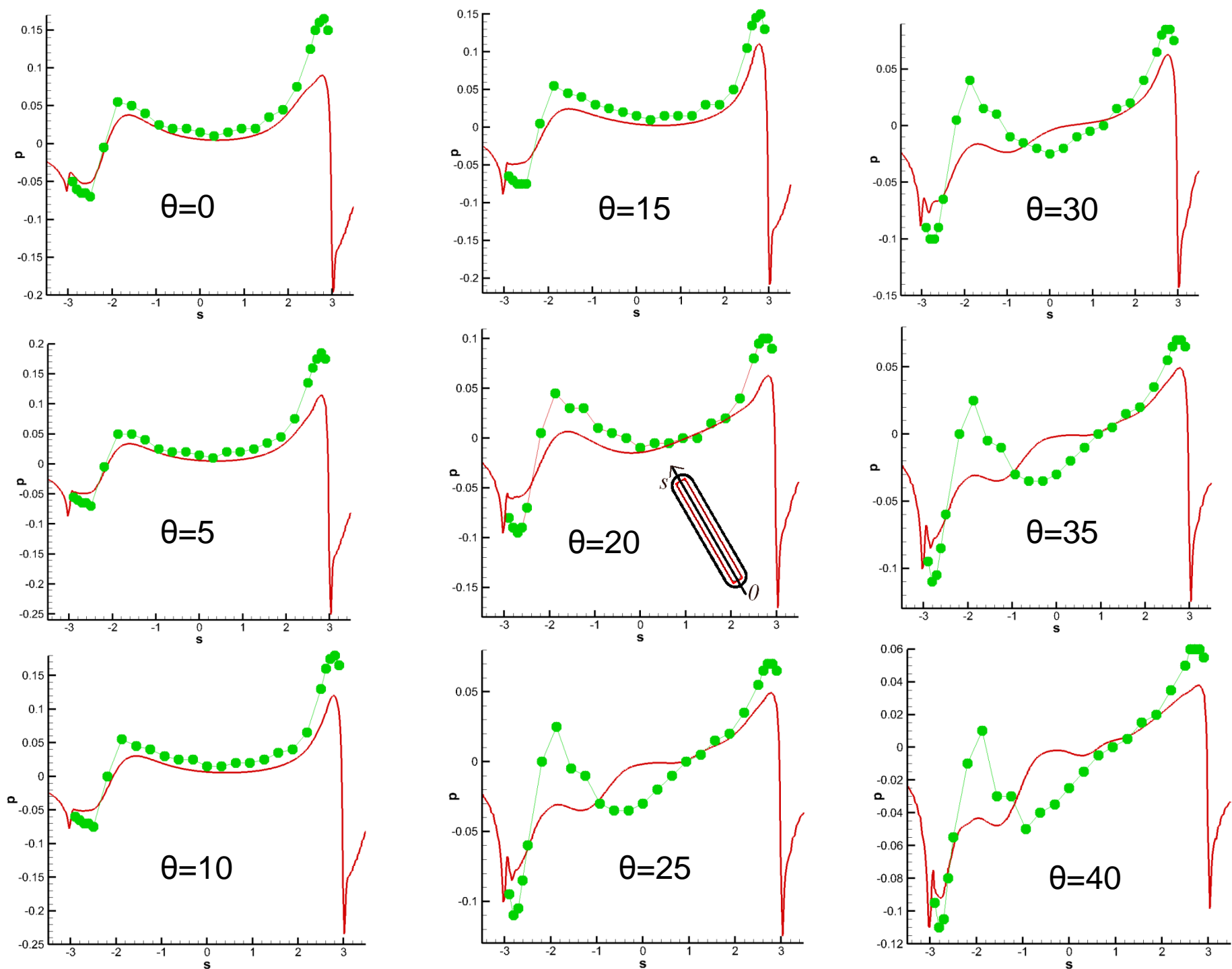
$C_p = -0.22$ наблюдается в диапазоне $40^\circ < \varphi < 45^\circ$

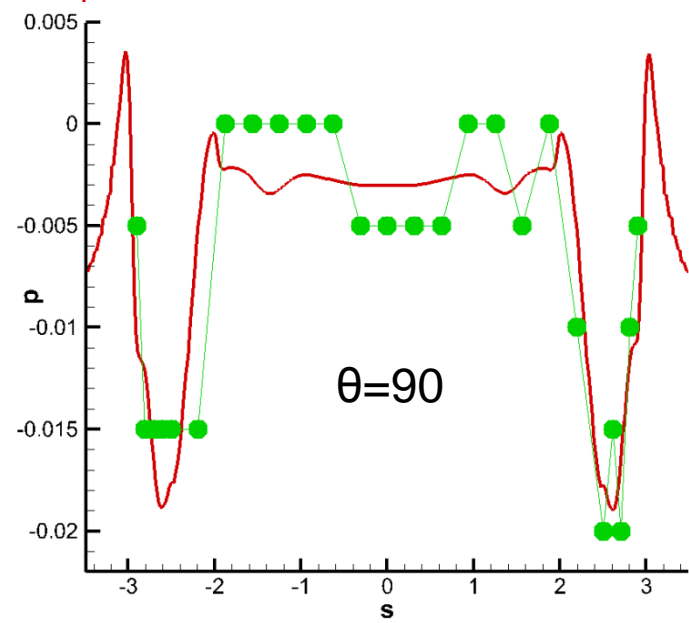
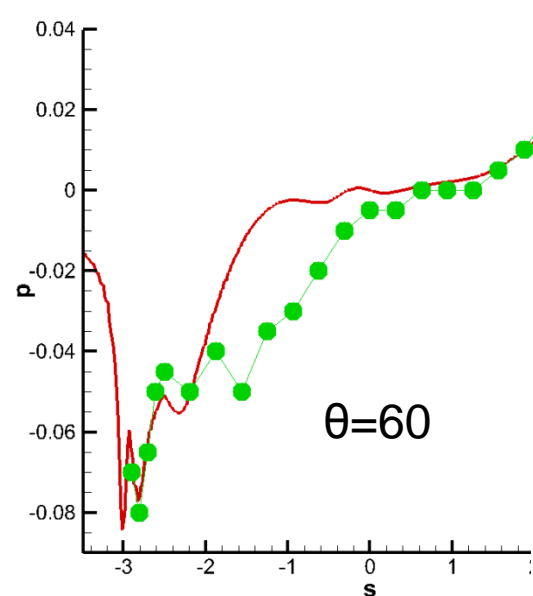
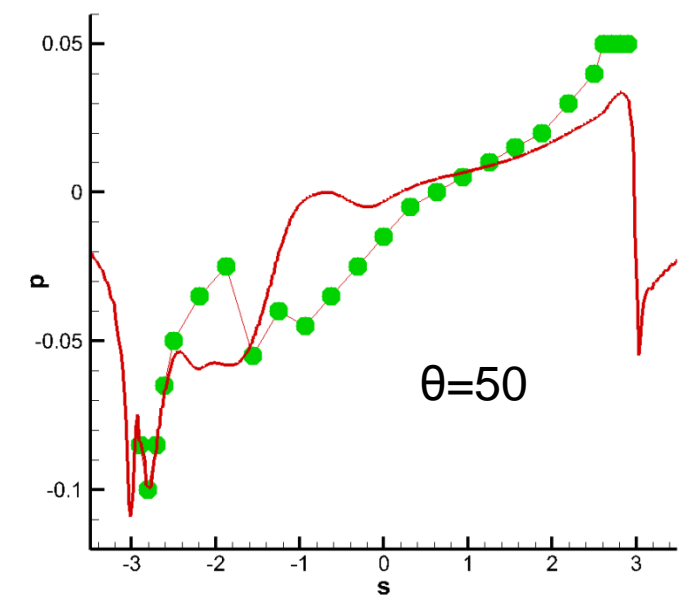
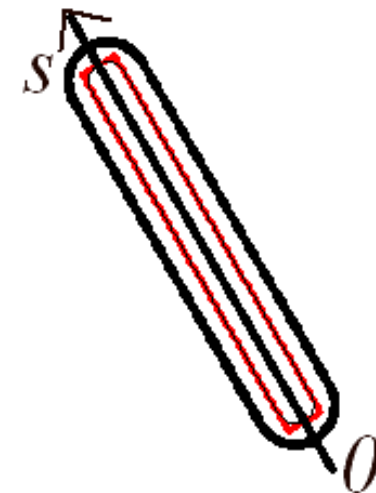
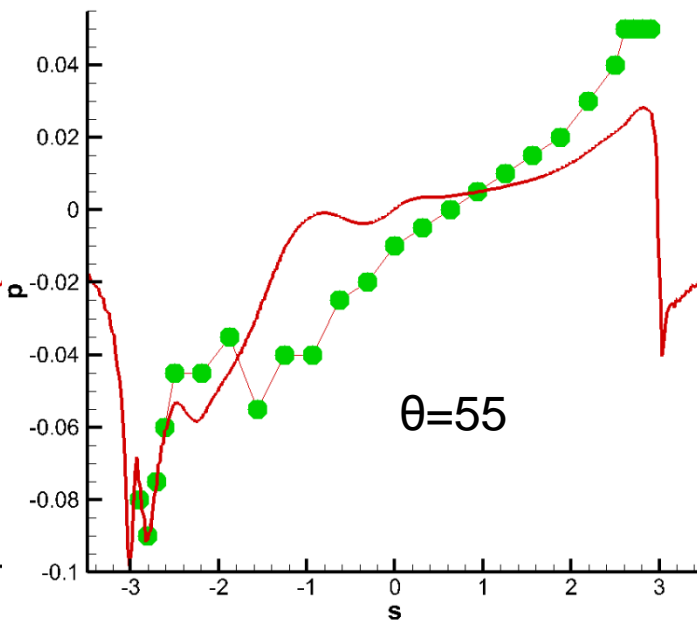
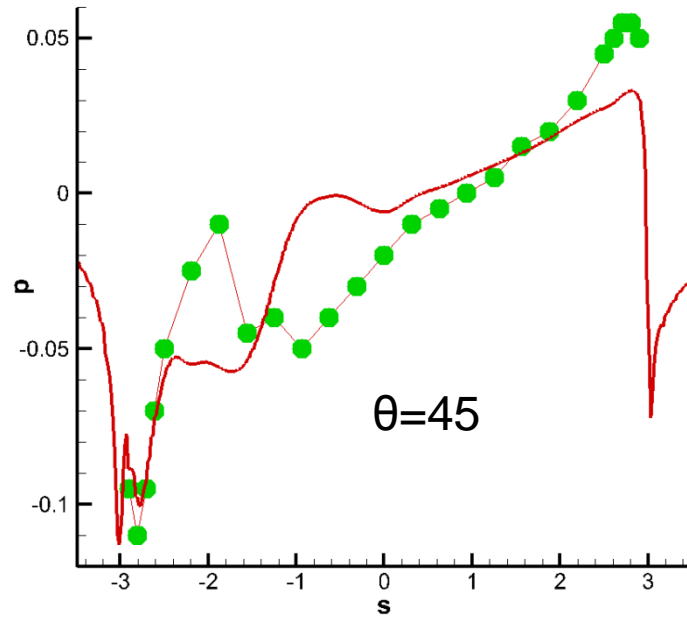
$C_p = 0.41$ наблюдается в диапазоне $55^\circ < \varphi < 60^\circ$

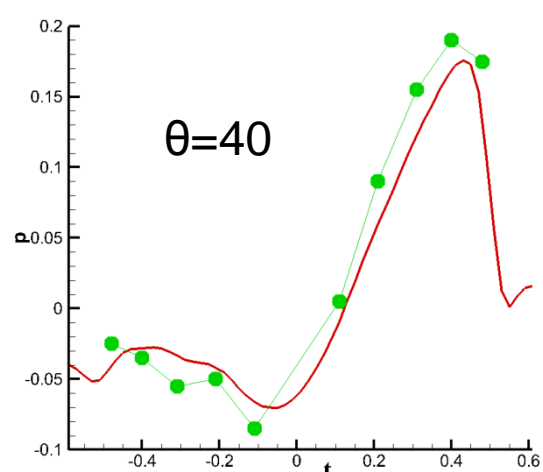
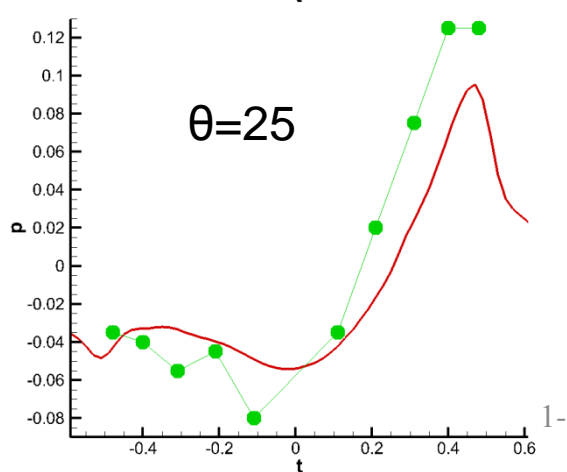
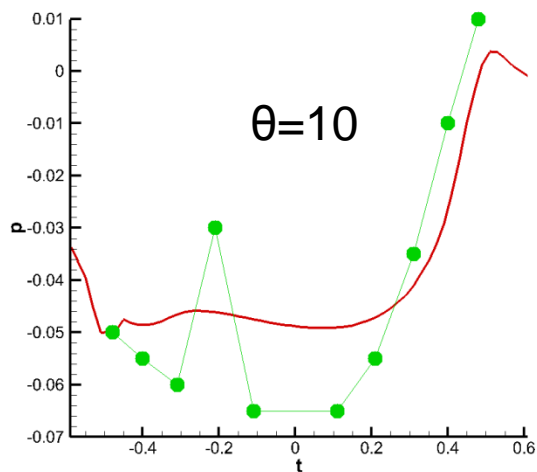
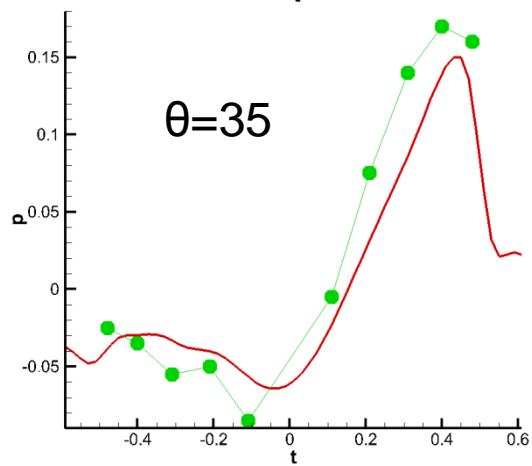
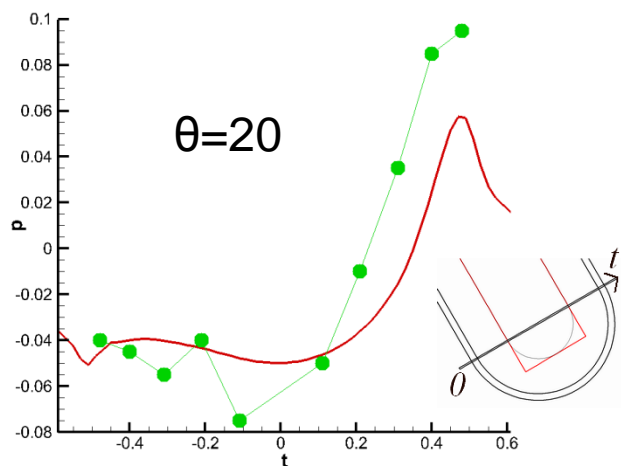
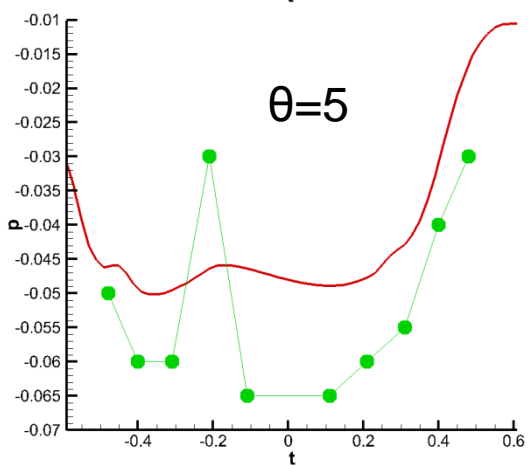
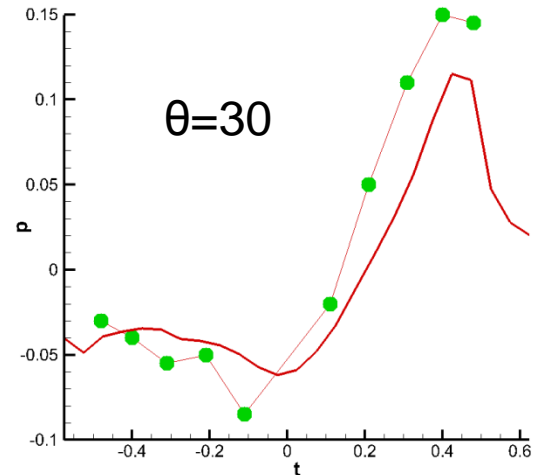
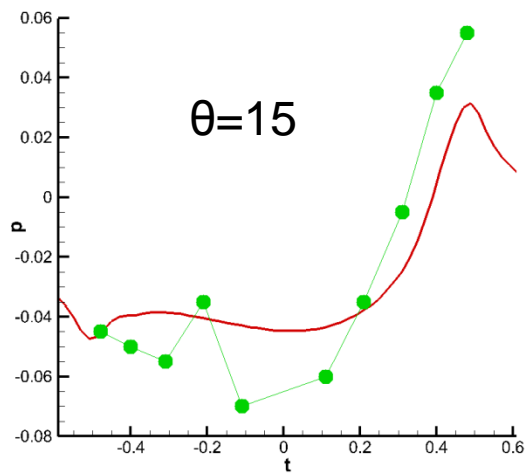
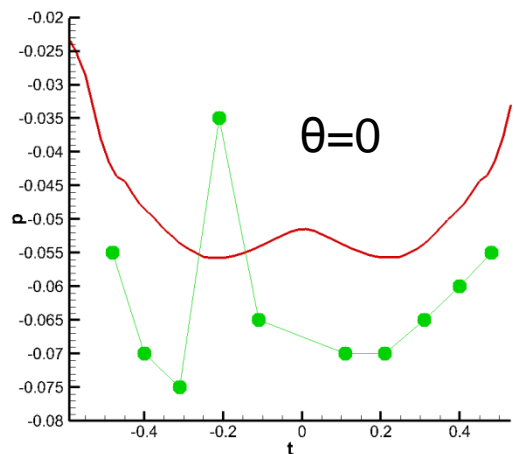
Численное моделирование турбулентного пристеночного течения при $Re=10000$

$R=0.1$ $L=5$ $b=1$, $\Delta=0.25$









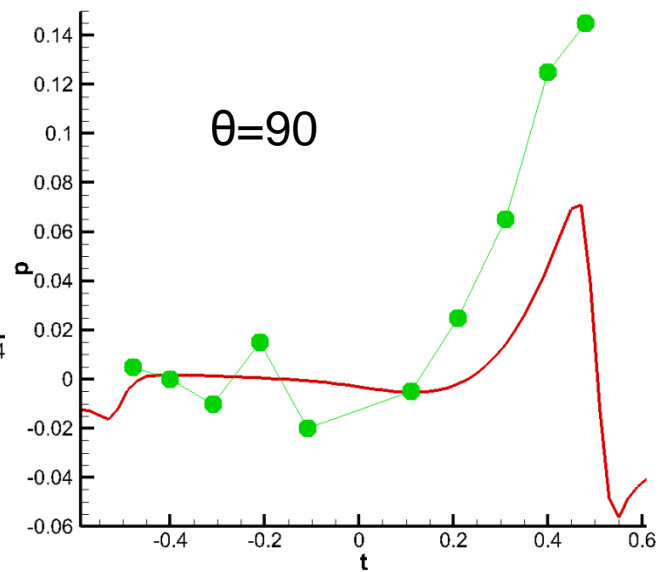
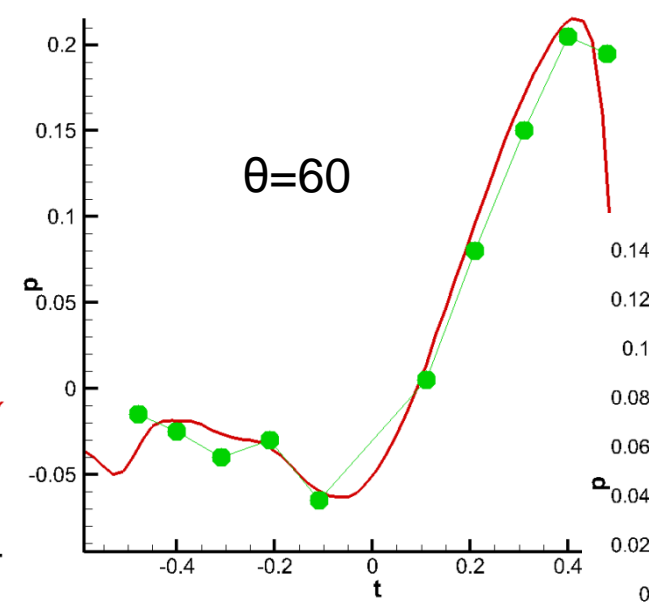
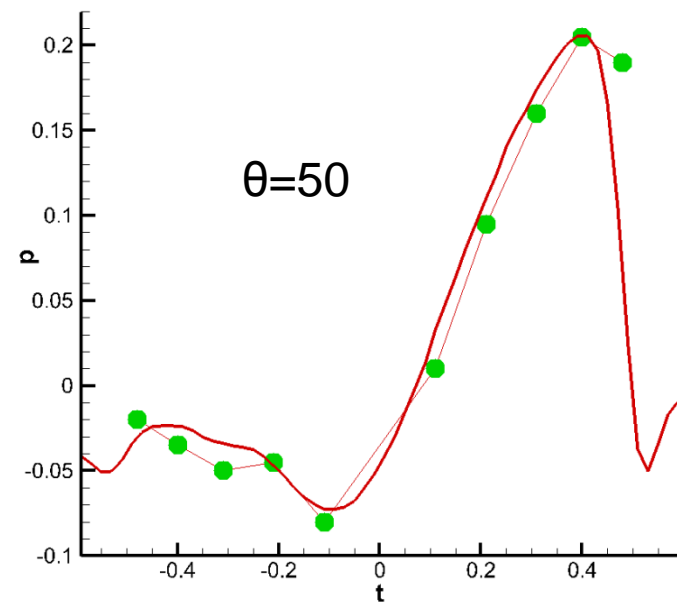
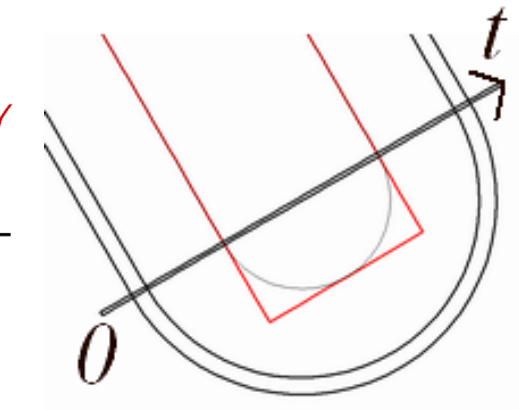
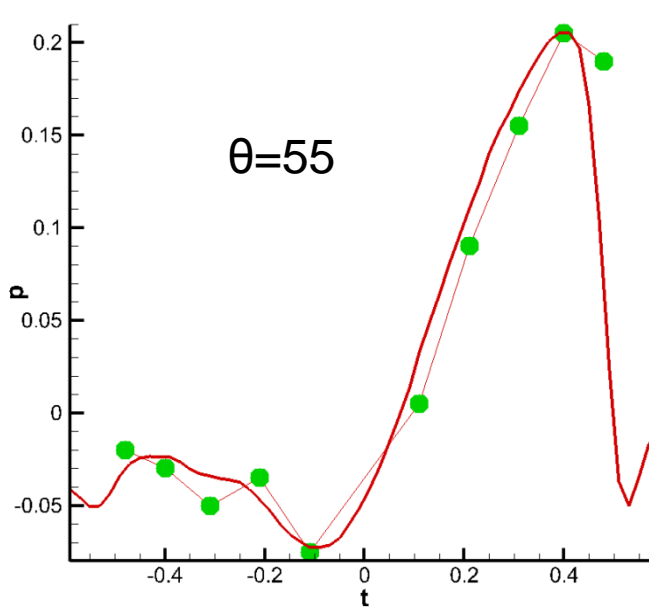
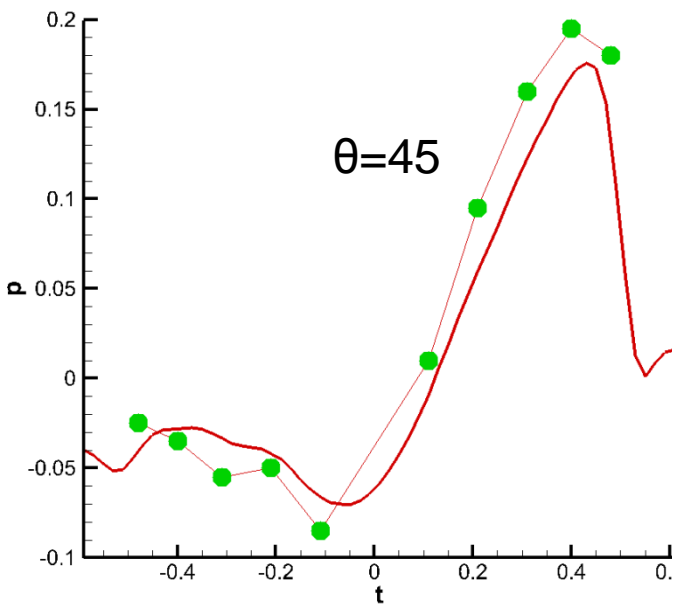
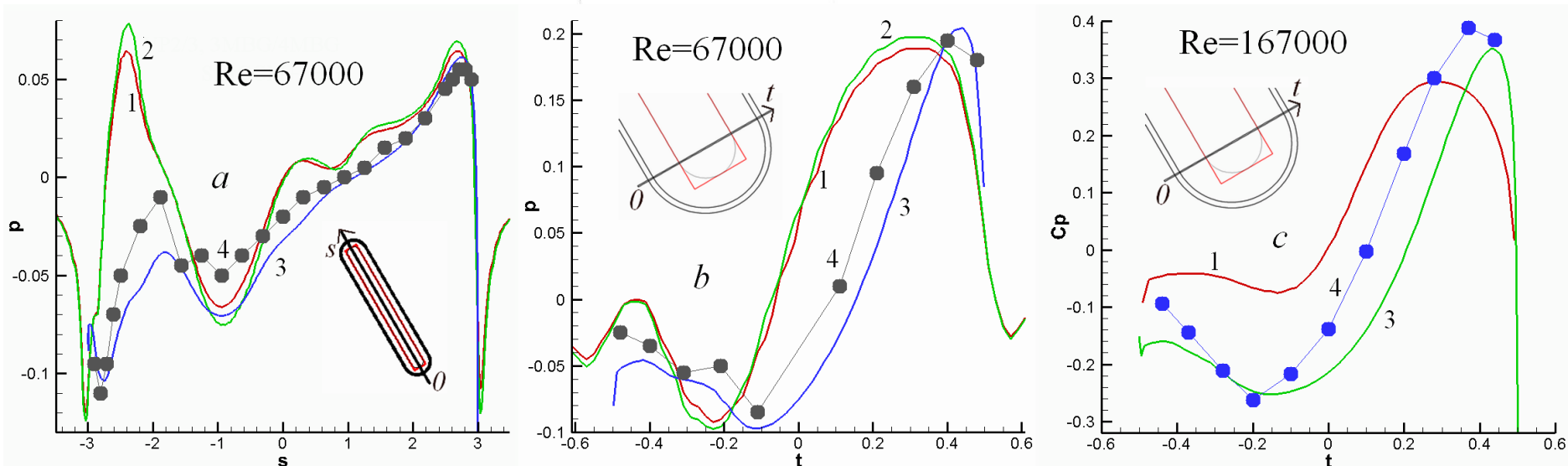
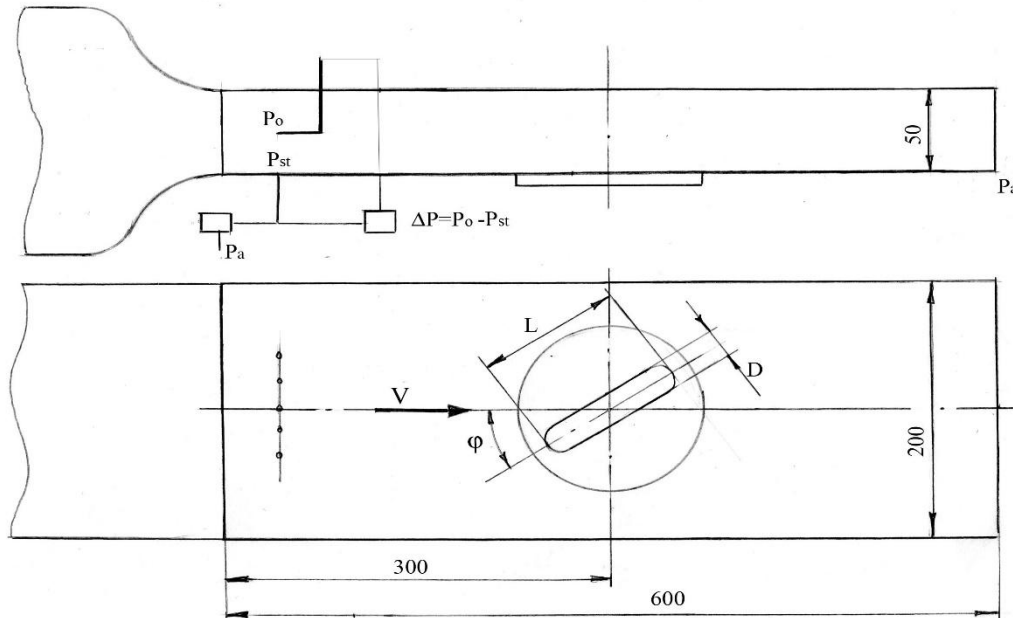


Схема
эксперимента на
установке ВИА
НИИ механики
МГУ



Распределения давления и коэффициента давления в характерных сечениях ОТЛ
глубиной 0.25 под углом наклона 45° на пластине (a,b) и на стенке канала (c). 1, 2 –
VP2/3 (4x и 3x частная многоблочная сетка), 3 – StarCCM+ (неструктурированная
сетка); 4 – эксперимент

Выводы

Экспериментально обоснованы сделанные численно открытия аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в наклонных овально-траншейных лунках (ОТЛ) и интенсификации потока в ядре канала с двухрядными наклонными ОТЛ в ламинарном и турбулентном режимах течения.

Уточнена формулировка формулы открытия:

Открыто явление интенсификации отрывного течения и теплообмена при интерференции растекающегося по склону наклонной ОТЛ внешнего потока и сгенерированного торнадоподобного вихря, приводящей к значительному перепаду между зонами торможения и разрежения в ядре вихря.