

Численное исследование нестационарного турбулентного течения возле клиновидного тела с обратным уступом

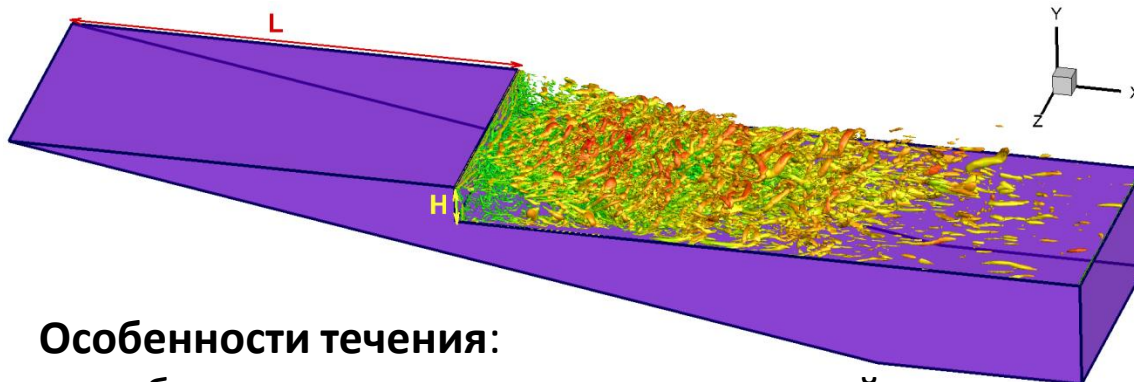


А.П. Дубень, Т.К. Козубская
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва



Б.Н. Даньков
ФГУП ЦНИИМаш, г. Королёв, Московская обл.

- Введение: физическая постановка задачи, схожие типы течения
- Вычислительная постановка задачи
- Выбор оптимальных параметров расчета
- Верификация расчёта: качественное и количественное сравнение с экспериментальными данными
- Особенности течения
- Аэроакустические характеристики течения в ближнем поле
- Выводы



Особенности течения:

- собственная транзвуковая перестройка течения: структурная перестройка течения, повышение уровней пульсаций давления, появление узкополосных составляющих в спектре;
- взаимодействующие отрывные течения в донной области.

Цели исследования:

- верификация вычислительных методов в рамках комплекса NOISEtte;
- исследование особенностей существенно трехмерного течения;
- изучение основных механизмов генерации пульсаций давления в ближнем поле.

Параметры течения:

$$Re_L = 7.2 \cdot 10^6, 8.2 \cdot 10^6$$

$$M_\infty = 0.913, 1.05$$

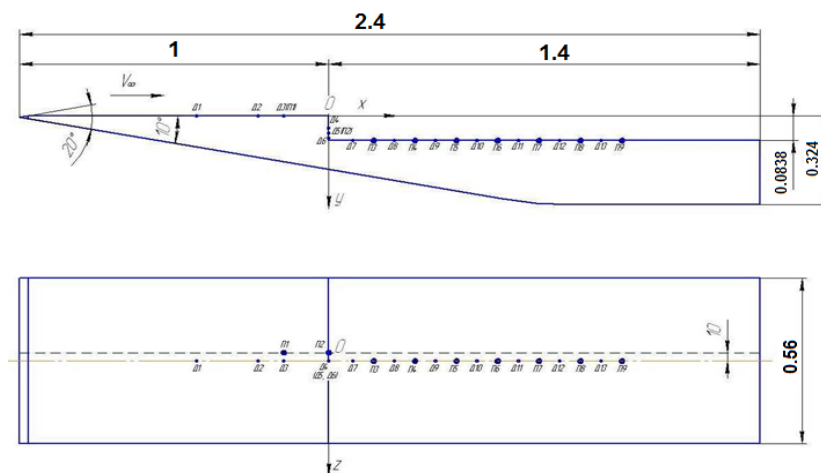
$$L = 0.358 \text{ [м]}$$

Экспериментальные данные (ЦНИИМаш):

- теневые спектры;
- капельная картина.

Профили:

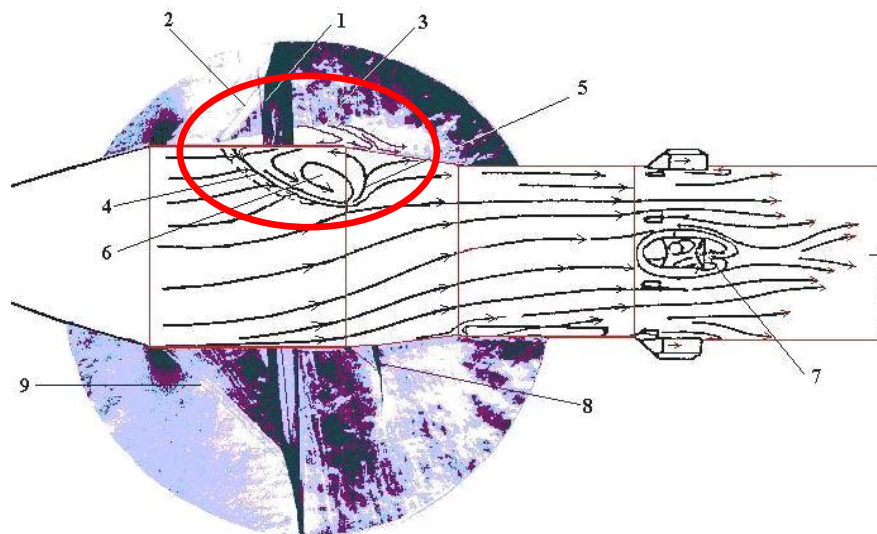
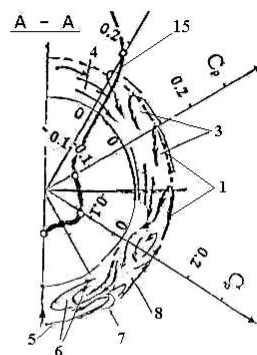
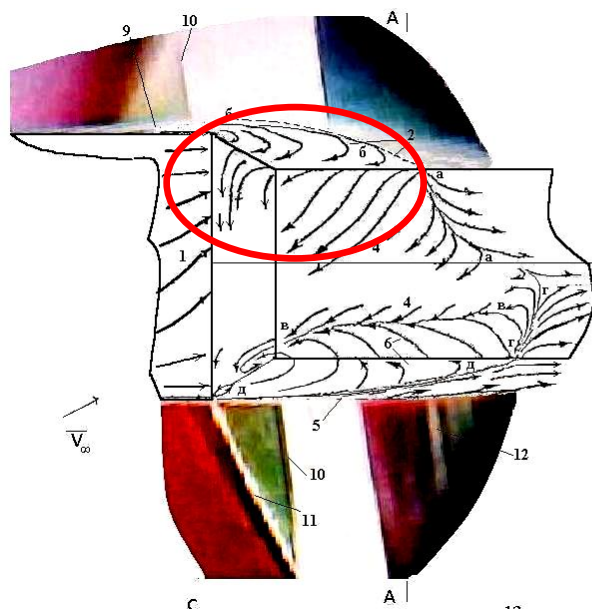
- C_p ; • OASPL ; • $PSD(p')$.



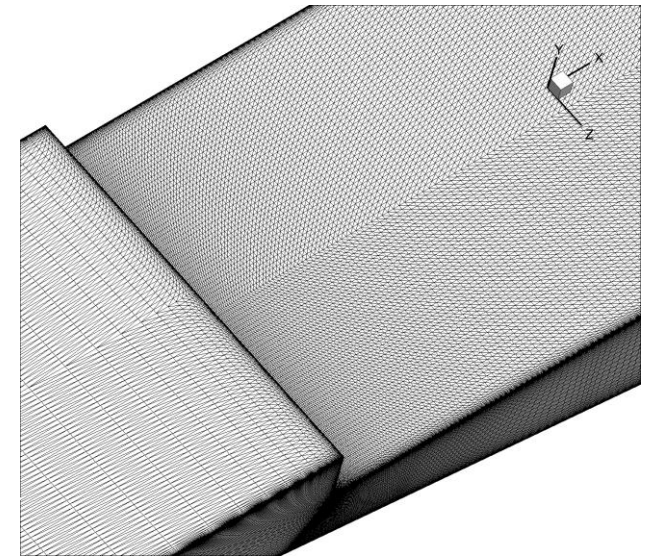
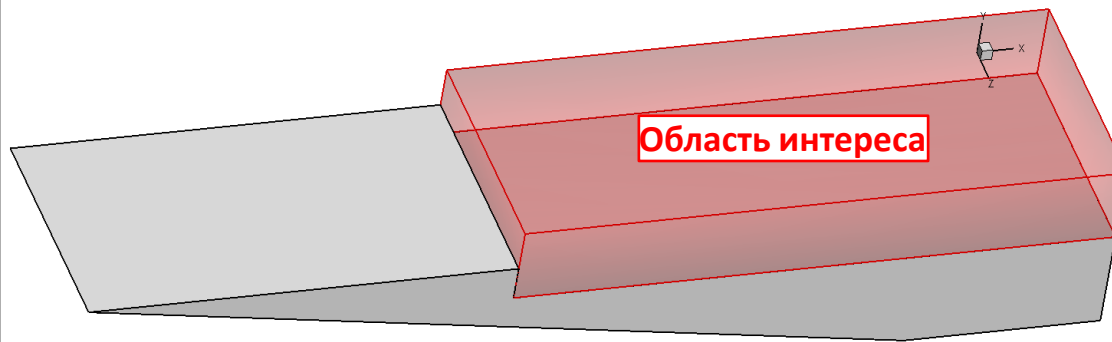
Аэрокосмическая промышленность:

- ракеты
- элементы планера (уступы, каверны, ...)

Взаимодействие отрывного течения, возникающего в плоскости углов атаки, с отрывом потока, перетекающего с боковых сторон конусоцилиндрического тела при угле атаки, отличном от нуля



1й этап: выбор оптимальных параметров расчета



Начальная сетка: 15.5M узлов, 91.8M тетраэдров.

$$L_x \times L_y \times L_z = 20 \times 20 \times 20$$

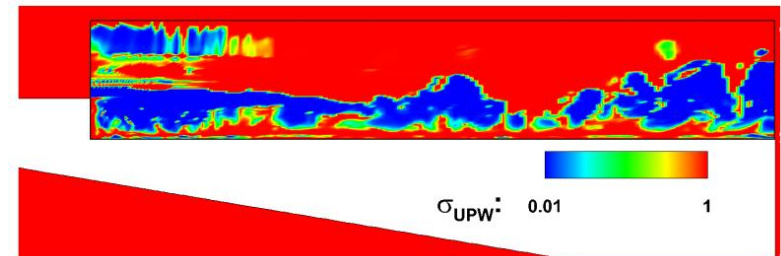
$$\Delta z = 5 \cdot 10^{-3} \cong \delta / 2.5$$

Расчетный код NOISEtte

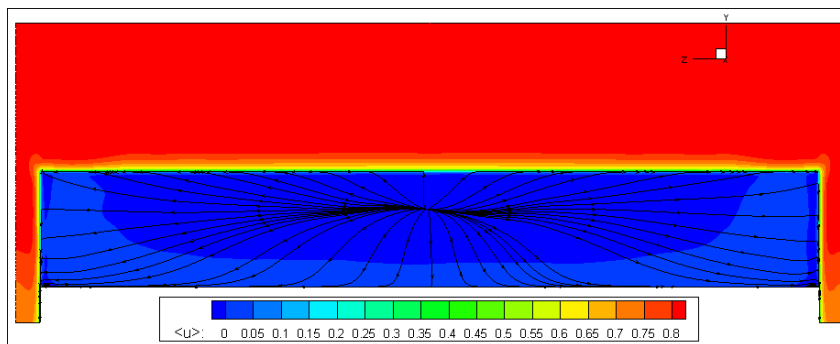
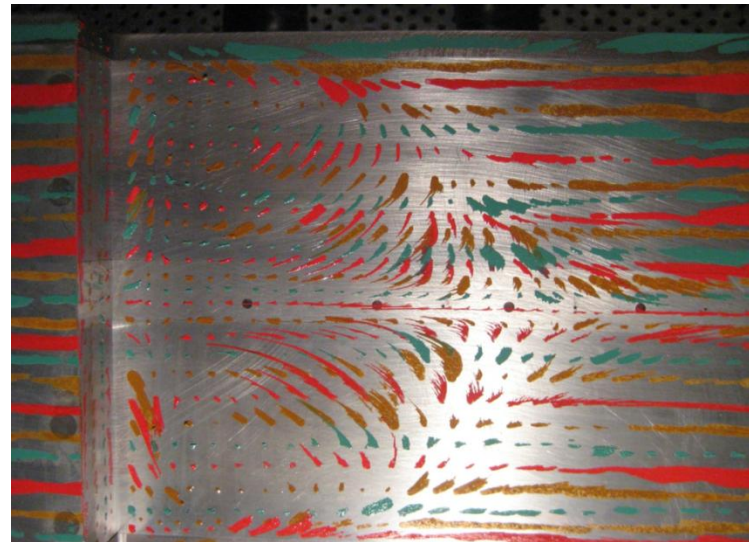
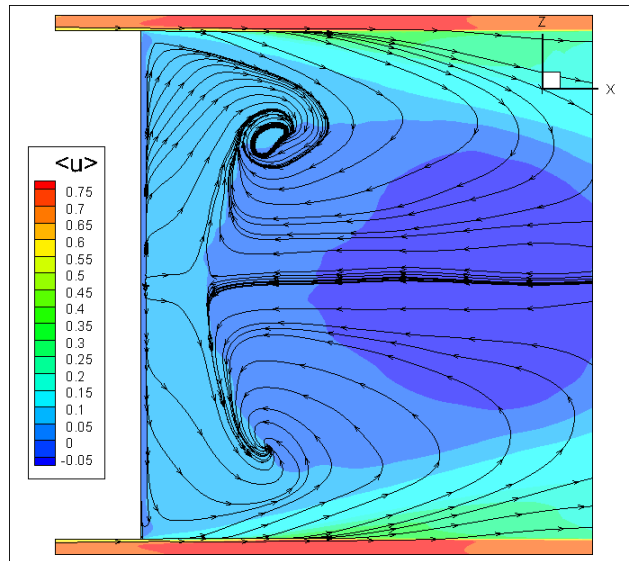
Численные методы:

- SA RANS, SA IDDES;
- Численная схема повышенного порядка:
 - гибридная CD/UPW * в зоне интереса
 - Противопоточная – в остальной
- Неявная схема 2го порядка. CFL<1 в LES зоне области интереса

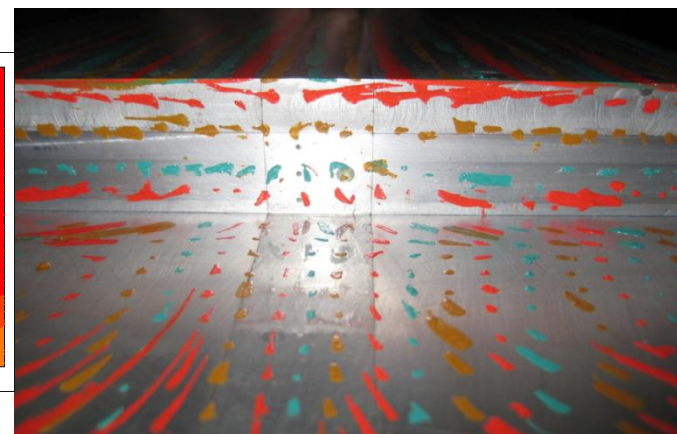
*[Travin et al., 2004]



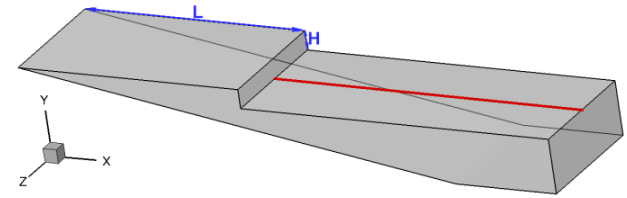
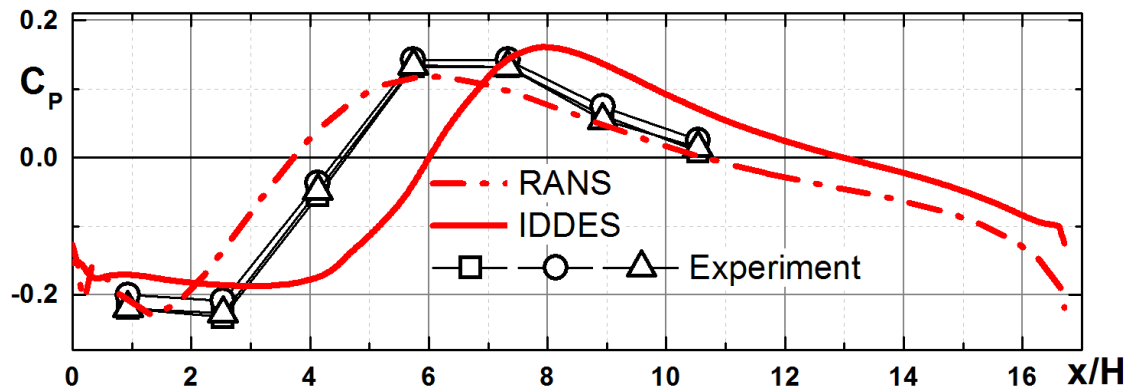
IDDES: качественно схожая картина течения



Линии тока осредненной скорости

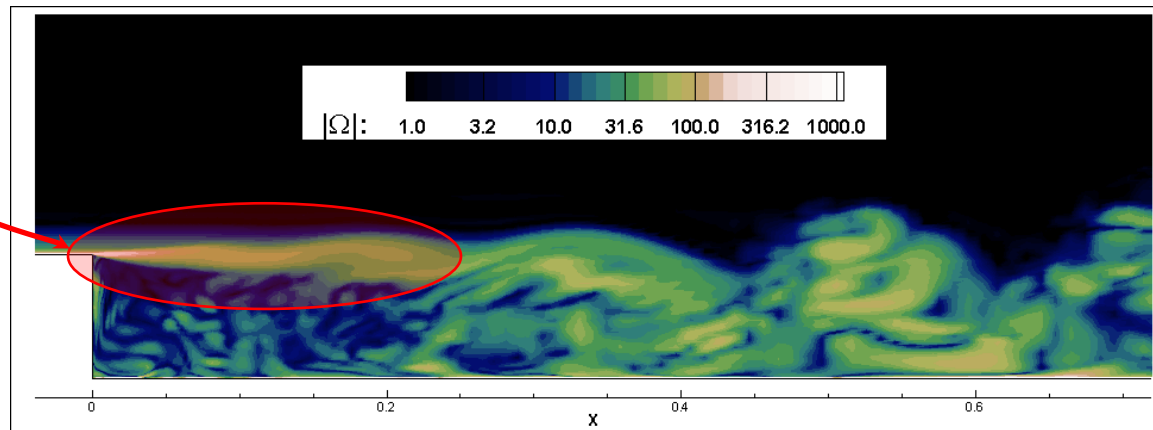


Экспериментальная картина течения



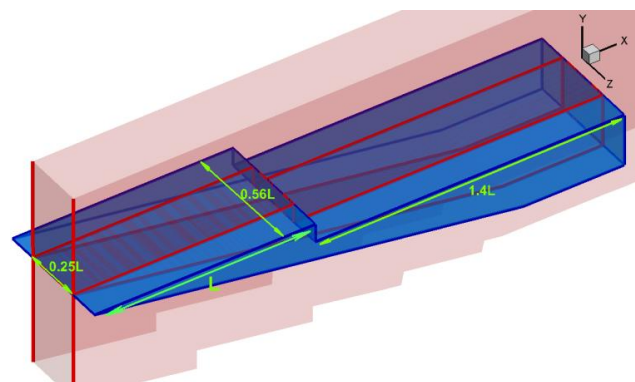
Основная причина рассогласованности данных расчета IDDES и эксперимента:
задержка «численного перехода» в слое смешения, что обусловлено:

- **недостаточным сеточным разрешением в поперечном направлении** $\Delta z = 5 \cdot 10^{-3} \cong \delta / 2.5$ (рекомендуется $\Delta z = \delta / 20$, но требует больших вычислительных затрат, чтобы получить достаточную выборку для хорошего спектра за разумное время)
- схемной диссипацией
- проблемой «серой зоны», характерной для DES



Цель: исследовать влияние схемной диссипации и подсеточного масштаба

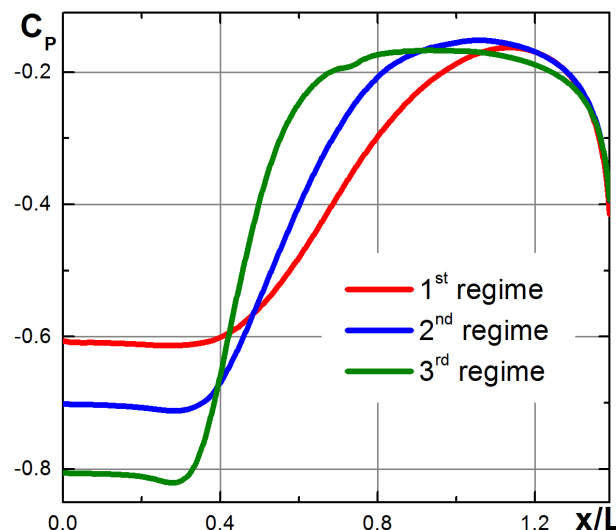
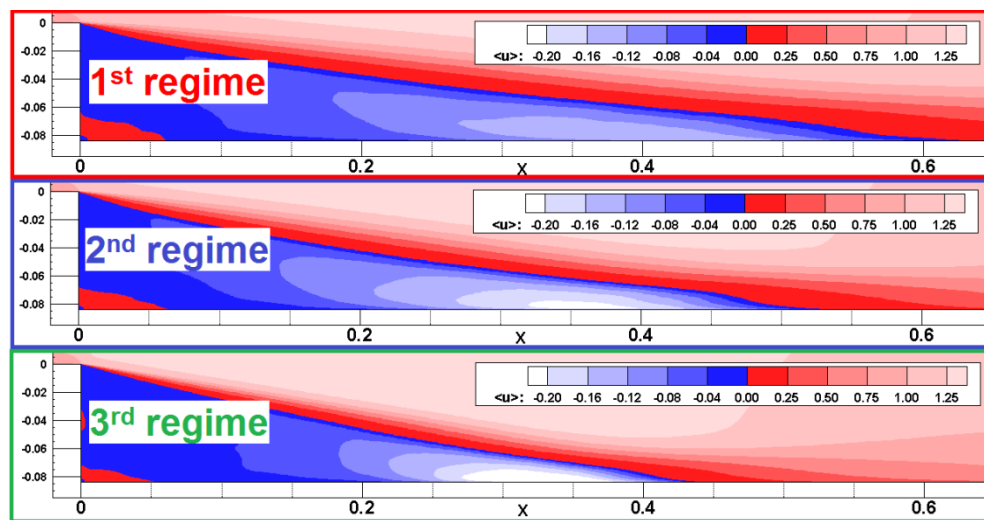
Упрощенная конфигурация: бесконечное клиновидное тело, периодика по Z, $L_z = 0.25L$



Моделирования в 3х режимах:

1. противопоточная схема во всей области
2. гибридная CD/UPW схема в донной области
3. гибридная CD/UPW схема в донной области + модификация подсеточного масштаба (Δ):
 $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, 0.1\Delta z)$

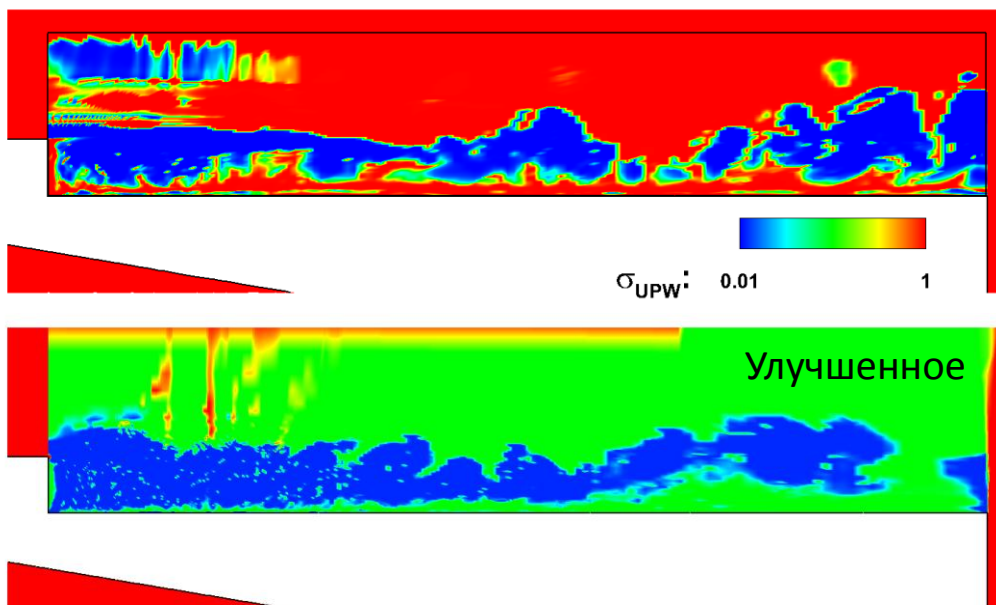
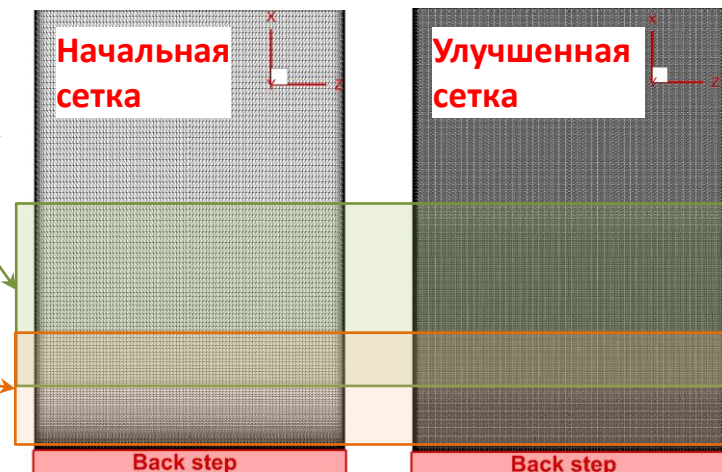
Результаты:



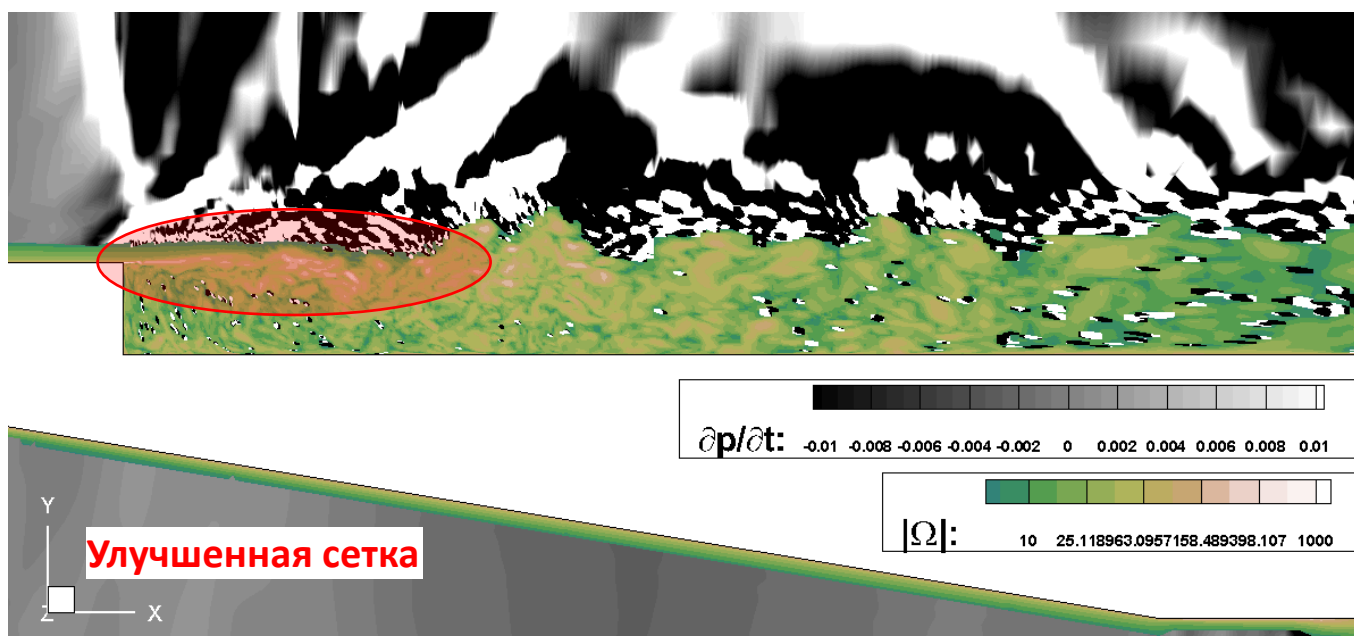
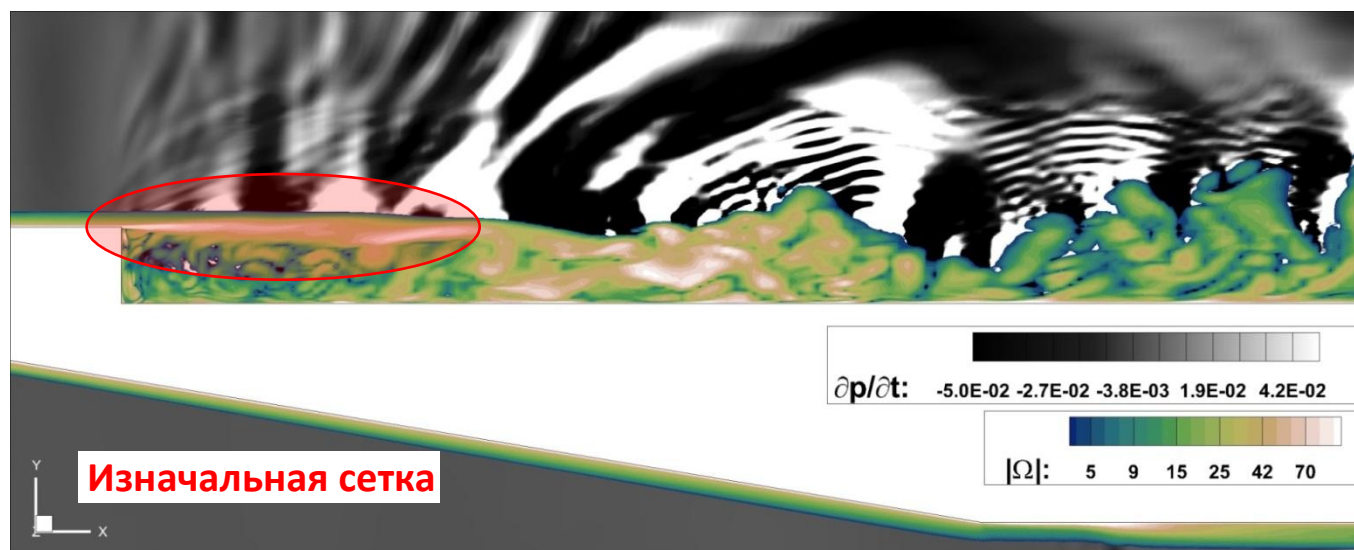
- Критическая зависимость результатов от численной схемы и Δ

Улучшения:

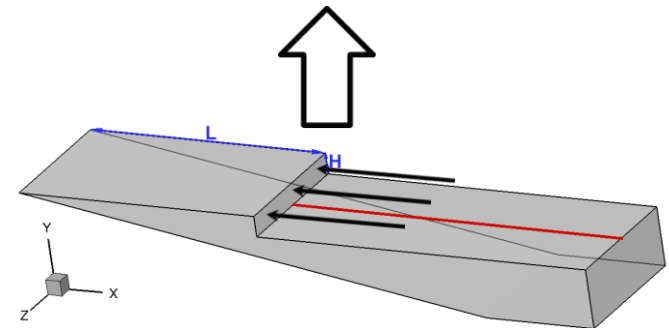
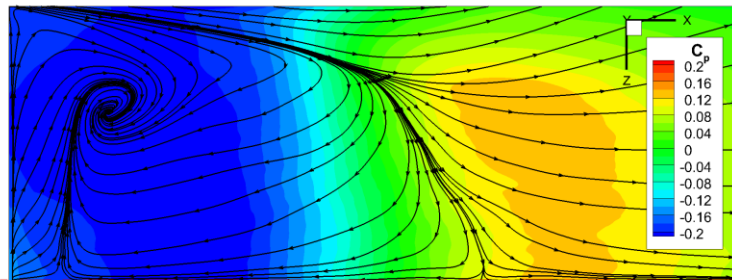
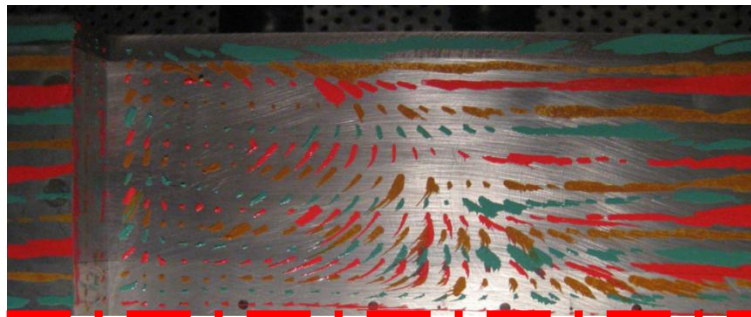
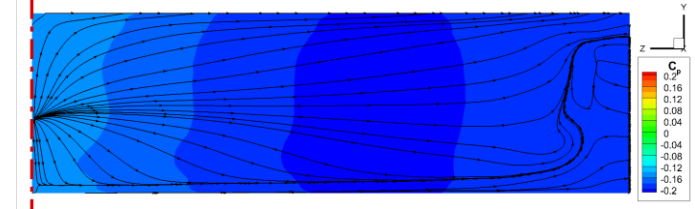
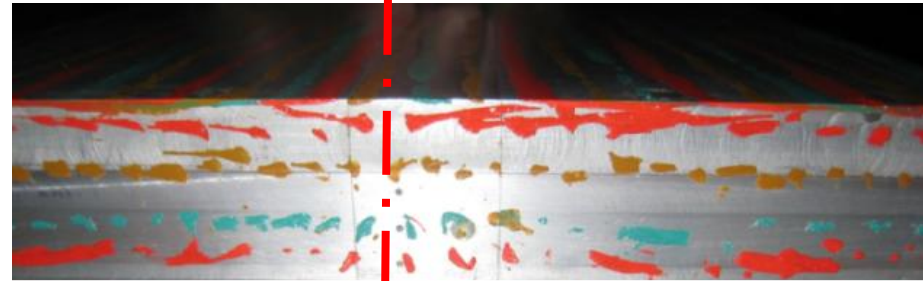
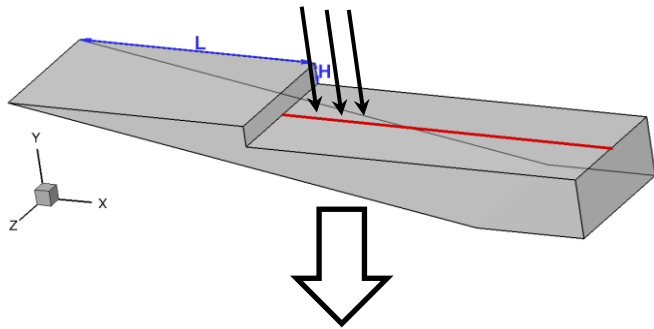
- улучшенная сетка: 26М узлов, 149М тетраэдров
 - поперечное разрешение $\Delta z = 2 \cdot 10^{-3} \cong \delta / 6$
 - продольное разрешение в зоне $H \leq x \leq 5H$
- модифицированный $\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, 0.1\Delta z)$ в области $0 \leq x \leq 2H$
- уменьшено «количество численной диссипации» (σ_{UPW}):

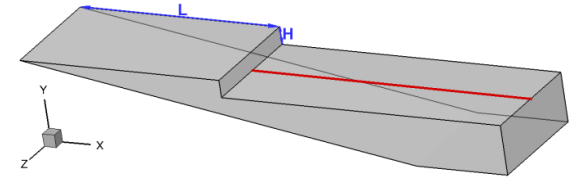
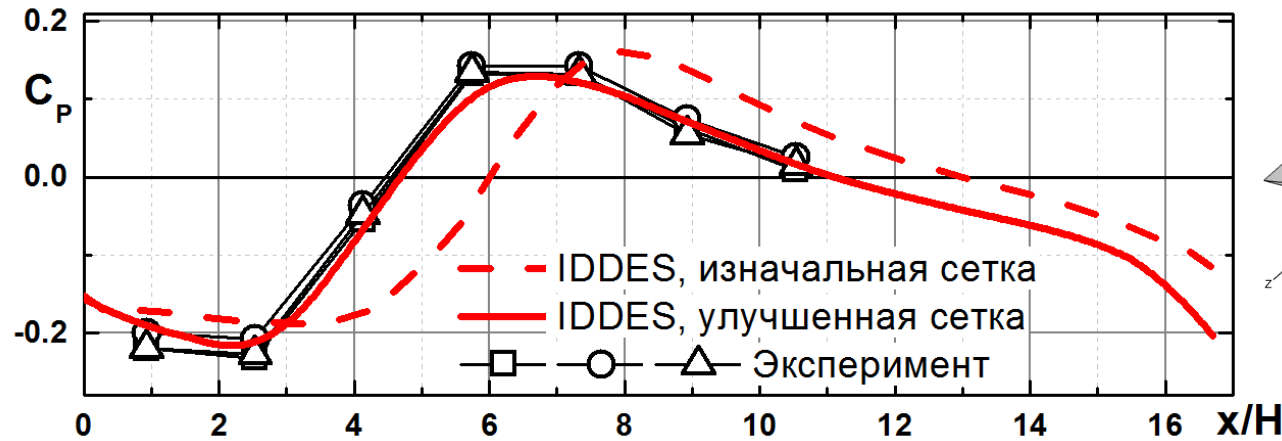


- модификация гибридной численной схемы: учет присутствия скачков уплотнения за счет специального анализатора Гибридная WENO-CD/UPW схема

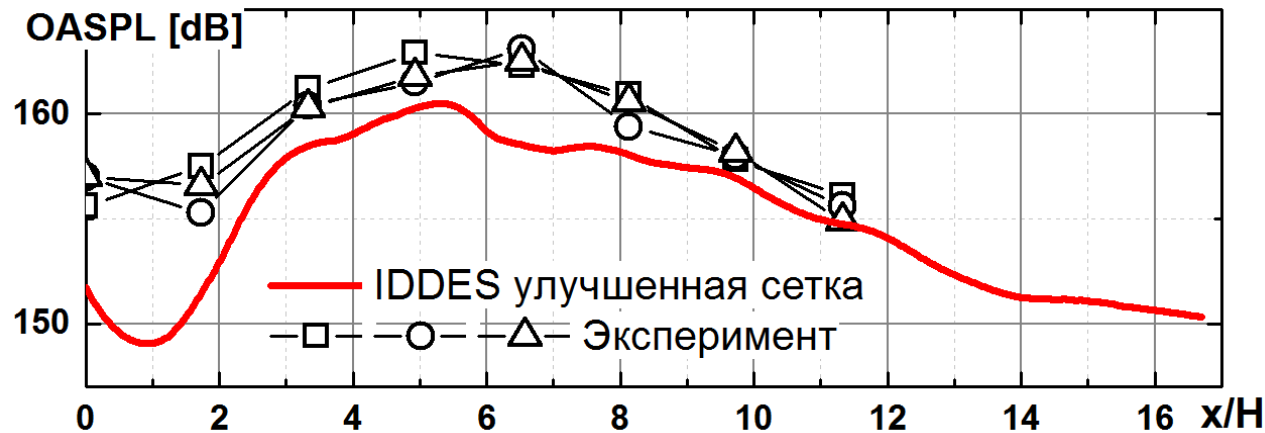


Визуально зона рециркуляции предсказана корректно

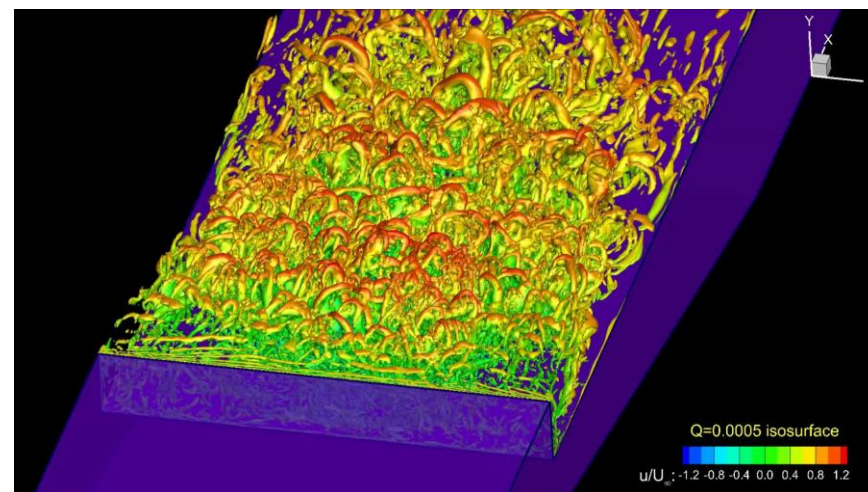
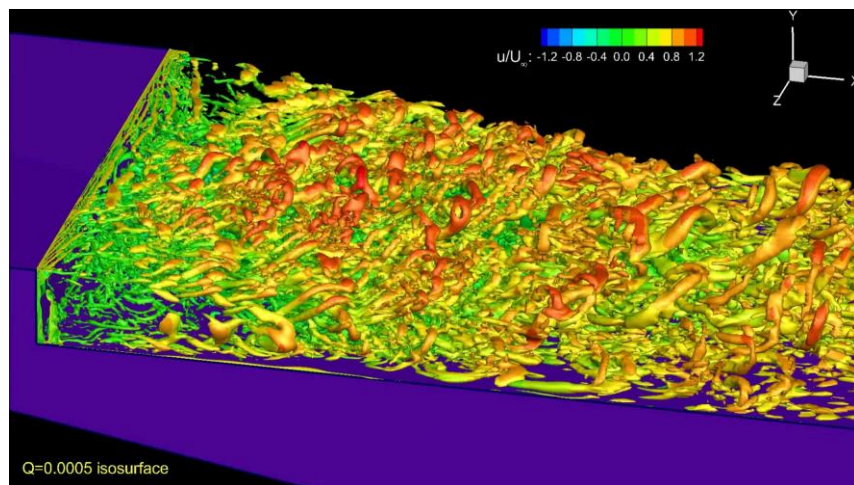




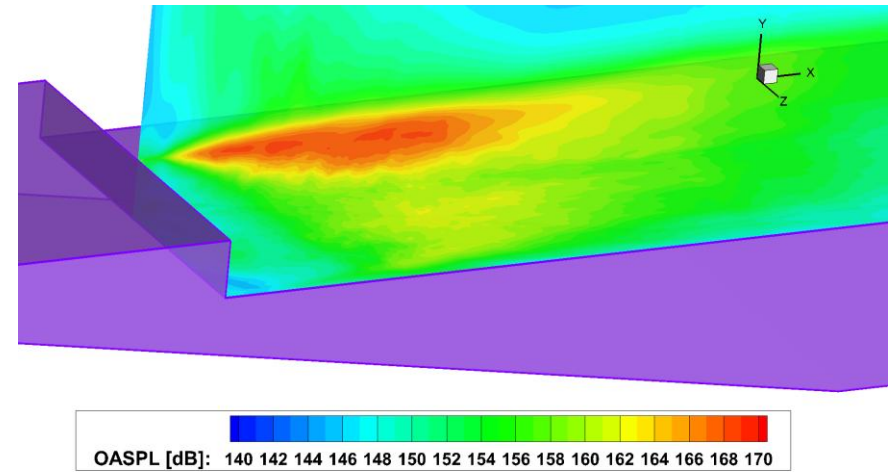
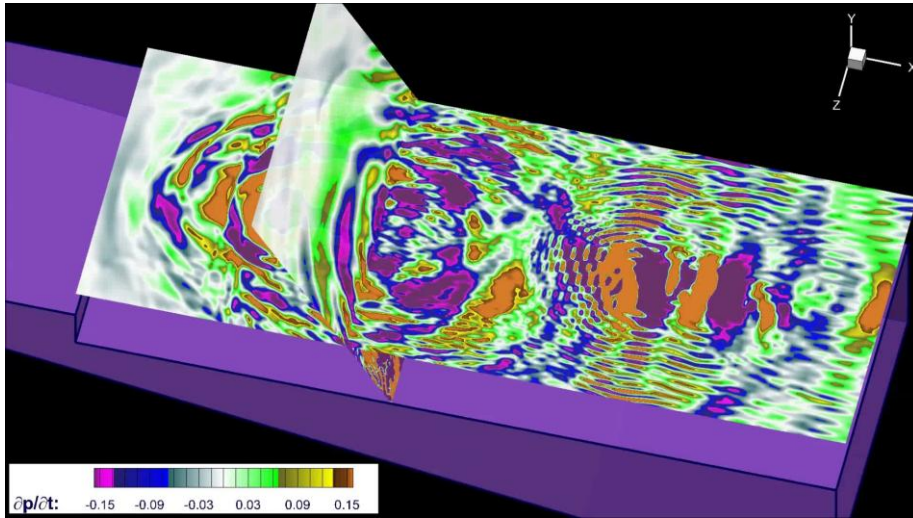
- Существенное улучшение результатов, хорошее согласование с экспериментом по C_p



- Приемлемое согласование с экспериментом по суммарному уровню пульсаций давления. Отличие может быть связано с вкладом мелкомасштабных высокочастотный турбулентный пульсаций, которые учтены в эксперименте, но не разрешены в расчете



- Существенная трёхмерность течения: затекание потока в кормовой отрыв с боковых сторон клина, оттеснение потока, оторвавшегося с угловой кромки, от поверхности модели за уступом
- Возникновение волн неустойчивости в слое смешения кормового отрыва
- Эволюция вихрей при их смещении вниз по потоку, потеря устойчивости вихревых образований, группирование вихрей в трехмерные когерентные структуры в волнах неустойчивости
- В развитии вихрей большую роль играет возвратное течение, следовательно в рассматриваемом случае происходит потеря устойчивости не только слоя смешения, но и всего сдвигового слоя кормового отрыва



- Основными источниками волновых возмущений (играющих роль обратной связи в автоколебательных процессах) являются область присоединения кормового отрыва (основной источник) и волны неустойчивости
- Всё это говорит о том, что при трансзвуковой перестройке течения возникает автоколебательный процесс гидродинамической природы

Произведено численное моделирование сложного пристеночного турбулентного течения возле клиновидного тела с обратным уступом

Проблема «серой зоны» актуальна особенно при использовании DES на неструктурированных сетках ввиду:

- Практически абсолютной неустойчивости «чистой» центрально-разностной бездиссипативной схемы для сложных конфигураций, должна вводиться небольшая диссипация;
- для трансзвуковых и сверхзвуковых течений: присутствие скачков и волн разрежения возле кромок требует аккуратной адаптации численной схемы (монотонизация, ...).

Планы на ближайшее будущее:

- численный анализ данных в контрольных точках;
- развитие гибридной модификации WENO-EBR схемы.

Благодарности:

- Суперкомпьютер “10P” МСЦ РАН;
- РФФ, проект № 14-11-00060.

Спасибо за внимание!