

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕРХЗВУКОВОГО ПОТОКА ЗА ОБРАТНЫМ УСТУПОМ МЕТОДАМИ RANS И LES

С.М. Босняков¹, А.П. Дубень², Т.К. Козубская²,
С.В. Матяш¹, С.В. Михайлов¹, М.Ф. Енгулатова¹

1. ЦАГИ, г. Жуковский, МО

2. ИПМ им. М.В. Келдыша г. Москва

Дорожная карта

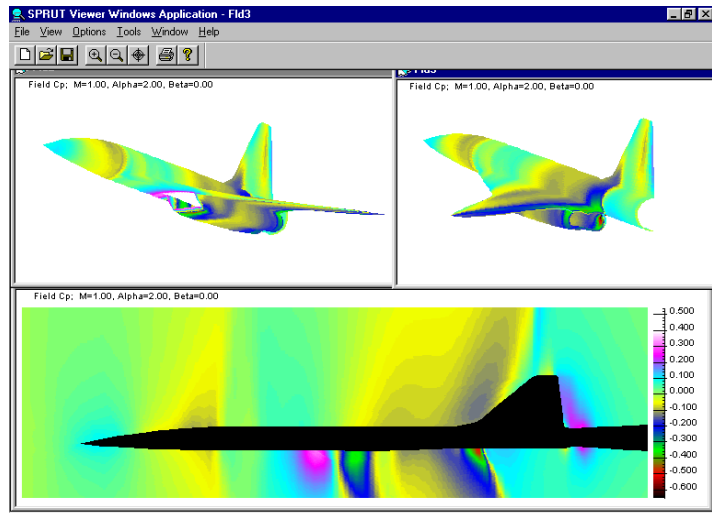
- **Мотивация**
- Экспериментальное исследование
- Постановка расчета
- Сопоставление расчета и эксперимента
- Заключение

Основание для начала работы



Сверхзвуковой самолет содержит «клиновидные элементы конструкции», которые вызывают появление отрывов

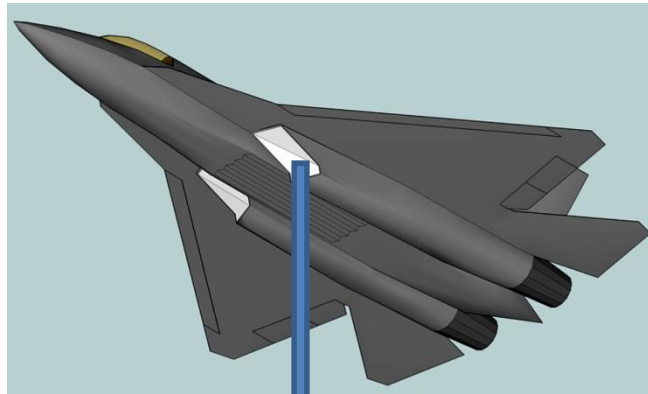
Потери полного давления в отрывных зонах в сотни раз превышают допустимые пределы и являются серьезной проблемой при проектировании элементов силовой установки



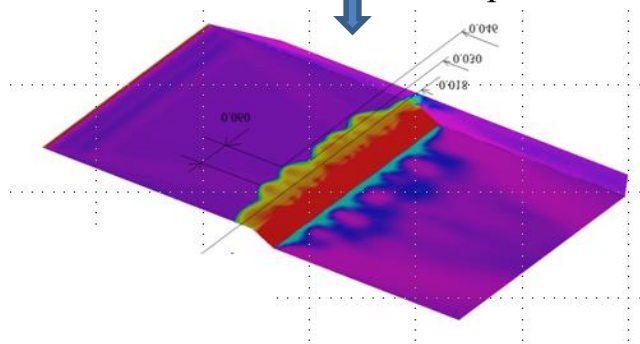
Существующие в настоящее время модели турбулентности могут давать серьезные ошибки при определении условий начала отрыва (с гладкой поверхности) и давать неточные значения параметров внутри отрывных зон.

Случай клина сжатия

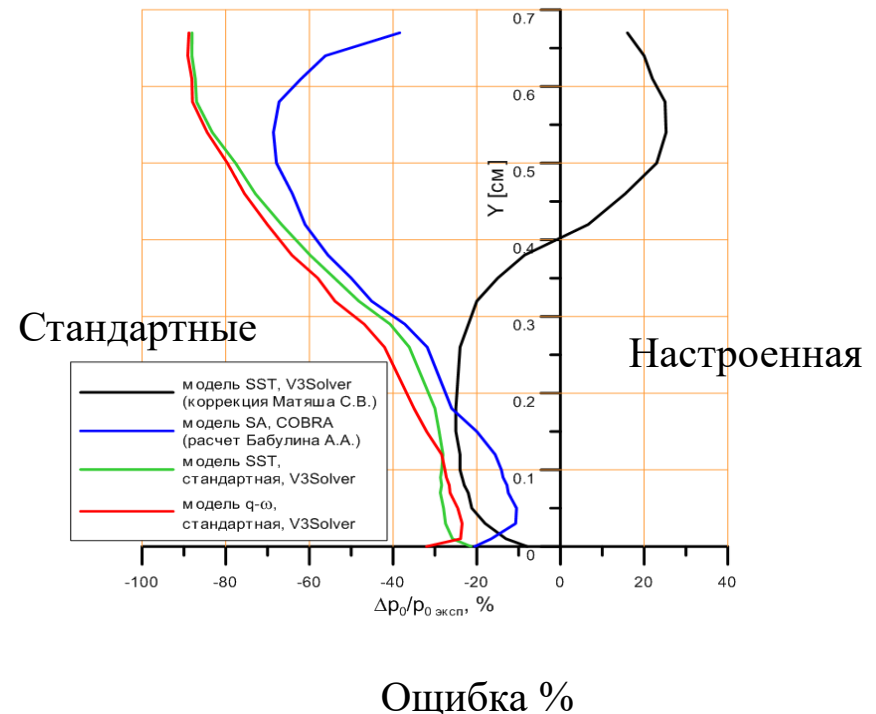
(Сильные отрывные зоны)



Отрыв на клине



ЦКМ им Белоцерковского



Ошибка при расчете u в отрывной зоне достигает 100 % без настройки модели турбулентности и не превышает 20% при динамической настройке

Что было известно перед началом работы

- В рамках программы NASP в США были подготовлены Тестовые Случаи, часть из которых были опубликованы. А.А. Желтоводов принимал активное участие в подготовке этих Случаев. В ЦАГИ проблемой отрыва занимался В.Я. Боровой.

1. Settles G.S., Dolling D.S. Swept shock-wave/boundary-layer interactions. Tactical Missile Aerodynamics // Progress in Astronautics and Aerodynamics Vol. 104. / Eds. M.J. Hemsch and J.N. Nilsen. – New York: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1986. – P. 297–379.
2. Zheltovodov A.A. Shock waves/turbulent boundary-layer interactions – fundamental studies and applications: AIAA Paper 96-1977, 1996.
3. Knight D.D., Zheltovodov A.A. Ideal-gas shock wave – turbulent boundary-layer interactions (STBLIs) in supersonic flows and their modeling: Two-dimensional interactions // Shock Wave – Boundary-Layer Interactions. Chapter 4 / Eds. H. Babinsky, J. Harvey. Cambridge Aerospace Series. New York et al.: Cambridge University Press, 2011. P. 137–201. [ISBN 980-0-521-84852-7].
4. Dolling D.S. Fifty years of shock-wave/boundary-layer interactions research: What next? // AIAA J. – 2001. – Vol. 39, ? 8. – P. 1517–1531.

Дорожная карта

- Мотивация
- **Экспериментальное исследование**
- Постановка расчета
- Сопоставление расчета и эксперимента
- Заключение

Эксперимент А.А. Желтоводова (ИТПМ СО РАН)

- Экспериментальные данные получены в двух аэродинамических трубах ИТПМ с использованием большинства известных методов проведения эксперимента

Газодинамика



T-313

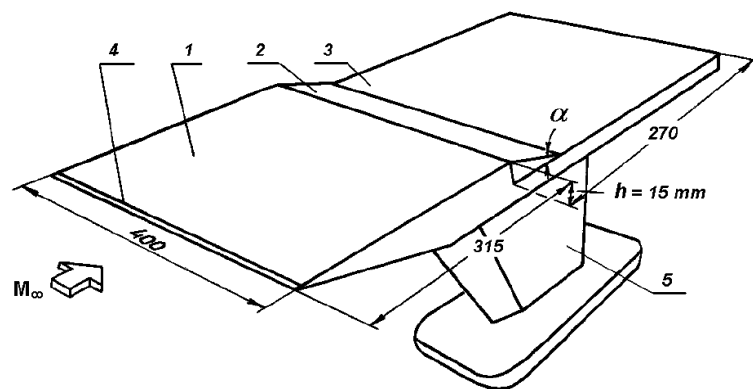
Пульсации и трение



T-325

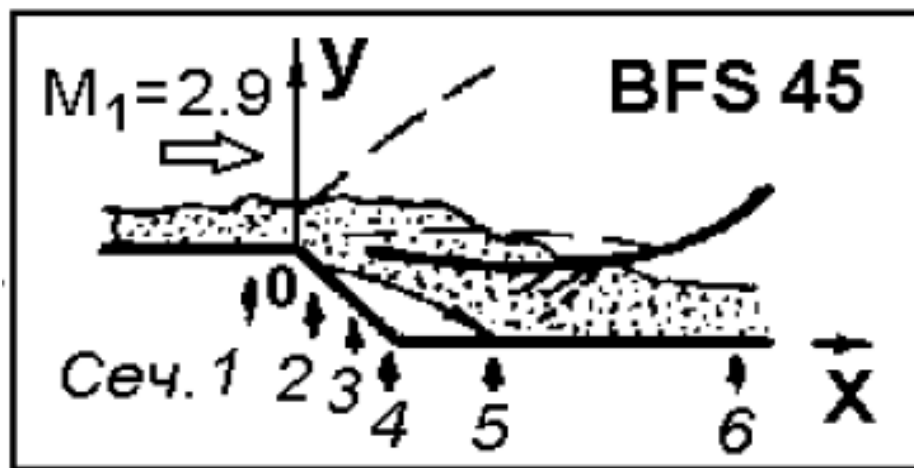
- Пито
- Дренаж
- Термоанемометр
- Сажа-масло
- Термопары
- Теплер
- Интерферометр
- Голограмма

Описание модели и режима



Модель	M_∞	P_0 , кПа	P_∞ , кПа	T_0 , К	$Re_1 \times 10^{-6}$, m^{-1}
BFS 45	3.01 ± 0.005	419.7 ± 2	11.2 ± 0.1	292 ± 04	32.7 ± 0.7

Измерительные сечения



№ сечения	1	2	3	4	5	6
X [см]	7.7	13	32.5	82.5	98	193

Точность экспериментального оборудования

Основные измерения распределений давления на поверхности модели проводились с помощью разработанного в ИТПМ СО РАН многоканального пневмокоммутатора МИД-100 с тензометрическими датчиками номинала 0.1 МПа класса 0.2, а также стандартных групповых регистрирующих манометров ГРМ-2 класса 0.5 с пределами измерения $0 \div \pm 1$ атм, что гарантировало точность измерений не хуже 0.5%. Проведенные сравнения обеспечивают аналогичную точность $\leq 0.5\%$. Параллельно с зондированием течения проводились дополнительные измерения давления на поверхности модели в исследуемом сечении с помощью дополнительного датчика ДМИ номинала 100 Кпа класса 0.5.

Дорожная карта

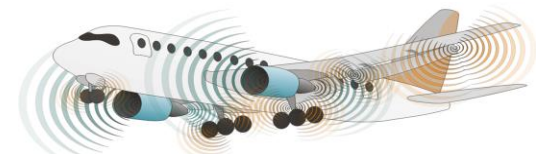
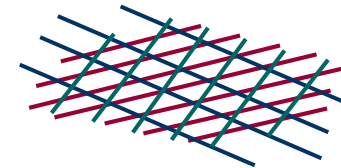
- Мотивация
- Экспериментальное исследование
- **Постановка расчета**
- Сопоставление расчета и эксперимента
- Заключение

Расчетная методология ЦАГИ

- RANS (12 млн. ячеек)
- Метод Годунова второго порядка точности
- Неявный интегратор по времени
- Явный интегратор по времени с фракционным шагом
- Модели турбулентности SST, SA, q - Ω
- Комплекс программ EWT – ЦАГИ
- Построение сетки GridCreator и GridEditor
- Графическая обработка Field Editor
- Модификация модели турбулентности Власенко-Матяш

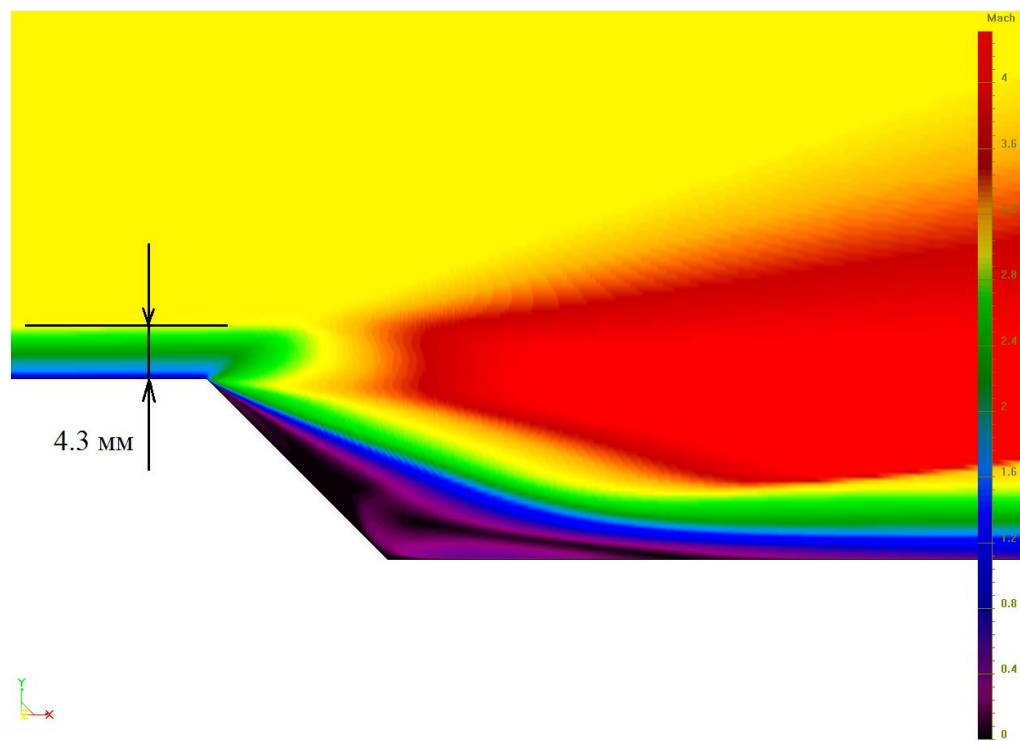
Расчетная методология ИПМ РАН

- **Модификация DDES метода** [Shur et. al, 2015]
- **Вершинно-центрированная EBR схема**
 - не выше второго порядка точности на произвольных неструктурированных стеках в рамках конечно-объемного подхода
 - 5-6 порядок точности на сетках типа равномерных решеток (трансляционно-инвариантные сетки) в рамках конечно-разностного подхода
- **WENO-EBR схема** для задач с разрывами
- **Адаптивная гибридная схема** минимальной диссипации
- **Интегрирование по времени**
 - явная схема Рунге-Кутты 4-го порядка;
 - неявная схема Ньютона 2-го порядка;
 - метод бисопряженных градиентов (BCGStab)



Код **NOISEtte**

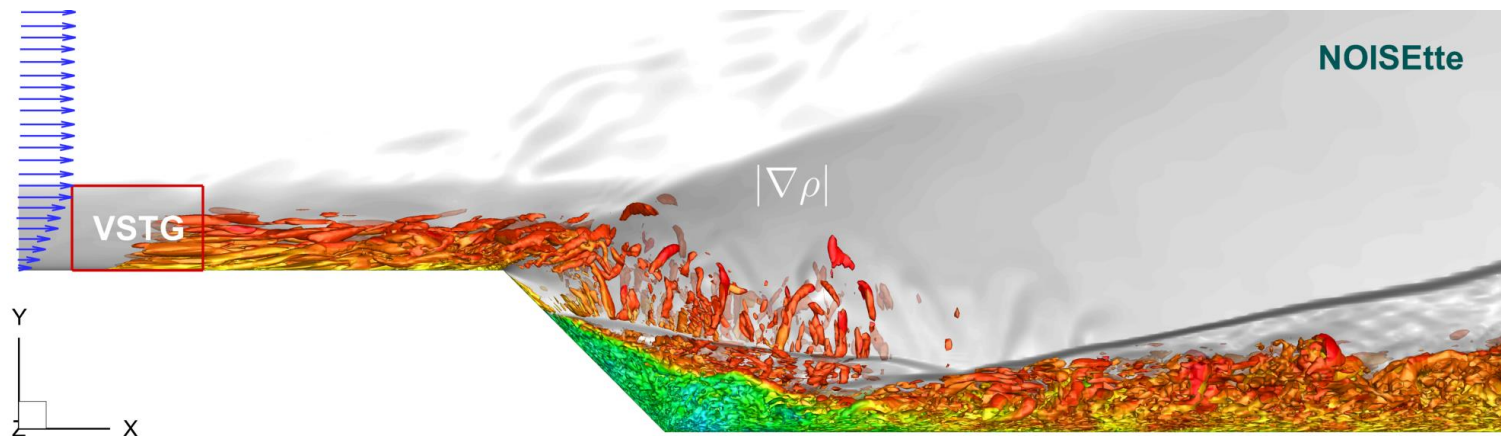
Привязка по пограничному слою (ЦАГИ)



TEST MODELS	M1	P1 [kG/cm ²]	δ [mm]	δ^* [mm]	δ^{**} [mm]	Cf1 $\times 10^3$
BFS 45	2.90	0.123	5.08	1.84	0.38	1.41

Привязка по пограничному слою ИПМ

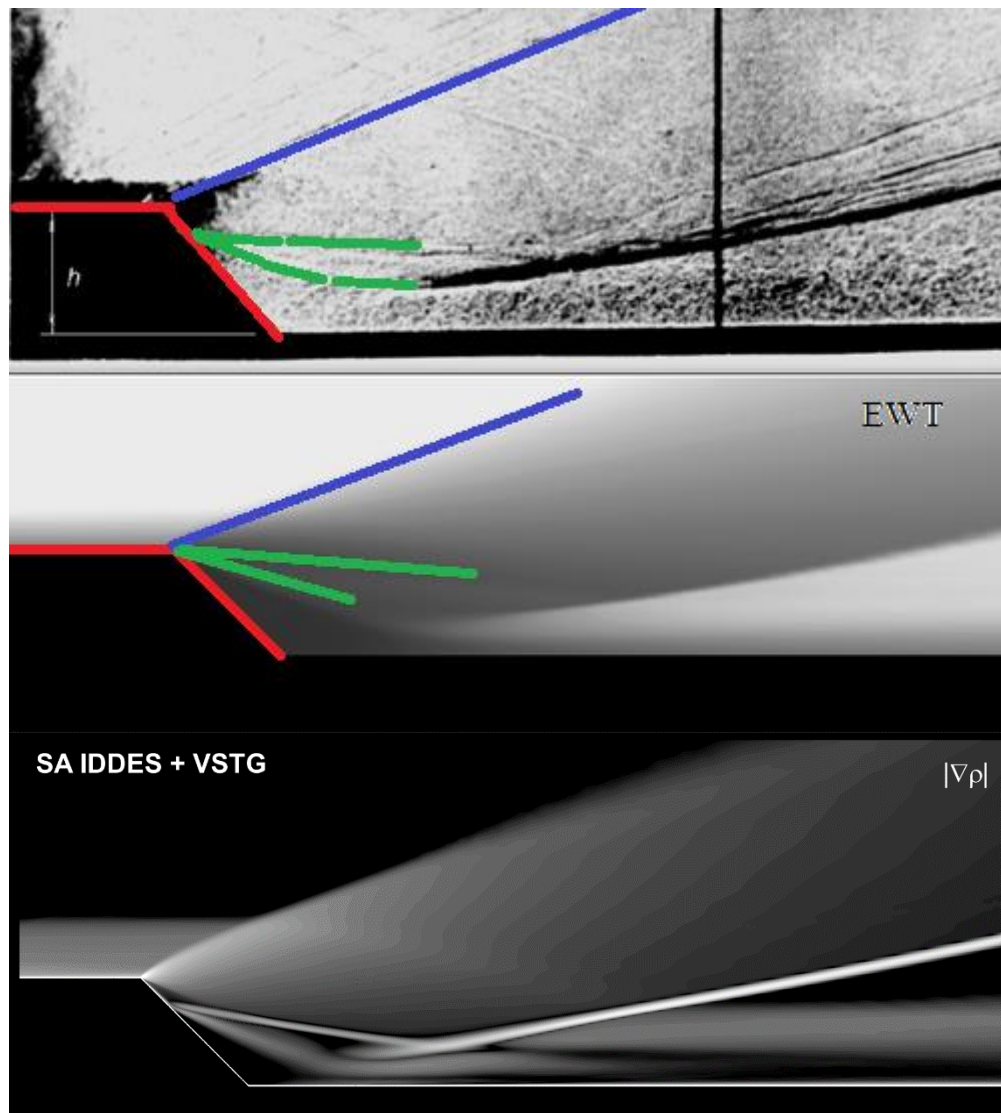
- **VSTG*** – генератор синтетической турбулентности перед уступом, турбулентные пульсации задаются через распределенный объемный источник
- На входной границе: [профили из RANS расчета](#)
- Вычислительный домен: $-3 < x/h < 50$; $-1 < y/h < 50$; $-1.5 < z/h < 1.5$ (периодика по z)
- Вычислительная сетка: 13.9 млн. узлов; $\Delta x = \delta/10$; $\Delta z = \delta/20$; $\Delta y_1^+ \leq 1$



Дорожная карта

- Мотивация
- Экспериментальное исследование
- Постановка расчета
- **Сопоставление расчета и эксперимента**
- Заключение

Сопоставление теневых «фотографий»

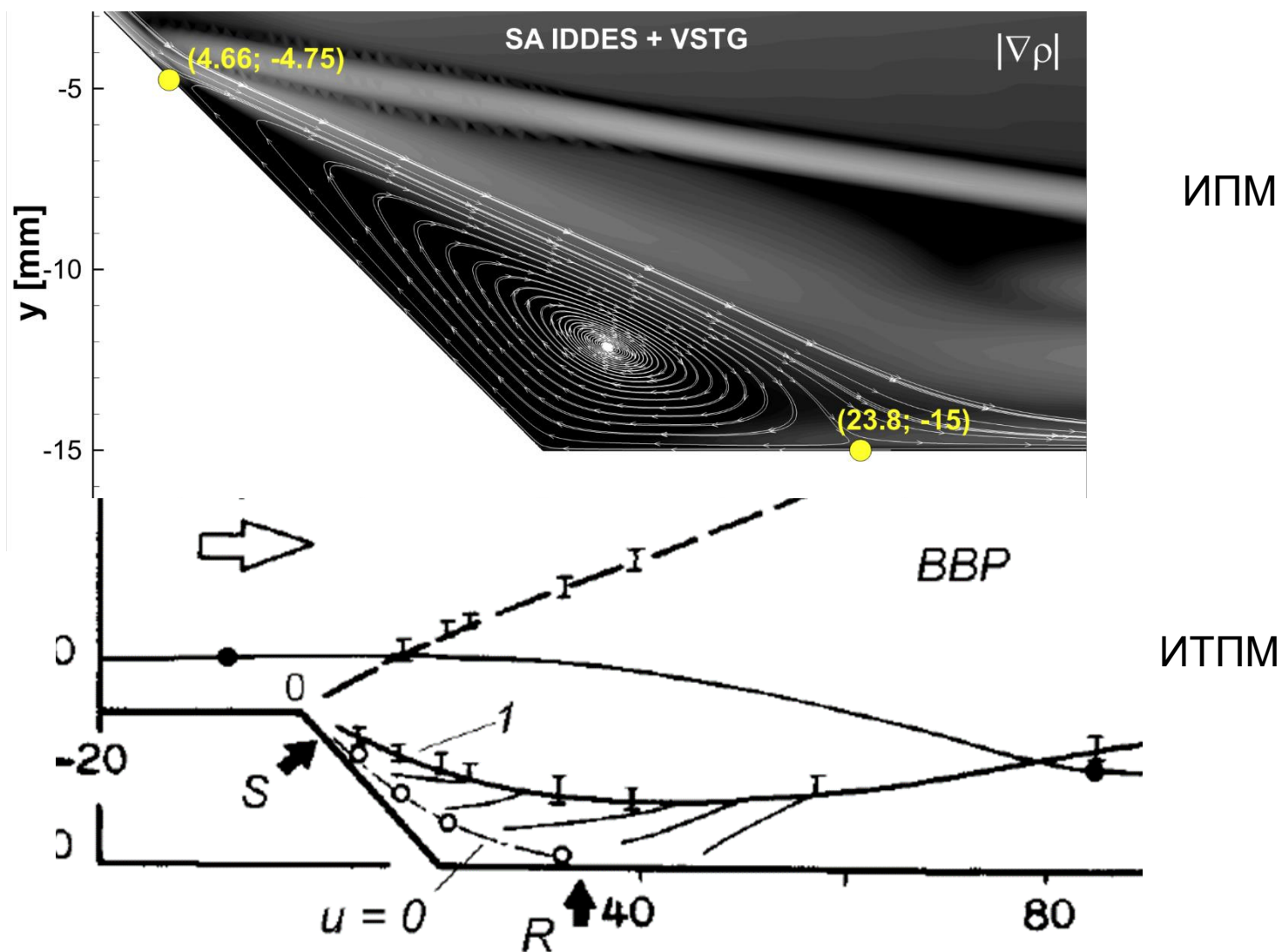


ИТПМ

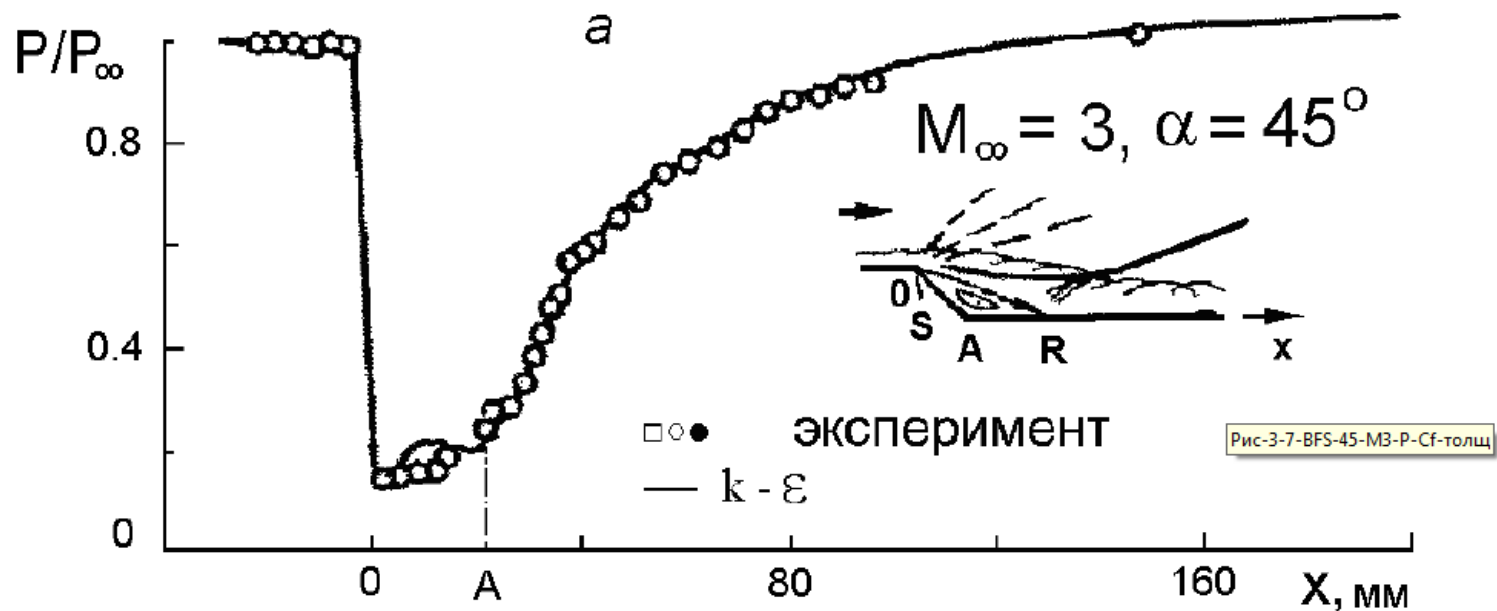
ЦАГИ

ИПМ

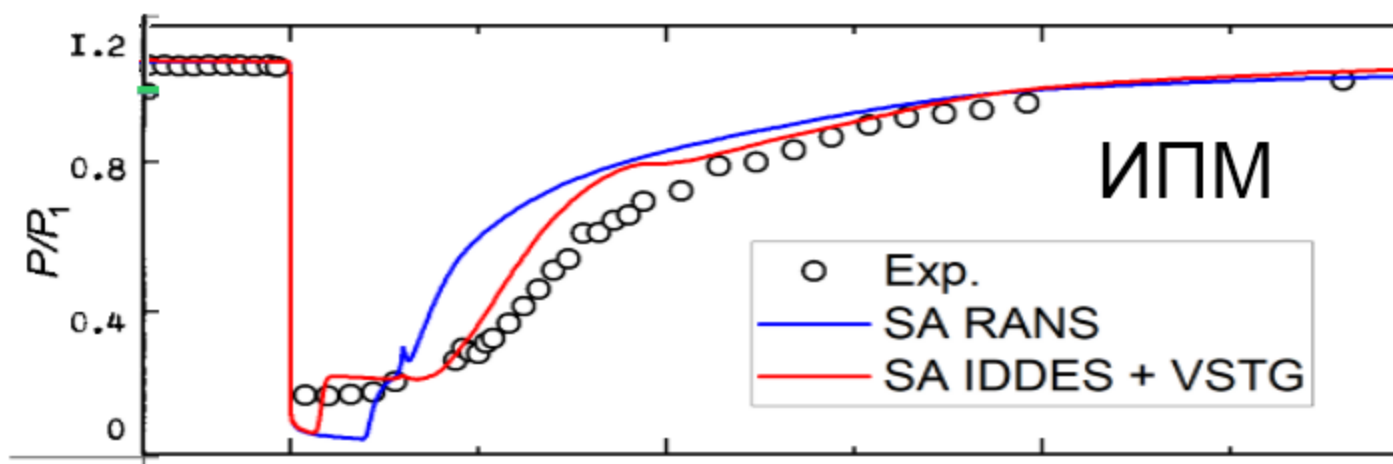
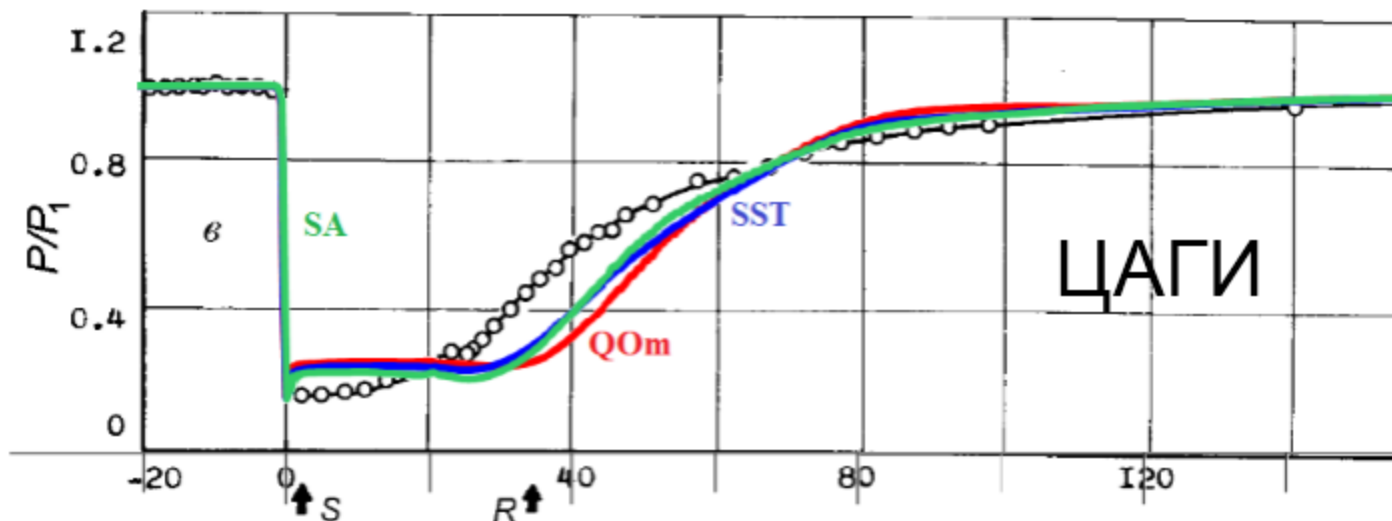
Теневая картина подробно (ИПМ, ИТПМ)



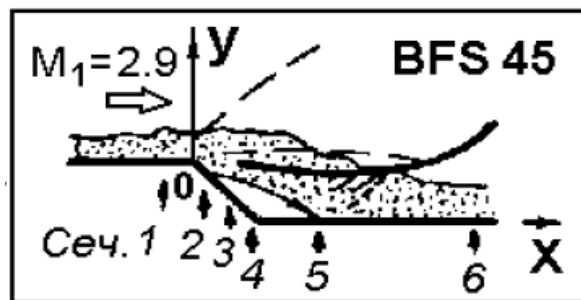
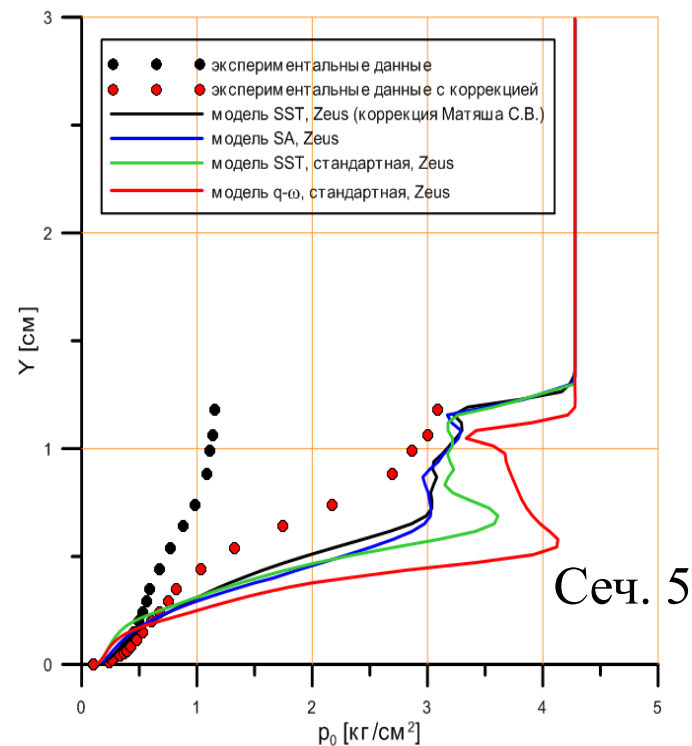
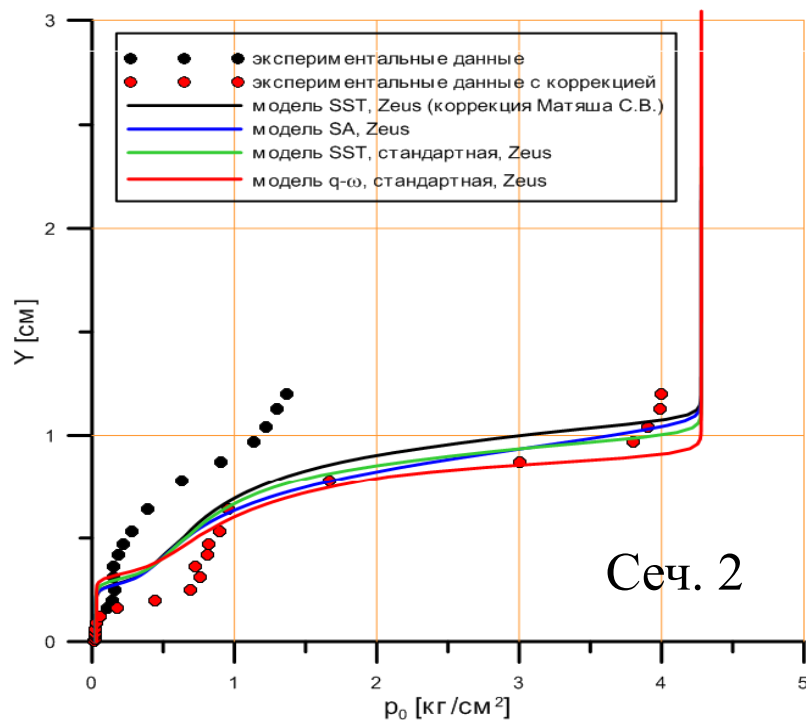
2D Расчет Желтоводова (ИТПМ)



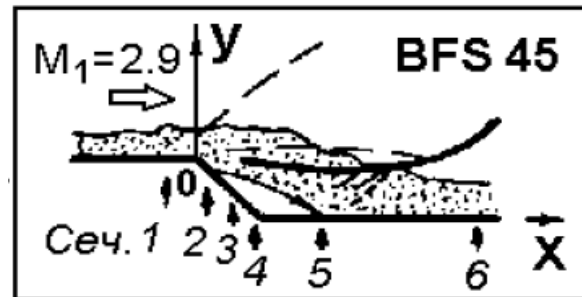
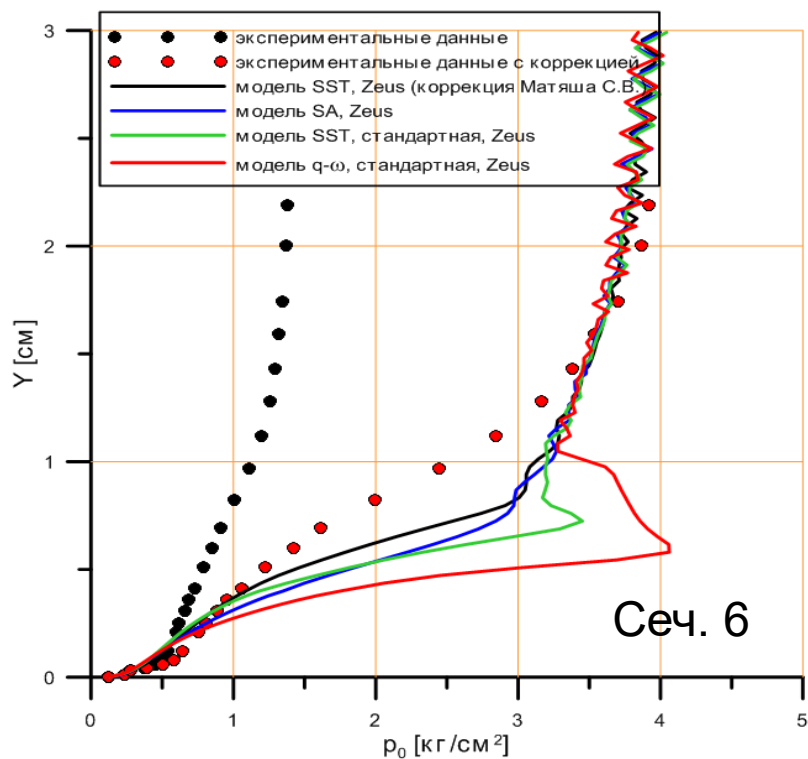
3D распределение статического давления



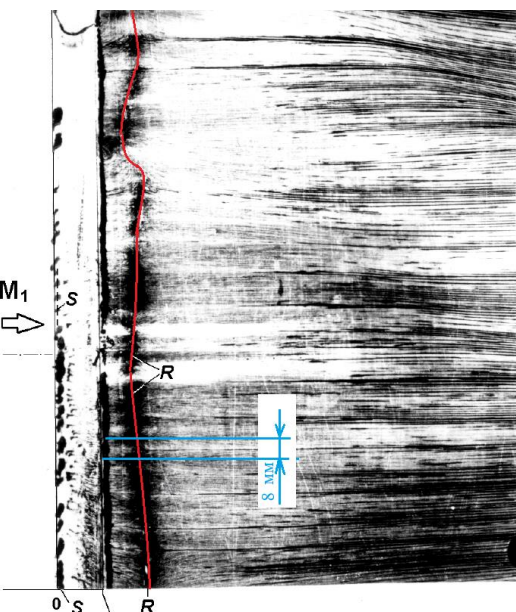
Профили полного давления (ЦАГИ)



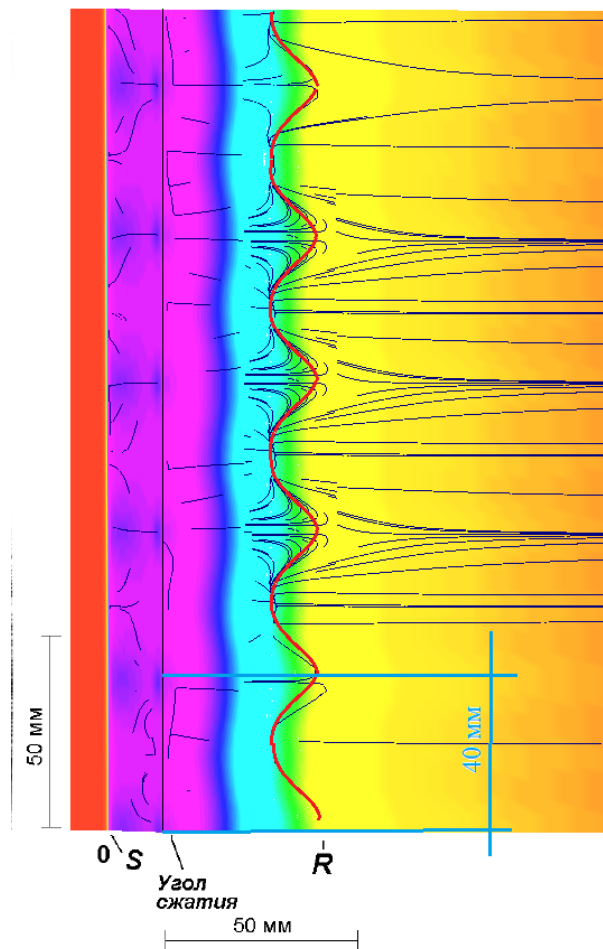
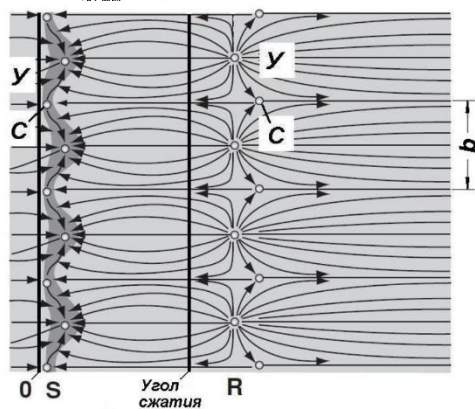
Профили полного давления (ЦАГИ)



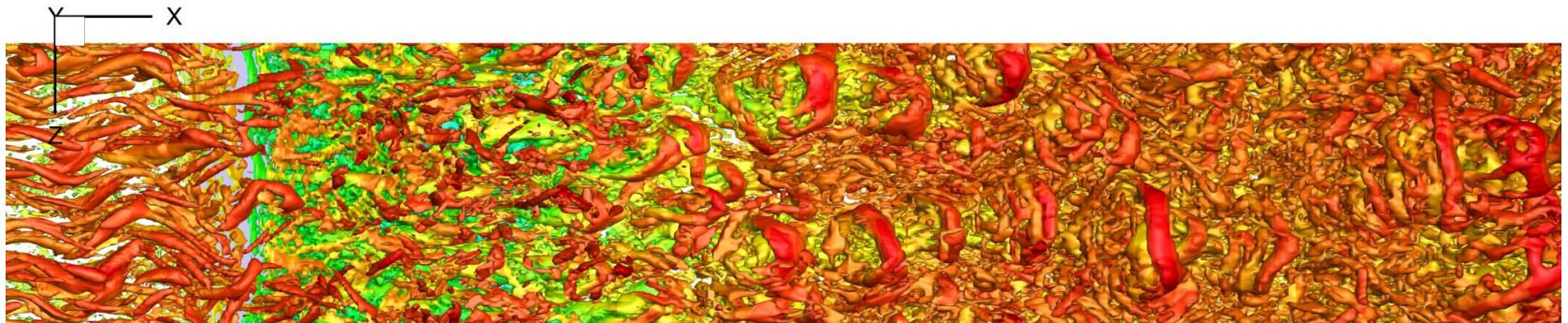
Масляные (ИТПМ) и расчетные (ЦАГИ) линии тока



$D=8$ и 50



Мгновенная «фотография течения» сверху (ИПМ)



Дорожная карта

- Мотивация
- Экспериментальное исследование
- Постановка расчета
- Сопоставление расчета и эксперимента
- **Заключение**

Заключение ИПМ

- IDDES позволяет более корректно предсказать особенности течения, однако сеточного разрешения оказалось недостаточно
- Ввиду большого числа Рейнольдса и сравнительно большой толщины пограничного слоя ($\delta_{0.99} \cong h/3$) в чувствительной области (возле кромки уступа) характеристики течения (точка отрыва) определяются RANS режимом IDDES, который работает некорректно
- Для улучшения результатов необходима сетка с лучшим разрешением

Заключение ЦАГИ

- Солидарны с ИПМ
- Основная проблема заключается в нарушении масштабов вихревых структур и пока не видно пути преодоления этой проблемы путем настроек моделей.