



**ПОЛИТЕХ**  
Санкт-Петербургский  
политехнический университет  
Петра Великого



# РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ МОДЕЛИ СОПЛА РАКЕТНОГО БЛОКА АВАРИЙНОГО СПАСЕНИЯ

А.К.Травин<sup>1</sup>, М.Х. Стрелец<sup>1</sup>, М.Л. Шур<sup>1</sup>, В.И. Запрягаев<sup>2</sup>,  
И.Н. Кавун<sup>2</sup>, Д.А. Губанов<sup>2</sup>, А.А. Дядькин<sup>3</sup>, С.П. Рыбак<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Институт теоретической и прикладной механики СО РАН,  
Новосибирск*

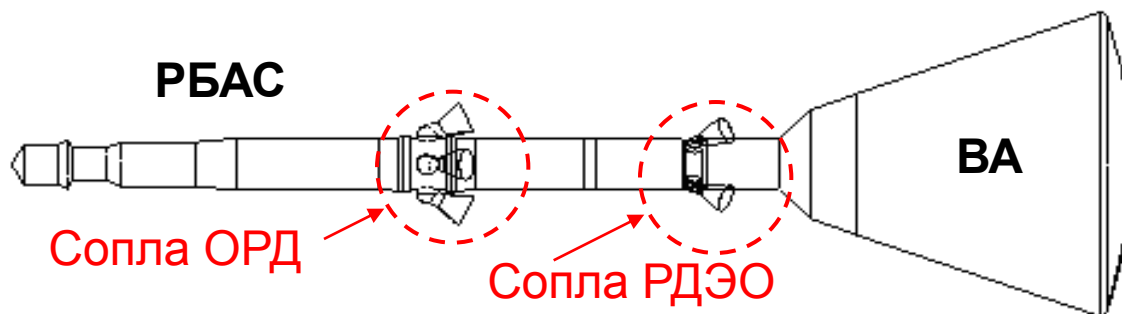
<sup>3</sup>*РКК "Энергия", г. Королев Московской области*

# Содержание

- Мотивация и цели исследования
- Краткое описание эксперимента и расчетных подходов
- Результаты расчетов
- Сравнение расчета с экспериментом
- Основные выводы

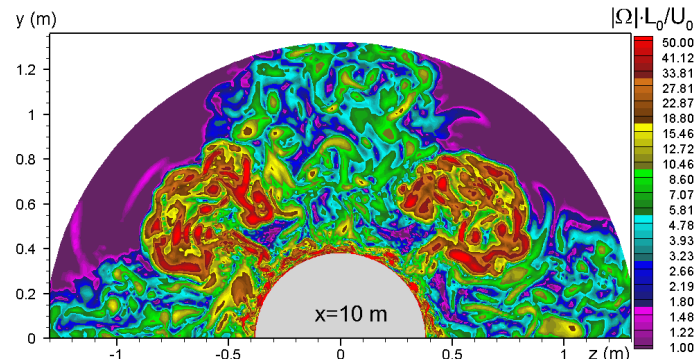
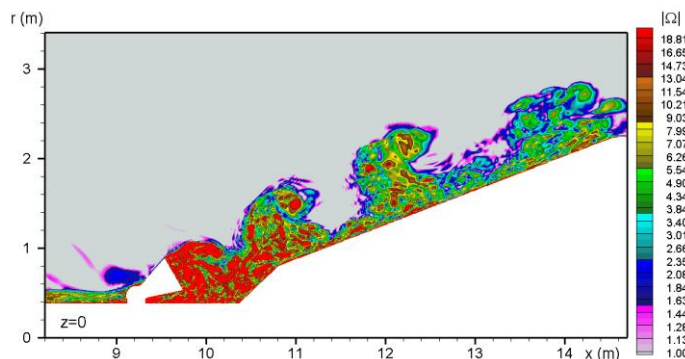
# **Мотивация и цели исследования**

- При выводе ракеты космического назначения на орбиту элементы ее конструкции, в том числе возвращаемый аппарат (ВА), подвергаются воздействию интенсивных нестационарных аэроакустических воздействий со стороны турбулентного воздушного потока



Отделяемый головной блок (ОГБ)

- Значительный вклад в эти нагрузки вносит турбулентный след за соплами основного ракетного двигателя (ОРД) и ракетного двигателя экстренного отделения (РДЭО) блока аварийного спасения (РБАС)



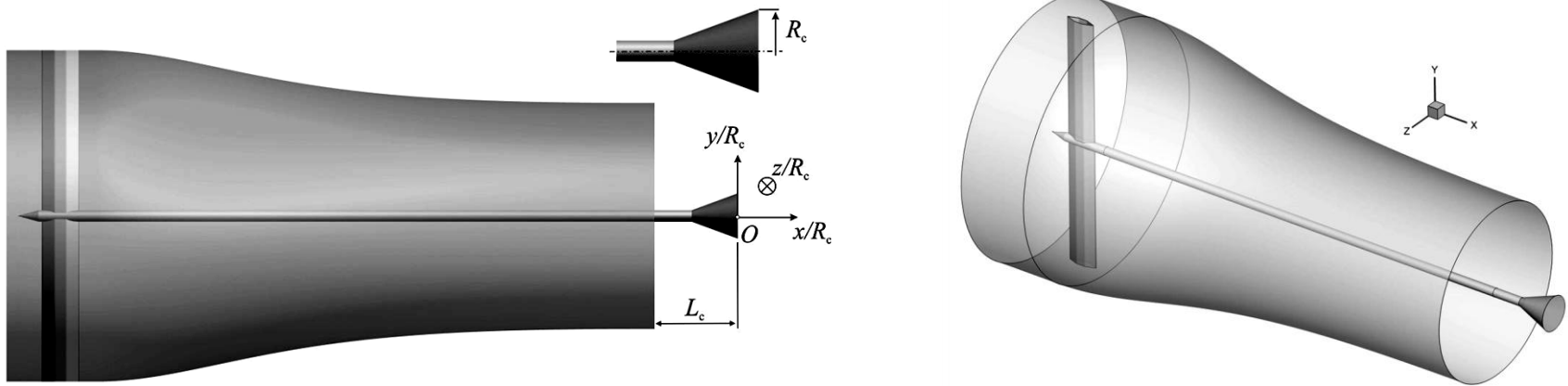
Структура турбулентного следа за соплами РБАС

- В связи с этим надежное расчетное определение амплитуды и частотных характеристик этих воздействий является одной из важных задач, возникающих при проектировании пилотируемых транспортных космических кораблей
  - Ее решение на основе экономичных полуэмпирических RANS моделей в принципе невозможно, и требует применения исключительно ресурсоемких вихре-разрешающих подходов к описанию турбулентности
- Для валидации и усовершенствования таких подходов необходимо проведение согласованных между собой экспериментальных и расчетных исследований
- В настоящей работе такое комплексное исследование выполнено на примере трансзвукового обтекания модели сопла РБАС
  - Коническое тело с плоским донным срезом

# **Описание эксперимента**

# Экспериментальная модель

Конус с плоским донным срезом, установленный на выходе из сопла Витошинского



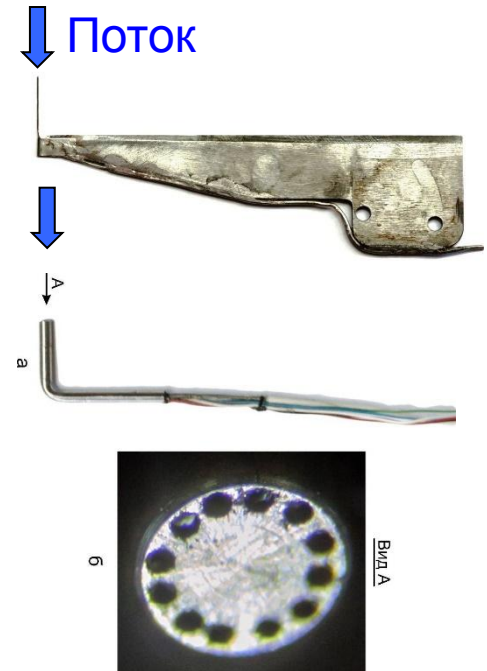
- Число Маха на выходе из сопла  $M=0.85$ ; число Рейнольдса  $Re_D = 1.36 \cdot 10^6$



Эксперименты проводились в  
струйном модуле  
аэродинамической трубы Т-326  
ИТПМ СО РАН

# Экспериментальное оборудование и Измеряемые характеристики потока

1. Измерение полного давления трубкой Пито ( $d=0.8\text{mm}$ )
2. Измерение пульсаций полного давления датчиками избыточного давления Kulite XB-16-062-5G диаметром 1,7 мм
3. Визуализация течения теневым методом и методом лазерного ножа
4. Измерение скорости методом PIV





# **Численное моделирование**

# Подход к моделированию турбулентности

- Метод моделирования отсоединенных вихрей (DES) на базе SA RANS модели в сочетании с двумя определениями линейного подсеточного масштаба

➤ **Масштаб**  $\Delta_{\omega} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{n,m=1,8} |\mathbf{l}_n - \mathbf{l}_m|$  ,  $\mathbf{l}_n = \mathbf{n}_{\omega} \times \mathbf{r}_n$

- Учитывает анизотропию ячеек и 2D характер течения на начальном участке слоя смешения

→ Позволяет имитировать эксперименты с толстым пограничным слоем на выходе из сопла

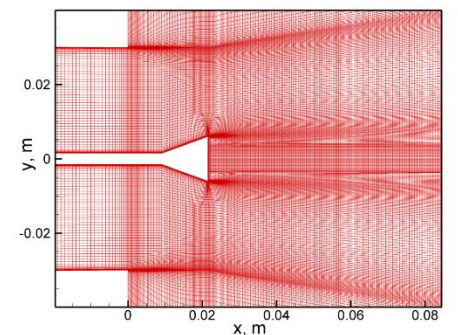
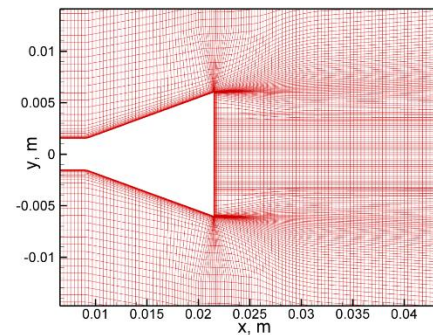
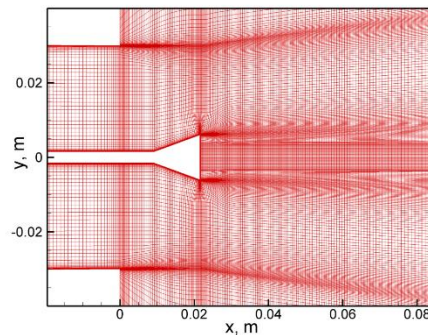
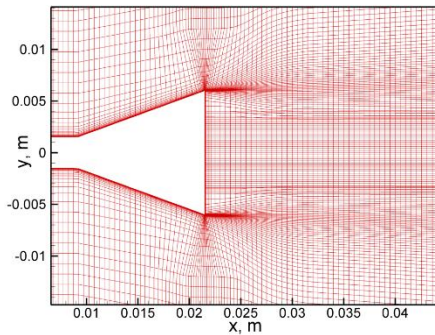
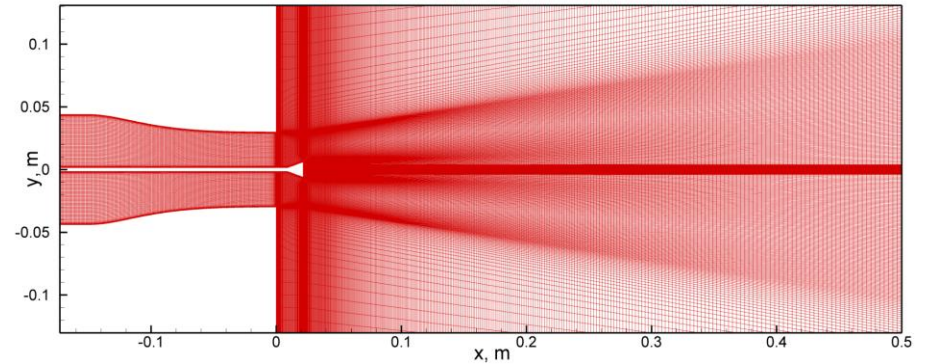
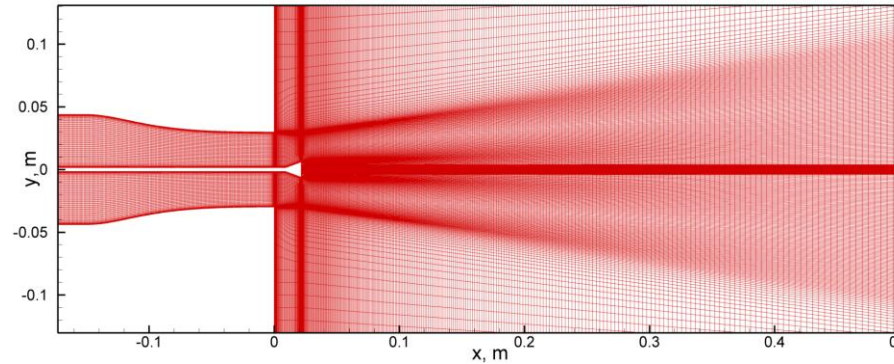
➤ **Масштаб**  $\Delta_{SLA} = \Delta_{\omega} \cdot F_{KH}$

- Эмпирическая функция  $F_{KH}$  обеспечивает дополнительное (не связанное с особенностями используемой сетки) снижение турбулентной вязкости на начальных участках слоев смешения и ускоряет развитие неустойчивости Кельвина-Гельмгольца (КН) в слое смешения

→ Позволяет имитировать эксперименты с тонким пограничным слоем на выходе из сопла при достаточно высоком числе Re

# Расчетные сетки

- Многоблочные (с перекрывающимися блоками) сетки



Грубая сетка:

$503 \times 170 \times 361 = \sim 20\text{M}$  узлов

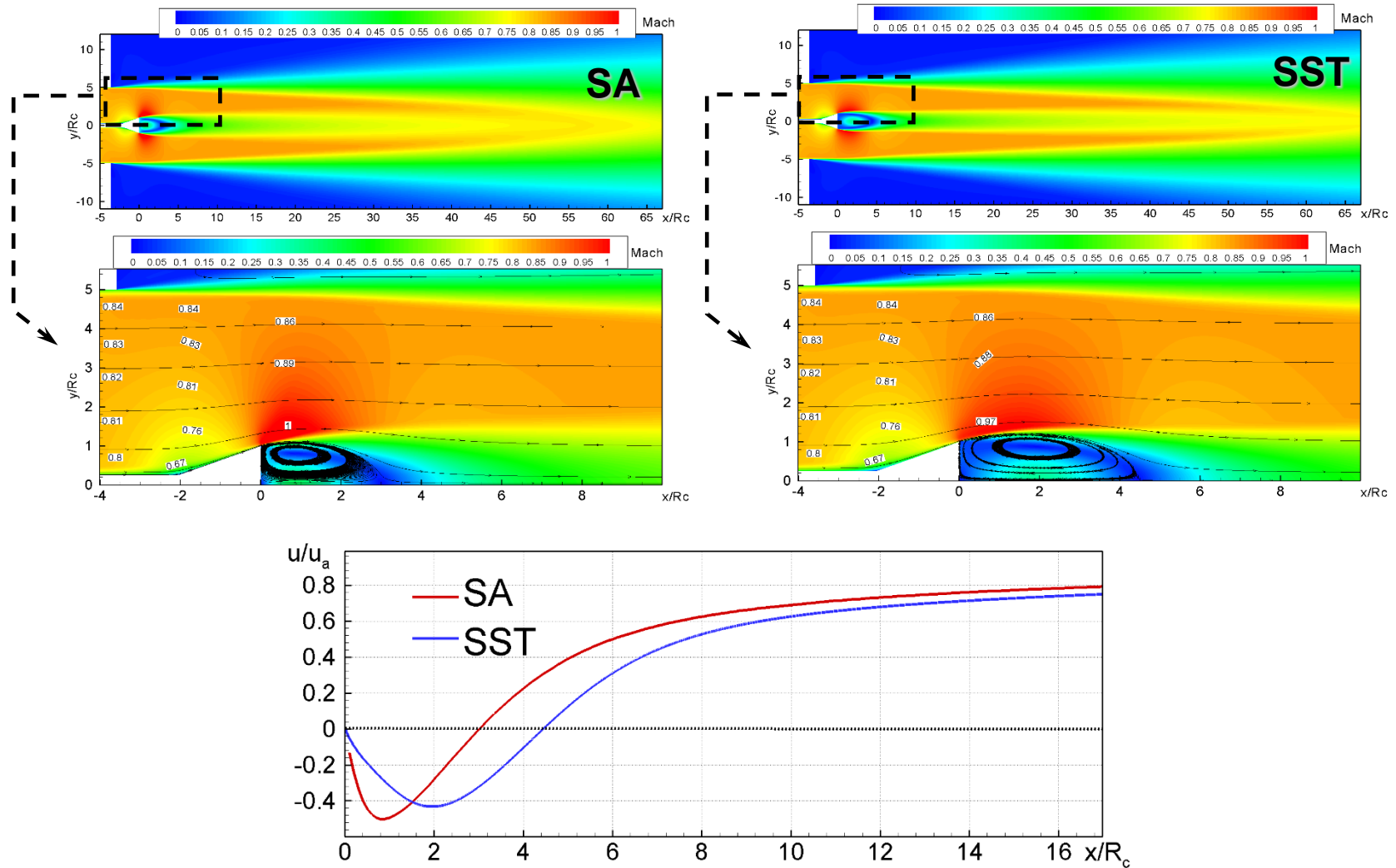
Мелкая сетка:

$605 \times 180 \times 505 = \sim 40\text{M}$  узлов

- Расчеты проводились с помощью CFD кода NTS (“Numerical Turbulence Simulation”) лаб. “Вычислительная аэроакустика и турбулентность” СПбПУ

# **Результаты расчетов**

# RANS

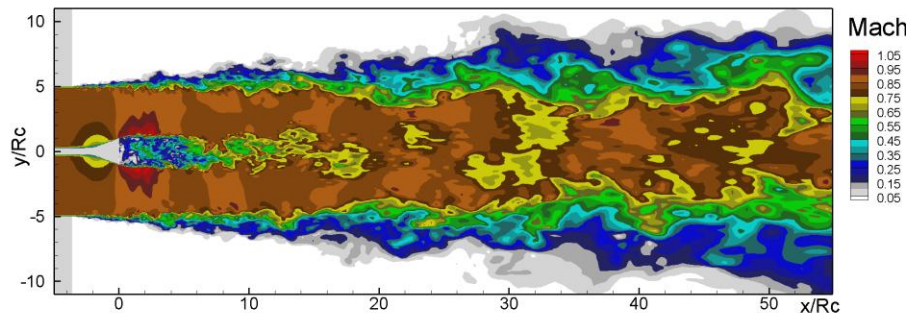


- Сильная чувствительность решения (особенно длины зоны обратных токов за донным срезом конуса)
  - Типичная ситуация при использовании RANS для расчета отрывных течений

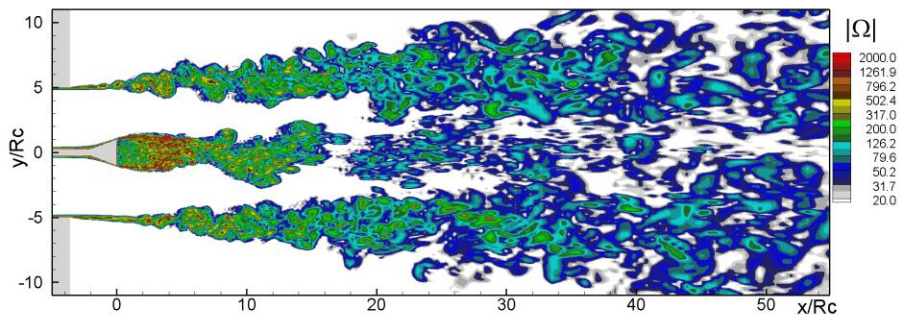
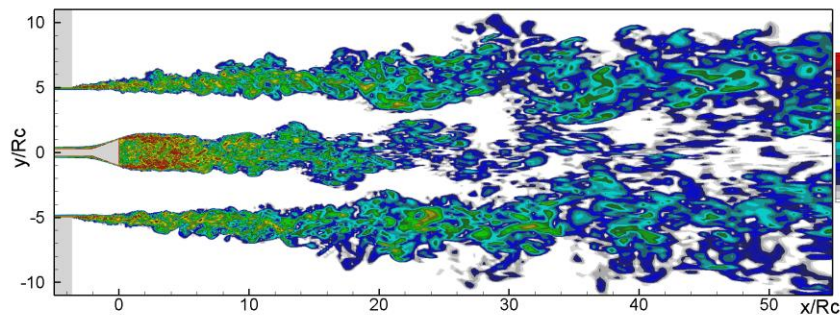
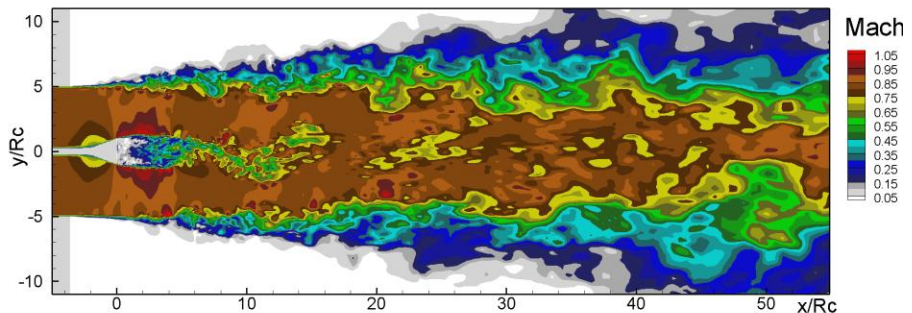


# DES: Мгновенные поля числа Маха и модуля завихренности

$\Delta_{SLA}$

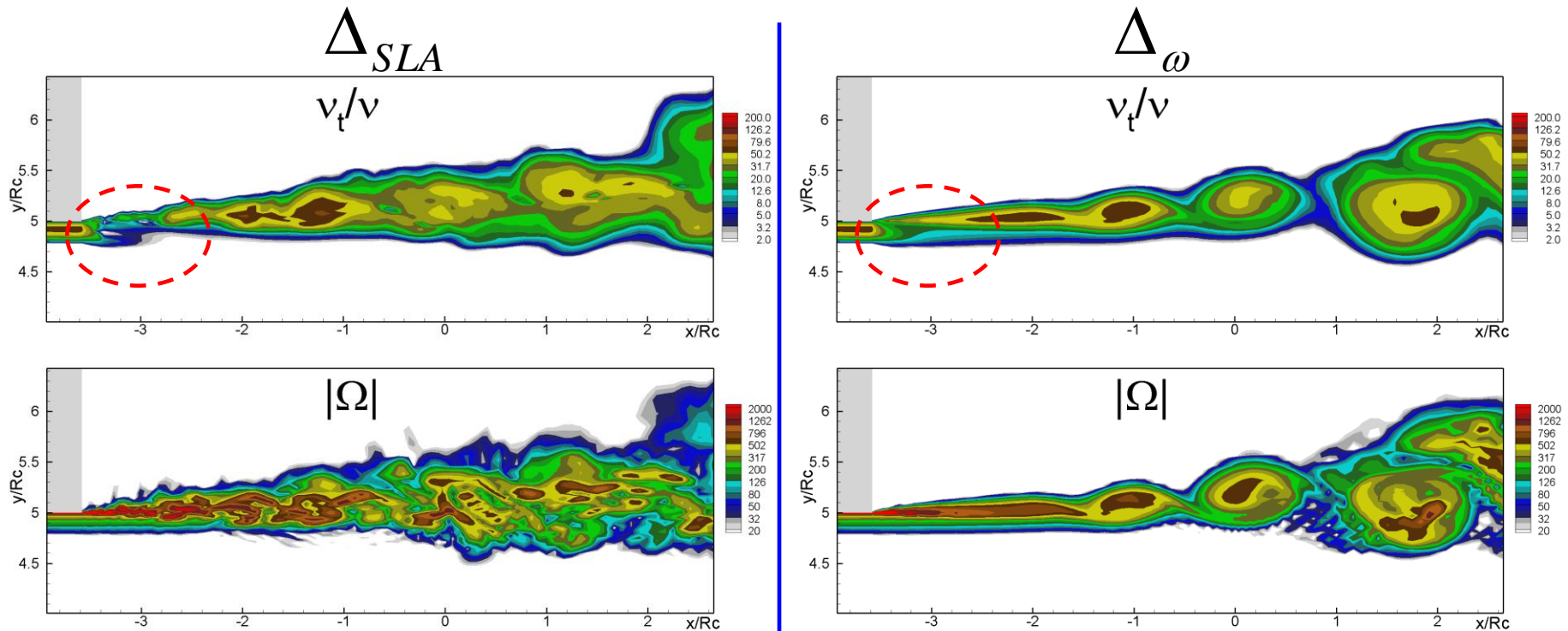


$\Delta_{\omega}$



- Обе версии DES предсказывают в целом аналогичные картины течения и структуру турбулентности

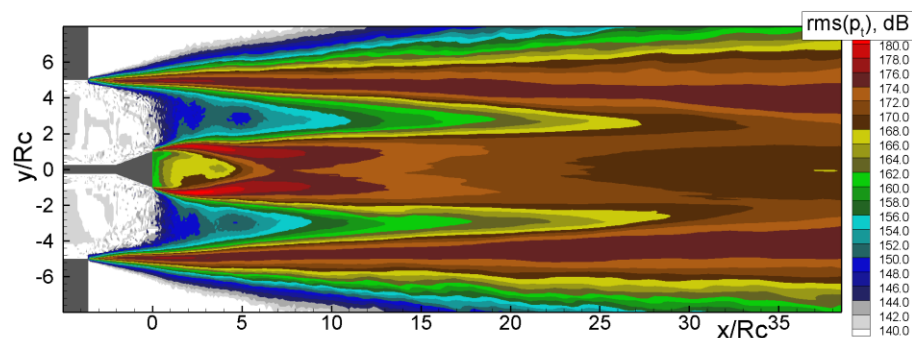
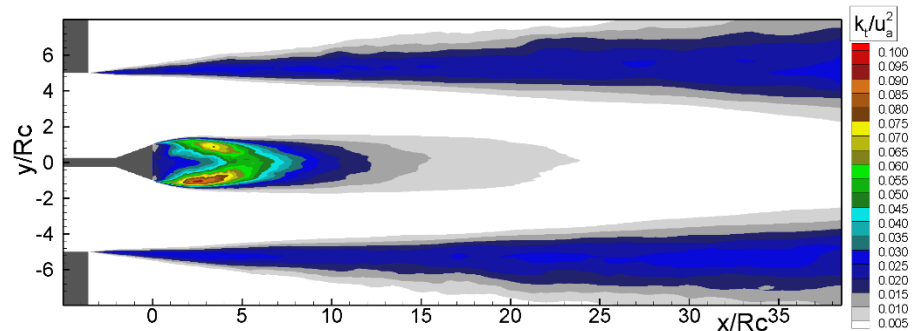
# DES: Мгновенные поля подсеточной вязкости и модуля завихренности на начальном участке слоя смешения



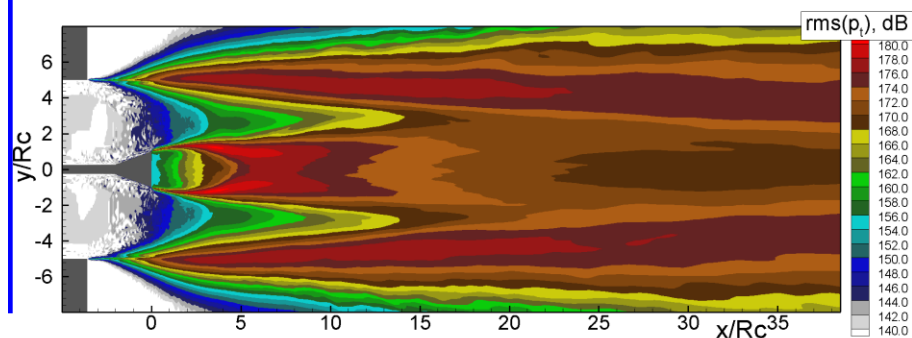
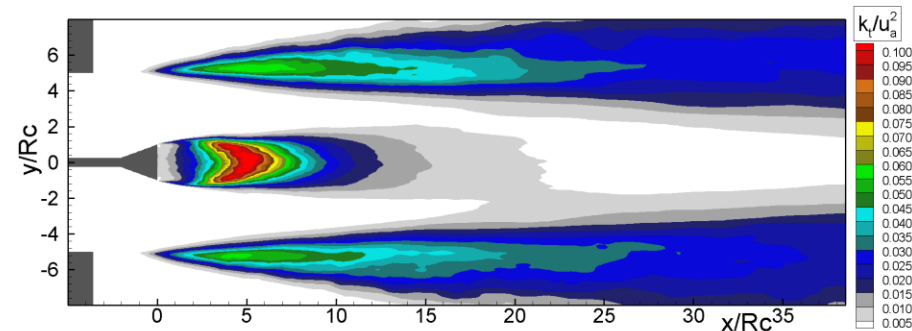
- Однако, использование масштаба  $\Delta_{SLA}$  приводит к уменьшению подсеточной вязкости в начальной области слоя смешения и, как следствие, к существенному ускорению формирования развитой турбулентности в слое смешения

# DES: Поля кинетической энергии турбулентности и среднеквадратичных пульсаций полного давления

$$\Delta_{SLA}$$



$$\Delta_{\omega}$$

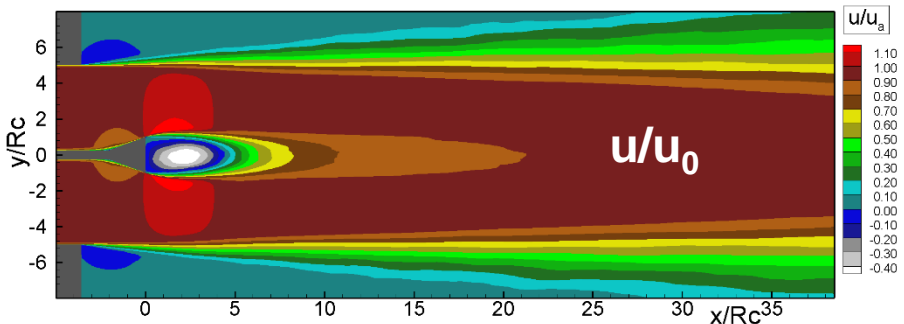


- Хорошо видна задержка формирований развитой турбулентности в слое смешения струи при использовании масштаба  $\Delta_{\omega}$

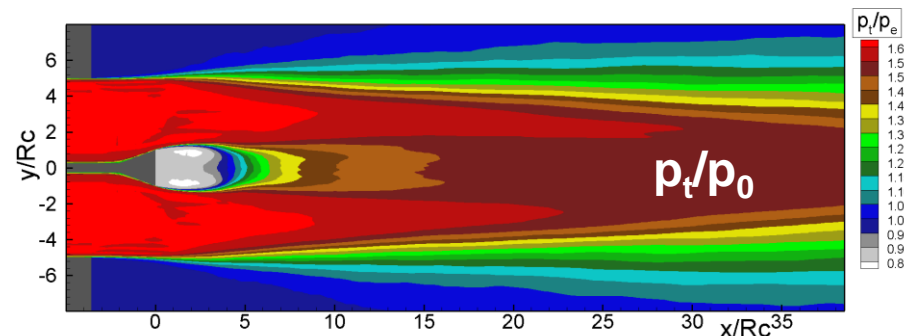
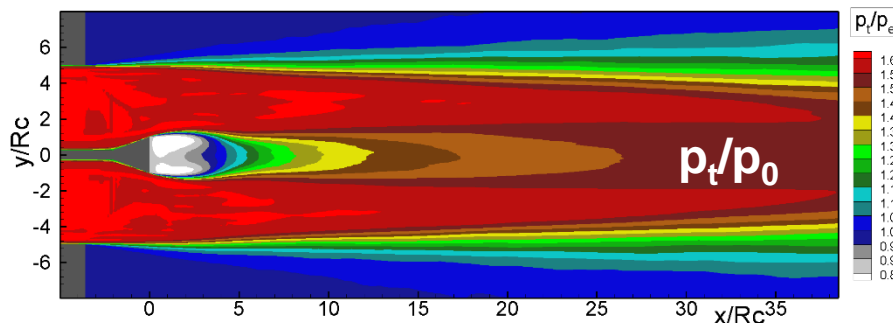
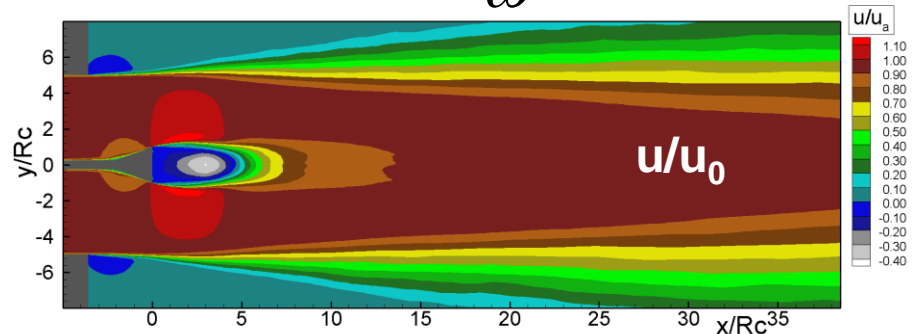


# DES: Осредненные поля скорости и полного давления

$\Delta_{SLA}$



$\Delta_{\omega}$

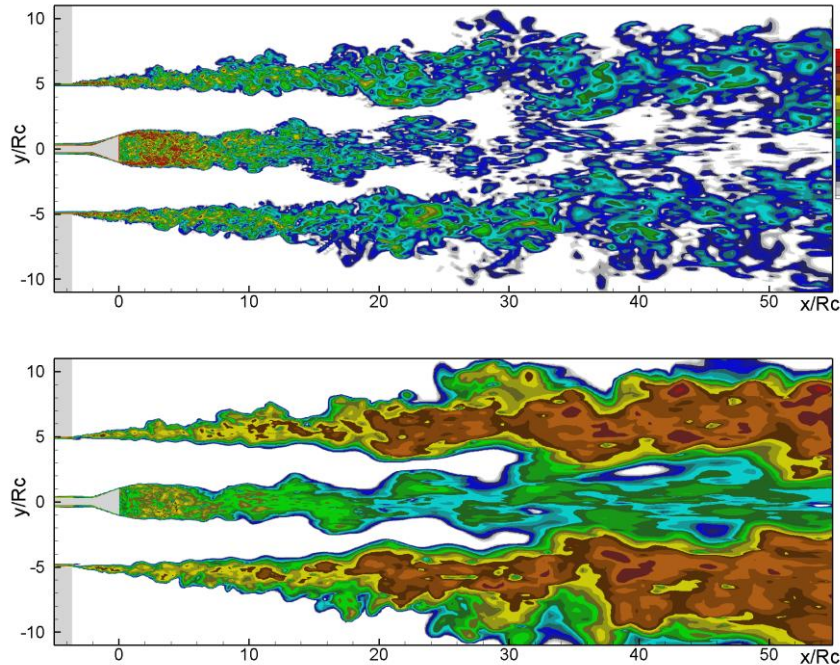


- Это приводит к некоторому различию между результатами двух версий DES как в слое смешения струи, так и в следе за конусом

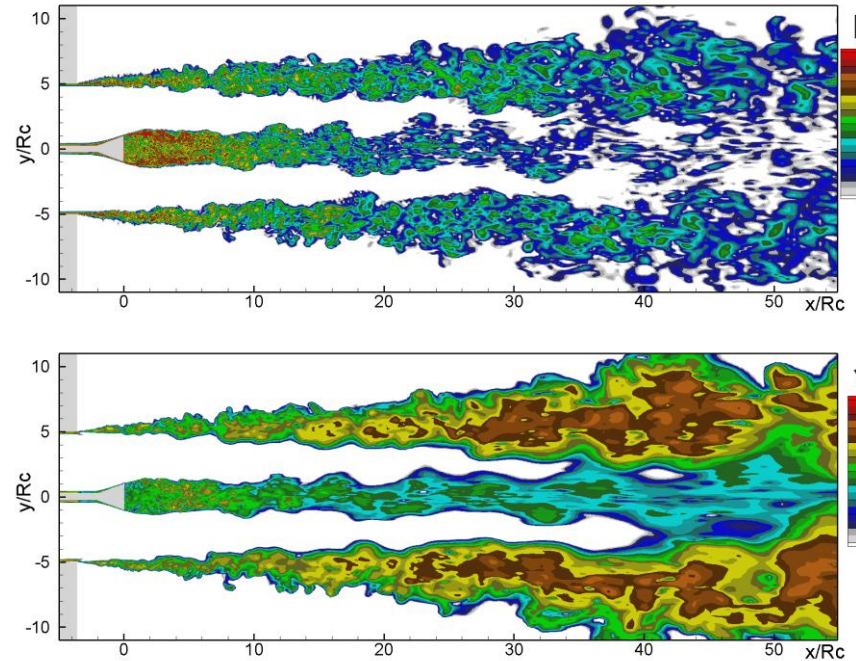
**Влияние  
измельчения сетки  
на результаты расчетов**

# Мгновенные поля завихренности и вязкости

Грубая сетка



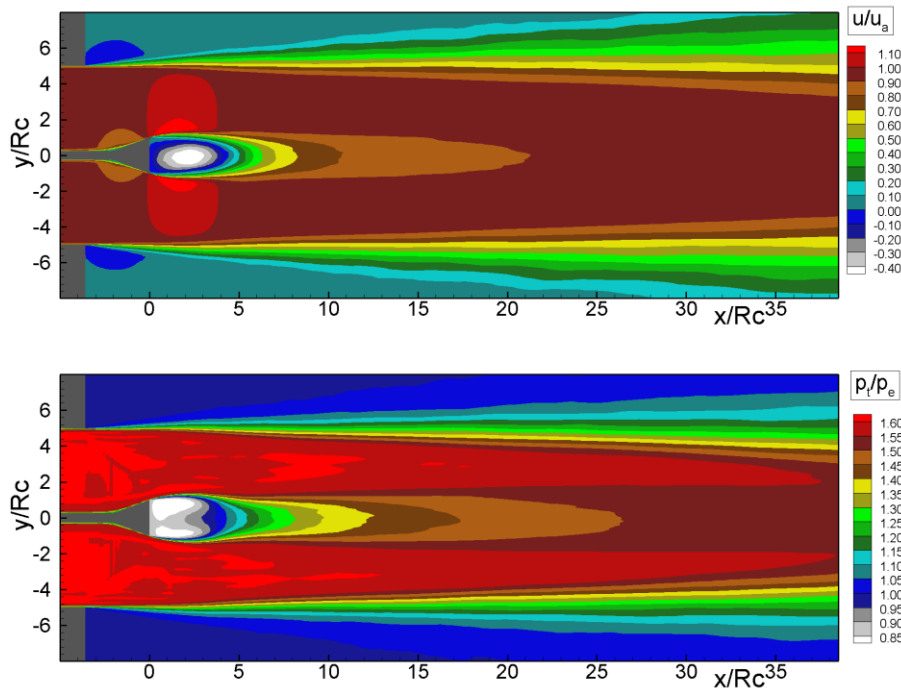
Мелкая сетка



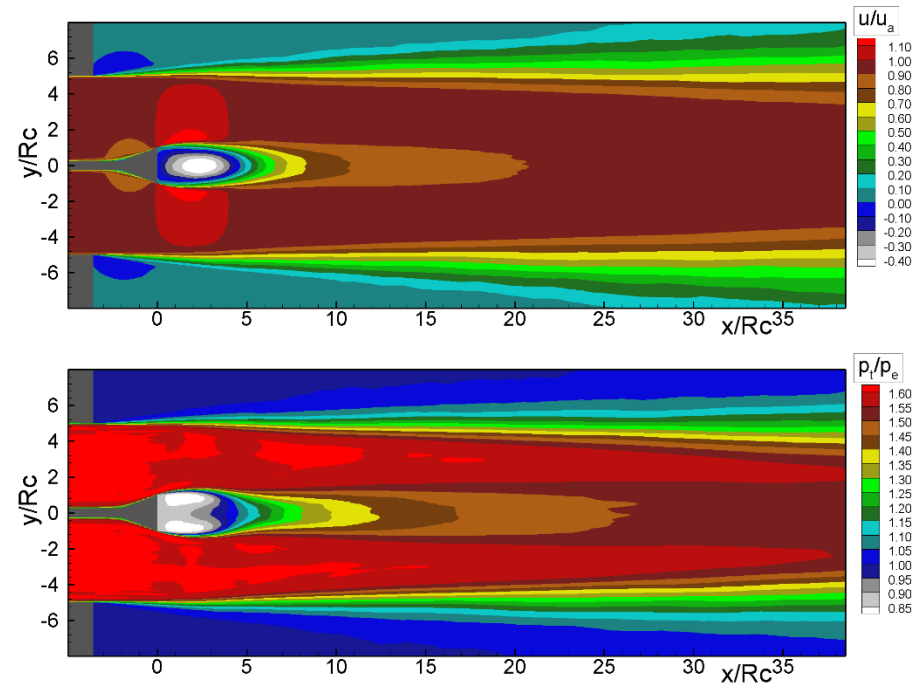
- Измельчение сетки обеспечивает разрешение более мелких вихревых структур и приводит к снижению подсеточной вязкости
  - Адекватная для LES реакция на измельчение сетки
    - DES функционирует в режиме LES

# Поля средней скорости и полного давления

Грубая сетка

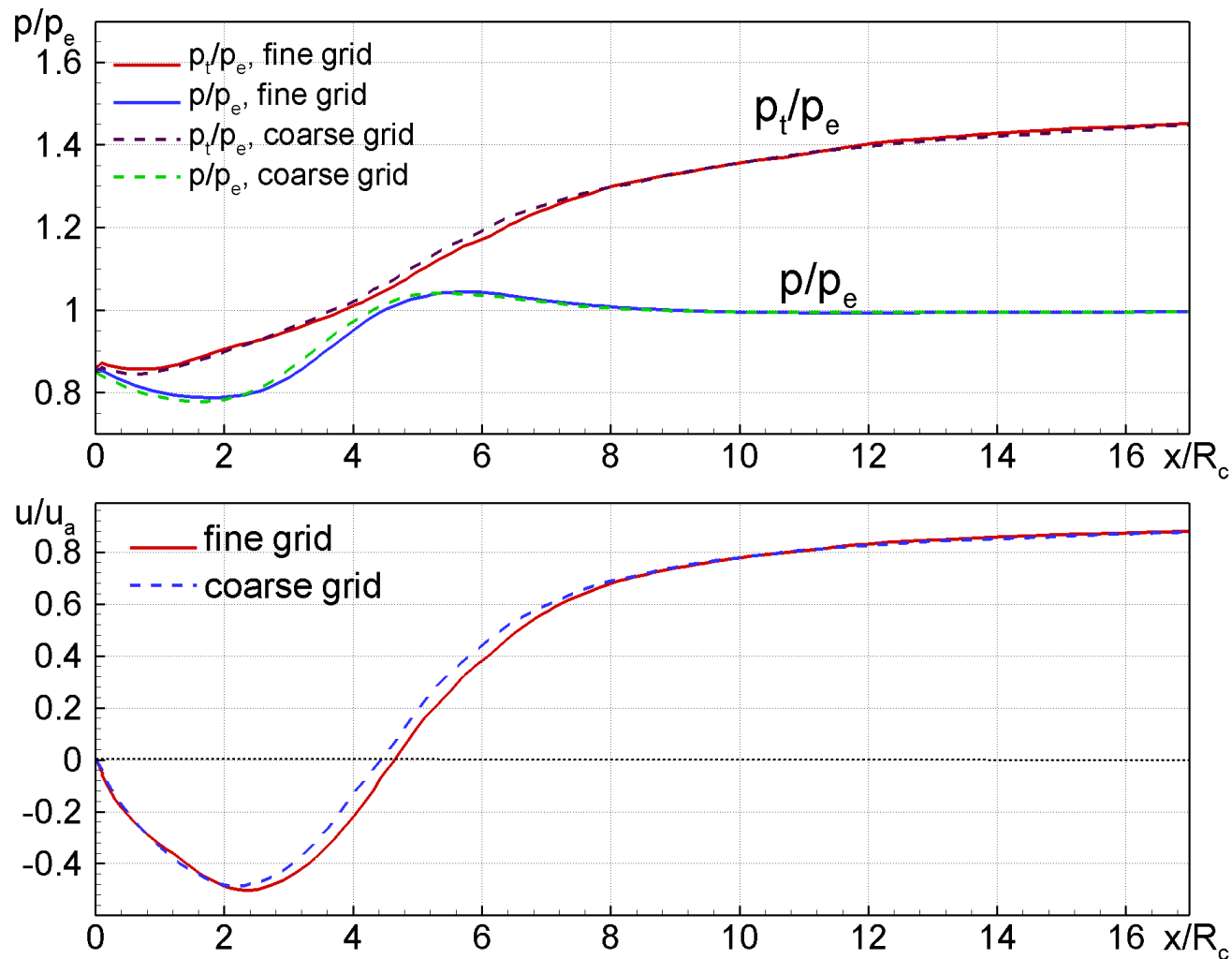


Мелкая сетка



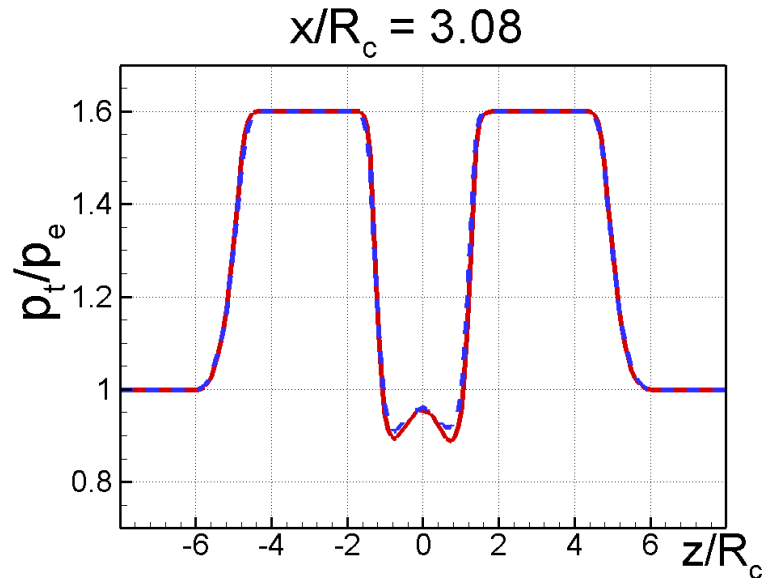
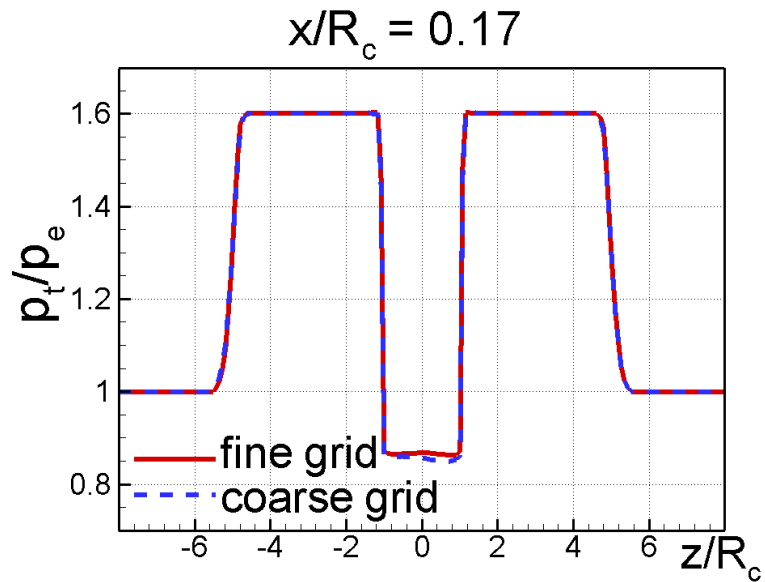
- Влияние измельчения сетки на осредненные параметры потока пренебрежимо мало
  - Практически сеточно-независимое решение

# Распределения полного и статического давления и скорости вдоль оси следа за конусом



Сплошные кривые – мелкая сетка; штриховые кривые – грубая сетка

# Профили полного давления

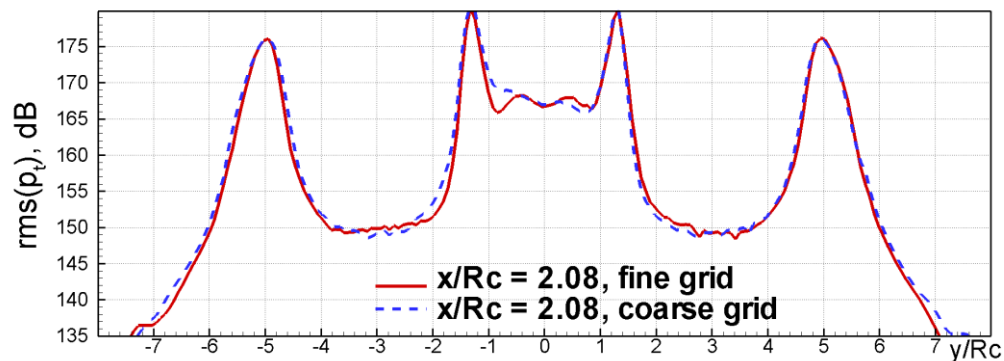
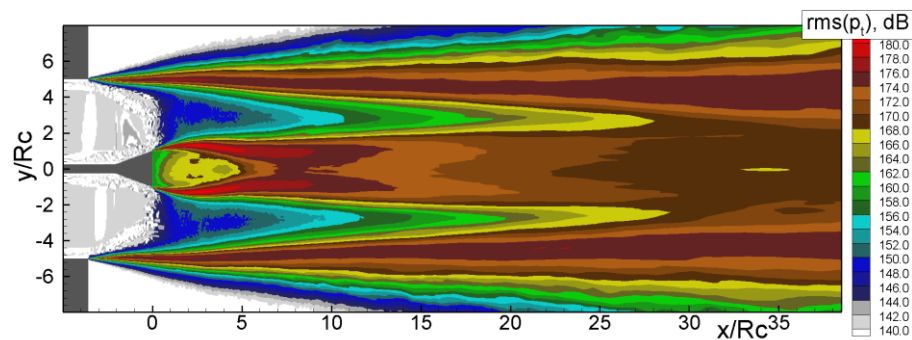
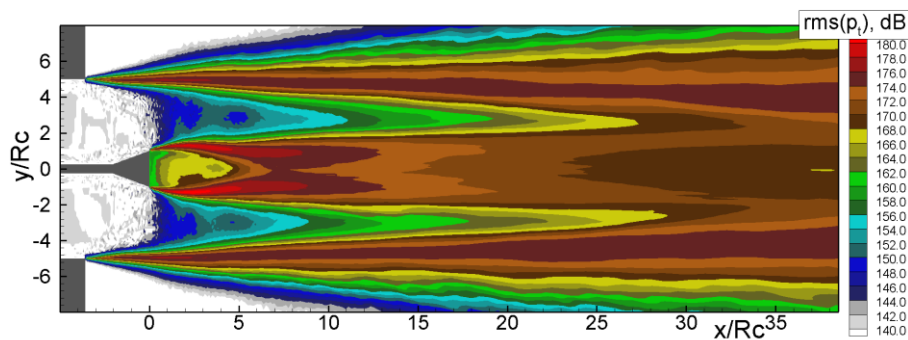
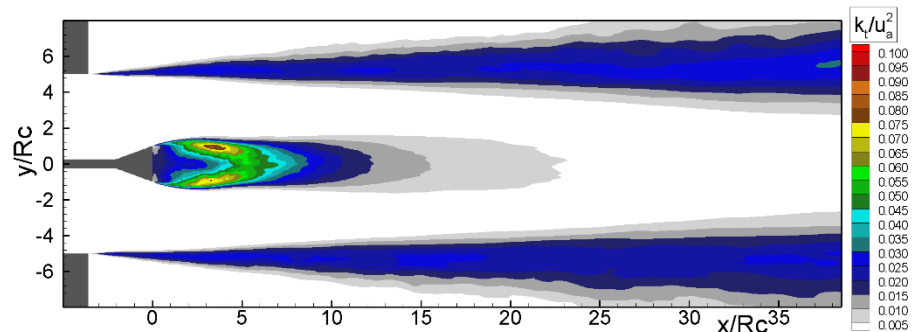
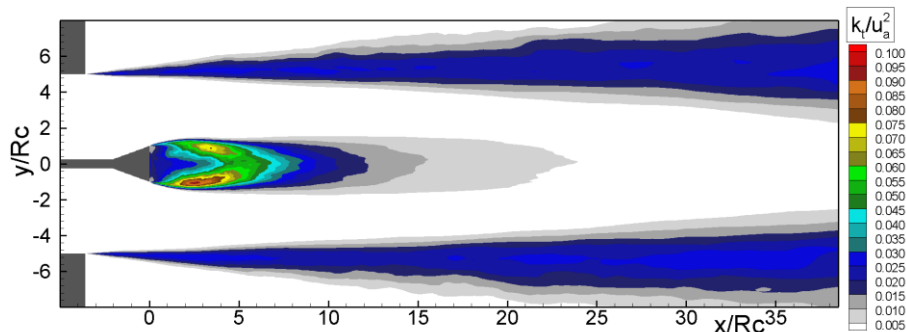


Сплошные кривые – мелкая сетка; штриховые кривые – грубая сетка

# Поля кинетической энергии турбулентности и среднеквадратичных пульсаций полного давления

Грубая сетка

Мелкая сетка



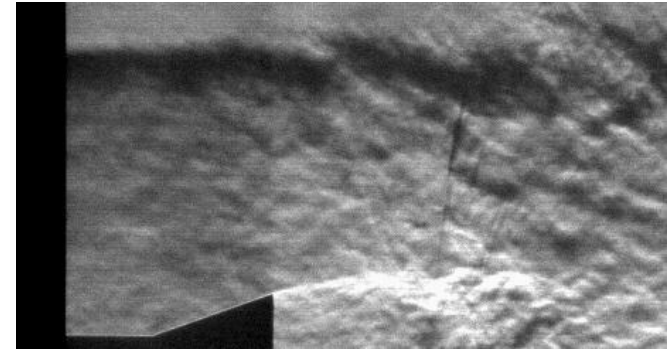
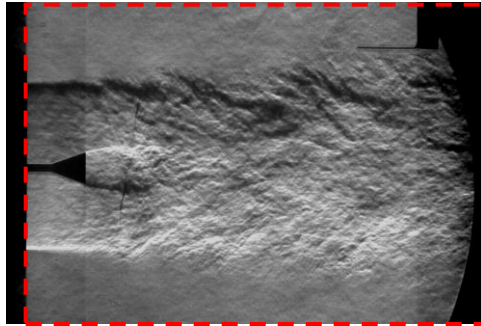
- Влияние измельчения сетки на пульсационные параметры потока также несущественно

# **Сравнение результатов расчета с экспериментом**

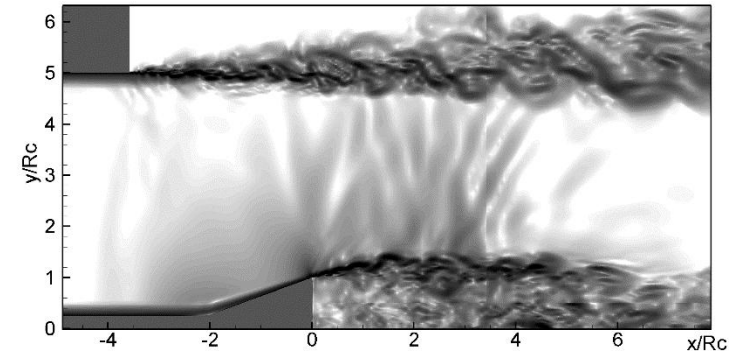
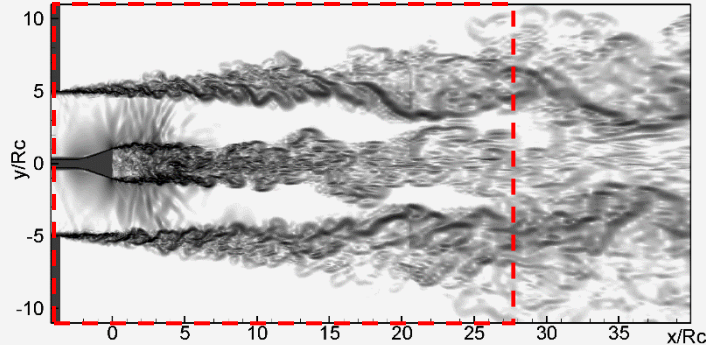


# Шлирен - картина

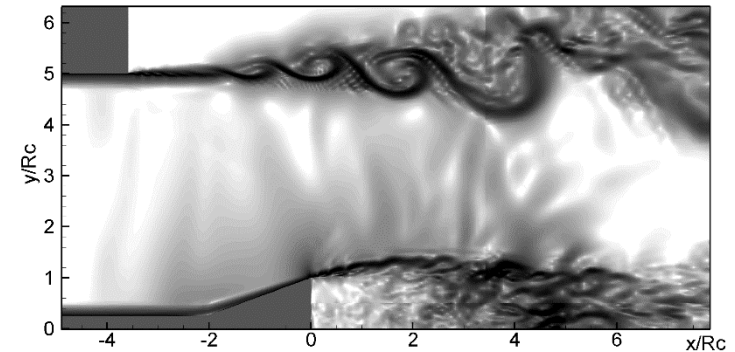
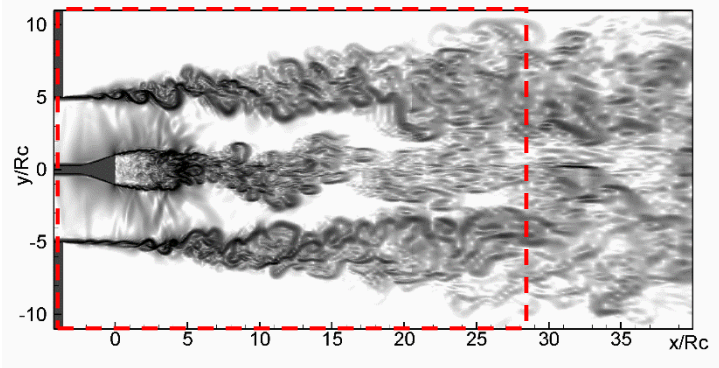
Эксперимент



Расчет  $\Delta_{SLA}$



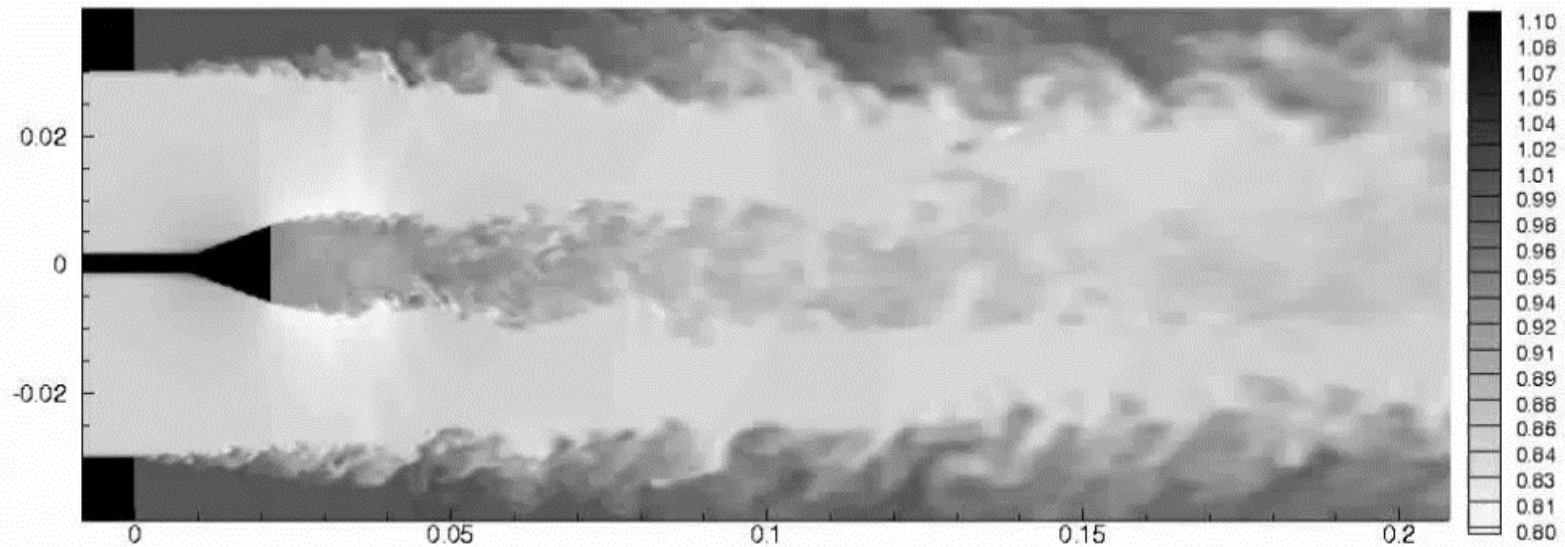
Расчет  $\Delta_{\omega}$



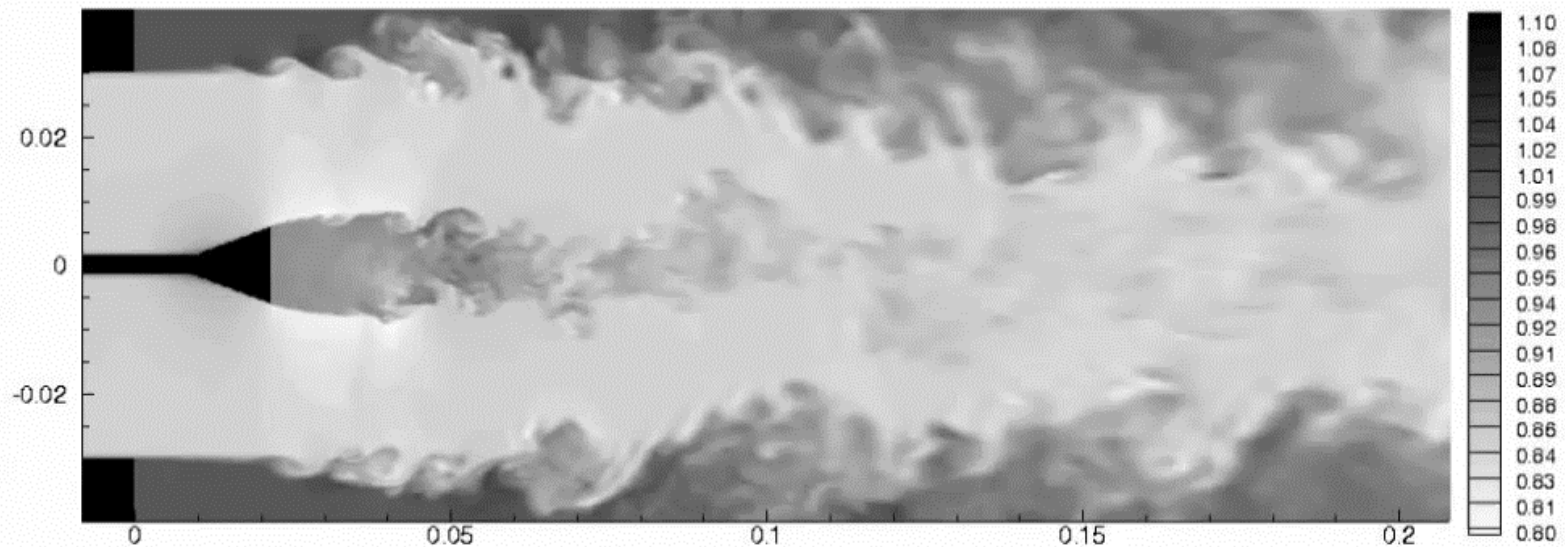
- Масштаб  $\Delta_{\omega}$  позволяет лучше воспроизвести эволюцию слоя смешения струи на начальном участке, наблюдаемую в эксперименте

# Анимации поля температуры

$\Delta_{SLA}$

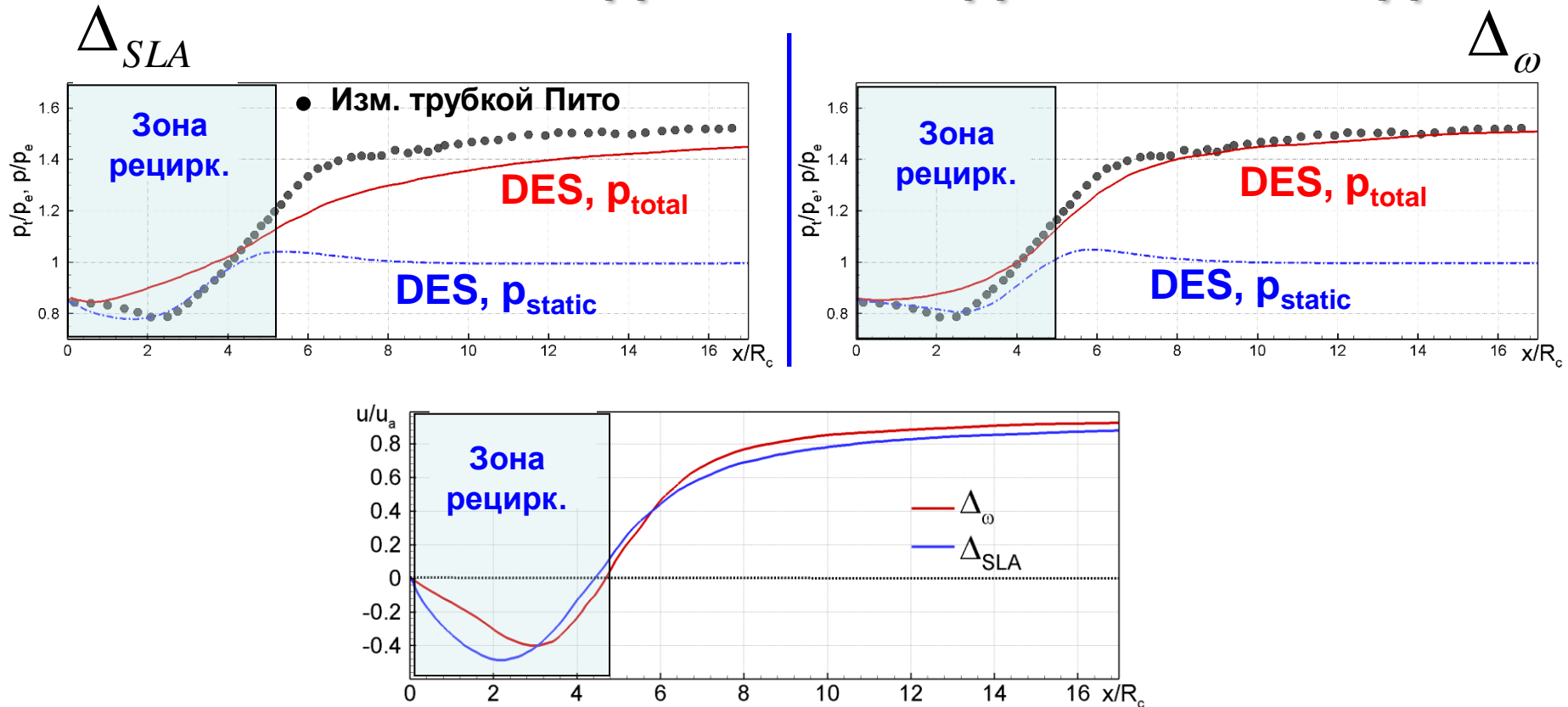


$\Delta_{\omega}$



- Наглядно иллюстрируют различие эволюции структуры турбулентности на начальном участке слоя смешения струи

# Распределения давления торможения и статического давления вдоль оси следа

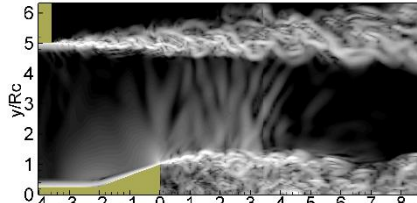


## Распределение скорости вдоль оси следа за донным срезом конуса

- В зоне рециркуляции (при  $x/R_c < \sim 4.0$ ), где трубка Пито фактически измеряет статическое давление, с результатами измерений совпадают расчетные распределения статического, а далее вниз по потоку – полного давления
- В целом, результаты DES с использованием масштаба  $\Delta_{\omega}$  лучше согласуются с измерениями, чем результаты с использованием масштаба  $\Delta_{SLA}$

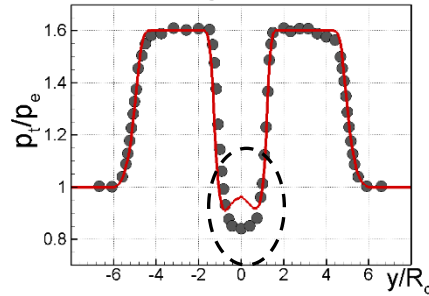
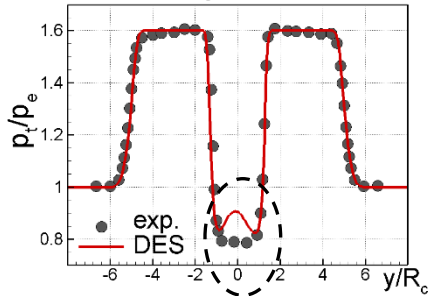
# Профили полного давления

$\Delta_{SLA}$



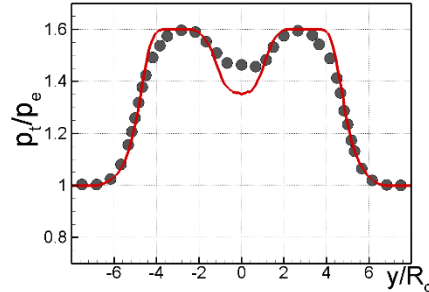
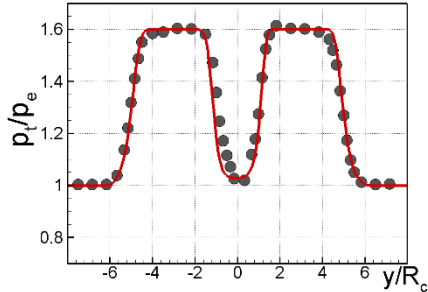
$x/R_c = 2.08$

$x/R_c = 3.08$

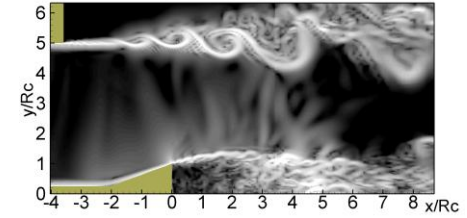


$x/R_c = 4.08$

$x/R_c = 9.75$

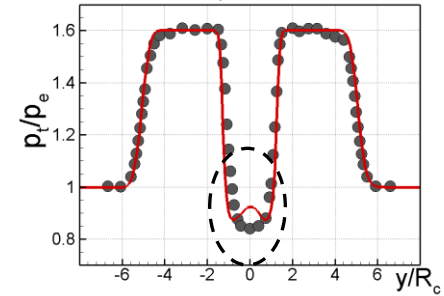
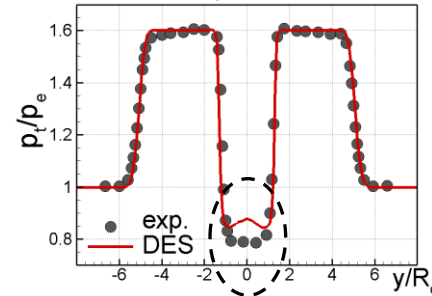


$\Delta_{\omega}$



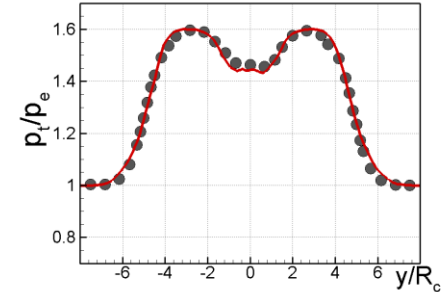
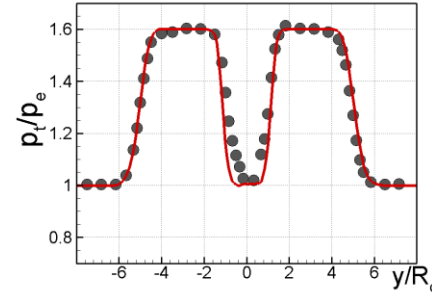
$x/R_c = 2.08$

$x/R_c = 3.08$



$x/R_c = 4.08$

$x/R_c = 9.75$



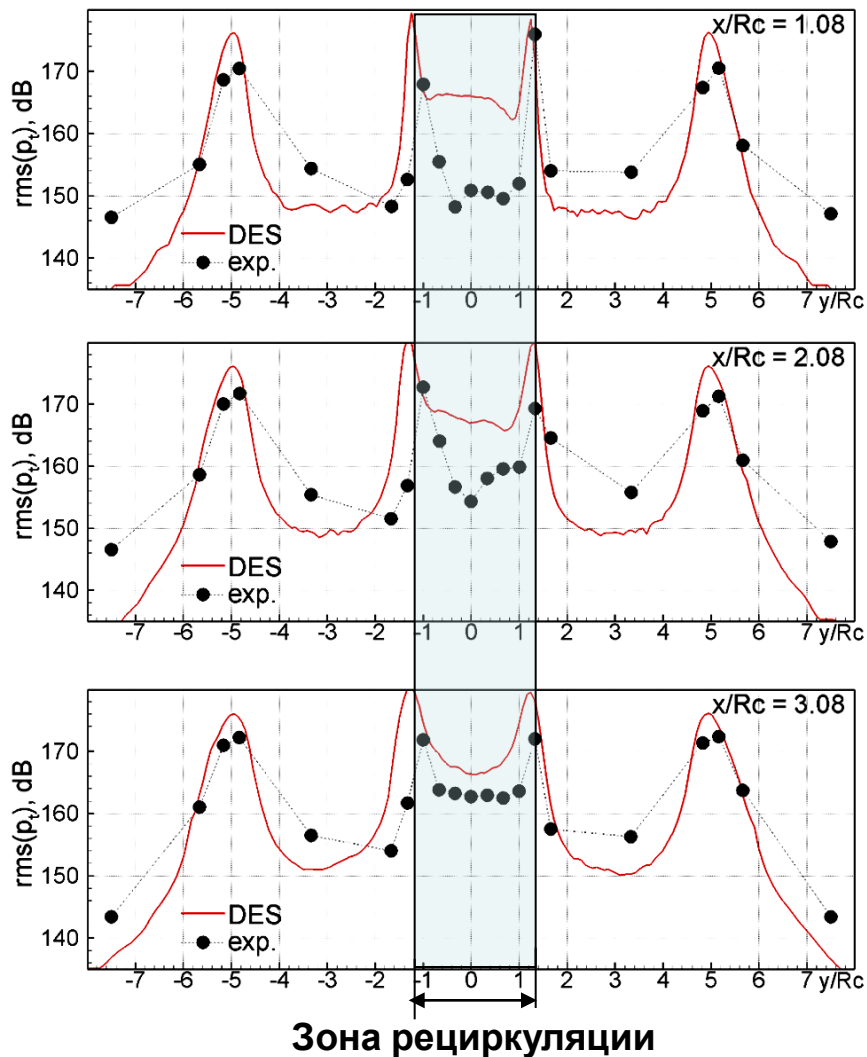
- То же относится к профилям полного давления в различных поперечных сечениях следа за конусом

➤ Рассогласование с измерениями внутри зоны рециркуляции при использовании обоих масштабов, как уже отмечалось, связано с тем, что в этой области трубка пито измеряет статическое, а не полное давление

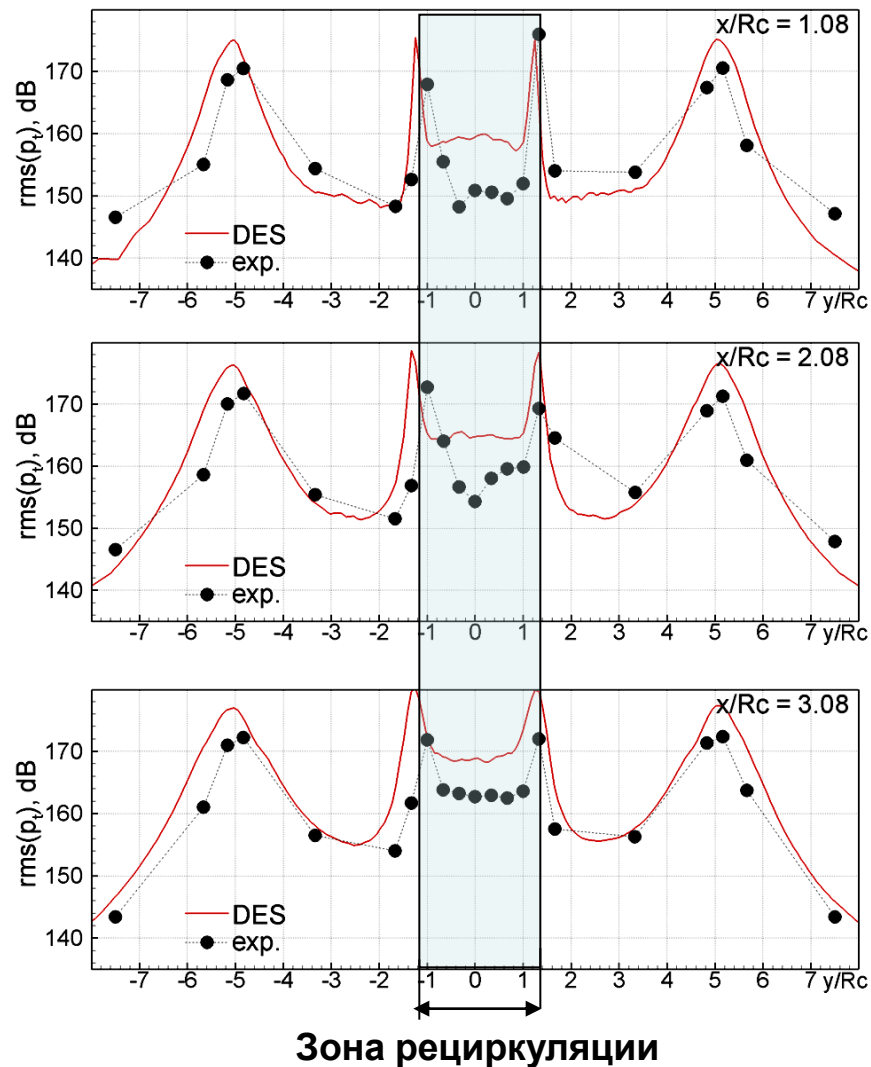


# Профили пульсаций полного давления

$\Delta_{SLA}$



$\Delta_{\omega}$



- Аналогичная ситуация имеет место и для профилей среднеквадратичных пульсаций полного давления в различных сечениях следа

# Заключение

- Проведено комплексное расчетно-экспериментальное исследование трансзвукового ( $M=0.85$ ) обтекания модели сопла ракетного блока аварийного спасения (конус с плоским донным срезом)
  - Показано, что при условиях эксперимента используемый в расчетах вихреразрешающий гибридный RANS-LES подход к моделированию турбулентности (Моделирование Отсоединенных Вихрей - DES) в сочетании с линейным подсеточным масштабом  $\Delta_\omega$  обеспечивает высокую точность предсказания осредненных и пульсационных параметров потока
  - Подтверждено, что при использовании DES в сочетании с линейным подсеточным масштабом  $\Delta_{SLA}$  в расчете реализуется быстрый переход к развитой трехмерной турбулентности как в слое смешения струи, истекающей из сопла, так и в слое смешения, сходящем с задней кромки конуса
- Данный сценарий по-видимому является характерным для полетных условий

**Спасибо за внимание!**