

О моделировании турбулентных струй на неструктурированных сетках

А.П. Дубень, Т.К. Козубская

Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша

МОТИВАЦИЯ

Вычислительный эксперимент в аэроакустике может претендовать на востребованность в инженерных разработках для произвольно сложных геометрических конфигураций, если он будет обеспечивать **требуемую точность воспроизведения нестационарных турбулентных течений и генерируемый ими шум за приемлемое время расчета**

Цель

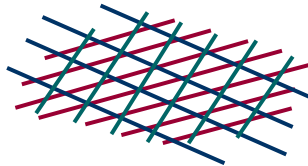
разработать удовлетворяющий этим условиям численный алгоритм, **работающий на неструктурированных сетках («неструктурированный» алгоритм)**

Струи

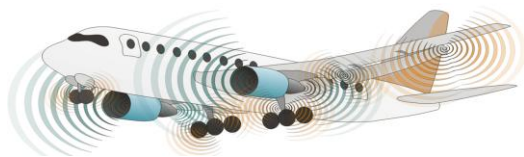
рассматриваем как один из базовых элементов сложного турбулентного течения, особенно чувствительных к качеству численного моделирования

НЕСТРУКТУРИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ НА СТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ

Составляющие нашего «неструктурированного» алгоритма

- **Последняя модификация DDES метода** [Shur et. al, 2015]
 - **Вершинно-центрированная EBR схема**
повышенной точности и пониженной стоимости
 - не выше второго порядка точности на произвольных неструктурированных стеках в рамках конечно-объёмного подхода
 - 5-6 порядок точности на сетках типа равномерных решеток (трансляционно-инвариантные сетки) в рамках конечно-разностного подхода
- Повышенная точность EBR схемы обеспечивается за счёт квазиодномерной реконструкции потоковых переменных на расширенном рёберно-ориентированном шаблоне
- 
- **WENO-EBR схема** для задач с разрывами
 - **Адаптивная гибридная схема** для минимизации схемной диссипации
 - **Интегрирование по времени**
 - явная схема Рунге-Кутты 4-го порядка;
 - второго порядка неявная схема на основе линеаризации по Ньютону, алгебраический солвер – метод бисопряженных градиентов (BCGStab)

Код **NOISEtte**



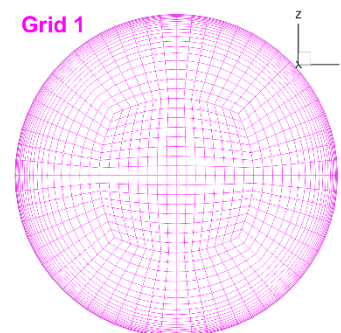
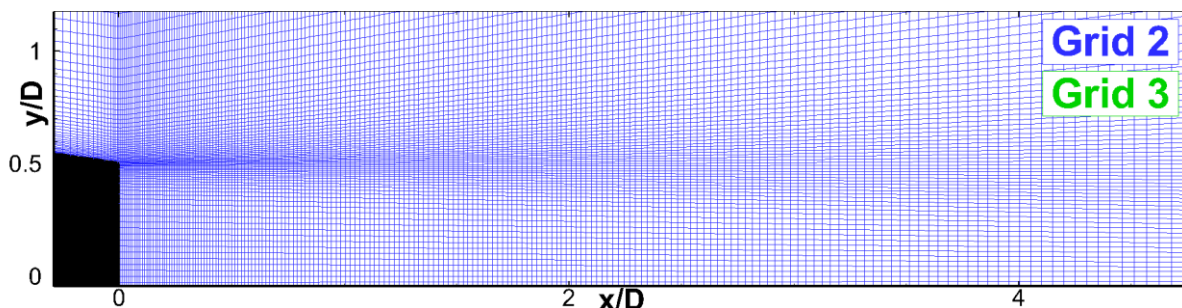
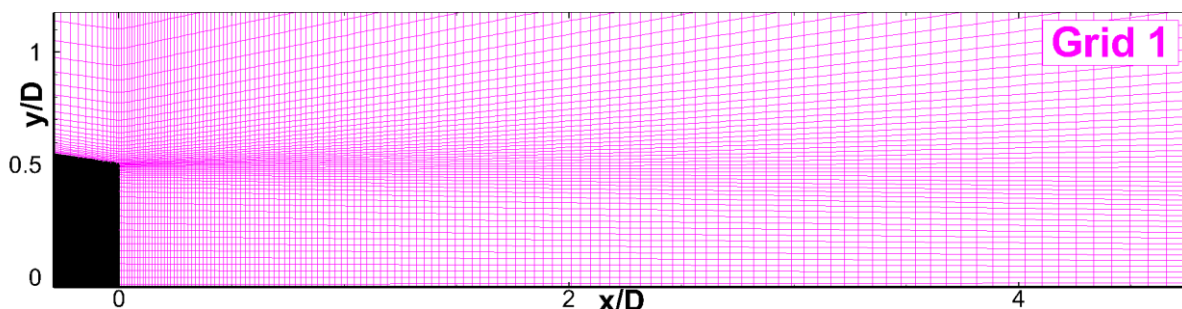
Вычислительная постановка 1

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

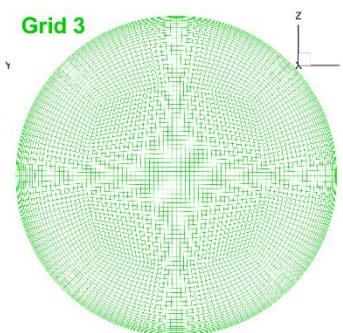
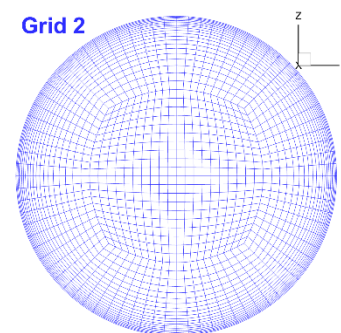
Данные для сравнения

- Турбулентность: [Lau, 1981], [Arakeri et al., 2003], [Simonich et al., 2001]
 - Акустика: [Viswanathan, 2004]
 - Сетки: **1.52M (Grid 1)**, **4.13 (Grid 2)**, **8.87 (Grid 3)**
 - Акустика дальнего поля: FWH метод
- Расчёты:
280-700 CPU ядер

Сечение $z/D=0$



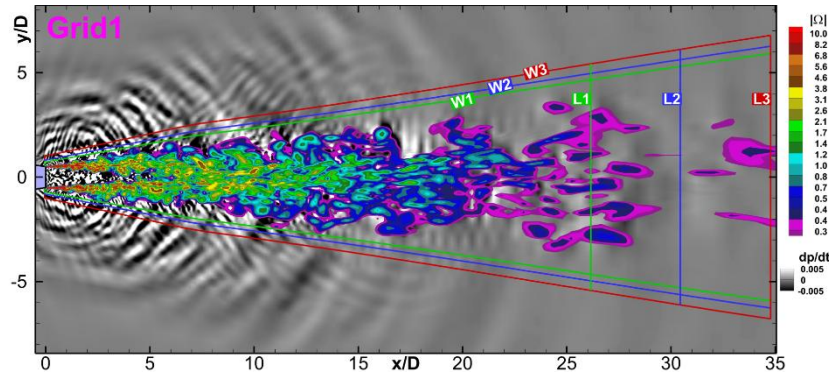
Срез сопла



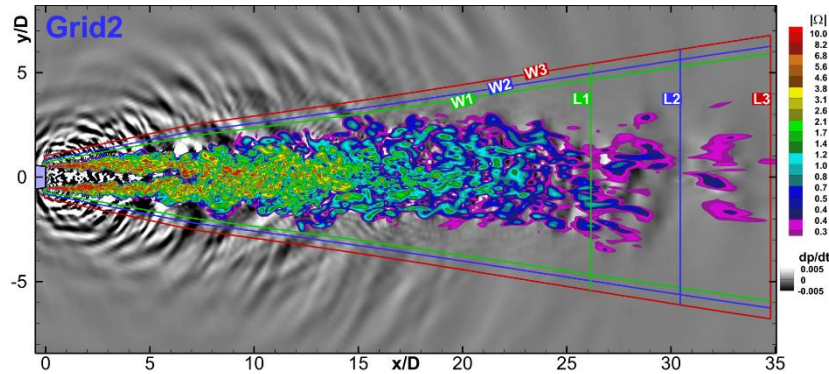
Subsonic jet, structured meshes: instantaneous flow fields

Slice $z/D=0$

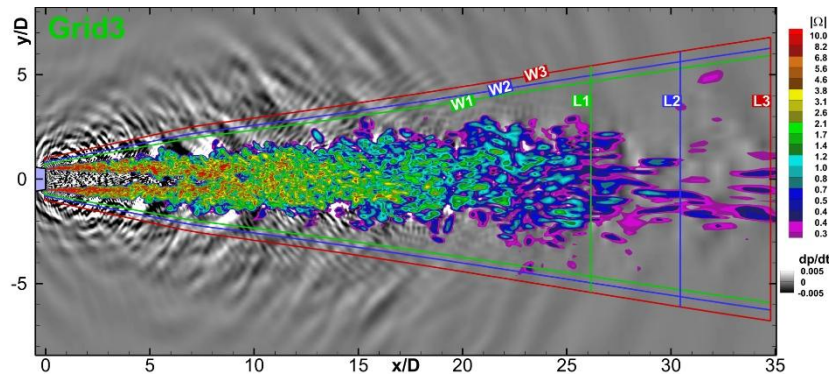
Grid 1



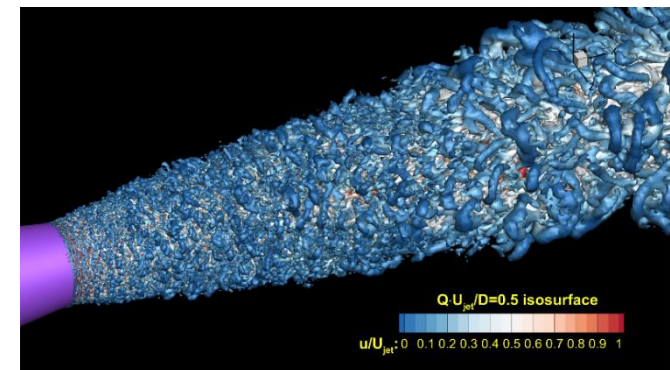
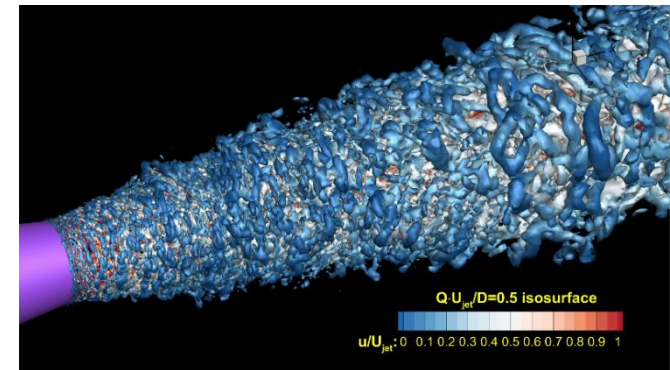
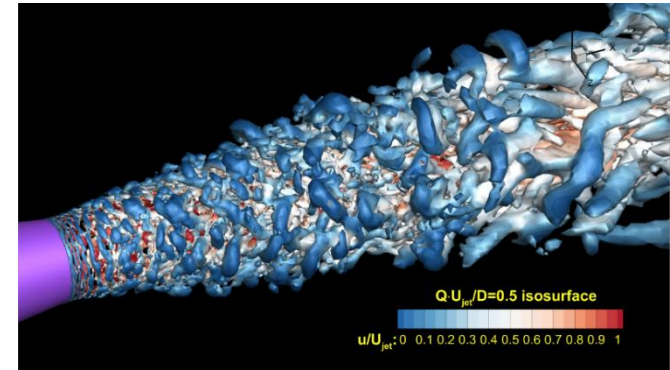
Grid 2



Grid 3

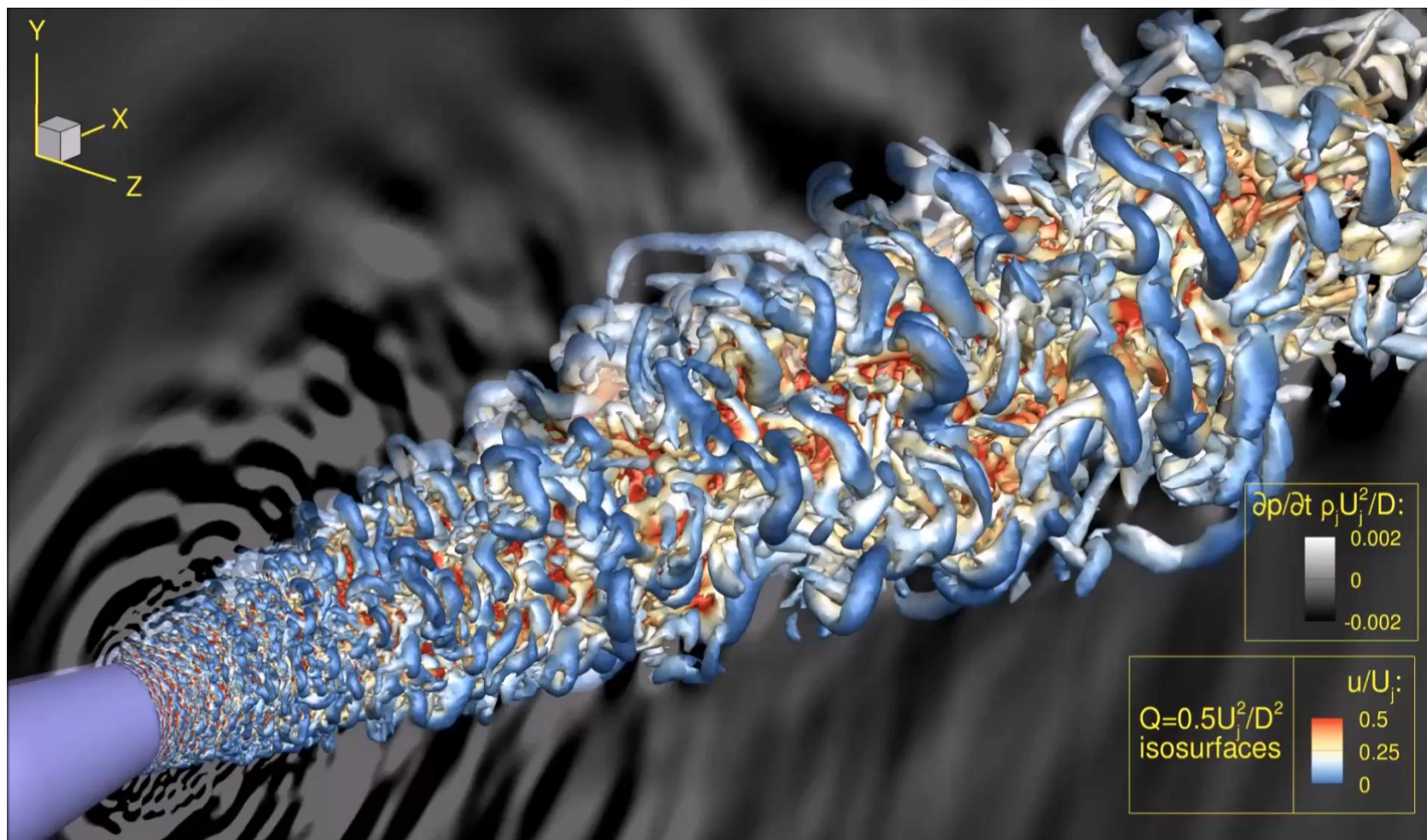


3D vortices



Затопленная ненагретая дозвуковая круглая струя

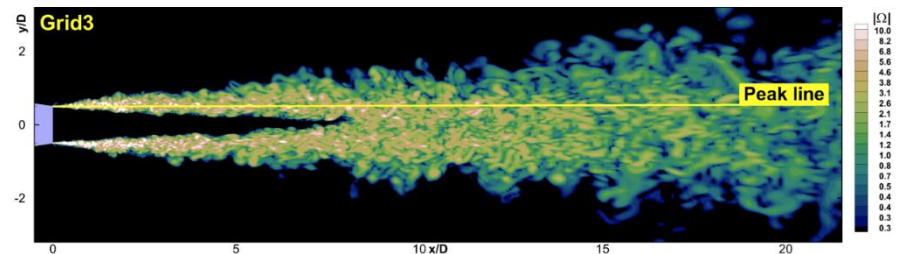
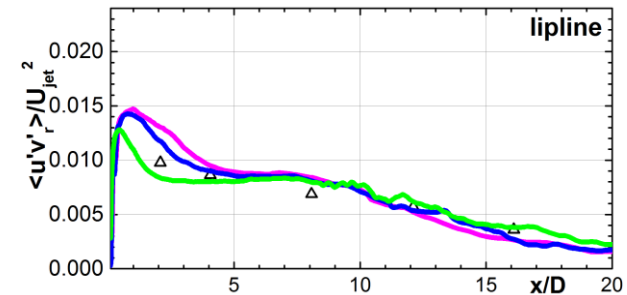
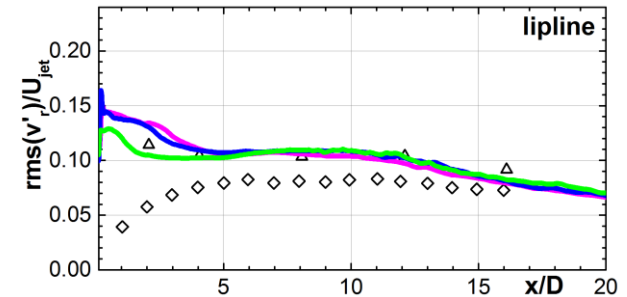
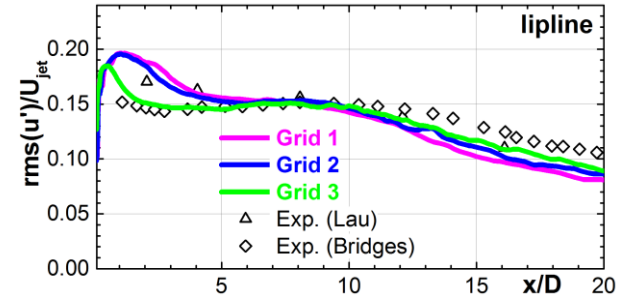
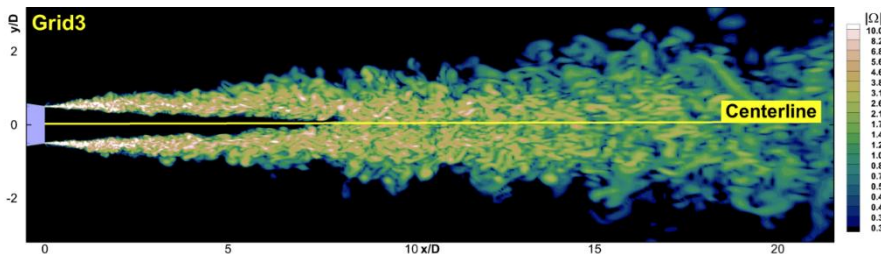
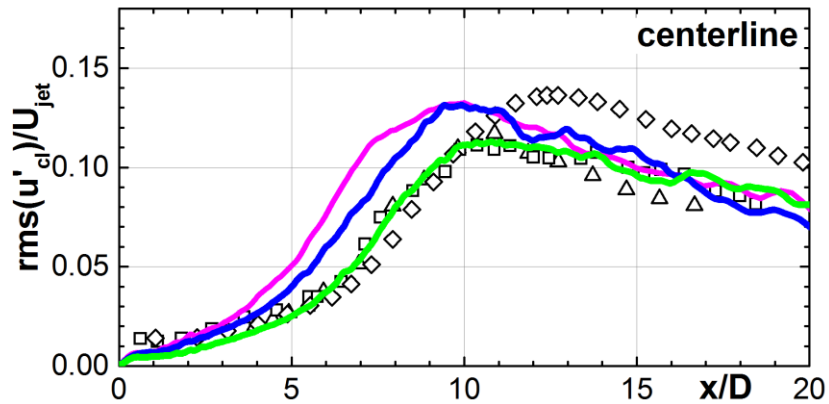
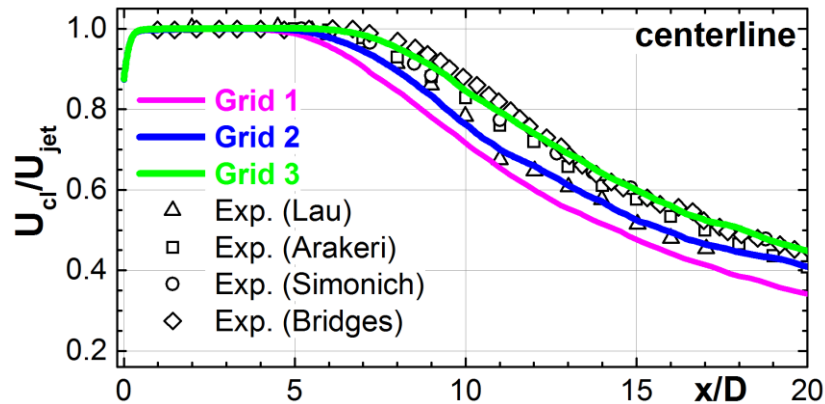
Трехмерные вихревые структуры



Grid 3

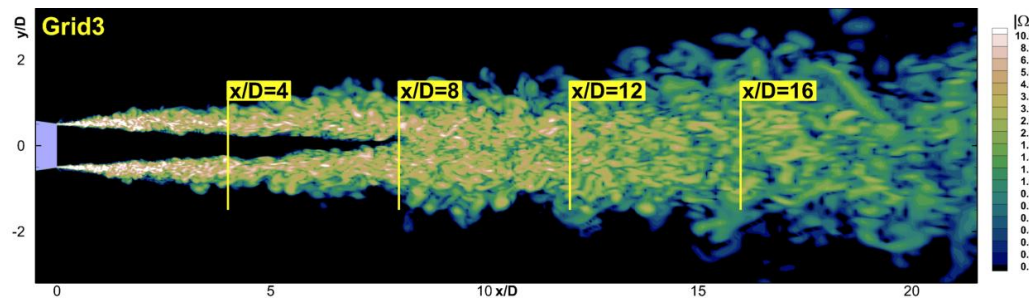
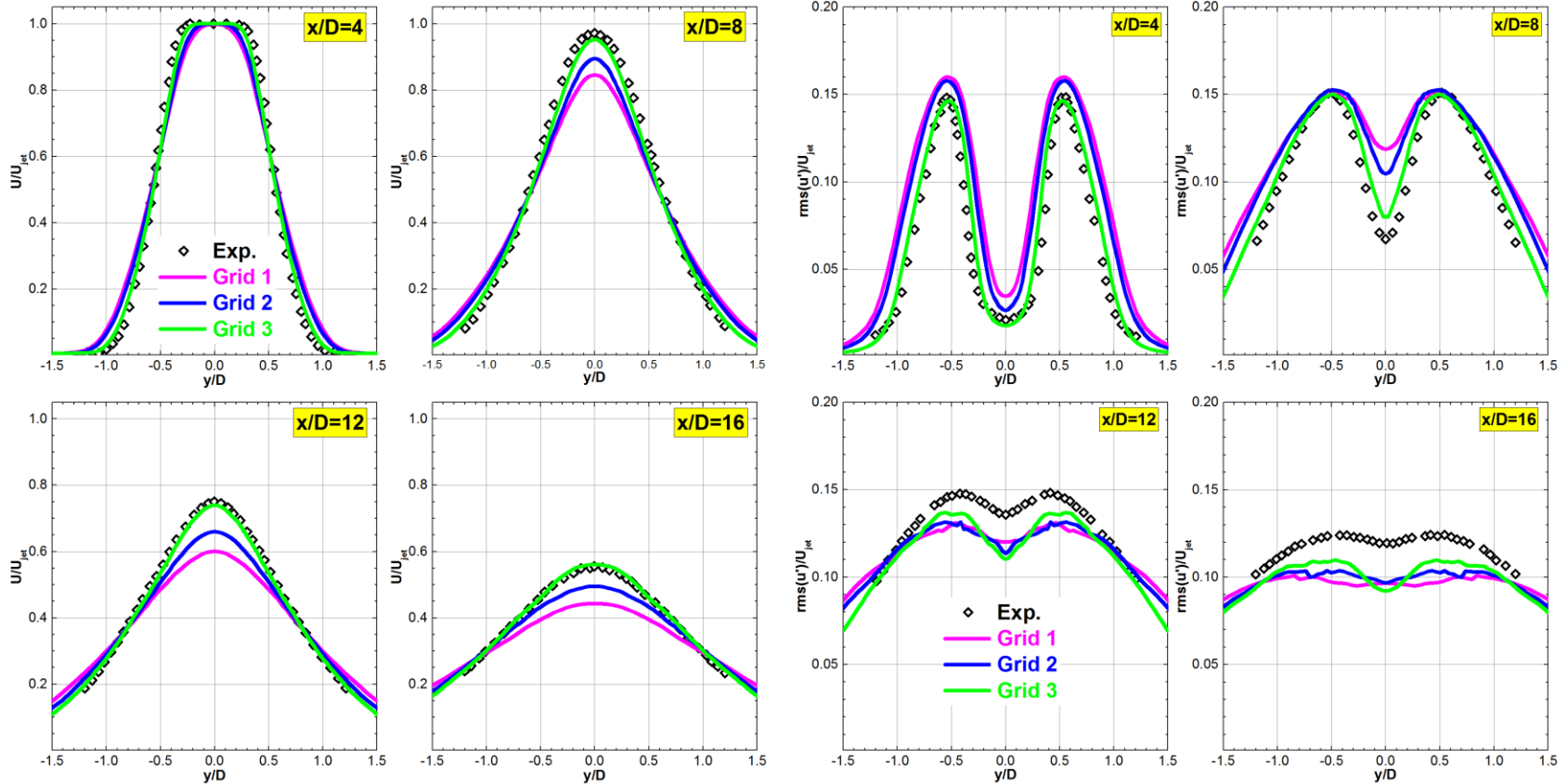
Затопленная ненагретая дозвуковая круглая струя

Осредненные профили в продольном направлении



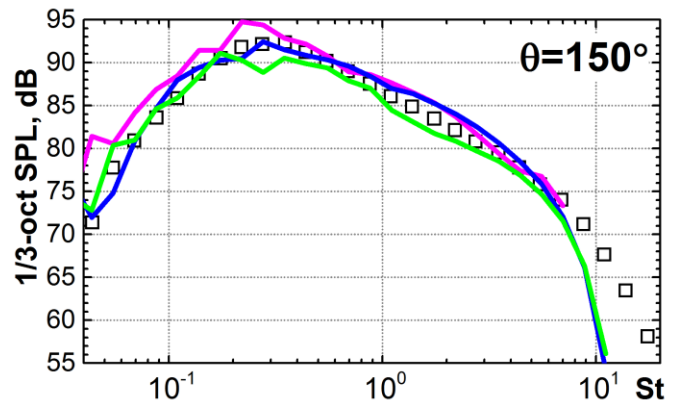
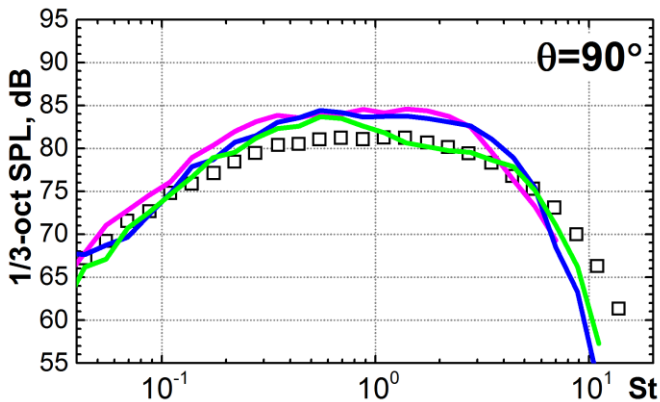
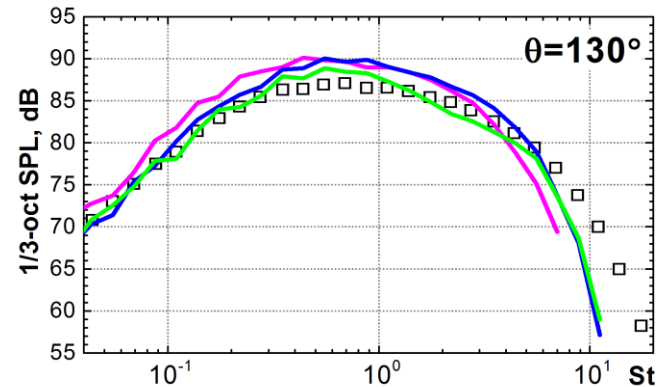
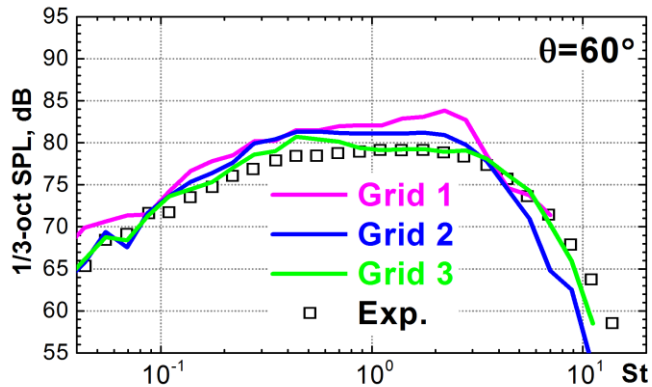
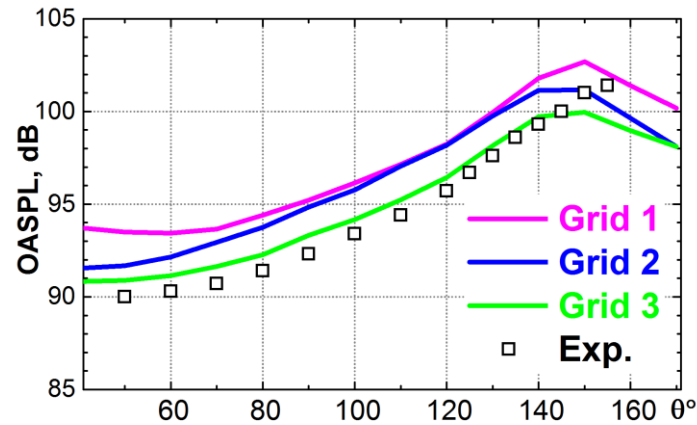
Затопленная ненагретая дозвуковая круглая струя

Осредненные профили в поперечном направлении



Затопленная ненагретая дозвуковая круглая струя

Акустика дальнего поля



Вычислительная постановка 2

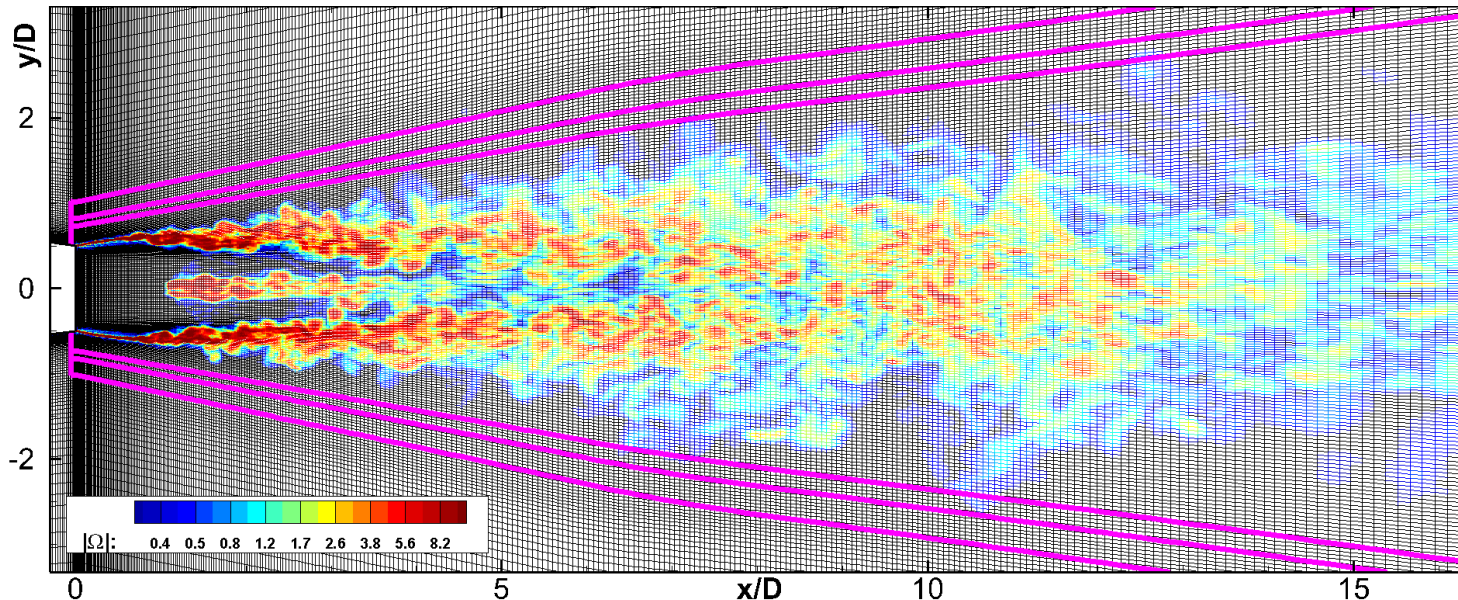
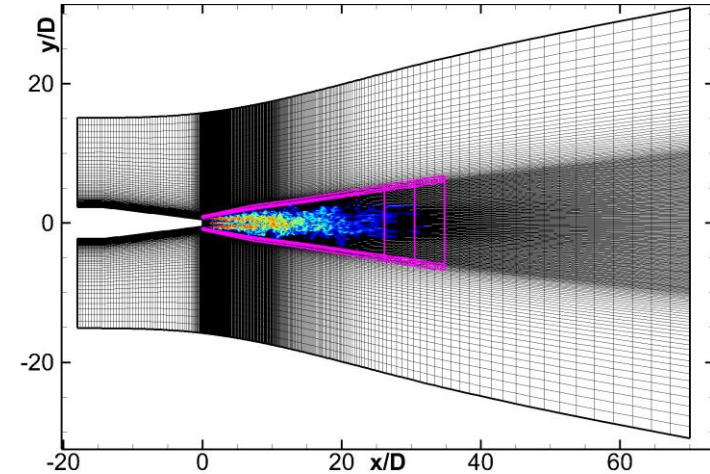
- Затопленная горячая ($NTR=2.97$) недорасширенная круглая струя ($Re_D=1.27 \cdot 10^6$, $NPR=3.86$)

fully expanded $M=1.54$, $M_a=2.18$, $U_{jet}=748.4$ m/s,

вычислительная постановка (сетки и RANS-профили на срезе сопла) предоставлена М.Л. Шуром и М.Х. Стрельцом из СПбПУ

Данные для сравнения

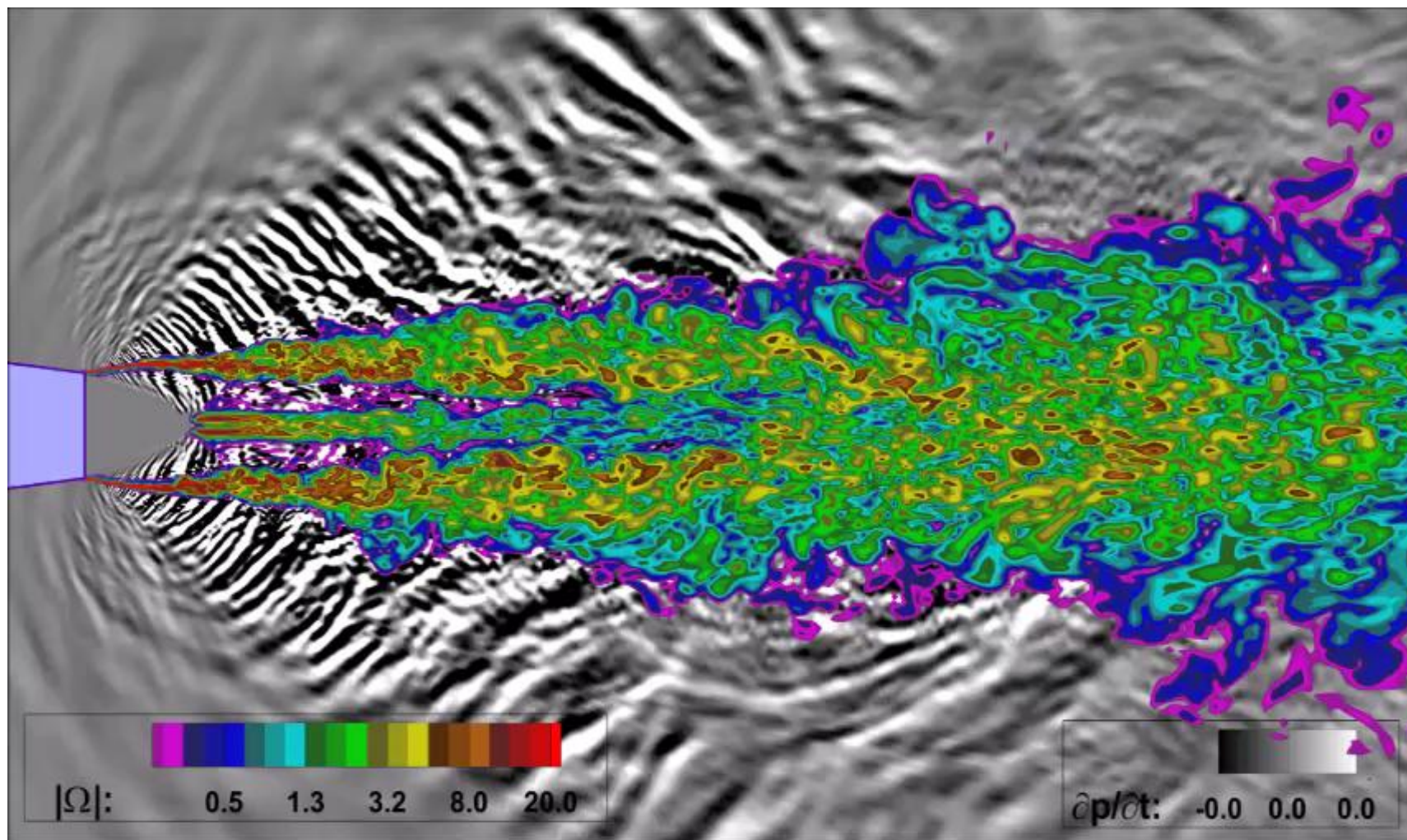
- Акустика: [Ahuja et al., 1979]
- Сетка: 4.55М, 80 узлов в азимутальном направлении
- Акустика дальнего поля: FWH метод



Расчёты
768 CPU ядер

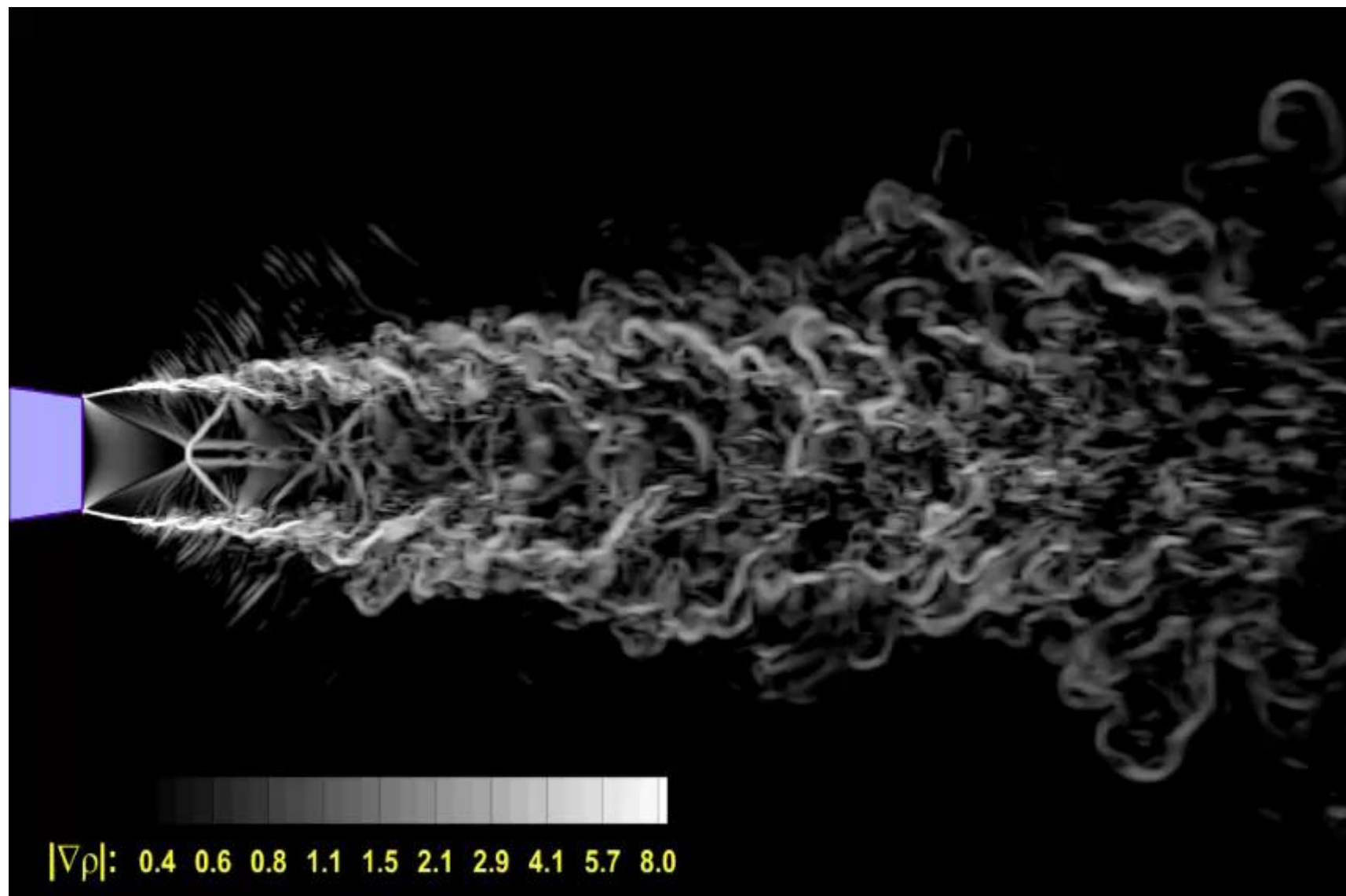
Сечение $z/D=0$ (область ядра струи покрашена величиной завихренности)

Затопленная горячая ($NTR=2.97$) недорасширенная круглая струя



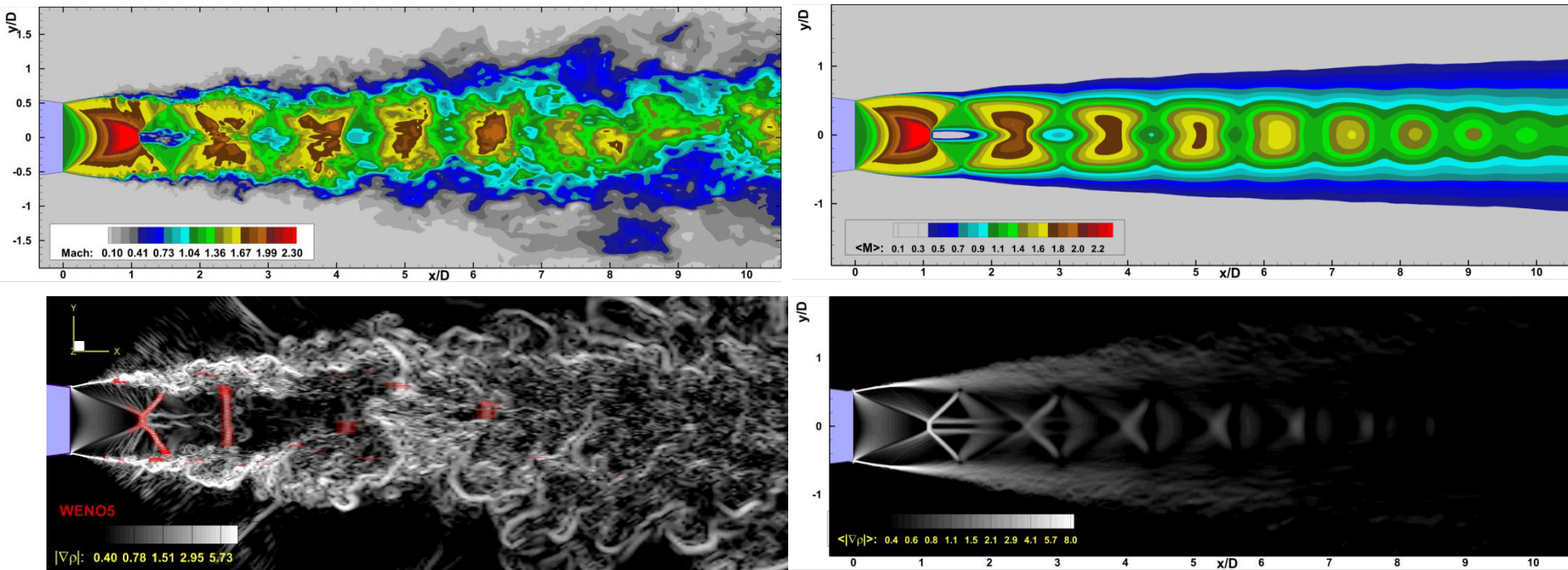
Мгновенные поля завихренности и производной давления по времени

Затопленная горячая (NTR=2.97) недорасширенная круглая струя



Мгновенное поле **градиента плотности** (численные шлирен)

Underexpanded hot jet: numerical results

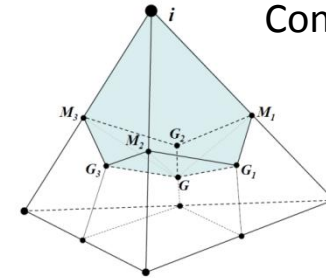
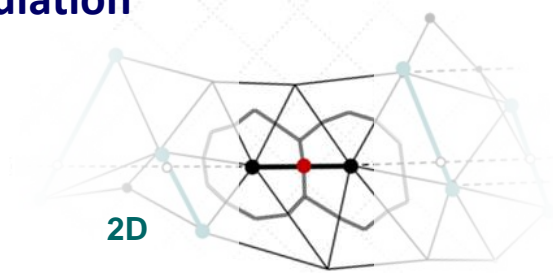
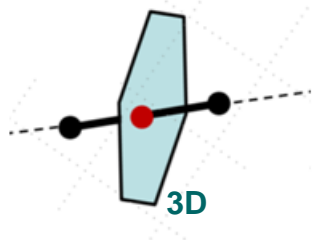


Instantaneous (left) and averaged (right) fields of **Mach number** (top) and **density gradient** (numerical schlieren) (bottom)

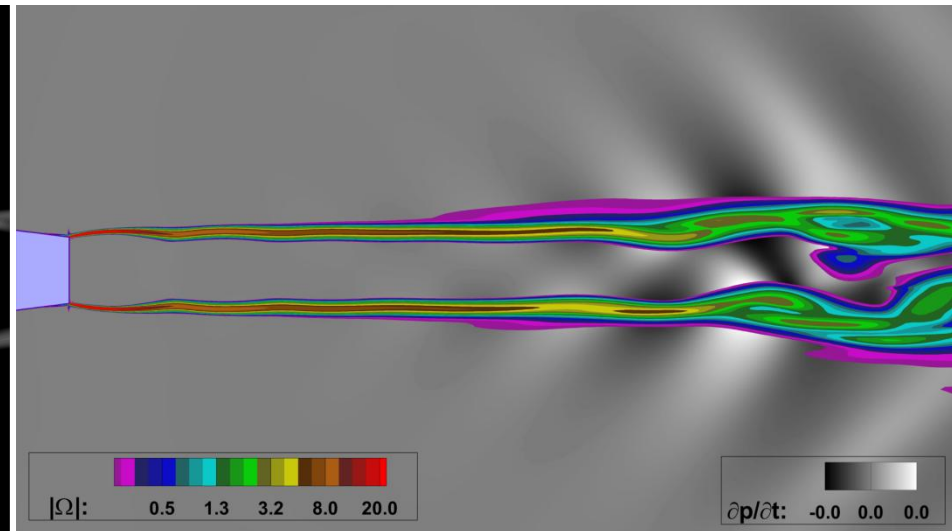
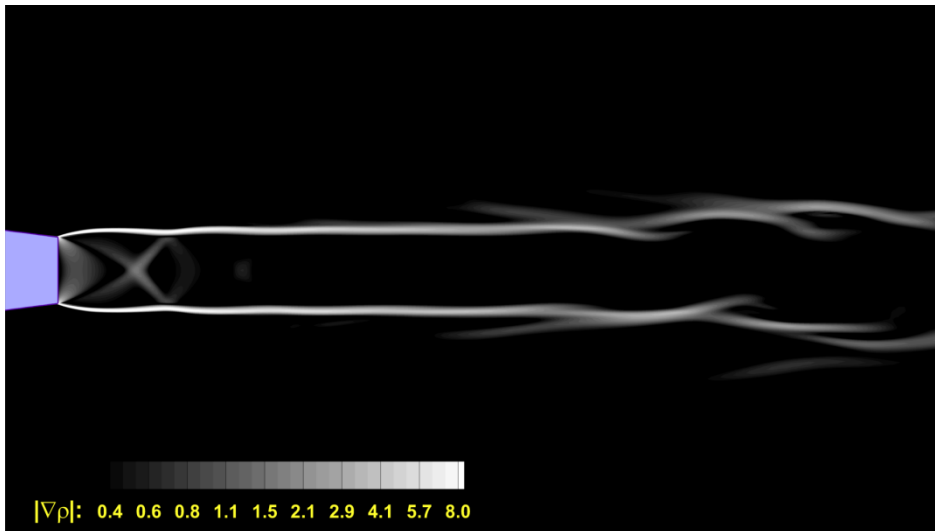
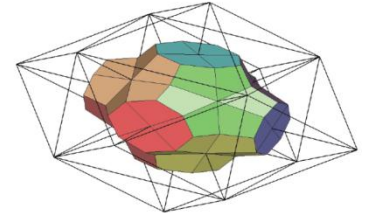
Edges where pure **WENO5** reconstruction is used are marked **in red**

On higher accuracy of EBR schemes on arbitrary unstructured meshes (1/3)

Basic scheme for flux calculation

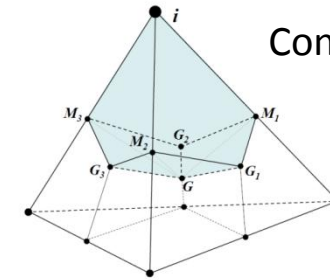
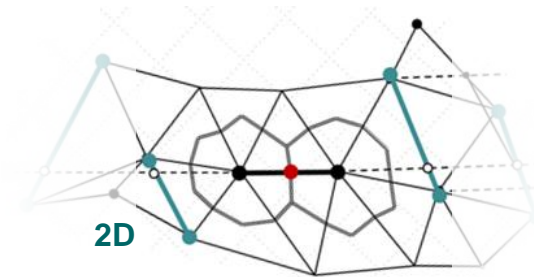
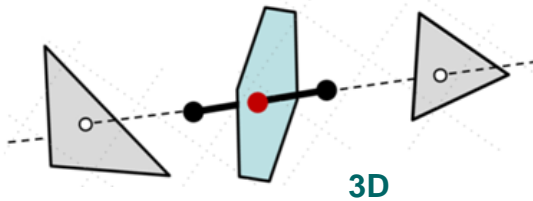


Control volume or cell

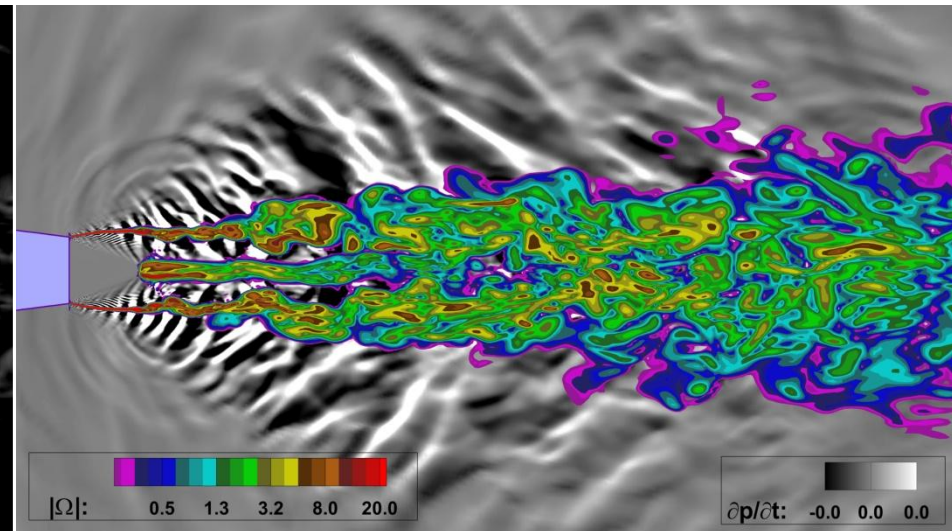
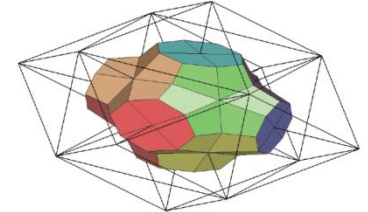


On higher accuracy of EBR schemes on arbitrary unstructured meshes (2/3)

EBR3-WENO scheme

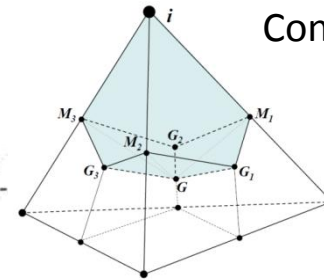
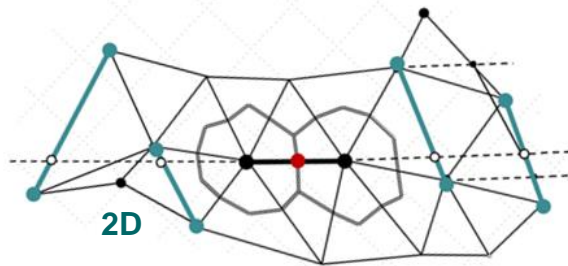
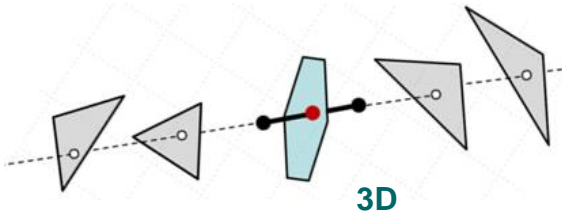


Control volume or cell

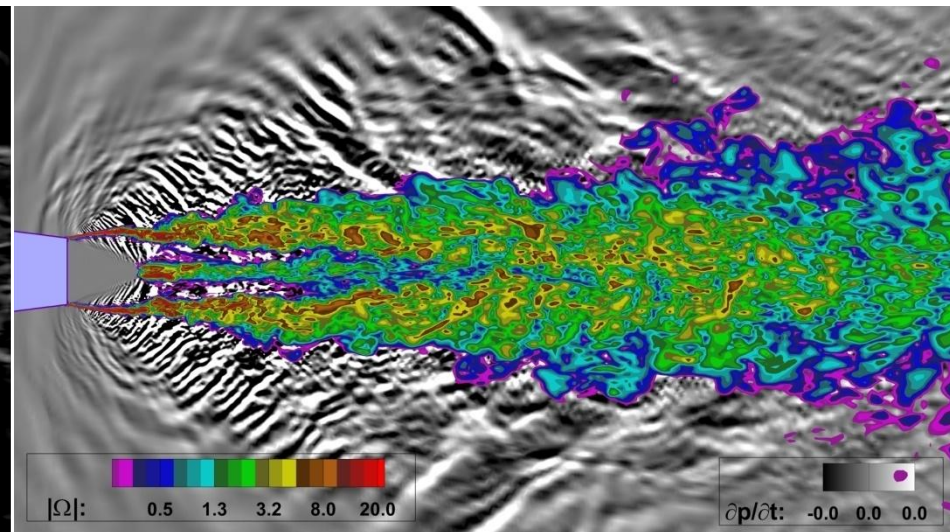
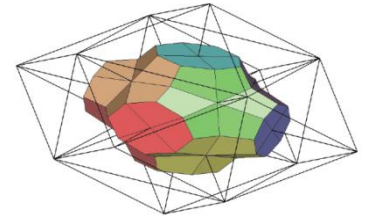


On higher accuracy of EBR schemes on arbitrary unstructured meshes (3/3)

EBR5-WENO scheme

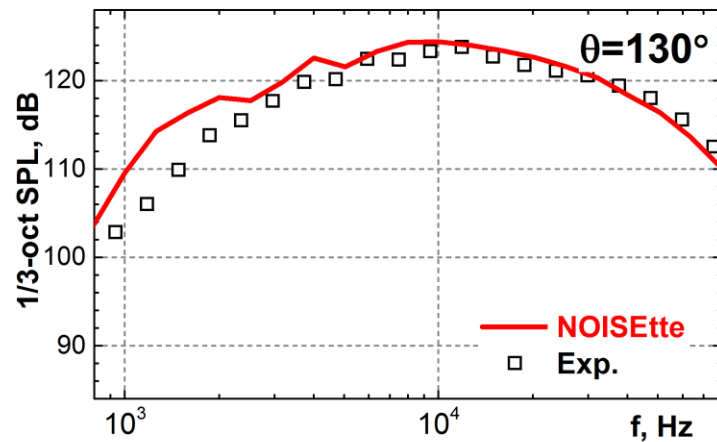
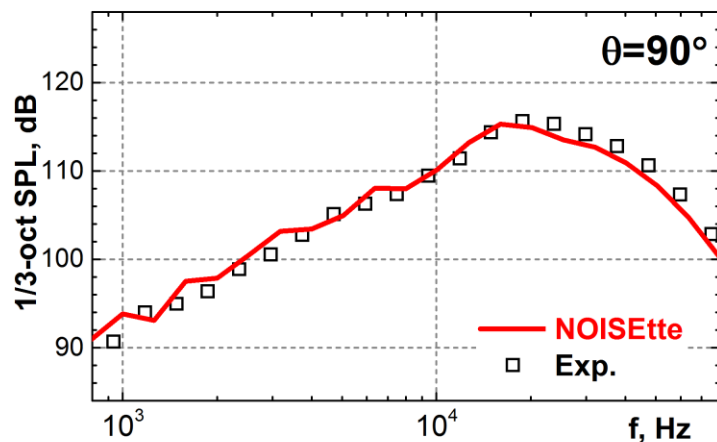
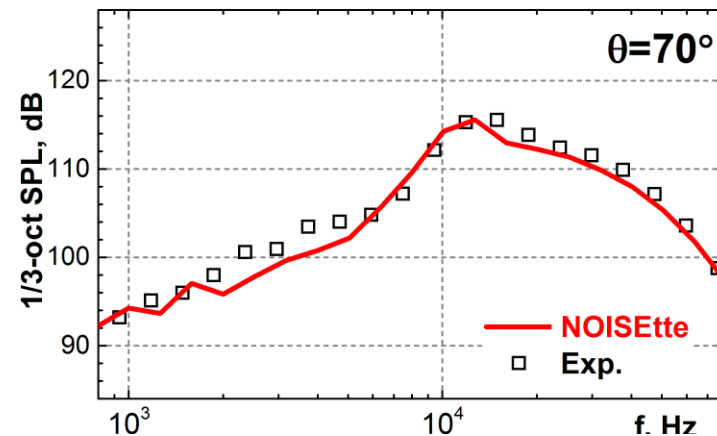
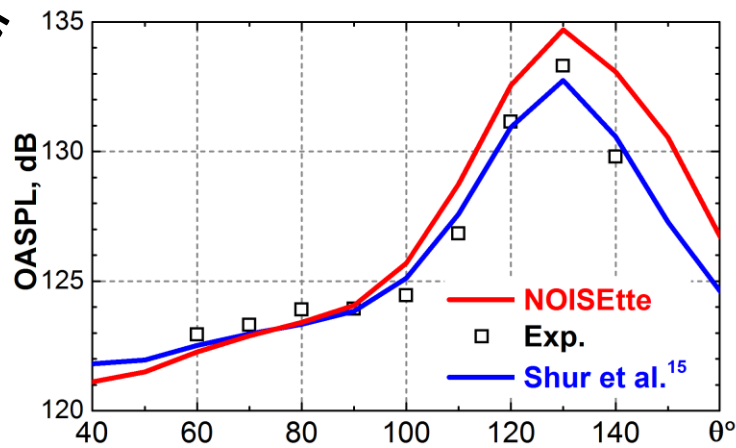


Control volume or cell



Затопленная горячая (NTR=2.97) недорасширенная круглая струя

Акустика дальнего поля



OASPL на расстоянии $100D$ (верхняя левая) и 1/3-октавные спектры для разных углов наблюдателя в сравнении с экспериментальными и численными данными

Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.Kh., "LES-based noise prediction for unexpanded jets shocked jets in static and flight conditions", *AIAA Journal*, 2011, v.49, No.9, pp. 2000-2017

Ahuja, K. K., Tanna, H. K., and Tester, B. J., "Effect of Simulated Forward Flight on Jet Noise, Shock Noise and Internal Noise," *AIAA Paper* 1979-0615, March 1979

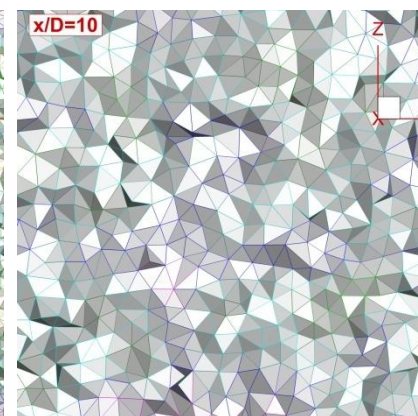
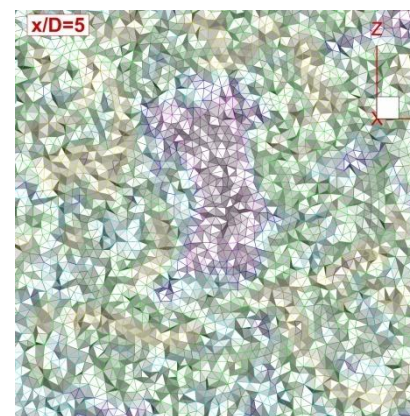
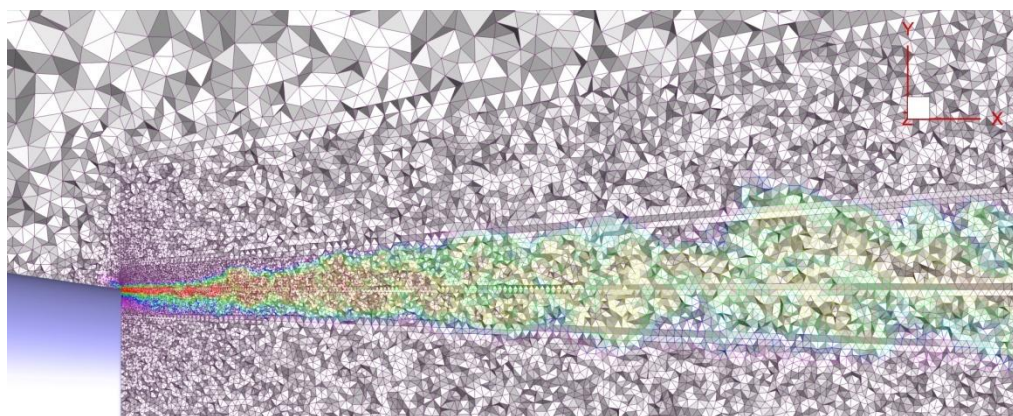
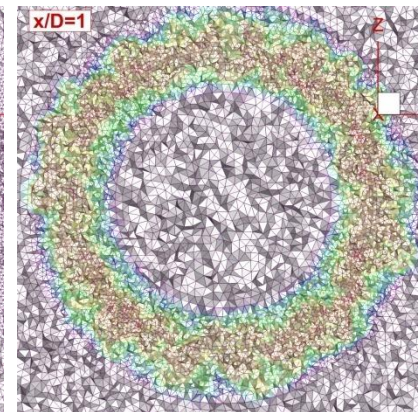
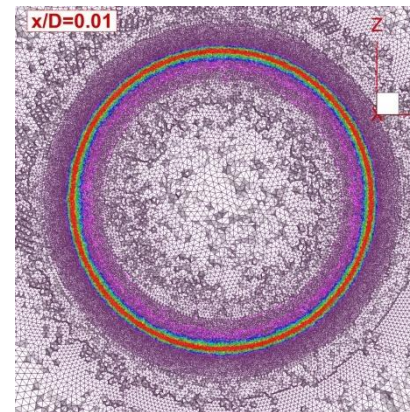
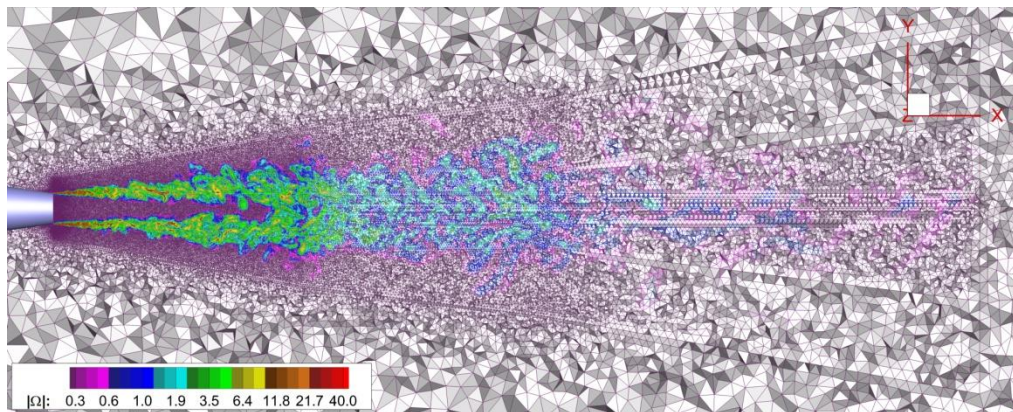
НЕСТРУКТУРИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ

Затопленная ненагретая дозвуковая круглая струя

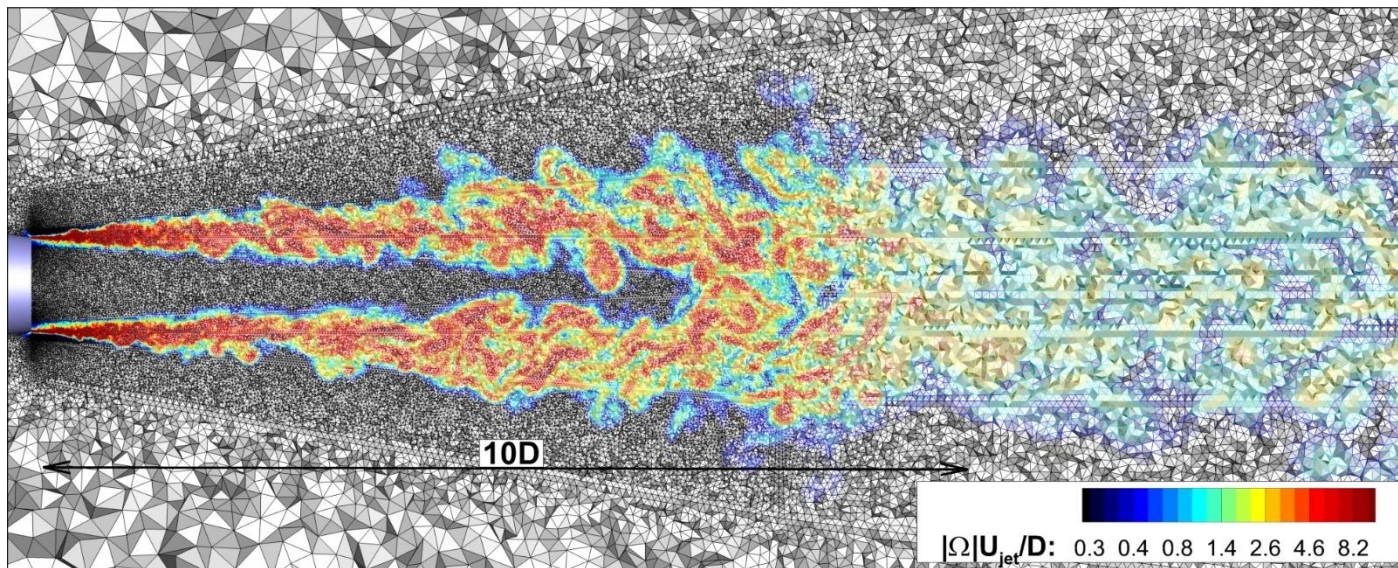
- Изотропная тетраэдральная сетка 6.1M узлов, 36.8M тетраэдров (Сетка U1)

Размер ячеек и коэффициенты сгущения подобны «лучшей» структурированной сетке **Grid 3 (8.8M)**

- $\Delta = 0.003D$ вблизи кромки сопла (~ 1047 азимутальных точек)
- $\Delta_{\max} = 0.075D$ вблизи FWH поверхности в регионе $0 < x/D < 10$



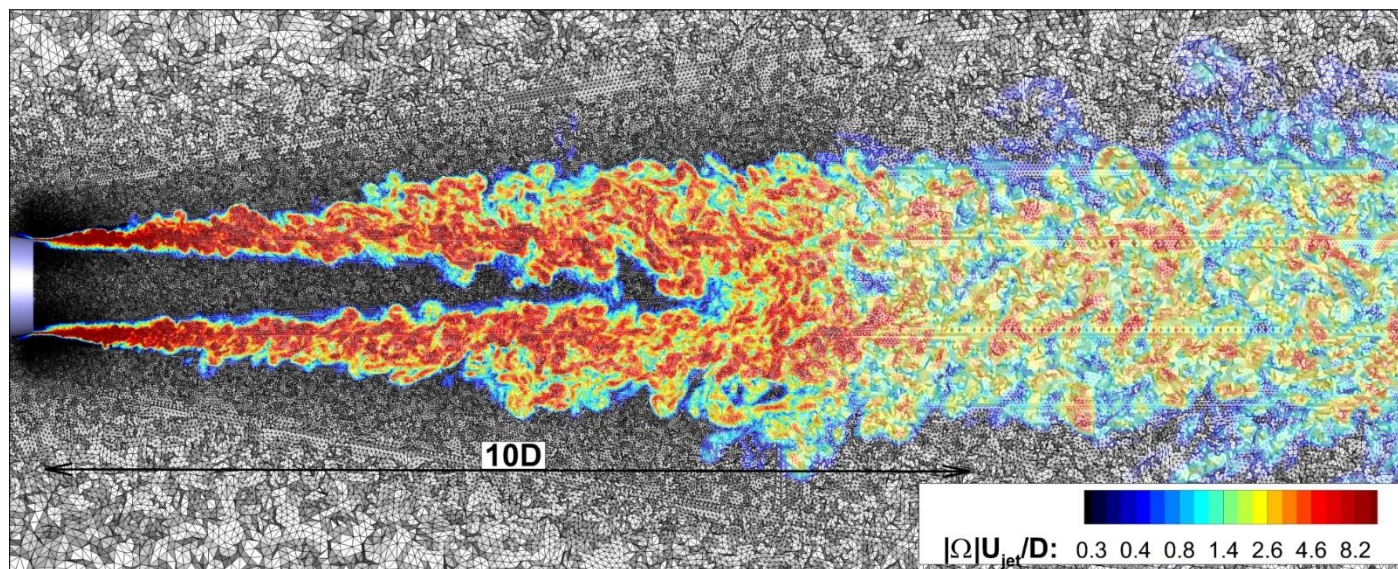
Затопленная ненагретая дозвуковая круглая струя



Сетка U1

6.1M узлов

36.8M тетраэдров



Сетка U2

26.9M узлов

161.3M тетраэдров

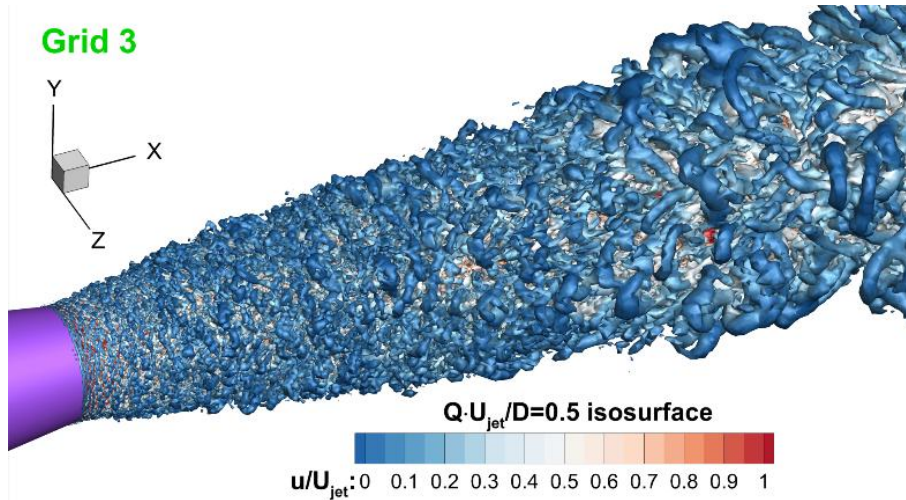
Затопленная ненагретая дозвуковая круглая струя

3D вихревые структуры: сравнение результатов

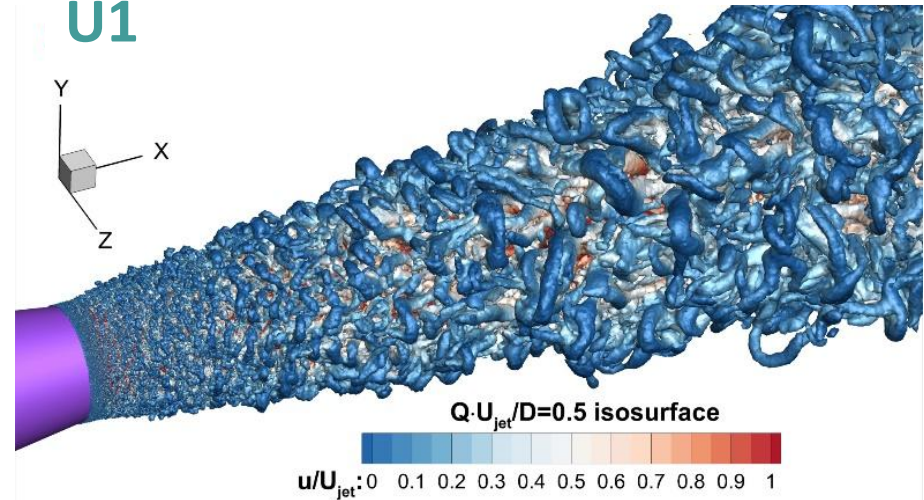
на «лучшей» структурированной

и двух неструктурированных сетках

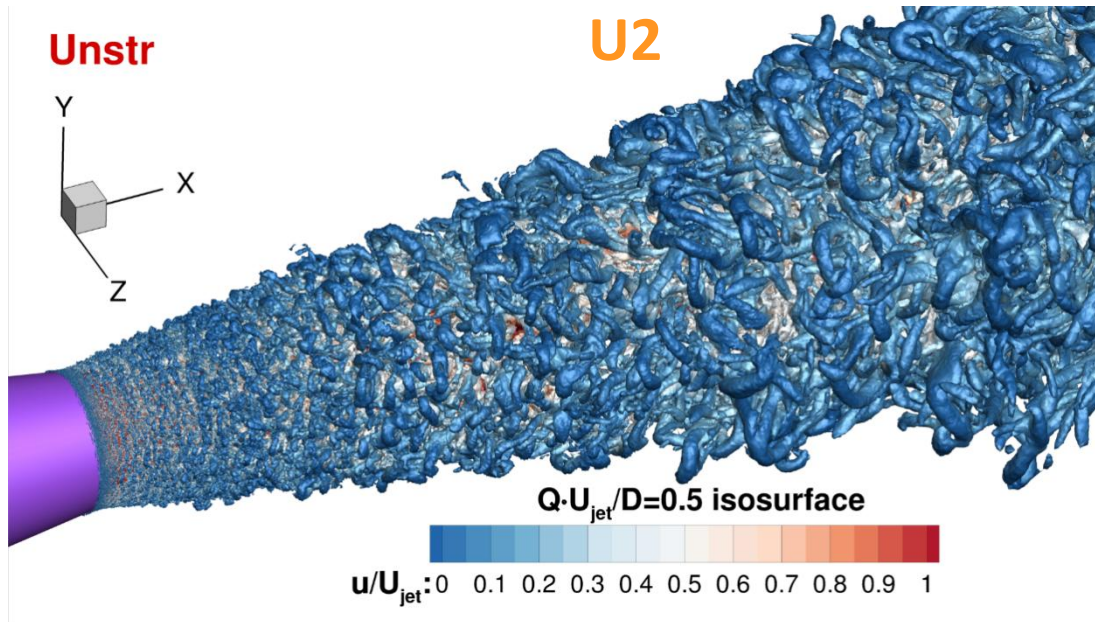
Grid 3



U1



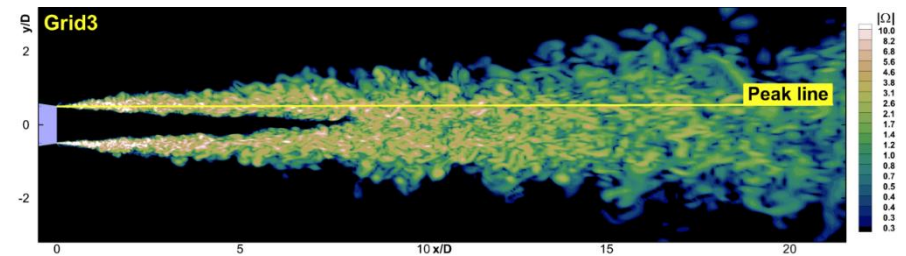
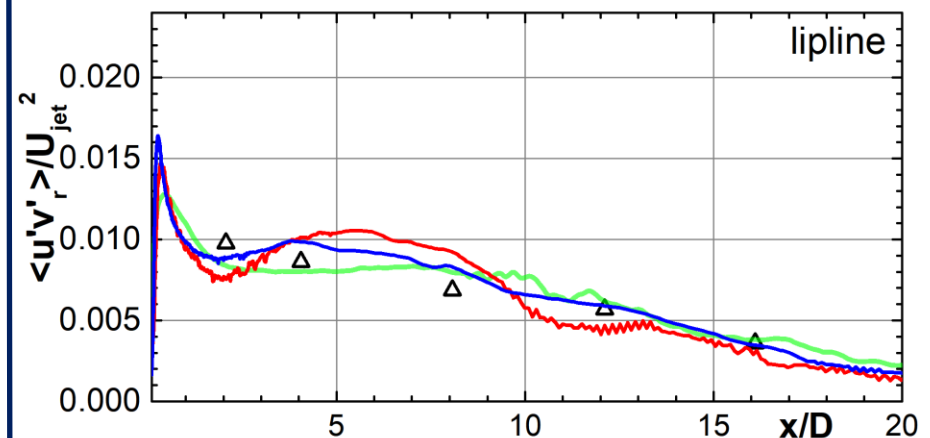
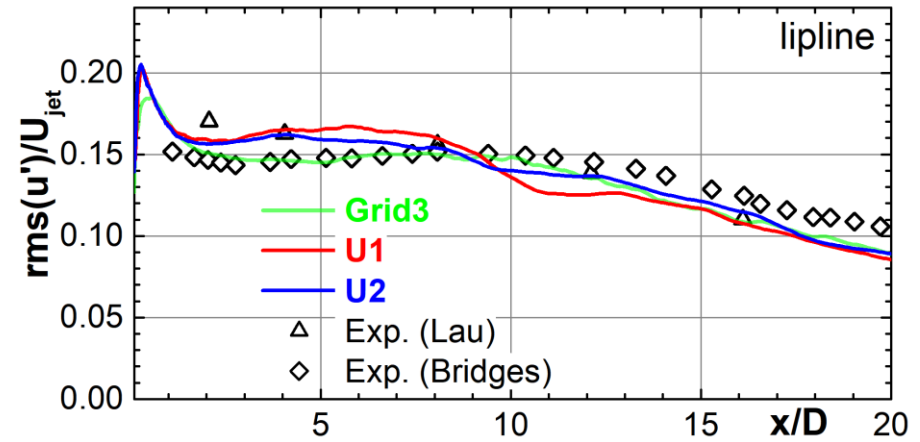
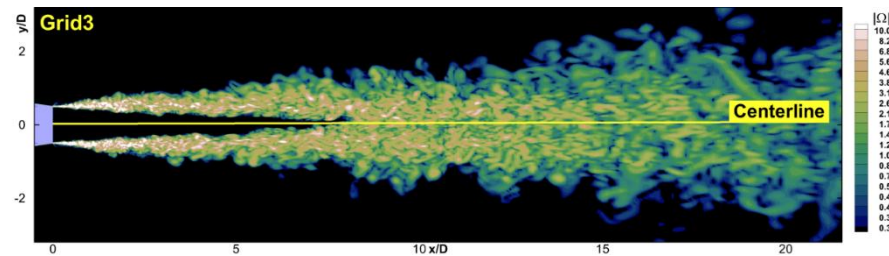
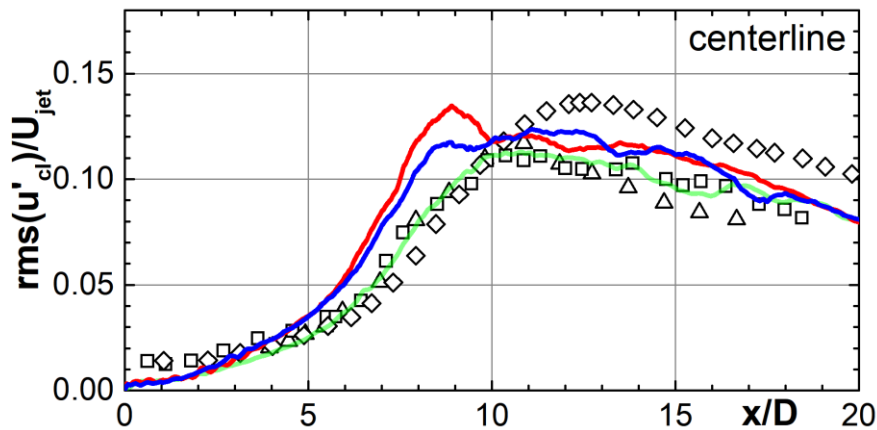
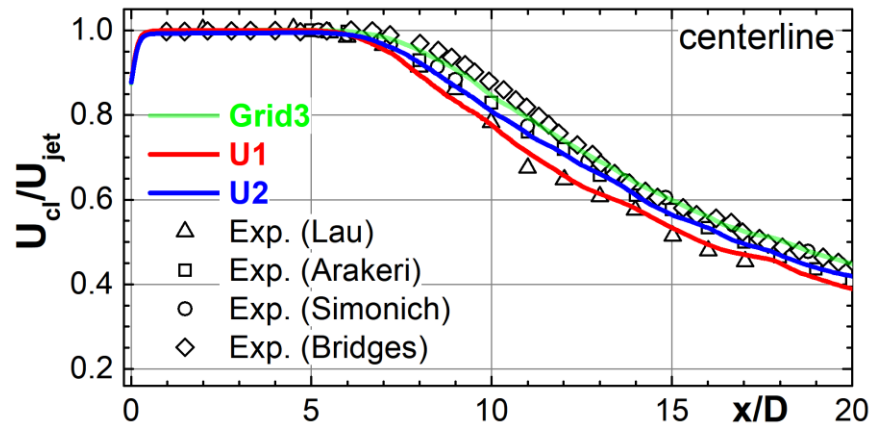
Unstr



U2

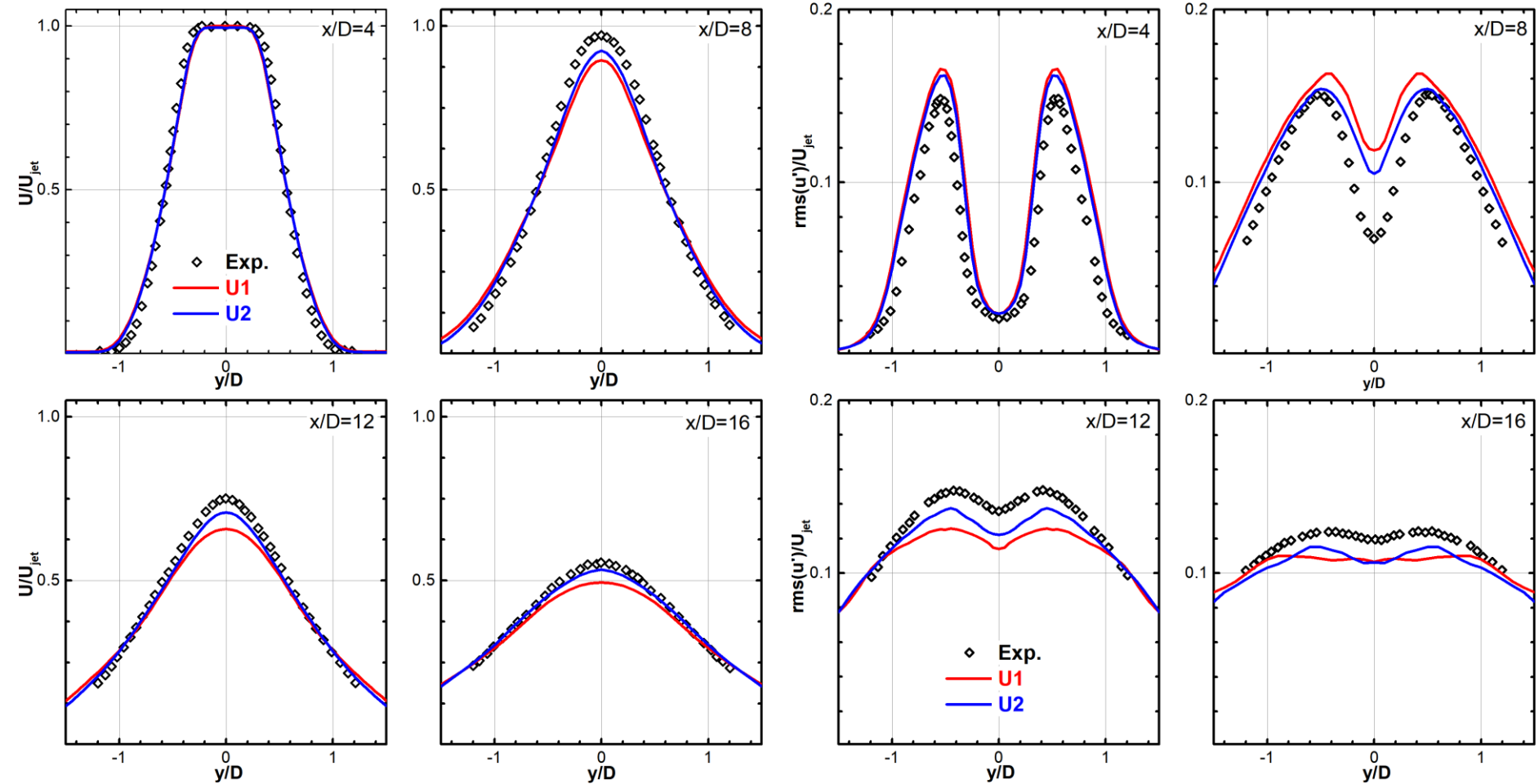
Затопленная ненагретая дозвуковая круглая струя

Осредненные профили в продольном направлении



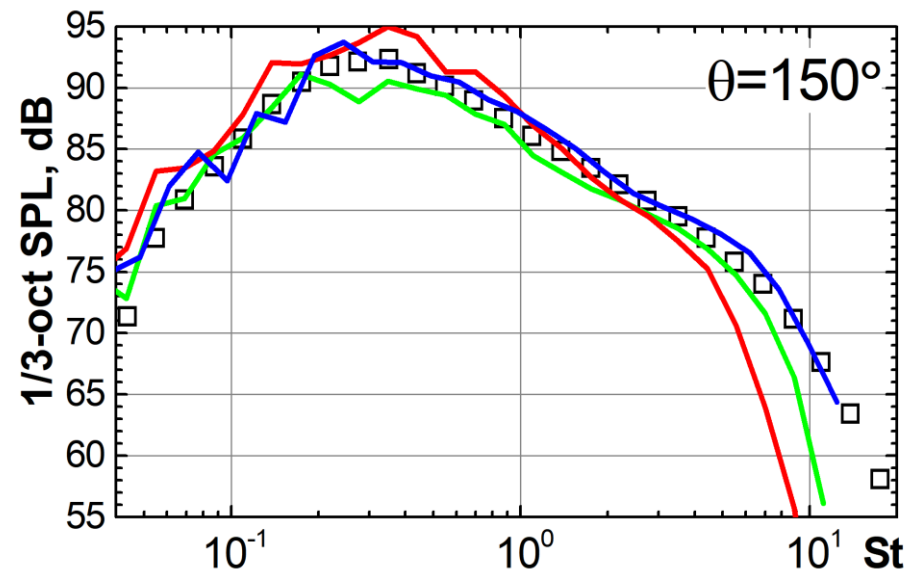
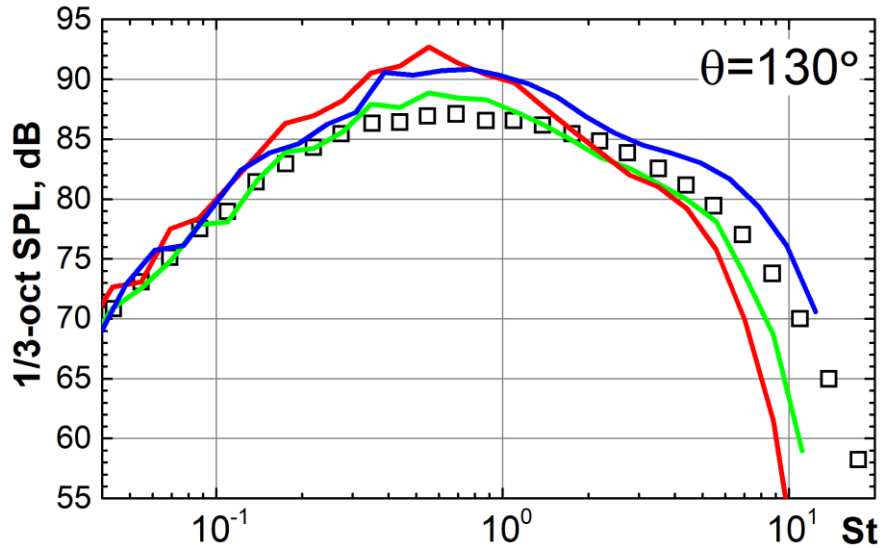
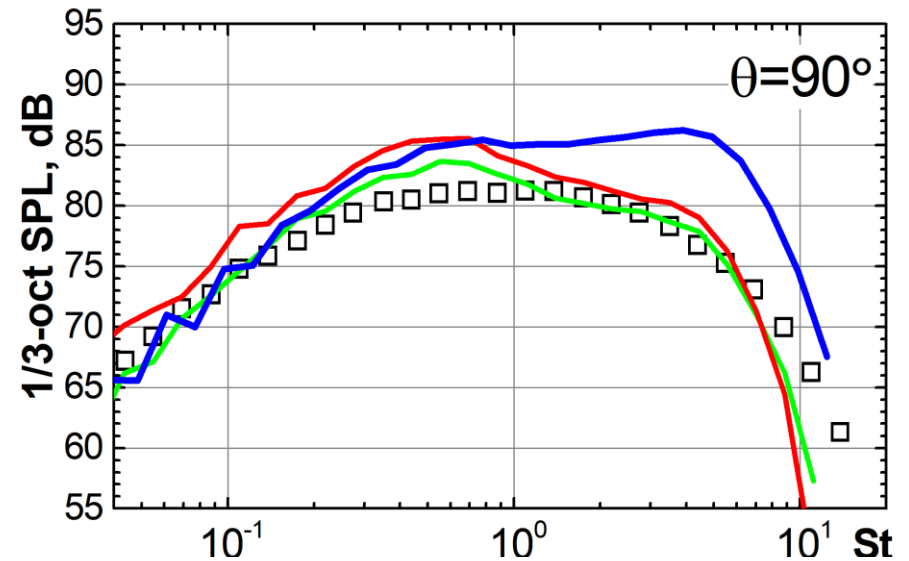
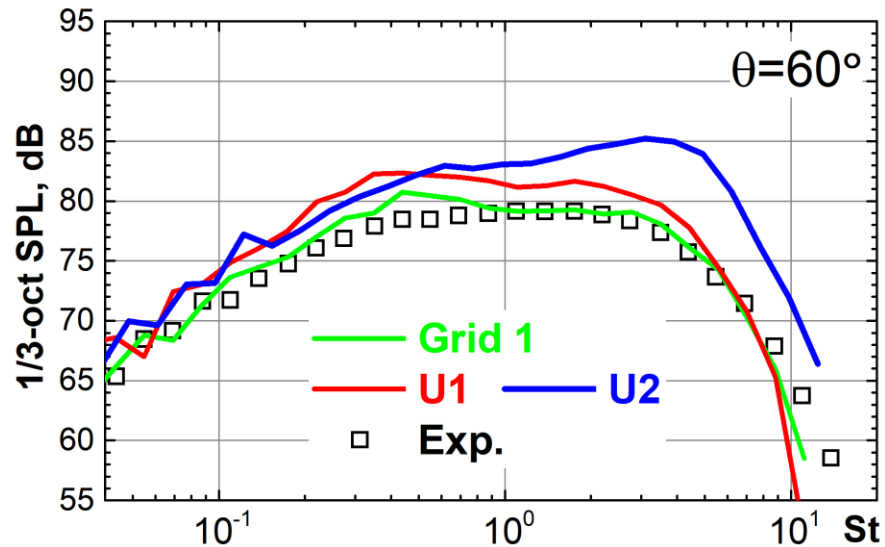
Затопленная ненагретая дозвуковая круглая струя

Осредненные профили в поперечном направлении



Затопленная ненагретая дозвуковая круглая струя

Акустика дальнего поля



Заключительные замечания

Представленный экономный неструктурированный алгоритм повышенной точности позволяет предсказывать **аэродинамические характеристики струй с точностью, выше той**, которую обеспечивают «традиционные» конечно-объёмные схемы второго порядка как **на структурированных, так и неструктурированных сетках**

Представленный неструктурированный алгоритм позволяет предсказывать **акустику струй с приемлемой точностью на структурированных сетках и в некоторых случаях на неструктурированных стеках**. В общем случае, уровни акустических спектров имеют тенденцию к завышению мощности звукового излучения из-за численной неустойчивости.

Однако, выявленный недостаток **может быть улучшен**, в первую очередь, за счёт **лучшей адаптации весовых коэффициентов гибридной схемы** для обеспечения более тонкого контроля за объёмом численной диссипации

Для представленного неструктурированного алгоритма выгодны сетки с включением **участков трансляционно-инвариантных сеток** при обязательном обеспечении **гладкого изотропного сгущения/разрежения**

Спасибо!

**Детали можно посмотреть
на стенде
и при желании даже обсудить!**