

**Валидационные тесты для пакетов
прикладных программ, основанные на БД
измерений давления, скорости,
теплоотдачи для описания явления
аномальной интенсификации отрывного
течения и теплообмена в наклонных
канавках на пластине и стенке канала.**

Исаев С.А.^{1,2}, Ключ А.А.², Судаков А.Г.², Никущенко Д.В.¹,
Усачов А.Е.³, Чулюнин А.Ю.⁴, Душин Н.С.⁵, Сероштанов В.В.⁶

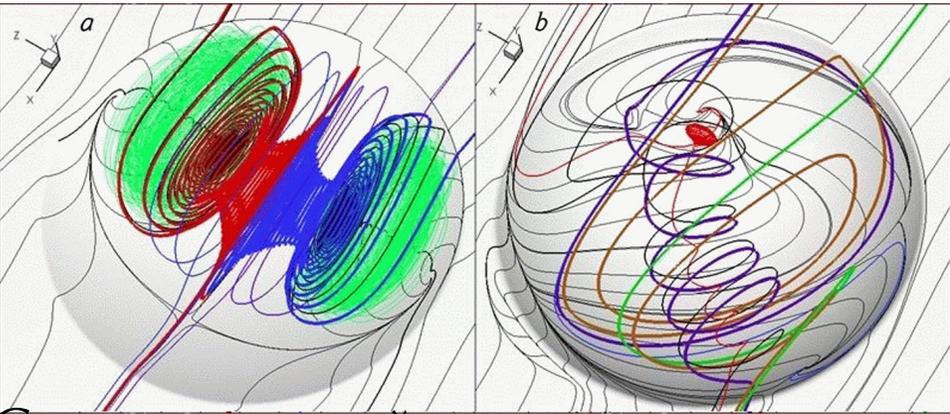
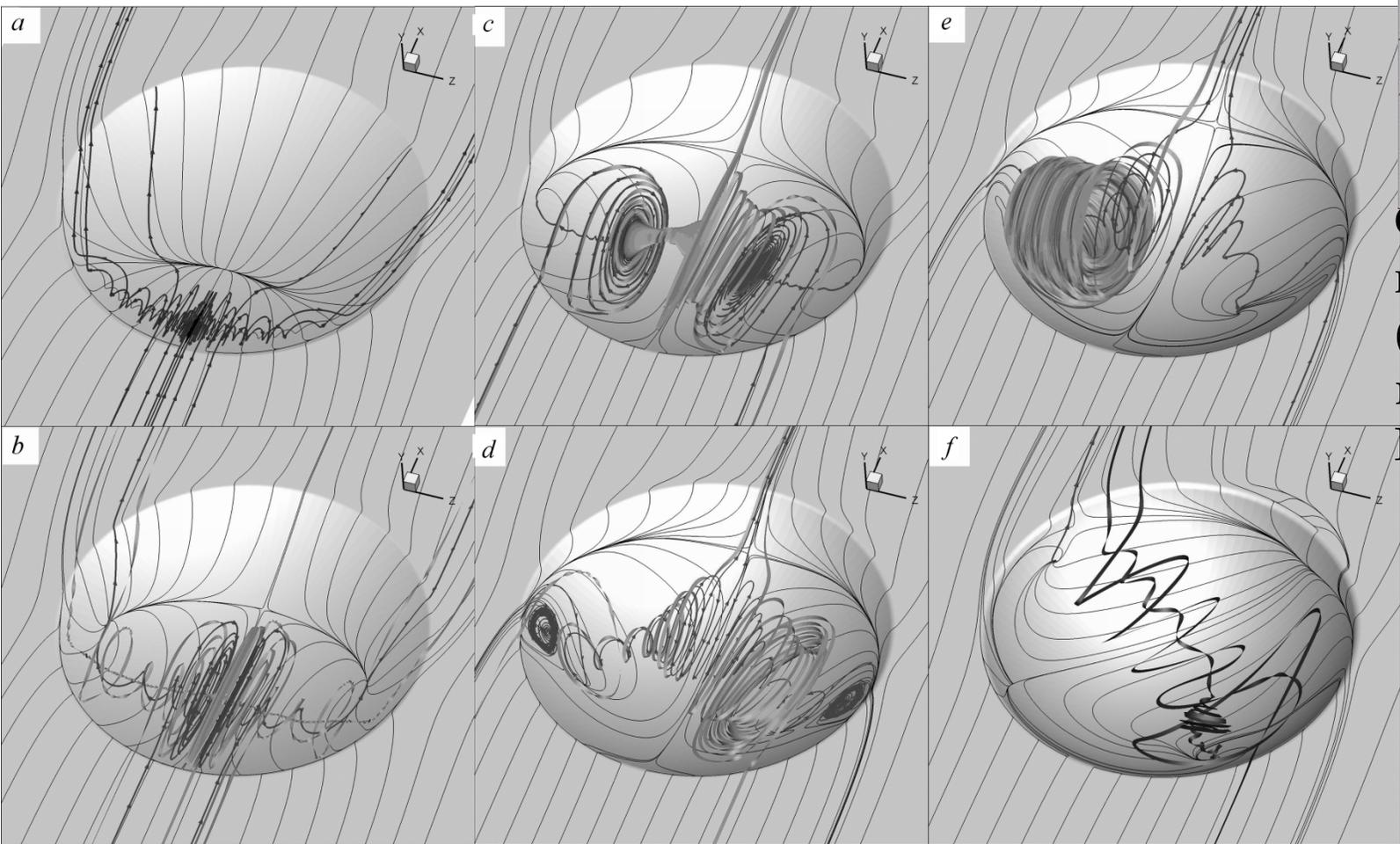
¹ СПбГМТУ, ² СПбГУГА им. А.А.Новикова, ³ МК ЦАГИ, ⁴ НИИ механики
МГУ им. М.В.Ломоносова, ⁵ КазНЦ РАН, ⁶ СПбПУ Петра Великого

Основные задачи

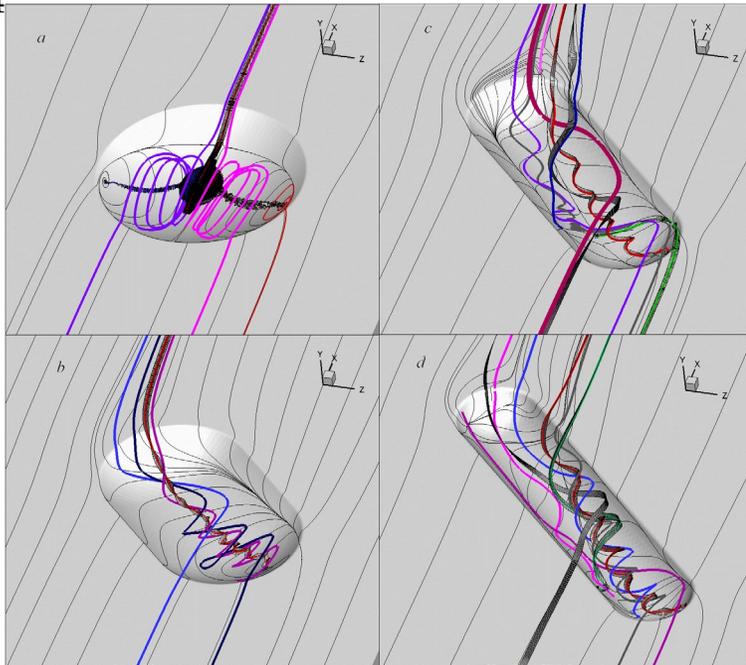
1. Осуществить валидацию основанного на многоблочных вычислительных технологиях пакета VP2/3 на задачах аномальной интенсификации отрывных течений и теплообмена (АИОТТ) в наклонных канавках на пластине и стенке узкого канала. Провести расчеты на цифровых аналогах аэродинамических установок НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, КазНЦ РАН и теплофизического стенда СПбПУ Петра Великого.
2. Оценить влияние температурных граничных условий при расчете конвективного теплообмена для интенсивных вихревых течений.

Обзор работ по луночной тематике

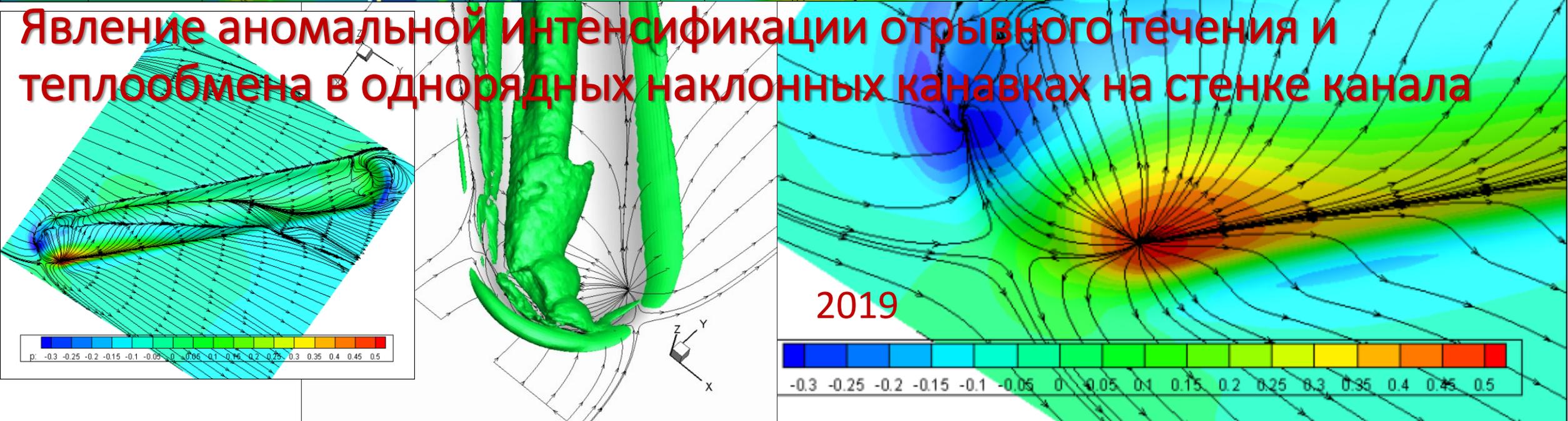
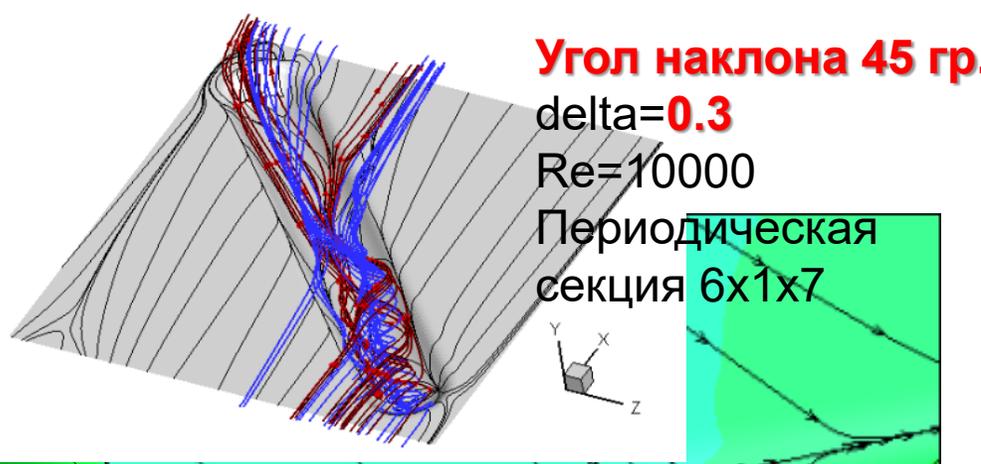
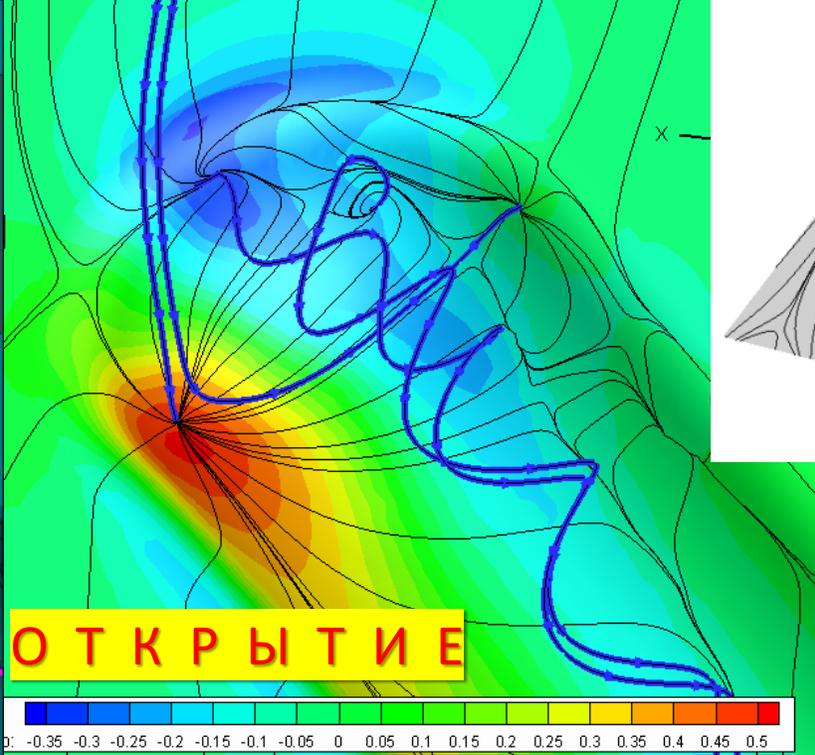
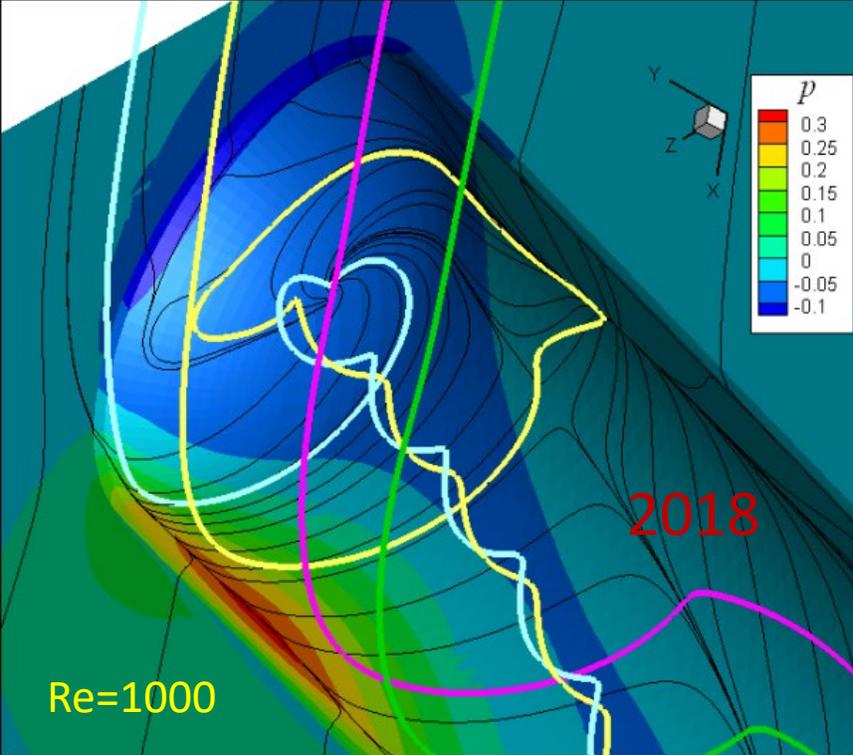
Влияние глубины и удлинения лунок на стенке канала



Сравнение струйно-вихревых структур внутри сферических лунок умеренной (*a* - $\Delta = 0.13$) и большой (*b* - $\Delta = 0.26$) глубины на стенке узкого канала при $Re = 4 \times 10^4$



Эволюция вихревого обтекания сферической лунки на стенке узкого канала с увеличением глубины Δ для $Re = 4 \times 10^4$. *a* - $\Delta = 0.07$; *b* - 0.1; *c* - 0.13; *d* - 0.17; *e* - 0.2; *f* - 0.26



Расчетная методология

Математические модели. МВТ(VP2/3)

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

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

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

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

SA	Спаларт-Аллмарес (1992)
k-ε	Лаундер-Сполдинг (1972)
RNG -k-ε	(1986)
Realizable-k-ε	(1995)
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

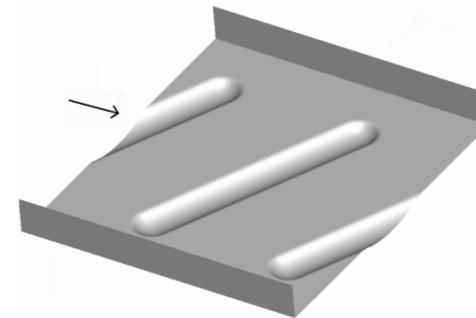
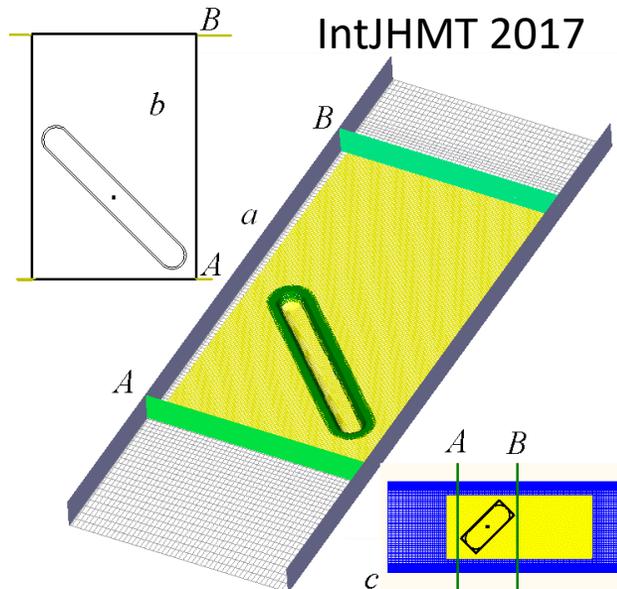
скорость U	длина d
скорость внешнего потока	диаметр цилиндра, лунки ширина траншеи, каверны
среднемассовая скорость	длина хорды

Диапазоны изменения режимных параметров:

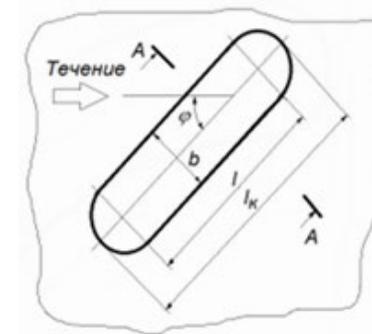
Re	$10^2 \div 10^7$
Pr	$0.7 \div 4000$
M ₀	$0 \div 9$

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

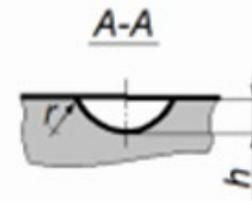
$T_u = 1.5\%$



IntJHMT 2019



Патент 2019

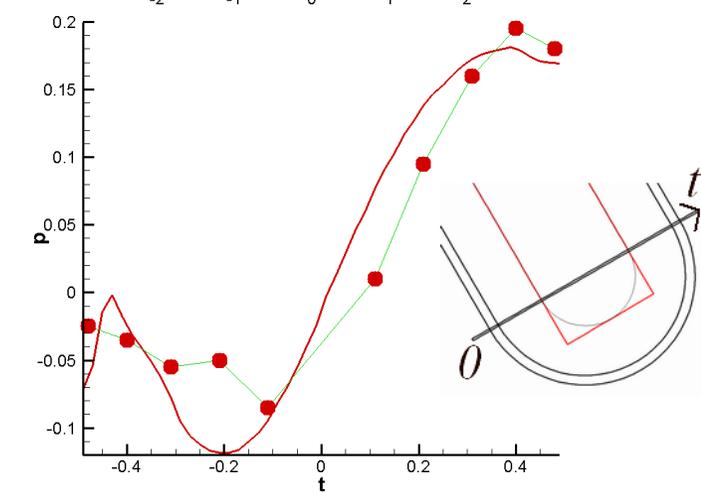
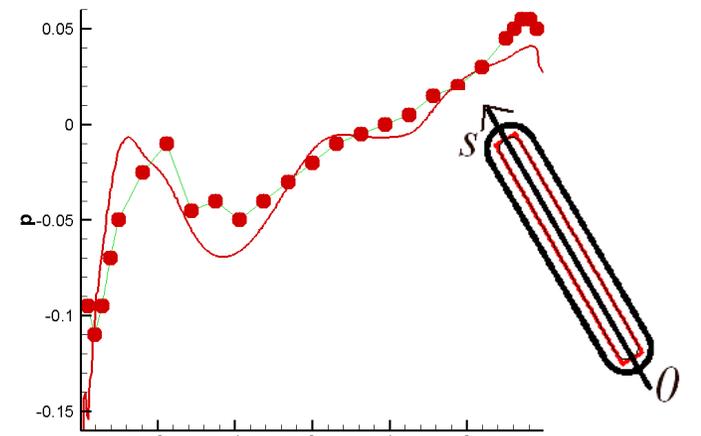
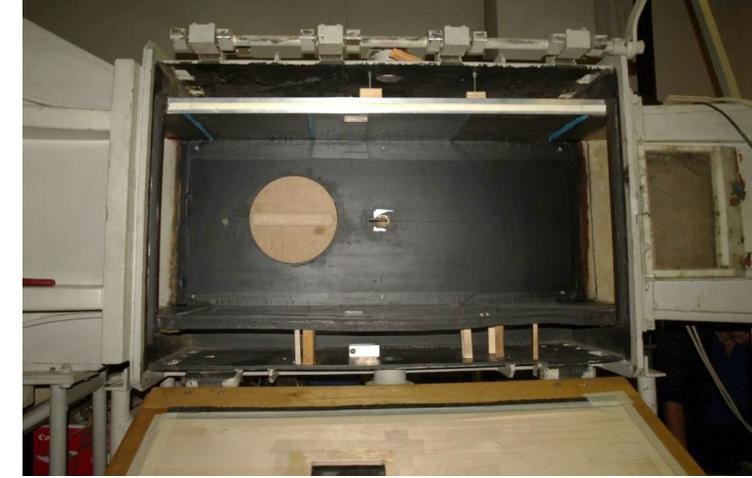
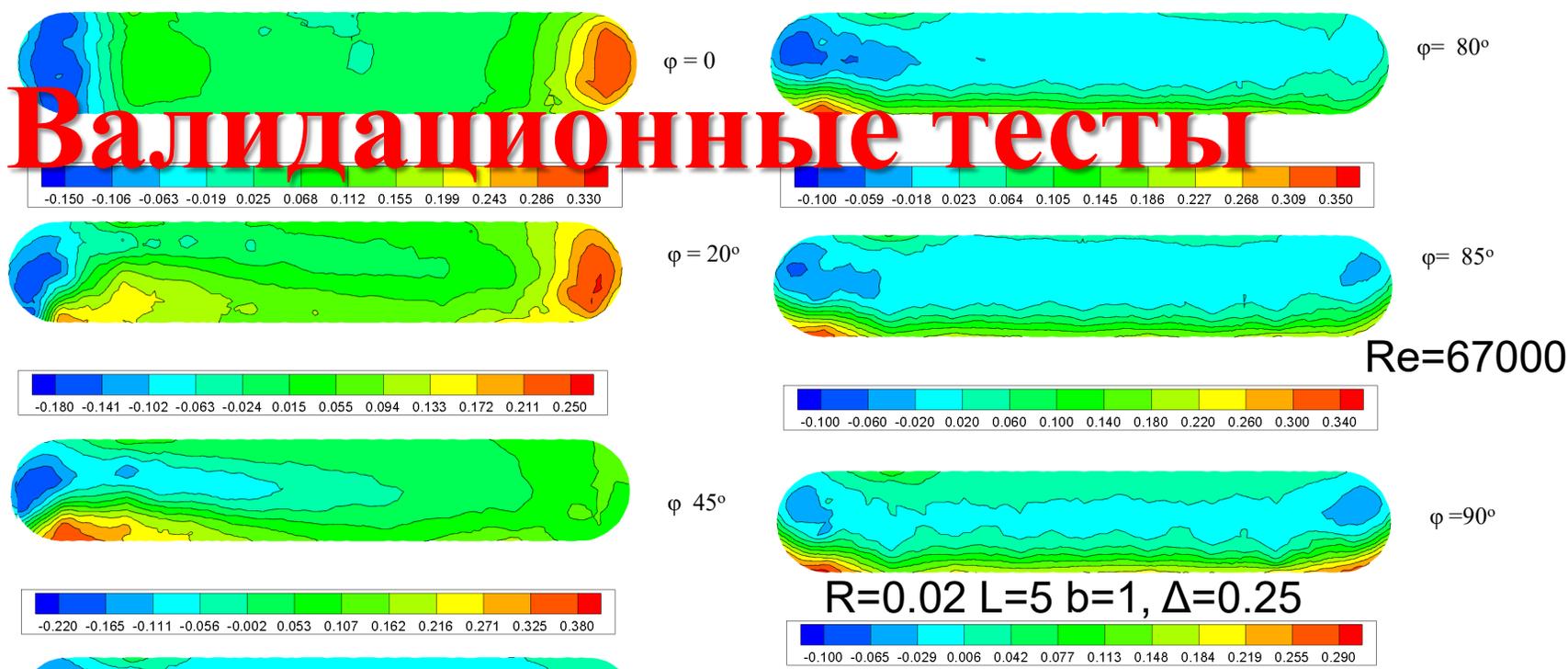


Коррекция SST-модели 2003 года (подход Роди-Лещинера-Исаева), апробированная на стационарных и нестационарных 2D/3D задачах

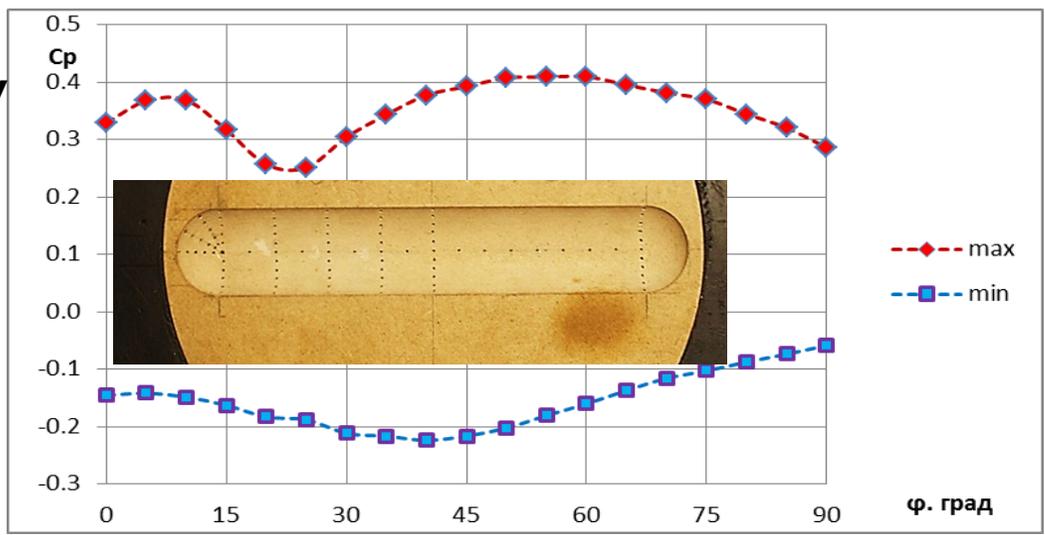
- идея методологии и ее развитие: многоблочные с пересечением разномасштабные структурированные сетки (МС) -> неструктурированные сетки (НС) -> гибридные сетки с заменой в МС зон пересечения неструктурированными вставками (ГС)

- **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**

Валидационные тесты



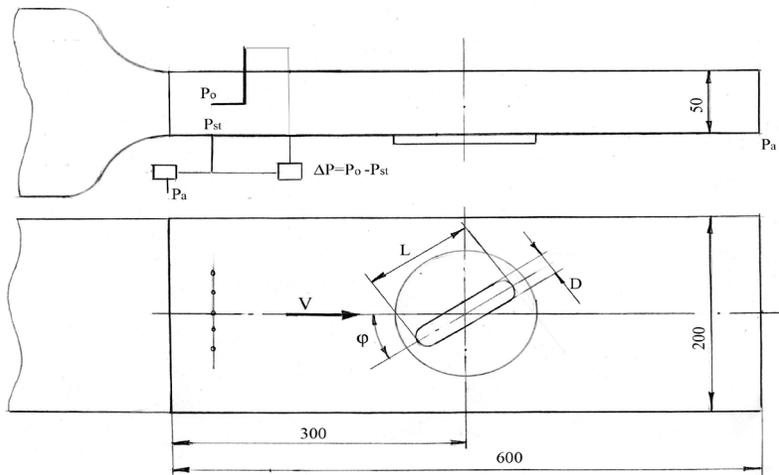
Выводы: Значительный перепад давления наблюдается в диапазоне $25^\circ < \varphi < 80^\circ$



труба А-4 НИИ механики МГУ

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

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



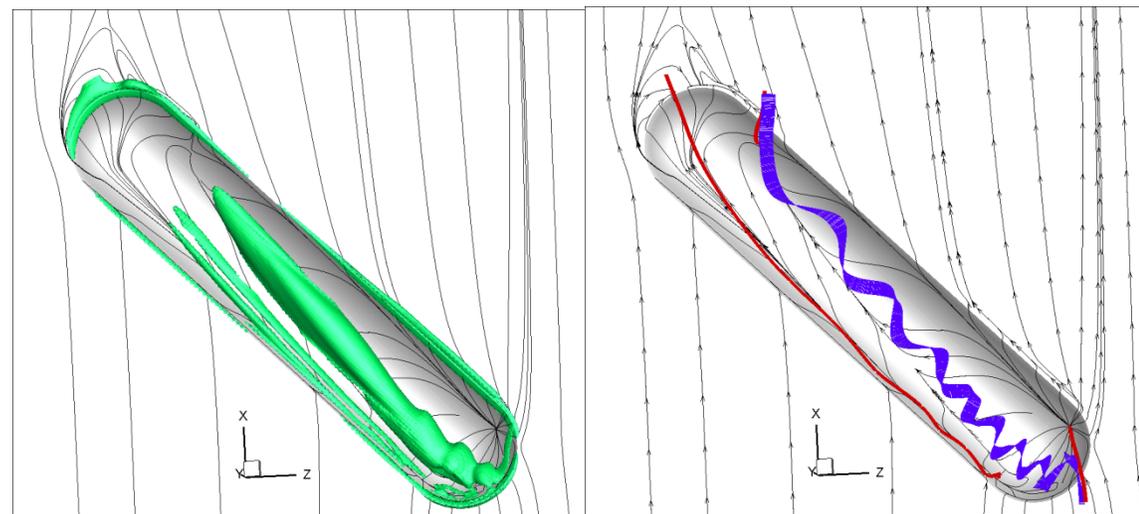
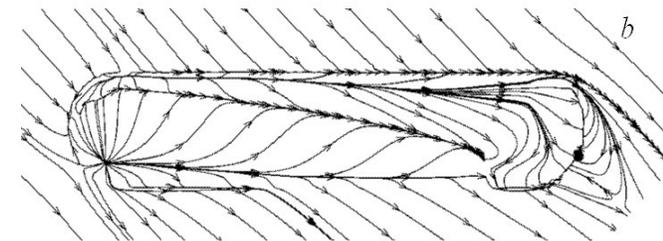
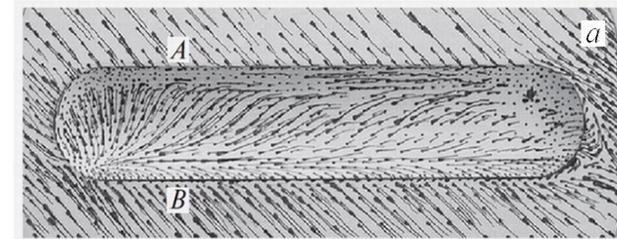
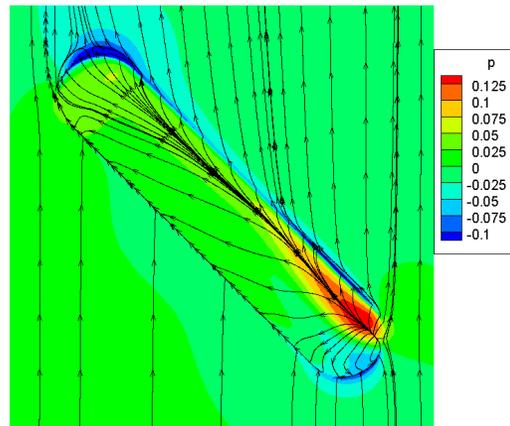
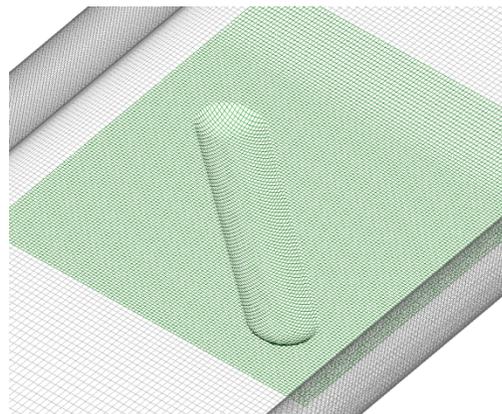
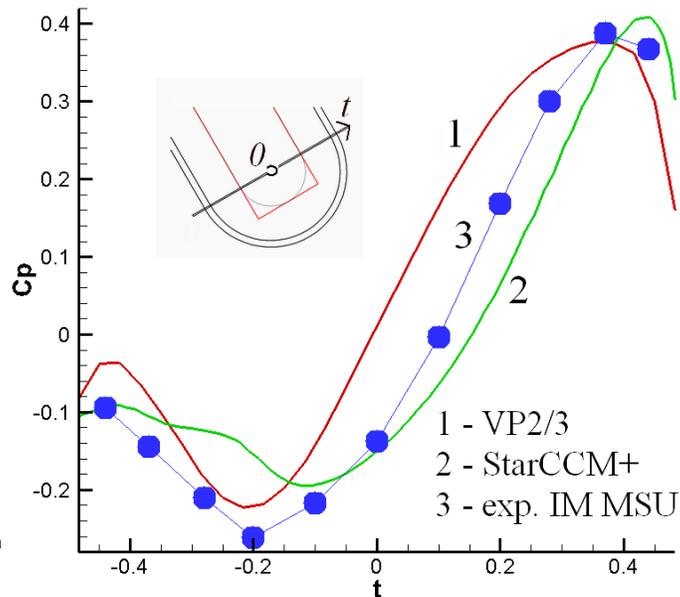
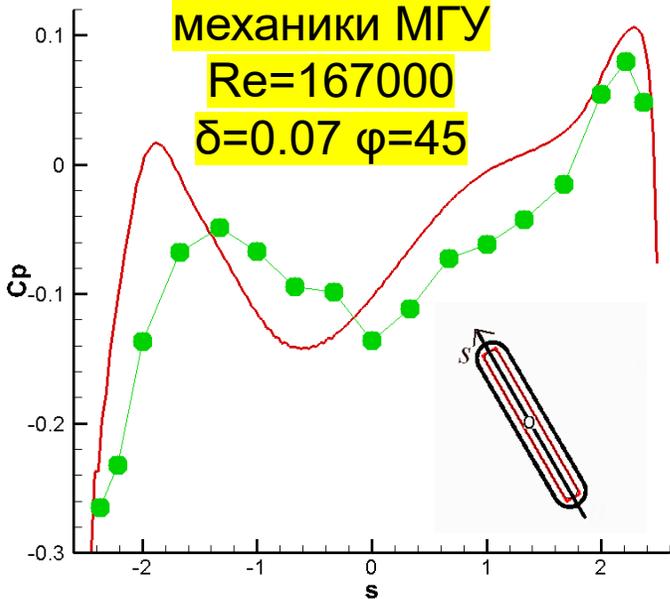
$R=0.02; L=5$

Схема эксперимента на установке ВИА НИИ механики МГУ

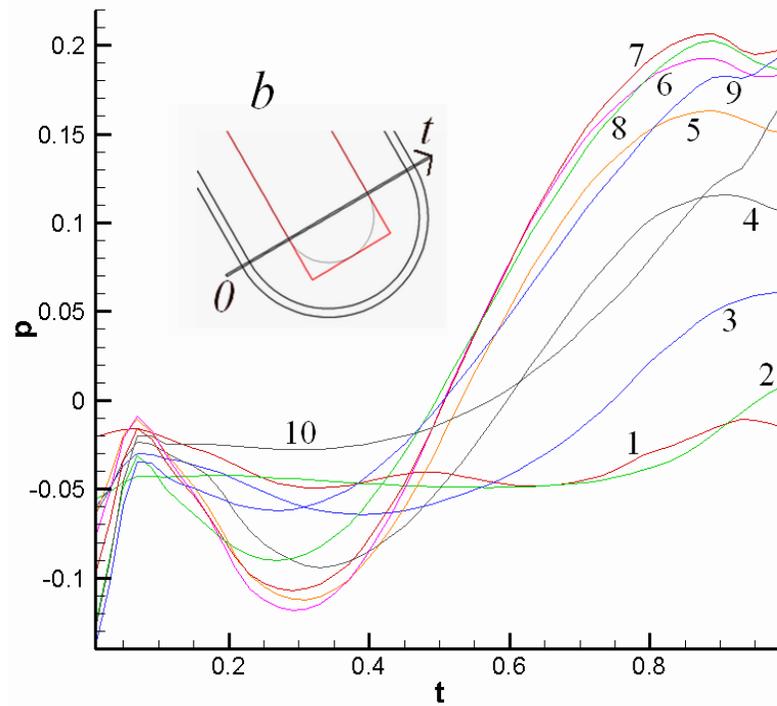
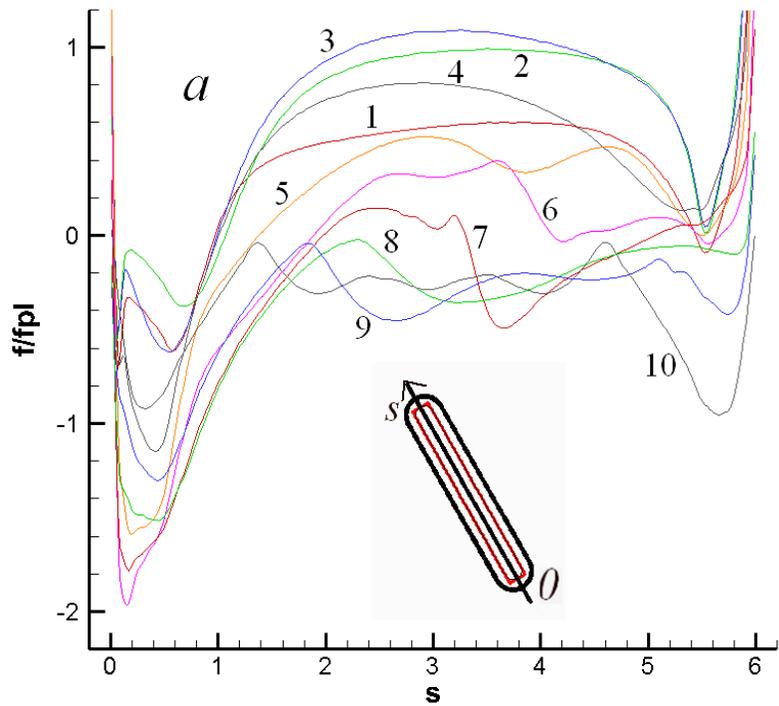
$Re=167000$

$\delta=0.07$

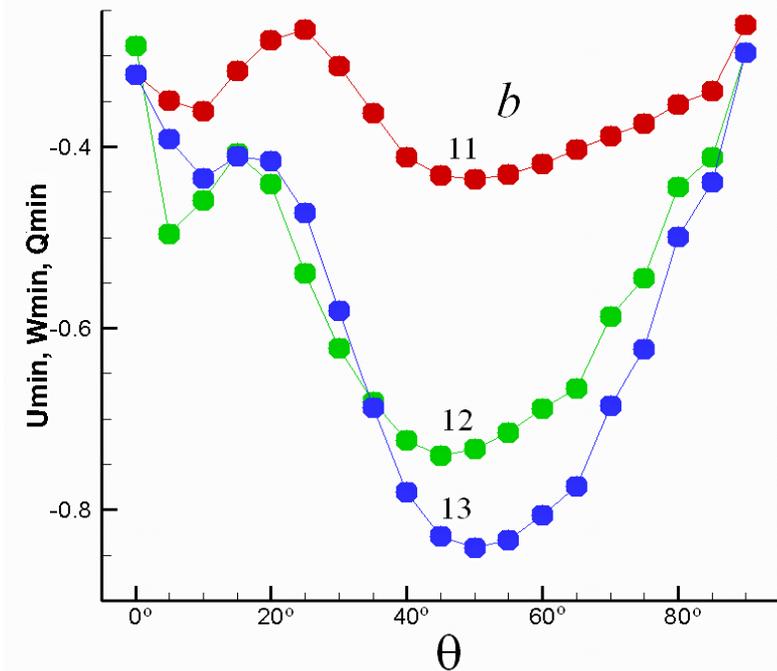
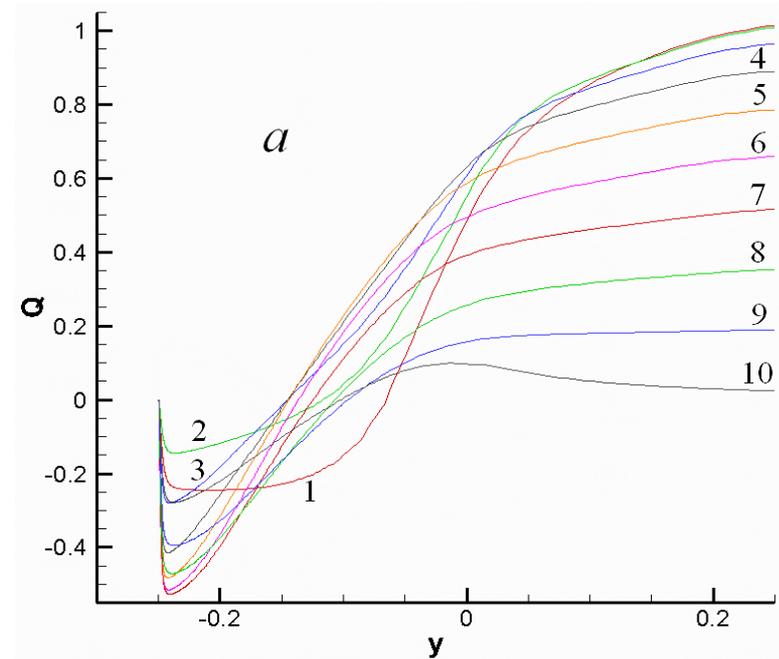
$\varphi=45$



Распределения давления и коэффициента давления в характерных сечениях ОТЛ глубиной 0.25 под углом наклона 45° на стенке канала. Линии - VP2/3 (2х частная многоблочная сетка); точки – эксперимент



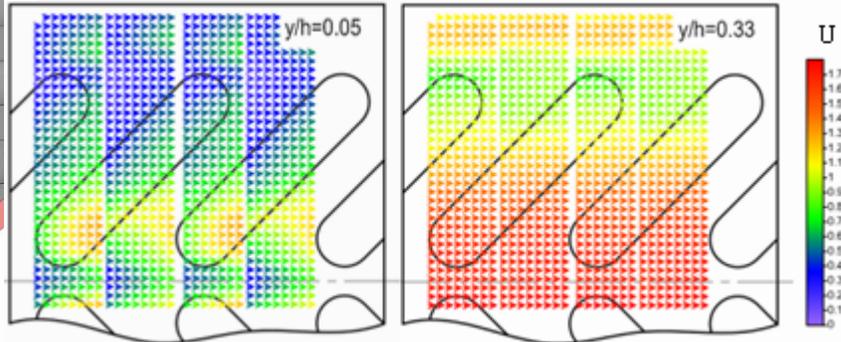
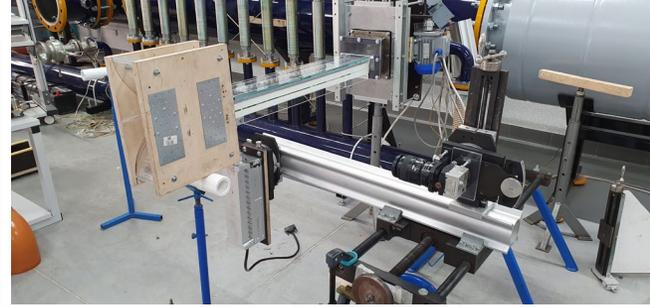
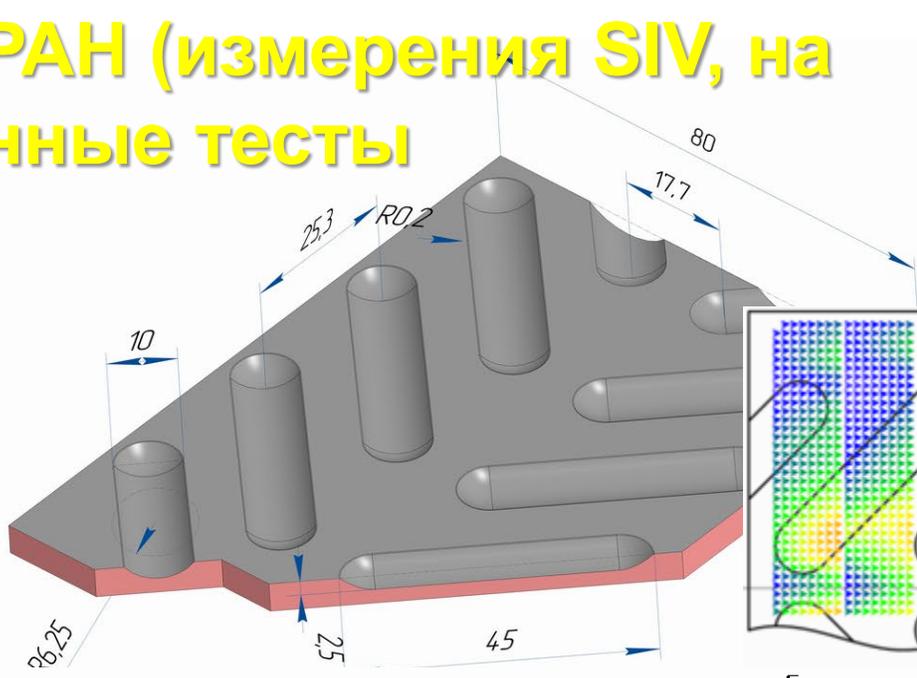
Влияние угла наклона θ на распределения относительного трения f/f_{pl} (s) в продольном поперечном сечении канавки (а) и статического давления $p(t)$ в сечении перехода от входного сферического сегмента к цилиндрической траншее (b). 1 – $\theta=0^\circ$; 2 – 10° ; 3 – 20° ; 4 – 30° ; 5 – 40° ; 6 – 50° ; 7 – 60° ; 8 – 70° ; 9 – 80° ; 10 – 90°



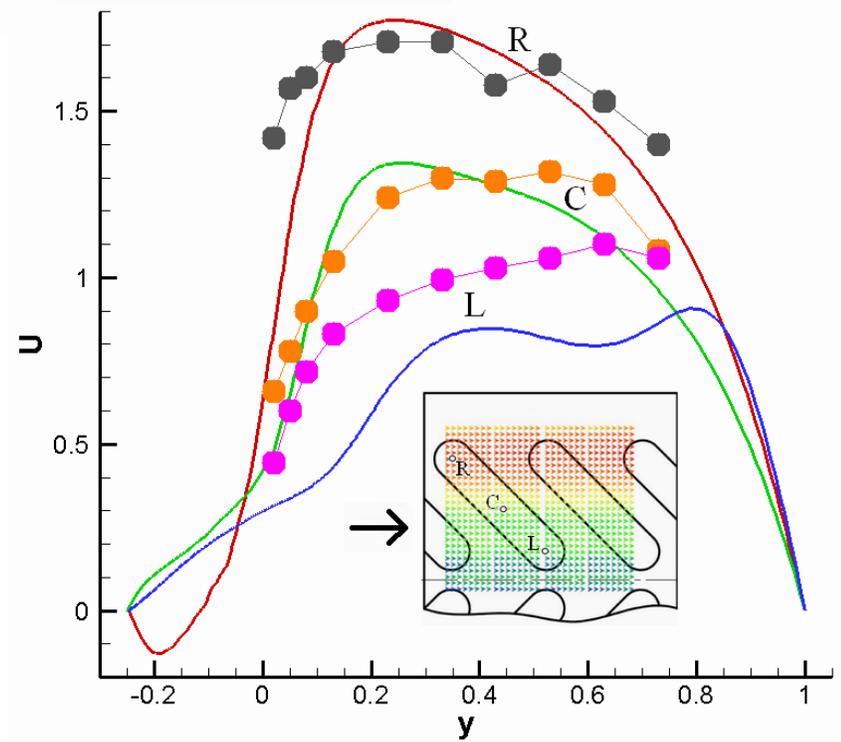
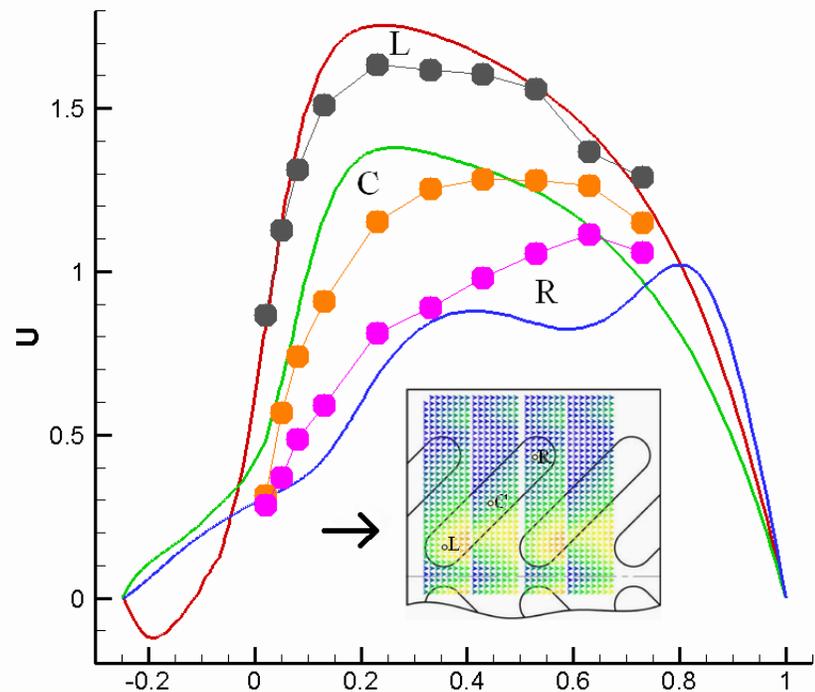
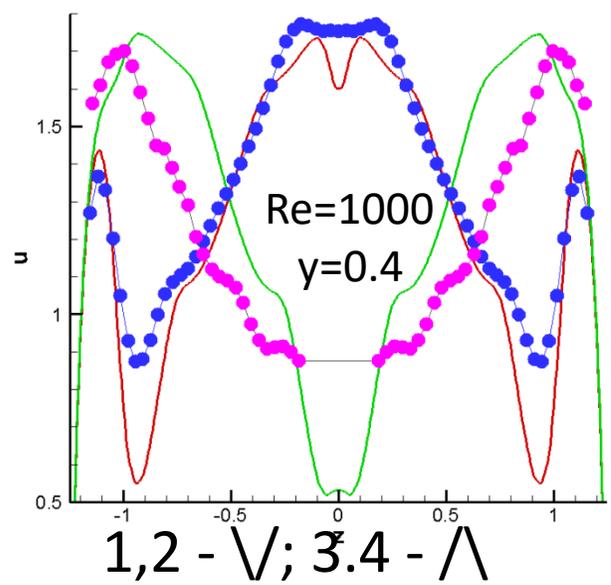
Влияние угла наклона θ на эволюцию профилей (кривые 1-10) составляющей скорости Q (y) вдоль s в связанной системе координат (а) и на экстремальные характеристики U_{min} , W_{min} , Q_{min} (кривые 11-13) (b). 1 – $\theta=0^\circ$; 2 – 10° ; 3 – 20° ; 4 – 30° ; 5 – 40° ; 6 – 50° ; 7 – 60° ; 8 – 70° ; 9 – 80° ; 10 – 90° ; 11 – U_{min} ; 12 – W_{min} ; 13 – $Q_{min} = U_{min} \cos\theta + W_{min} \sin\theta$

Эксперимент в КазНЦ РАН (измерения SIV, на входе $u=1$) Валидационные тесты

(Михеев Н.И., Душин Н.С.)



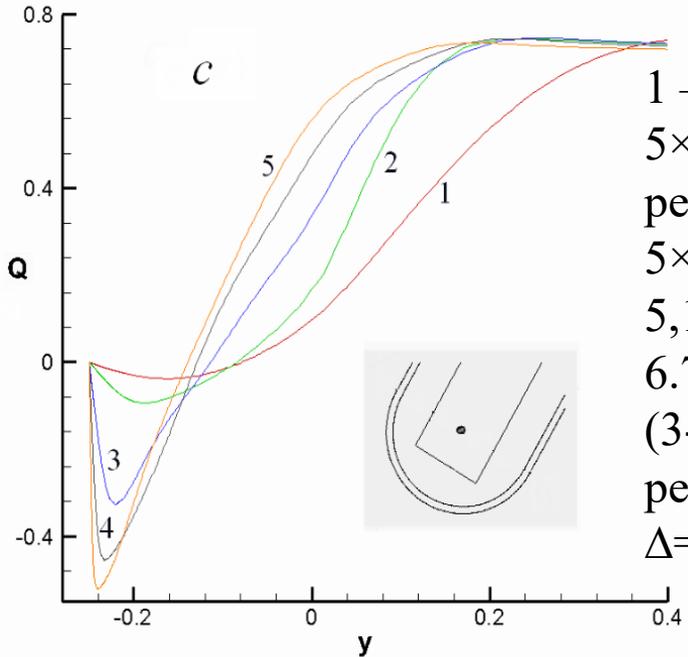
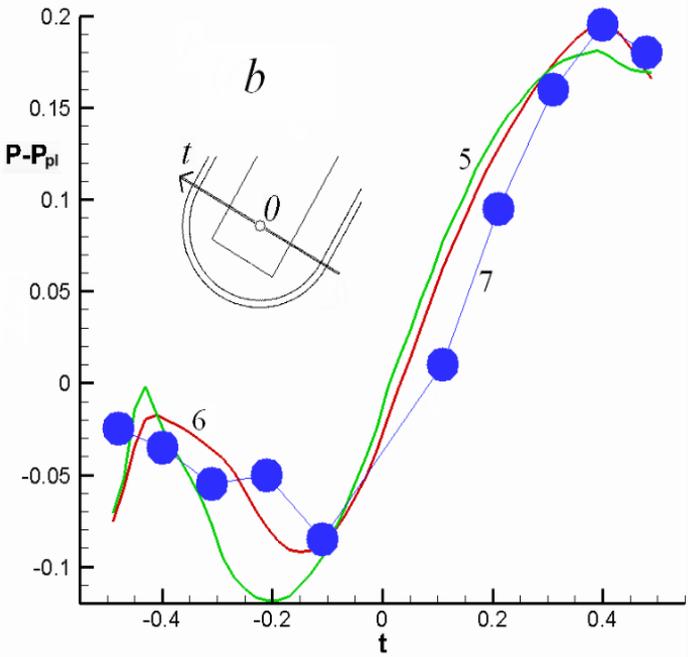
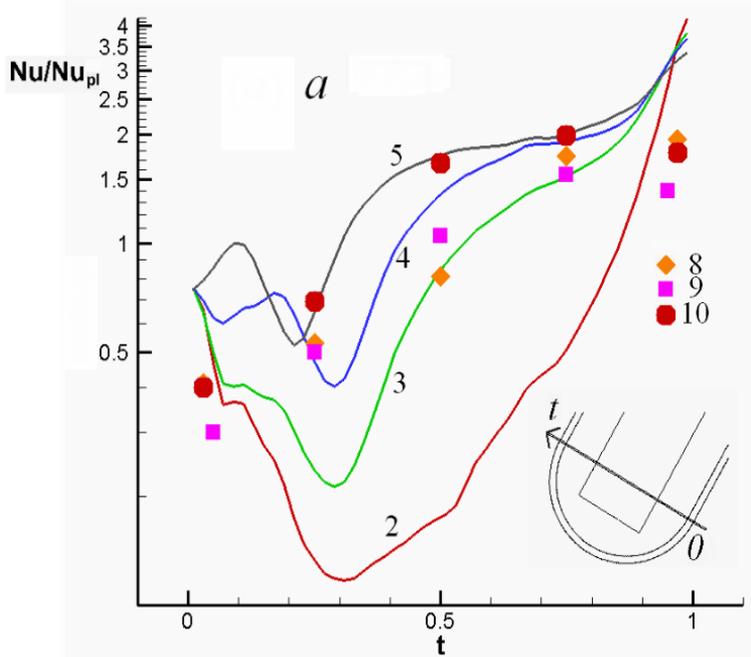
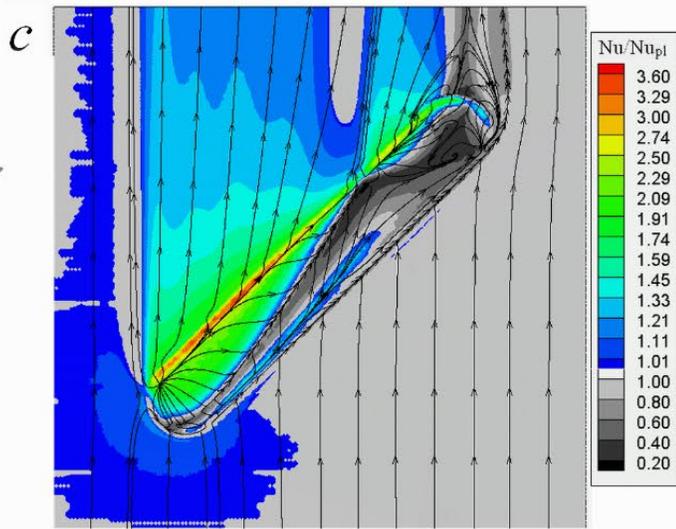
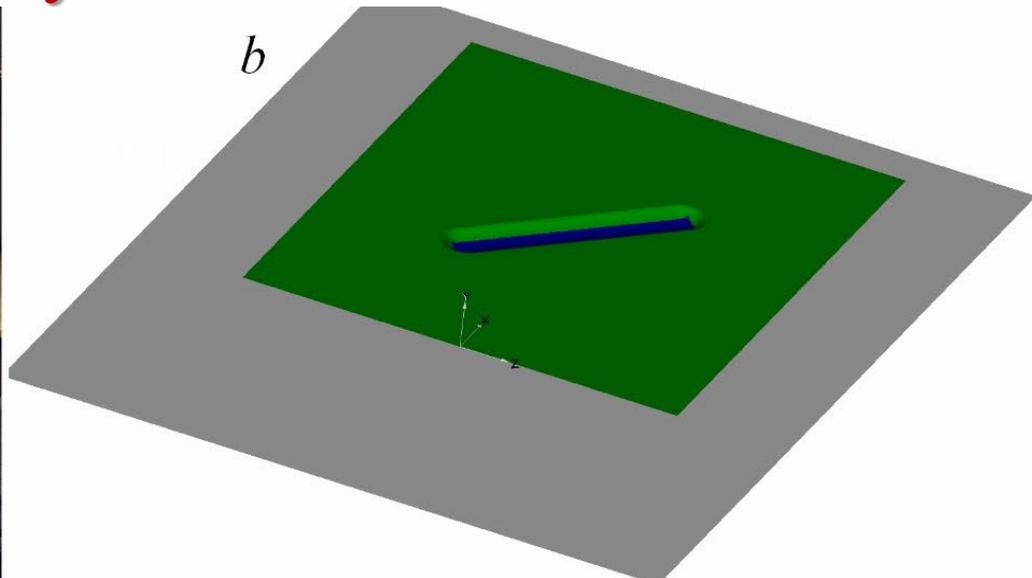
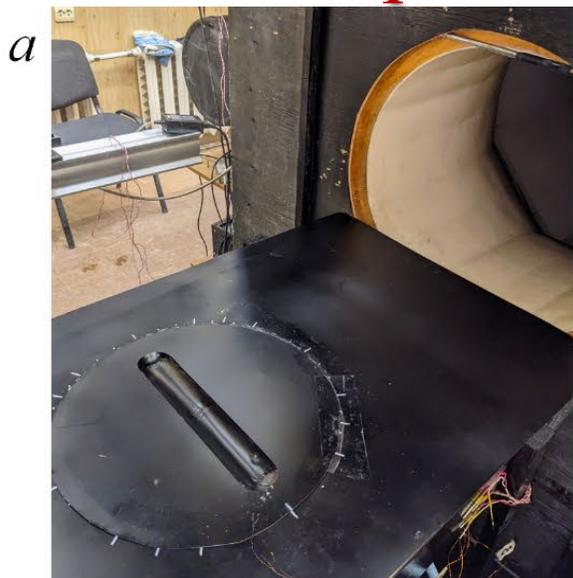
Ускорение потока (22 лунка)



Расчеты течения в облуненных узких каналах с 26 лунками

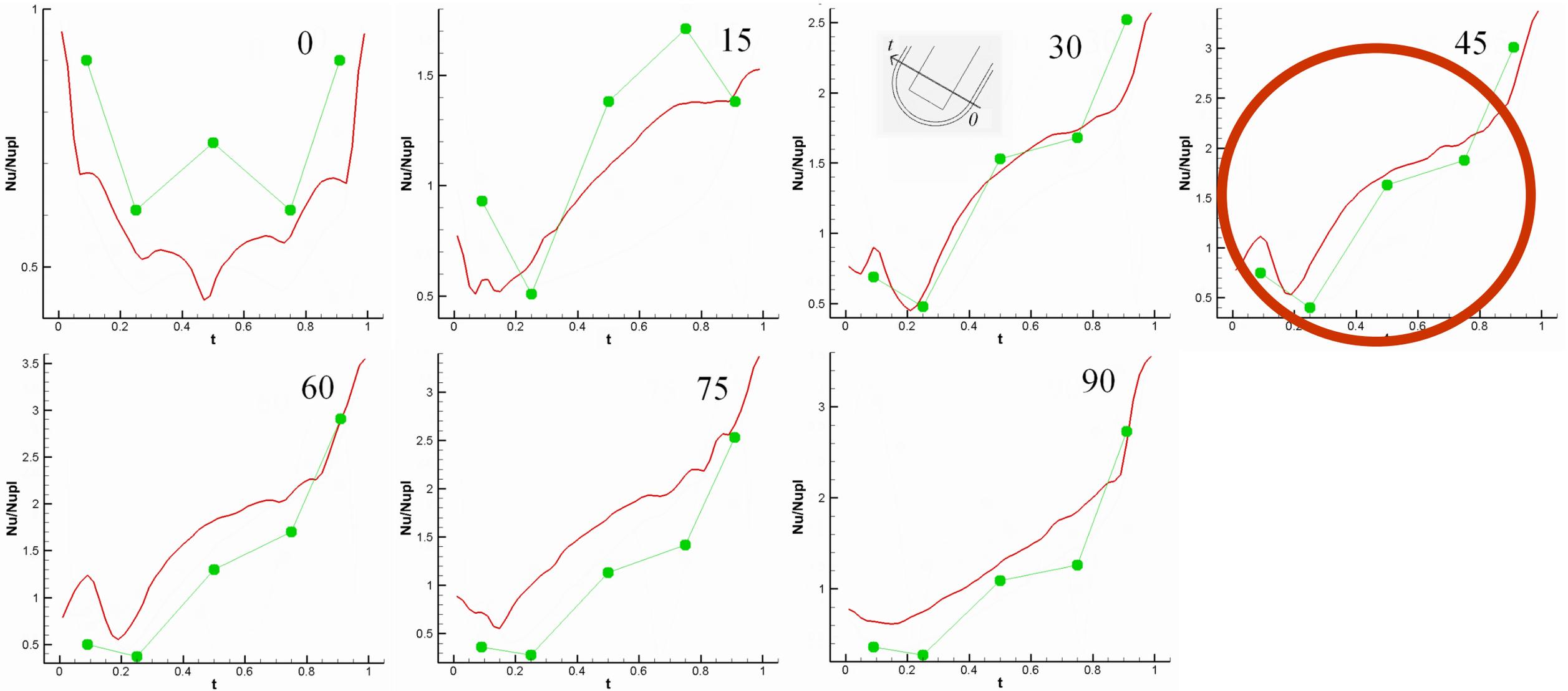
Аномальная интенсификация теплообмена в канавке под углом 45 градусов на нагретом участке пластины

$Re=3 \times 10^4$



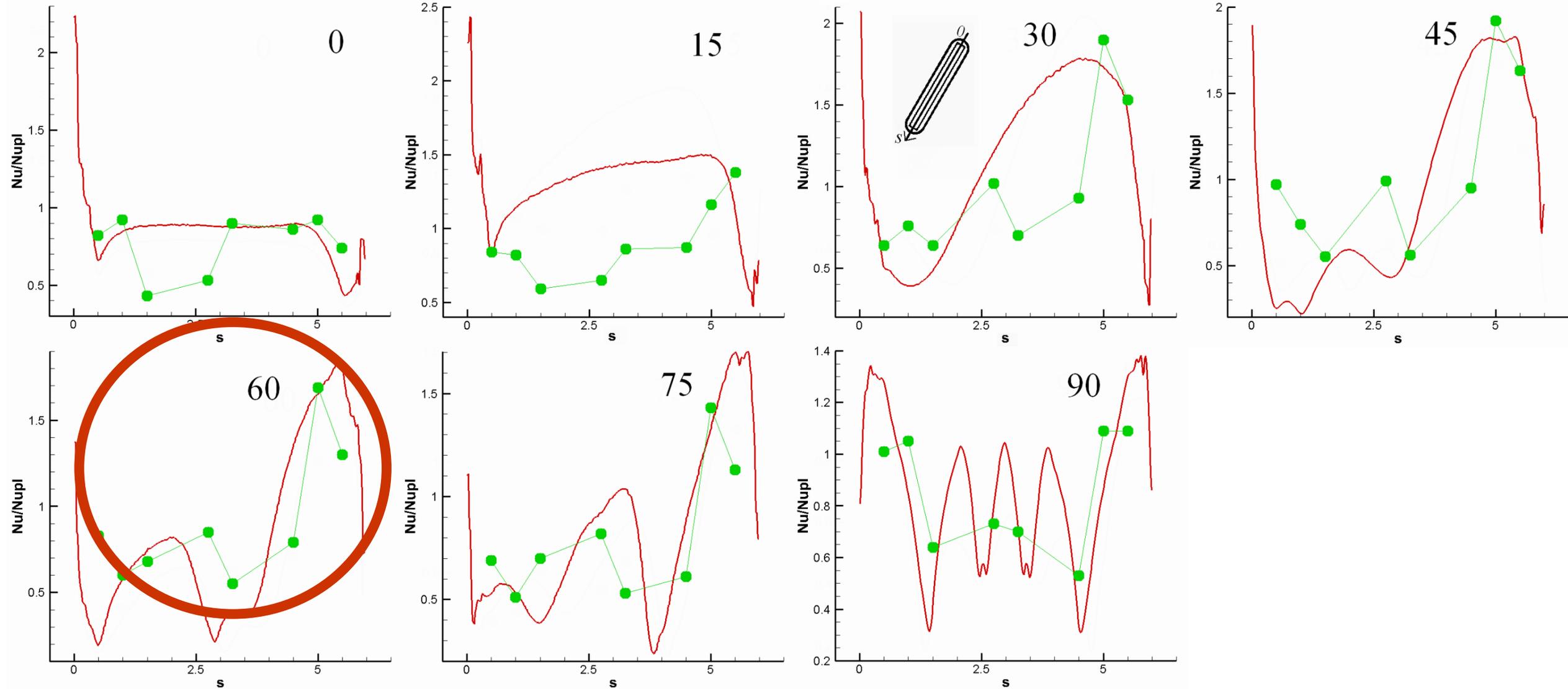
1 – $Re=10^3$; 2 – 5×10^3 (1,2 – лам. режим); 3,8 – 5×10^3 ; 4,9 – 10^4 ; 5,10 – 3×10^4 ; 6,7 – 6.7×10^4 [exp] (3-10 турб. режим). $\Delta=0.25$; $L=5$

Re=30000



Градиентная теплотметрия в СПбПУ Петра Великого

Re=30000



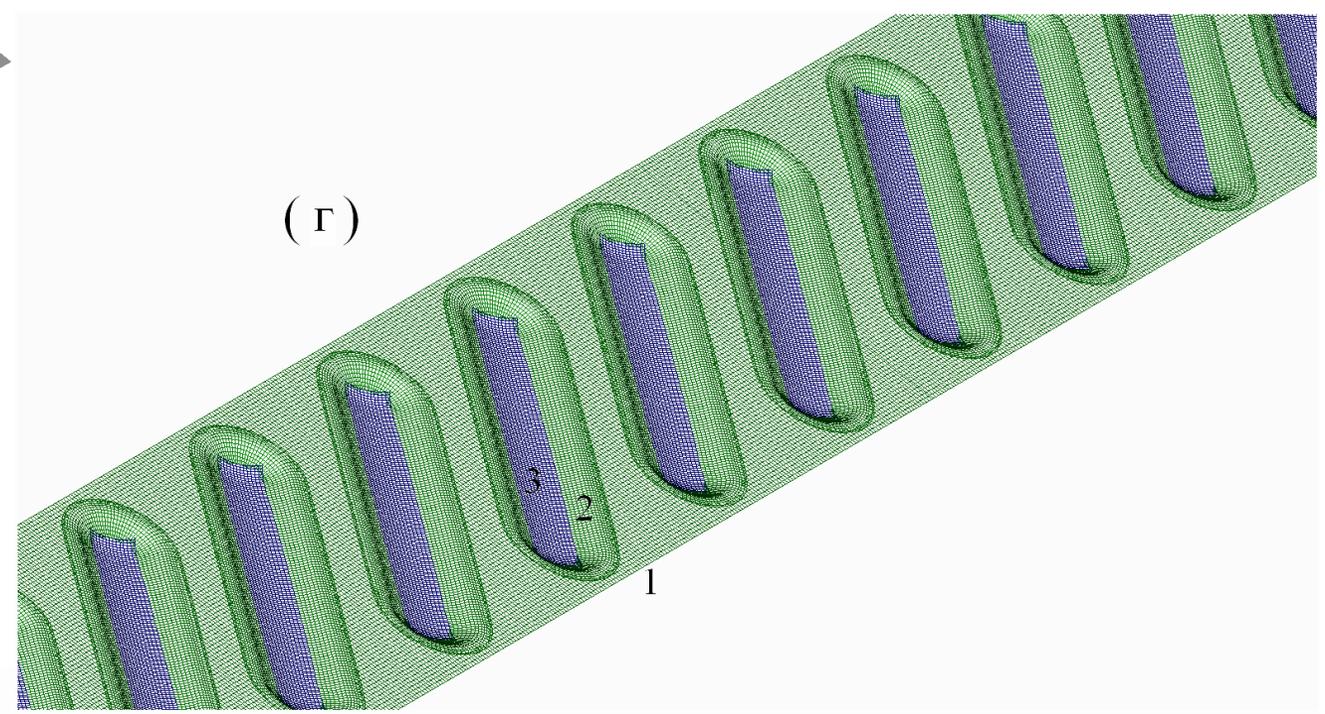
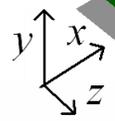
Градиентная теплотметрия в СПбПУ Петра Великого

Семинар ИПМ 09.12.23

Начальный гидродинамический участок

(а)

Re=6000



(б)

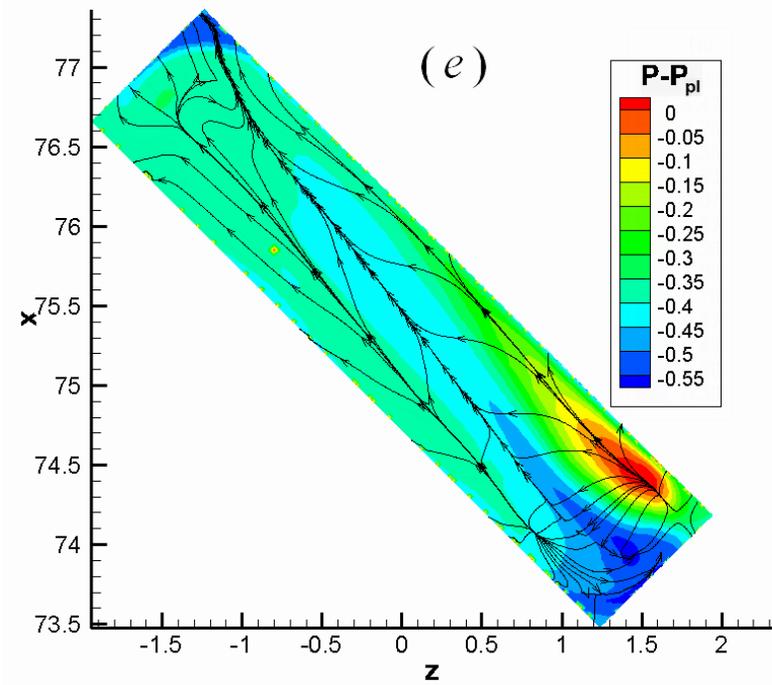
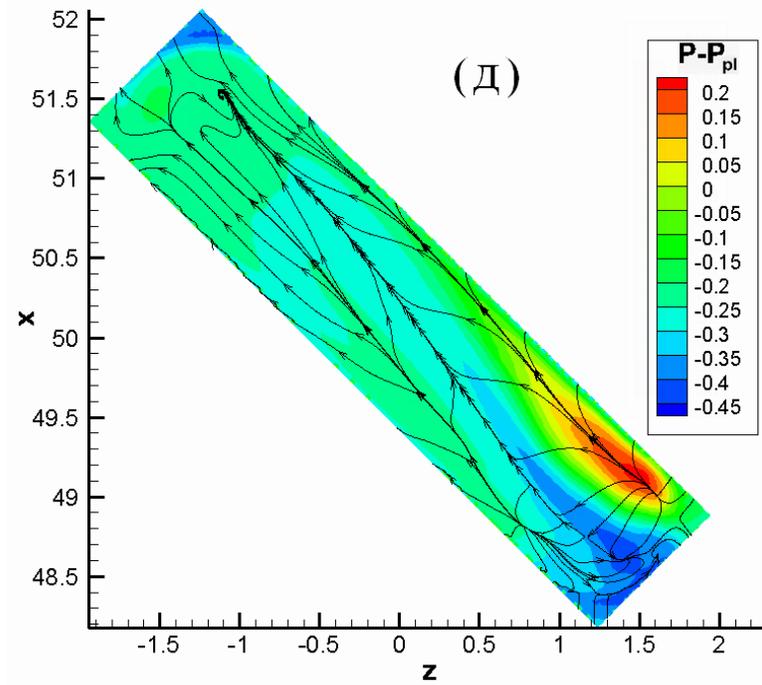
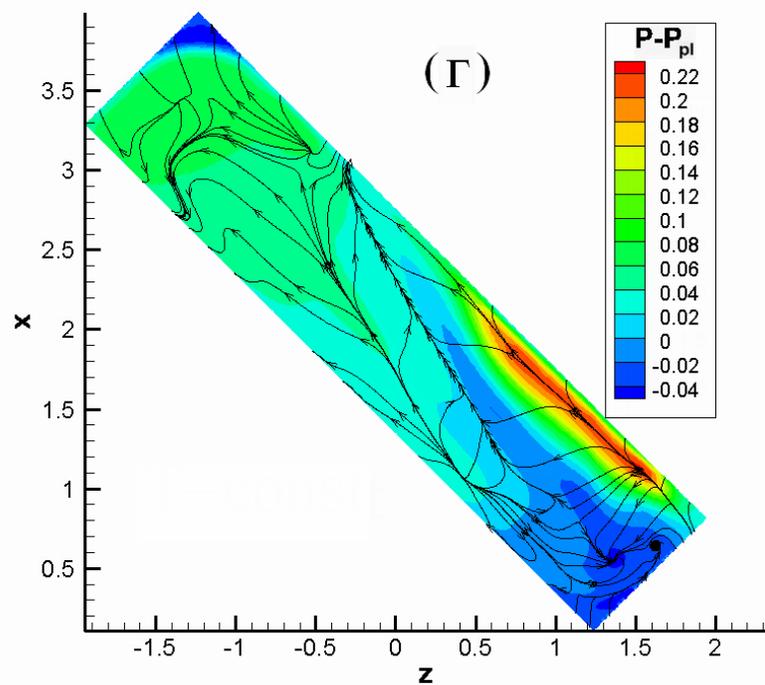
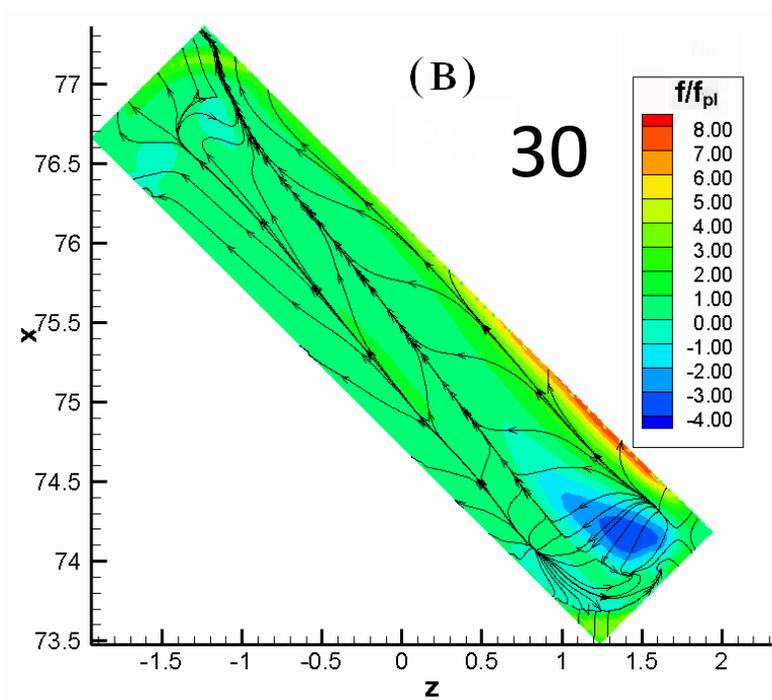
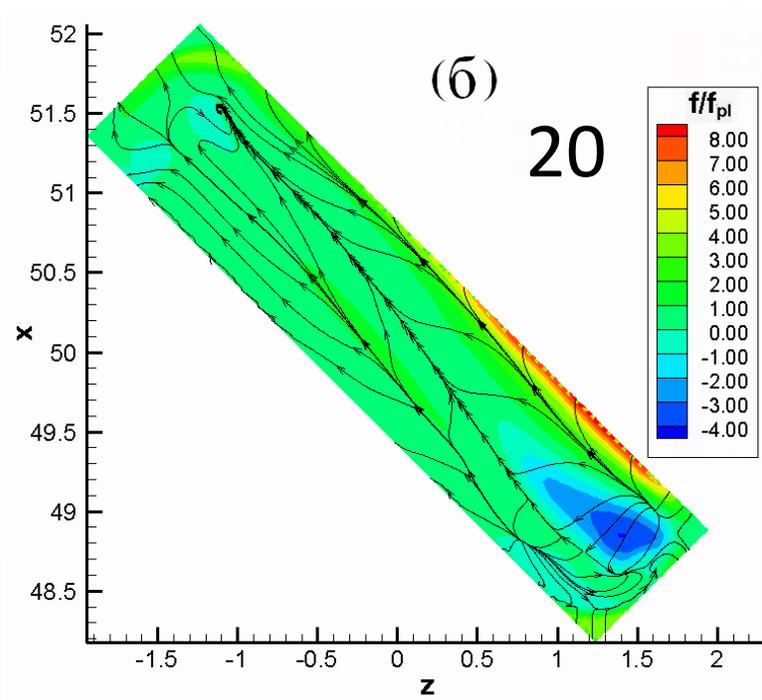
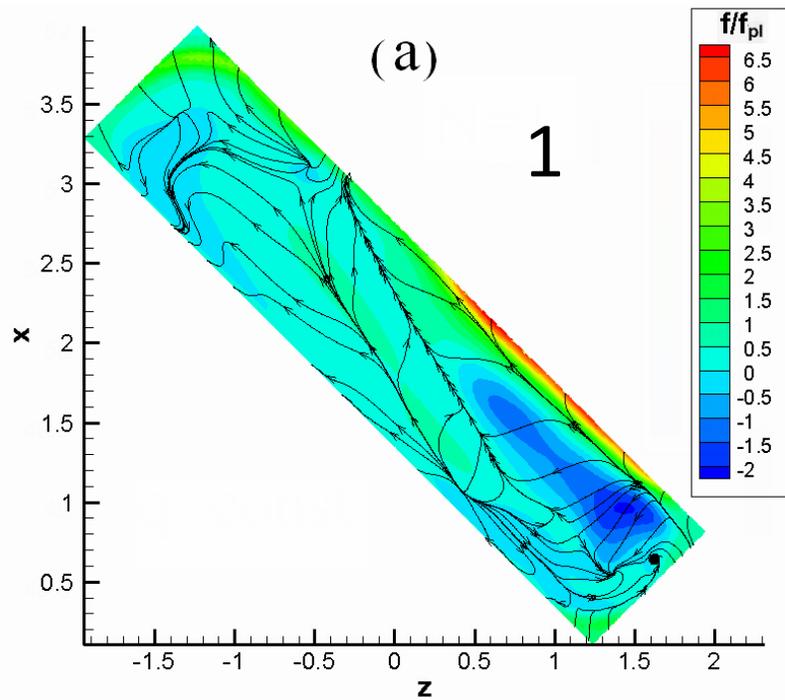


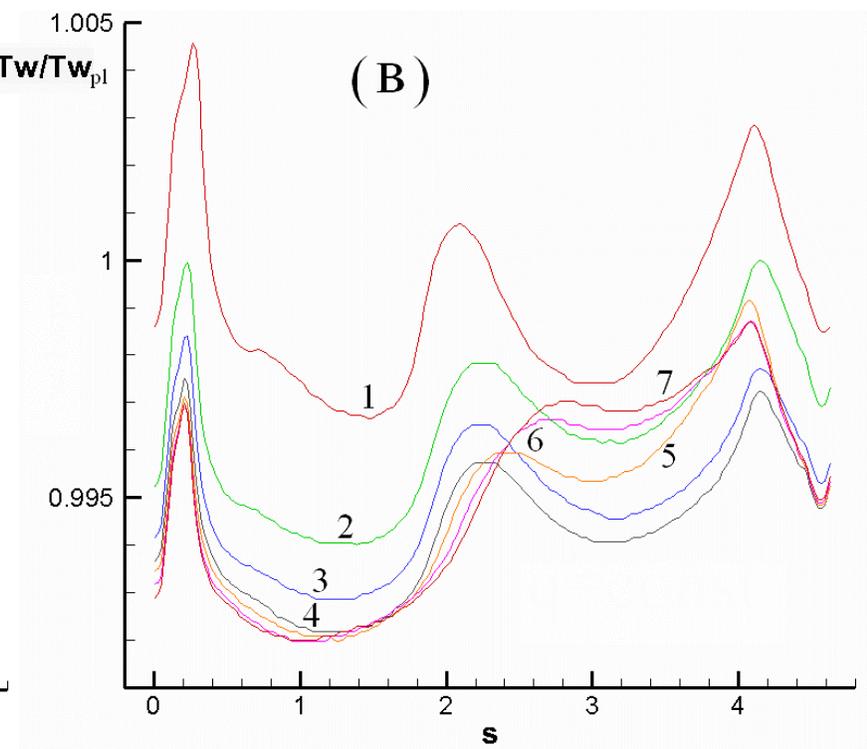
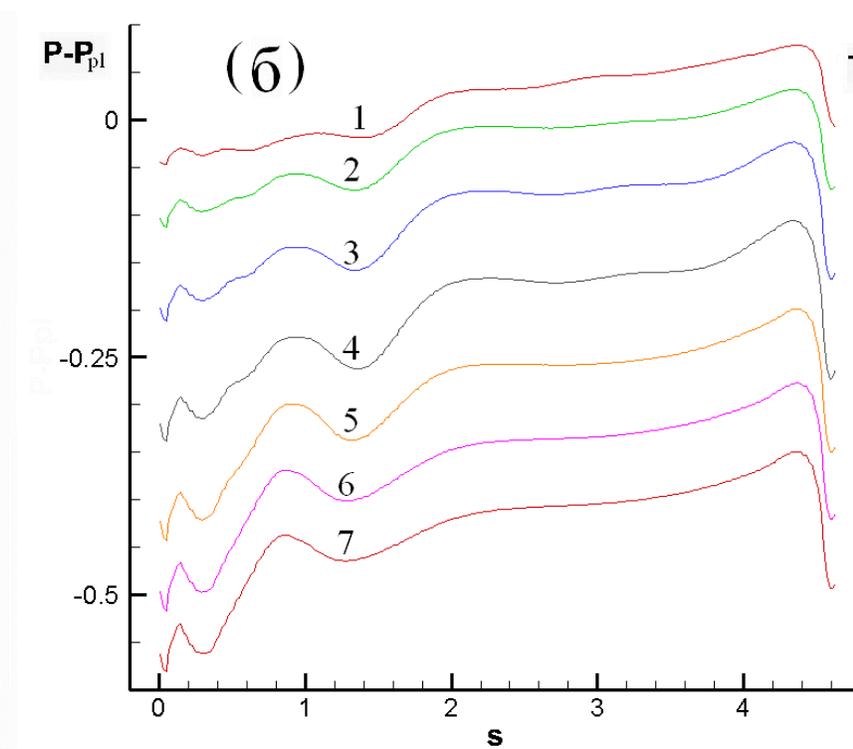
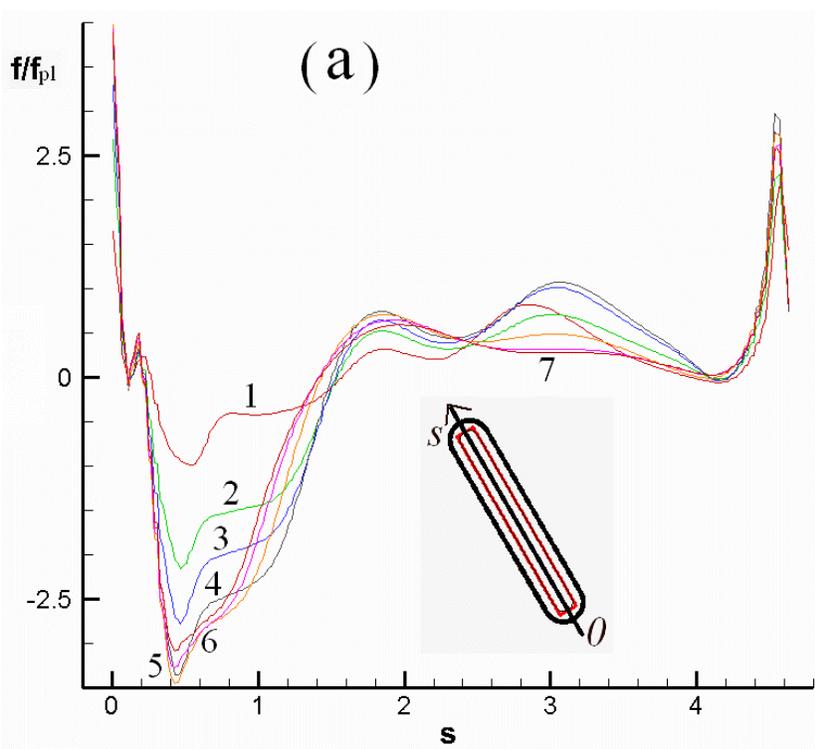
(в)



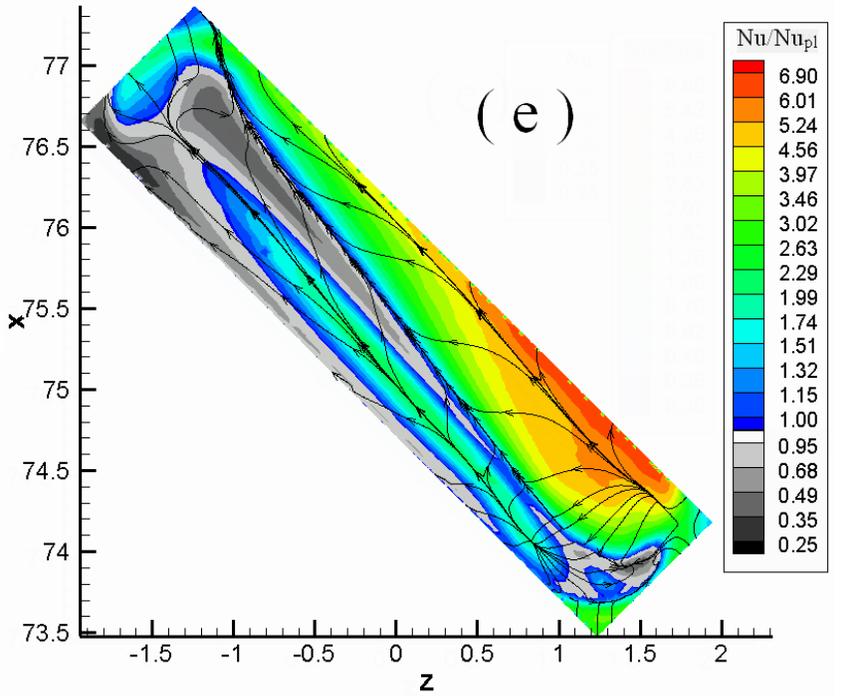
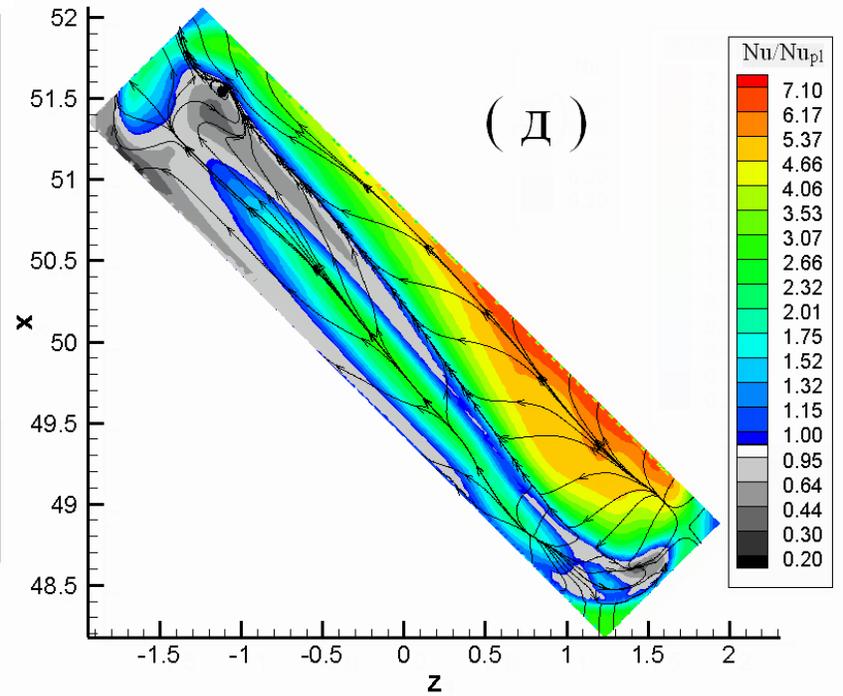
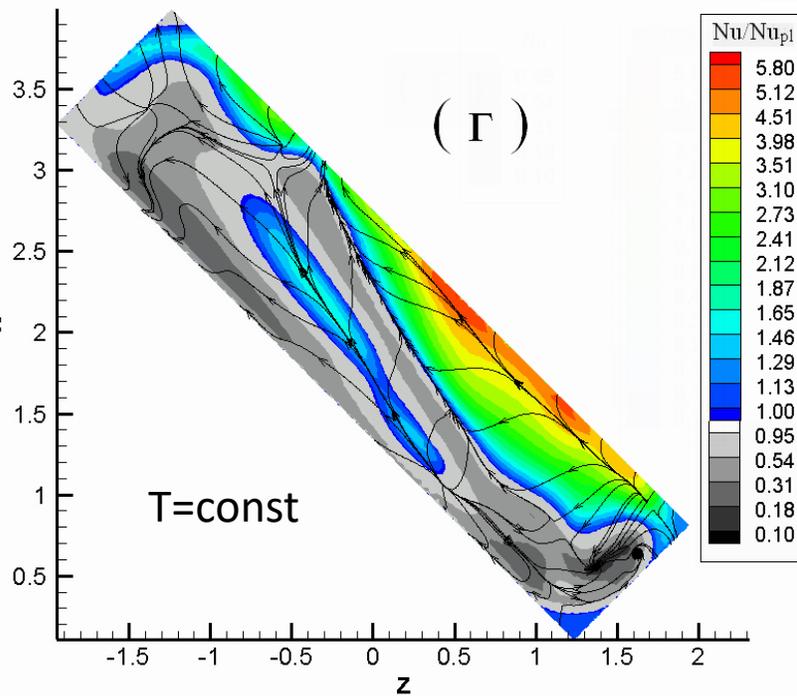
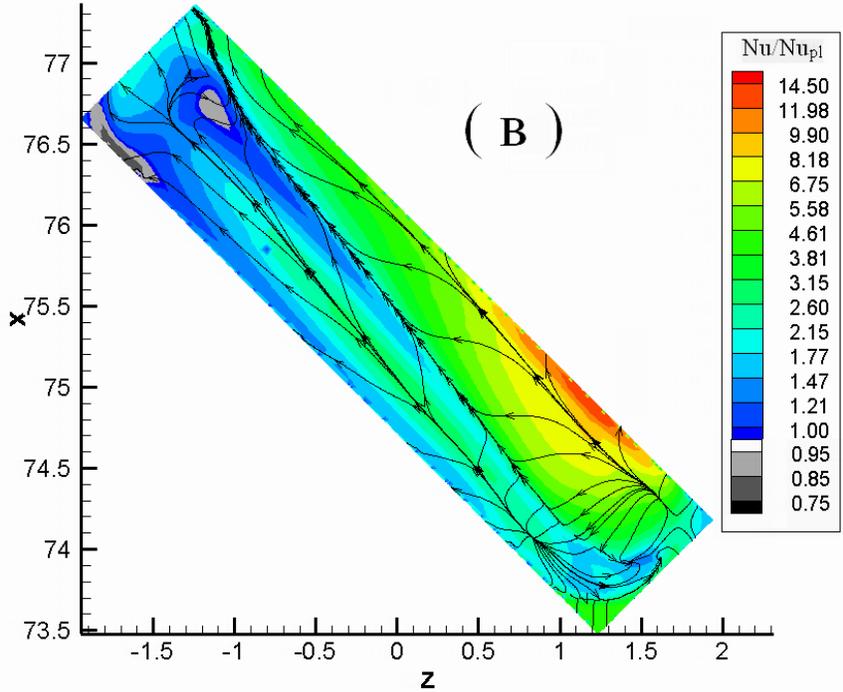
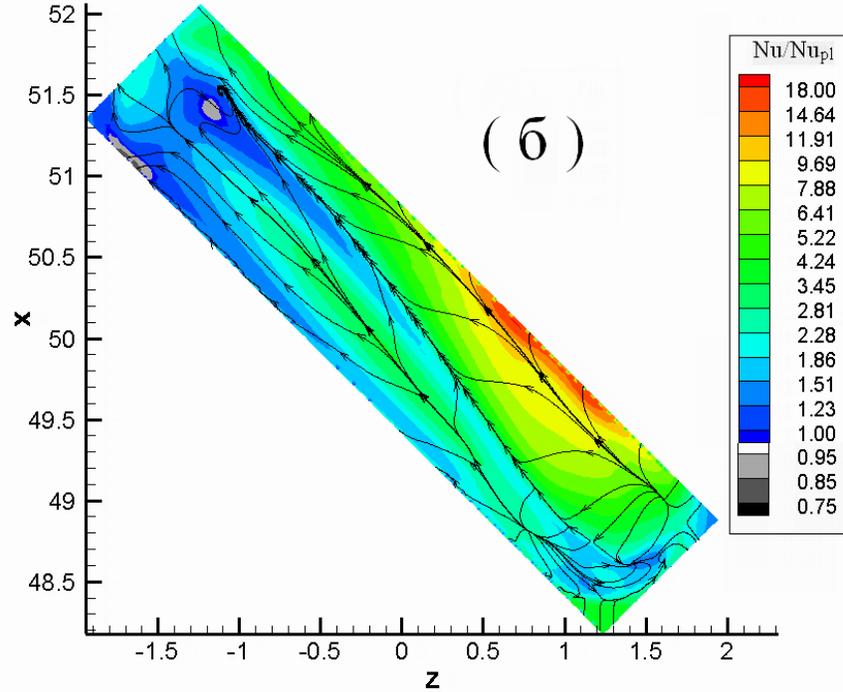
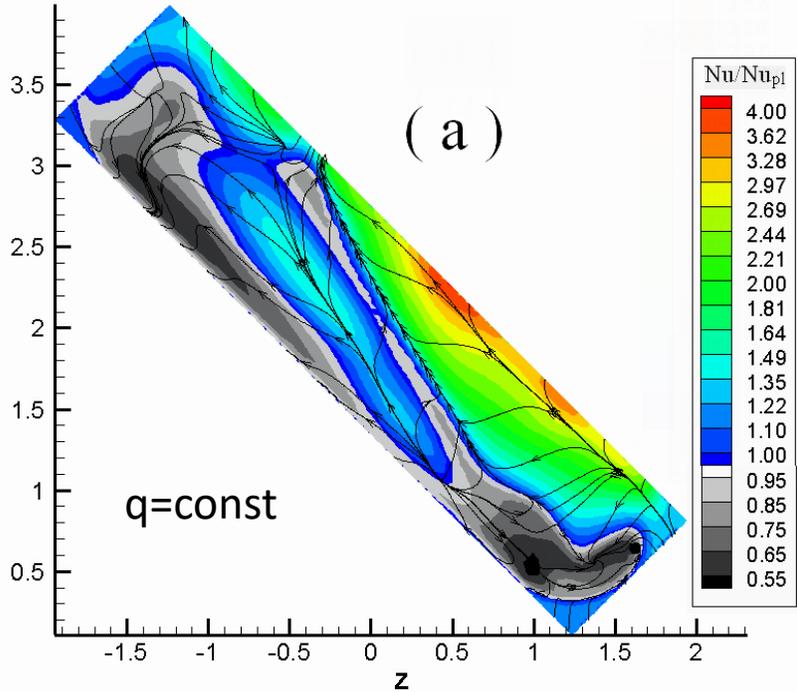
Межреберный канал
4x1x80
Канавки с шагом 2.5
 $\Delta=0.2$

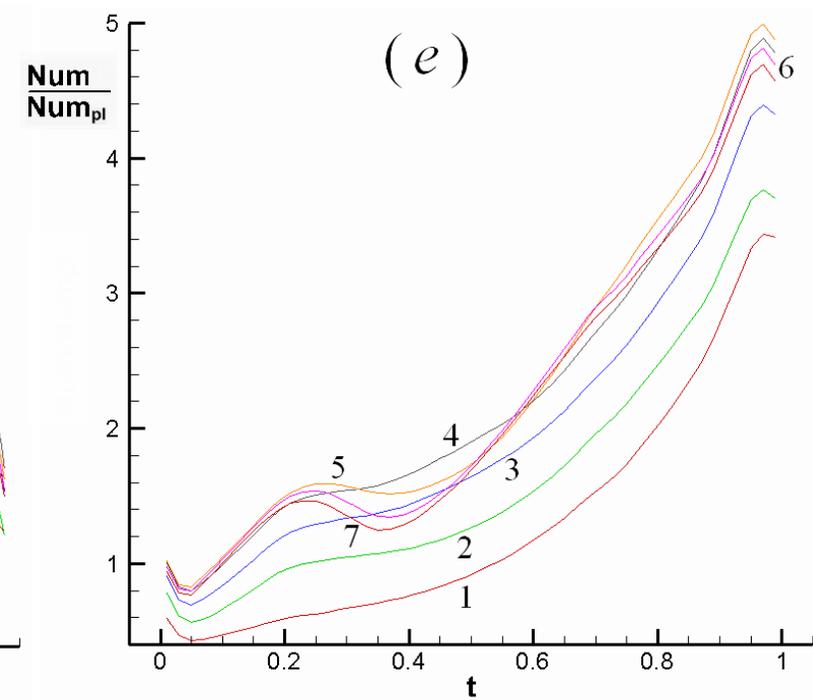
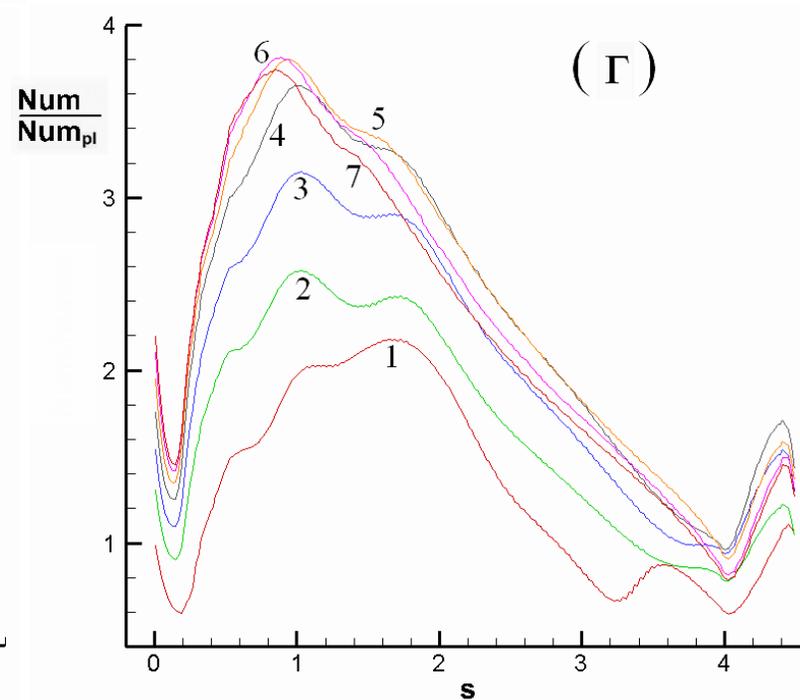
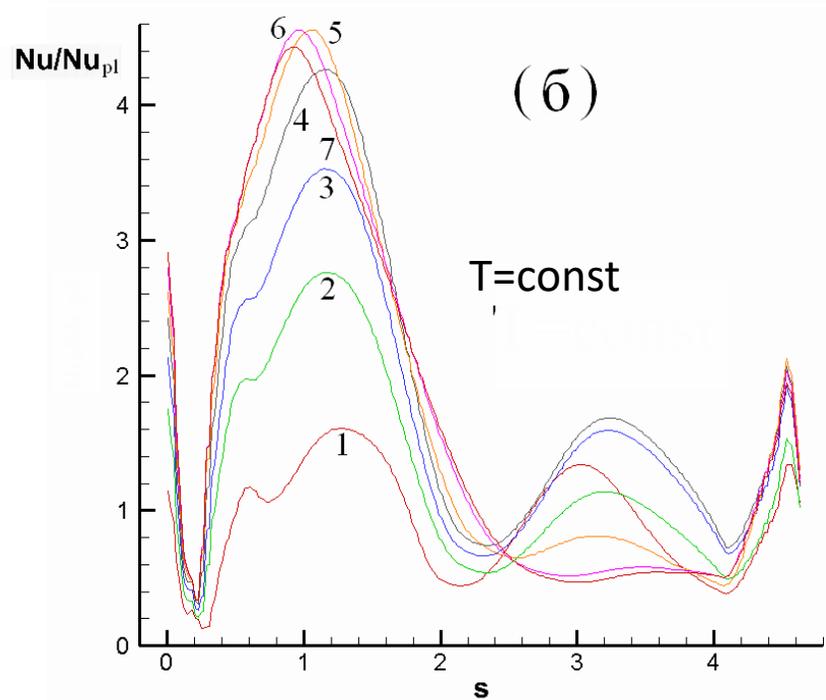
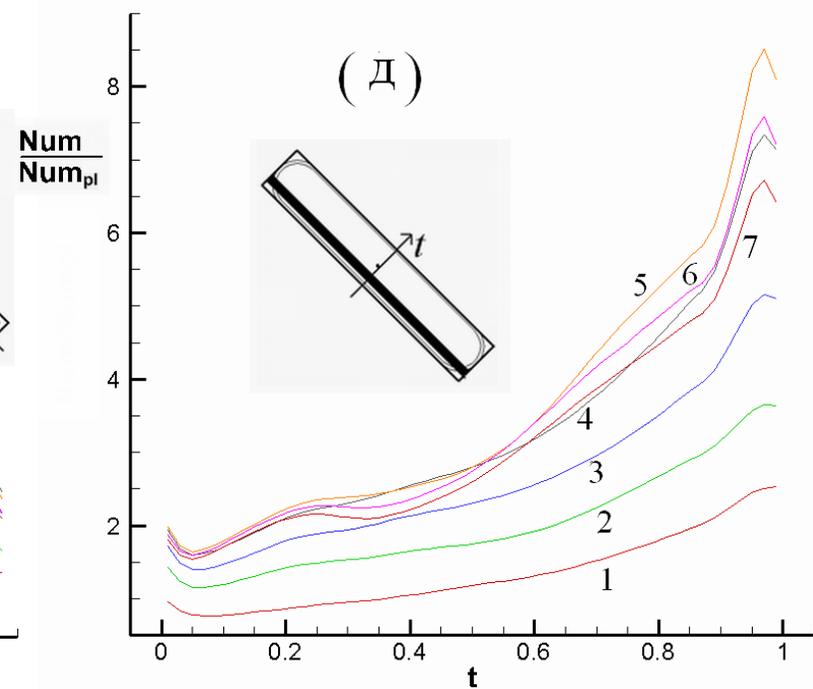
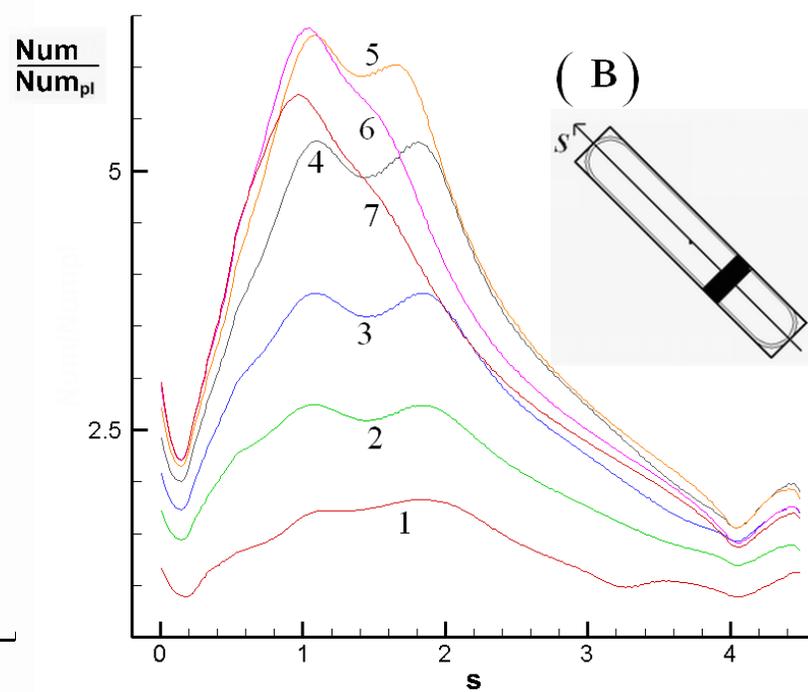
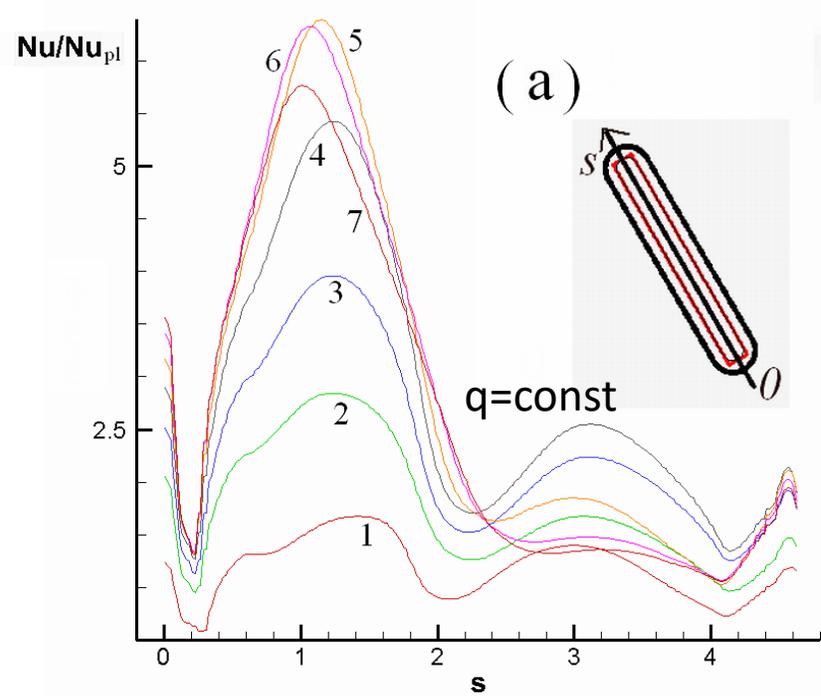
Тип граничных условий	Nu_{mm}/Nu_{mmp1}	ζ/ζ_{pl}	THE= $(Nu_{mm}/Nu_{mmp1})/(\zeta/\zeta_{pl})^{1/3}$
q=const	2.75	1.67	2.31
T=const	1.95		1.64

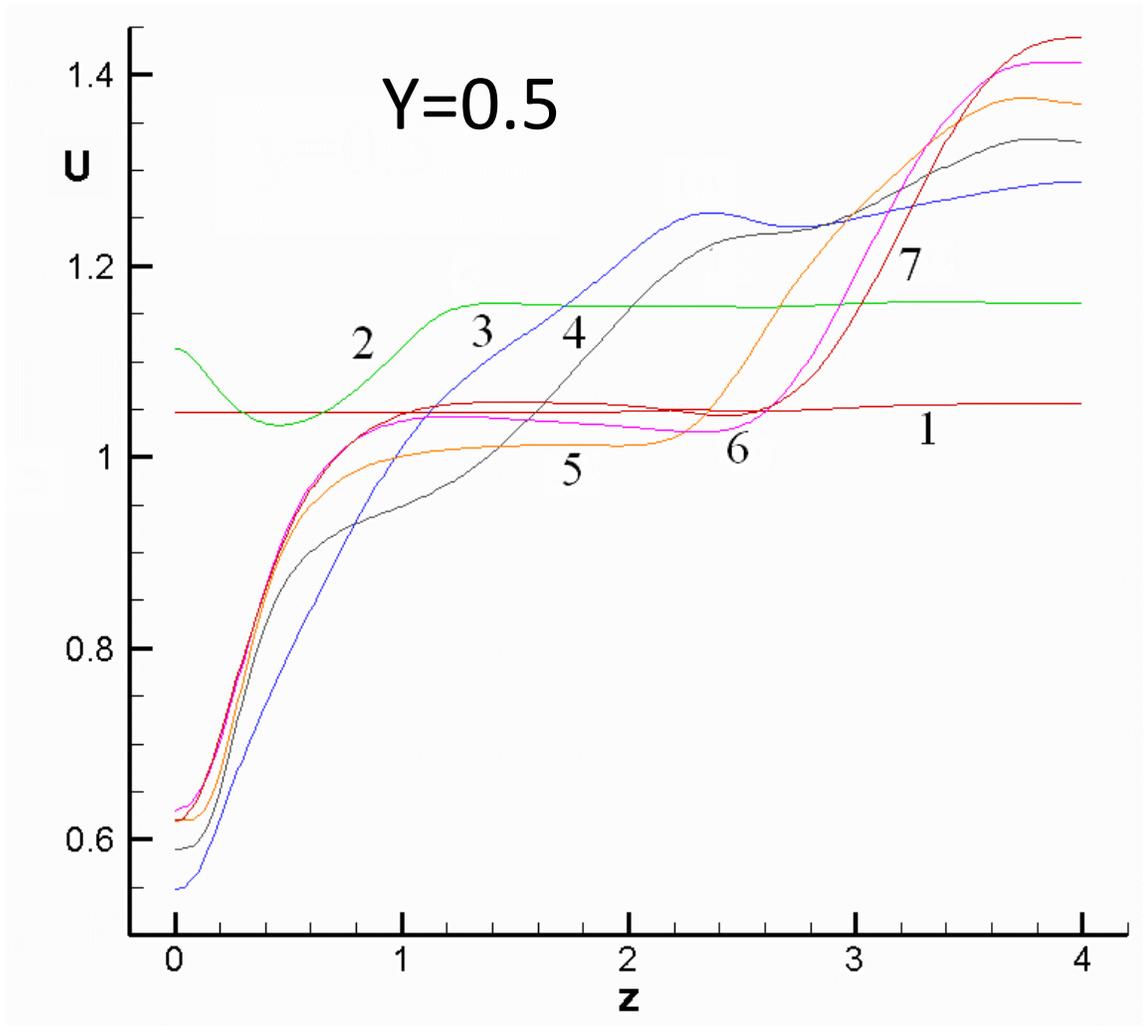
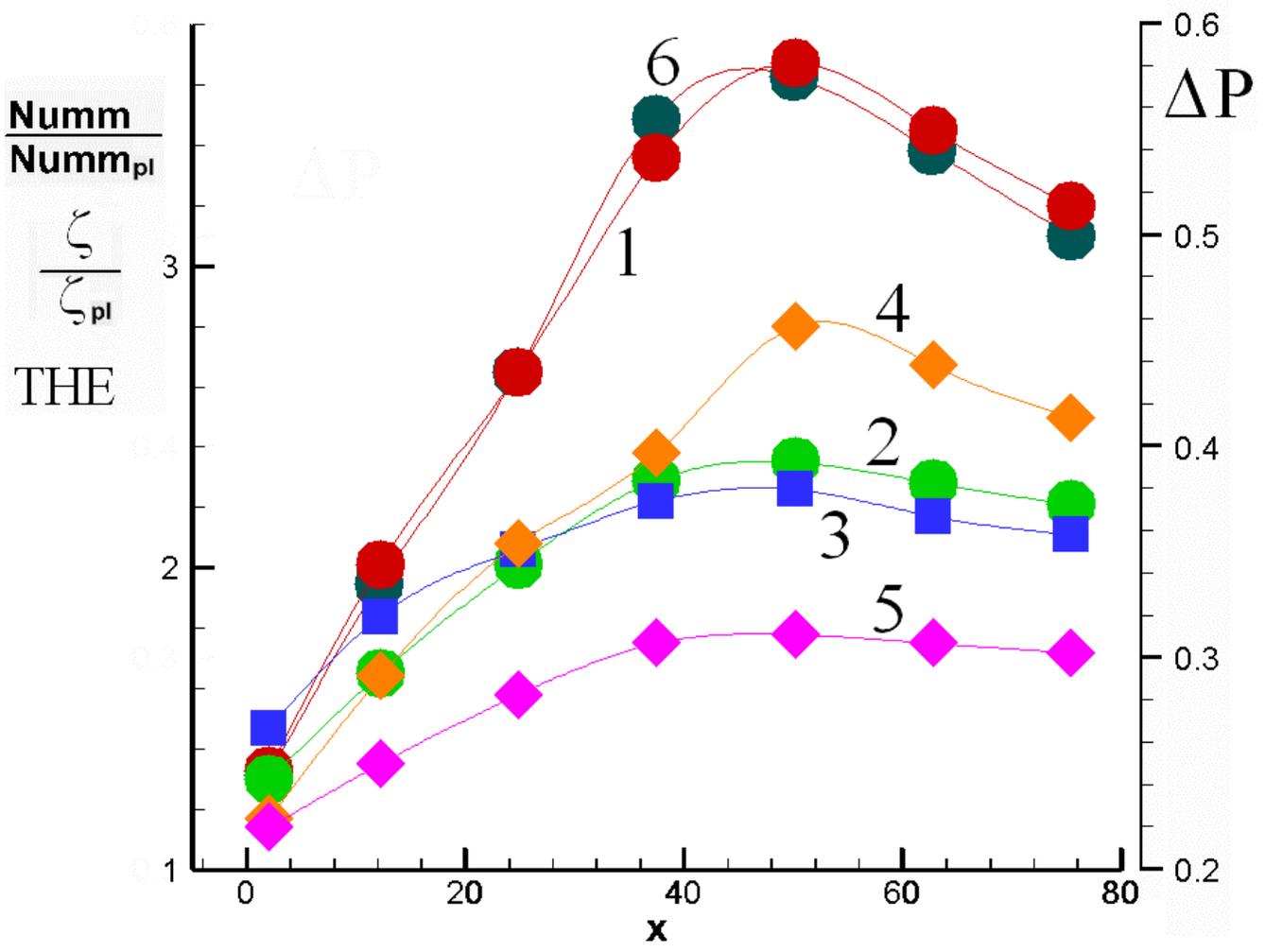




Номер канавки	1	5	10	15	20	25	30
ΔP	0.245	0.335	0.436	0.555	0.575	0.540	0.500
P_{max}	0.215	0.245	0.251	0.245	0.170	0.065	-0.035
P_{min}	-0.03	-0.09	-0.185	-0.31	-0.405	-0.475	-0.535







Заключение

1. Обоснована приемлемость подхода, основанного на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) при их замыкании модифицированной моделью переноса сдвиговых напряжений с помощью пакета VP2/3, при анализе явления аномальной интенсификации отрывного течения при генерации смерчей в единичных наклонных канавках на пластине. Численные прогнозы удовлетворительно согласуются с измерениями статического давления на поверхности канавок. Подтверждены **экстраординарные** перепады давления во входной части канавки при изменении углов наклона канавки от 0° до 90° , выполненные в НИИ механики МГУ.
2. Продемонстрирована интенсификация отрывного течения, возвратных, нисходящих, восходящих и закрученных потоков в канавке с ростом глубины. Отмечается формирование первичного спиралевидного вихря, который, начиная с глубины 0.25, покидает канавку, не доходя до ее конца. За узкой зоной возвратных токов во входной части канавка становится проточной.
3. Установлена взаимосвязь **экстраординарных** сосредоточенных перепадов давления во входной части наклонной канавки на пластине, определяющих аномальную интенсификацию отрывного течения, и генерации смерчевой структуры в ней при углах наклона от 40° до 70° .
4. Определена минимальная относительная глубина канавки, равная 0.2, начиная с которой наблюдается явление аномальной интенсификации отрывного течения и теплообмена в входной части наклонной канавки на нагретой пластине. Это явление характеризуется минимальными величинами относительного трения, приближающимися к -2, и двукратным ростом относительной теплоотдачи в срединном сечении канавки. Для него характерен большой перепад давления между зоной торможения входящего в канавку потока на наветренном склоне и областью разрежения с отрицательным избыточным давлением в месте генерации торнадоподобного вихря (при глубине 0.35 перепад составляет 0.35).
5. Установлен **физический механизм** ускорения пристеночного течения над входной частью наклонной канавки в режиме аномальной интенсификации теплообмена, связанный с увеличением продольной составляющей скорости на срезе длинной канавки почти до 60% от скорости набегающего потока и утончением пограничного слоя.