



# РАСЧЕТ ШУМА ОТ ЗАСЛОНКИ В УПРОЩЕННОМ ВЕНТИЛЯЦИОННОМ ВОЗДУХОВОДЕ С ПОМОЩЬЮ ВИХРЕРАЗРЕШАЮЩЕГО ПОДХОДА В СОЧЕТАНИИ С ВОЛНОВЫМ УРАВНЕНИЕМ

**Екатерина Константиновна Гусева<sup>1</sup>, Ю.Э. Егоров<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, [katia.guseva@inbox.ru](mailto:katia.guseva@inbox.ru)

<sup>2</sup>ANSYS Germany GmbH, [yuri.egorov@ansys.com](mailto:yuri.egorov@ansys.com)

## Расчет шума, генерируемого турбулентными течениями

- Наиболее точный метод - прямой метод моделирования шума
  - Совместный расчёт генерации звука турбулентными структурами и распространения звуковых волн в рамках единой системы газодинамических уравнений
    - ✓ Необходимо разрешение всех длин волн, вносящих вклад в шум, в расчетной области вплоть до приемника
    - ✓ Высокие вычислительные затраты
- Альтернатива - гибридные методы
  - Расчет основного течения и расчет распространения звука проводятся отдельно с использованием различных уравнений
- Интегральные гибридные методы используются наиболее часто
  - Их применение ограничено внешними задачами, в которых нет препятствий между источниками шума и приемниками
- Дифференциальные гибридные методы
  - Один из таких подходов для течений с низкими числами Маха основан на совместном решении уравнений движения жидкости в несжимаемой постановке и волнового уравнения
    - ✓ В настоящей работе он применен для расчета шума от модели упрощенного воздуховода

## Метод расчета шума, основанный на волновом уравнении

- Гибридный подход для течений при низких числах Маха:

расчет несжимаемого течения + волновое уравнение для расчета звука  
[Kaltenbacher]

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 \varphi = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial t} P_{flow}$$

- Уравнение для акустического потенциала  $\varphi$  ( $\partial \varphi / \partial t = -p' / \rho$ ) выведено из модели [Ewert] в предположении постоянных плотности  $\rho$  и скорости звука  $c$

Совместный расчет уравнений движения жидкости и волнового уравнения на одной сетке с одним шагом по времени

Нестационарный расчет в несжимаемой постановке с использованием вихреразрешающих подходов

Источник волнового уравнения

Решение уравнения для потенциала

Акустическое давление  $p'$

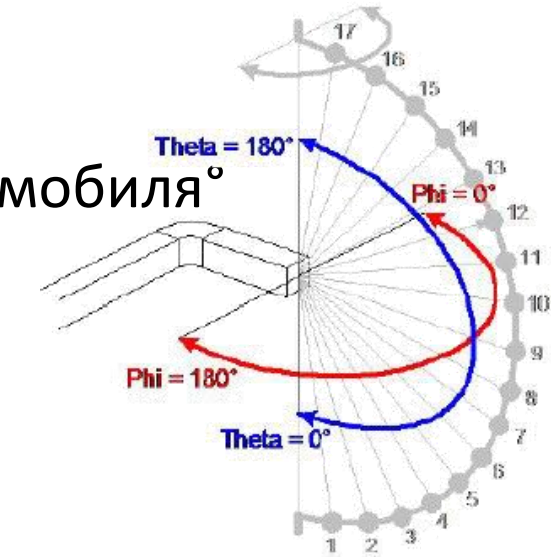
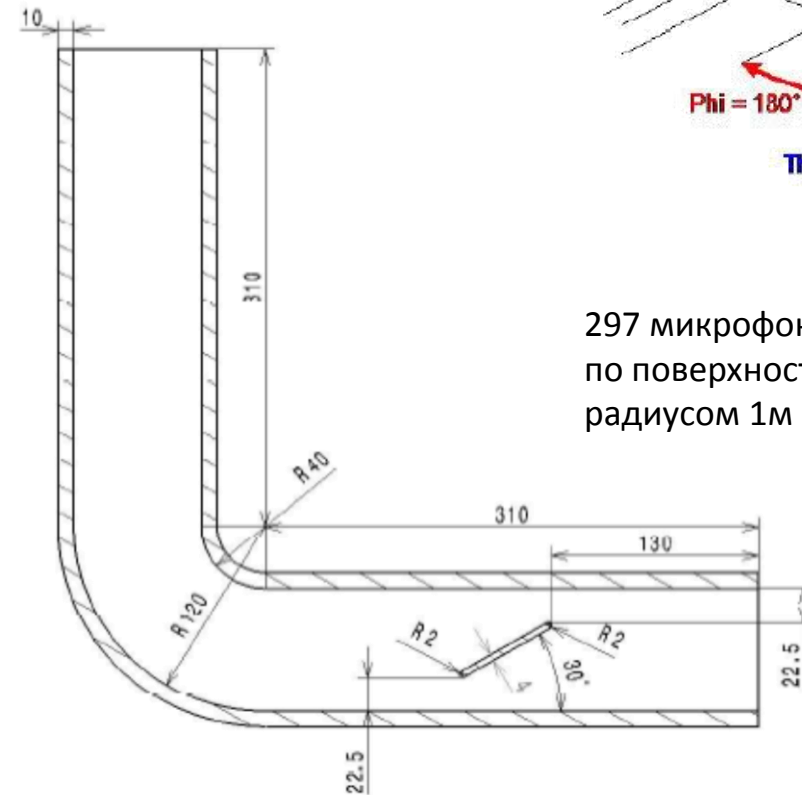
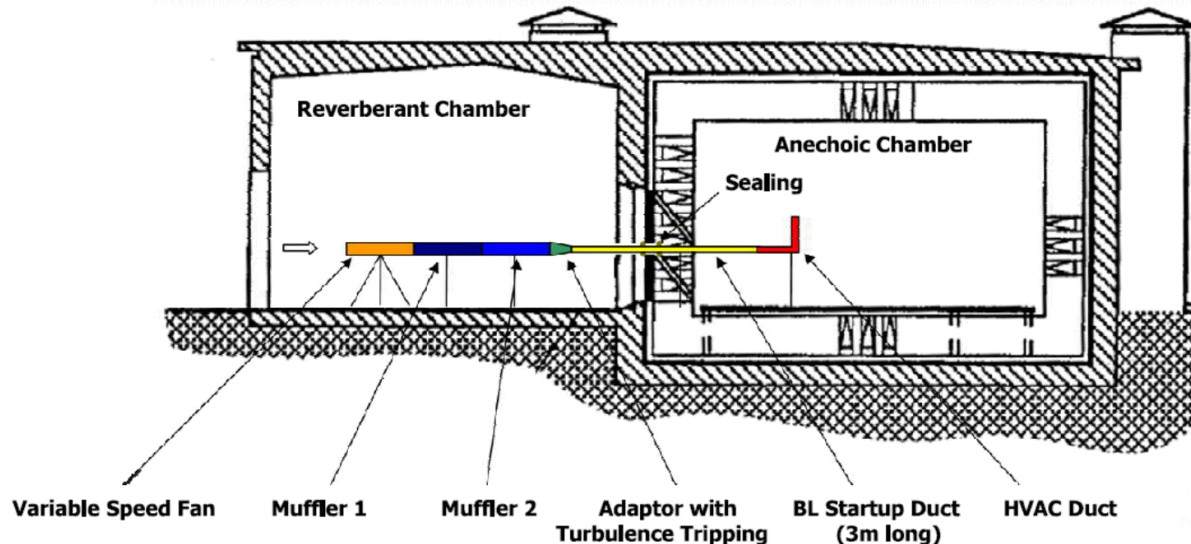
\* Время расчета одного шага по времени возрастает не более чем на 15%

# Шум от заслонки, расположенной в упрощенном воздуховоде

Эксперимент (Jäger et al., 2008)

• Модель упрощенного воздуховода вентиляционной системы автомобиля<sup>o</sup>

- Канал квадратного сечения с поворотом 90°
- За поворотом установлена заслонка
- Среднерасходная скорость в канале  $U_{\text{bulk}} = 7.5 \text{ м/с}$
- Сторона канала  $h = 0.08 \text{ м}$

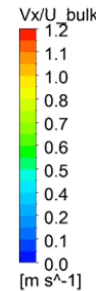


297 микрофонов распределено по поверхности полусферы радиусом 1м

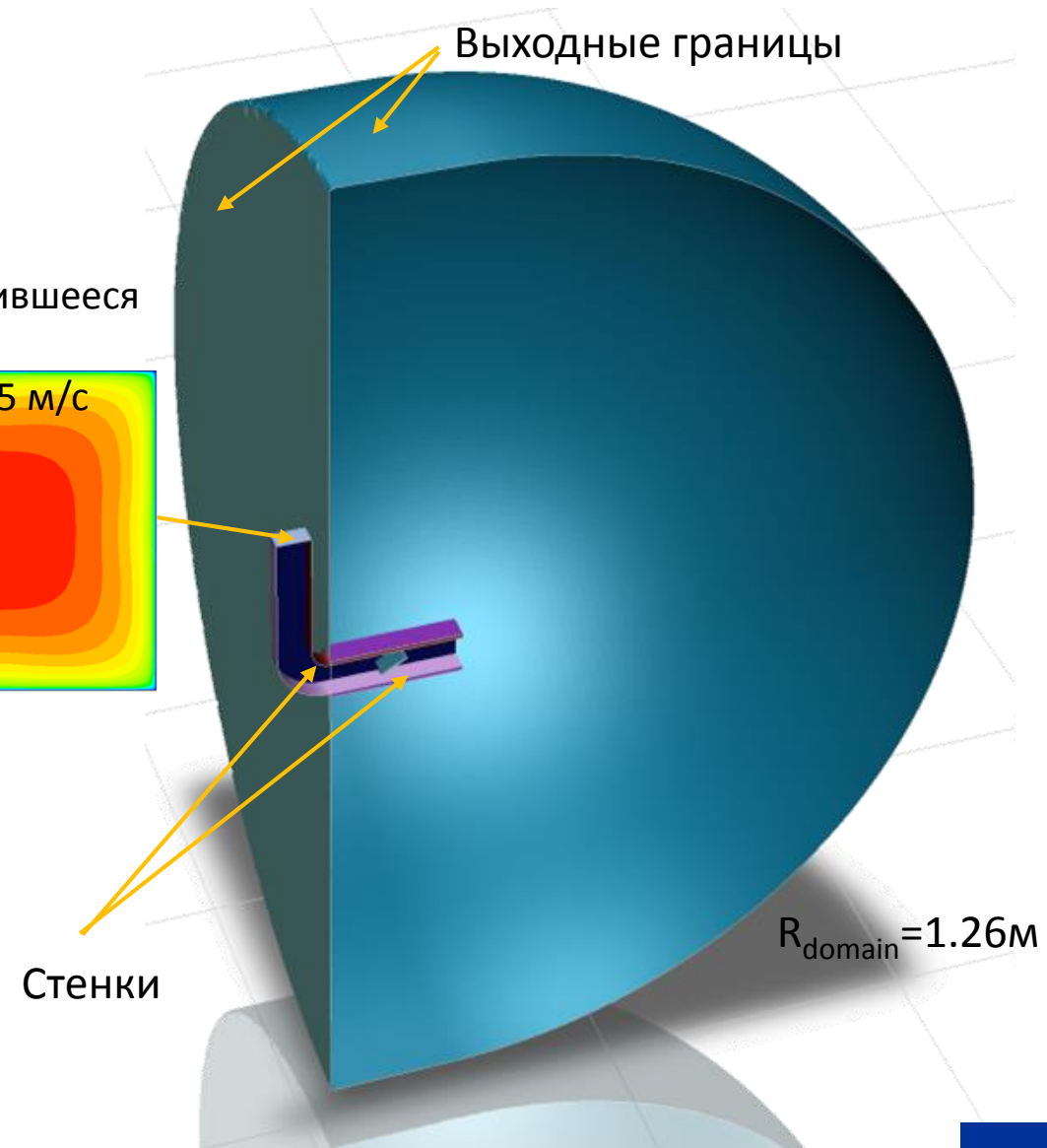
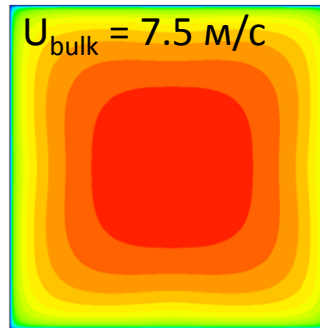


## Постановка задачи (1 из 2)

- $Re = U_{bulk} h/\nu = 4 \cdot 10^4$ ,  $M = 0.02$
- Течение несжимаемой жидкости
- Моделирование турбулентности гибридным RANS-LES методом SBES
- Граничные условия:
  - На входе в канал - профиль скорости и турбулентных характеристик из предварительного RANS расчета установившегося течения в квадратном канале
  - Стенки канала – условия прилипания
  - Выходные границы с заданным давлением
  - Неотражающие граничные условия для волнового уравнения на входе и выходе
  - Отражающие граничные условия на для волнового уравнения на стенках
- Расчеты проводились с использованием ANSYS FLUENT



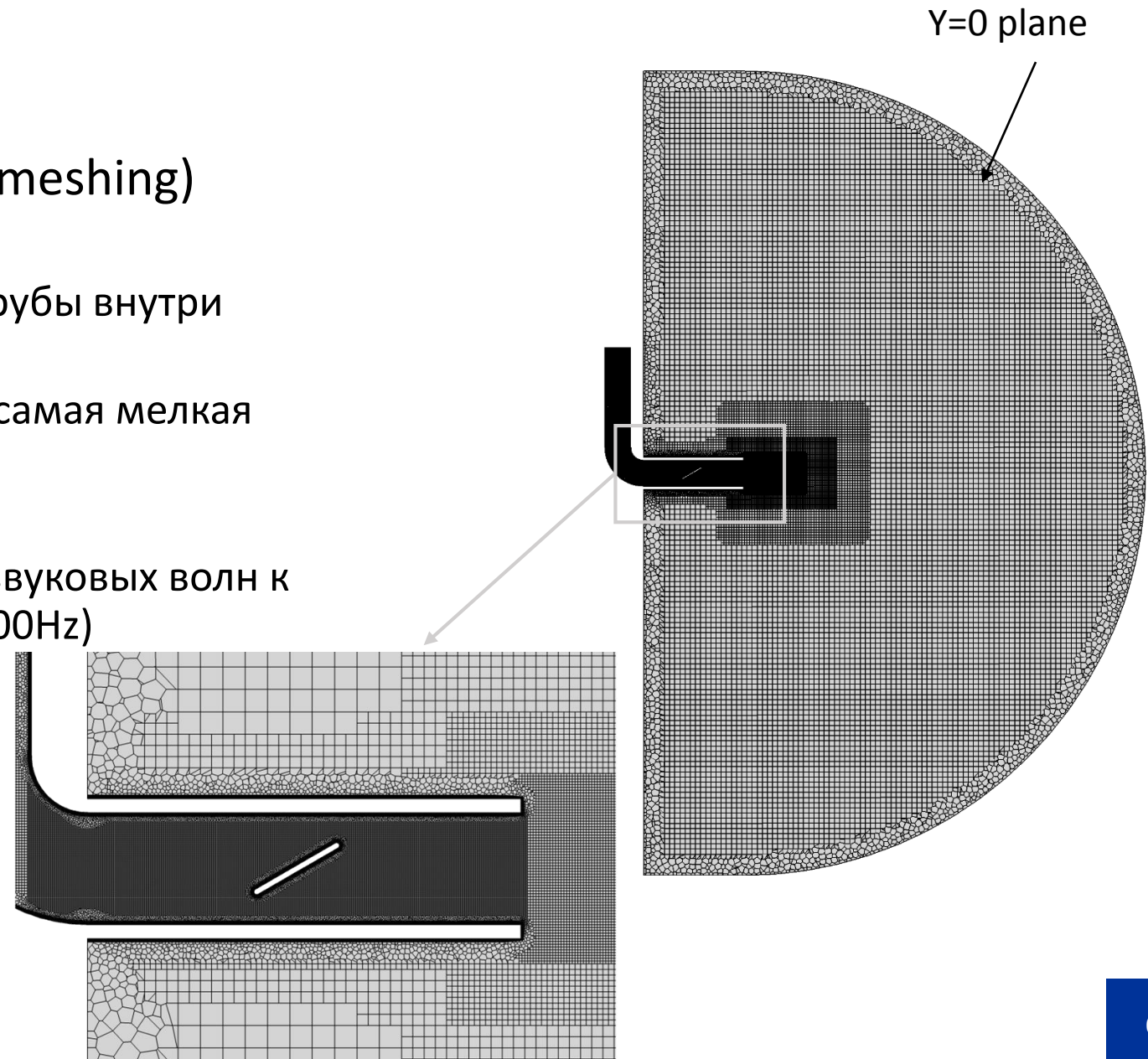
Установившееся течение,



## Постановка задачи (2 из 2)

- Неструктурированная сетка (Fluent meshing)
  - около 8М ячеек
  - 13 призматических слоев на стенках трубы внутри канала ( $y_{wall}^+ < 1$ )
  - $\Delta = 1\text{мм}$  внутри канала за поворотом (самая мелкая сетка)
  - 5 уровней измельчения
  - $\Delta = 16\text{мм}$  в области распространения звуковых волн к микрофонам (разрешение волн до 2000Hz)
- $\Delta t = 1 \cdot 10^{-5}\text{с}$ 
  - Конвективное число Куранта менее 1

\*Расчеты проведены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра СПбПУ «Политехнический» при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках реализации программы Научного центра мирового уровня по направлению «Передовые цифровые технологии» СПбПУ (согл. № 075-15-2020-934 от 17.11.2020 г.)



## Численные методы

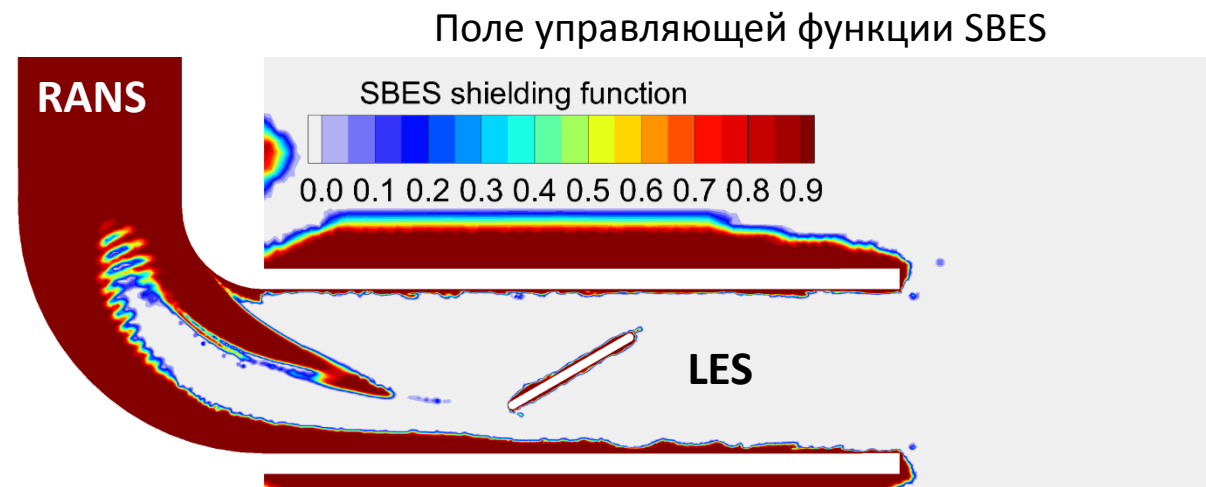
- Гидродинамика
  - Метод конечных объемов
  - Неявная схема второго порядка по времени
  - Монотонизированная центрально-разностная схема дискретизации конвективных членов (Tunable BCD, bounded central differencing)
  
- Акустика
  - Метод конечных объемов
  - Дискретизация второго порядка по пространству
  - Неявный метод Ньюмарка второго порядка для дискретизации по времени

## Гибридный RANS-LES подход SBES

- SBES (Stress-Blended Eddy Simulation) – незонный гибридный RANS-LES подход, в котором с помощью управляющей функции обеспечивается переключение от базовой RANS модели к алгебраической подсеточной LES модели:

$$\tau_{i,j}^{SBES} = f_{SBES} \tau_{i,j}^{RANS} + (1 - f_{SBES}) \tau_{i,j}^{LES}$$

- В настоящей работе:
  - RANS - SST с поправками на кривизну линий тока и вторичные токи в угловых течениях
  - LES – WALE

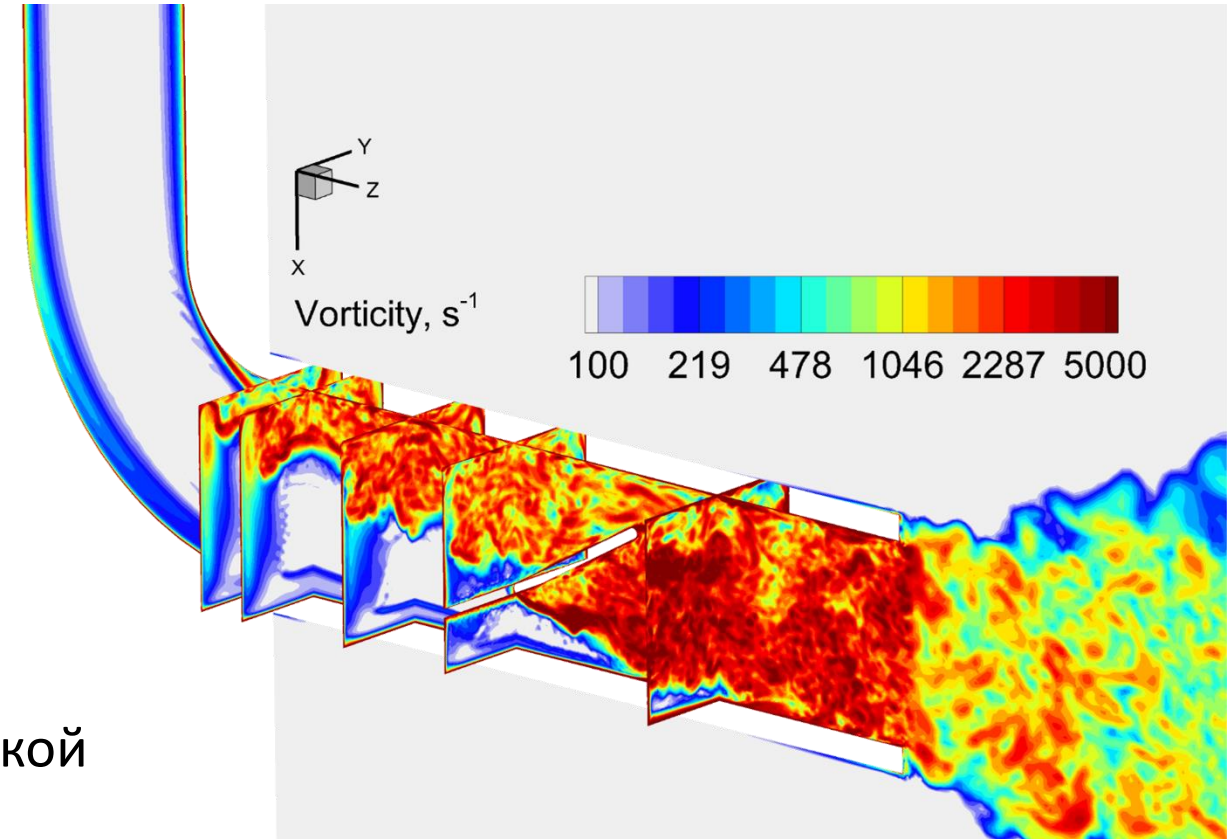
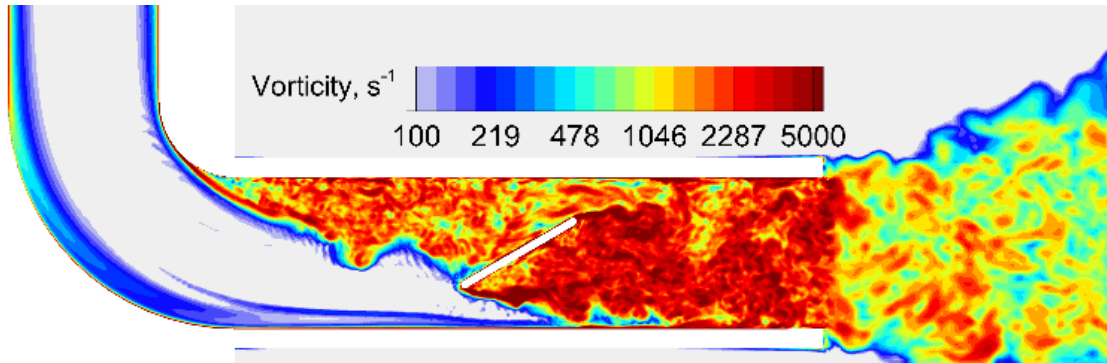


- SBES обеспечивает использование RANS модели в канале до поворота и подсеточной LES модели в оторвавшемся слое смешения и в областях с разрешенными турбулентными структурами в канале за поворотом канала



## Структура течения (визуализация)

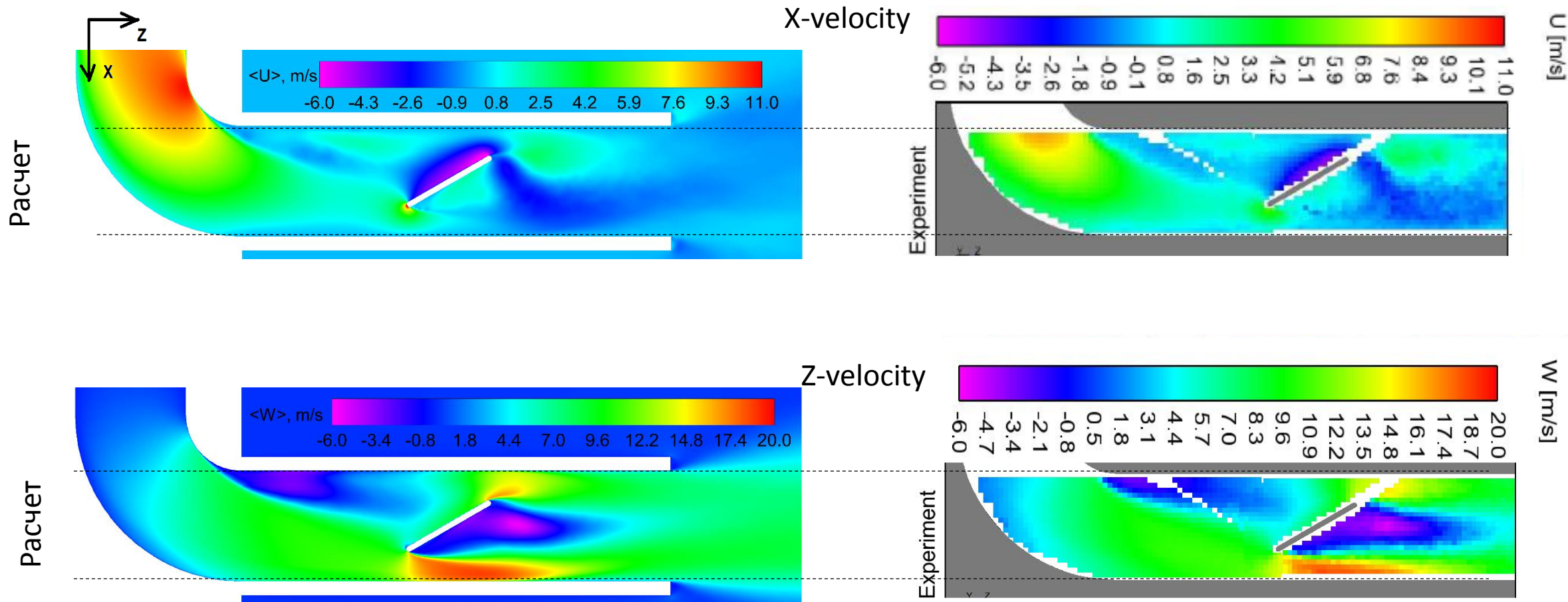
Мгновенное поле модуля завихренности



- В слое смешения за поворотом канала быстро формируются разрешенные турбулентные структуры
- В отрывных областях за поворотом и за заслонкой разрешаются мелкие турбулентные структуры

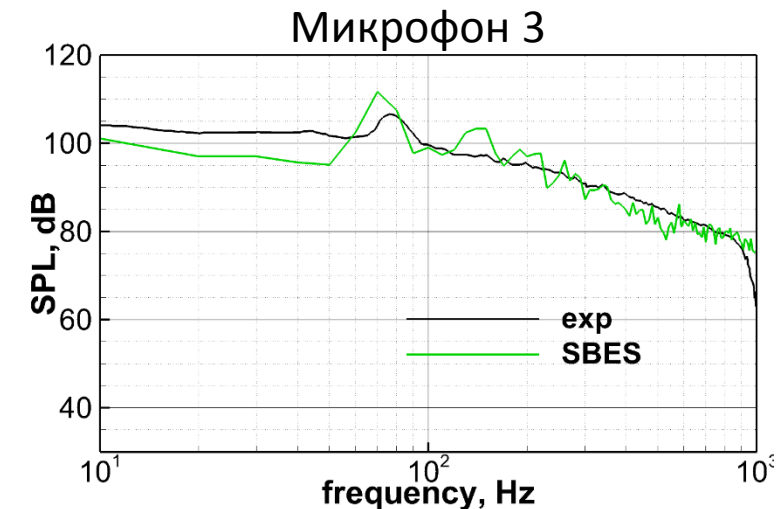
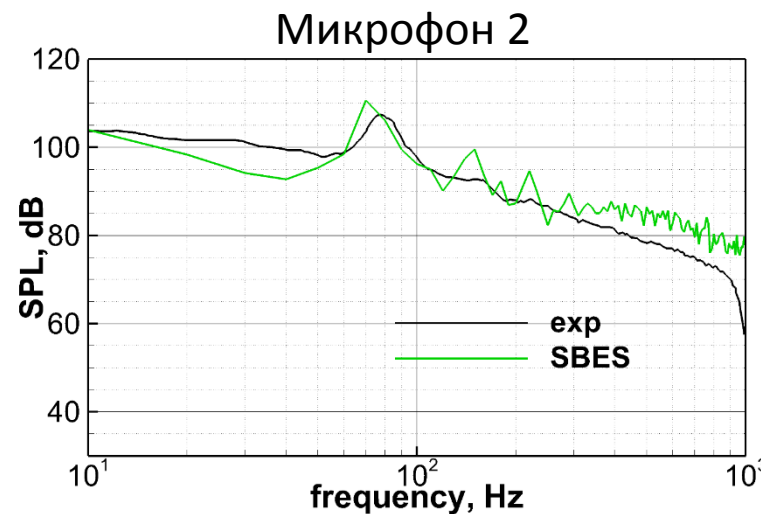
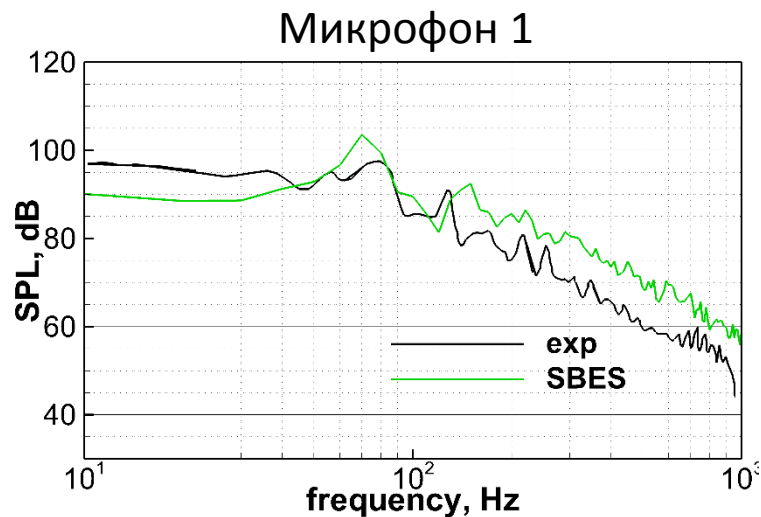
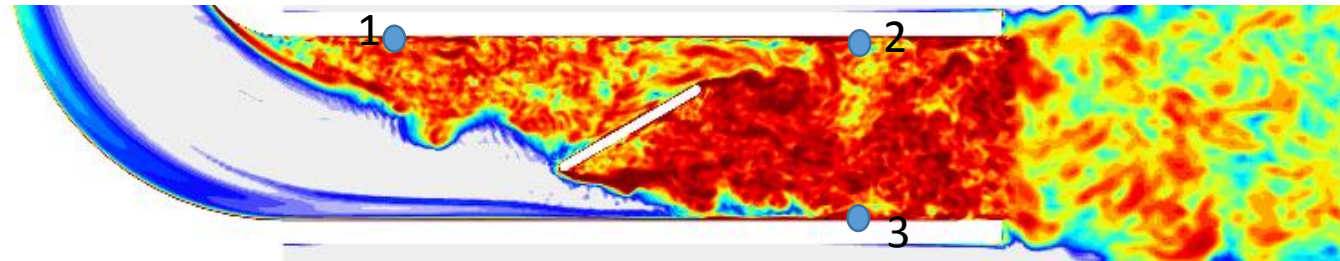


## Осредненная скорость в сечении $y=0$ (центр канала)



- Структура течения, размеры и форма отрывных областей, а также уровни скоростей хорошо согласуются с экспериментальными данными

## Спектры давления на стенках канала



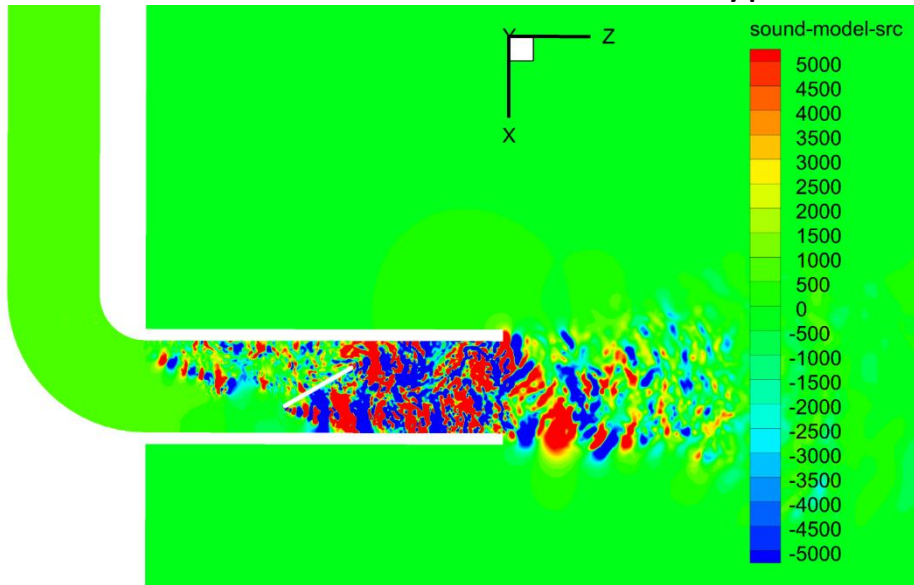
Расчетные спектры масштабированы к экспериментальному разрешению в 4Гц

- Расчетные спектры давления на стенках канала в микрофонах, расположенных за заслонкой хорошо согласуются с экспериментальными
  - Предсказан пик на 80Гц (дорожка Кармана за заслонкой)

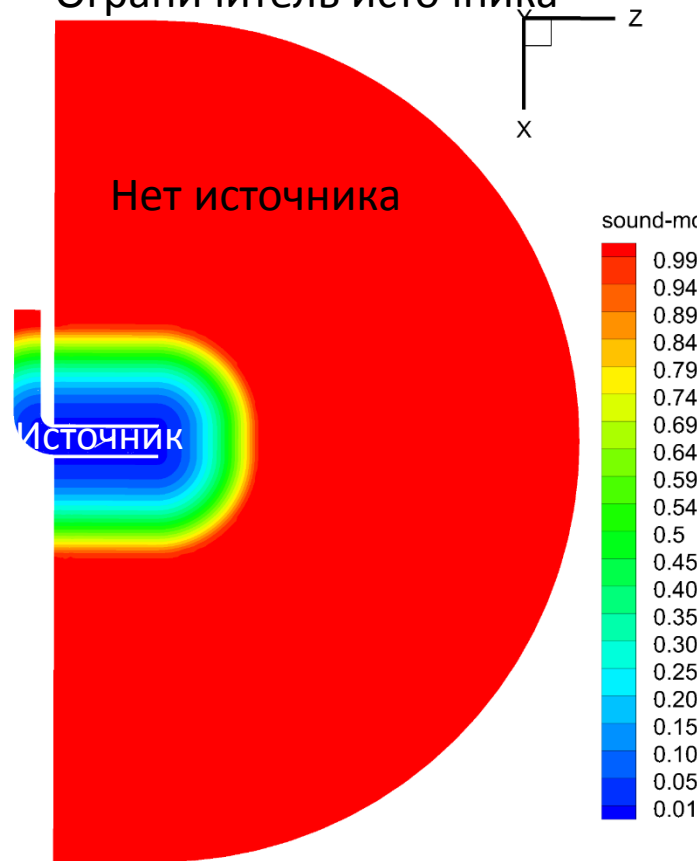


# Параметры волнового уравнения

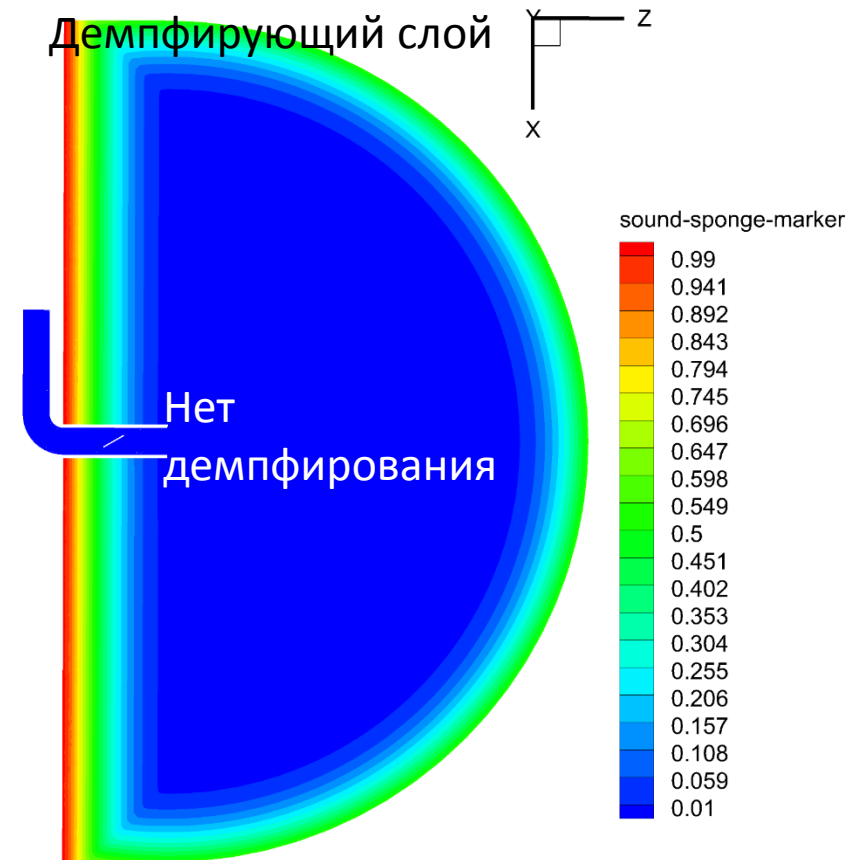
Источниковый член волнового уравнения



Ограничитель источника



Демпфирование методом искусственной вязкости

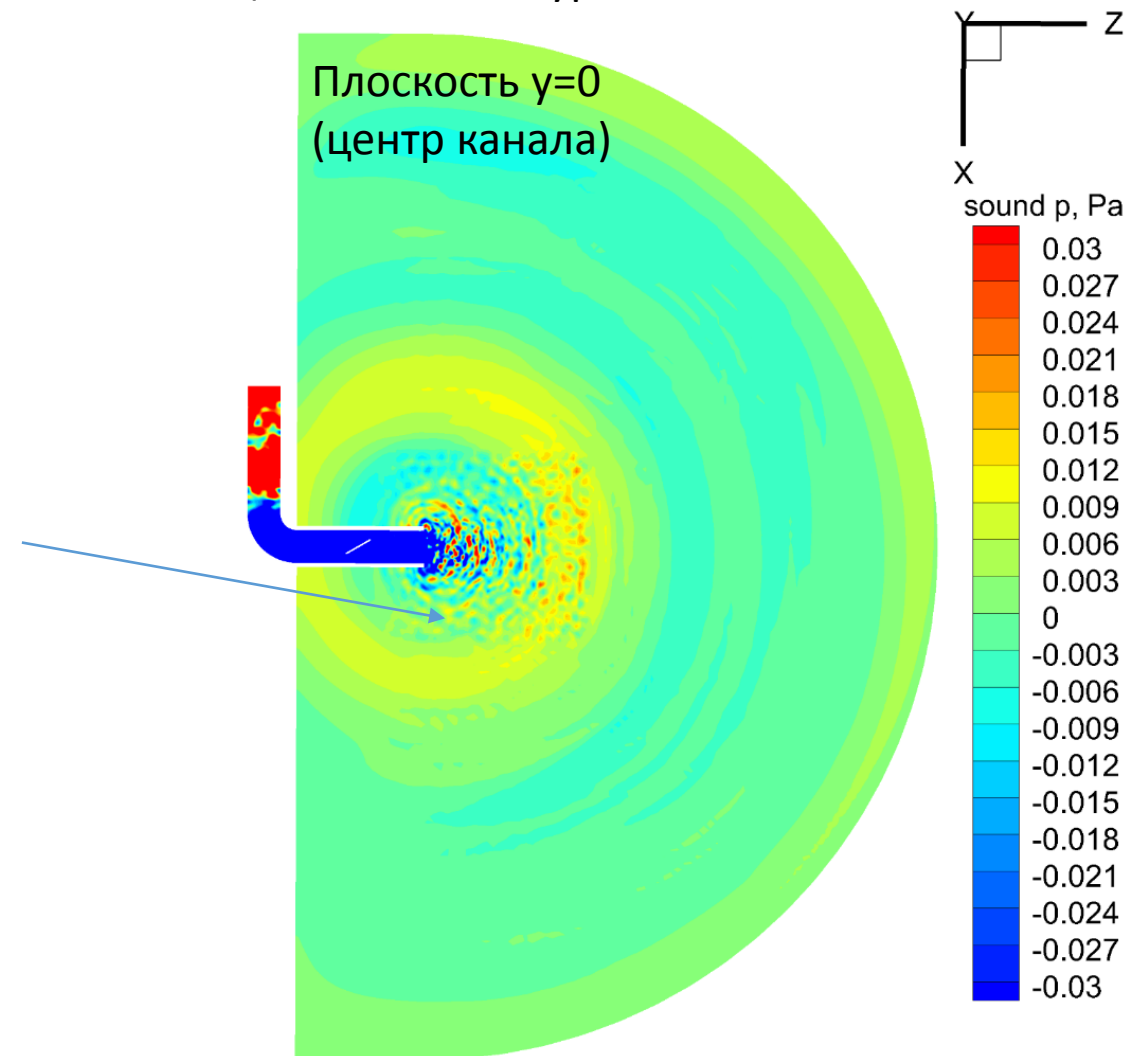




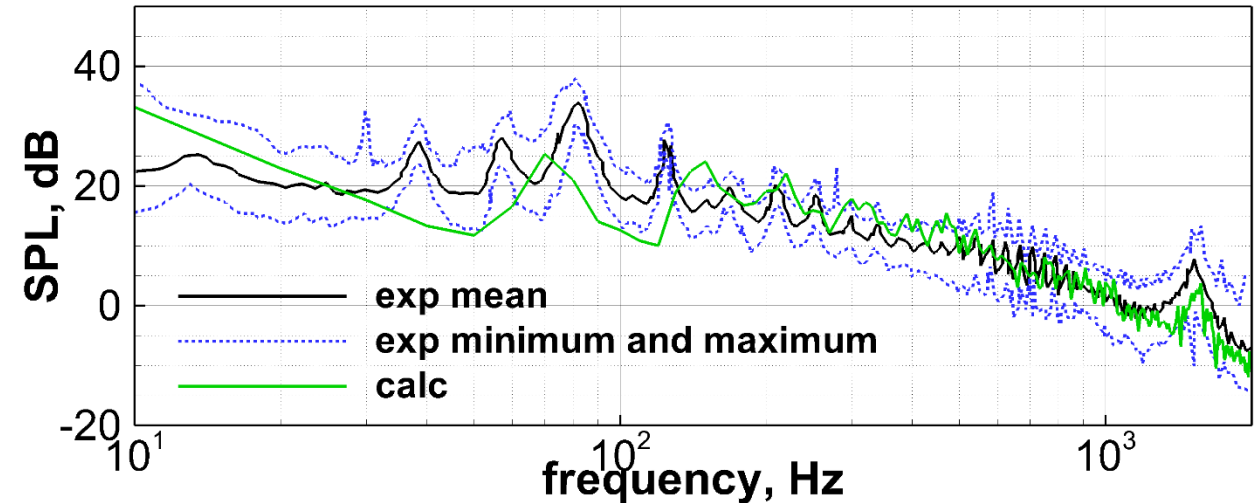
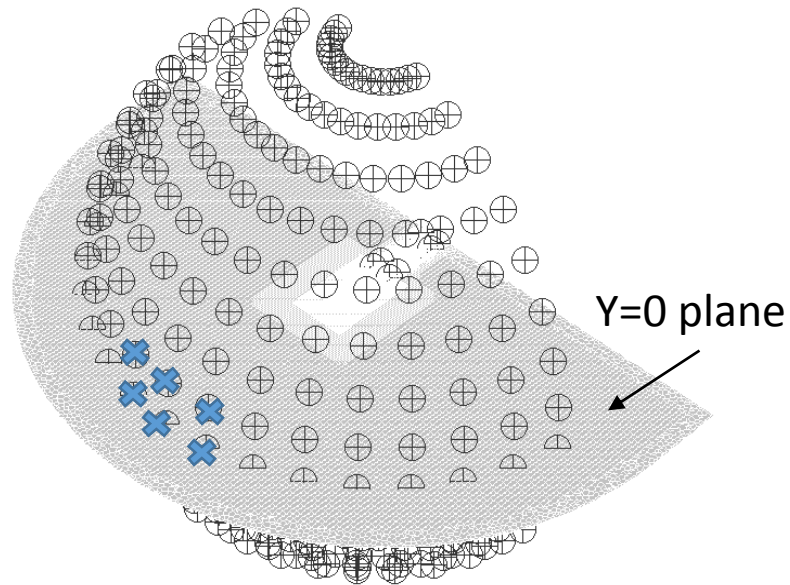
## Поле звукового давления

- Отражение высокочастотных волн (не разрешаемых на используемой сетке и с используемыми шагами по времени) от интерфейсов закругления сетки

Мгновенное поле звукового давления, полученное с помощью волнового уравнения



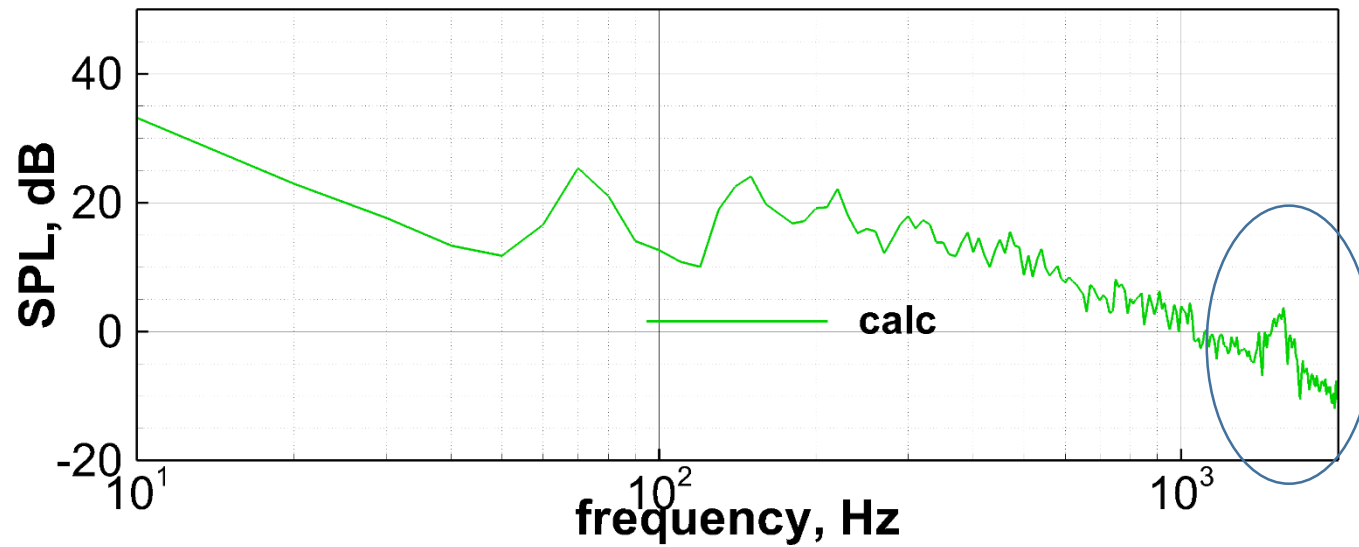
## Спектры шума в среднем поле (1 м от выхода из трубы)



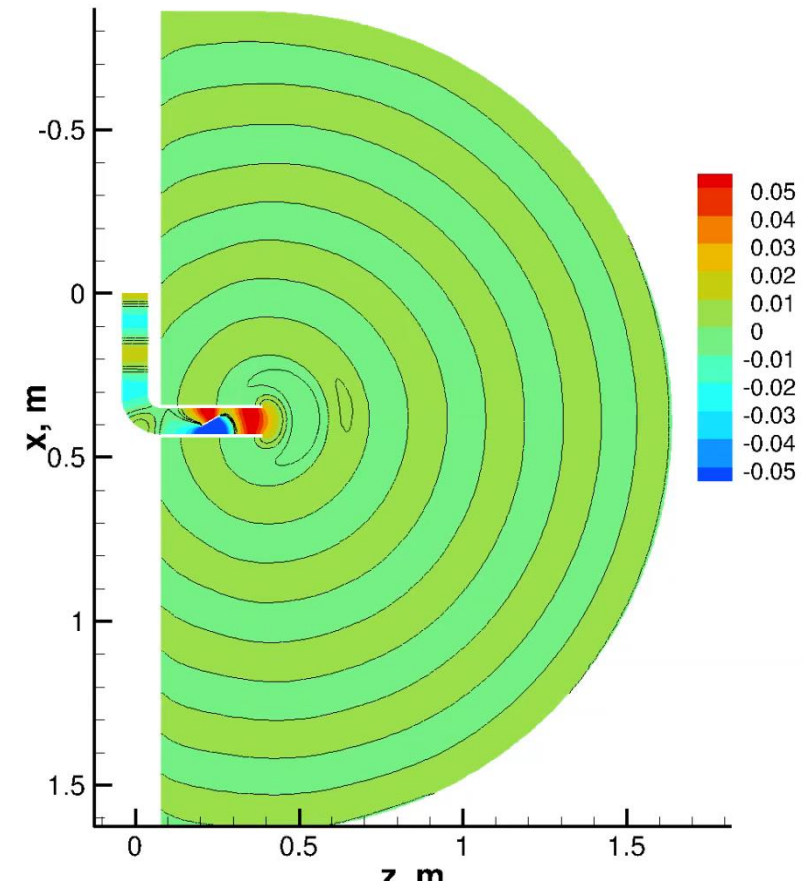
\* Окно Ханна, 7 окон длиной 0.1 с с перекрытием 50%,  
Спектры нормированы к экспериментальному разрешению (0.625Гц)

- Несколько микрофонов расположено непосредственно в струе
- Сетка в этой области недостаточно мелкая для качественного разрешения турбулентных структур
  - Сигнал давления в этих микрофонах ненадежен и, соответственно, не включен в осредненный спектр
- Полученный осредненный спектр шума близок к экспериментальному:
  - Низкочастотные моды не предсказаны в соответствии с упрощенной постановкой задачи
  - Хорошее согласие в полосе 100-1000Гц
  - Пик на 1500 Гц немного занижен (<5дБ)

# Поле звукового давления



Распространение звуковых волн частотной полосы  $1500 \pm 200$  Гц



- Пик на 1500Гц соответствует собственной частоте канала с заслонкой

## Заключение

- Гибридный подход расчета шума на основе волнового уравнения применен к задаче расчета шума, возникающего при обтекании заслонки, установленной в модель вентиляционного воздуховода квадратного сечения с поворотом  $90^\circ$
- Использованный вихреразрешающий подход SBES обеспечил согласование осредненной скорости и пульсаций давления на стенках канала с экспериментальными данными
  - Это позволяет сделать вывод о качественном разрешении источников шума
- Шум в среднем поле, предсказанный с помощью волнового уравнения, достаточно близок к экспериментальным данным



Спасибо за внимание!