



Оценка возможностей новых модификаций подхода DDES для расчета аэродинамики и аэроакустики струи



А.В. Горобец, **А.П. Дубень**
Сектор вычислительной аэродинамики и аэроакустики
ИПМ им. М. В. Келдыша РАН



Jesus Ruano, F. Xavier Trias
Heat and Mass Transfer Technological Center
Technical University of Catalonia

Введение (1/2)

- Вычислительная аэроакустика предъявляет особые требования к точности численного моделирования
 - если аэродинамика «недостаточно точна», то точность оценки шума в дальнем поле будет крайне низка
- Рассматриваются 2 вопроса, связанных с практическим использованием вихреразрешающих подходов
 - как численная дискретизация дифференциальных операторов (по большей части, конвекция) влияет на качество результатов
 - насколько «адекватно» работает подсеточная модель
- Востребованы схемы повышенной точности
 - схемы высокого порядка (либо не обобщаются на неструкт., либо дорогие)
 - низкодиссипативные схемы 2го порядка (требуют оочень хороших подробных сеток)
 - схемы второго порядка, но повышенной точности, с расширенными шаблонами

Введение (2/2)

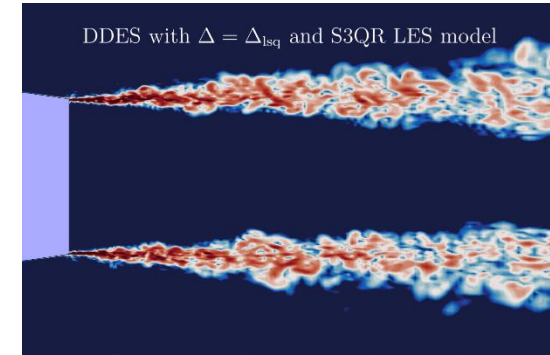
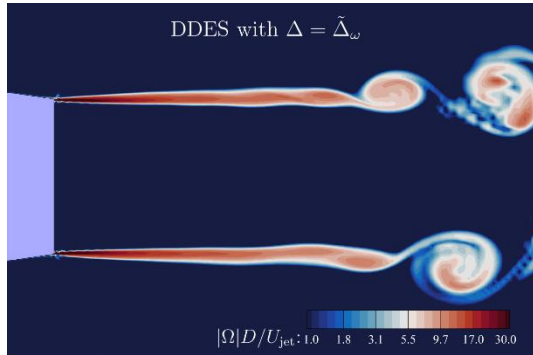
- Важная часть вычислительного алгоритма – подход к моделированию турбулентности
 - гибридные RANS-LES методы – оптимальный выбор с точки зрения баланса точности и вычислительной стоимости (незональные методы семейства DES – наиболее распространены)
 - DES: проблема «серой зоны» (главным образом, задержка перехода от RANS к развитому LES в слоях смешения)
 - Общая методология решения проблемы серой зоны
 - специальный адаптивный подсеточный масштаб
 - альтернативные, чувствительные к квази-2D течению, LES модели
-
- **Цель работы** – исследование возможностей и ограничений современных модификаций подхода DES для предсказания шума в дальнем поле
 - **Объект исследования** – затопленная дозвуковая ($M_{\text{jet}} = 0.9$) ненагретая круглая турбулентная струя ($Re_D = 1.1 \cdot 10^6$)
 - шум струи очень чувствителен к точности моделирования эволюции слоев смешения
 - на результаты существенно влияют как свойства численных схем, так и особенности работы подсеточной модели

Методы решения проблемы серой зоны

Уменьшение подсеточной вязкости в переходных (RANS-to-LES) зонах:

$$\nu_{sgs} = (C_{sgs}\Delta)^2 D_{sgs}$$

- уменьшение подсеточного масштаба (SLS), Δ (в оригинальной формулировке: $\Delta = \Delta_{max}$)
- использование другого дифференциального оператора D_{sgs} (в оригинальной формулировке: модель Смагоринского)



SLS и D_{sgs} , предложенные в последнее время для (*)DES:

- Δ_ω [Chauvet et al., 2007]: чувствительность к локальным характеристикам потока
- Δ_ω для неструктурированных сеток [Deck, 2012]
- [Mockett et al., 2015]:
 - $\tilde{\Delta}_\omega = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{n,m=1,\dots,8} |l_n - l_m|$
 - альтернативный дифференциальный оператор других LES моделей (WALE, σ)
- [Shur et al., 2015]: $\Delta_{SLA} = \tilde{\Delta}_\omega F_{KH}(\langle VTM \rangle)$ (VTM – vortex tilting measure)
- [Trias et al., 2017]: Δ_{lsq} (lsq – least mean square)
- [Trias et al., 2015]: новое семейство LES моделей, S3PQR

Адаптивные подсеточные масштабы

$$\tilde{\Delta}_{\omega} = \frac{1}{\sqrt{3}} \max_{n,m=1,\dots,8} |l_n - l_m|$$

l – максимальный шаг сетки в проекции контрольного объёма на плоскость, определяемой вектором завихренности ω .

$$\Delta_{SLA} = \tilde{\Delta}_{\omega} F_{KH}(\langle VTM \rangle)$$

VTM – vortex tilting measure

$$VTM = \frac{|(S\omega) \times \omega|}{\omega^2 \sqrt{-Q_S}} \quad Q_A = 1/2(tr^2(A) - tr(A^2))$$

$$\Delta_{lsq} = \sqrt{\frac{JG^T G : JG^T G}{G^T G : G^T G}}, J = \begin{pmatrix} \mathcal{J}_{ii}^x & & \\ & \mathcal{J}_{ii}^y & \\ & & \mathcal{J}_{ii}^z \end{pmatrix}, \mathcal{J}_{ii}^l = \frac{1}{\sum_{j \neq i} \|G_{ij}^l\|}$$

J - якобиан перехода из физического в вычислительное пространство

G_{ij}^l – компоненты тензора градиентов скоростей, G , в направлении l

Семейство подходов S3PQR

$$D_{sgs}^{S3PQR}(\bar{u}) = P_{GG^T}^p Q_{GG^T}^{-(p+1)} R_{GG^T}^{(p+5/2)/3}$$

$$P_A = tr(A)$$

$$Q_A = 1/2(tr^2(A) - tr(A^2))$$

$$R_A = det(A)$$

$$A=GG^T \quad G \equiv \nabla \bar{u}$$

Альтернативная LES модель в рамках DDES:
замена инварианта тензора градиентов
скоростей SA, $S_{SA}^* = \sqrt{\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$, на:

$$S_{sgs-DDES}^* = S_{SA}^* - f_d \text{pos}(l_{SA} - l_{LES})(S_{SA}^* - B_{sgs} D_{sgs})$$

$\text{pos}(a) = 0$ if $a \leq 0$ and $\text{pos}(a) = 1$ otherwise

$$B_{sgs} = |C_{sgs}^2 / C_{SMG}^2|$$

p задается равным 0 для деактивации модели в квази-2D течение

Рассматриваемые конфигурации:






Масштабы:

- $\tilde{\Delta}_\omega$
- Δ_{SLA}
- Δ_{lsq}

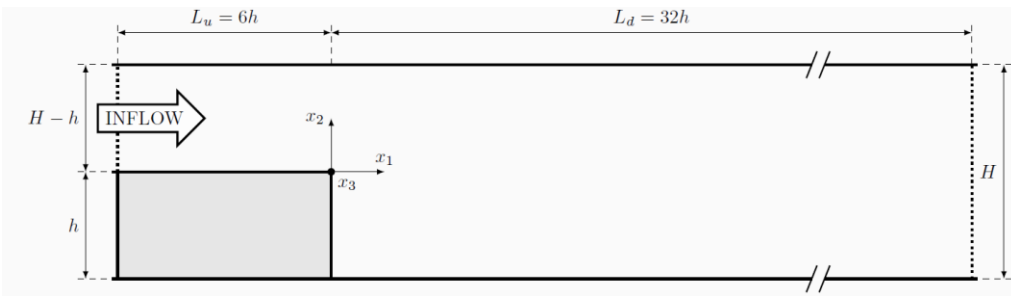
Подсеточные модели:

- Smagorinsky (SMG)
- σ model
- S3QR model

Комбинации:

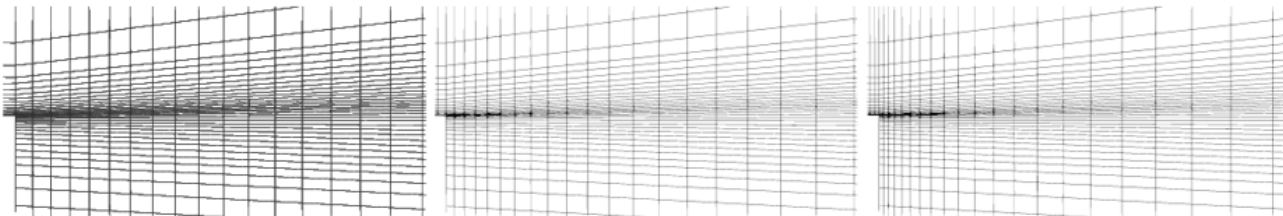
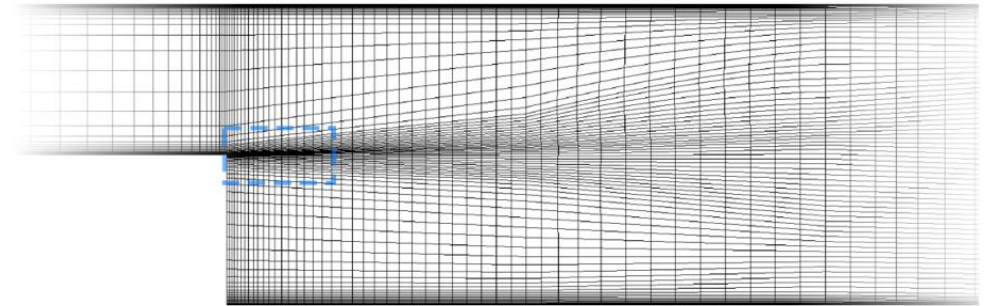
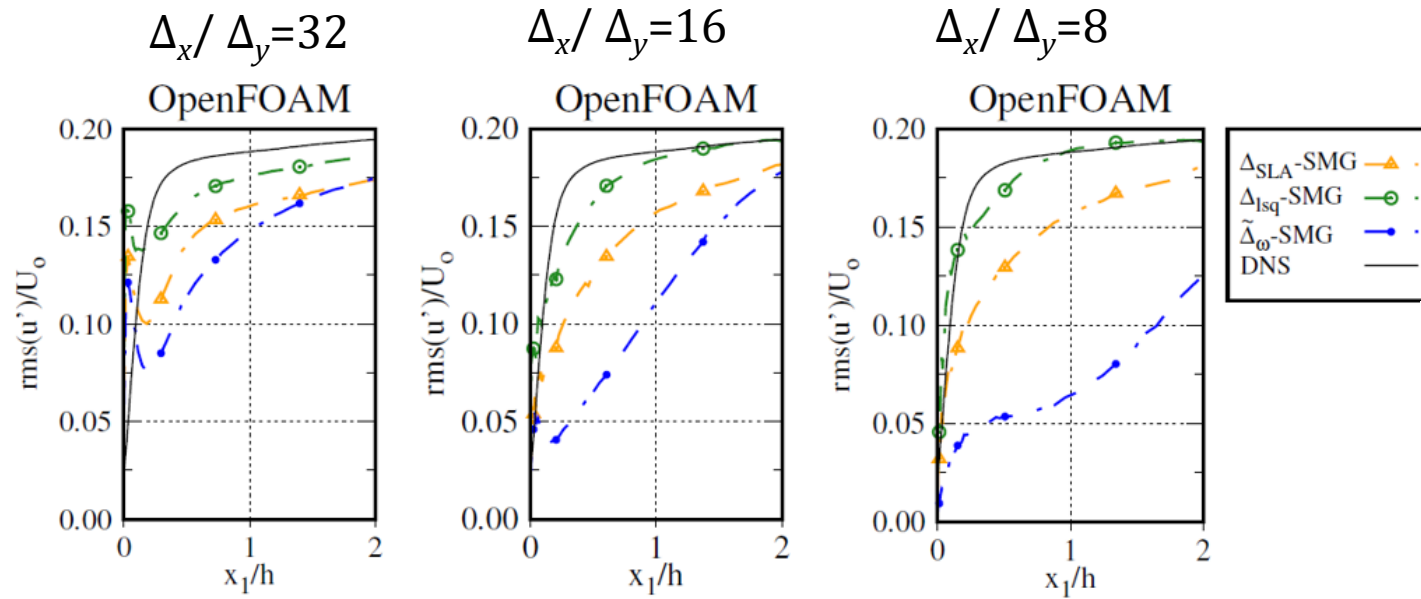
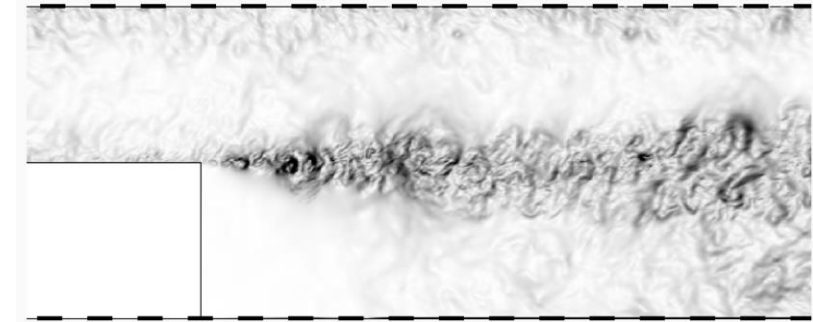
- $\Delta_{SLA} + \text{SMG}$ —  - -
- $\Delta_{lsq} + \text{SMG}$ —  - -
- $\tilde{\Delta}_\omega + \text{SMG}$ —  - -
- $\Delta_{lsq} + \text{S3QR}$ —  - -
- $\tilde{\Delta}_\omega + \sigma$ —  - -

Лирическое отступление: обратный уступ в канале



Подсеточные модели:

- Эталон: DNS
- $Re_\tau = 395$
- Сетка: $L_z = 2h, \Delta_z = h/30$



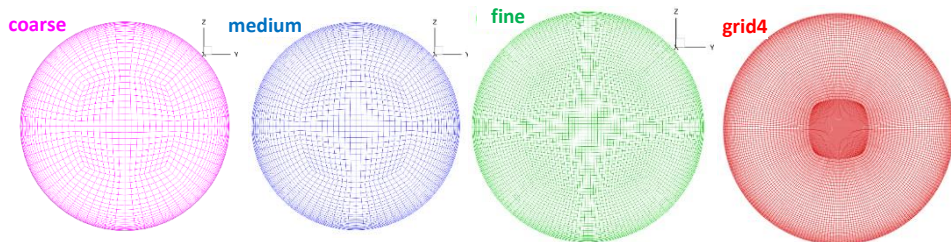
Струя: постановка задачи

- **Затопленная ненагретая дозвуковая круглая струя** ($Re_D=1.1 \cdot 10^6$, $M_{jet}=0.9$)
 - вычислительная постановка (сетка и профили на срезе сопла, посчитанные с помощью RANS) предоставлена М.Л. Шуром и М.Х. Стрельцом

Данные:

- Турбулентность: [Lau, 1981], [Arakeri et al., 2003], [Simonich et al., 2001]
- Акустика в дальнем поле: [Viswanathan, 2004]
- **Сетки (структурированные): 1.52M (coarse), 4.13 (medium), 8.87 (fine), grid4 (23.7 млн.)**

$N_\theta=64, 80, 160, 240$

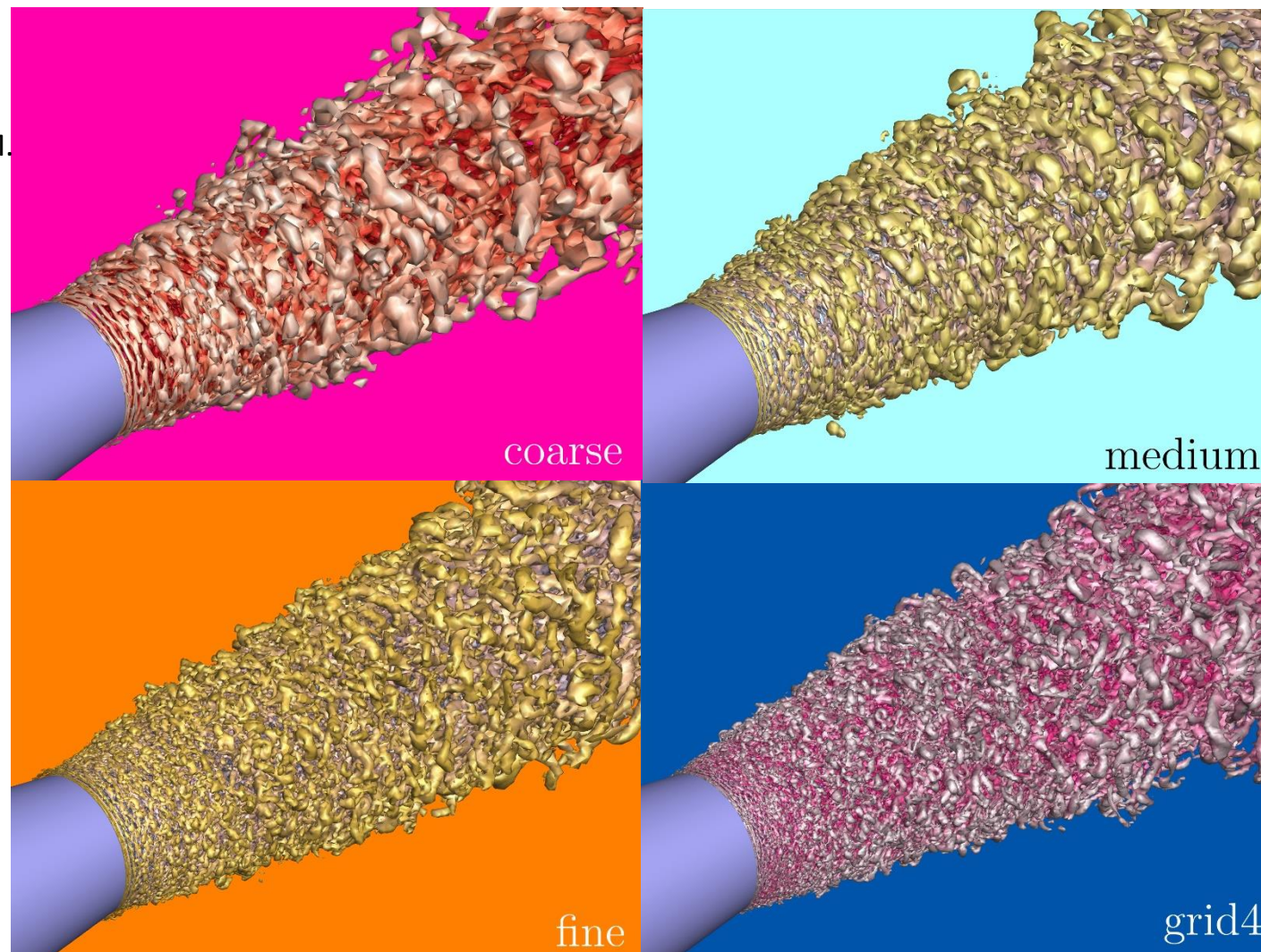


- **Двухстадийный подход**

- RANS: сопло+струя
- LES: RANS профили на выходе из сопла



Disclaimer



Мгновенные картины течений на различных сетках, расчеты с помощью DDES+ Δ_{SLA}

Вычислительные алгоритмы

NOISEtte

OpenFOAM

Конечно-объемный
подход

- конечно-объемный, вершинно-центрированный

- конечно-объемный, объемно-центрированный

Конвективные
потoki

Гибридная CD-Urw численная схема для конвективных потоков

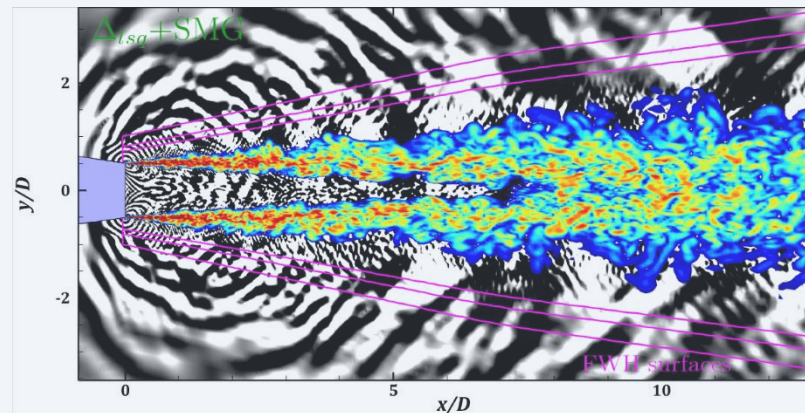
- статическое распределение σ_{\min} и σ_{\max} вдоль оси струи
 - динамическое переключение
- EBR схемы повышенной точности
 - 5-й порядок Urw.
 - 4-й порядок CD
- схема второго порядка:
 - 2-й порядок Urw.
 - 2-й порядок CD

Интегрирование
по времени

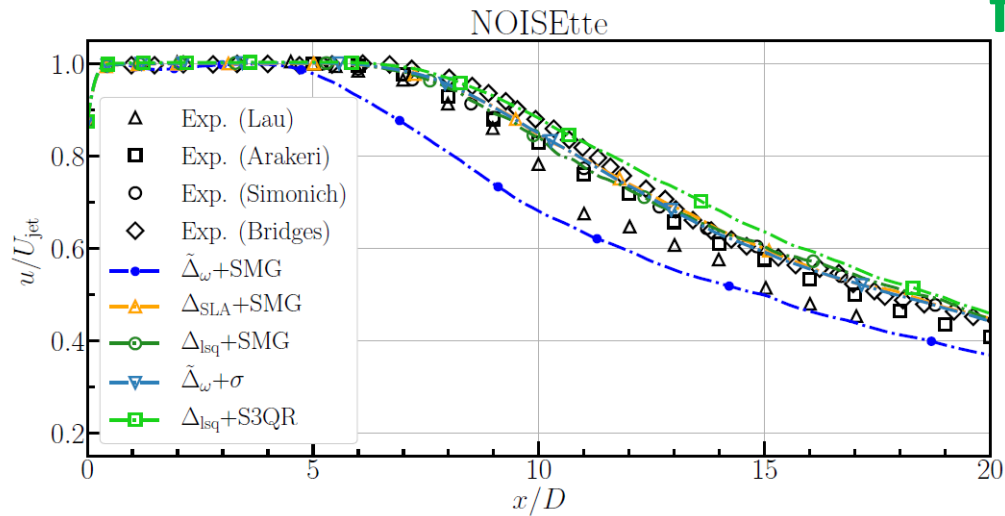
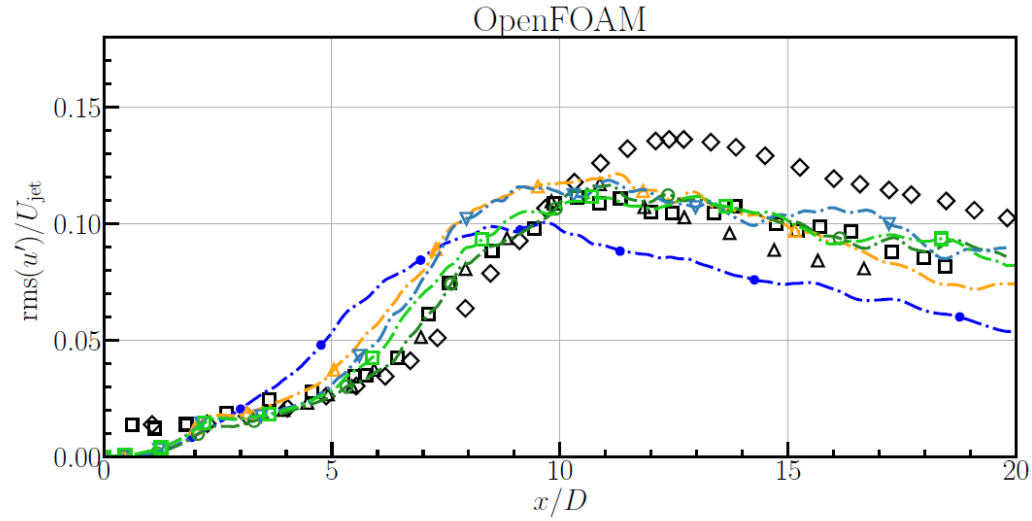
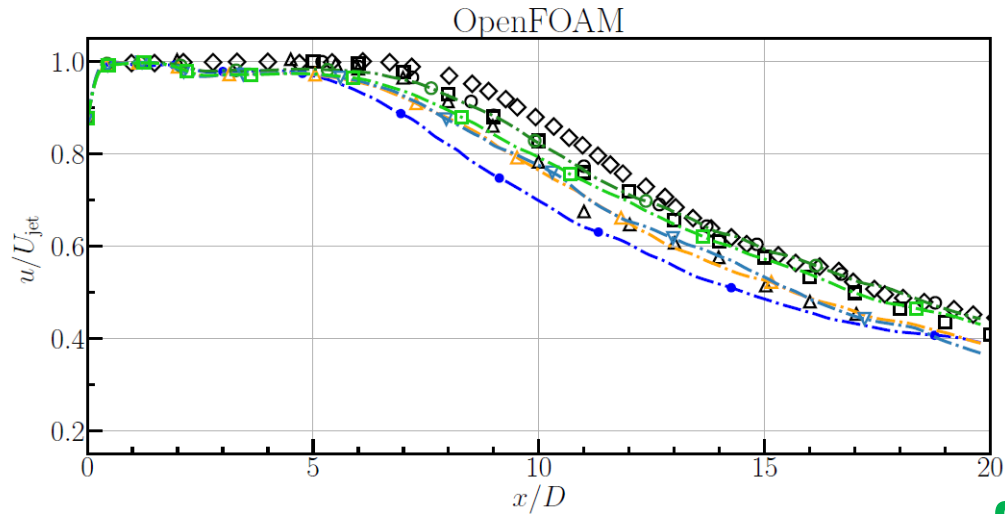
- Рунге-Кутты 4 порядка
- неявная схема 2-го порядка

Дальнее поле

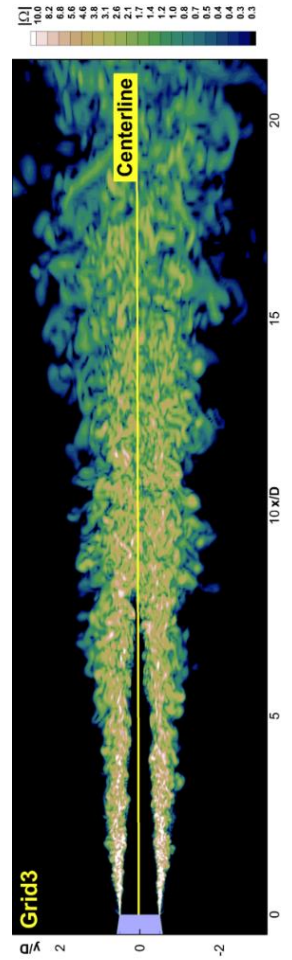
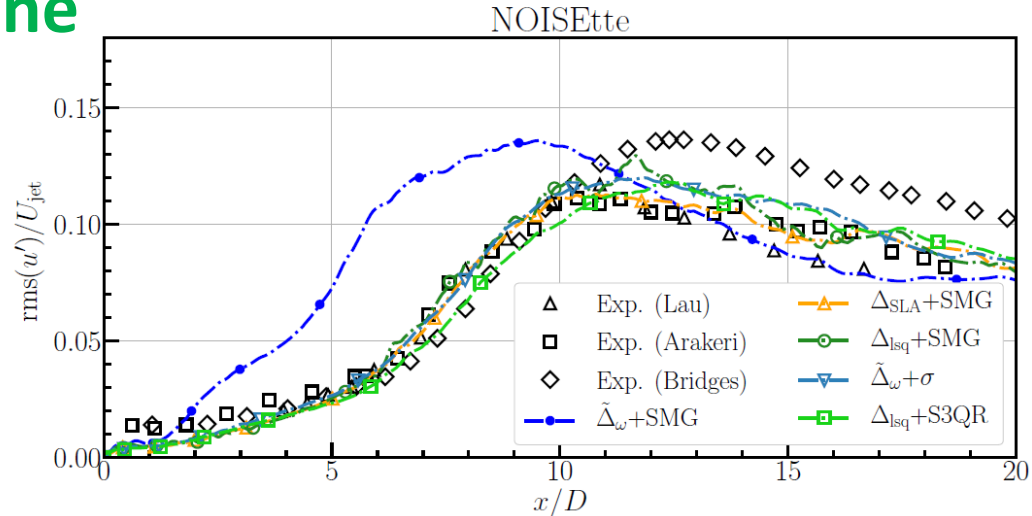
- FWH время с задержкой
- FWH с фазовым сдвигом



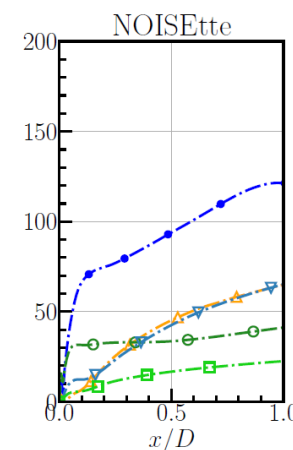
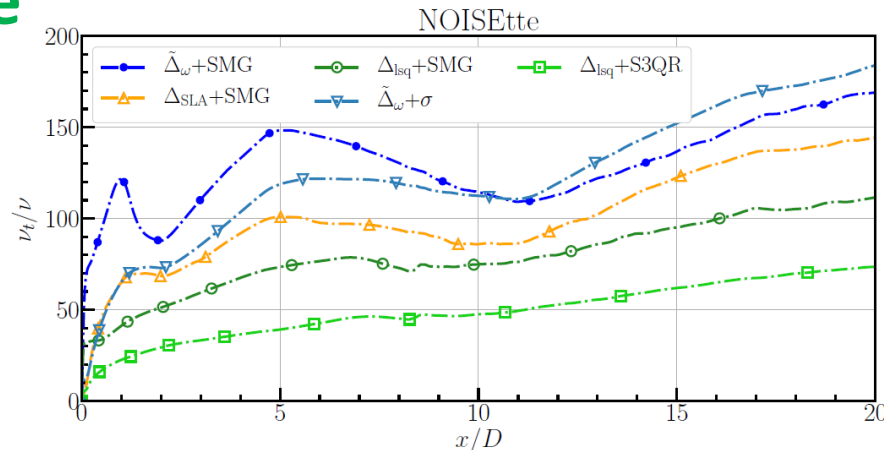
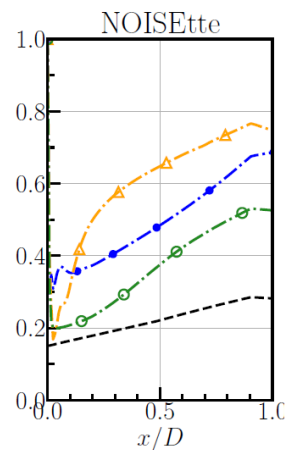
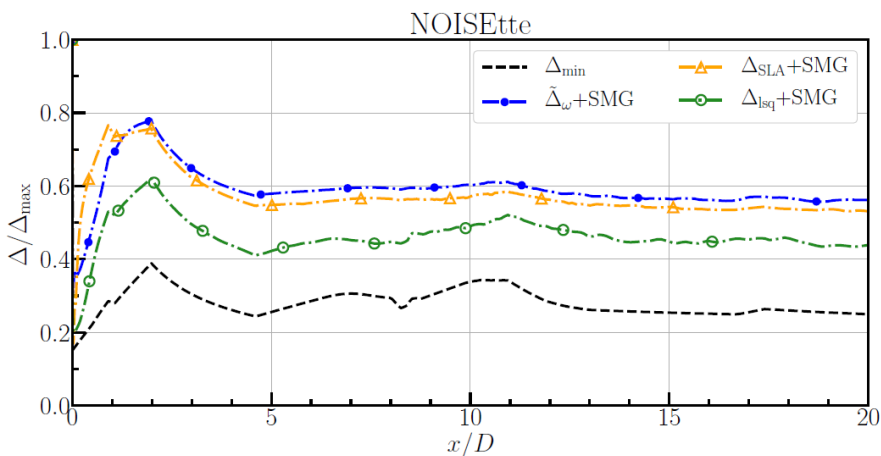
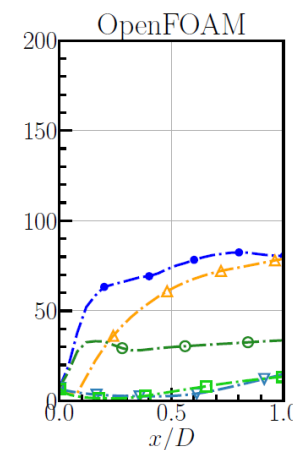
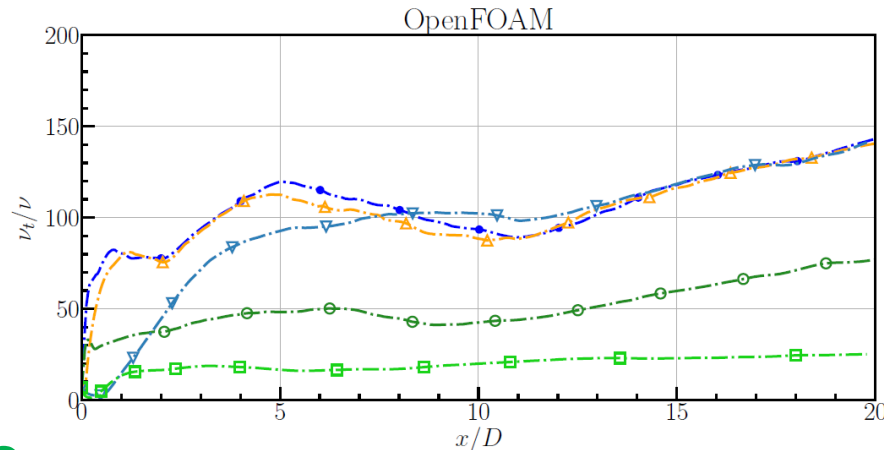
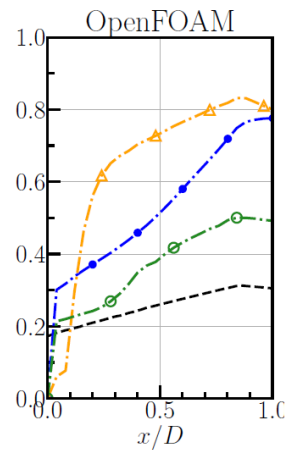
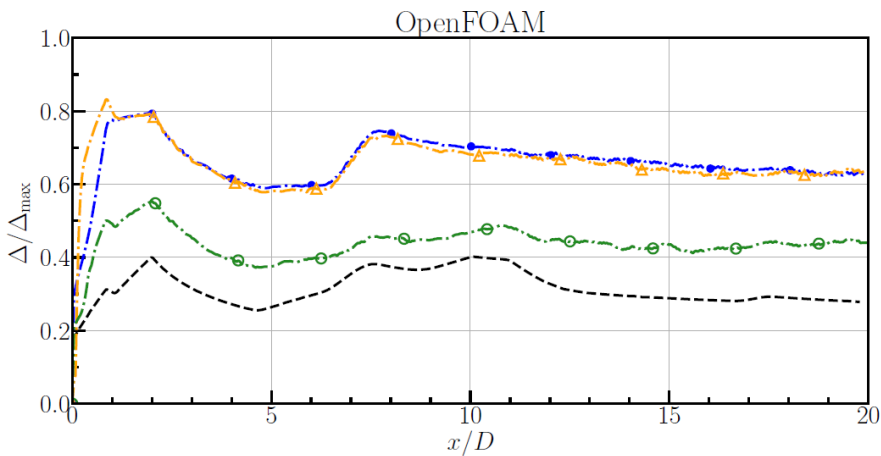
Ближнее поле: результаты на сетке fine (1/3)



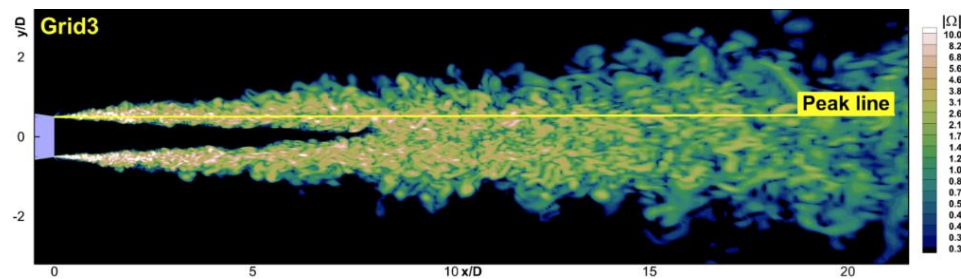
fine



Ближнее поле: результаты на сетке fine (2/3)

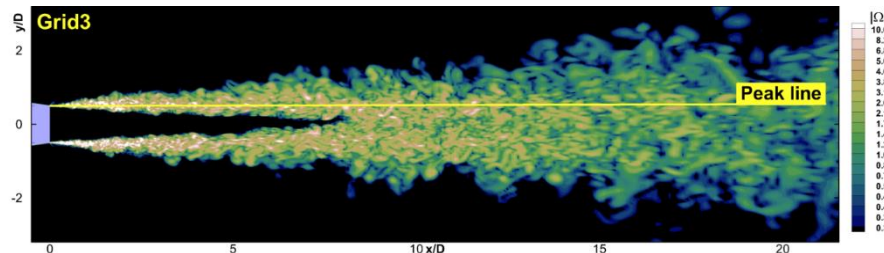
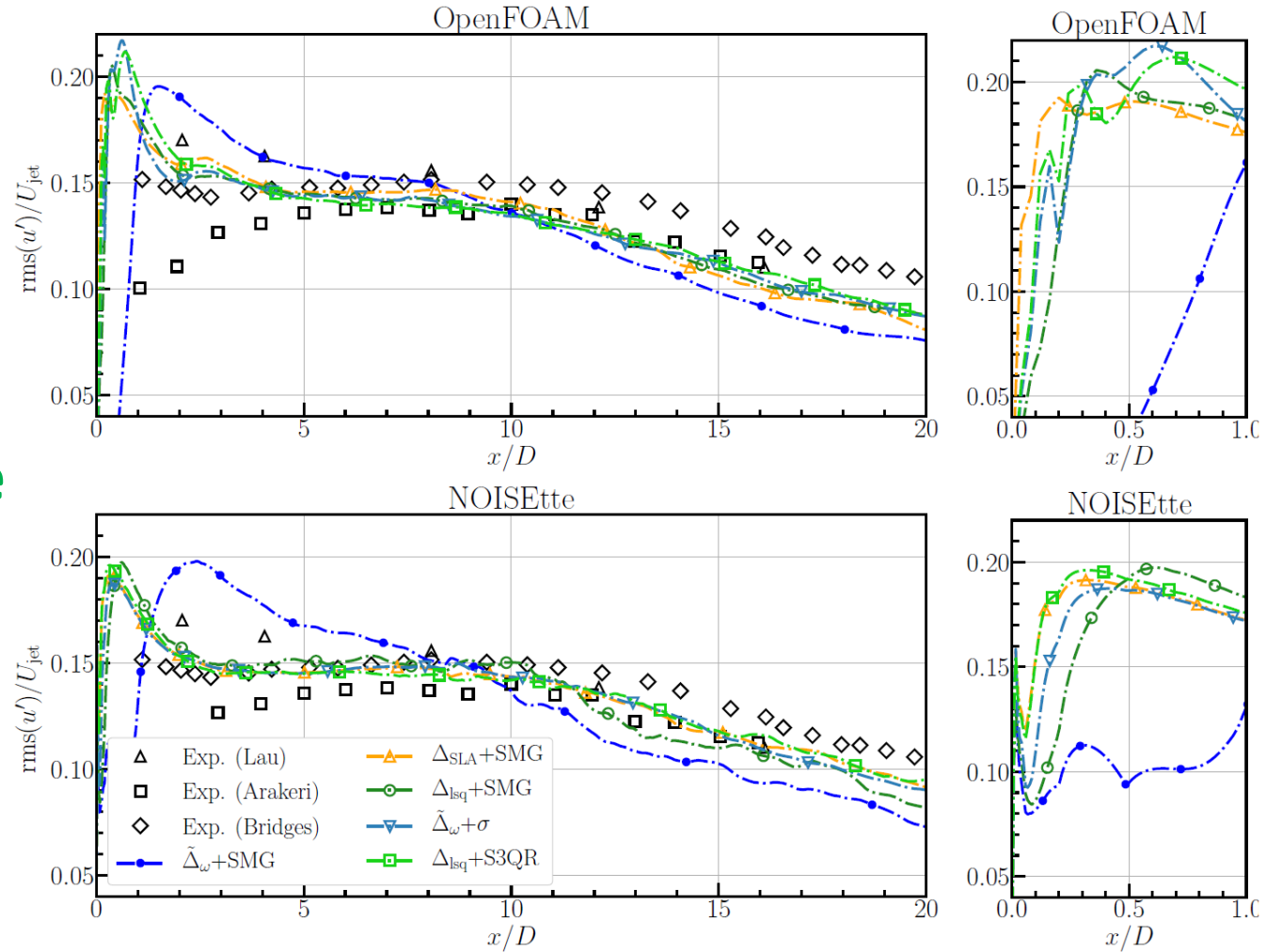


fine



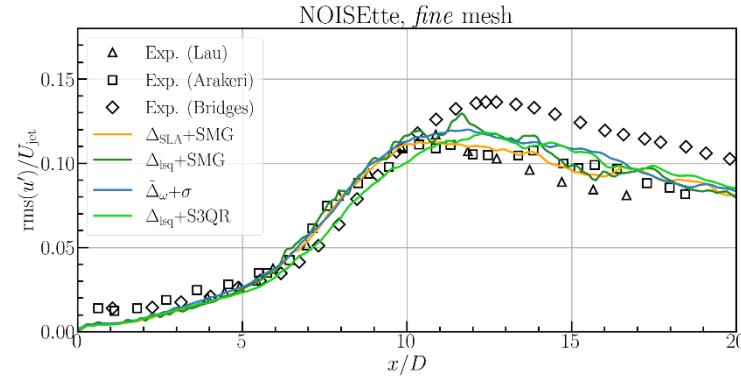
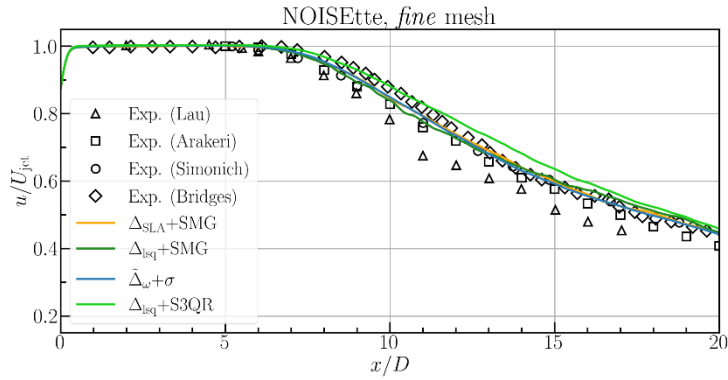
Ближнее поле: результаты на сетке fine (3/3)

fine

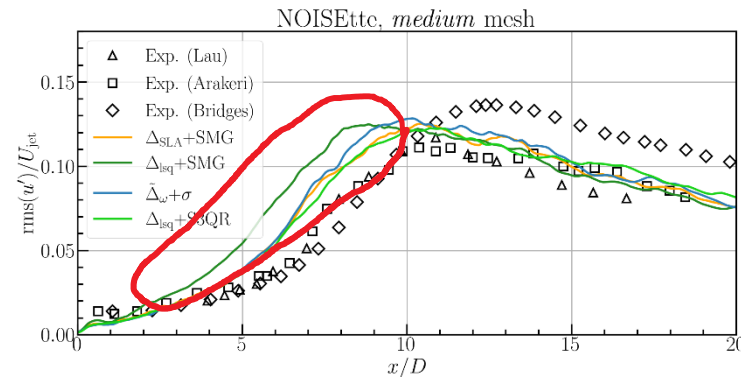
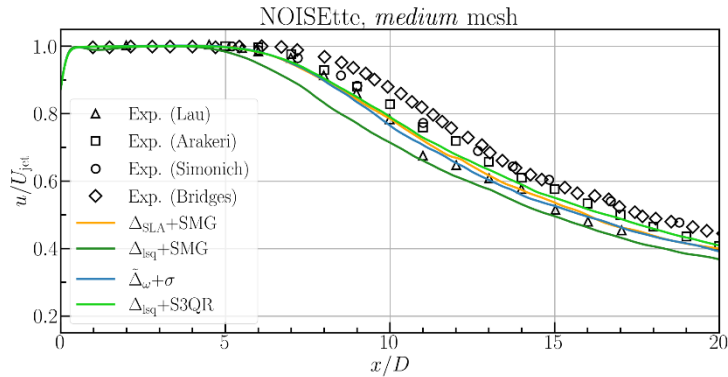


Ближнее поле: результаты на разных сетках (1/2)

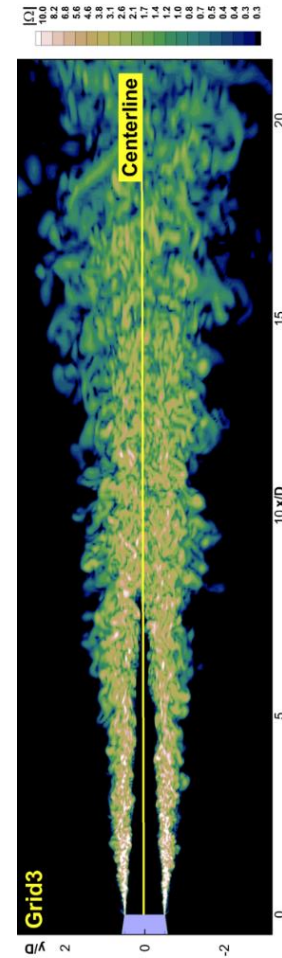
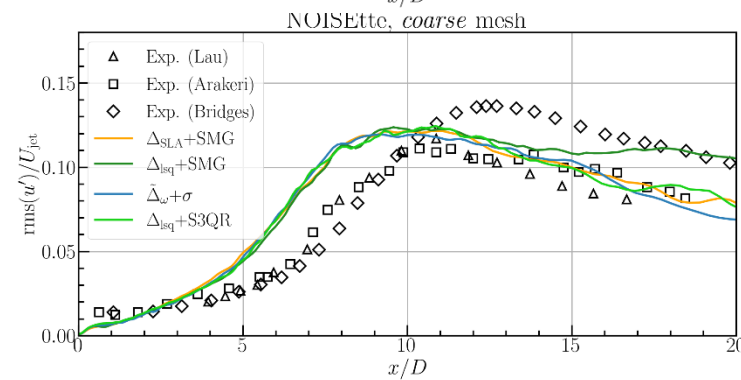
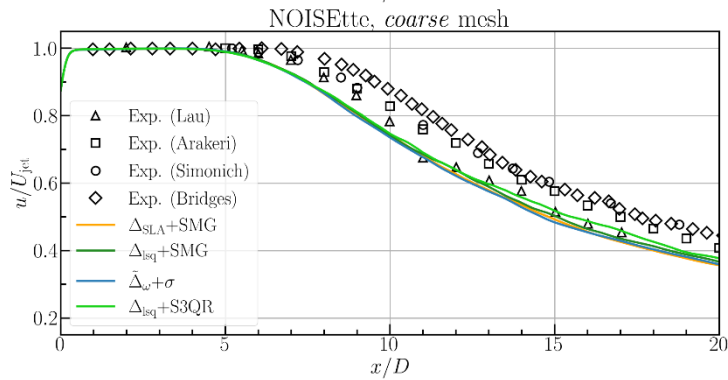
fine



medium

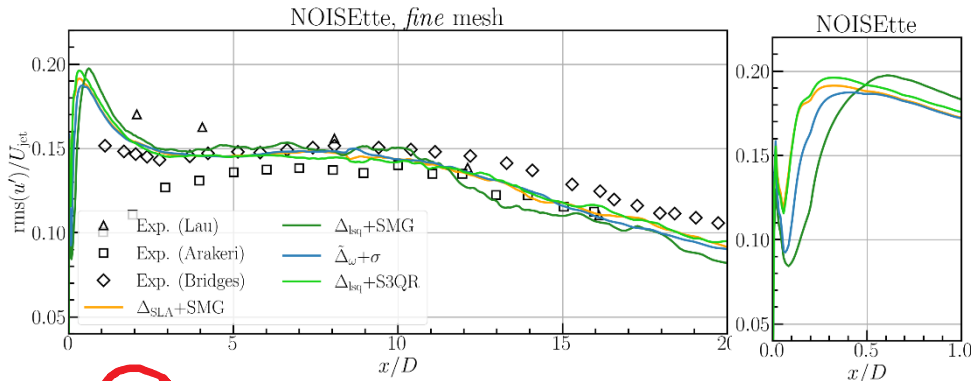


coarse

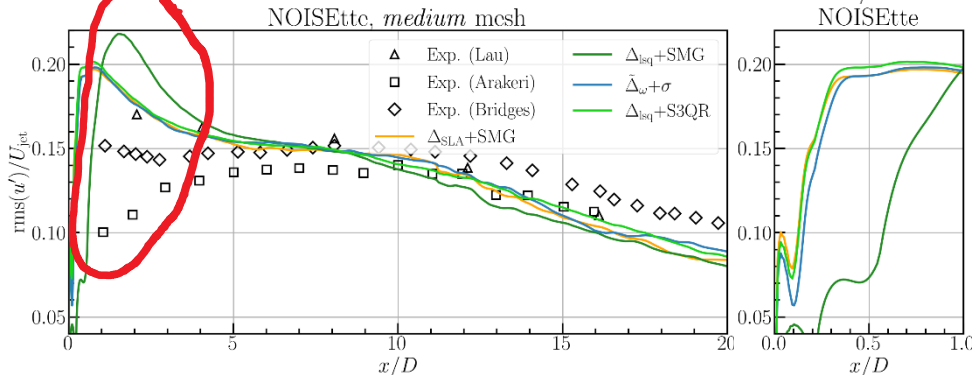


Ближнее поле: результаты на разных сетках (2/2)

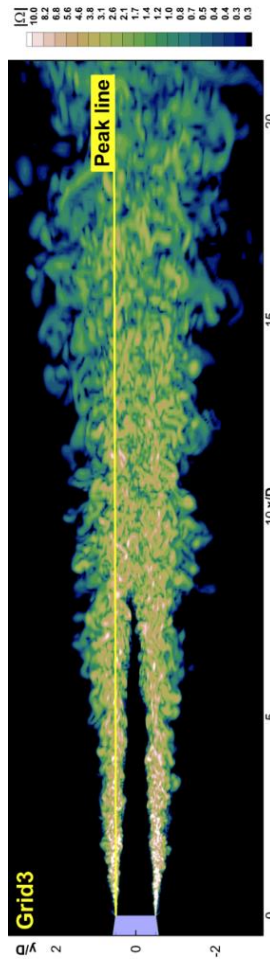
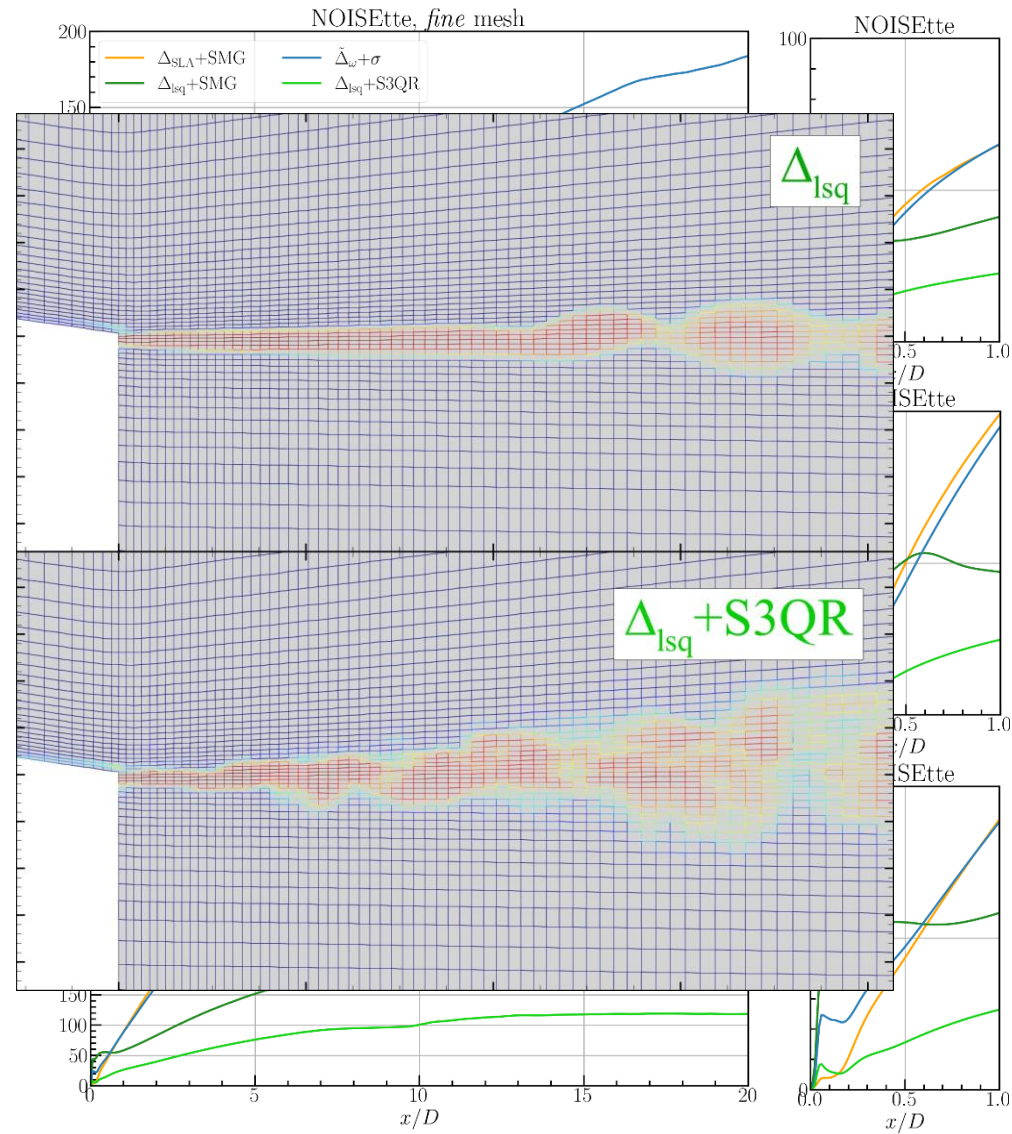
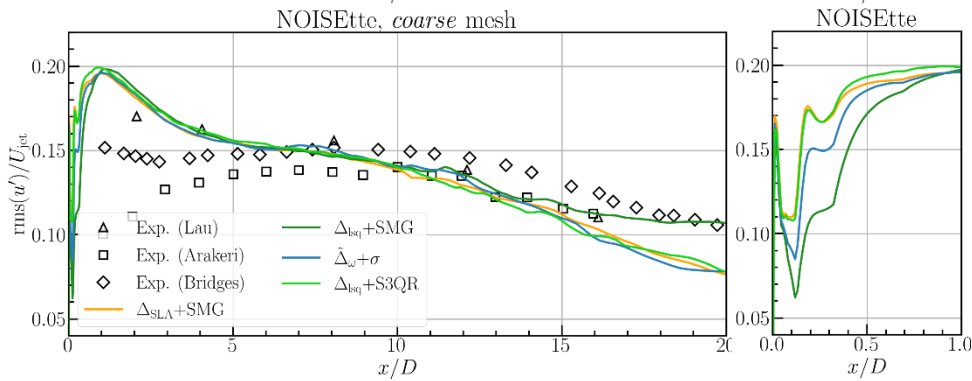
fine



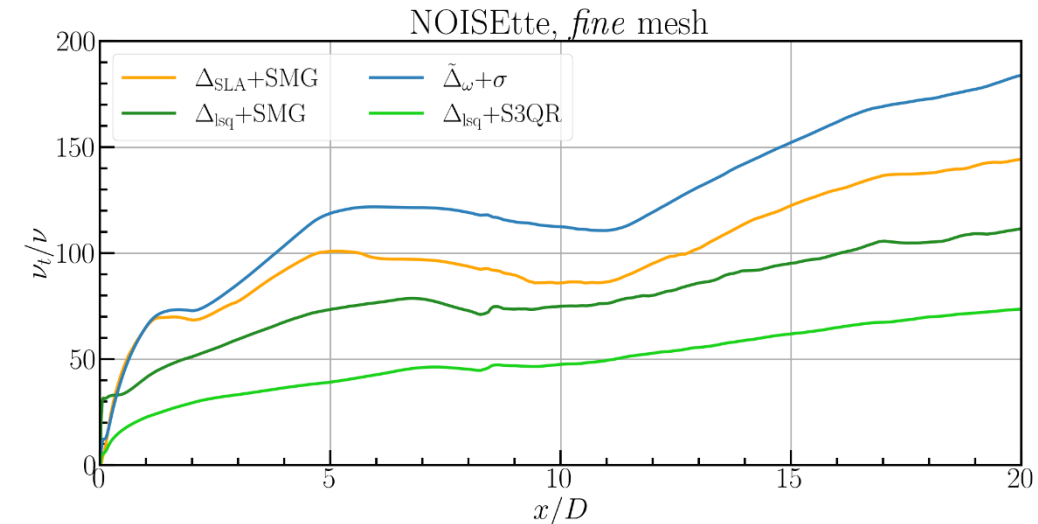
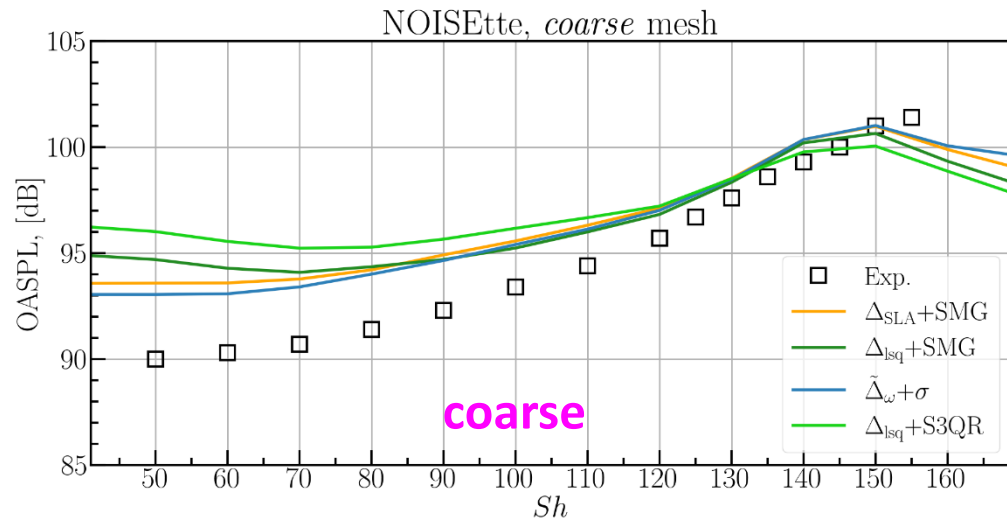
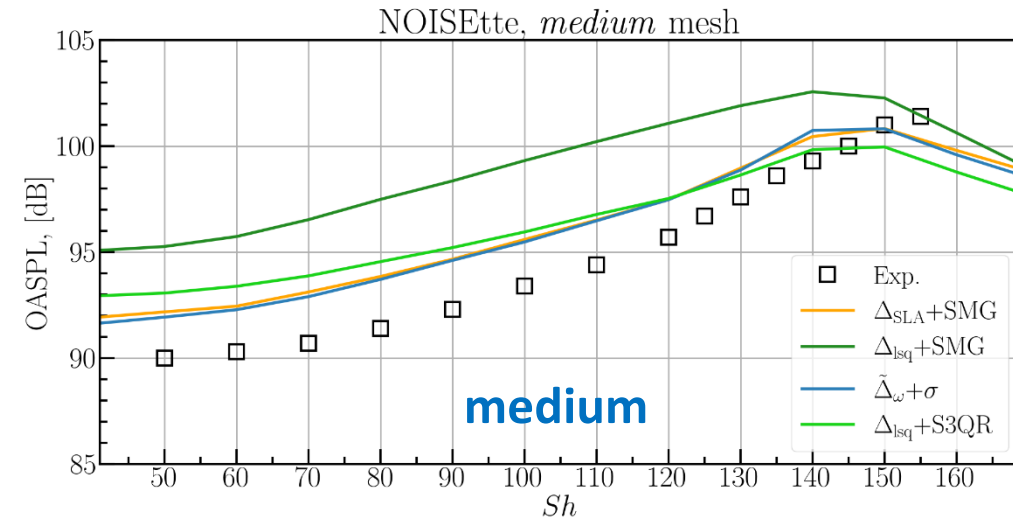
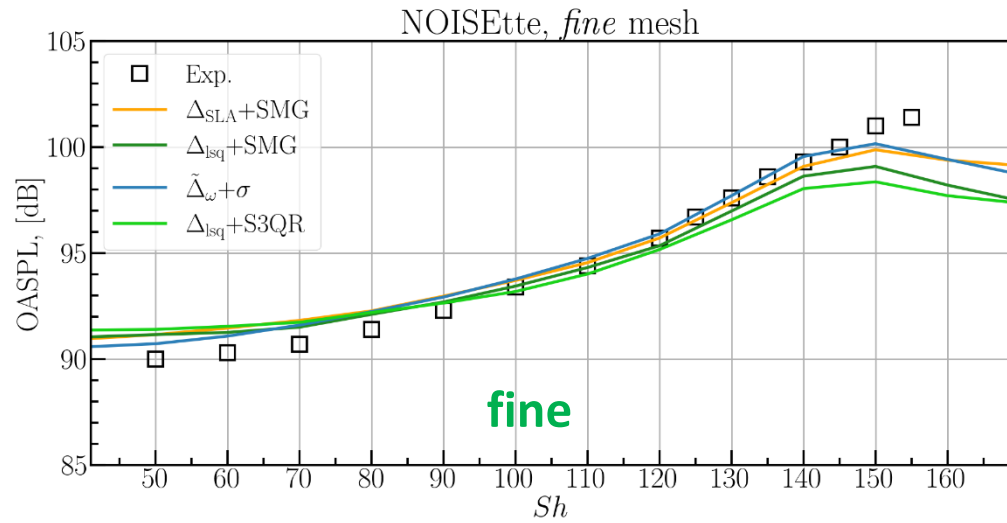
medium



coarse

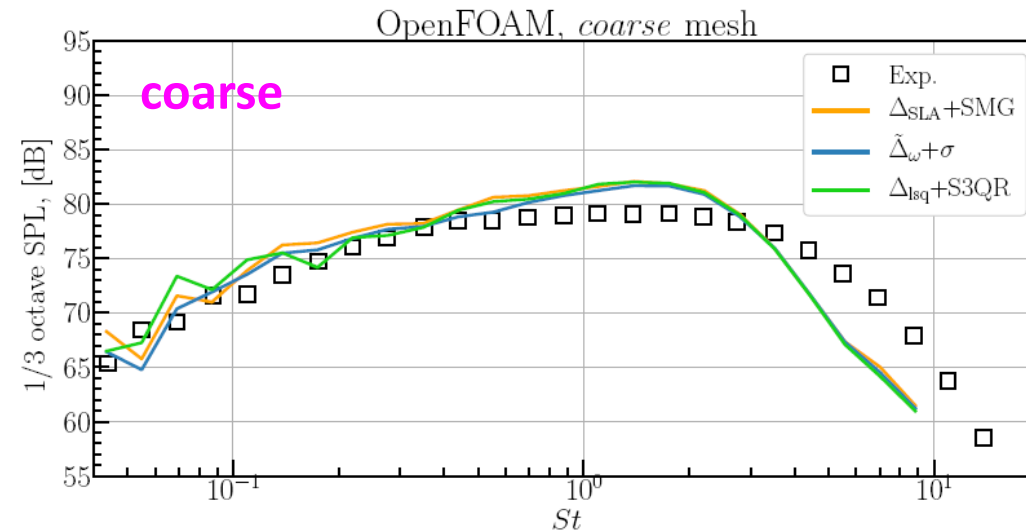
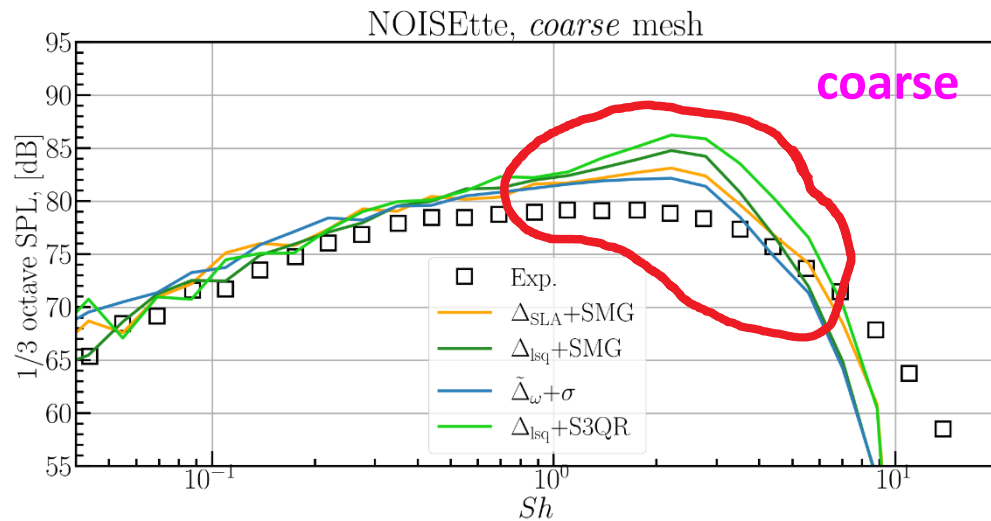
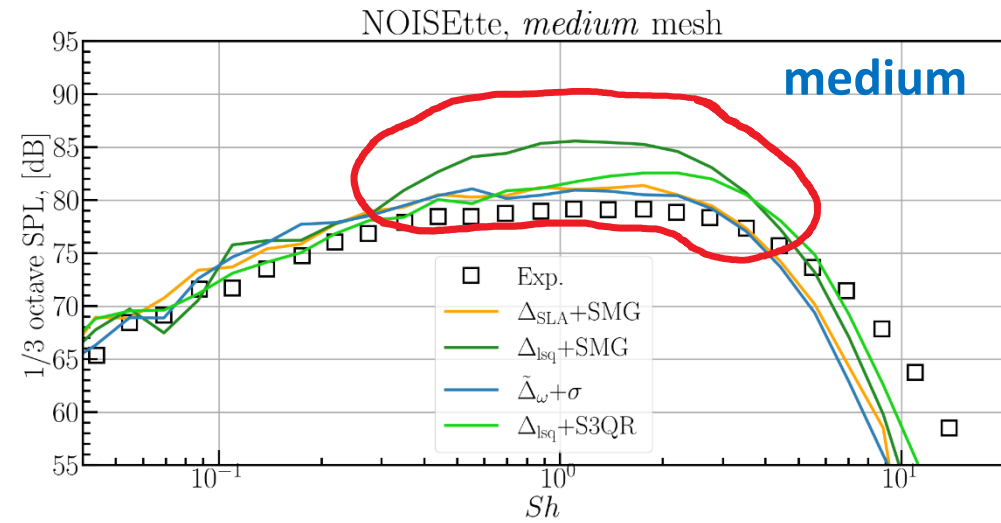
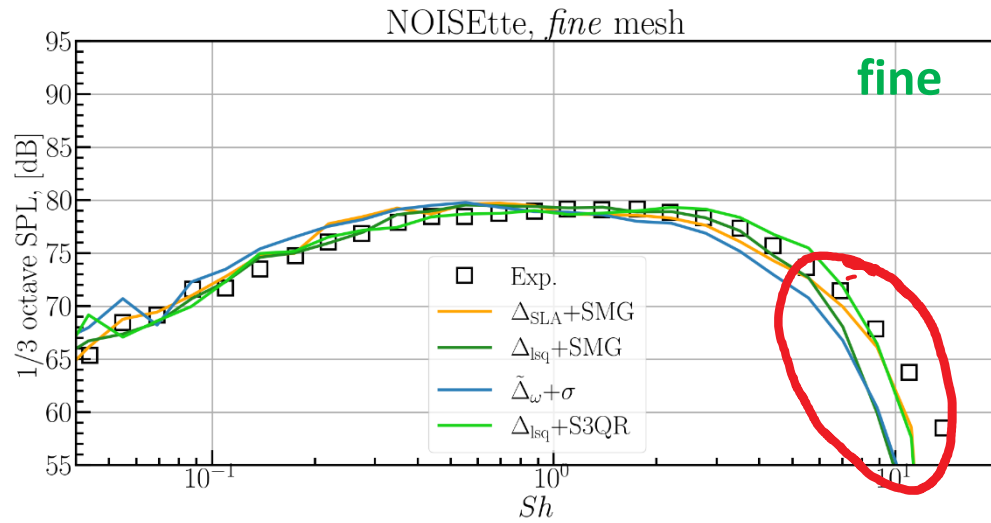


Дальнее поле: OASPL

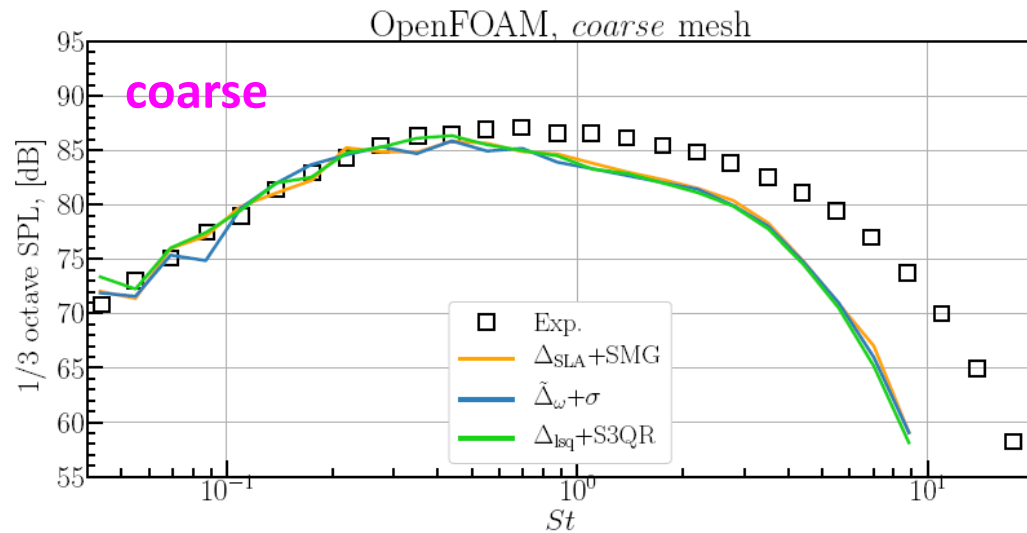
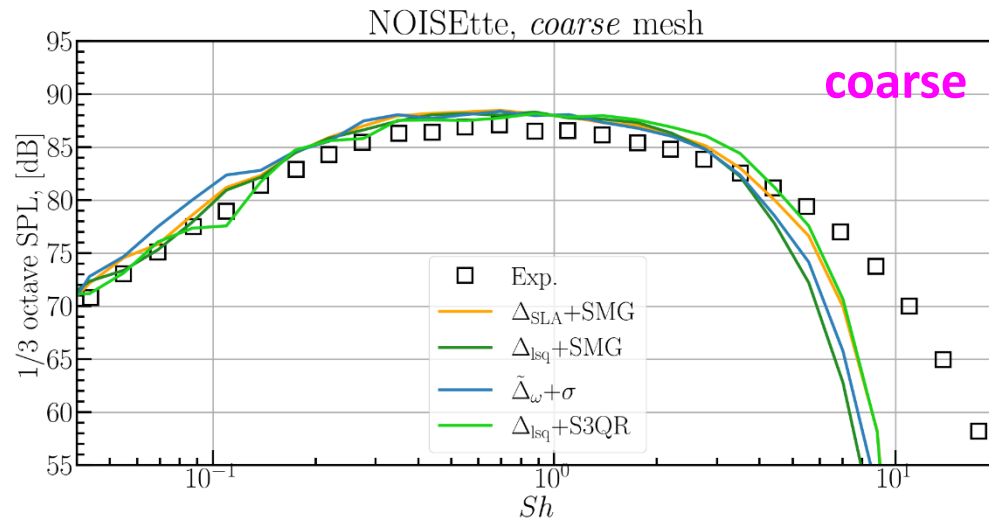
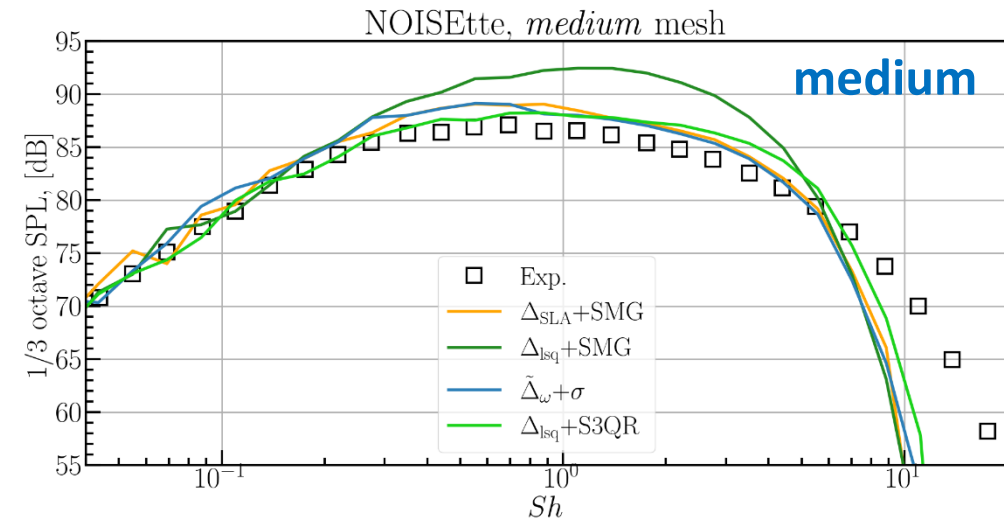
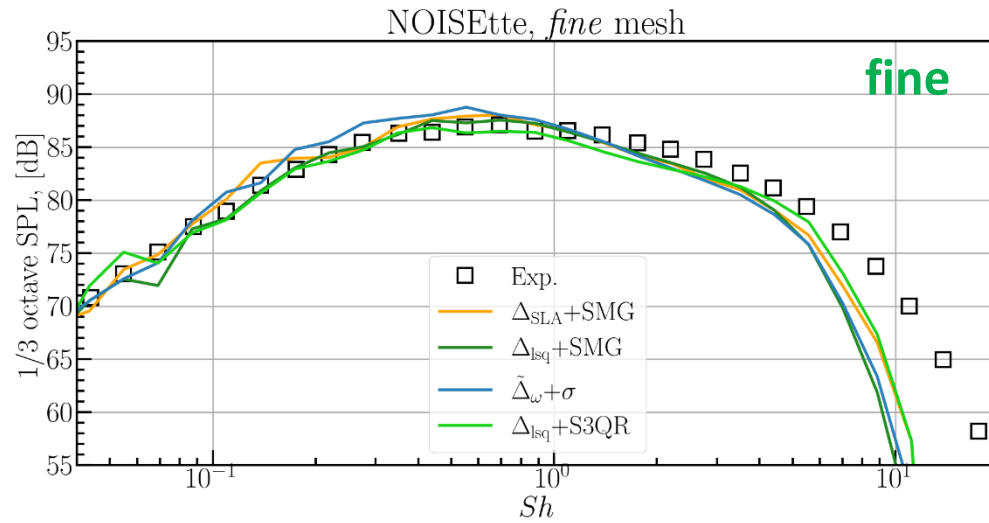


- Недостаток турбулентной вязкости
 - завышает шум при малых θ (ложный шум начального участка слоя смешения, большие Sh)
 - занижает при больших θ (недостаточно мощные крупные вихри)

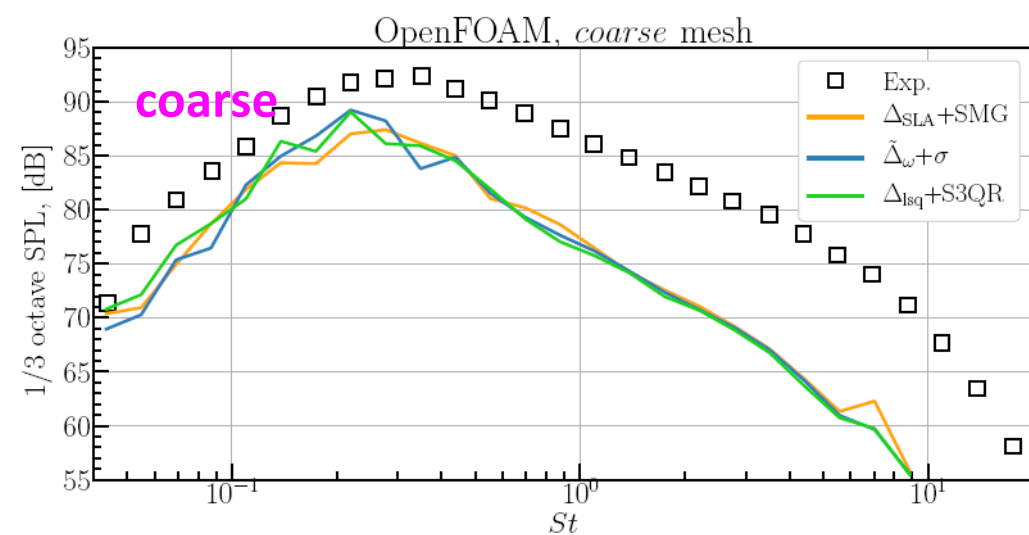
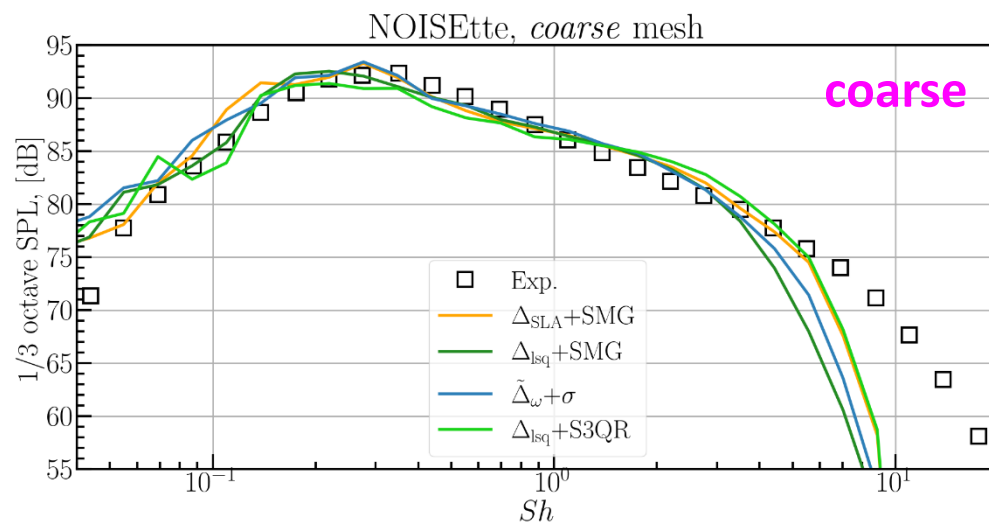
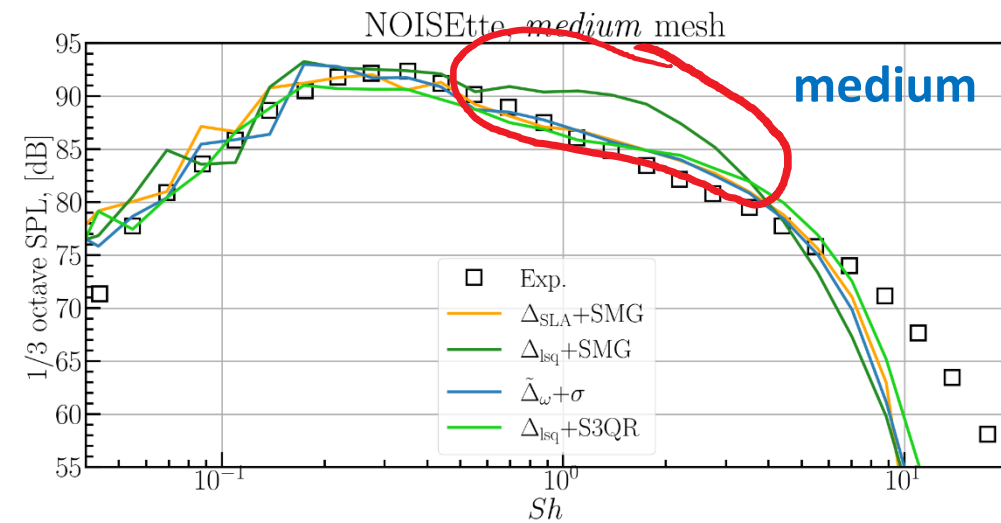
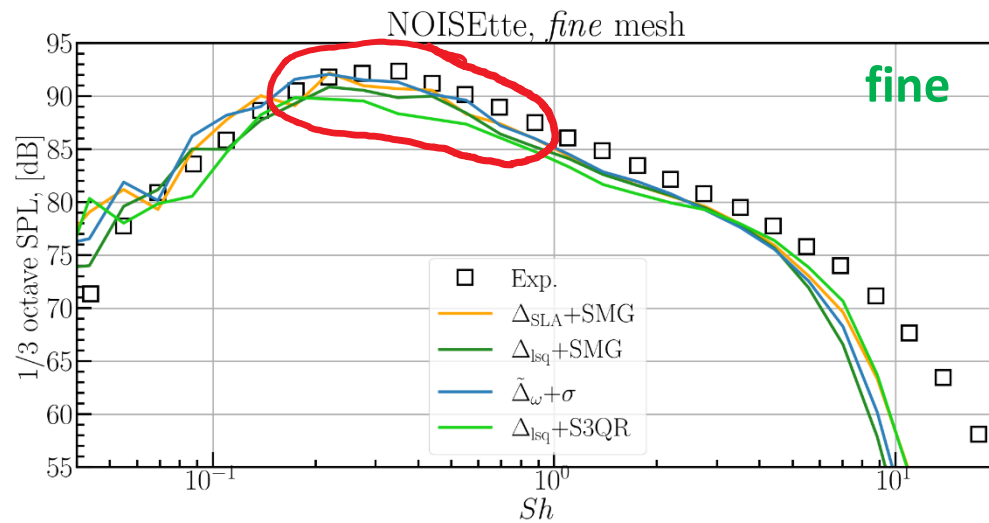
Дальнее поле: спектры для $\theta = 60^\circ$



Дальнее поле: спектры для $\theta = 130^\circ$



Дальнее поле: спектры для $\theta = 150^\circ$



- OpenFOAM **coarse**: слишком грубая сетка и диссипативная схема
 - нивелируются эффекты подсеточных моделей
 - вихри недоразрешены - не генерируют шум

Заключение

- Аэроакустика струи очень чувствительна к подсеточной модели (в отличие от аэродинамики)
- Наиболее оптимальный масштаб - Δ_{SLA}
 - очень мал в самом начальном участке слоя смешения
 - «достаточный» уровень вязкости в развитом турбулентном потоке, вихри не теряют энергию
- Δ_{lsq} недостаточно мал в начальном участке
- S3QR занижает вязкость, «оставляет без поддержки» крупные вихри

- **Планы на ближайшее будущее:**
 - OpenFOAM на medium и fine сетках
 - расчеты на grid4
 - модификация DDES с подсеточной S3QR моделью для увеличения вязкости в области развитого течения