

# Численное исследование нестационарного турбулентного течения возле клиновидного тела с обратным уступом



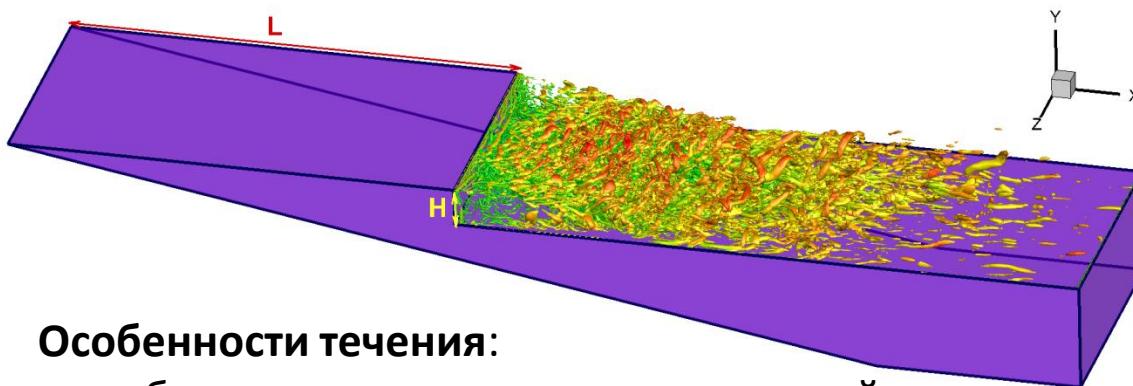
**А.П. Дубень, Т.К. Козубская**  
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва



**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

# Введение: физическая постановка задачи



## Особенности течения:

- собственная трансзвуковая 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:

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

$$M_\infty = 0.913, 1.05$$

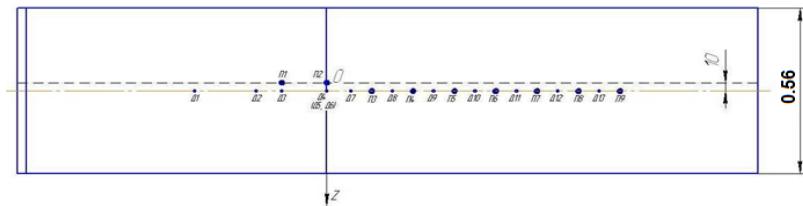
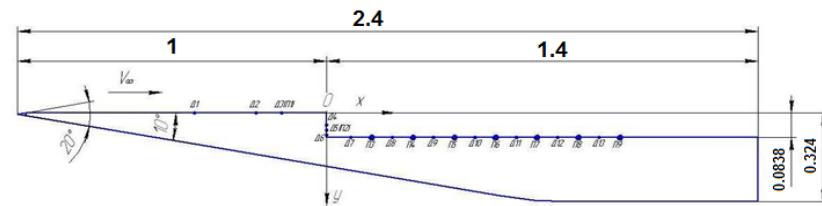
$$L = 0.358 \text{ [м]}$$

## Экспериментальные данные (ЦНИИМаш):

- теневые спектры;
- капельная картина.

## Профили:

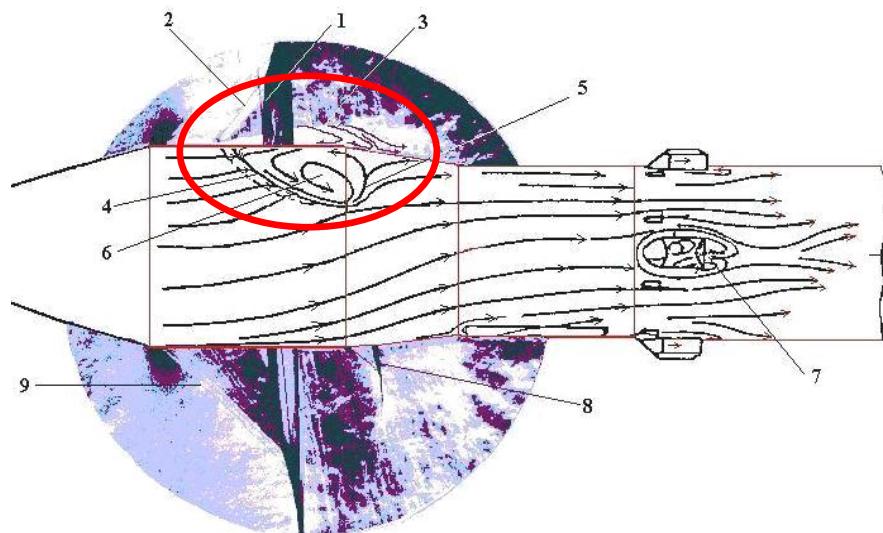
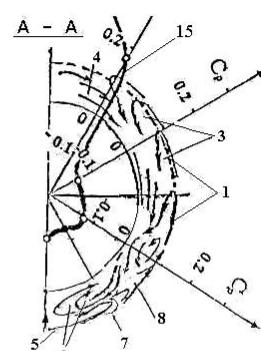
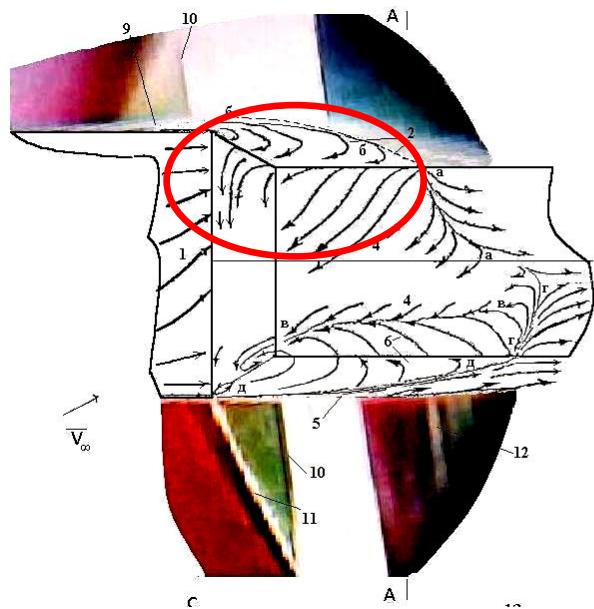
- $C_p$ ;   • OASPL ;   • PSD( $p'$ ).



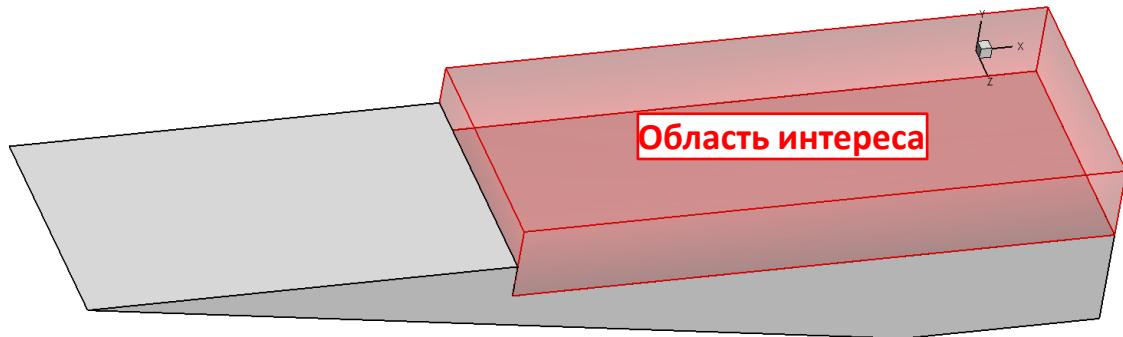
## Аэрокосмическая промышленность:

- 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



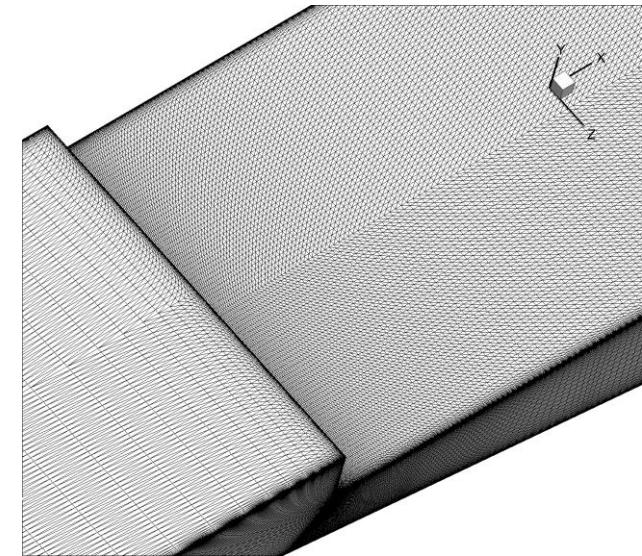
## 1й этап: выбор оптимальных параметров расчета



Начальная сетка: 15.5M узлов, 91.8M тетраэдров.

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

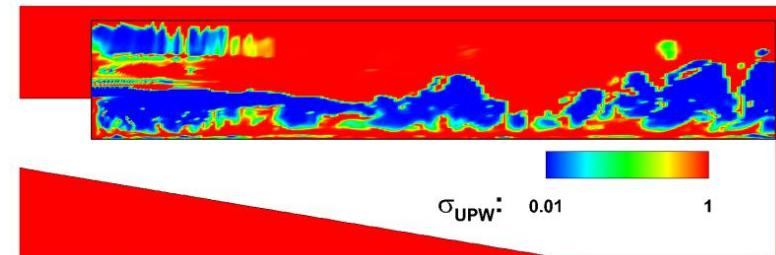
$$\Delta z = 5 \cdot 10^{-3} \cong \delta / 2.5$$



### Расчетный код NOISEtte

#### Численные методы:

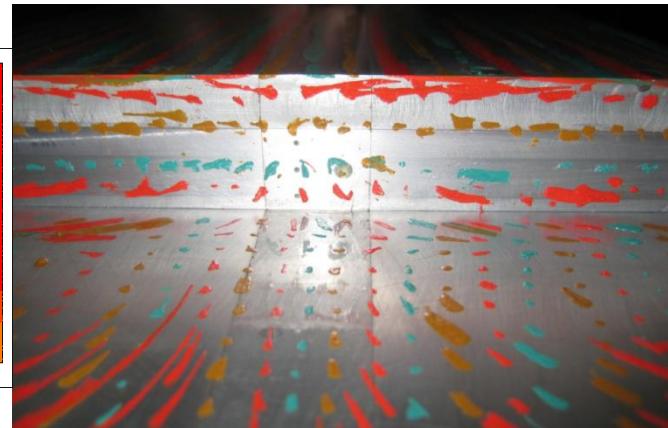
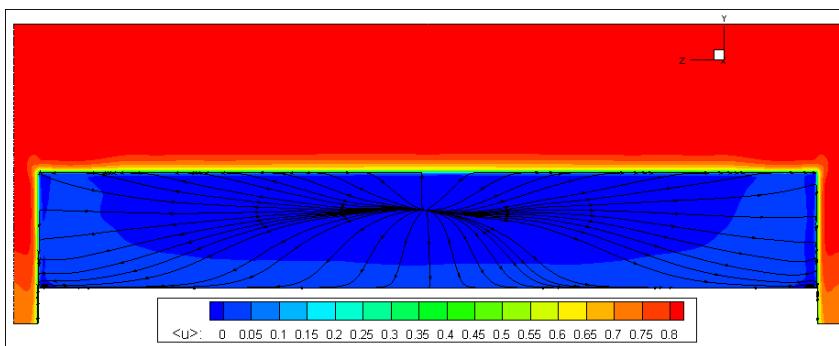
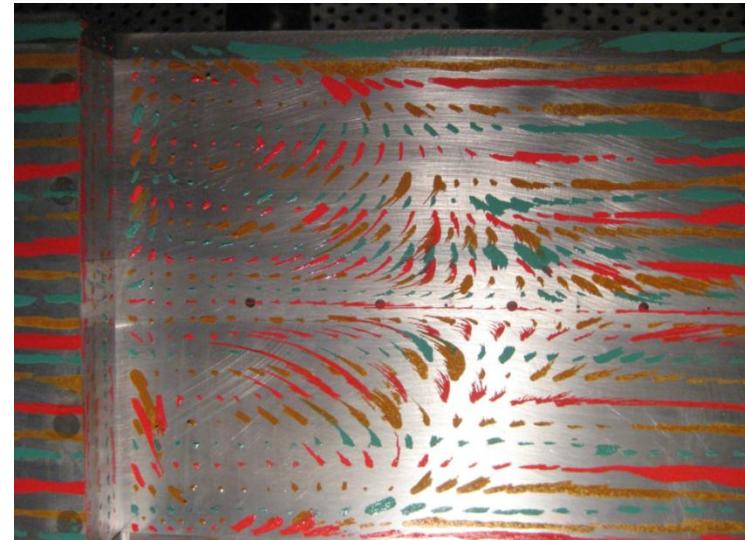
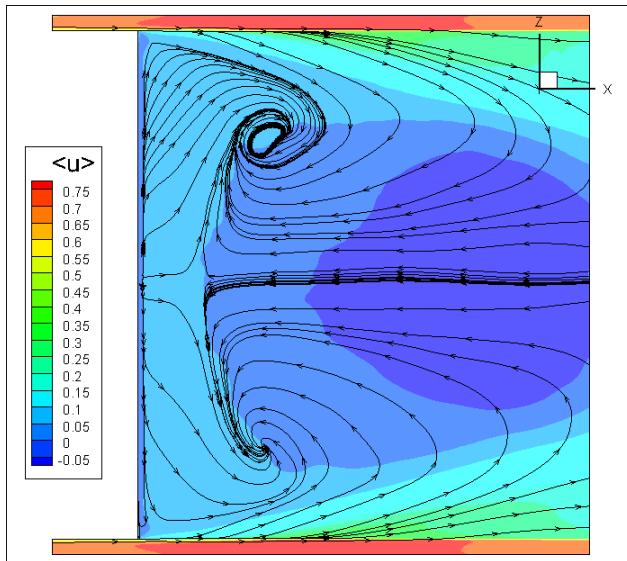
- SA RANS, SA IDDES;
- Численная схема повышенного порядка:
  - гибридная CD/UPW \* в зоне интереса
  - Противопоточная – в остальной
- Неявная схема 2го порядка. CFL<1 в LES зоне области интереса



\*[Travin et al., 2004]

# 1й этап: результаты

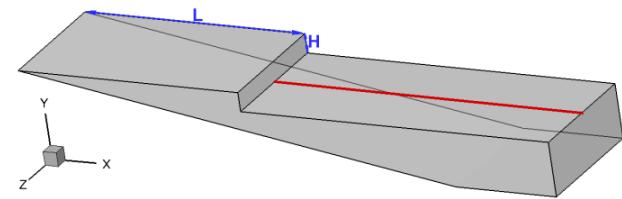
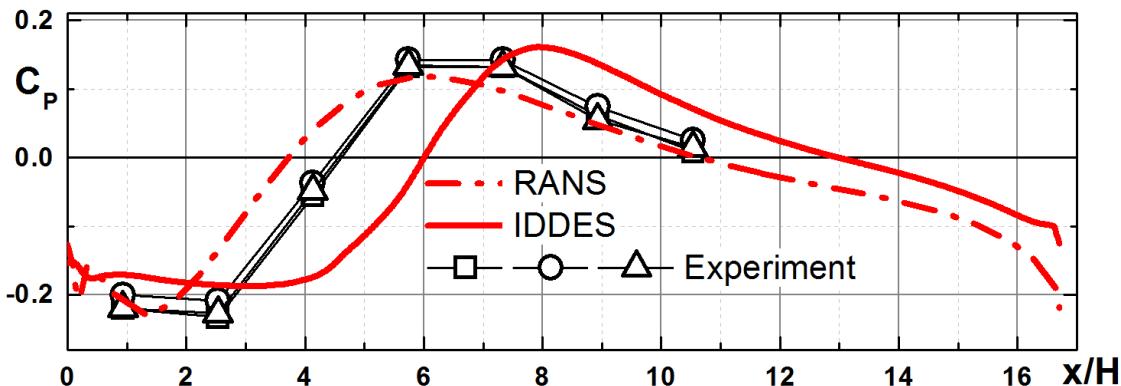
IDDES: качественно схожая картина течения



Линии тока осредненной скорости

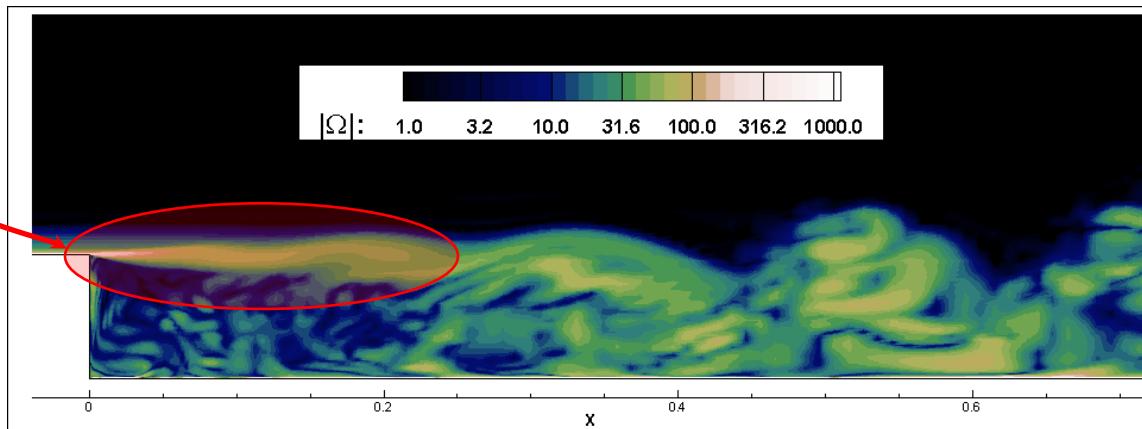
Экспериментальная картина течения

# 1й этап: результаты



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

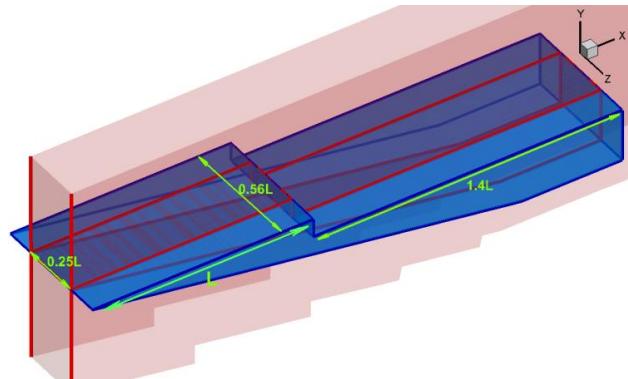
- недостаточным сеточным разрешением в поперечном направлении ( $\Delta z = \delta / 20$ , но требует больших вычислительных затрат, чтобы получить достаточную выборку для хорошего спектра за разумное время)
- схемной диссипацией
- проблемой «серой зоны», характерной для DES



# Расчеты для упрощенной конфигурации

Цель: исследовать влияние схемной диссипации и подсеточного масштаба

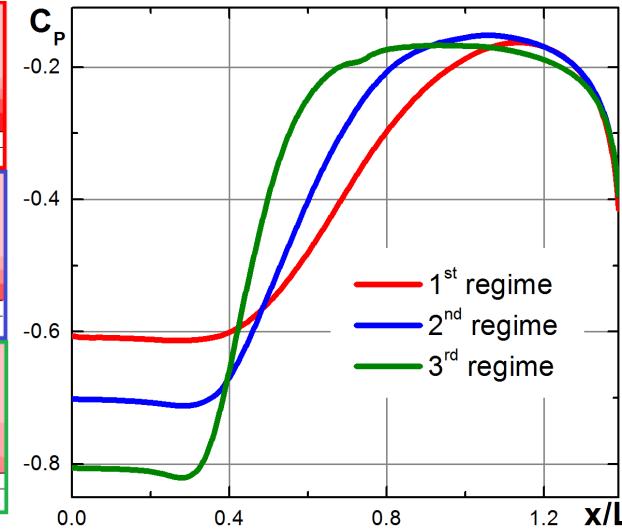
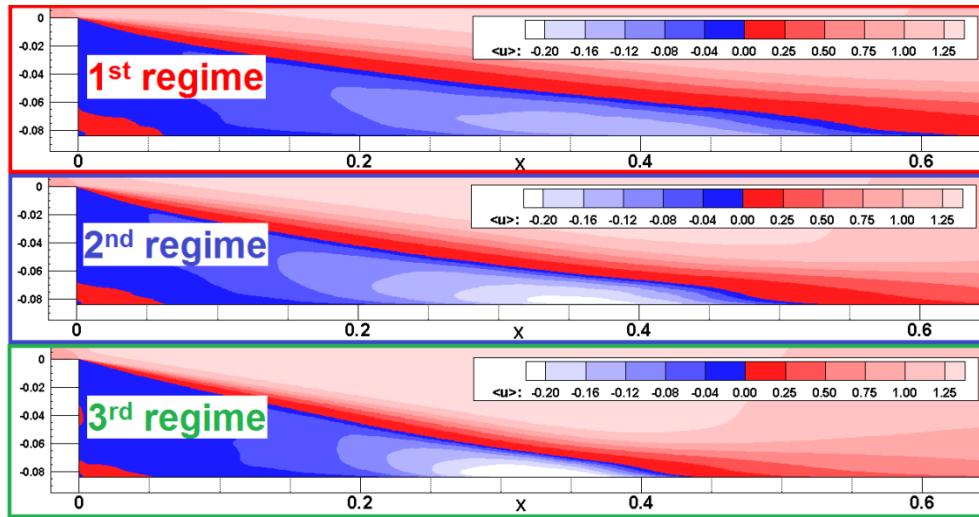
Упрощенная конфигурация: бесконечное клиновидное тело, периодика по Z,  $L_z=0.25L$



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 ( $\Delta$ ):  
$$\Delta = \max(\Delta x, \Delta y, 0.1\Delta z)$$

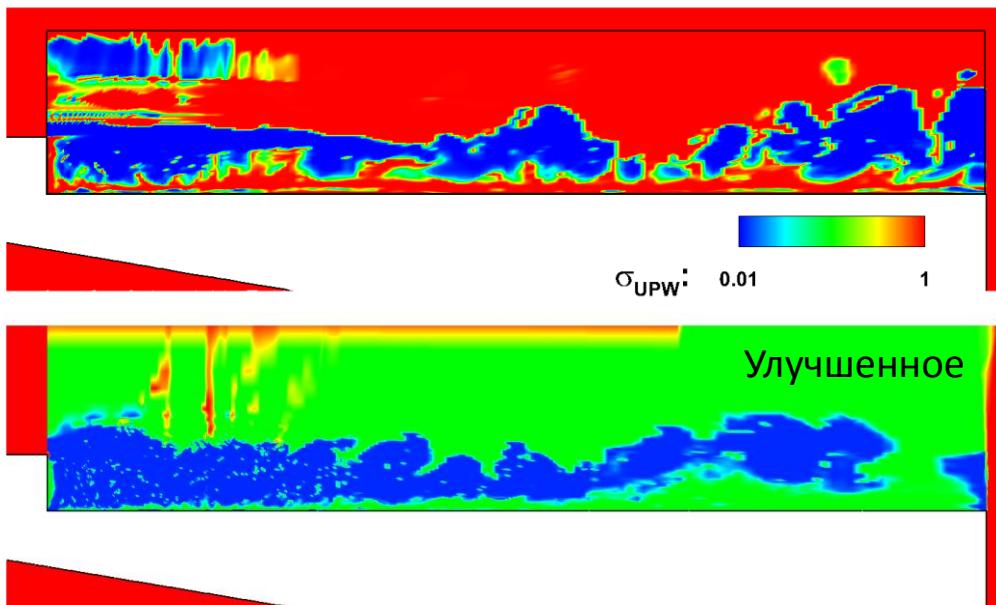
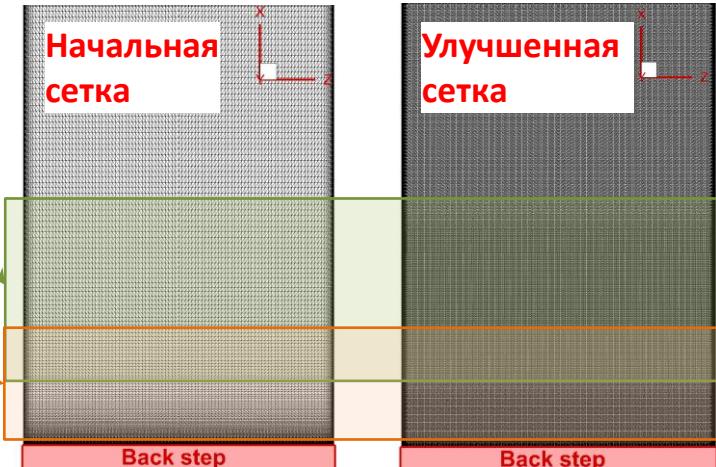
Результаты:



- Критическая зависимость результатов от численной схемы и  $\Delta$

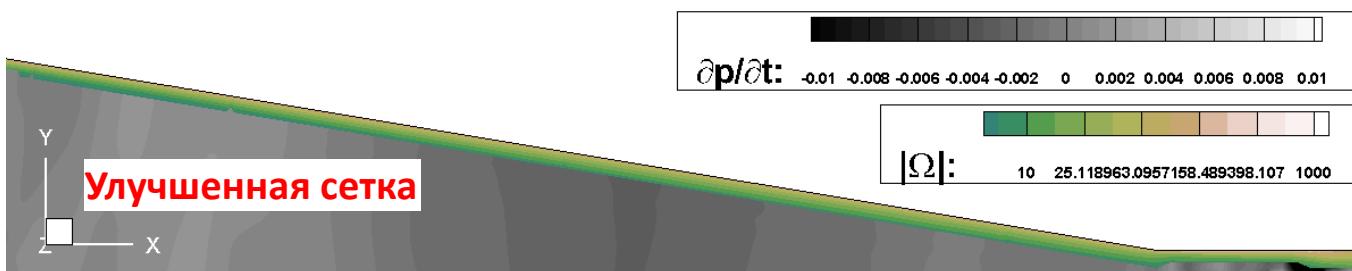
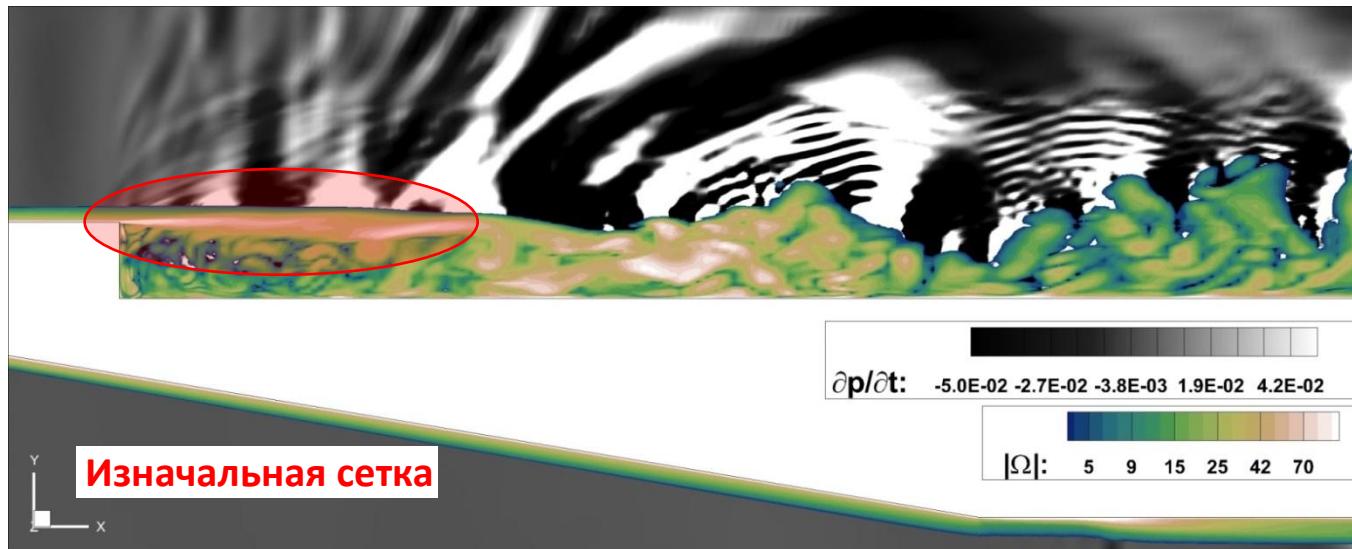
## Улучшения:

- **улучшенная сетка:** 26M узлов, 149M тетраэдров
  - поперечное разрешение  $\Delta z = 2 \cdot 10^{-3} \approx \delta / 6$
  - 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» ( $\sigma_{UPW}$ ):



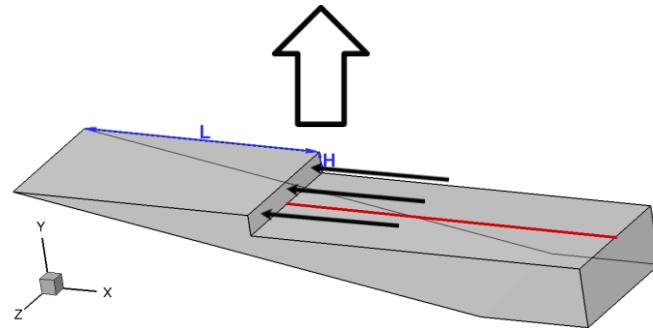
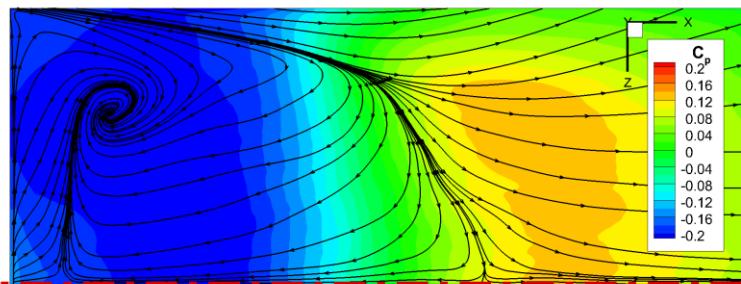
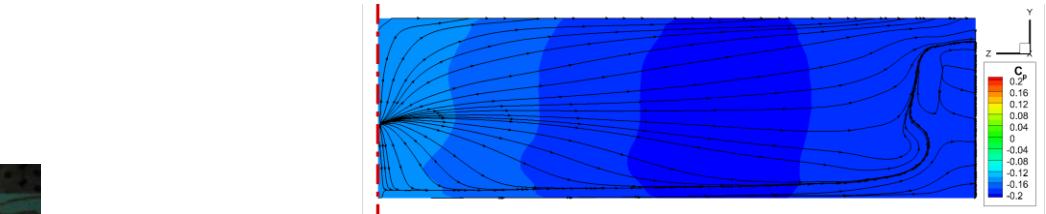
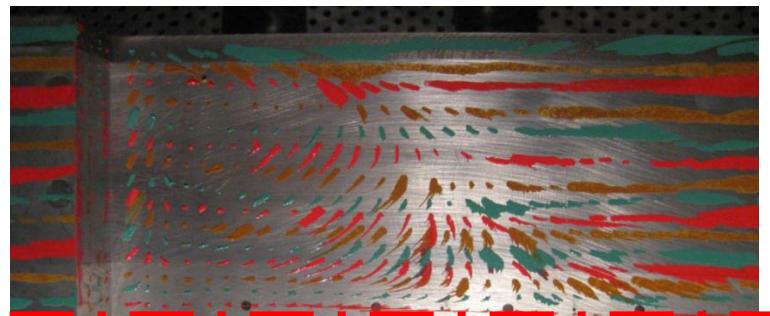
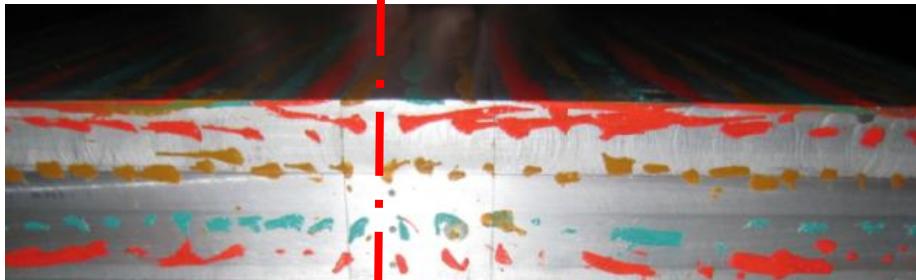
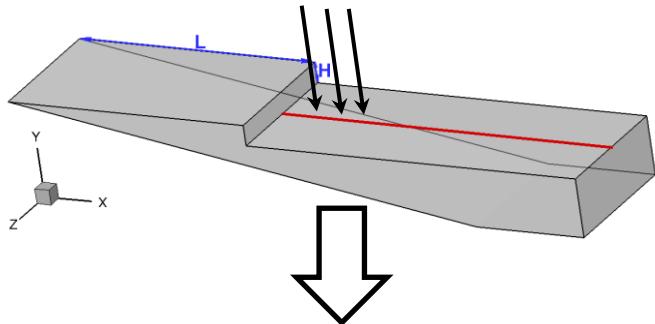
- **модификация гибридной численной схемы:** учет присутствия скачков уплотнения за счет специального анализатора Гибридная WENO-CD/UPW схема

# Улучшенное моделирование: результаты

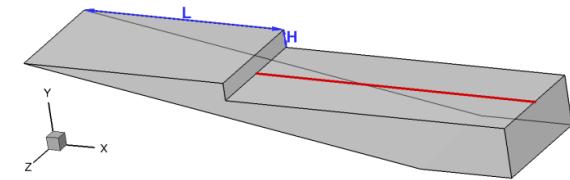
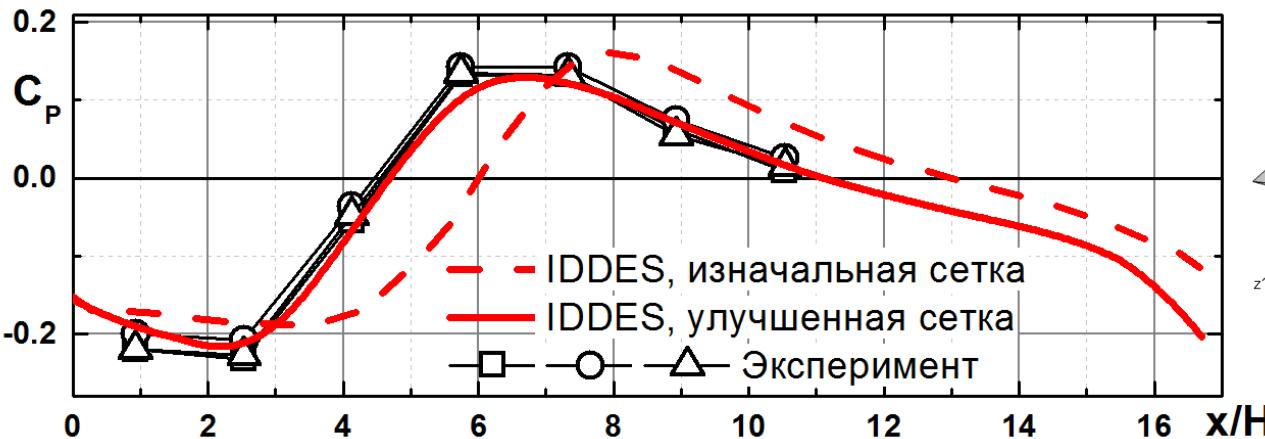


# Верификация расчета

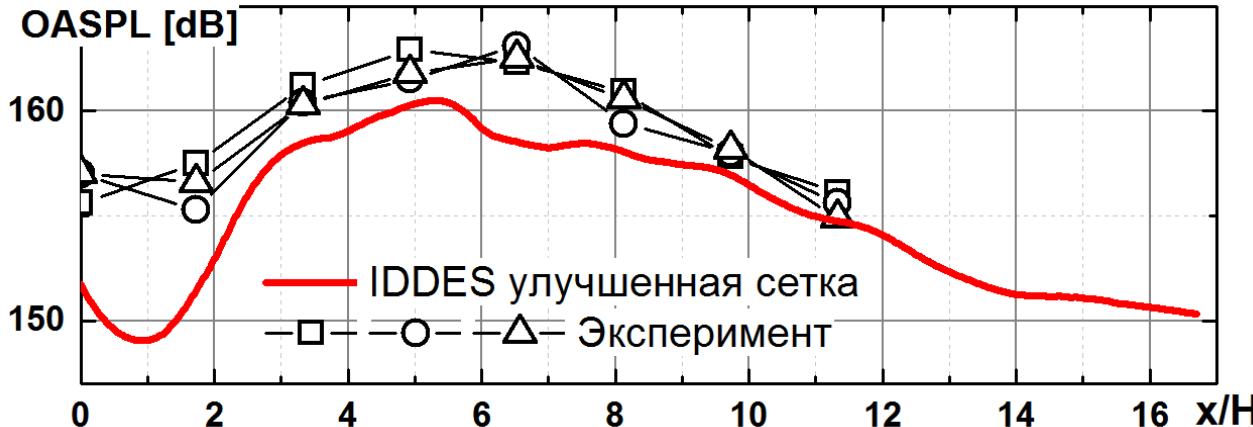
Визуально зона рециркуляции предсказана корректно



# Верификация расчета

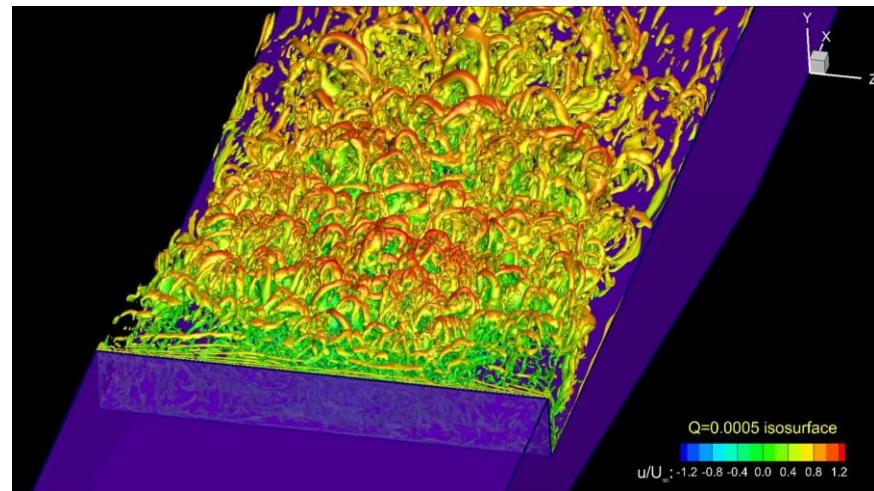
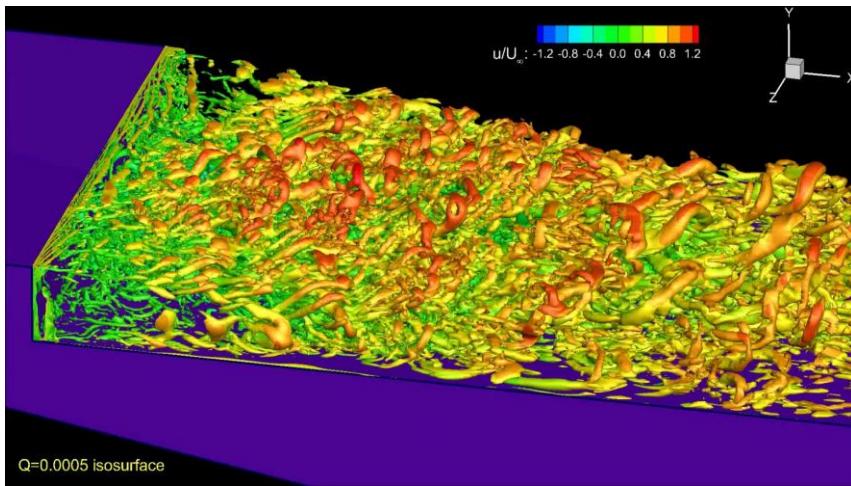


- Существенное улучшение результатов, хорошее согласование с экспериментом по  $C_p$



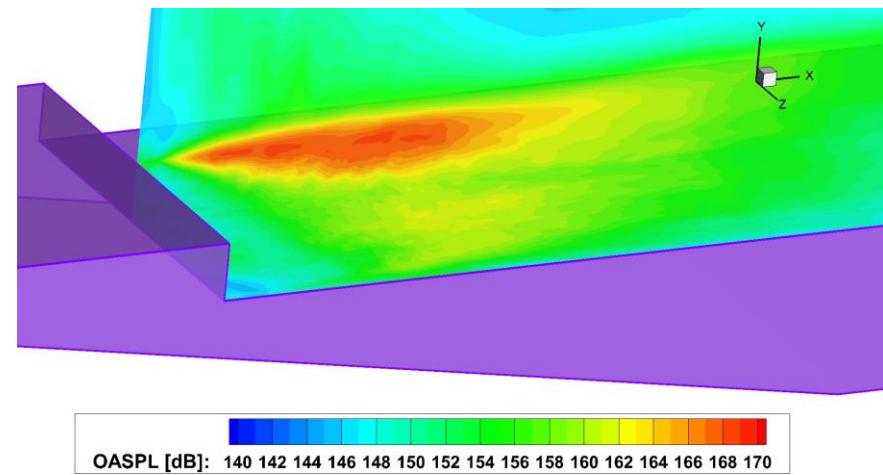
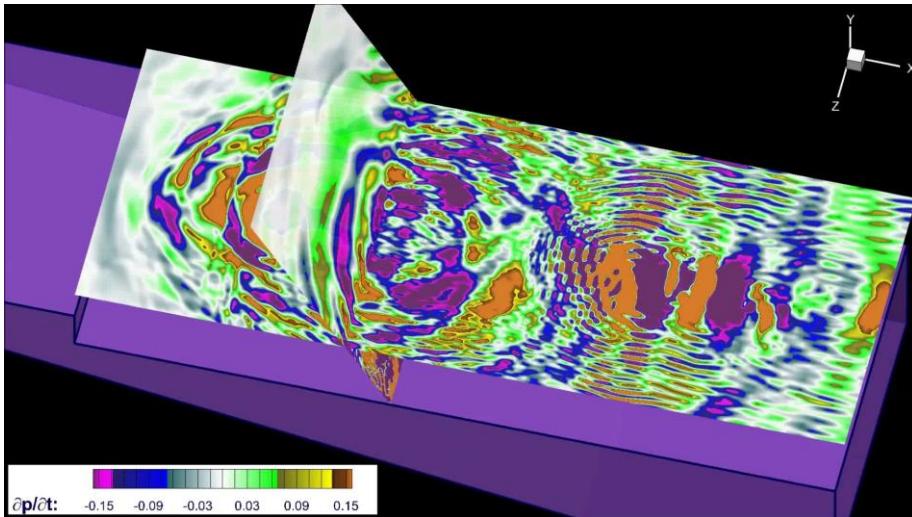
- Приемлемое согласование с экспериментом по суммарному уровню пульсаций давления. Отличие может быть связано с вкладом мелкомасштабных высокочастотных турбулентных пульсаций, которые учтены в эксперименте, но не разрешены в расчете

# Особенности течения



- 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 смешении 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

# Аэроакустические характеристики течения



- 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 “10Р” МСЦ РАН;
- РНФ, проект № 14-11-00060.

# Спасибо за внимание!