

Код Jet3D: итоги в 2018 года

Аюпов Р.Ш., Бендерский Л.А., Жигалкин А.С., Любимов Д.А.,
Польняков Н.А., Терехова А.А.

ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова», г. Москва, Россия

Пятый профессиональный слёт разработчиков отечественных CFD кодов «Отечественные CFD коды -2017»
CFD Weekend-2017. 1-2 декабря 2018. ИПМ им. М.В. Келдыша. Москва.

Что моделируется (классы течений):

несжимаемые течения

сжимаемые течения: дозвук - гиперзвук

аэроакустика

Модели для описания среды:

уравнения Н-С, Weiss-Smith precondition

Моделирование турбулентных течений:

RANS, URANS, DES, RANS/ILES

Замыкание:

RANS: SA, k - ϵ , v_t -92; RANS/ILES : в области RANS SA, в области ILES - схемная вязкость

Сетки и сеточные технологии:

структурированные многоблочные криволинейные сетки,

импорт сеток и граничных условий из CFD-GEOM

Численные методы:

конечно-объемные , переменные: плотность-скорость -давление

Порядок аппроксимации по пространству : 3-5 для несжимаемых течений, 5-9 для

предраспадных параметров в схеме Роу для сжимаемых течений

Интегрирование по времени:

явная схема (dual time stepping)

Ускорение вычислений:

OpenMP-MPI

Язык программирования:

FORTRAN

В RANS/ILES методе [Любимов Д.А. Разработка и применение метода высокого разрешения для расчета струйных течений методом моделирования крупных вихрей // ТВТ. 2012. Т.50. № 3. С. 450-466.] модифицированное расстояние d_{ILES} вычислялось по формулам:

$$d_{ILES} = d, \quad \text{при } d \leq C_{ILES} \Delta_{max}, \quad d_{ILES} = 10^{-6}H, \quad \text{при } d > C_{ILES} \Delta_{max}$$

H – характерный размер задачи, Δ_{max} – максимальный размер текущей ячейки, $C_{ILES}=0.65$ – определяет **только** положение перехода от RANS к ILES. **В методе DES C_{DES} определяет еще и уровень подсеточной вязкости в области LES!**

В модифицированном варианте RANS/ILES метода [Lyubimov D.A., Chestnykh A.O. Flow in a High-Velocity Mixed Compression Inlet Studied by the RANS/ILES Method in Different Operation Modes // High Temperature. 2018. V. 56. No 5. P.702-710.] расстояние d_{ILES} определяется следующим образом:

$$d_{ILES} = \max(d_{\Delta}, d_f)$$

Входящие в выражение для d_{ILES} величины были определены следующим образом:

$$\begin{aligned} d_{\Delta} &= d, & \text{при } d \leq C_{\Delta} \Delta_{max}, & & d_{\Delta} &= 10^{-6}H, & \text{при } d > C_{\Delta} \Delta_{max} \\ d_f &= df_d, & \text{при } f_d \geq f_{dmin}, & & d_f &= 10^{-6}H, & \text{при } f_d < f_{dmin} \end{aligned}$$

Выражение для f_d имеет структуру аналогичную использованной в методе IDDES [Shur M.L., Spalart P.R., Strelets M.K., Travin A.K. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities // Int. J. Heat Fluid Flow. 2008. V. 29. P. 1638–1649.]:

$$f_d = \max(f_{dt}, f_b)(1 + f_e \psi)$$

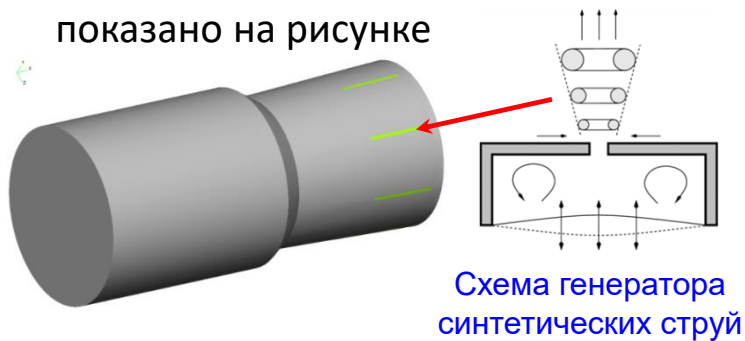
В выражении для f_d функции f_b , f_e и ψ такие же, как и в методе IDDES. Функция f_{dt} определена следующим образом:

$$f_{dt} = \text{th}((C_{dt} r_{dt})^3)$$

$C_{\Delta}=1$, $C_{dt}=8$ и $f_{dmin}=10^{-2}$ подбирались на основе тестовых расчетов. Другие функции, входящие в выражения для f_d и f_{dt} , совпадают с аналогичными в методе IDDES.

Применение синтетических струй для управления течением в нерасчетной сверхзвуковой струе

Восемь синтетических струй располагались симметрично, с одинаковым шагом в азимутальном направлении, вблизи кромки сопла как показано на рисунке



Параметры синтетических струй

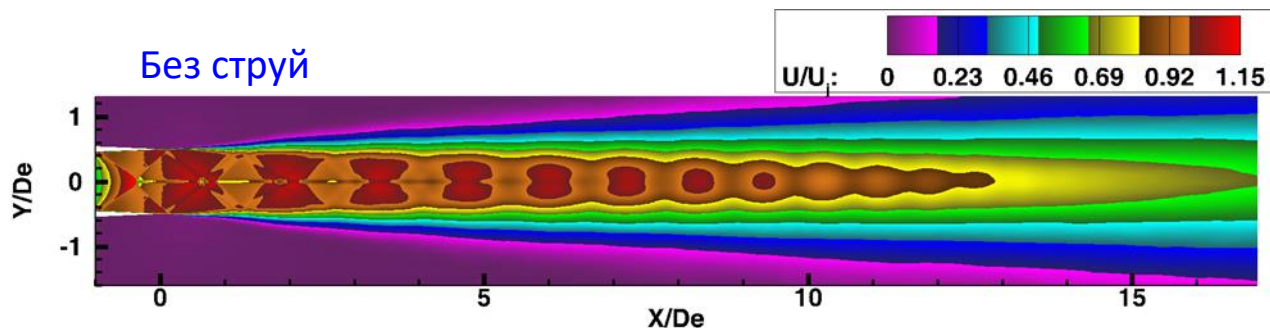
Холодная

q , м/с	f , Гц	C_μ , %
50	60	0.022
50	100	0.022
50	200	0.022
50	300	0.022
200	200	0.35

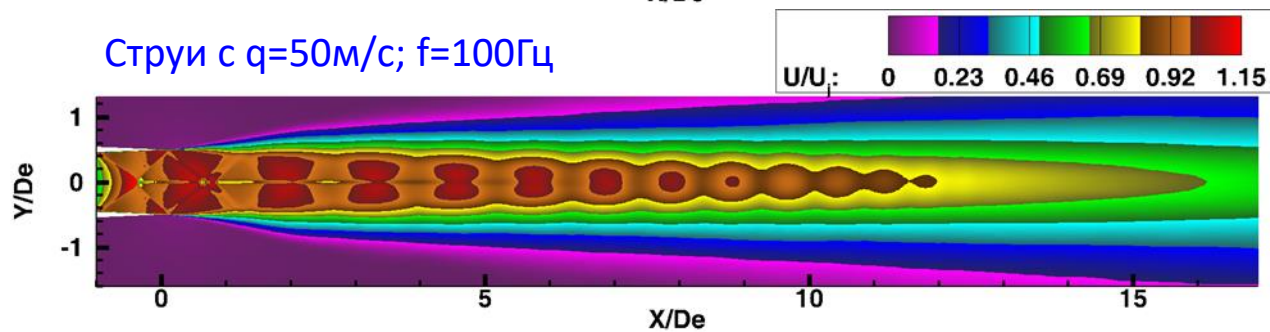
Горячая

q , м/с	f , Гц	C_μ , %
50	200	0.013
100	200	0.05
50	400	0.013
187	83	0.175
100	140	0.05
200	140	0.201
325	140	0.529
400	140	0.802
325	83	0.529
325	41	0.529

Без струй

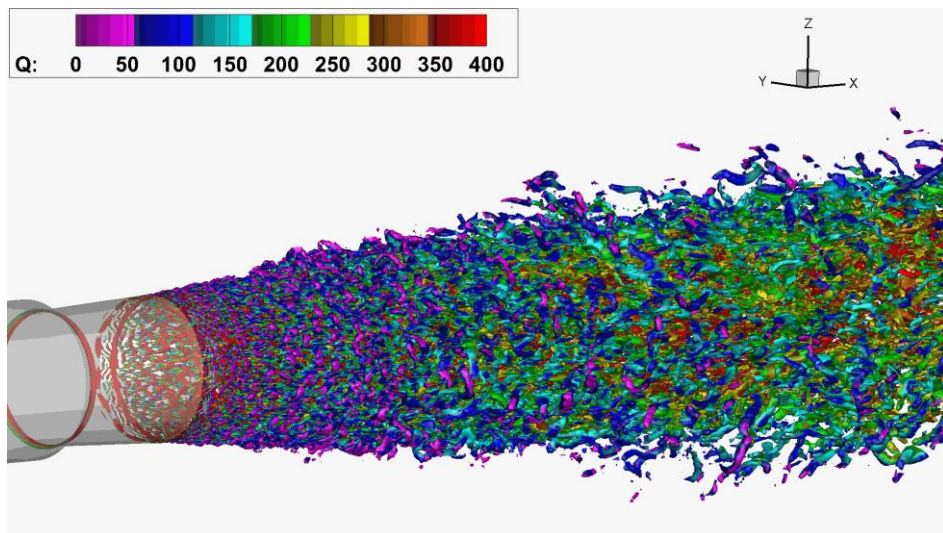


Струи с $q=50$ м/с; $f=100$ Гц

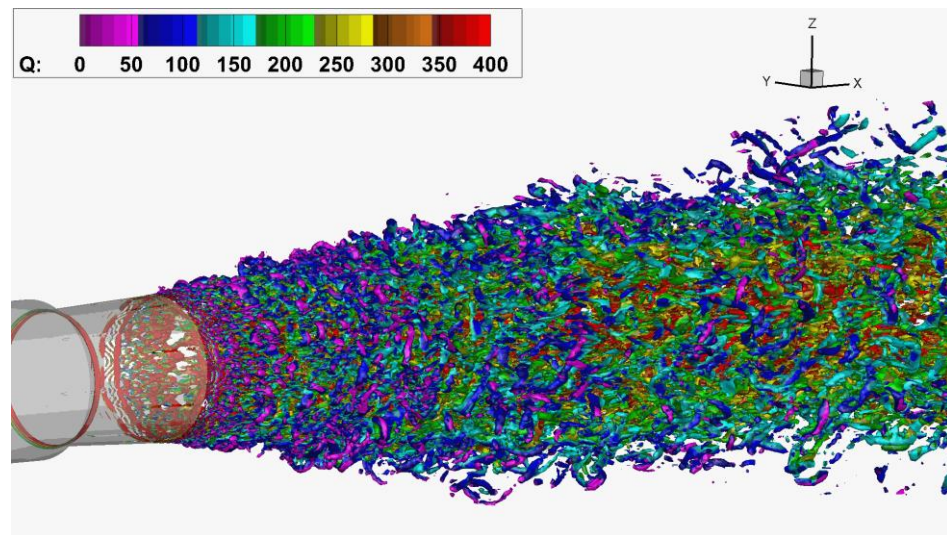


Применение синтетических струй для управления течением в нерасчетной сверхзвуковой холодной струе

Изоповерхности Q_{cr} в цветах модуля скорости

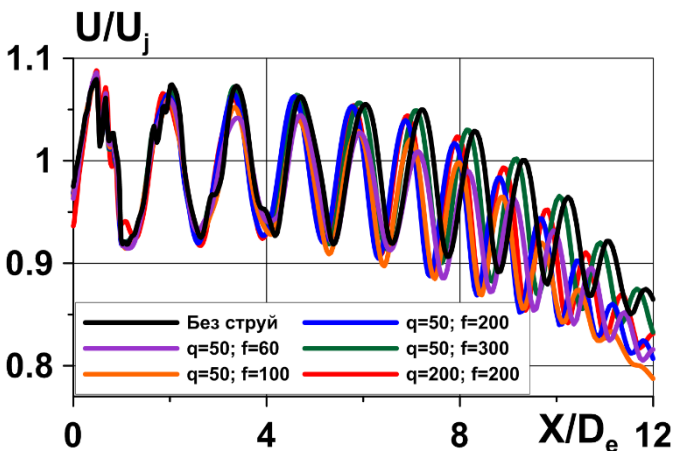


Без струй



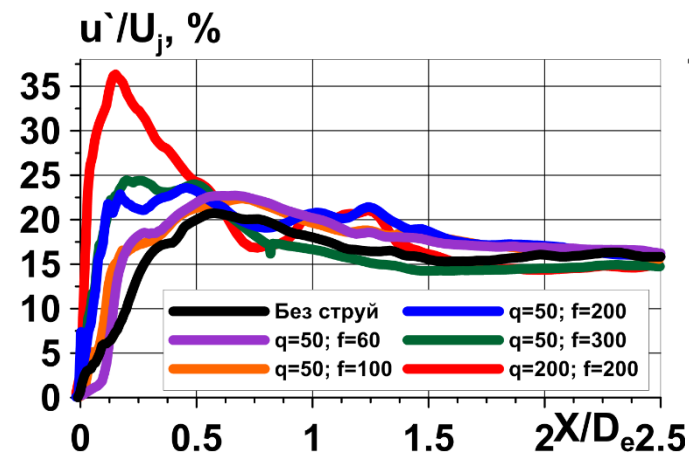
Струи с $q=50\text{ м/с}$; $f=100\text{ Гц}$

Влияние режимных параметров синтетических струй на течение и параметры турбулентности в холодной струе

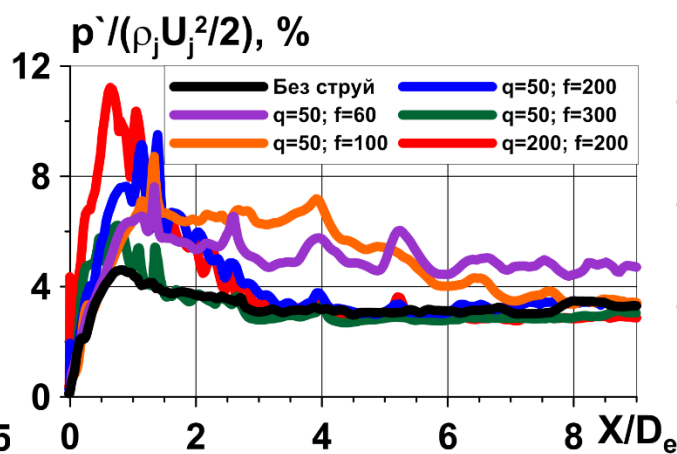


Распределение продольной скорости вдоль оси струи

q , м/с	C_μ , %	f , Гц	Sh	длина начального участка, X/D_e
Без струй			0.0045	9.354
50	0.022	60	0.27	7.24
50	0.022	100	0.45	7.12
50	0.022	200	0.90	8.02
50	0.022	300	1.35	9.2
200	0.35	200	0.90	8.11



Распределение пульсаций продольной скорости в слое смешения

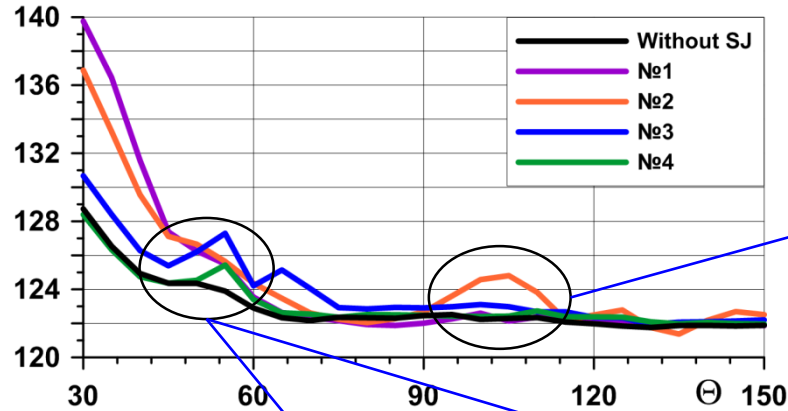


Распределение пульсаций статического давления в слое смешения

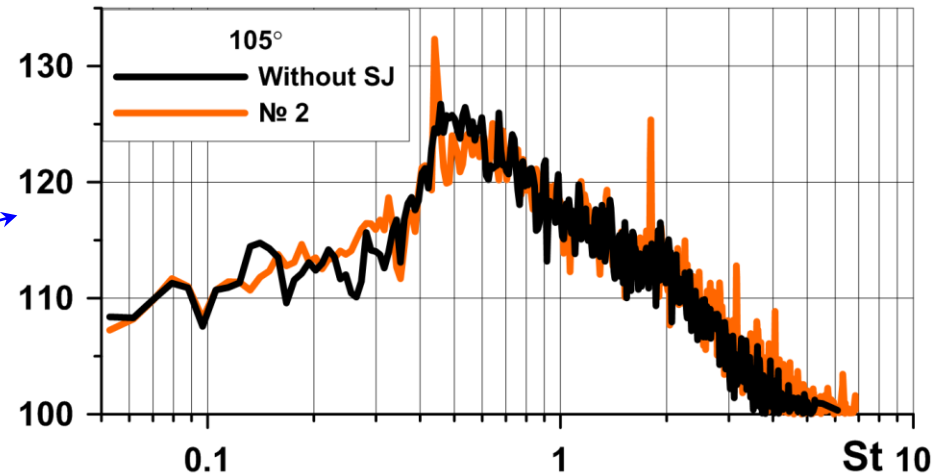
- Возрастают пульсации статического давления
- Длина начального участка уменьшается до 25%
- На длину начального участка заметное влияние оказывает изменение частоты синтетических струй
- Частота скрича $Sh=0.267$

Влияние синтетических струй на уровень и спектры шума в дальнем поле струи

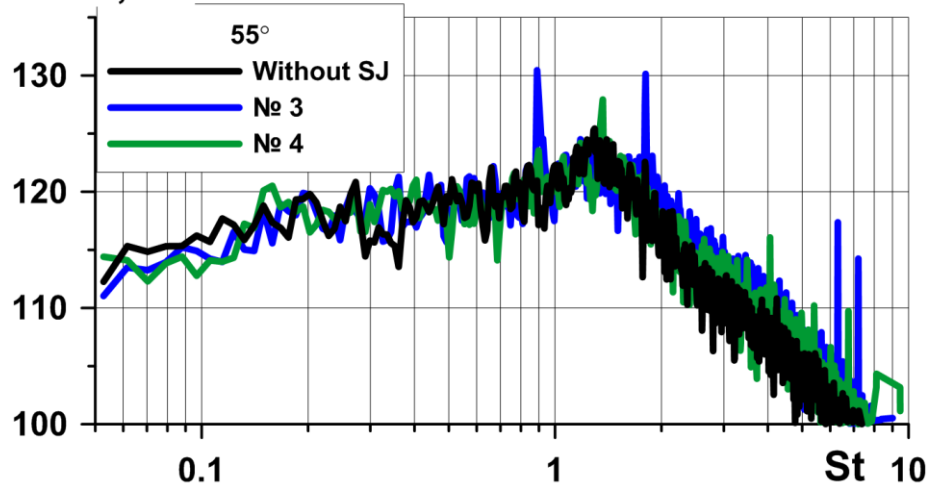
OASPL, dB



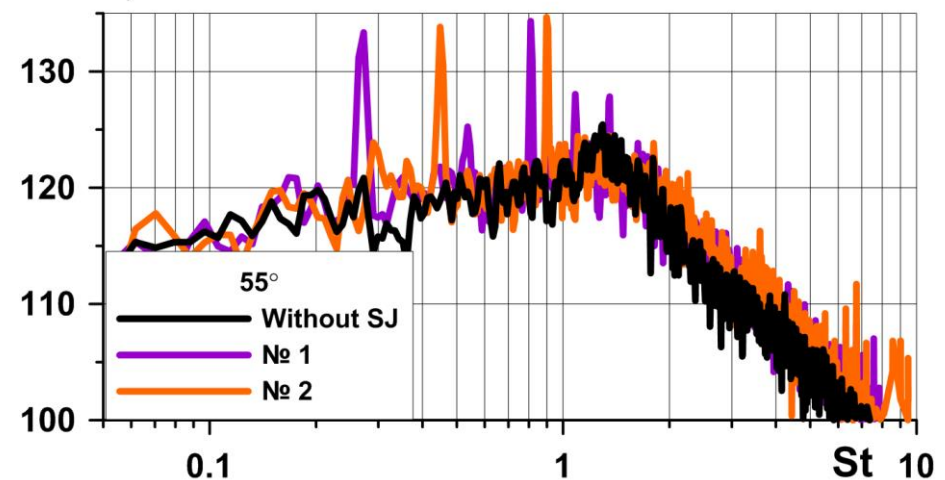
PSD, dB



PSD, dB

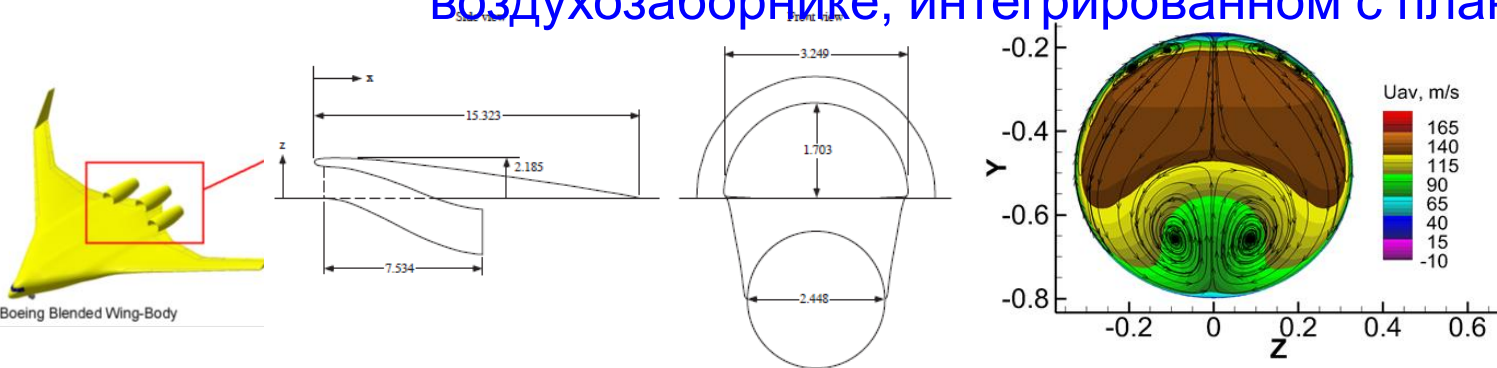


PSD, dB



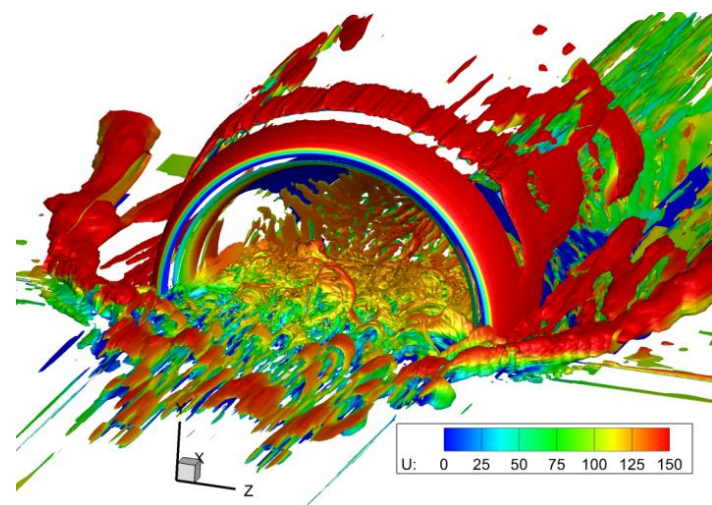


Влияние дросселирования на эффективность газодинамического управления течением, спектральные свойства и уровень пульсаций давления в S-образном воздухозаборнике, интегрированном с планером самолета



Уровень окружной
неравномерности
 $\Delta\sigma_0=4.1\%$

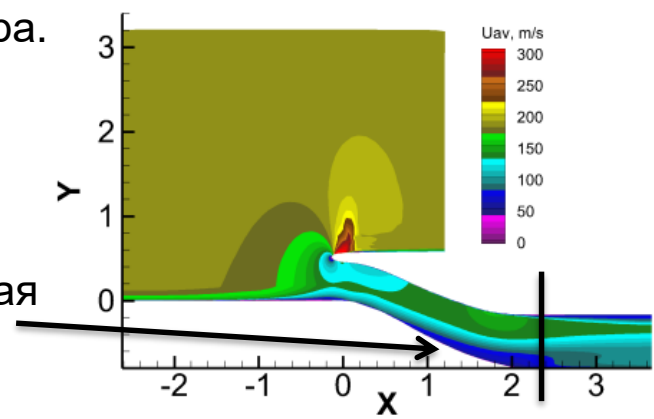
Общий вид геометрии ВЗ



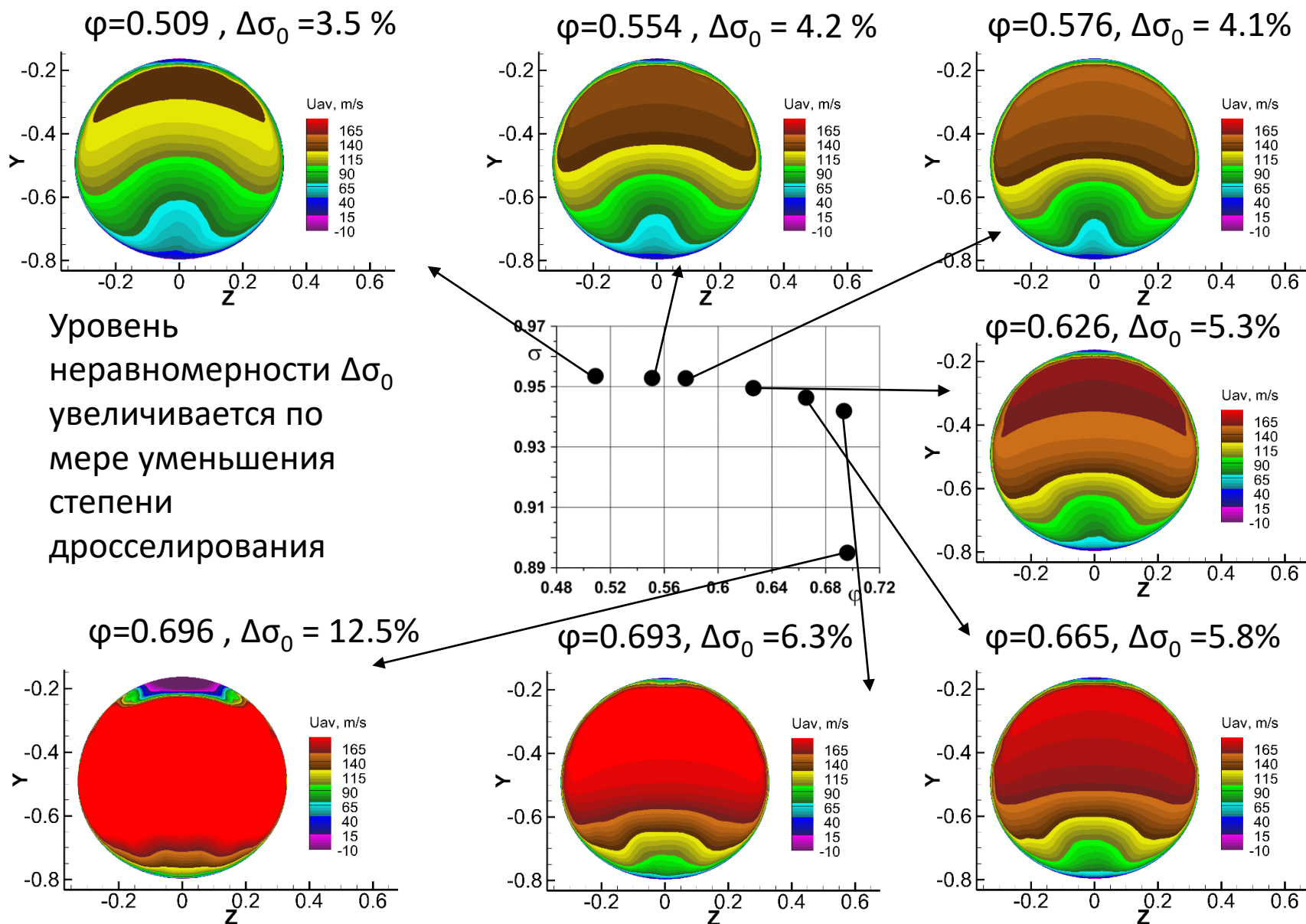
На вход в ВЗ попадает толстый турбулентный пограничный слой.
(Изоповерхность Q-критерия)

В диффузоре ВЗ происходит кардинальная перестройка течения, которая обусловлена как изменением формы поперечного сечения от D-образной на входе в ВЗ к круглой в выходном сечении, так и S-образной геометрий диффузора в продольном направлении. В результате образуются пара продольных вихрей в нижней части диффузора, которые вызывают перетекание пограничного слоя со стенок в нижнюю часть диффузора.

Низкоскоростная область



Влияние степени дросселирования на поля осредненной скорости и уровень окружной неравномерности в выходном сечении ВЗ



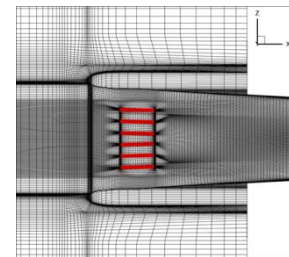
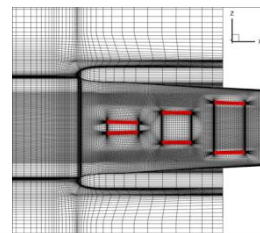
Влияние положения синтетических струй на поля осредненной продольной скорости в выходном сечении характеристики ВЗ

№1 - reverse_pyramid

№2 - middle_angle

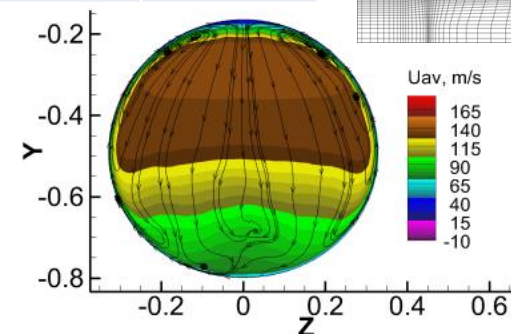
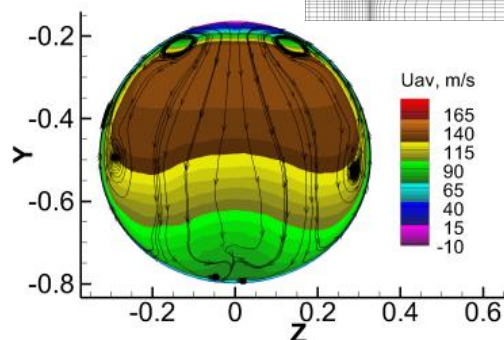
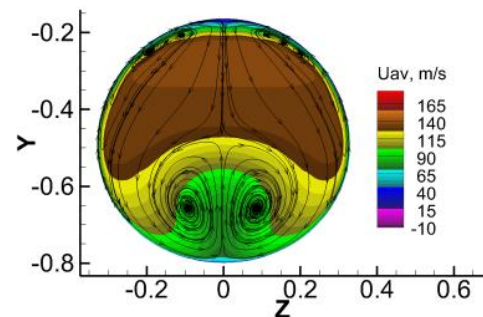
без струй

Рассмотрено около 20 вариантов СС. Эффективными оказались **reverse_pyramid** и **middle_angle** с $q=150$ м/с, $f=100$ Гц

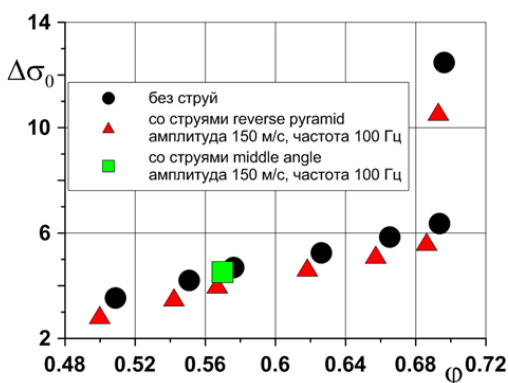


Коэффициент импульса струй

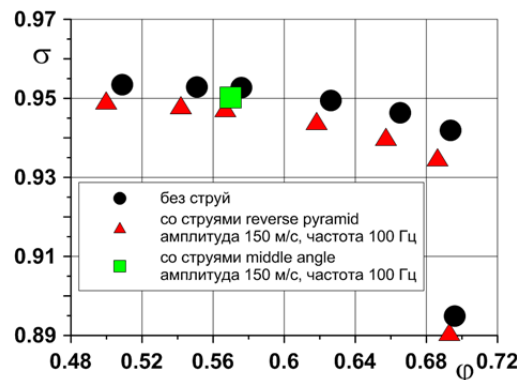
	$C_\mu, \%$
№1	0.443
№2	0.657



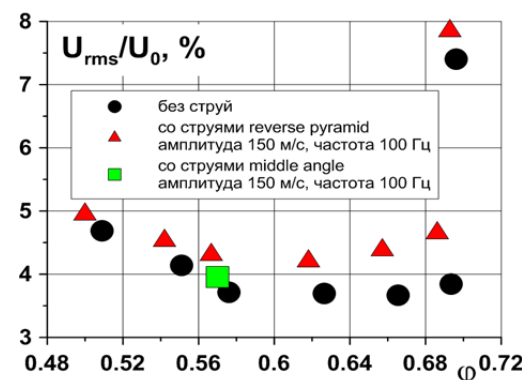
Синтетические струи разрушают парные вихри в нижней части сечения, вследствие чего уменьшается неравномерность распределения параметров в окружном направлении.



уровень окружной
неравномерности

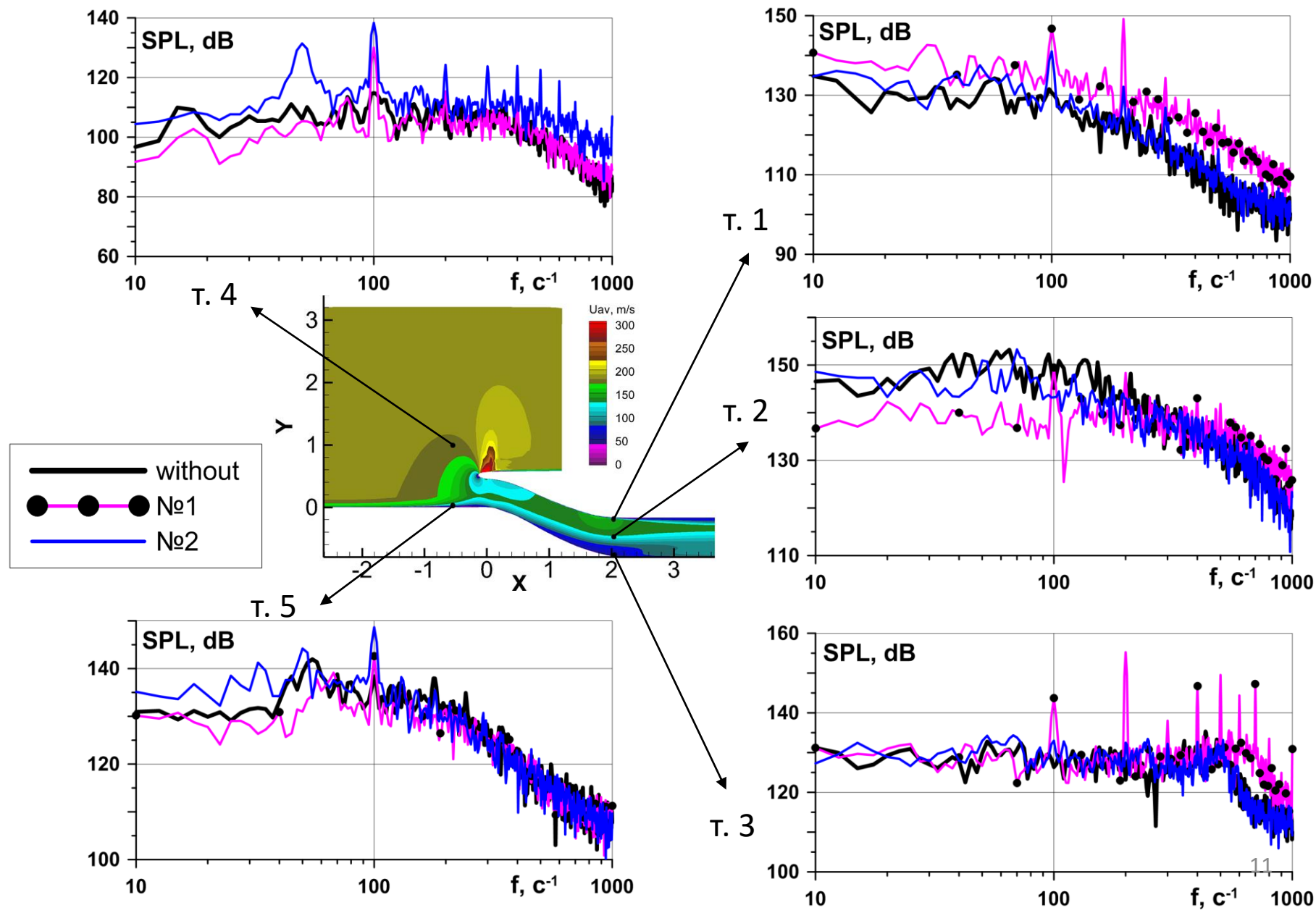


коэффициент восстановления
полного давления

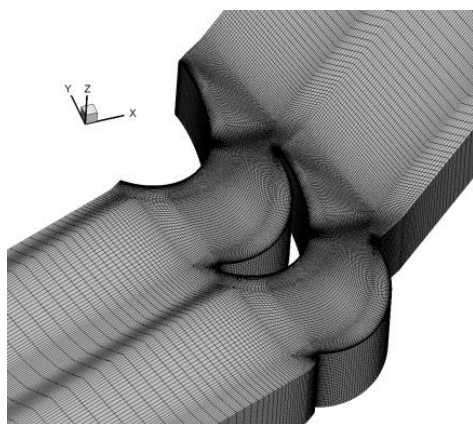


уровень пульсаций
скорости

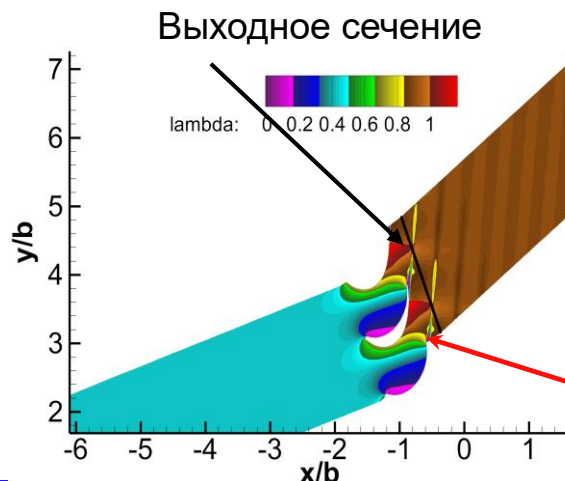
Воздействие синтетических струй на спектральные свойства пульсаций давления в диффузоре ВЗ



Управление течением в решетке профилей с помощью синтетических струй



Фрагмент расчетной сетки

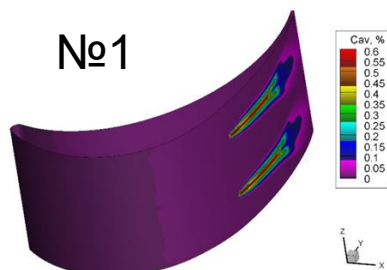


Поле осредненной приведенной скорости в продольном сечении

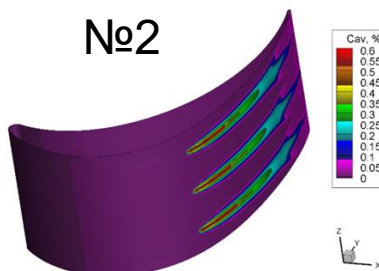
$P_{0in} = 101 \text{ КПа}$, $T_{0in} = 288 \text{ К}$, число, $Re = 566761.7$, $P_{out} = 60000 \text{ Па}$, сетка 1.2×10^6 ячеек.

На внешней кромке лопаток появляется область с пониженной или отрицательной скоростью и, как следствие, сильная неравномерность на выходе из межлопаточного канала

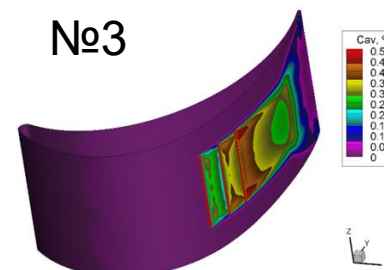
Варианты расположения щелей для выхода синтетических струй



№1



№2



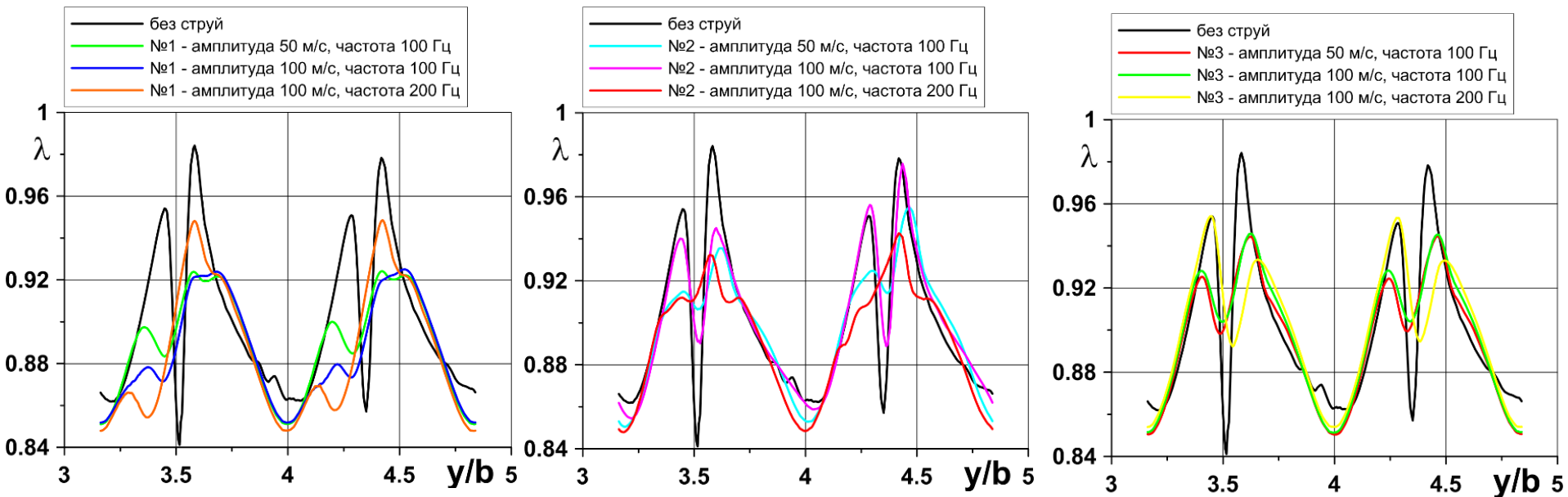
№3

Режимные параметры синтетических струй

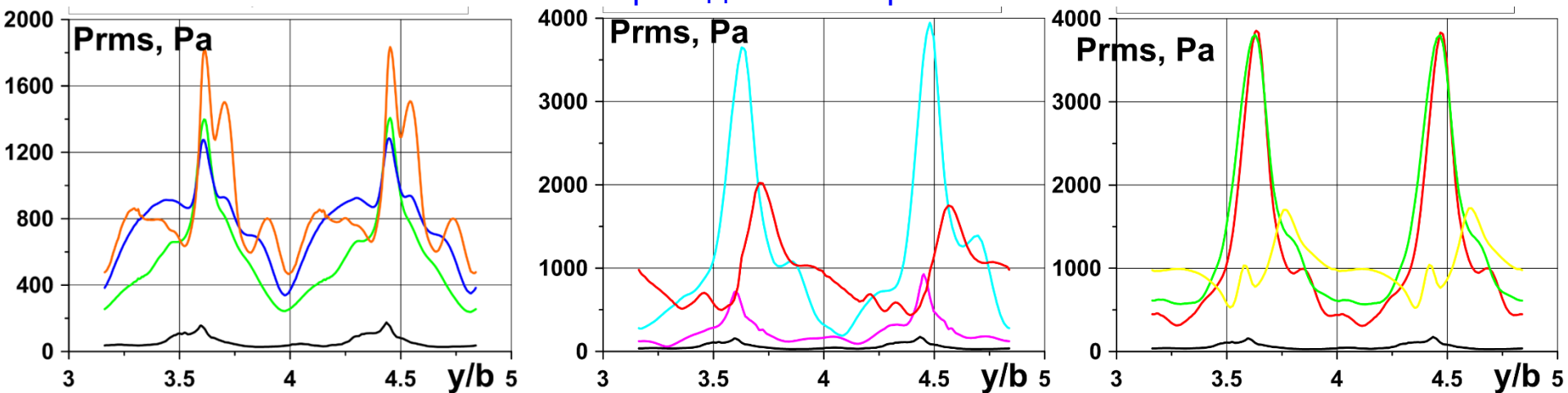
Вариант расположения	№1			№2			№3		
Частота, м/с	50	100	100	50	100	100	50	100	100
Амплитуда, Гц	100	100	200	100	100	300	100	100	200



Влияние синтетических струй на течение за турбинной решеткой

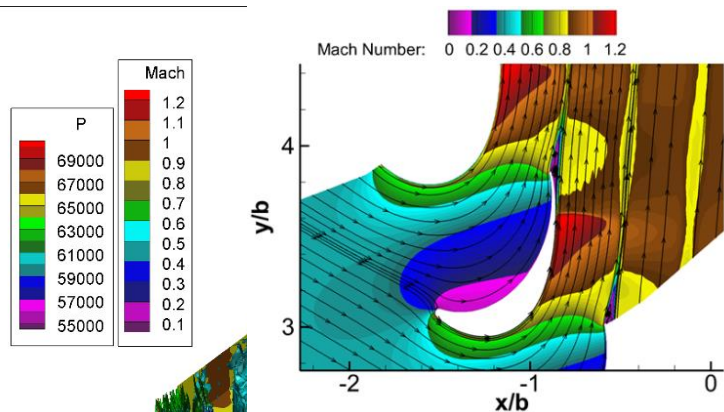


Приведенная скорость

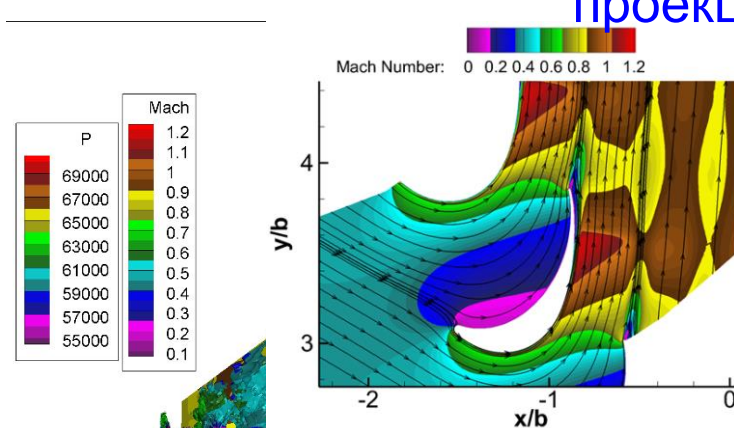


Пульсации статического давления

Синтетические струи существенно выравнивают и турбулизируют течение за лопатками

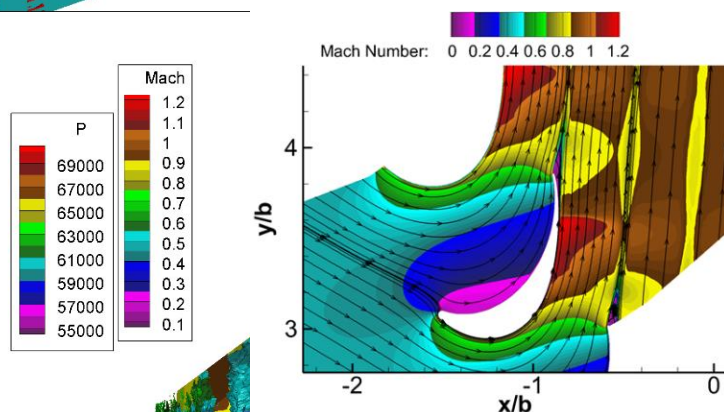


Без струй

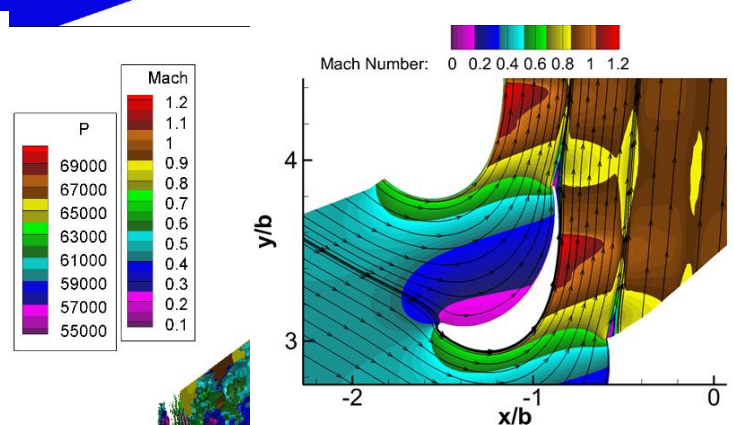


№1

Происходит уменьшение отрыва на выходной кромке лопаток.



№2

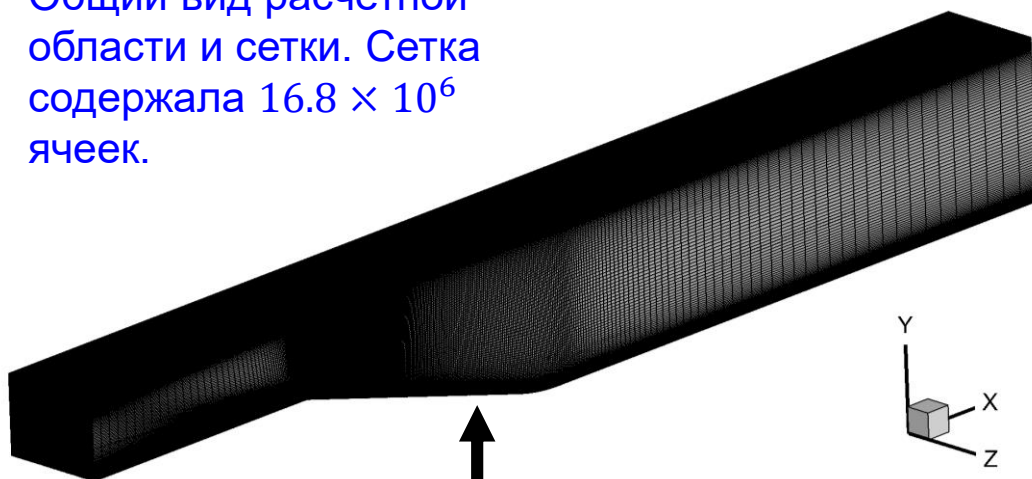


№3

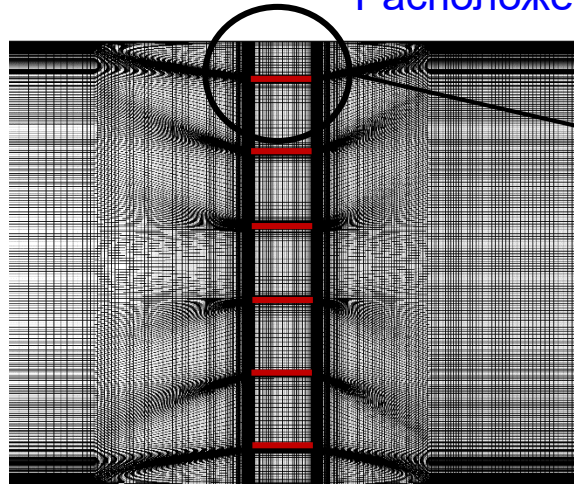
Изоповерхность Q-критерия в цветах давления, сечения – в цветах числа Маха

Влияние сверхкритических синтетических струй на течение в модельном диффузоре

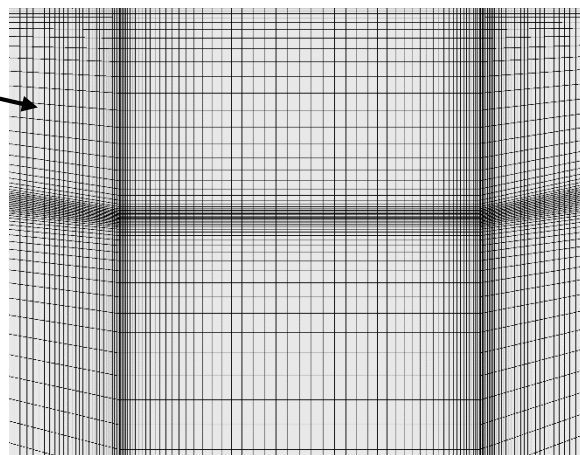
Общий вид расчетной области и сетки. Сетка содержала 16.8×10^6 ячеек.



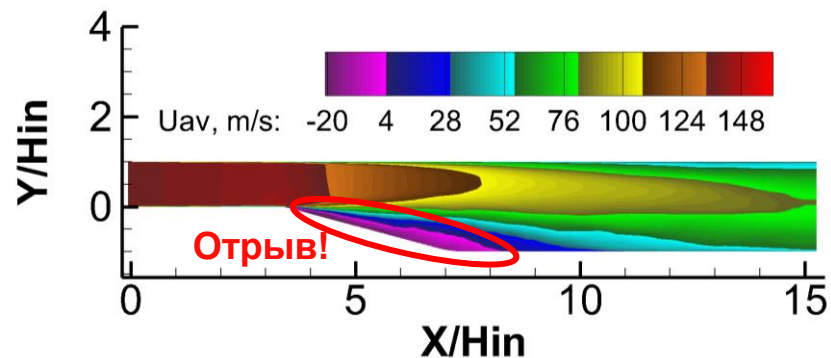
Расположение синтетических струй



Расположение синтетических струй, вид снизу

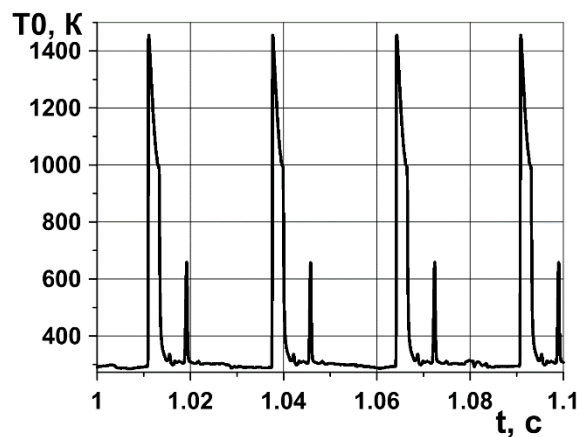
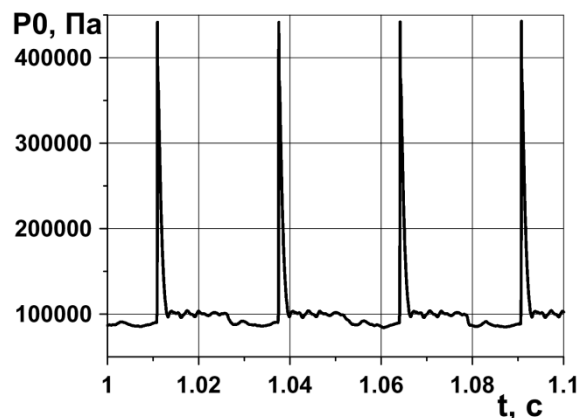


Сетка около щелей для выхода синтетических струй

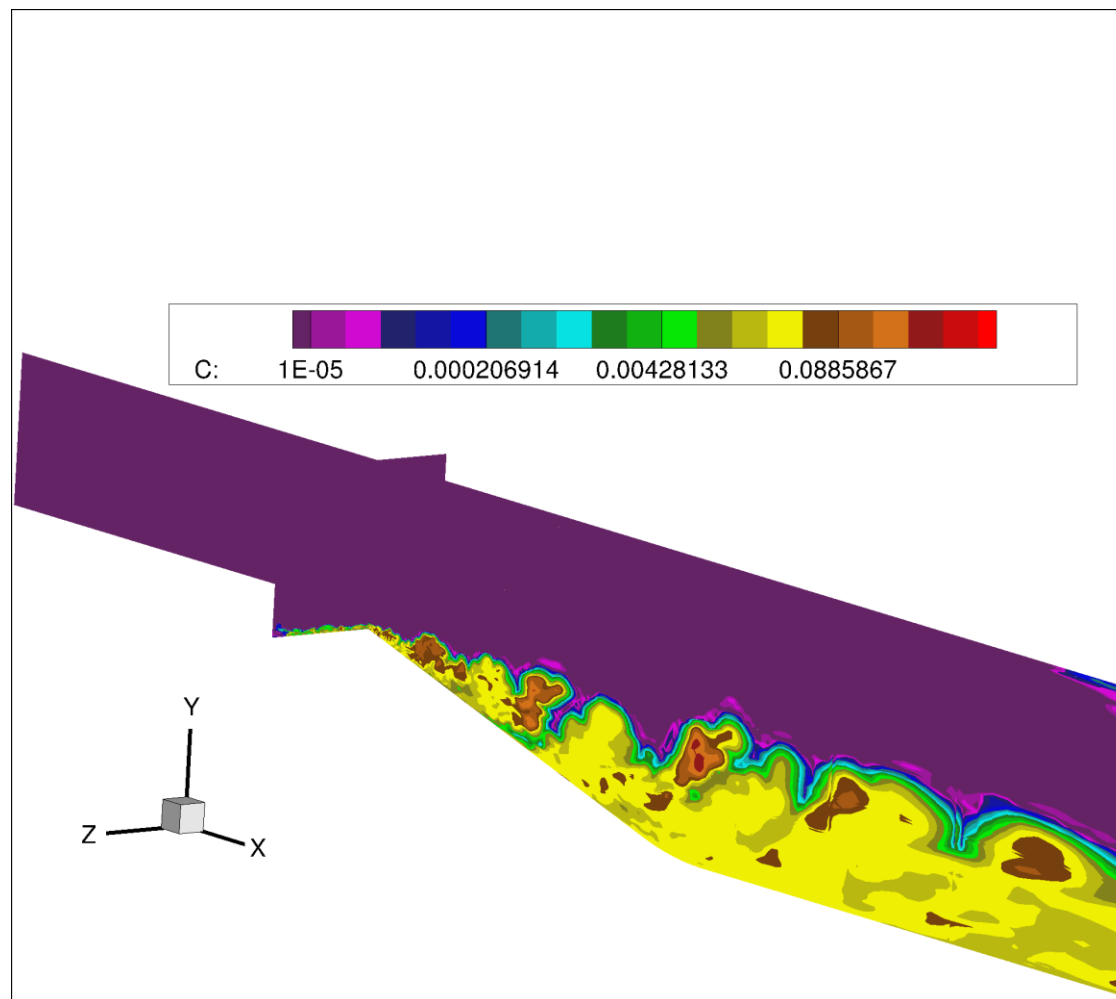


Поле распределения продольной скорости в сечении $Z=0$ без синтетических струй

Полные параметры на входе:
 $P_{0in} = 101 \text{ КПа}$ и $T_{0in} = 288 \text{ К}$.
 Число Рейнольдса 6.4×10^5 . На выходе задавалось статическое давление $P_{out} = 96 \text{ КПа}$.
 Струи выдувались по нормали к стенке.



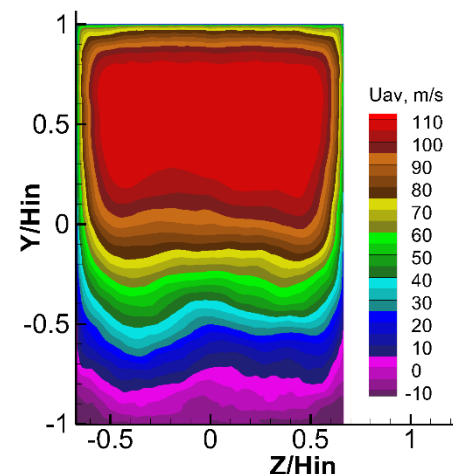
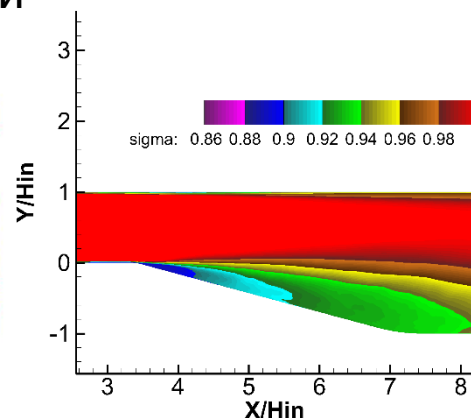
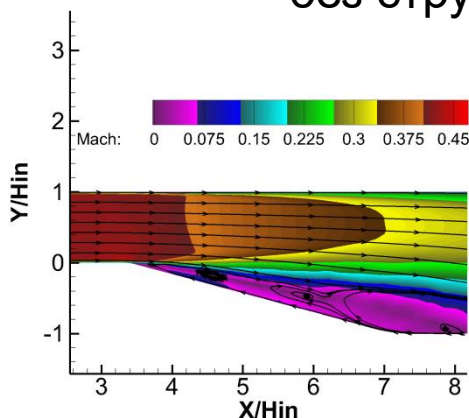
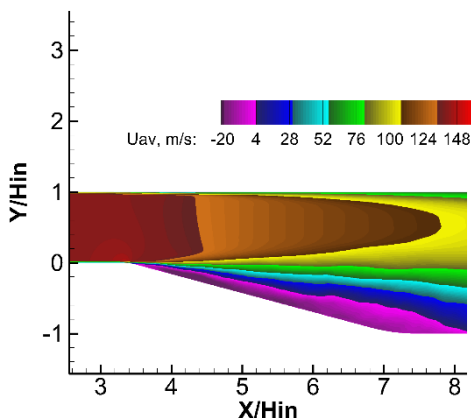
Осциллограммы полного давления и температуры на срезе щели во время действия сверхкритических синтетических струй



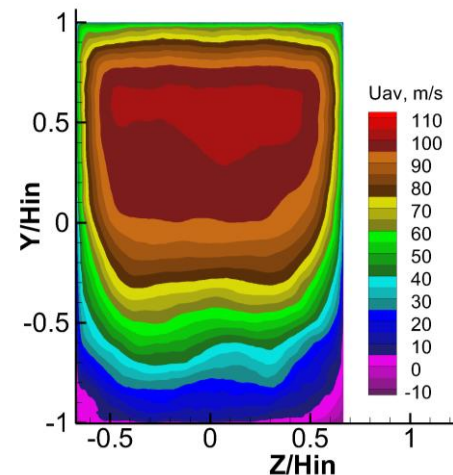
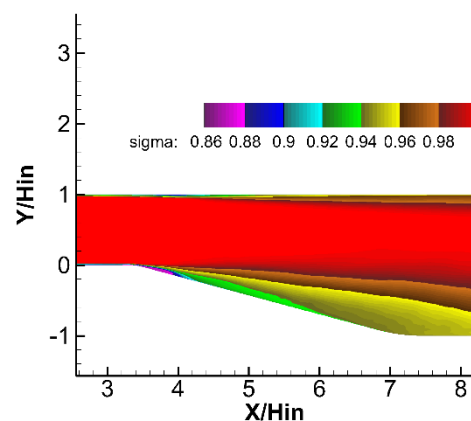
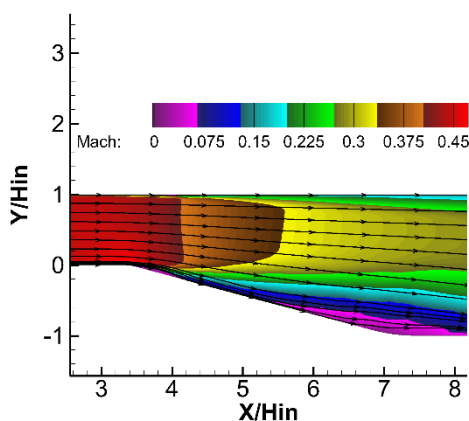
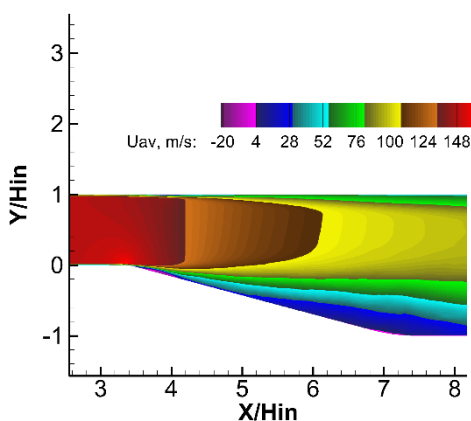
Нестационарное поле пассивной примеси, которой помечены синтетические струи

Влияние сверхкритических синтетических струй на распределение параметров в продольном $Z=0$ и в поперечном $X=7.5$ сечениях

без струй



со струями



Осредненная
продольная скорость

Число Маха и
линии тока

Коэффициент
восстановления
полного давления

Осредненная
продольная скорость в
поперечном сечении

Влияния неоднородного набегающего потока на течение, спектральные свойства и уровень пульсаций давления в сверхзвуковом воздухозаборнике



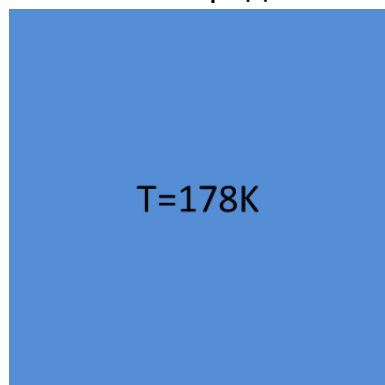
Геометрия ВЗ и режимные параметры:
[Trapier S. et. el. //AIAA J. 2006. V. 44. № 10. P. 2354.]



Сечение расчетной сетки, 4.5млн ячеек. Красной линией обозначено выходное сечение, где брались параметры потока для характеристик ВЗ.

$P_0=2.4 \times 10^5$ Па $T_0=320$ К
 $M=2$ $Re=2.7 \times 10^6$

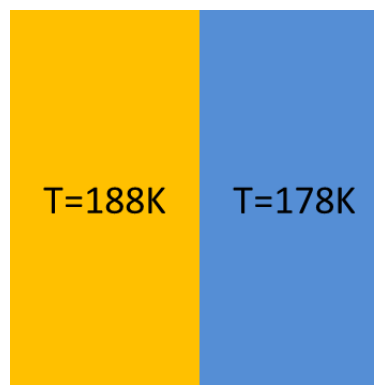
Неоднородность потока создавалась изменением температуры на части входной границы расчетной области перед ВЗ.



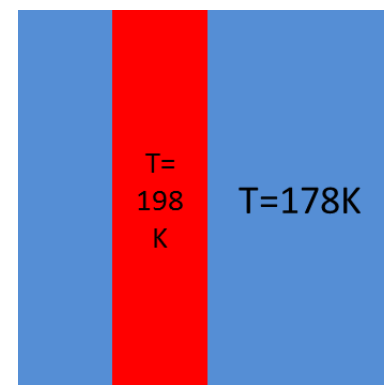
Однородный поток
 $M=2$



Однородный поток
 $M=1.97$

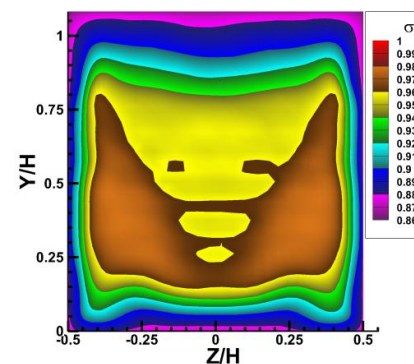
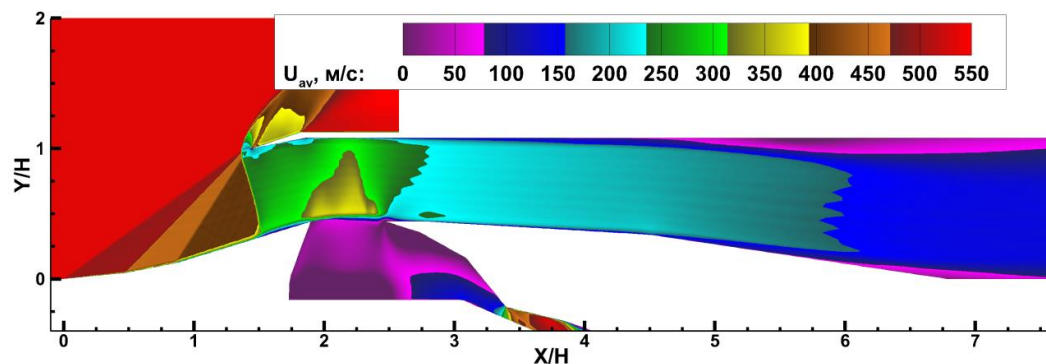


Половина подогрета на
 $\Delta T=10$ К $M_{cp}=1.97$

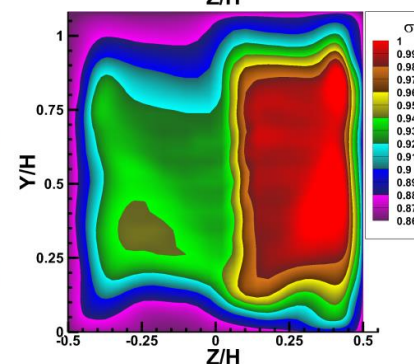
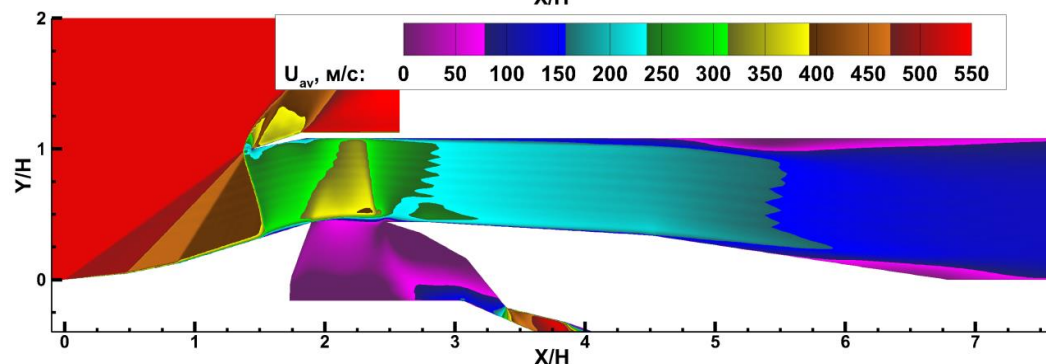


Четверть подогрета на
 $\Delta T=20$ К $M_{cp}=1.97$

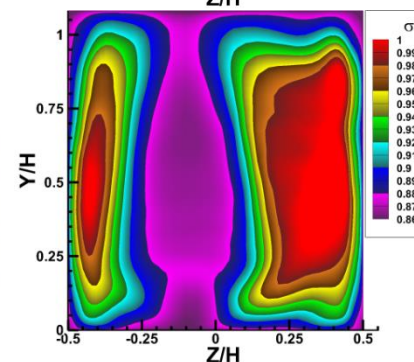
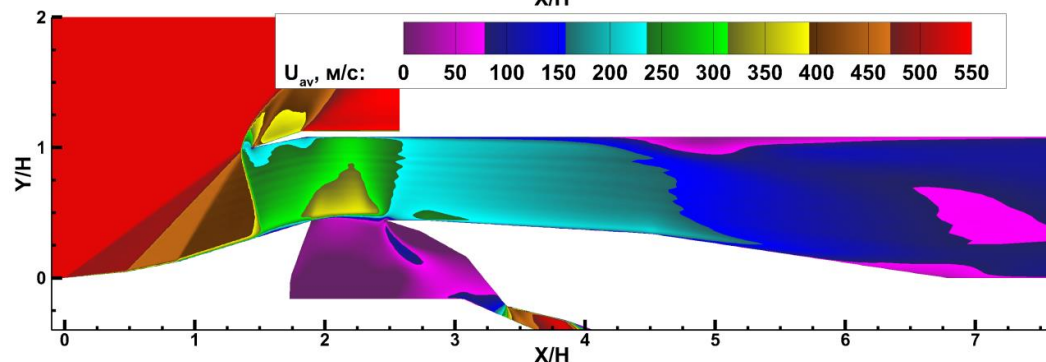
В трех конфигурациях, отличных от расчетной для данного ВЗ, среднее число Маха составило $M_{cp}=1.97$.



$\Delta T = 5K$
во всем потоке



$\Delta T = 10K$
в половине потока

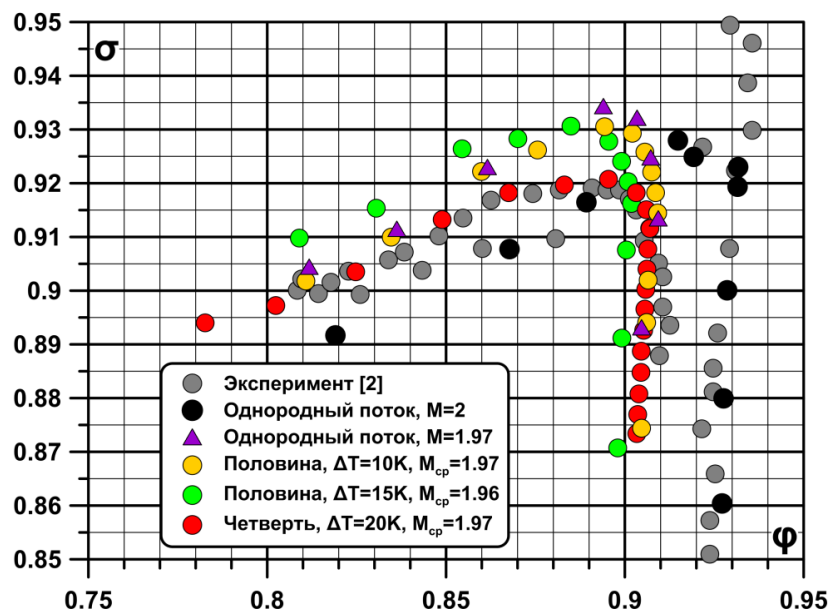


$\Delta T = 20K$
в четверти потока

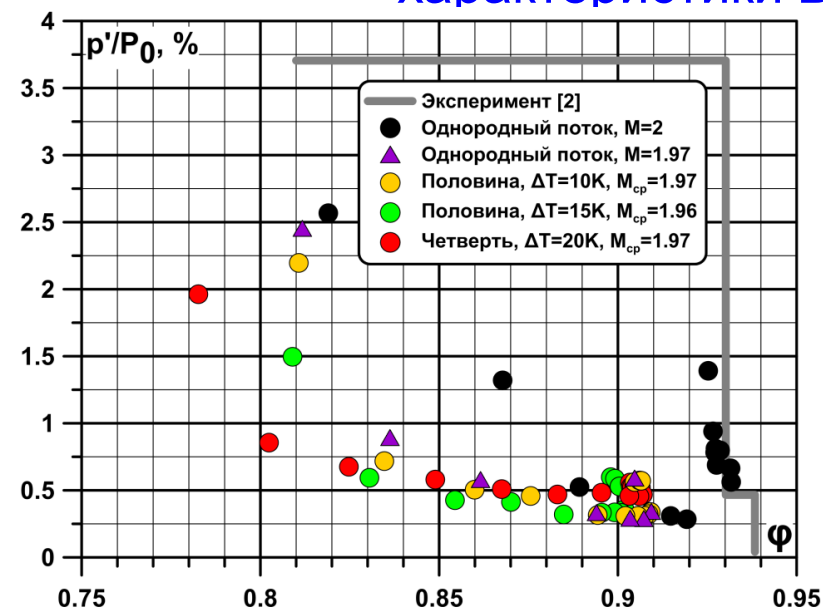
Продольная скорость

σ на выходе

Полное давление в выходном сечении $X/H=7$ отнесено, как и на дроссельной характеристике, к среднему полному давлению на входе. На выходе из ВЗ неоднородность сохраняется с четкими границами. При $\Delta T = 20K$ отрывная область на верхней стенке становится больше.



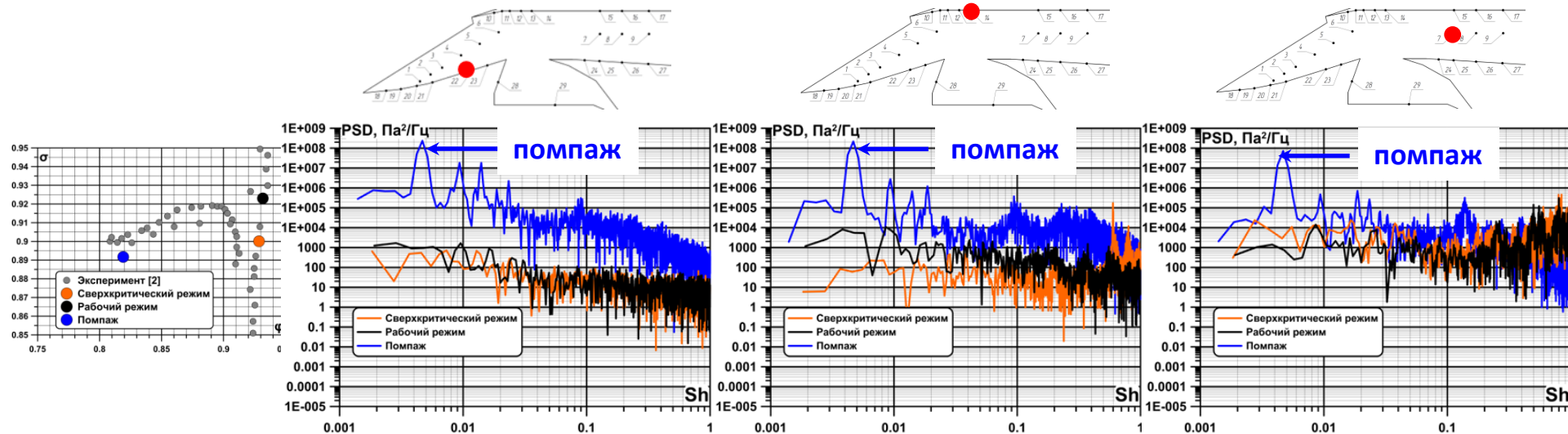
Дроссельная характеристика ВЗ



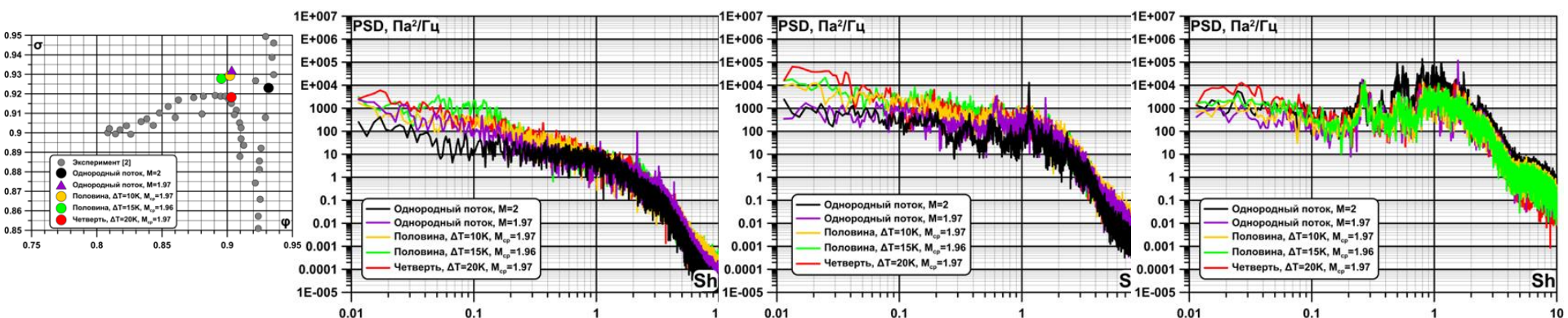
Пульсации статического давления на выходе

- Удовлетворительное совпадение расчета и эксперимента в условиях однородного потока с $M=2$ на сетке 4.5×10^6 ячеек.
- На сверхкритических режимах ϕ остается одинаковым для всех трех вариантов со средним числом Маха $M_{cp}=1.97$.
- В «угловой точке» снижается σ : на **0.5%** для **$\Delta T=10K$** и на **1.6%** для **$\Delta T=20K$** по сравнению с однородным потоком **$M=1.97$** .
- При помпаже на дроссельной характеристике отличия незначительны, но при одинаковой степени дросселирования с неоднородностью в потоке существенно, до **3 раз**, снижается интенсивность **пульсаций статического давления** в выходном сечении.

Влияние дросселирования и неоднородности на входе на спектры пульсаций давления в различных точках ВЗ

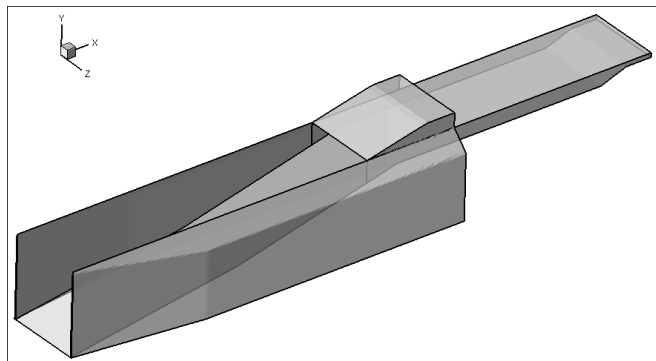


Влияние дросселирования на спектр пульсаций в канале ВЗ



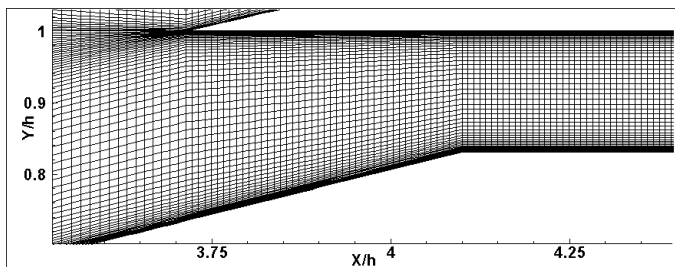
Рабочий режим. Влияние неоднородности на входе на спектры пульсаций давления в различных точках ВЗ

Влияние дросселирования и переменной теплоемкости воздуха на течение и спектральные свойства пульсаций давления в канале высокоскоростного ВЗ



Общий вид геометрии ВЗ при расчетах

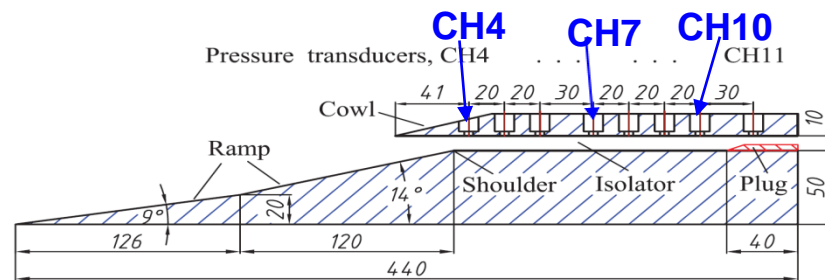
Расчетная сетка содержала 4.42×10^6 ячеек



Фрагмент сетки около входа в изолятор

В расчетах были использованы геометрия модели ВЗ и данные эксперимента из статьи: Li Z., Gao W., Jiang H., Yang J. Unsteady Behaviors of a Hypersonic Inlet Caused by Throttling in Shock Tunnel // AIAA J. 2013. V. 51, № 10. P. 2485- 2492.

Зависимость теплоемкости от температуры аппроксимировалась степенными полиномами JANAF.



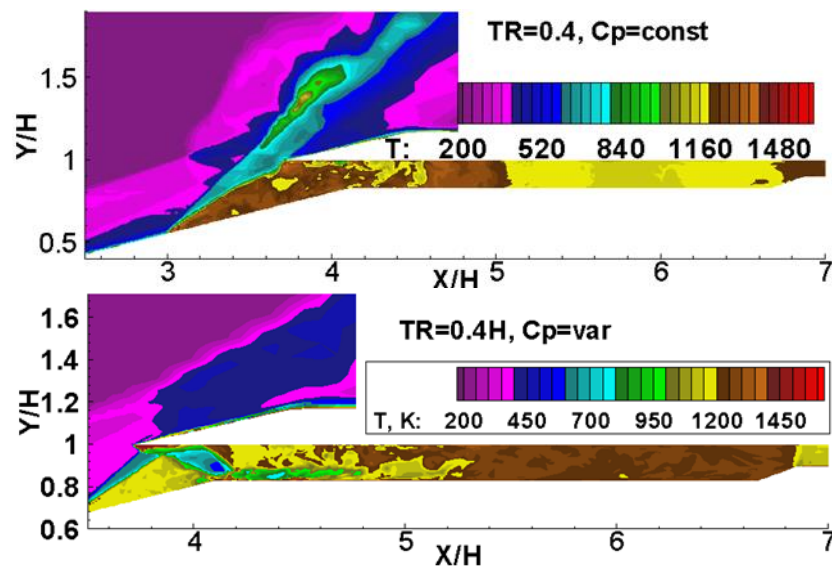
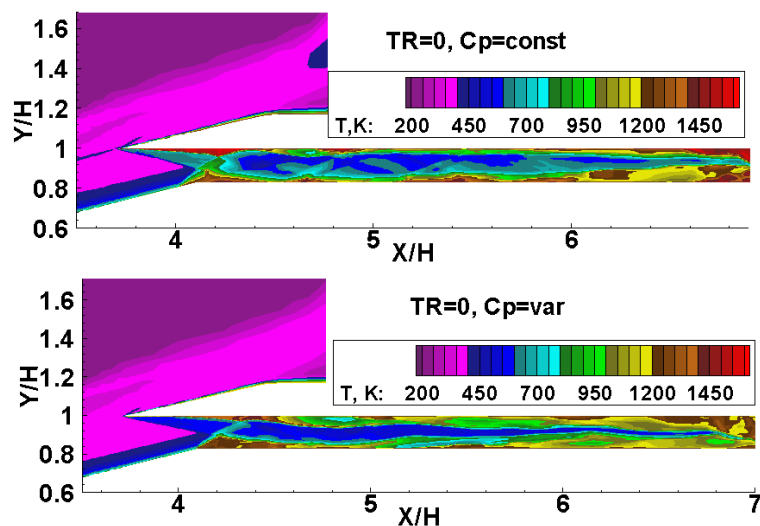
На входе число M_0 , статическое давление набегающего потока и на выходе из изолятора соответствовали эксперименту, но температура набегающего потока была выше $T_{sta}=217K$ (в эксперименте $T_{sta}=102K$) $Re=3.12 \times 10^5$.

Высота дроссельной вставки TR изменялась от 0 до $0.5H$ (H - высота канала изолятора).

TR=0

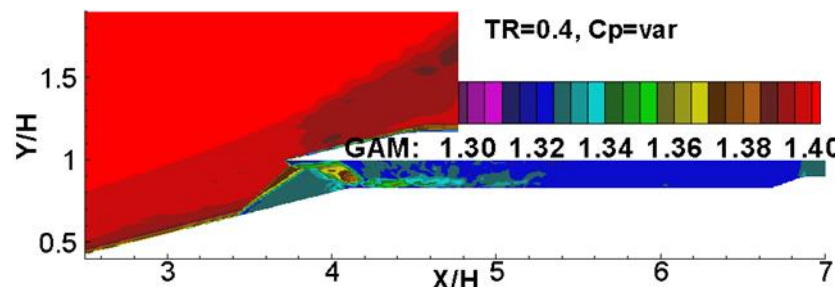
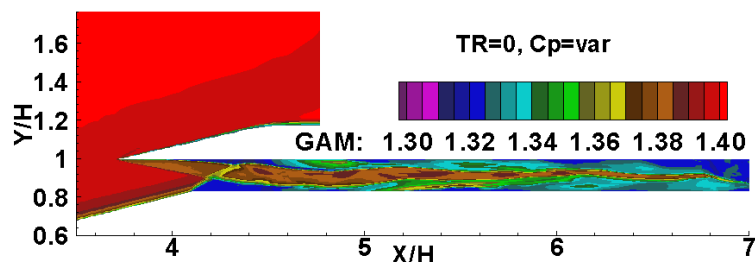
Мгновенная статическая температура

TR=0.4H



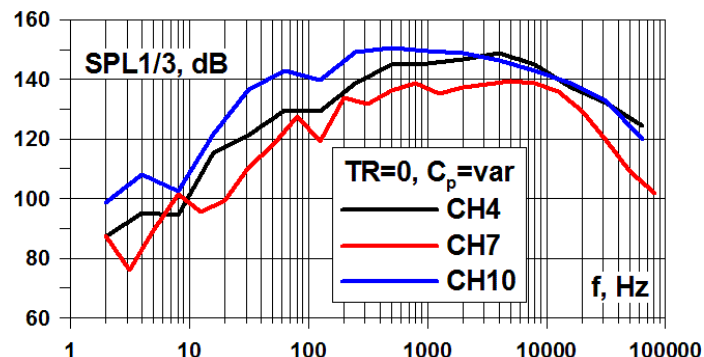
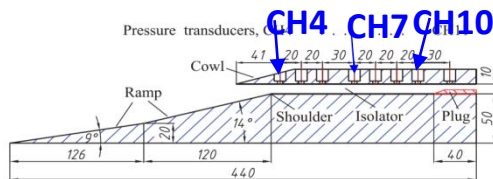
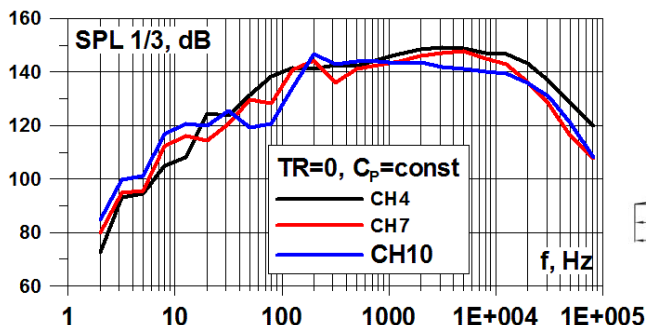
В случае $C_p=var$ меняется структура течения в канале изолятора, а максимальная температура ниже, чем в случае с постоянной теплоемкости.

Показатель адиабаты γ

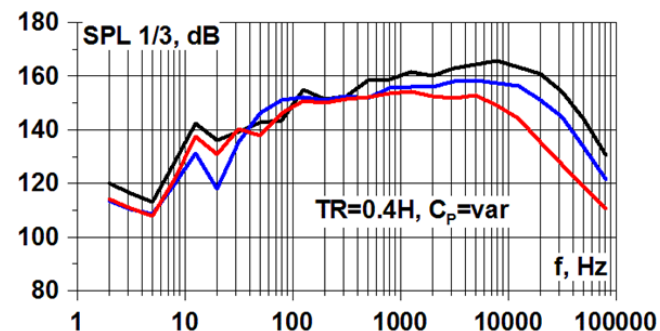
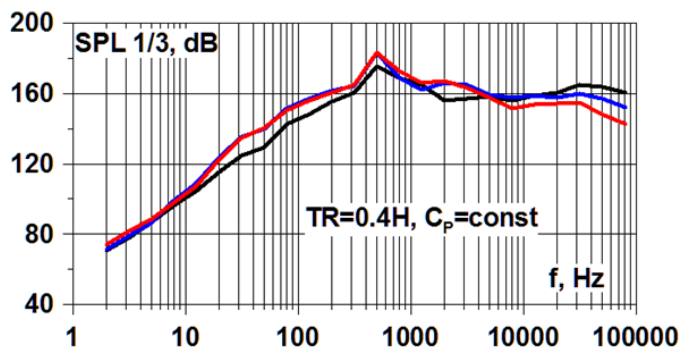


Малые значения γ наблюдаются в основном в зоне отрыва у нижней стенке около входа в изолятор и в окрестности выхода

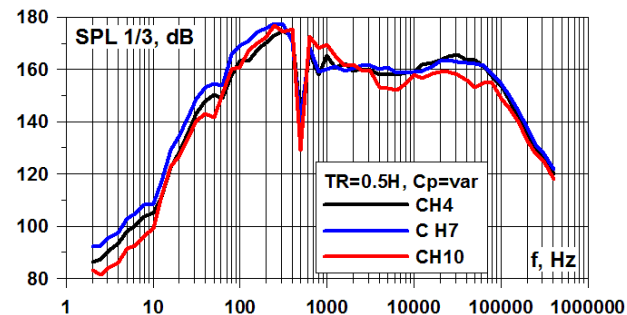
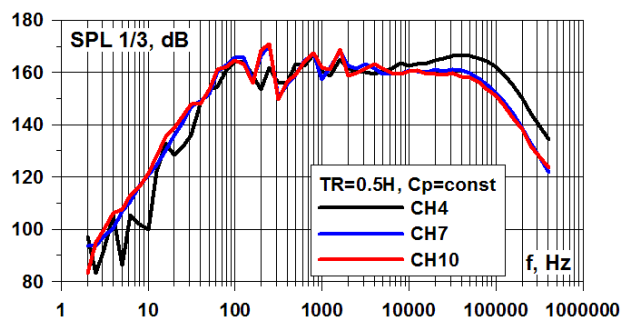
Область с низким уровнем γ занимает почти весь изолятор



При C_p =var пиковое значение в спектре пульсаций сильнее меняется по частоте по длине изолятора



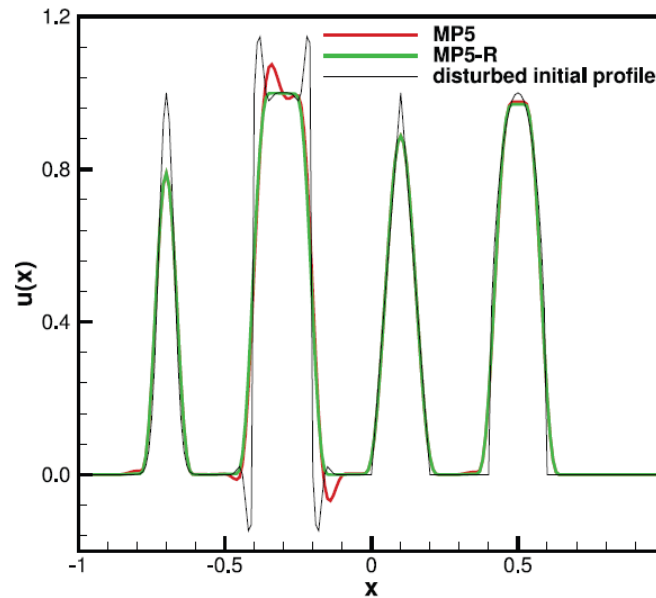
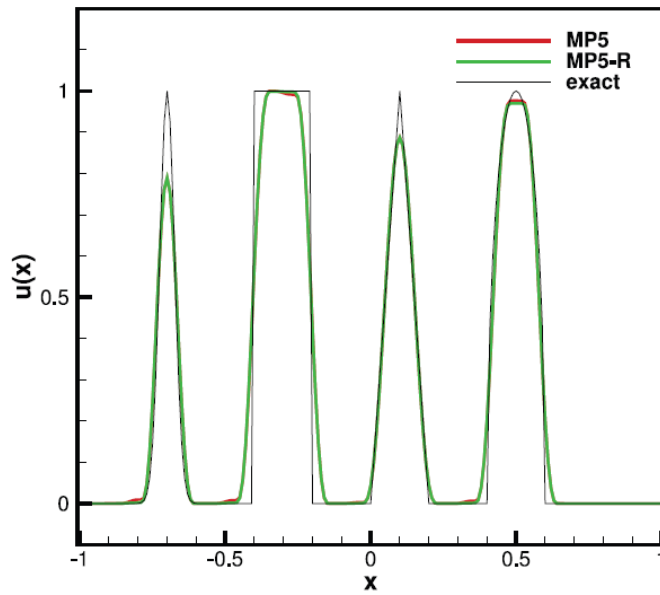
На частоте помпажа ($f=500$ Гц) наблюдается пик пульсаций давления. Для C_p =var 1/3 октавный спектр имеет небольшой подъем на высоких частотах, вызванный турбулентным характером течения. Похожий пик наблюдается и при C_p =const. Это свидетельствует, что спектральные характеристики, обусловленные турбулентными эффектами в обоих случаях близки.

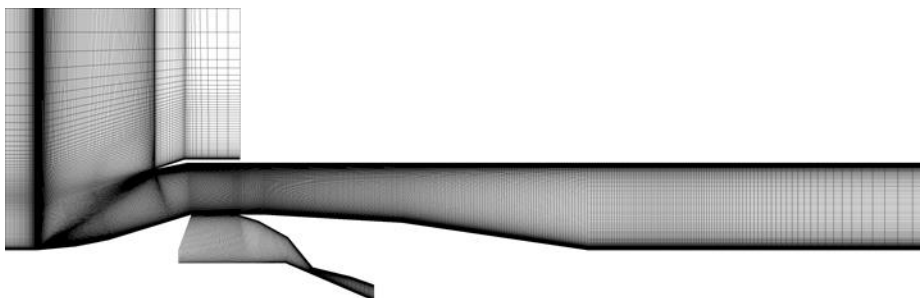


Для C_p =var SPL 1/3 спектра для разных датчиков частота пика пульсаций наблюдается при разных частотах.

Модифицированный вариант схемы MP9

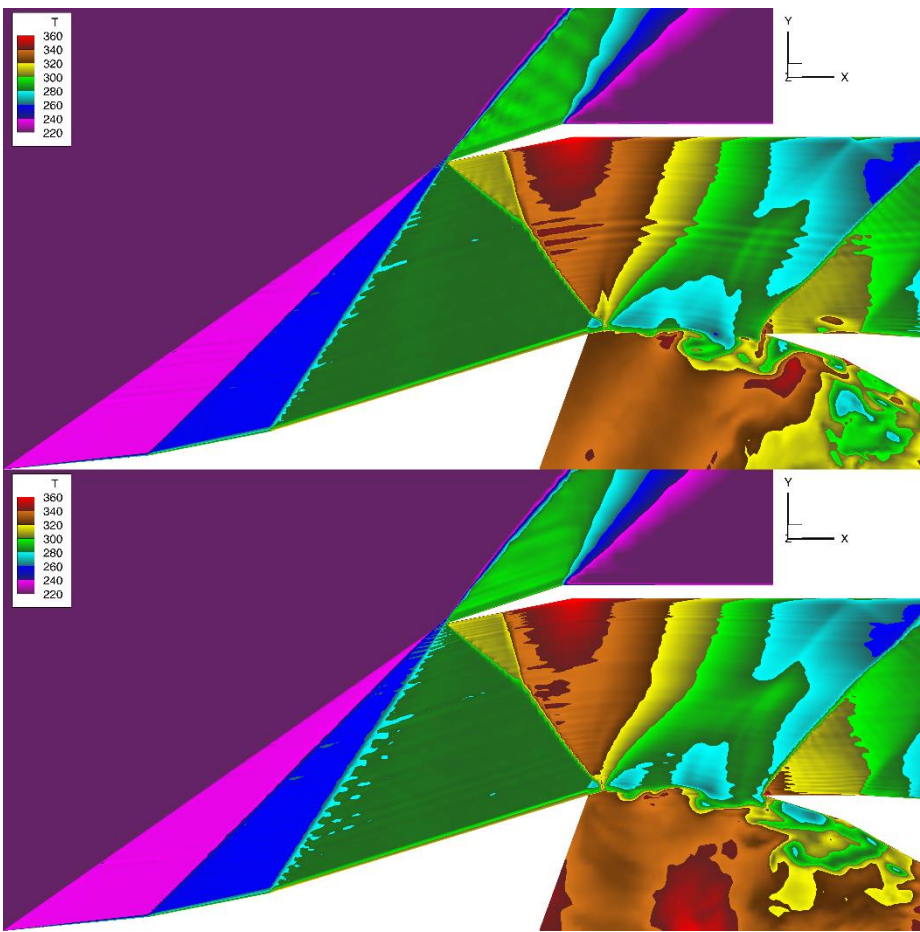
Наряду с исходным вариантом схемы MP, которая используется в RANS/ILES для расчета предраспадных параметров на гранях ячеек в методе Роу, описанным в статье [Suresh A , Huynh H . [Accurate monotonicity-preserving schemes with Runge- Kutta time stepping. //J. Comput. Phys. 1997.V. 136. P.83–99.](#)] для расчетов был использован модифицированный вариант схемы MP, предложенный авторами [He Z , Zhang Y. , Gao F. , Li X. , Tian B. [An improved accurate monotonicity-preserving scheme for the Euler equations //Computers and Fluids. 2016. V. 140. P. 1–10.](#)]. Он дополнен свойством TVD. По заявлениям авторов указанной статьи он повышает эффективность и надежность схемы MP, а также улучшает ее монотонность в окрестности больших градиентов течения (см. рисунки на этом слайде). Далее представлены результаты расчетов сложных сверхзвуковых течений со скачками уплотнения с использованием обоих вариантов схемы MP.



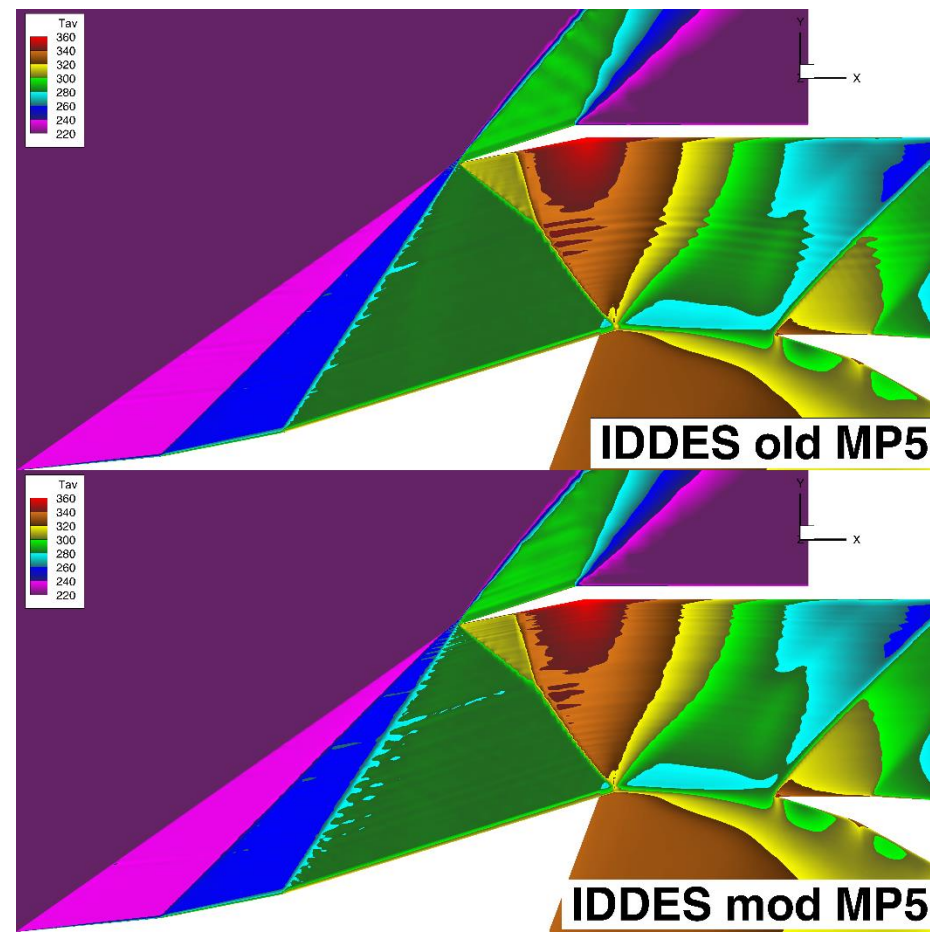


Сетка 18млн. ячеек

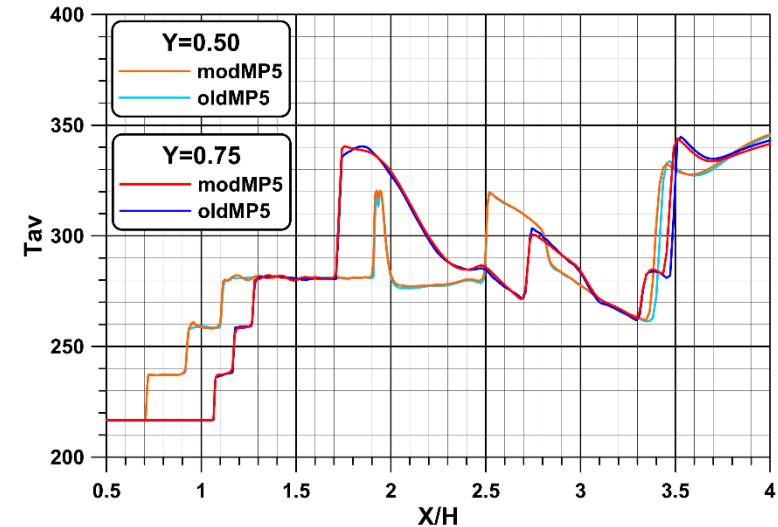
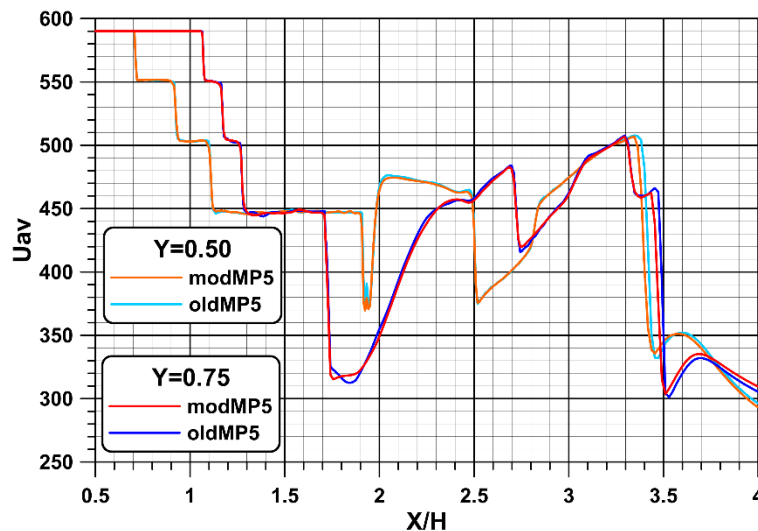
Мгновенная температура



Осредненная температура

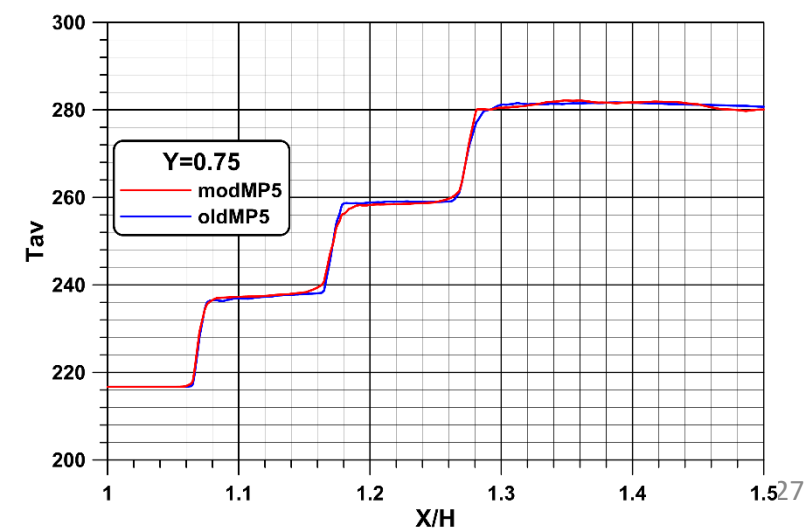
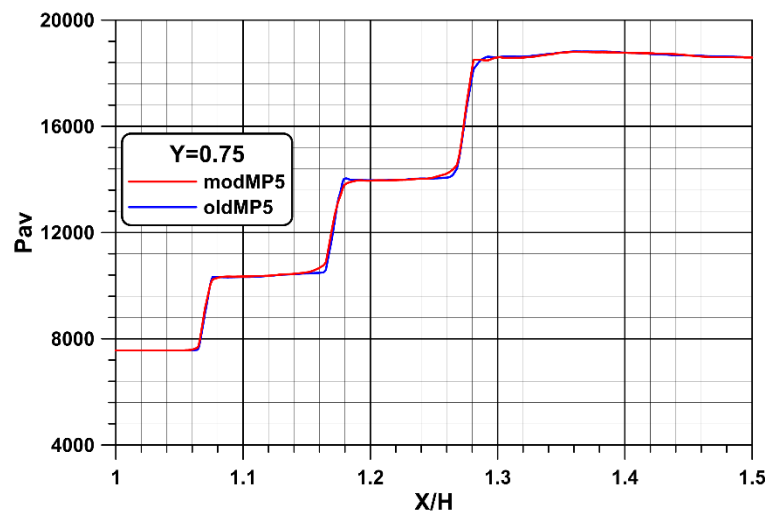


Распределение осредненных скорости, температуры и статического давления по линиям вдоль оси X

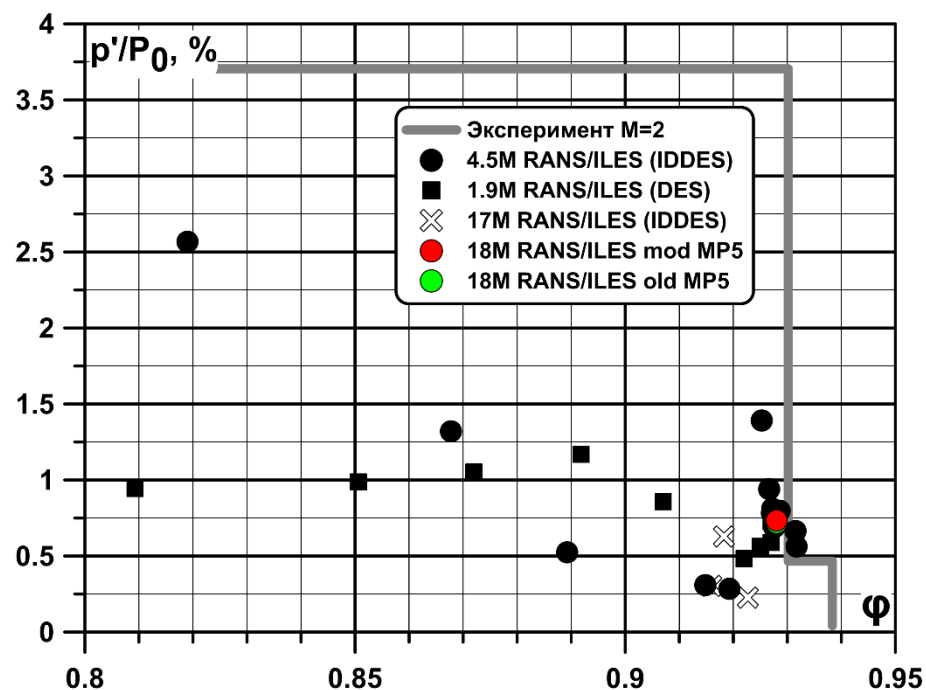
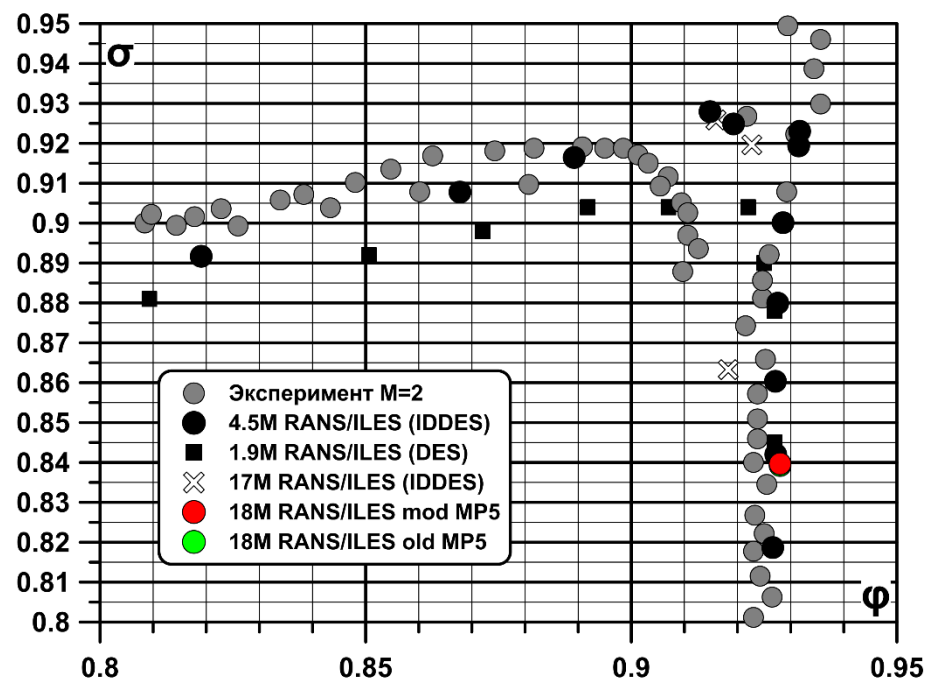


$Y=0.5$ — половина высоты входа, приходит близко к кромкам системы слива

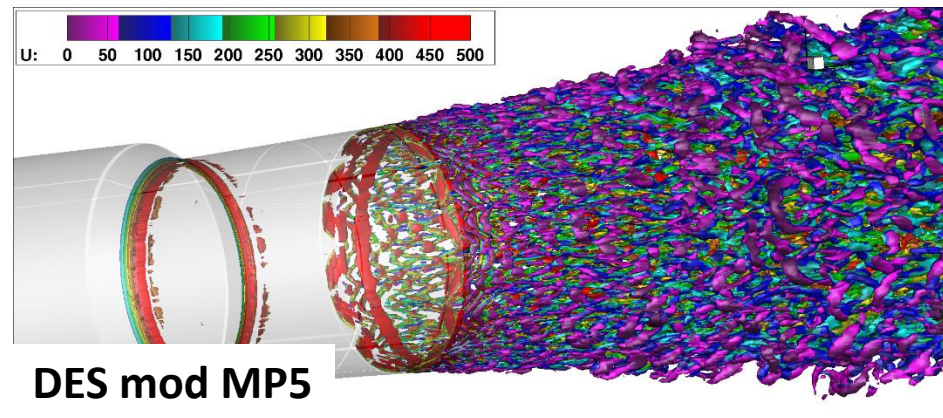
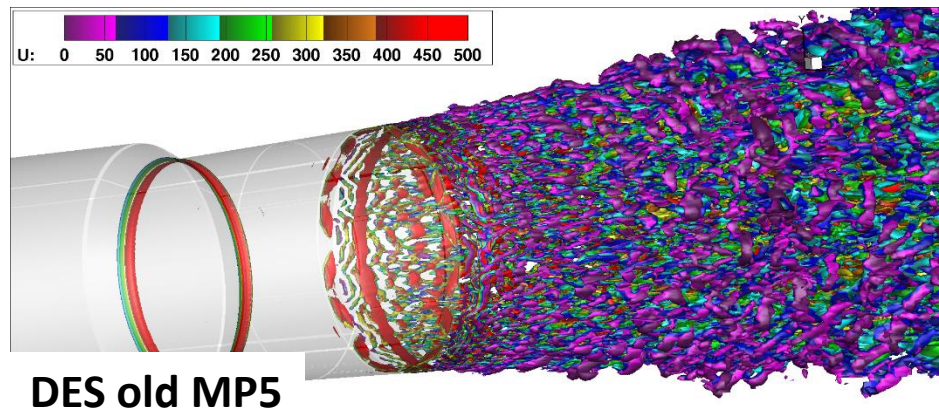
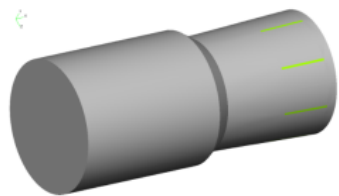
$Y=0.75$ — линия, проходящая примерно через середину горла ВЗ, где наблюдается максимальная «полосатость» течения



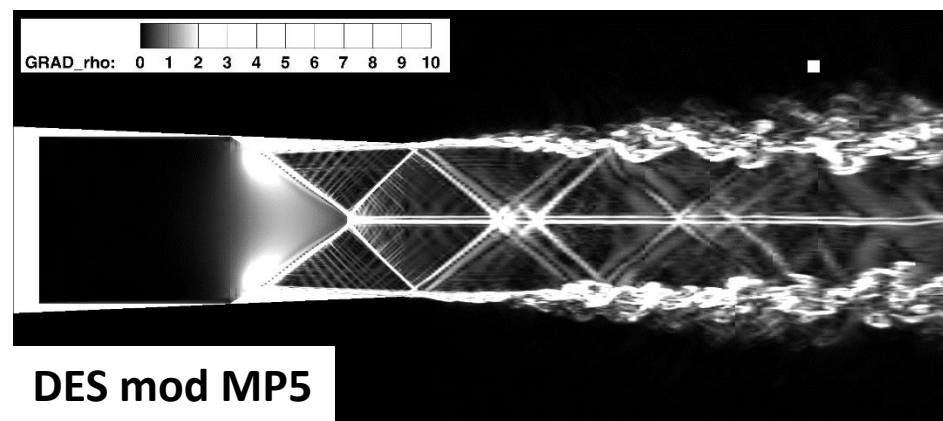
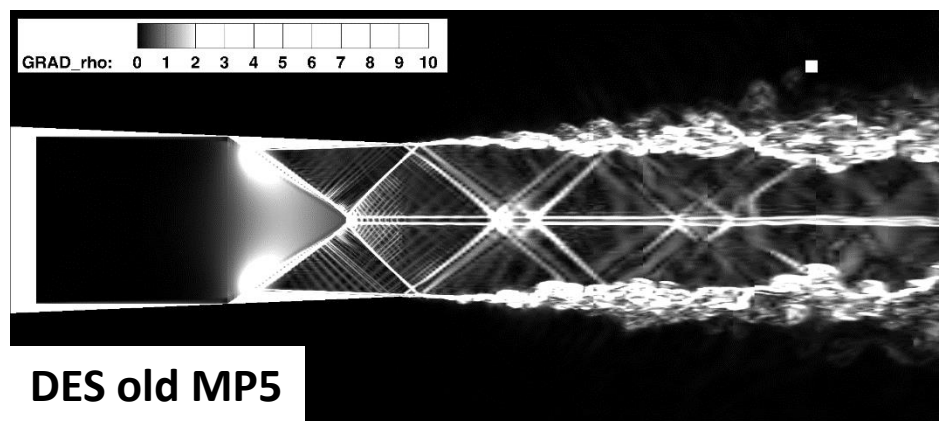
Дроссельная характеристика и уровень пульсаций статического давления на выходе из ВЗ для разных вариантов RANS/ILES метода и схемы MP5



MP5	Phi	Sigma	Prms/P0, %
old	0.92801	0.83924	0.71835
mod	0.92800	0.83970	0.73497

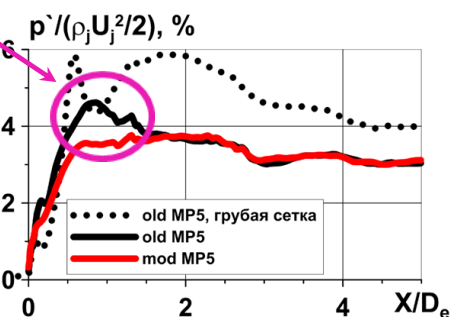
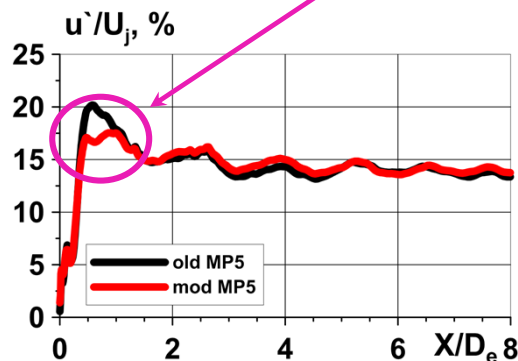
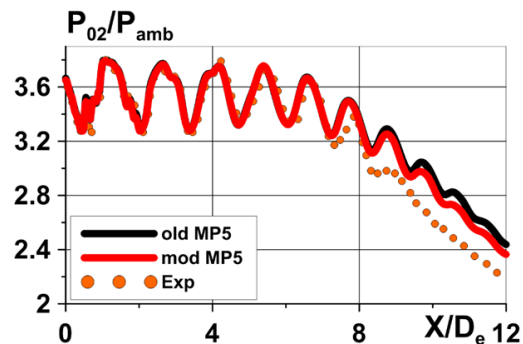


Изоповерхность Q_{cr} , в цветах модуля скорости

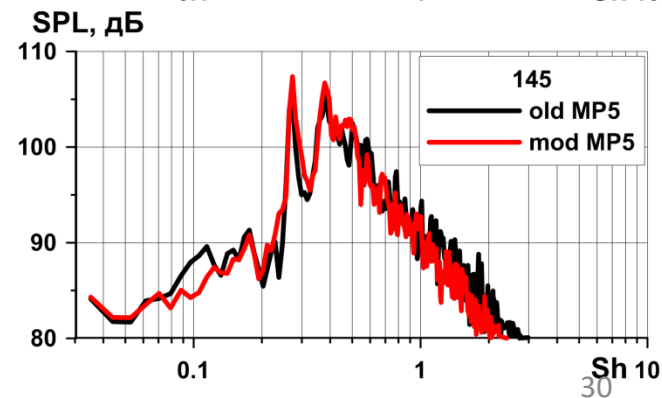
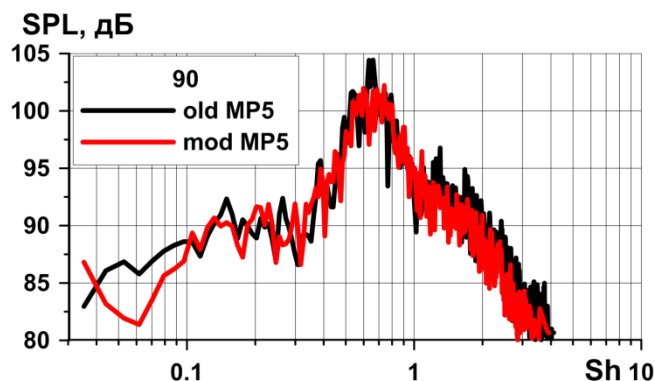
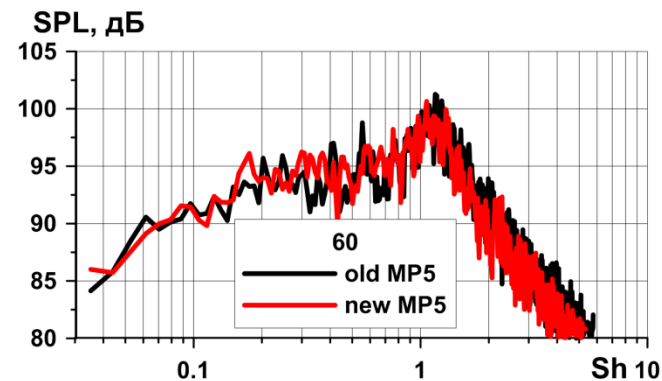
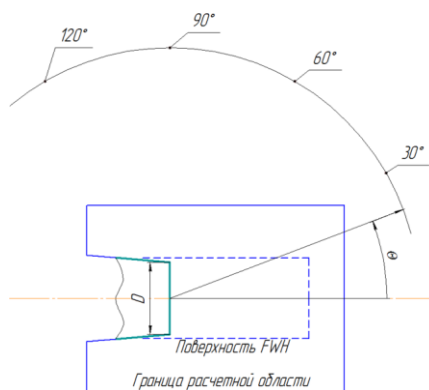
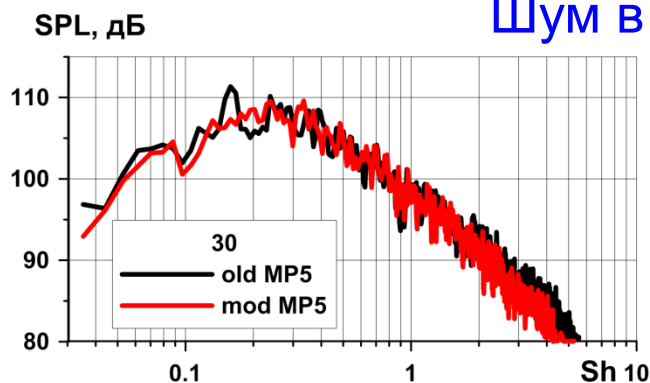


Градиент плотности

Удалось существенно уменьшить численный переход!



Шум в дальнем поле на расстоянии $47D_e$



Распад однородной изотропной турбулентности. Исходный вариант RANS/ILES метода. Эволюция Q-критерия.

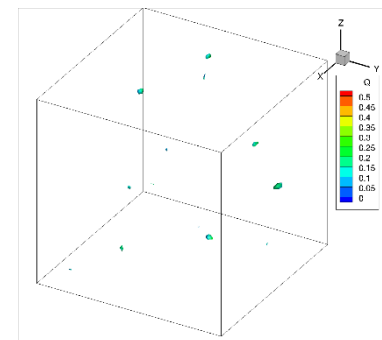
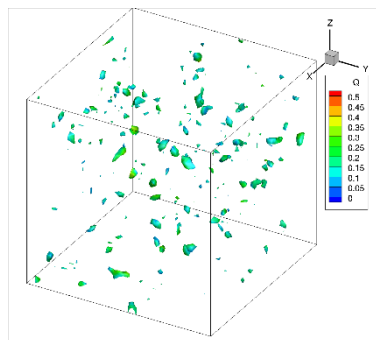
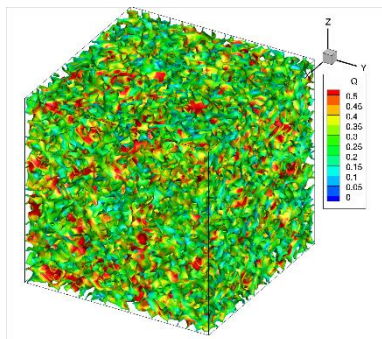
Время: $t=0$

$t=0.28s$

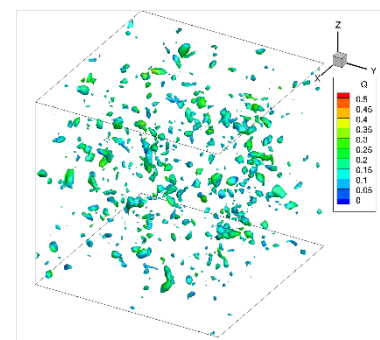
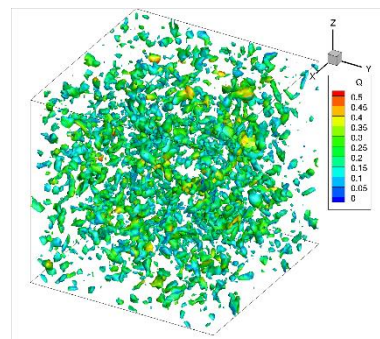
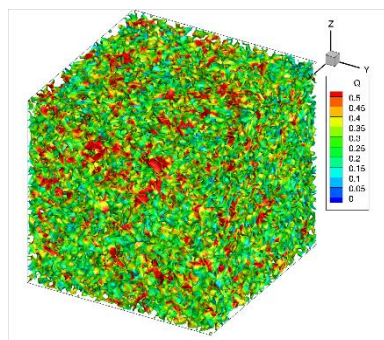
$t=0.66s$

Число ячеек сетки

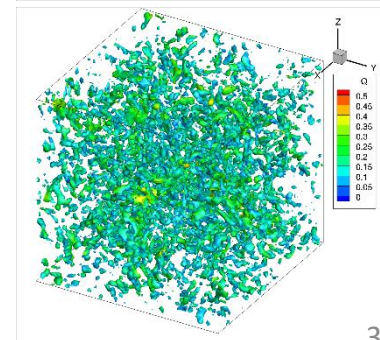
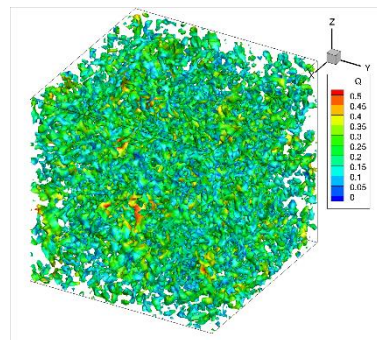
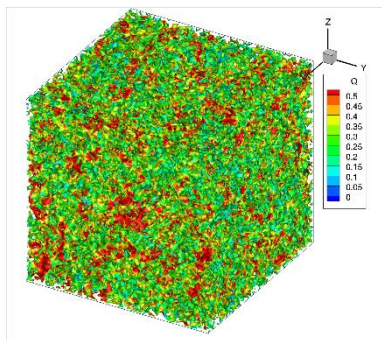
46x46x46

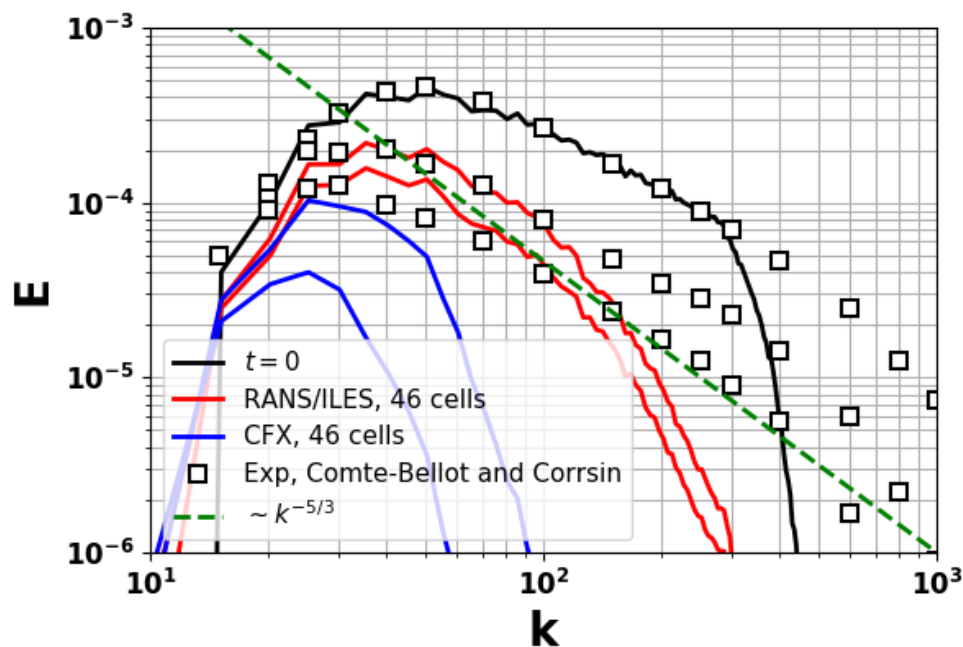


64x64x64



90x90x90





- Расчет с помощью CFX был произведен с теми же начальными условиями на той же сетке 46x46x46 и с теми же граничными условиями.
- Использовались настройки решателя, выставленные по умолчанию, за исключением шага по времени.
- Наблюдается значительно большая диссипативность.

Генерация синтетической турбулентности: что выбрать?

Были рассмотрены варианты задания синтетической турбулентности

T. Lund, X. Wu, and D. Squires Generation of turbulent inflow data for spatially-developing boundary layer simulations // Journal of Computational Physics, 1998, N. 140, P. 233–258.

L. Davidson Using isotropic synthetic fluctuations as inlet boundary conditions for unsteady simulations // Advances and Applications in Fluid Mechanics, 2007, N. 1, P. 1–35.

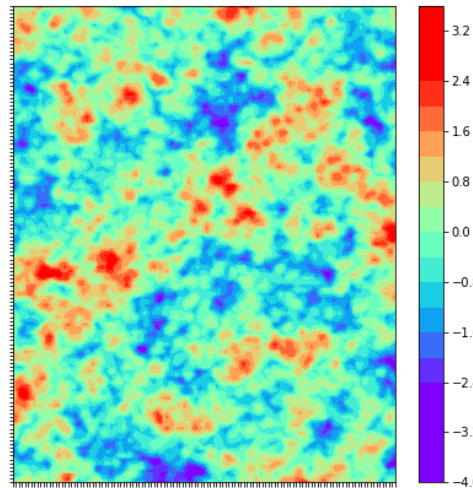
A. Smirnov, S. Shi, and I.B. Celik Random flow generation technique for large-eddy simulations and particle-dynamics modeling // Journal of Fluids Engineering, 2001, N. 123, P. 359–371.

N. Jarrin, S. Benhamadouche, D. Laurence, and R. Prosser, A synthetic-eddy-method for generating inflow conditions for large-eddy simulations // International Journal of Heat and Fluid Flow, 2006, V. 27, pp. 585–593.

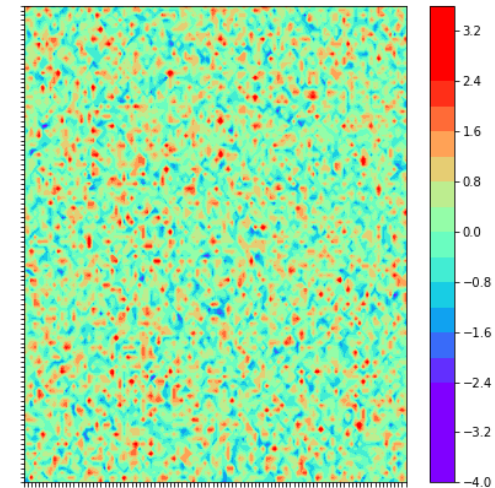
Поля скорости

- **Lund** – «белый шум», масштаб турбулентных структур нельзя регулировать.
- **Davidson** – поле сгенерированное данным методом наиболее богато структурами различных масштабов: присутствуют как крупномасштабные структуры, так и мелкомасштабные преобразования.
- **SEM, Smirnov** – явно преобладают структуры одного масштаба, присутствующие в виде областей, имеющих гладкие границы. Их масштаб и количество можно регулировать.

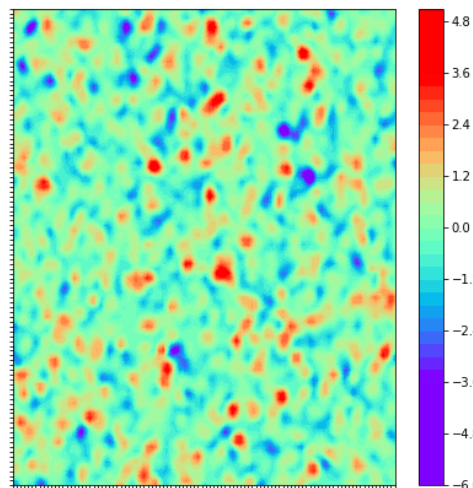
Davidson



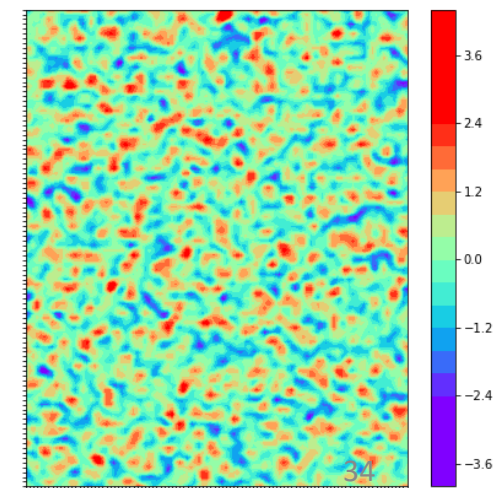
Lund



SEM



Smirnov

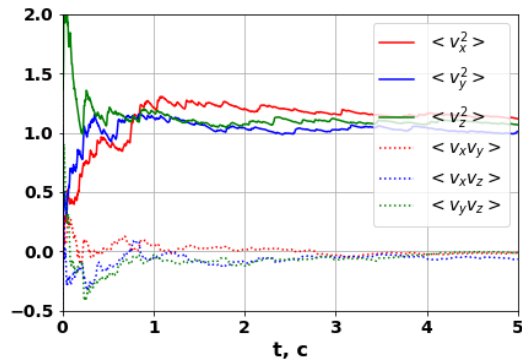


Вторые моменты

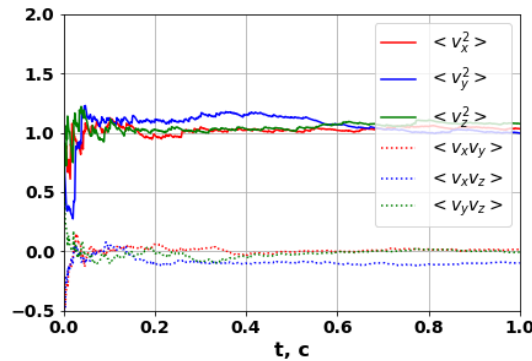
Изотропное поле

$$\overline{uu} = 1, \overline{vv} = 1, \overline{ww} = 1, \\ \overline{uv} = \overline{uw} = \overline{vw} = 0$$

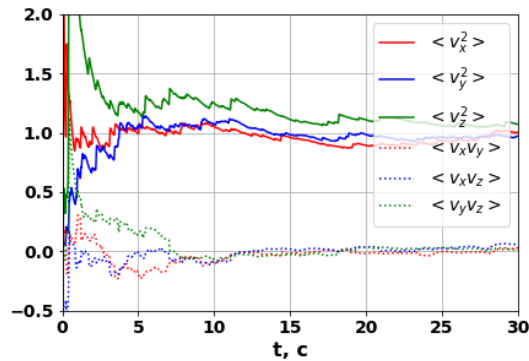
Davidson



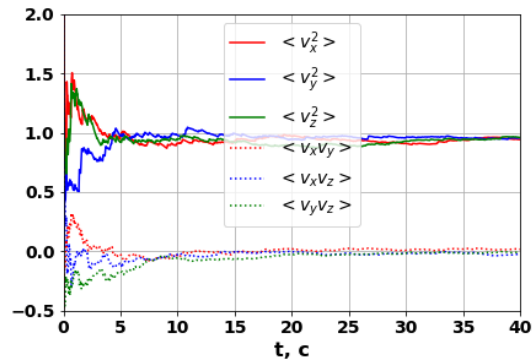
Lund



SEM



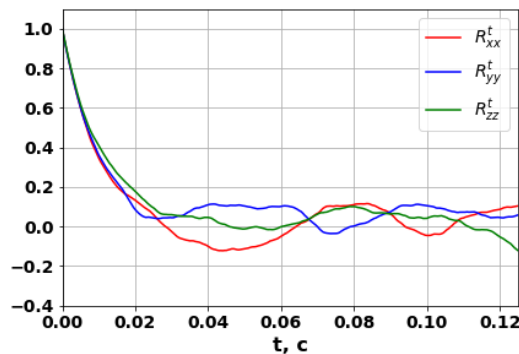
Smirnov



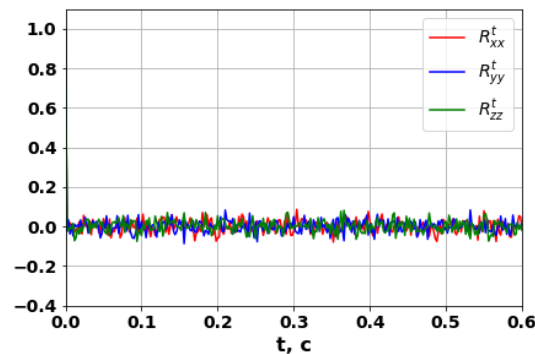
- Тензор вторых моментов для однородного изотропного поля представляет собой единичную матрицу
- Все методы создают поле с заданными значениями вторых моментов.

Автокорреляции

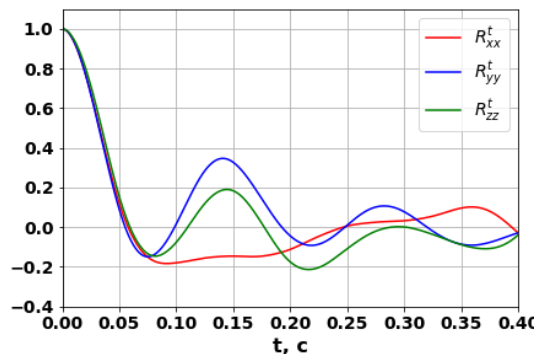
Davidson



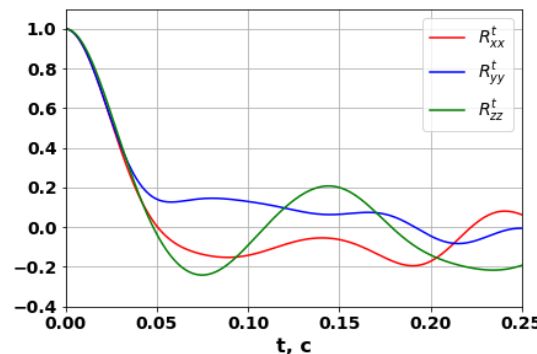
Lund



SEM



Smirnov



В реальной турбулентности двухточечные корреляционные коэффициенты должны асимптотически стремиться к нулю при увеличении расстояния между точками. Причем на начальном участке скорость убывания значения должна быть больше и величина этого участка тем больше, чем больше масштаб турбулентности.

Lund – корреляции равны нулю при любом расстоянии, что нефизично. Davidson – наиболее близкая к реальной картина. Smirnov, SEM – после участка быстрого уменьшения наблюдаются колебания значения корреляций, что не совсем физично.

Спасибо за терпение!