

# Код Jet3D: развитие в 2016 году

Бендерский Л.А., Любимов Д.А., Макаров А.Ю., Соловьева А.А.,  
Терехова А.А., Федоренко А.Э., Честных А.О.

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

CFD weekend «Отечественные CFD-коды 2016»  
ИПМ им. М.В. Келдыша, Москва, 3-4 декабря 2016

# Характеристики кода

Название кода:

*JET3D*

Что моделируется (классы течений):

*несжимаемые течения*

*сжимаемые течения: дозвук - гиперзвук*

*аэроакустика*

Модели:

*H-C*

Моделирование турбулентных течений:

*RANS URANS DES RANS/ILES*

Сетки и сеточные технологии:

*структурированные многоблочные криволинейные сетки,*

*импорт сеток и граничных условий из CFD-GEOM*

Численные методы:

*Конечно-объемные*

*Переменные: плотность-скорость*

*Порядок аппроксимации по пространству 3-5 для несжимаемых течений, 5-9 для предраспадных параметров в схеме Роу для сжимаемых течений*

Интегрирование по времени:

*неявная схема*

Ускорение вычислений:

*OpenMP-MPI*

Язык программирования:

*FORTAN*

# Разные ветви кода

HIHAR

URANS, WENO5



Различные задачи при  
разных числах Маха

DORIS

RANS-ILES, MP5



Течения в каналах при  
дозвуковых скоростях,  
газодинамическое  
управление течениями

HIRIC

RANS-ILES, MP9



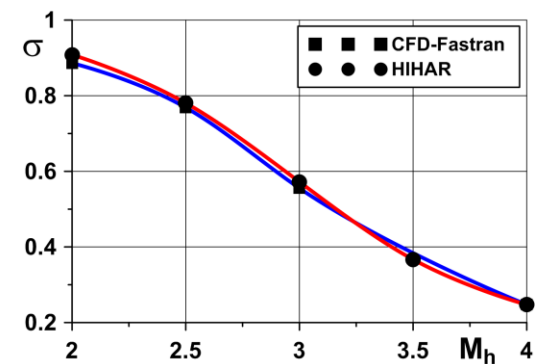
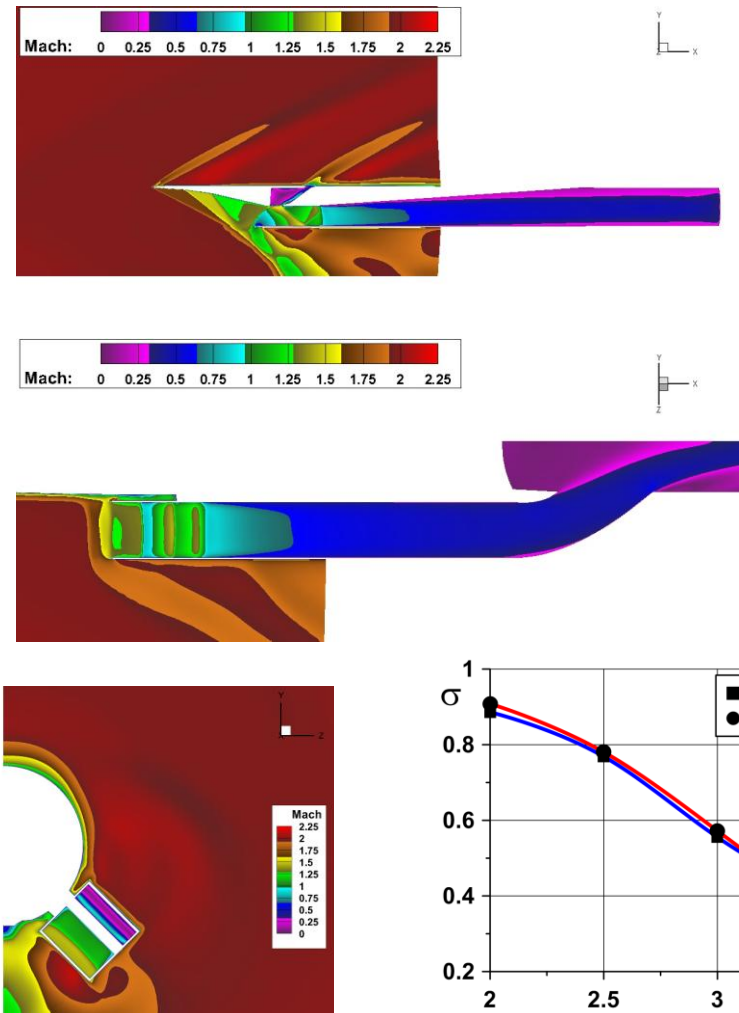
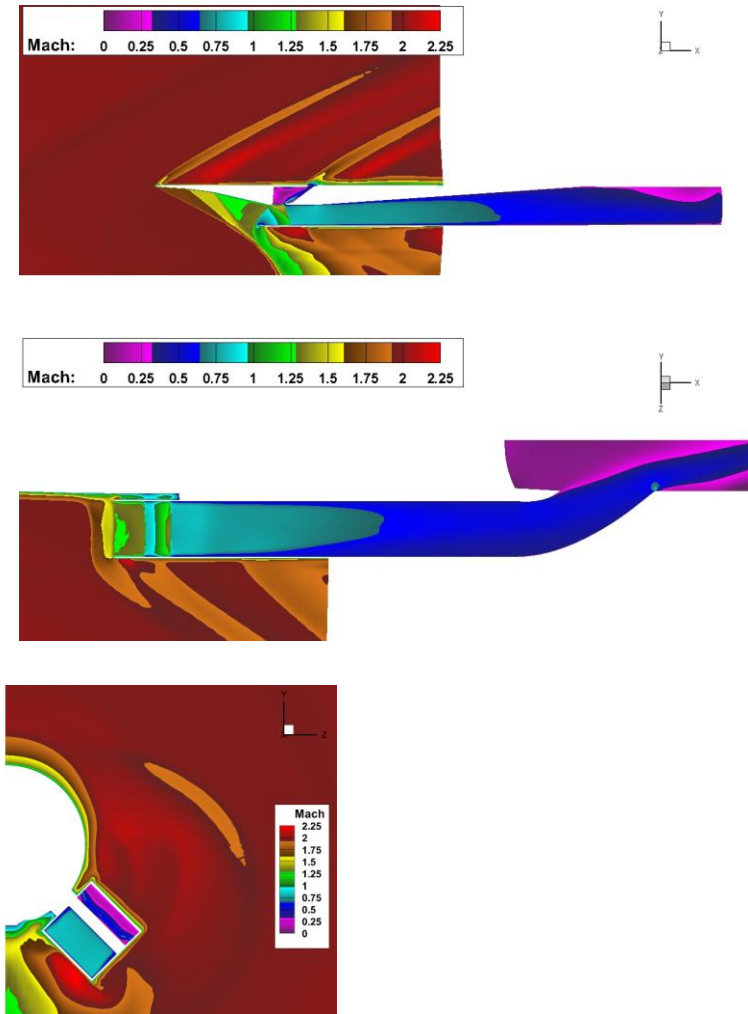
Воздухозаборники  
разных типов,  
реактивные струи

# Сверхзвуковой ВЗ интегрированный с корпусом ЛА $M_0=2$ : НИНАР сравнение с Fastran

НИНАР

сетка  $12 \times 10^6$  ячеек

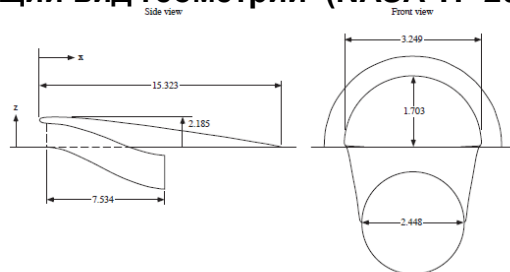
Fastran



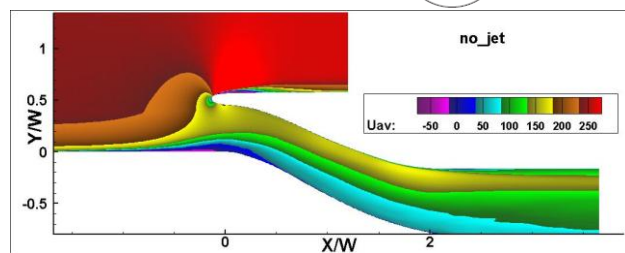
НИНАР меньше размазывает скачки, чем Fastran

# Расчет течения и параметров турбулентности в канале дозвукового интегрированного с планером воздухозаборника и исследования средств управления течением (HIRIC)

Общий вид геометрии (NASA TP 2005-13766)

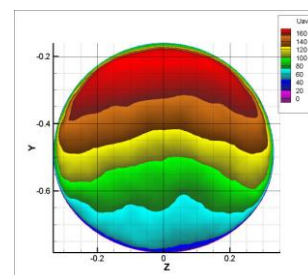


У интегрированных с планером ЛА на входе ВЗ толстый пограничный слой. Это приводит к большой неравномерности, как течения в самом ВЗ, так и на выходе из него.

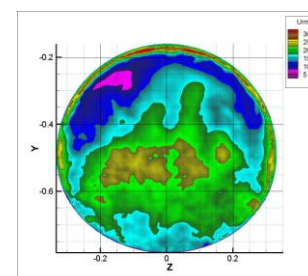


Поле осредненной скорости при числе  $M_0=0.83$

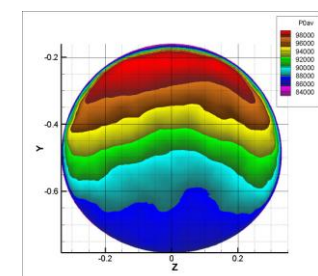
осредненная скорость



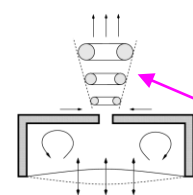
пульсации скорости



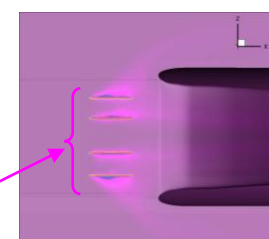
полное давление



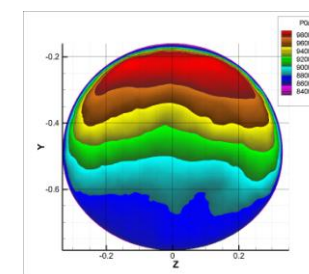
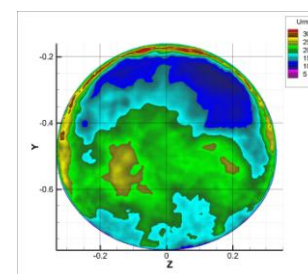
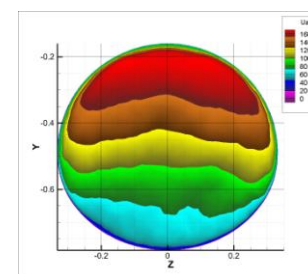
Исходный вариант без синтетических струй



Управление течением с помощью синтетических струй, выдуваемых перед входом ВЗ



При положении щелей перед ВЗ снижается неравномерность в распределении параметров на выходе из ВЗ





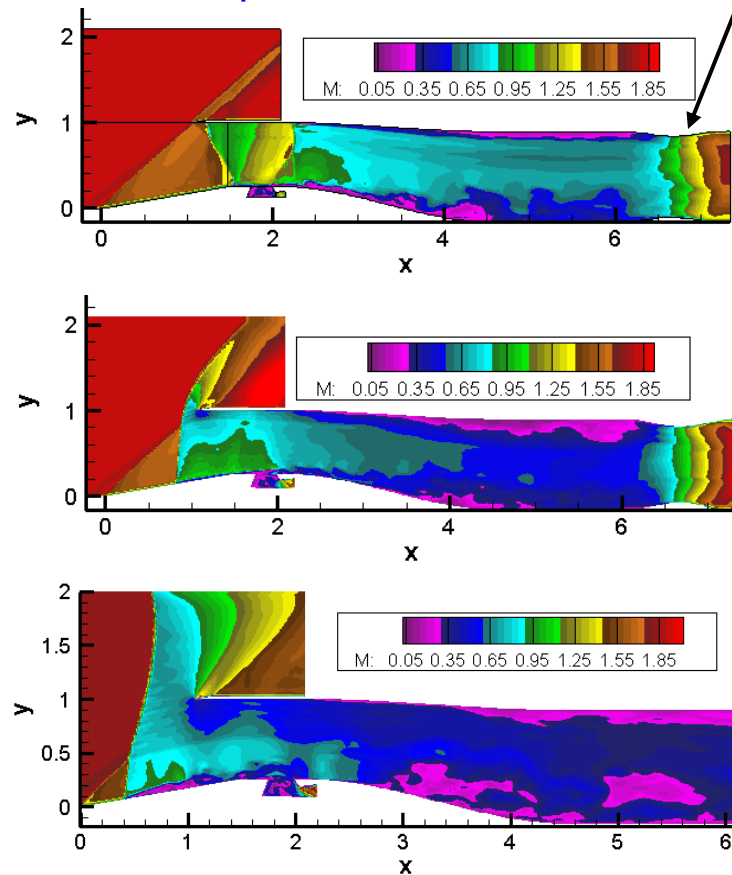
# Влияние имитатора планера на течение в ВЗ (HIRIC)



При  $M_0=1.8$  на входной границе расчетной области статическое  $p_{st}=30\text{кПа}$ ,  $T_{st}=182\text{К}$ ,  $Re=1.09\times 10^6$ . Для  $M_0=2$  –  $p_{st}=25\text{кПа}$ ,  $T_{st}=167\text{К}$  и  $Re=1.14\times 10^6$ . Число ячеек сетки  $4.4\times 10^6$ .

Дросселирование обеспечивалось изменением площади горла  $F_{TR}$  сопла Лавала на выходе из ВЗ

## Изолированный ВЗ

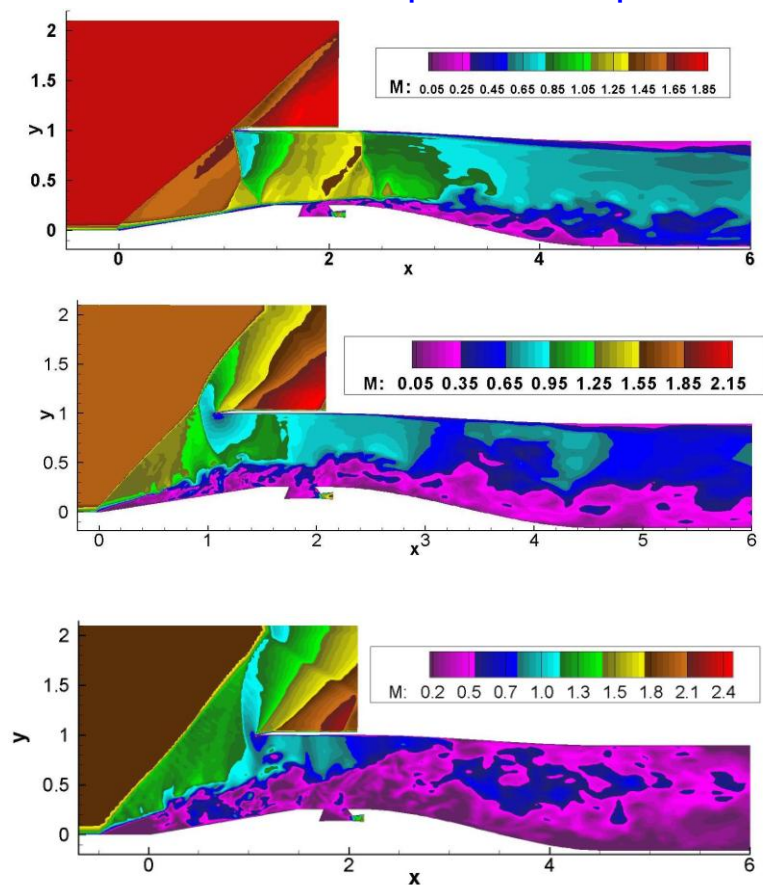


$$F_{TR}/F_0 = 0.8$$

$$F_{TR}/F_0 = 0.65$$

$$F_{TR}/F_0 = 0.45$$

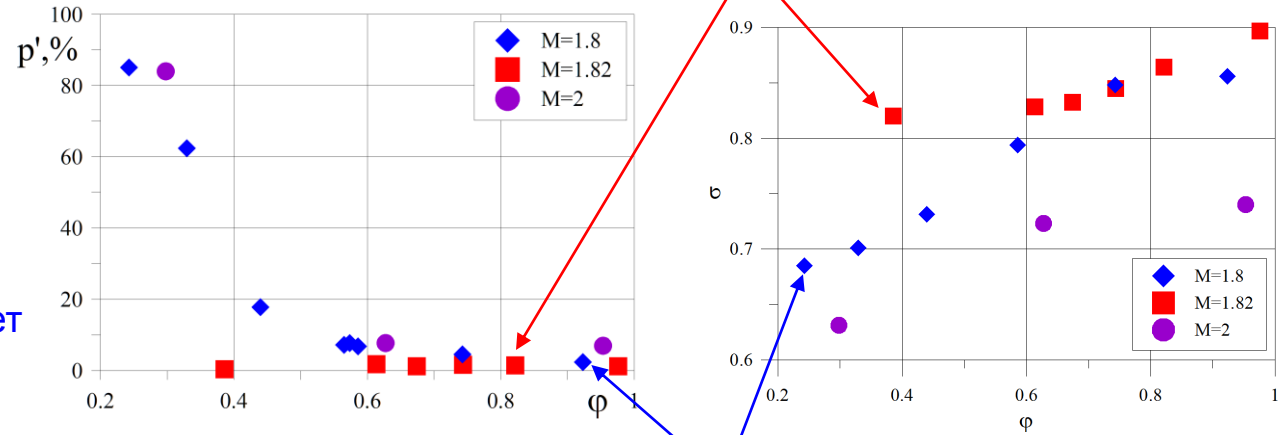
## ВЗ с имитатором планера



# Влияние имитатора планера на течение в ВЗ (HIRIC)

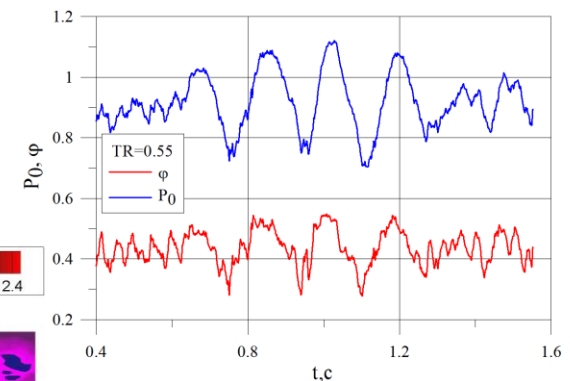
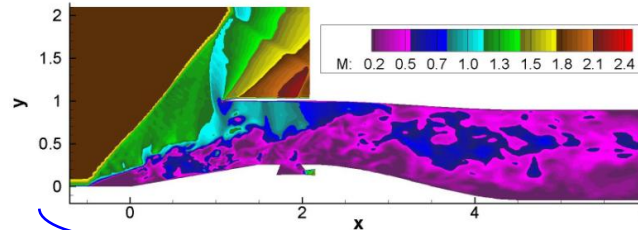
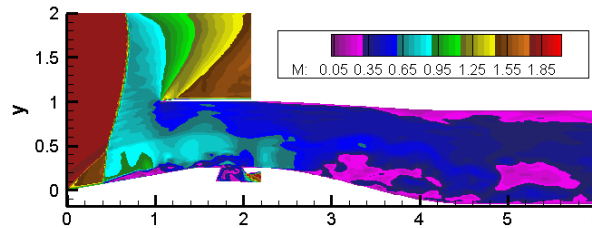
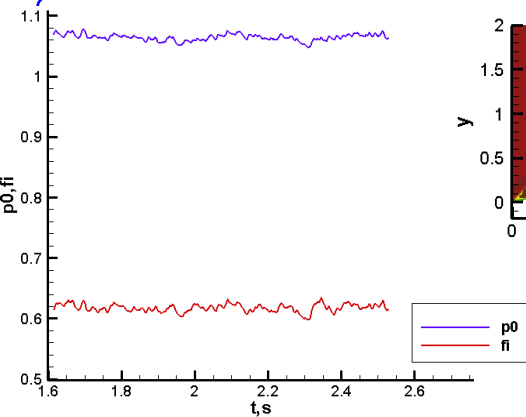
На дроссельных режимах выбитый скачок отрывает погранслои на поверхности планера, что еще больше ухудшает течение в ВЗ. При большом дросселировании наступает помпаж, которого нет у изолированного ВЗ.

Изолированный ВЗ



ВЗ в компоновке

Изолированный ВЗ

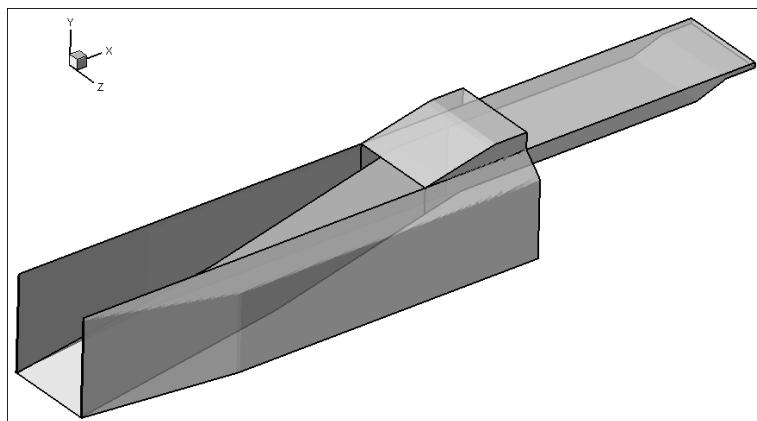


Зависимость от времени  $P_0$  и  $\phi$  на выходе из ВЗ

Зависимость от времени  $P_0$  и  $\phi$  на выходе из ВЗ

ВЗ в компоновке

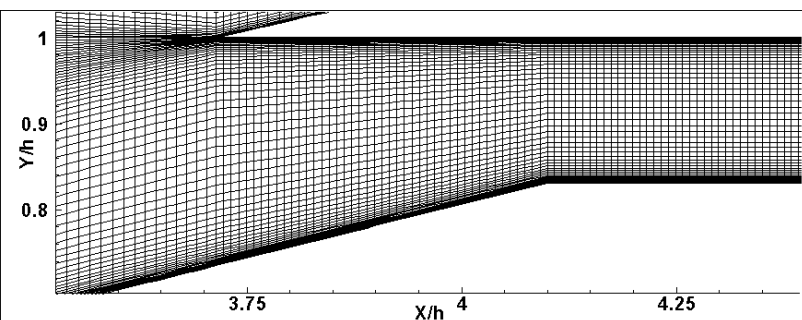
# Влияние дросселирования на течение в гиперзвуковом воздухозаборнике (HIRIC)



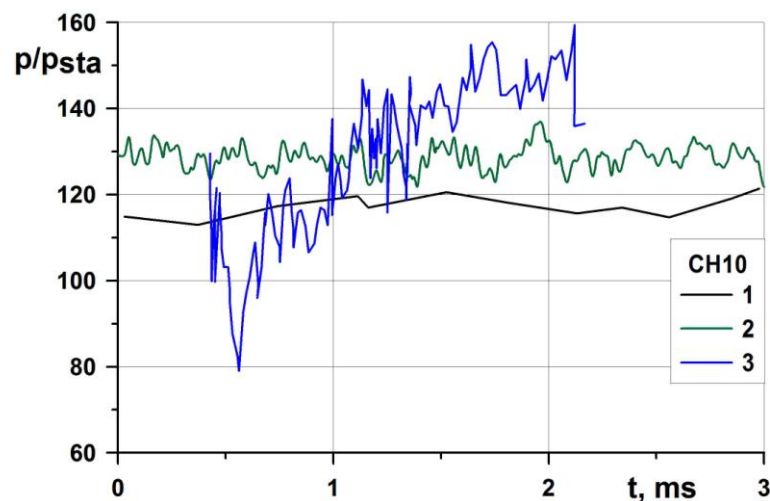
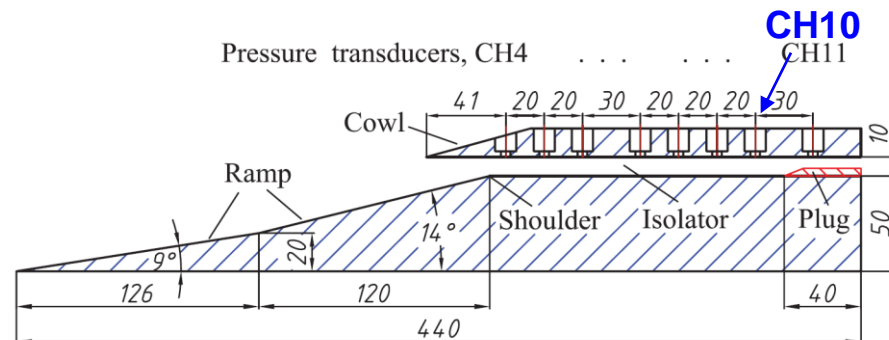
Общий вид геометрии

На входе  $M_0=5.9$ ,  $P_{sta}=892\text{Па}$ ,  $T_{sta}=102\text{К}$ , на выходе из изолятора  $P_{sta}=5 \times 10^4\text{Па}$ ,  $Re=3.12 \times 10^5$ . Высота дроссельной вставки TR изменялась от 0 до 0.7H (H - высота канала изолятора).

Расчетная сетка  $3.32 \times 10^6$  ячеек.



Фрагмент сетки около входа в изолятор

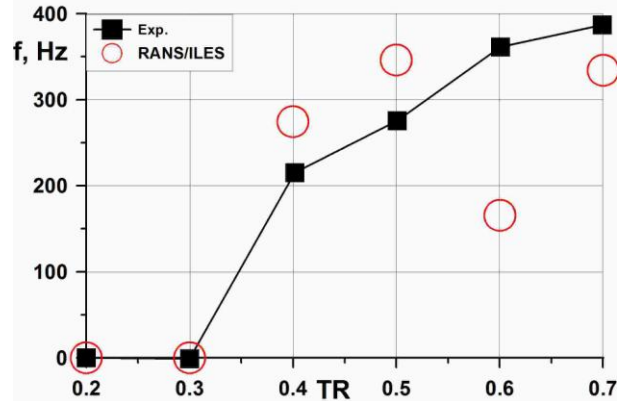


Зависимость от времени статического давления в точке CH10 при TR=0.3: 1 – эксп., 2 – расчет HIRIC, ВЗ-2015, 3 – расчет на сетке  $5.6 \times 10^6$  ячеек с помощью LES (Sun P.Z., Shi H.T., Lu X.Y. Numerical investigation of the unsteady behavior of a hypersonic inlet under throttling // 2015. Proc. Eng. V.126. P.179 – 183.)

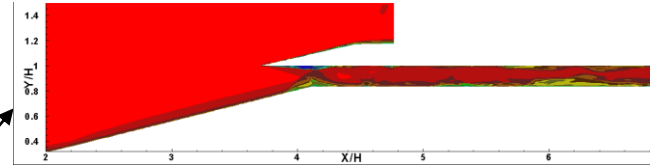
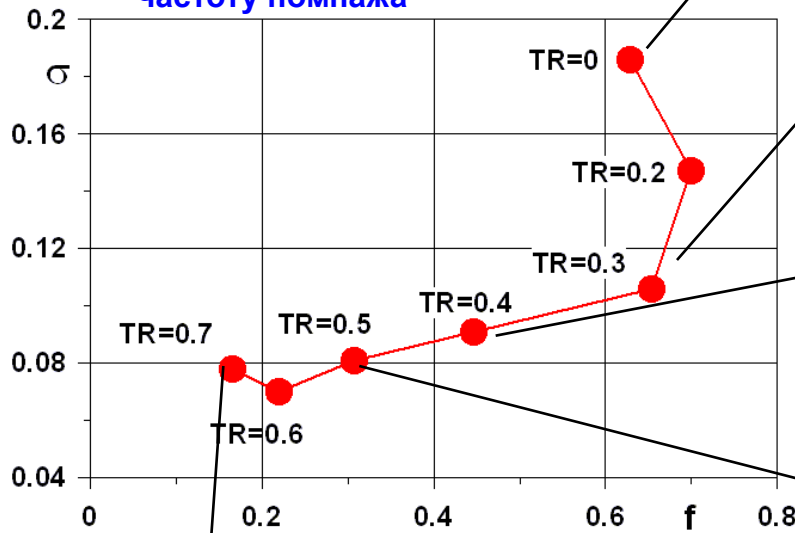
При расчете с помощью LES течение было **нестационарным**, в эксперименте и расчете настоящим методом – стационарным.



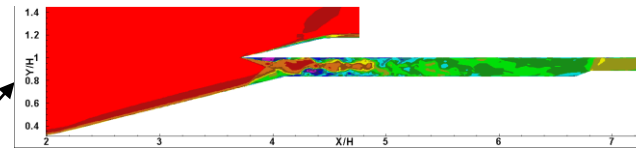
# Дроссельная характеристика и анимация мгновенных полей скорости при разном дросселировании, осциллограммы давления в точке CH10



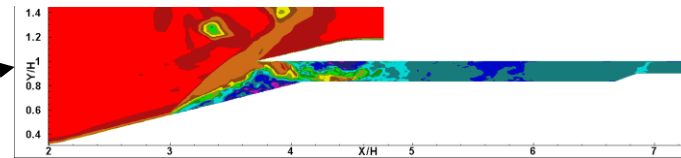
Влияние дросселирования на частоту помпажа



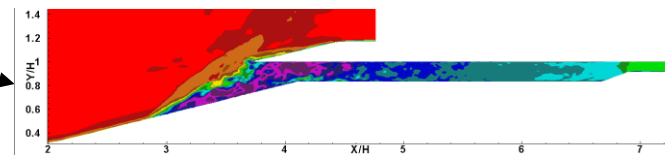
Сверхзвуковое течение в изоляторе



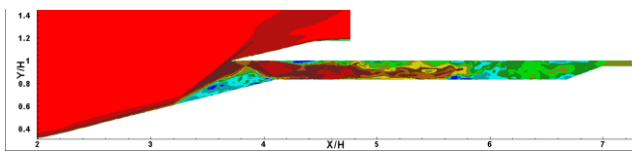
Торможение в псевдоскачке



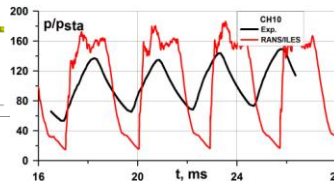
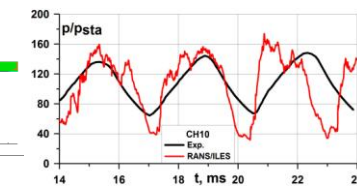
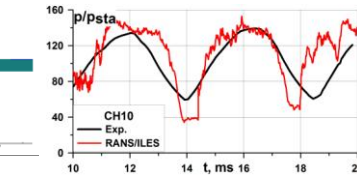
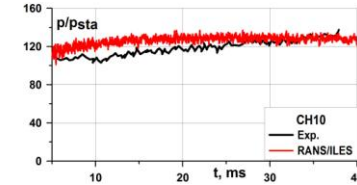
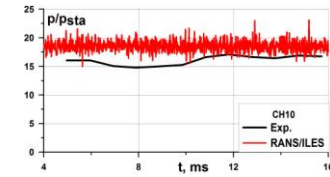
Начало помпажа



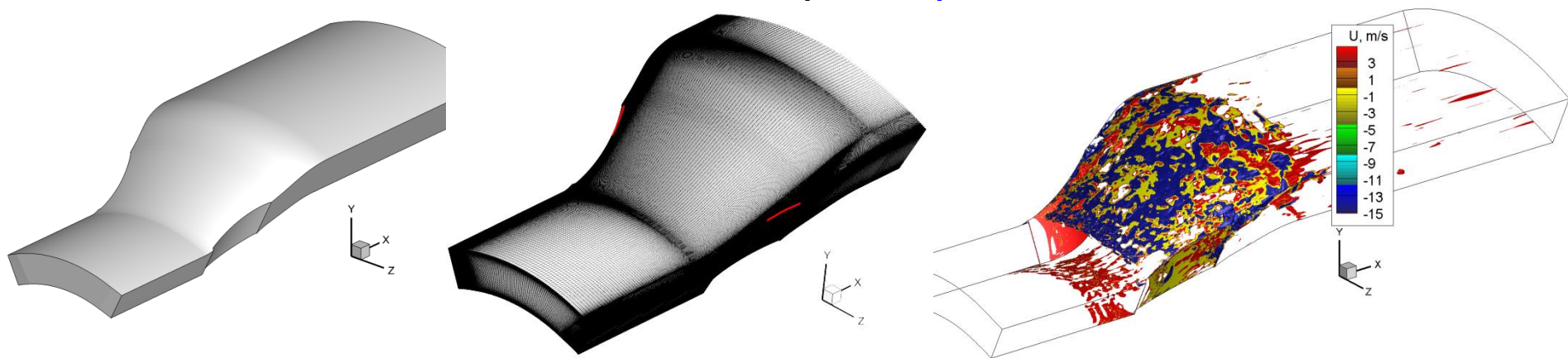
Развитый помпаж



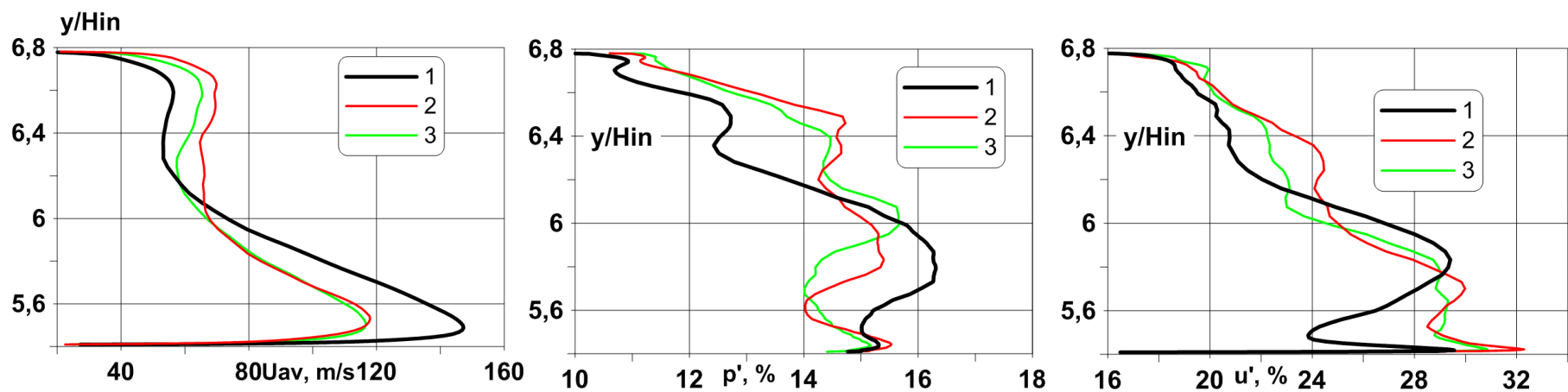
Развитый помпаж



# Применение синтетических струй для улучшения течения в следах за пилонами (DORIS)



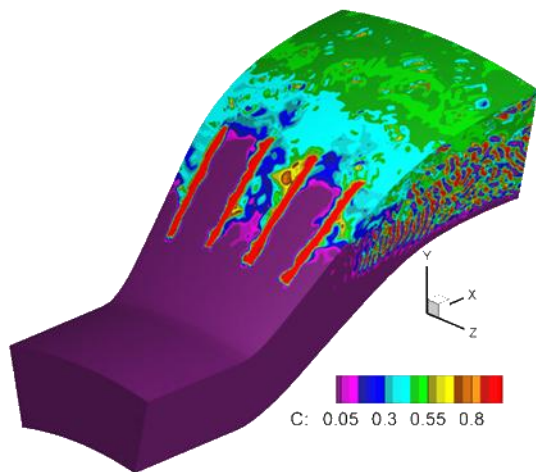
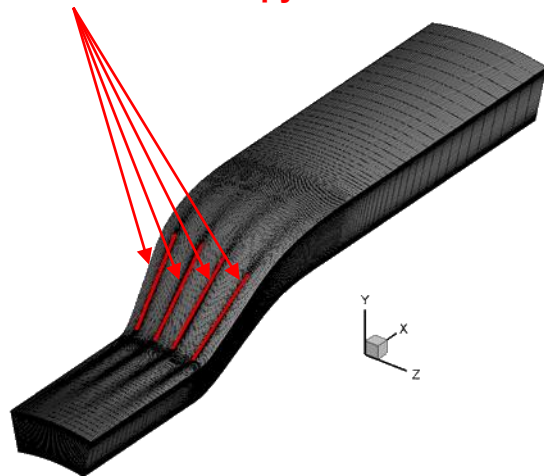
Вход:  $P_{inl}^* = 341.8 \text{ КПа}$ ,  $T_{inl}^* = 1123 \text{ К}$ . Выход:  $p_{st} = 328.1 \text{ КПа}$ .  $Re = 3.55 \times 10^6$ ,  $\gamma = 1.33$ ,  $H_{ex}/H_{in} = 1.5$ , сетка  $6.4 \times 10^6$  ячеек



1 – без струй; 2 – режим  $f=100 \text{ Гц}$ ,  $q=200 \text{ м/с}$ ; 3 – режим  $f=300 \text{ Гц}$ ,  $q=100 \text{ м/с}$

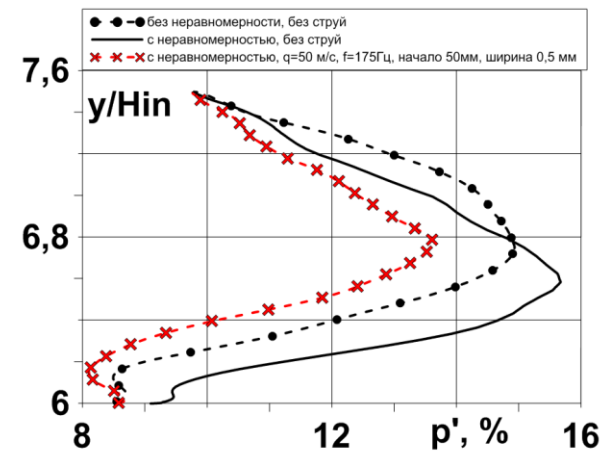
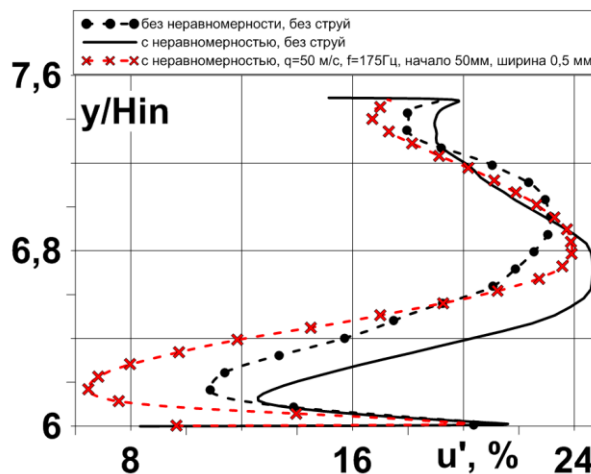
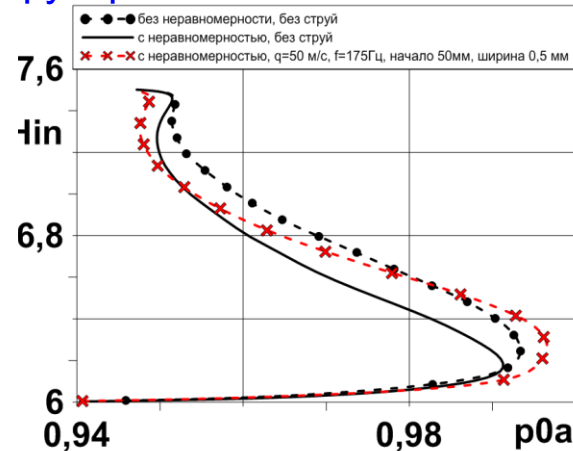
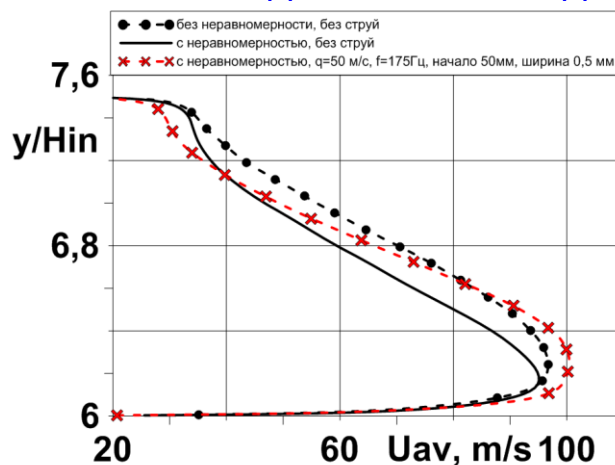
# Применение синтетических струй для улучшения характеристик течения в диффузоре с неравномерностью полного давления на входе (имитация следов от лопаток спрямляющего аппарата) (DORIS)

Щели для выхода синтетических струй



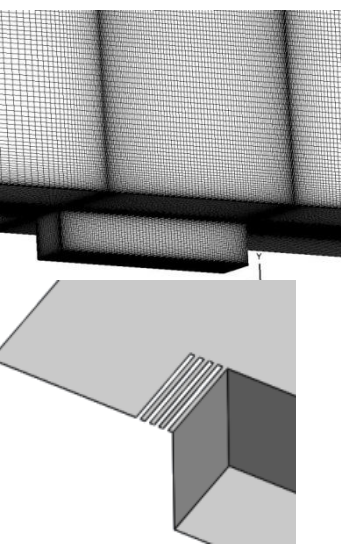
Вход:  $P_{inl}^* = 100000 \text{ Па}$ ,  $T_{inl}^* = 300 \text{ К}$ . Выход:  $p_{st} = 95000 \text{ Па}$ .  
 Пограничный слой  $h/H_{in} = 4.9 \times 10^{-3}$   $\gamma = 1.4$ , Неравномерность  
 полного давления на входе  $0.914 P_{in}^*$ .

## Распределение параметров течения по высоте выходного сечения диффузора



Мгновенное распределение вещества синтетических струй

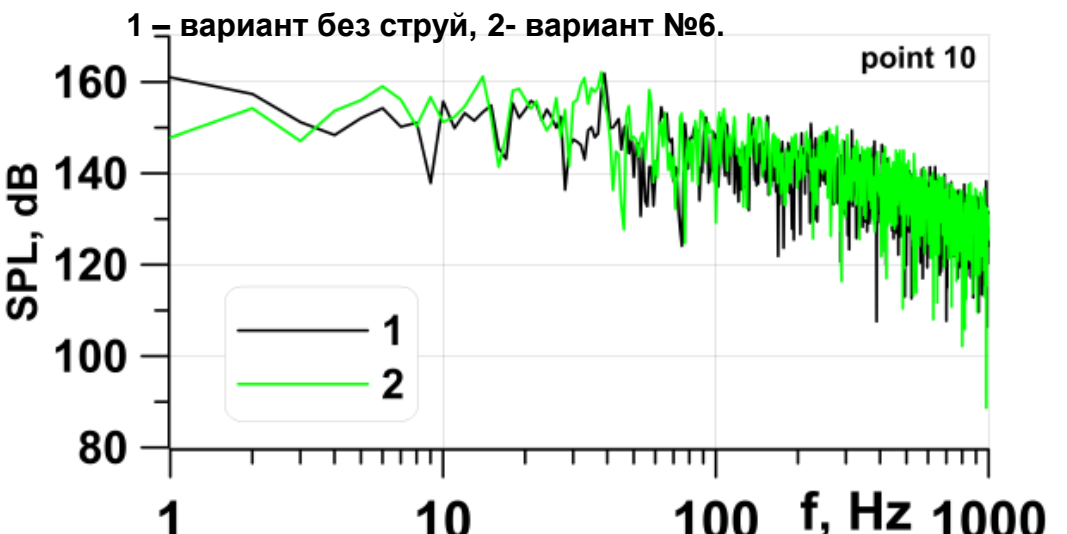
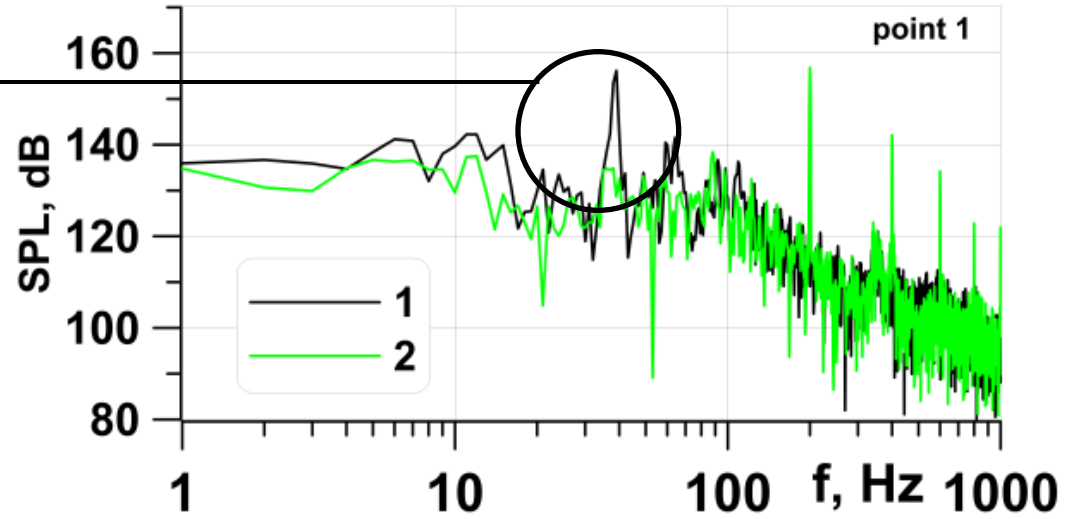
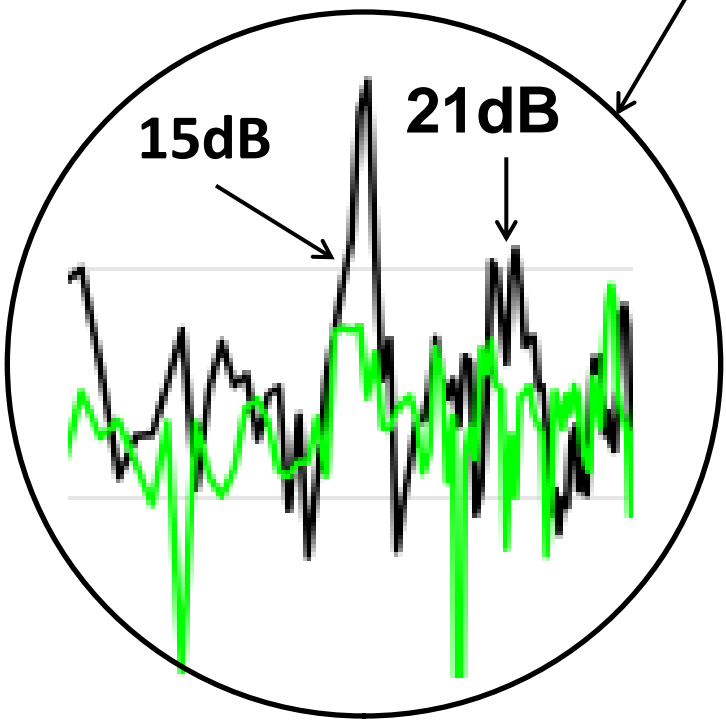
Управление течением в каверне M219 с помощью синтетических струй (HIRIC)  $M_0=0.85$



$2.6 \times 10^6$  ячеек  
(в каверне -  $3.4 \times 10^5$ )  
 $M=0.85/1.5$   
 $T=300K$   
 $P=0.1MPa$ ,  
 $Re=1.4 \times 10^6/2.4 \times 10^6$

200Гц, 100 м/с  
 $L/D=5$   
L – длина каверны  
D – глубина каверны

	I мода, Hz	II мода, Hz	III мода, Hz	IV мода, Hz
Эксперимент	18.0	38.2	62.5	83.7
LES	19.6	40.3	62.5	83.7
Формула Росситера	14.9	36.0	57.0	78.1
RANS/ILES	20.0	25.7	56.2	89.8

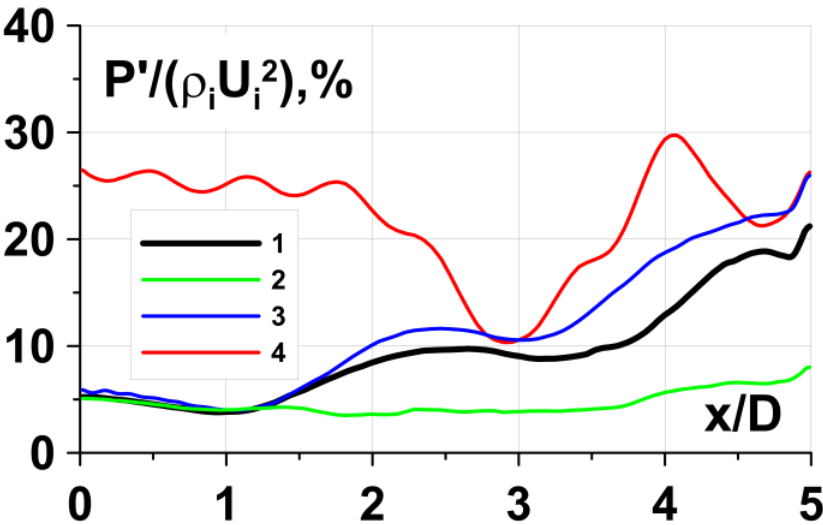


Управление течением в каверне M219 с помощью синтетических струй (HIRIC)  $M_0=1.5$

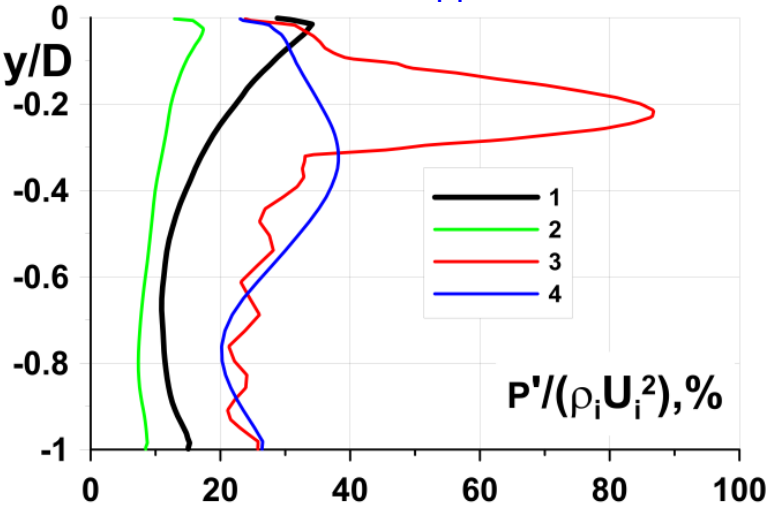
q, m/s	50			100			
f, Hz	100	200	300	100	200	300	1000
Variants, №	1	2	3	4	5	6	7
	9	10	11	12	13		14
	16	17	18	19	20		21
							8
							15
							22

- перед каверной
- на передней стенке
- на задней стенке

Распределение пульсаций давления на нижней стенке

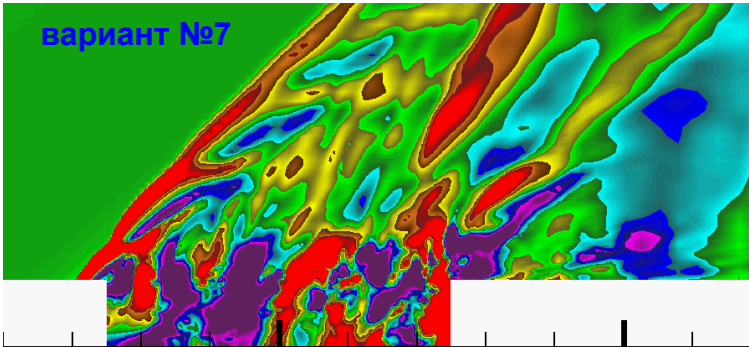
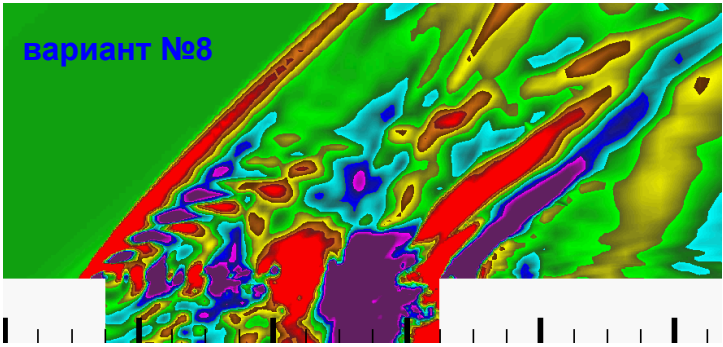


Распределение пульсаций давления на задней стенке



1 – вариант без струй 2 – вариант №6, 3 - вариант №22, 4 - вариант №14.

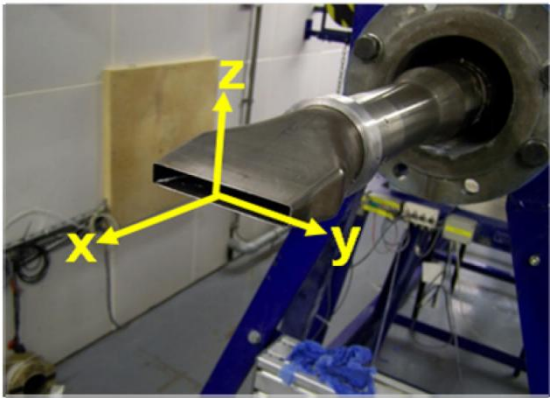
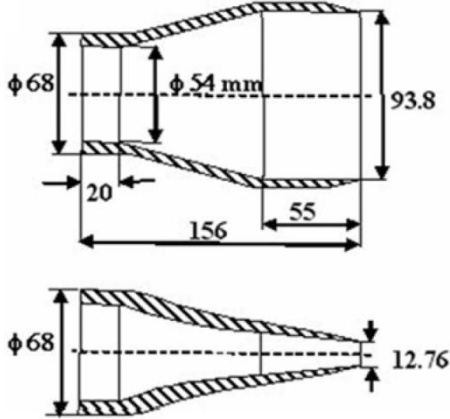
Мгновенные поля давления для различных вариантов синтетических струй



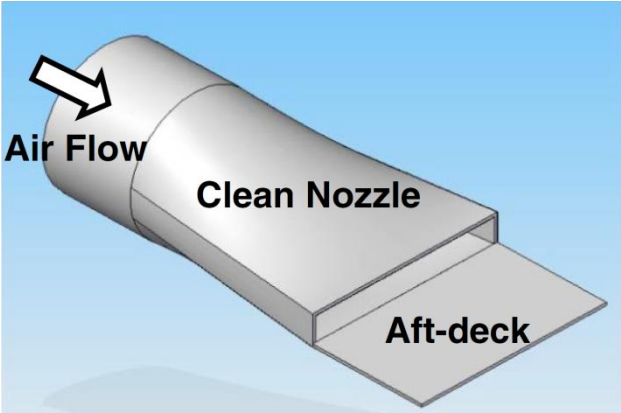


# Влияние условий истечения на особенности течения в прямоугольной струе (HIRIC)

Сопло без экрана (конф. 1)

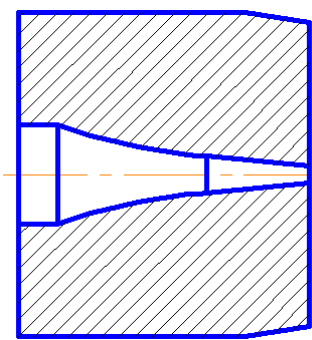


Сопло с экраном (конф. 2)

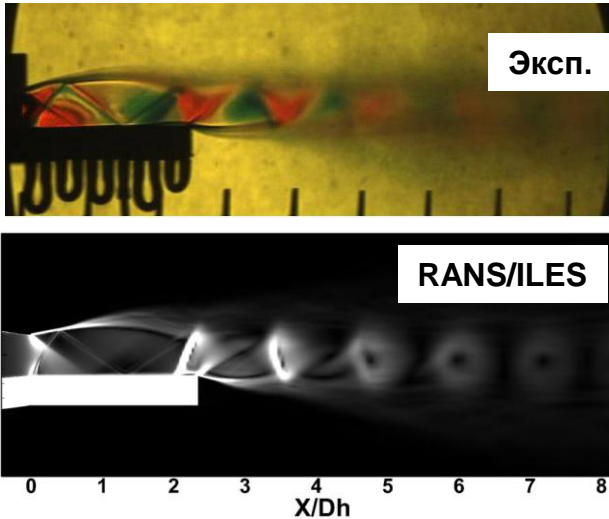


Геометрии сопла: P. Behrouzi, McGuirk Underexpanded Jet Development from a Rectangular Nozzle with Aft-Deck // AIAA J., 2015, DOI: 10.2514/1.J053376

Сопло с «торцом» (конф. 3) Режимные параметры



$T_{0in}$ , K	300	600
$P_{0in}$ , Па	350000	
$M_j$	1.467	
$U_j$ , м/с	425.84	602.23
$Re \times 10^{-6}$	1.142	0.466



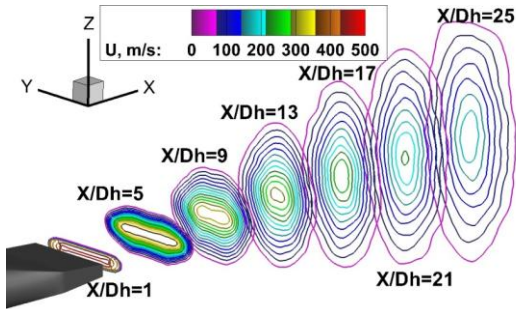
Расчетные сетки  $(7.1-7.8) \times 10^6$

Модуль градиента плотности

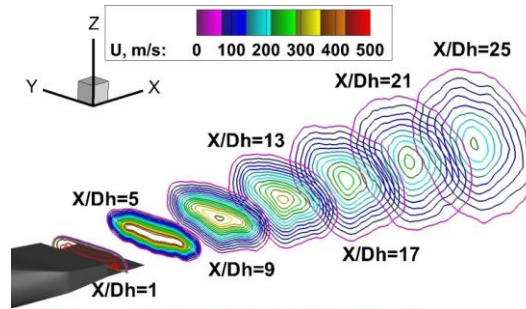


# Влияние условий истечения на эффект «переворота осей» прямоугольной струи

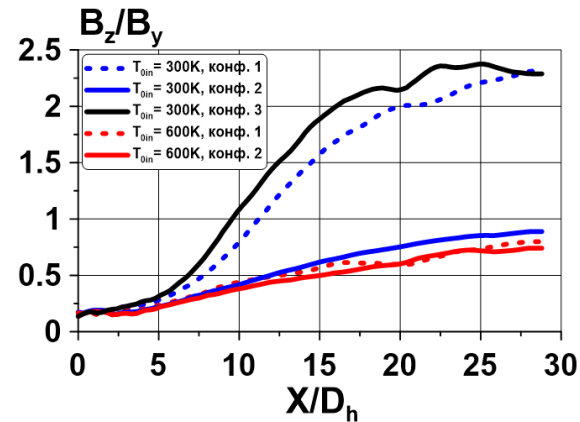
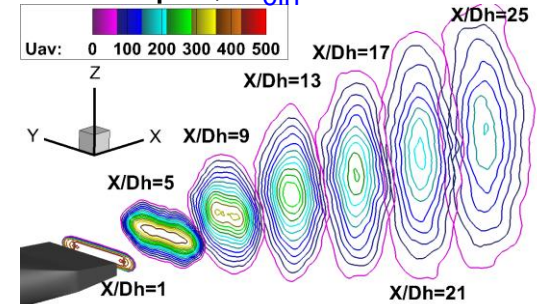
Конф.1,  $T_{oin}=300K$



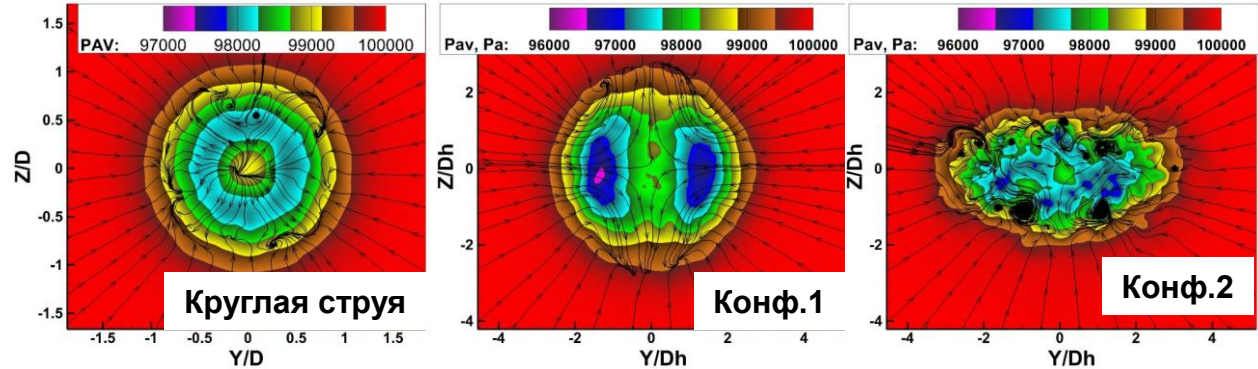
Конф.2,  $T_{oin}=300K$



Конф.3,  $T_{oin}=300K$

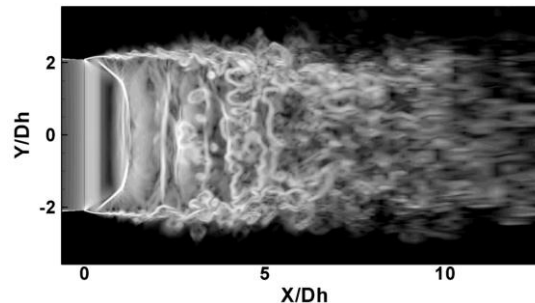


Отношение размеров струй в вертикальном и горизонтальном направлении

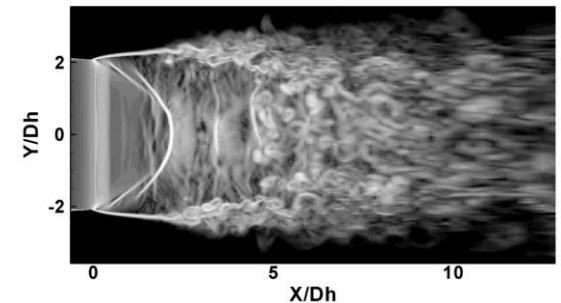


Поля осредненного давления  $X/Dh=10$ ,  $T_{oin}=300K$

Мгновенные поля  $\text{Log}(|\text{rag}(\rho)|)$

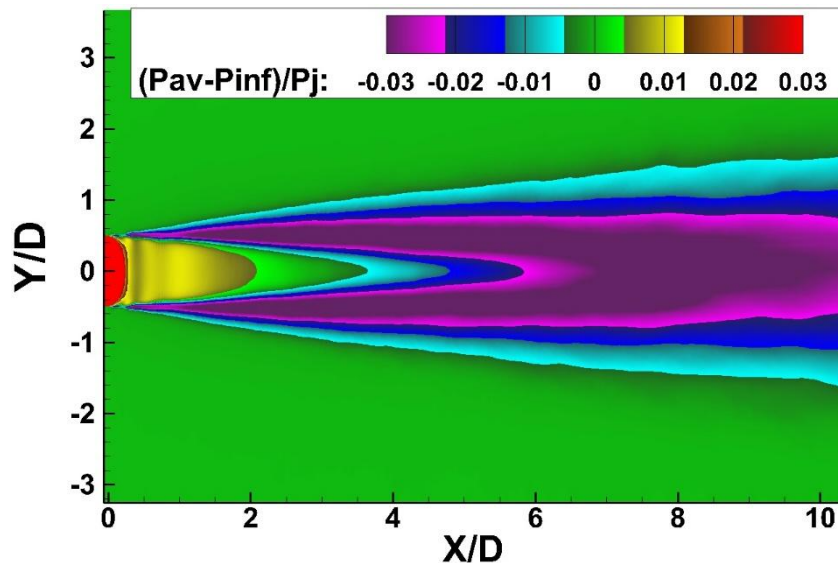


Сопло без экрана



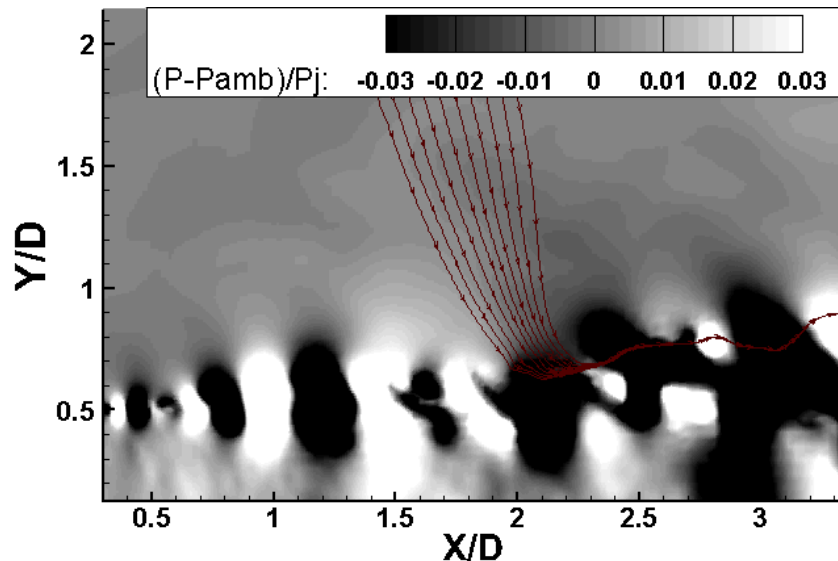
Сопло с экраном

# Механизм генерации шума в дозвуковых струях (HIRIC)

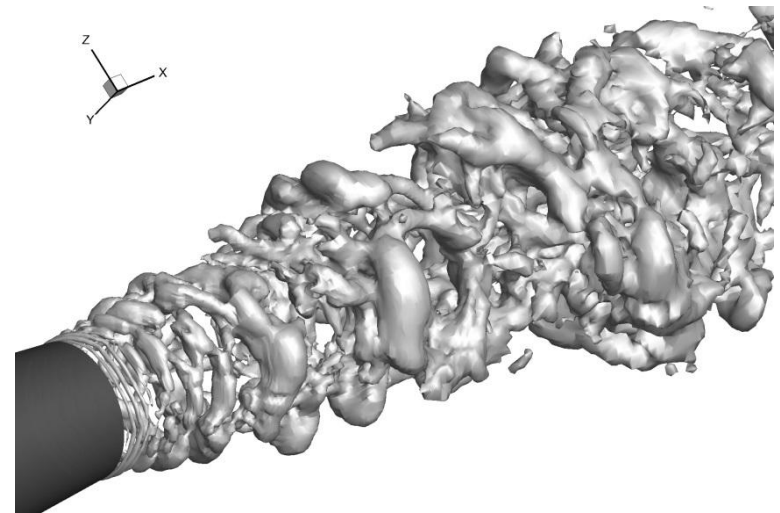


- Известно, что в средней части слоя смешения имеется разрежение, средняя величина которого 3-4% от скоростного напора струи. согласно Таунсенду оно обусловлено пульсационным движением.
- Однако, в мгновенном поле статического давления существуют области повышенного давления.
- Линии тока внешней среды огибают области повышенного давления и заканчиваются в областях пониженного давления.
- Ответственным за вовлечение внешней среды в струю является разрежение, которое возникает в «турбулентной жидкости».

Поле осредненного статического давления

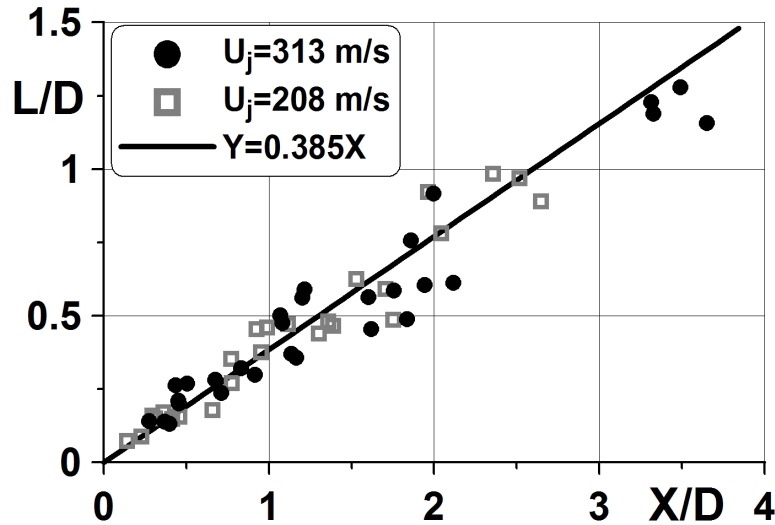


Поле мгновенного статического давления



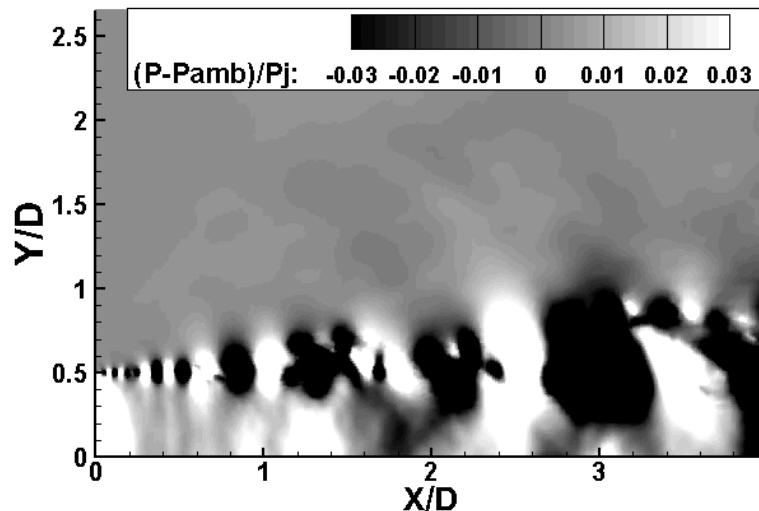
Изоповерхность мгновенного значения статического давления  $P = P_{amb} - 0.03\rho U_j^2/2$

# Механизм генерации шума в дозвуковых струях (HIRIC)

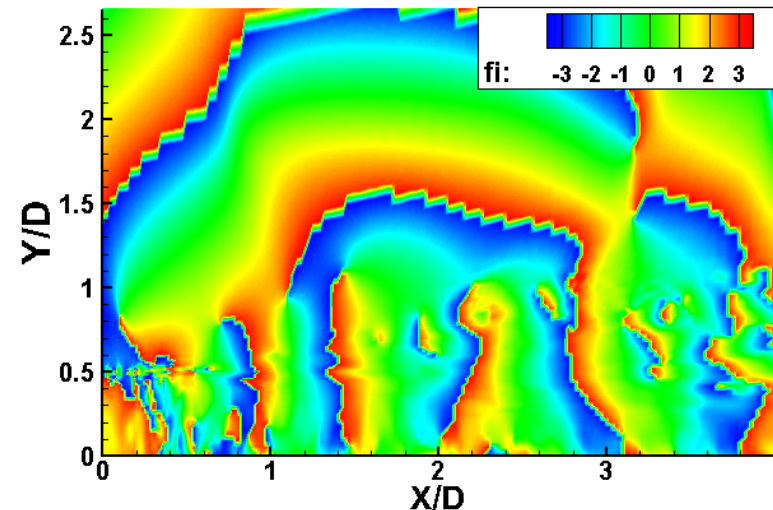


Продольный масштаб зон пониженного давления

- Зоны пониженного давления имеют сходную структуру, а их продольный размер линейно увеличивается с увеличением расстояния от среза сопла по закону  $Y = 0.385X$ .
- Накапливая мгновенные значения давления в продольном сечении, возможно, используя БПФ, визуализировать распространение фазы излучения шума для выбранной частоты.



Поле мгновенного статического давления



Анимация поля фазы излучения шума на частоте  $Sh = 1$

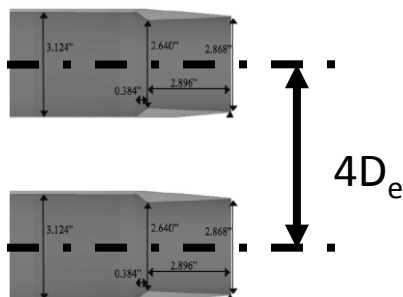


# Взаимное влияние пары нерасчетных сверхзвуковых струй (HIRIC)

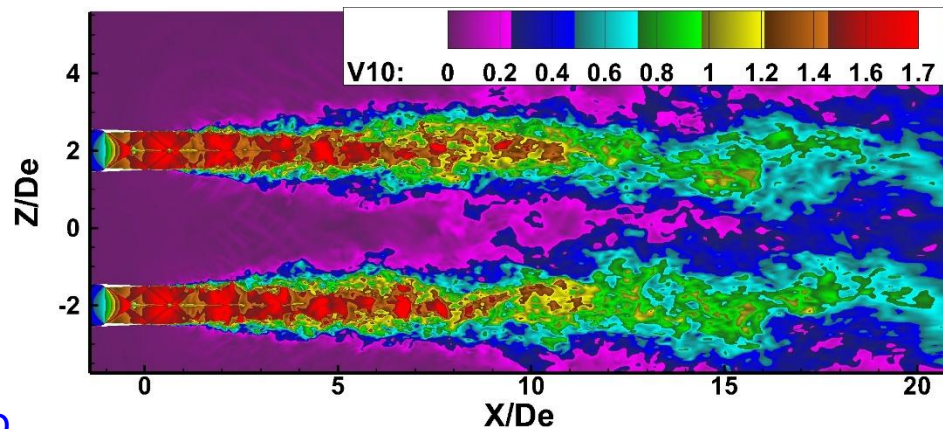
Расчетные сетки  $(4-17) \times 10^6$ .

Режимы истечения:  $\pi_C = 4$  ( $M_j = 1.56$ ),  $T_0 = 300\text{K}$ ,  $600\text{K}$ ,  $1050\text{K}$ ,  $T_a = 300\text{K}$ ,  $Re = 2.4 \times 10^6$ ,  $1.5 \times 10^6$ ,  $0.866 \times 10^6$

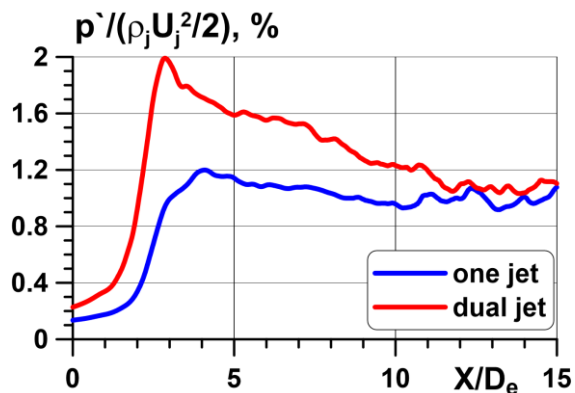
## Схема расположения сопел



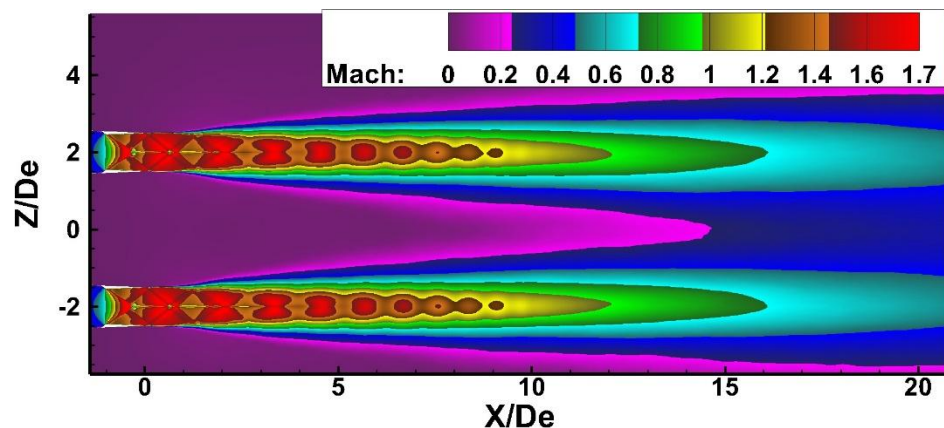
## Мгновенное поле числа Маха



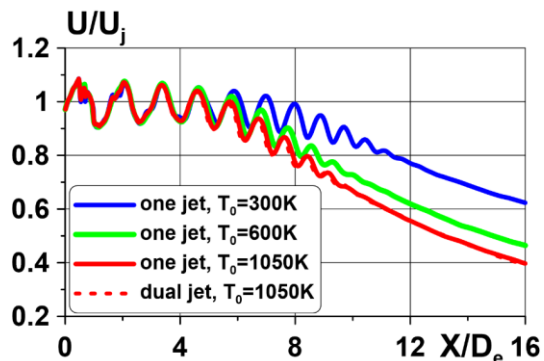
## Распределение пульсаций статического давления между струями



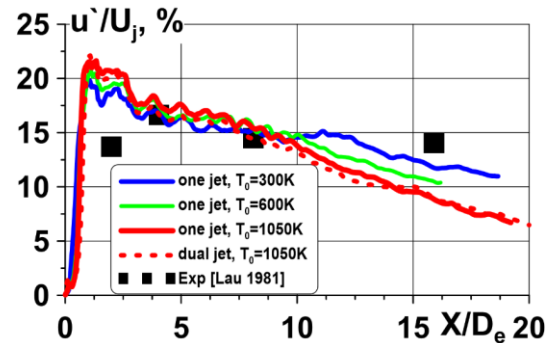
## Осредненное поле числа Маха



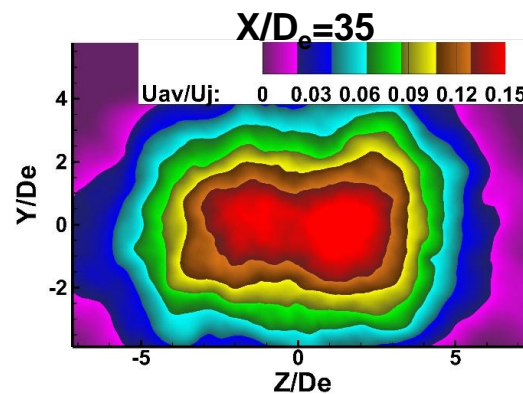
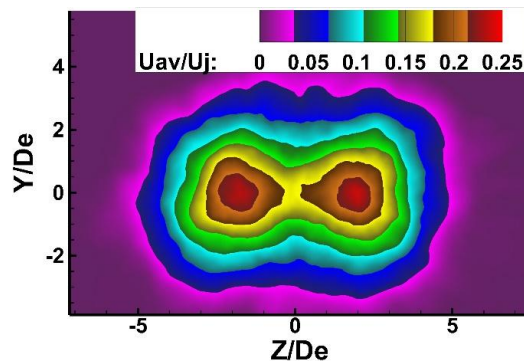
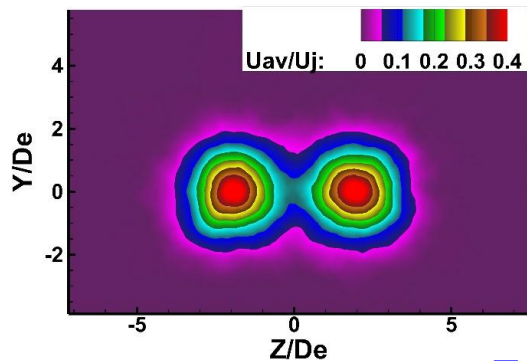
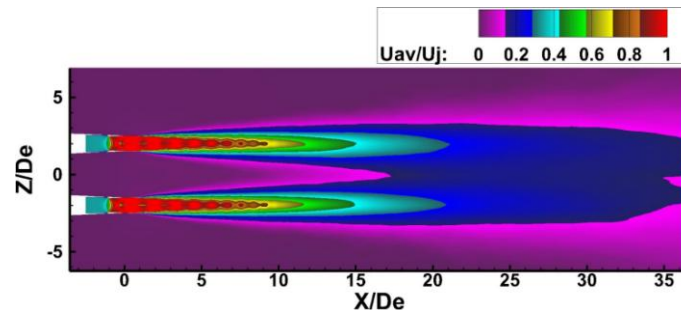
# Взаимодействие пары струй: параметры течения и турбулентности



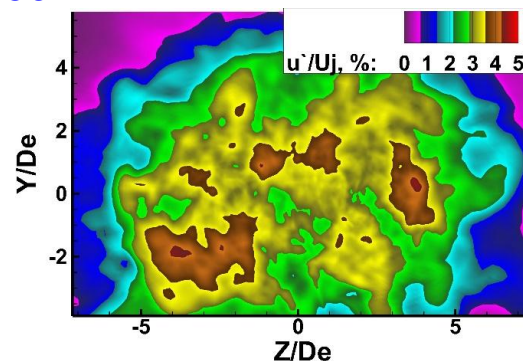
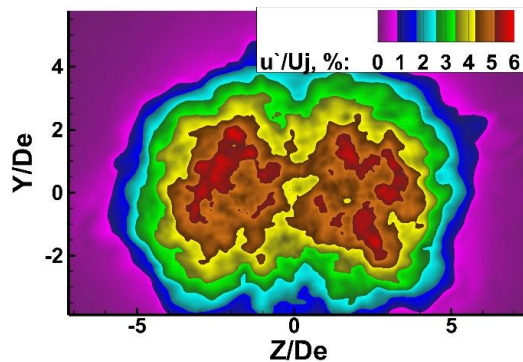
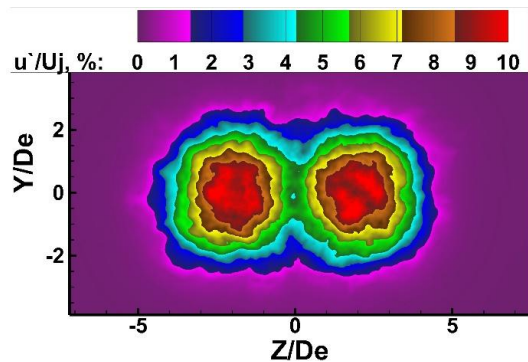
$X/D_e=15$



$X/D_e=25$

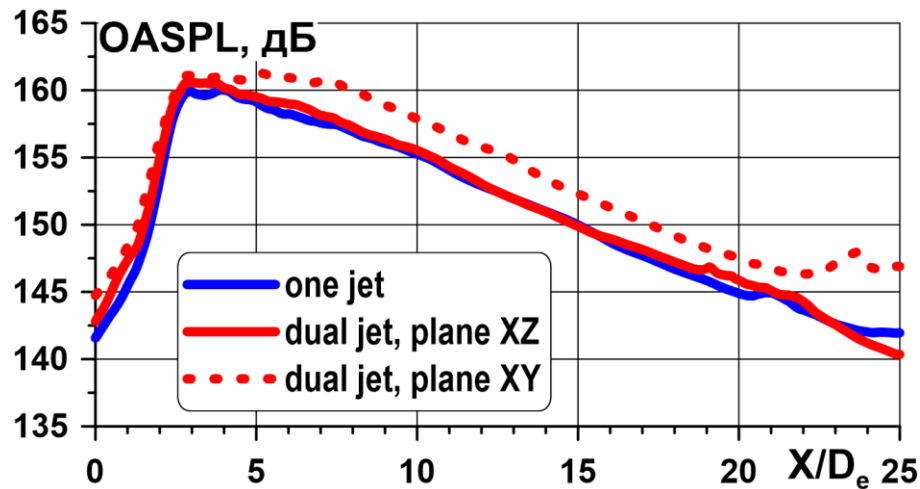


Поля осредненной продольной скорости

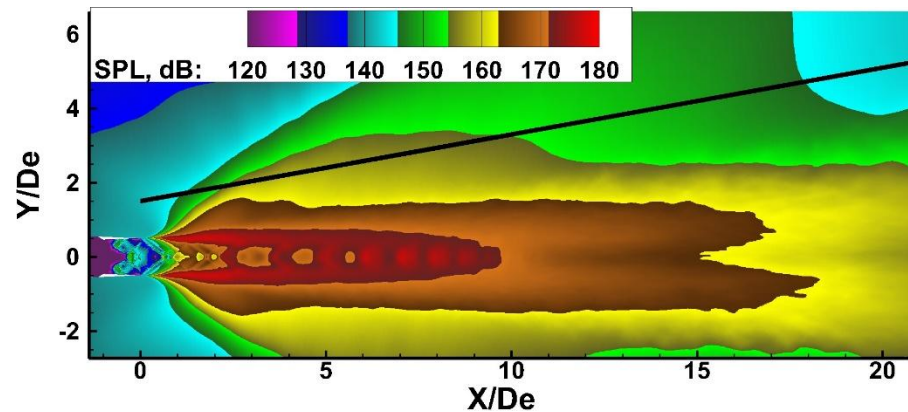


Поля пульсаций продольной скорости

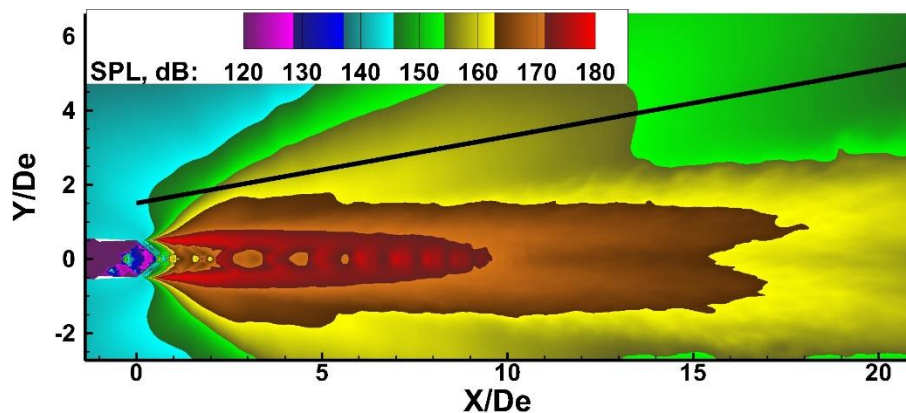
# Уровень шума в ближнем поле струй: две струи vs одна



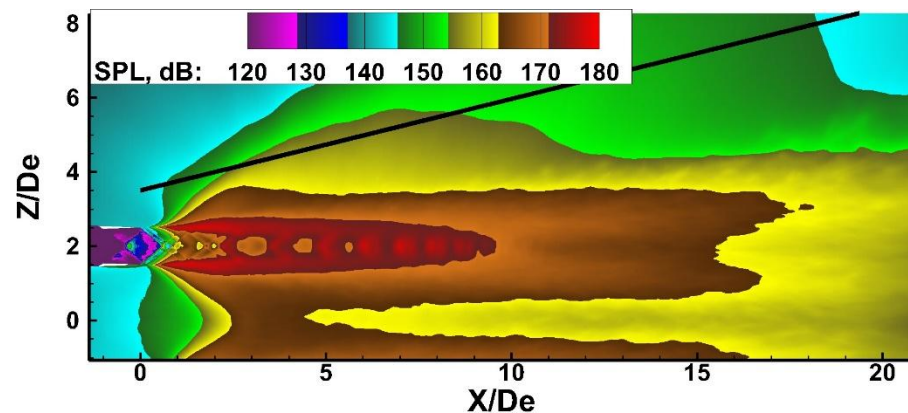
Уровень шума вдоль черной линии



Поле уровня шума для одиночной струи



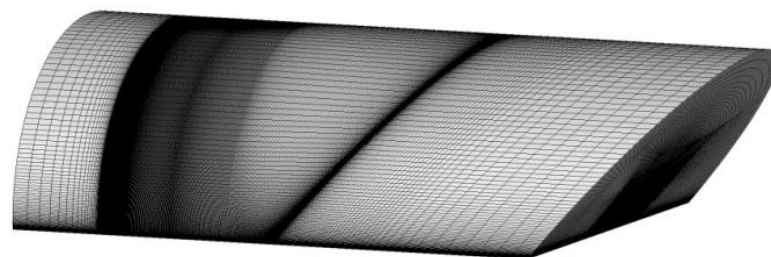
Поле уровня шума для пары струй в плоскости XY



Поле уровня шума для пары струй в плоскости XZ



# Взаимодействие нерасчетных сверхзвуковых струй с газоотбойником. Влияние скорости ветра (HIRIC)



Расчетные сетки: 6.3M, 8.5M

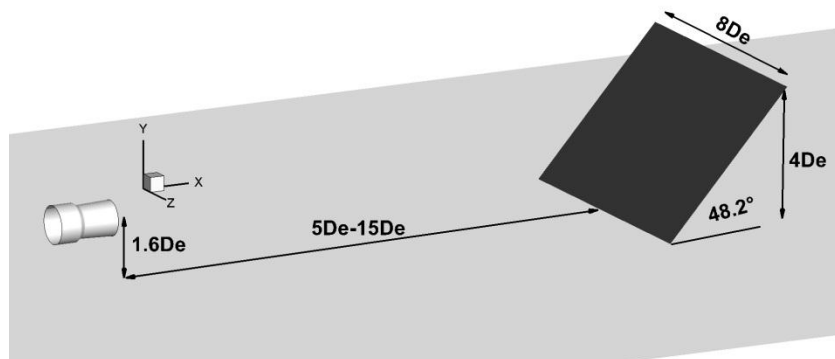


Схема расположения сопла, поверхности аэродрома и газоотбойника

Режимы истечения:

$\pi_C = 4$  ( $M_j=1.56$ ),  $T_0 = 300K, 600K, 1050K,$

$T_a = 300K,$

$Re=2.4 \times 10^6, 1.5 \times 10^6, 0.866 \times 10^6$

Скорость ветра:  $U_w=0, 12 \text{ m/s}, 20 \text{ m/s}$

Положение газоотбойника:

$X_{JBD}/D_e=5,15$

Геометрия сопла и режимные параметры взяты из работ:

- Liu J., Corrigan A., Kailasanath K., Ramammurti R., Heeb N., Munday D., Gutmark E., Impact of Deck and Jet Blast Deflector on the Flow and Acoustic Properties of Imperfectly Expanded Supersonic Jets // AIAA P. 2013. №323.
- Kuizhi Y., Liangliang C., Hu L., Yunliang W. Analysis of jet blast impact of embarked aircraft on deck takeoff zone. // Aerospace Science and Technology. 2015. V. 45. P. 60-66.

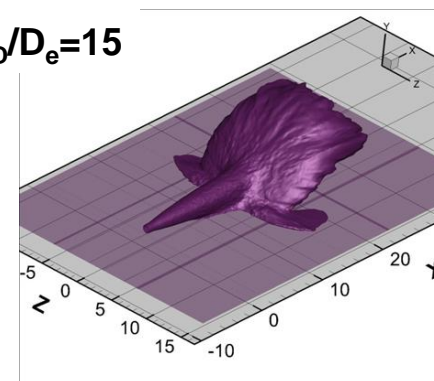
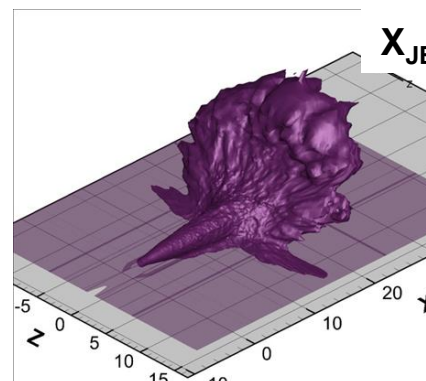
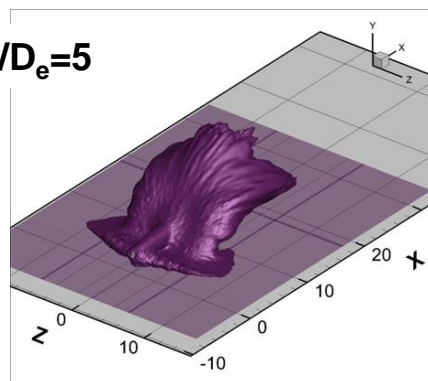
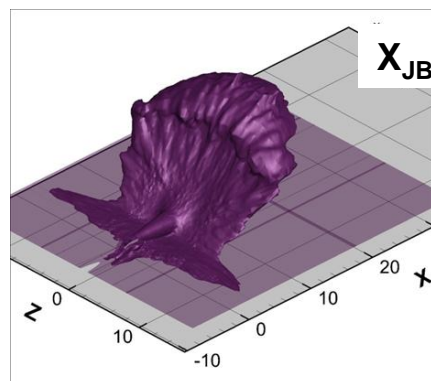
Изоповерхность  $T=350\text{K}$  для осредненной температуры при различной скорости ветра и положениях газотбойника для одной и для пары струй с  $T_0=1050\text{K}$

$U_w=0$

$U_w=20\text{m/s}$

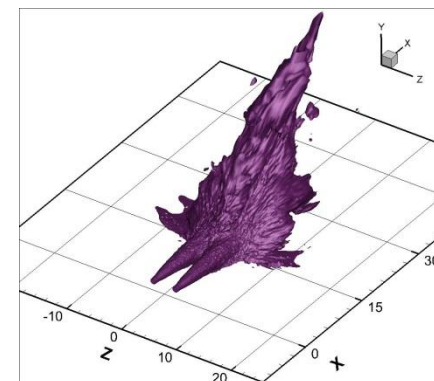
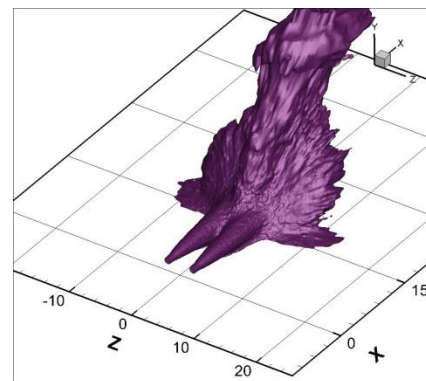
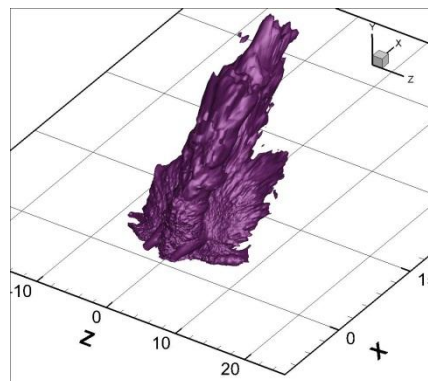
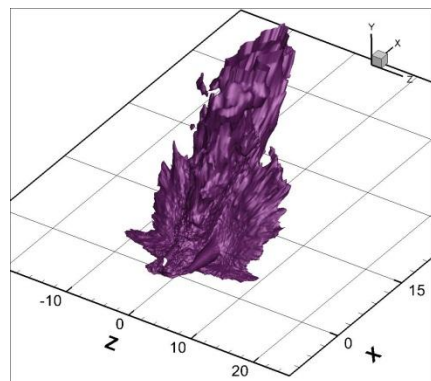
$U_w=0$

$U_w=20\text{m/s}$



Одна струя

$U_w$  заметно влияет на течение на периферии струи: изменяется форма границы зоны безопасности по температуре. Видно сильное трансверсальное растекание струи на поверхности аэродрома перед газотбойником при  $U_w=0$ . При увеличении скорости ветра эти боковые «крылья» загибаются в положительном направлении оси  $X$ , а ширина их несколько уменьшается.



Две струи

Для  $X_{\text{JBD}}/D_e=5$  трансверсальное растекание около стенки начинается практически сразу от среза сопла.

За счет растекания от центра газотбойника в стороны под воздействием ветра ширина зоны безопасности возрастает при увеличении  $U_w$ . Но растекание около газотбойника меньше.

# Влияние $U_w$ на размеры зоны безопасности по пульсациям давления для пары струй и одной струи

$U=0$

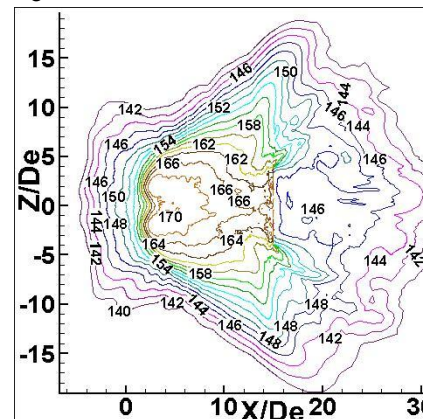
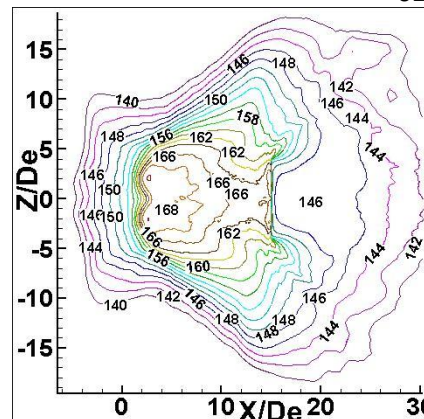
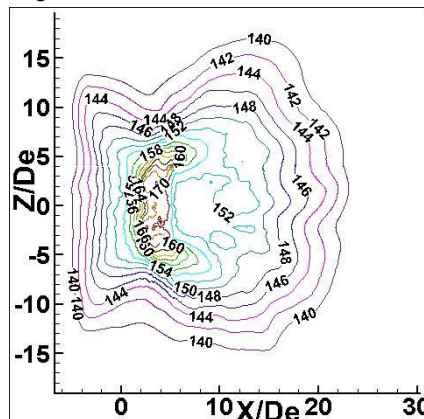
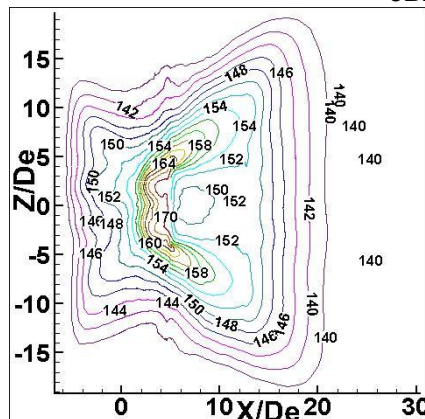
$U=20\text{m/s}$

$U=0$

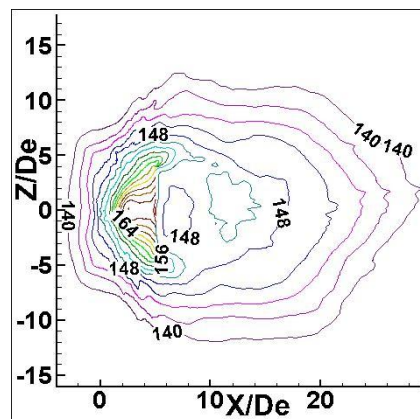
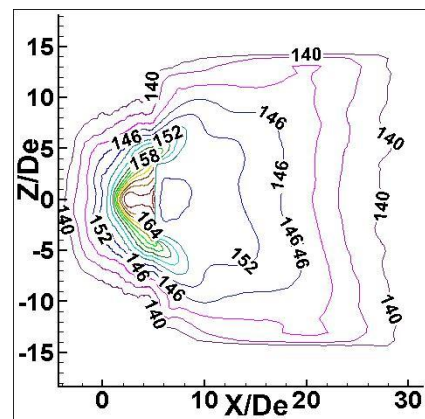
$U=12\text{m/s}$

$X_{JBD}/D_e=5$

$X_{JBD}/D_e=15$



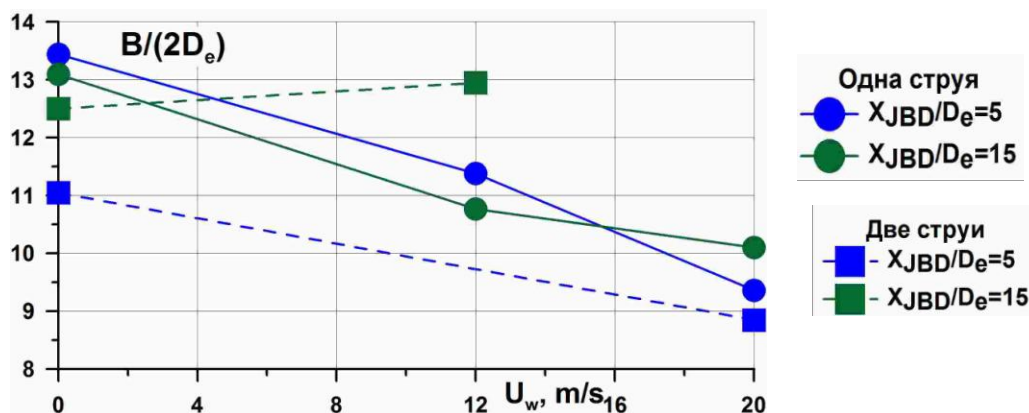
Две струи



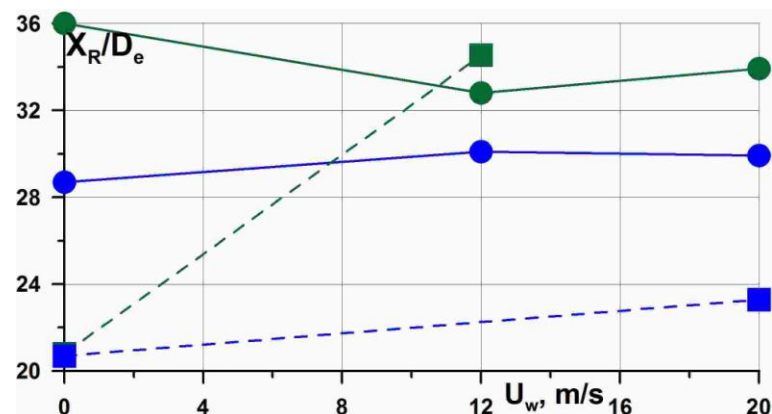
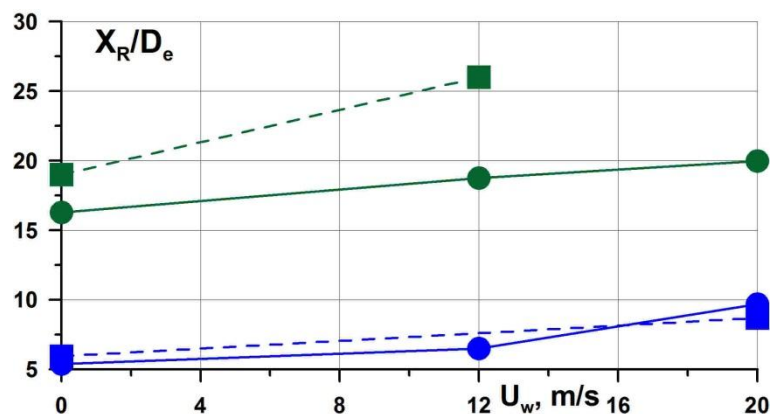
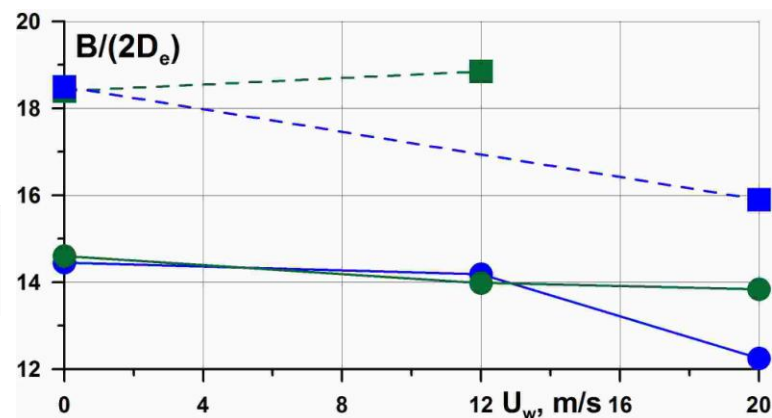


# Влияние $X_{JBD}$ и $U_w$ на ширину и положение правой границы зон безопасности для одной струи и пары струй:

по температуре



по пульсациям давления



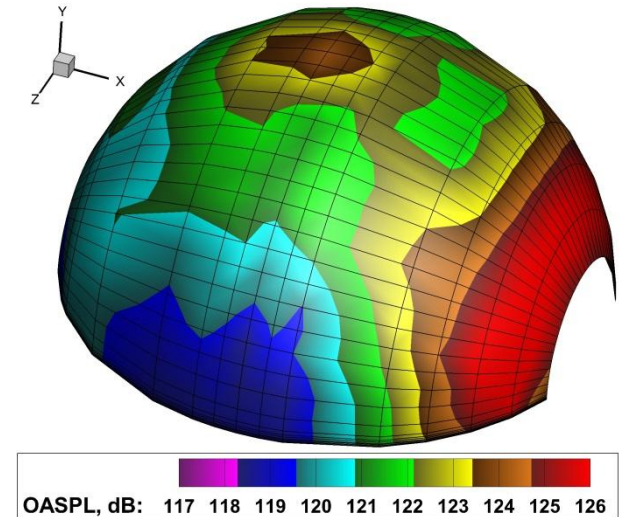
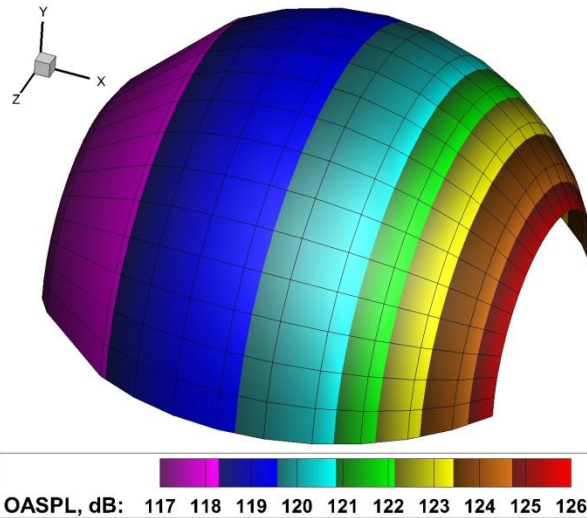
Для одной и пары струй влияние  $U_w$  на размеры зон безопасности для варианта с  $X_{JBD}/D_e=15$  разнонаправлено. Наибольшее влияние скорость ветра оказывает на ширину зоны безопасности по температуре.

# Уровень шума в дальнем поле свободных струй и аэродромных струй с газоотбойником на расстоянии $49D_e$

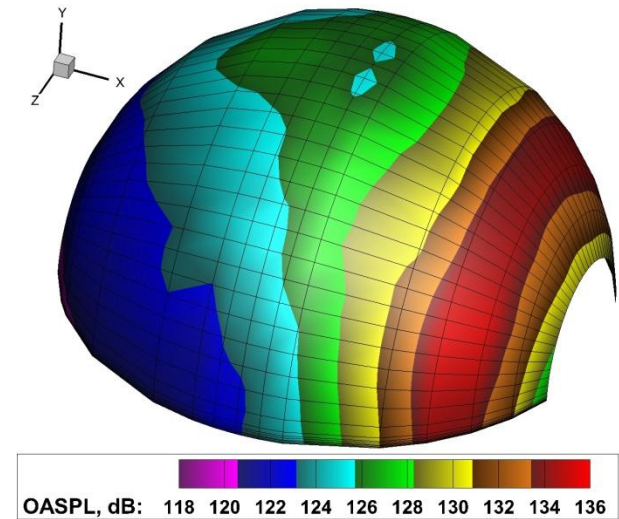
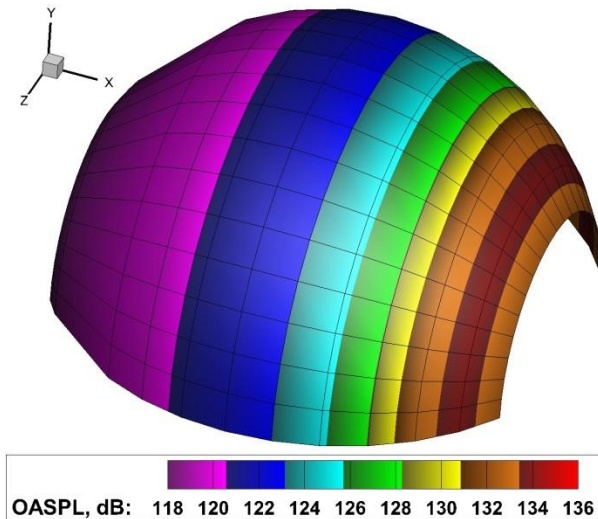
Свободная струя

Пристеночная струя с  
газоотбойником

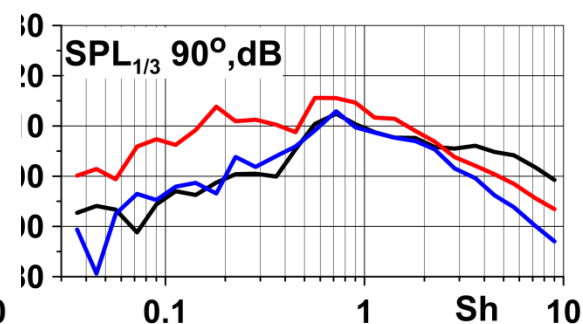
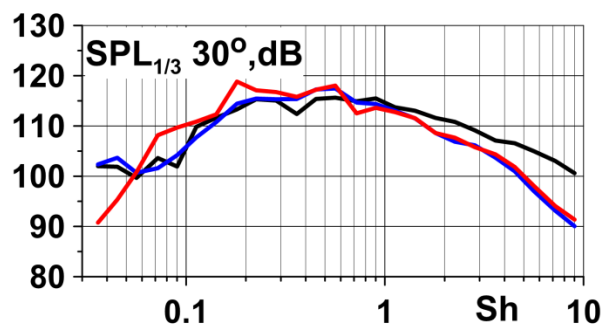
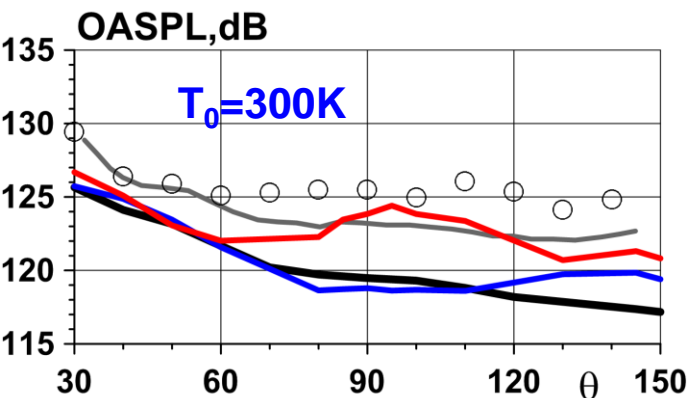
$T_0=300K$



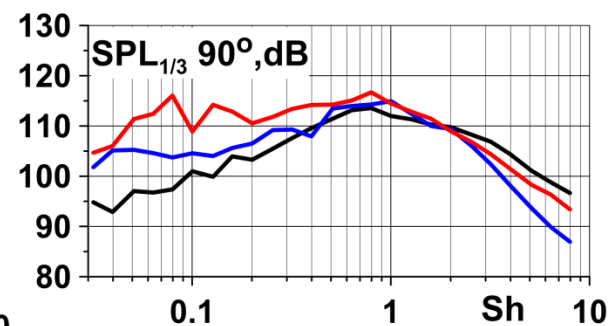
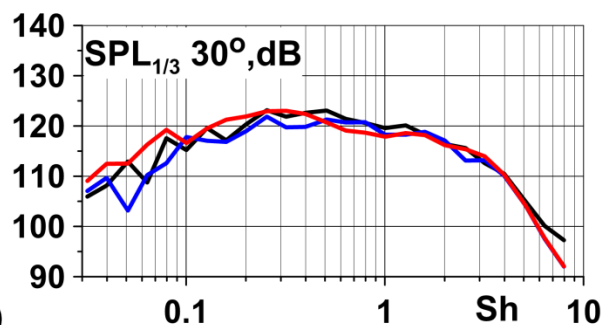
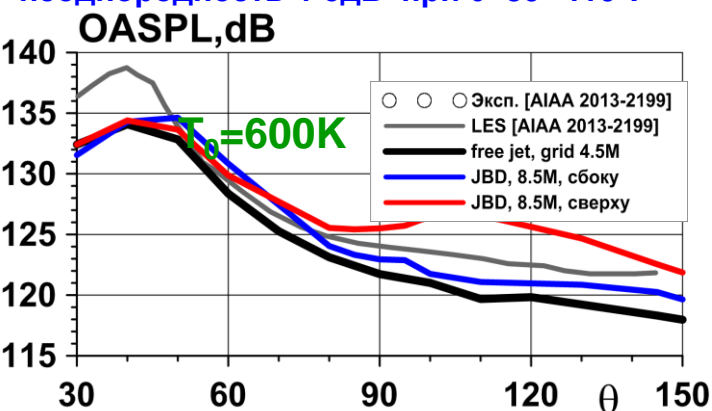
$T_0=600K$



# Влияние газотбойника на общий уровень шума в дальнем поле струй на расстоянии $49D_e$



У струи с газотбойником сбоку подъем шума на 2-3дБ при  $\theta \geq 120^\circ$ . Сверху подъем на 3-5дБ при  $\theta > 60^\circ$ . Азимутальная неоднородность 4-5дБ при  $\theta = 80^\circ - 110^\circ$ .

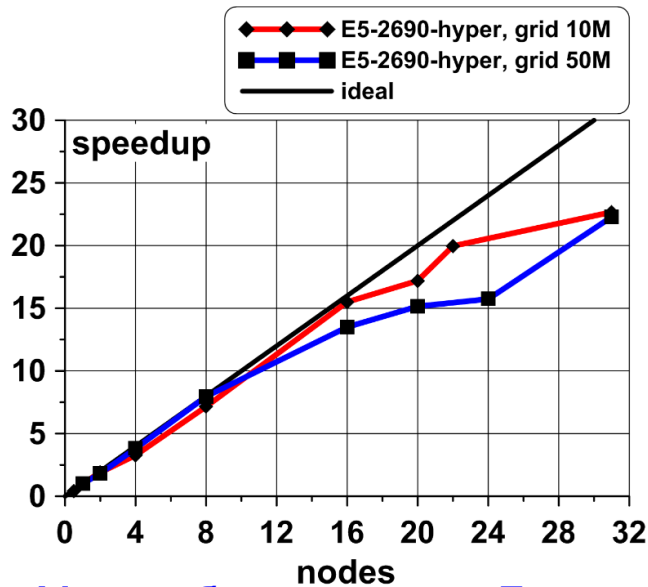


У струи с газотбойником сбоку увеличение шума, 1-1.5Б при  $\theta \geq 40^\circ$ . Сверху подъем шума на 4-6дБ при  $\theta > 90^\circ$ . Азимутальная неоднородность 4-7дБ при  $\theta = 90^\circ - 150^\circ$ .

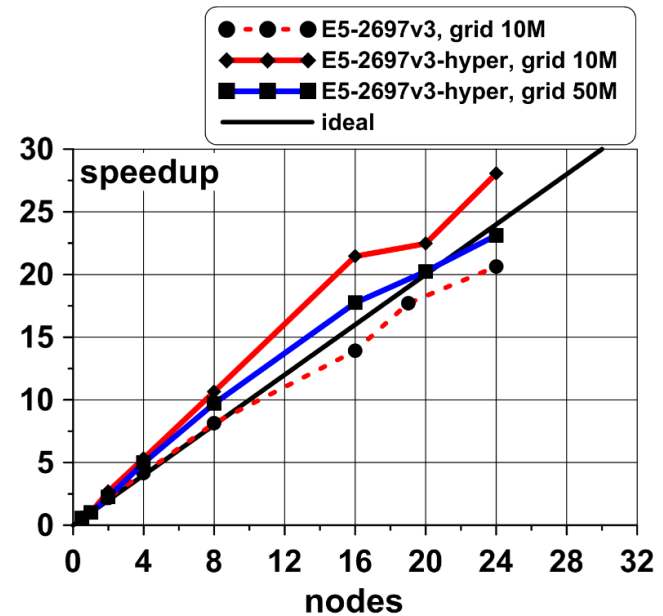
Наибольшая азимутальная неоднородность при 90°. При  $T_0 = 300K$  подъем на низких частотах до 10дБ, спад на высоких до 7дБ. При  $T_0 = 600K$  заметное влияние только при  $\theta \geq 90^\circ$ .



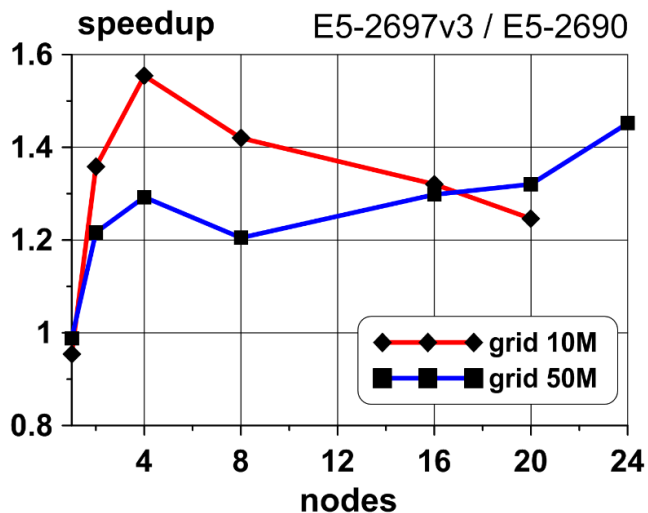
# Исследование эффективности работы RANS/ILES-метода на суперкомпьютере (HIRIC)



Масштабируемость на E5-2690



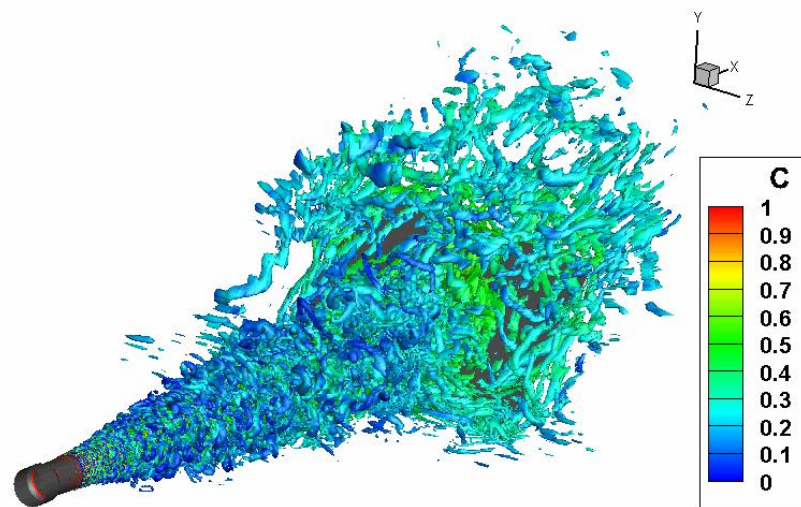
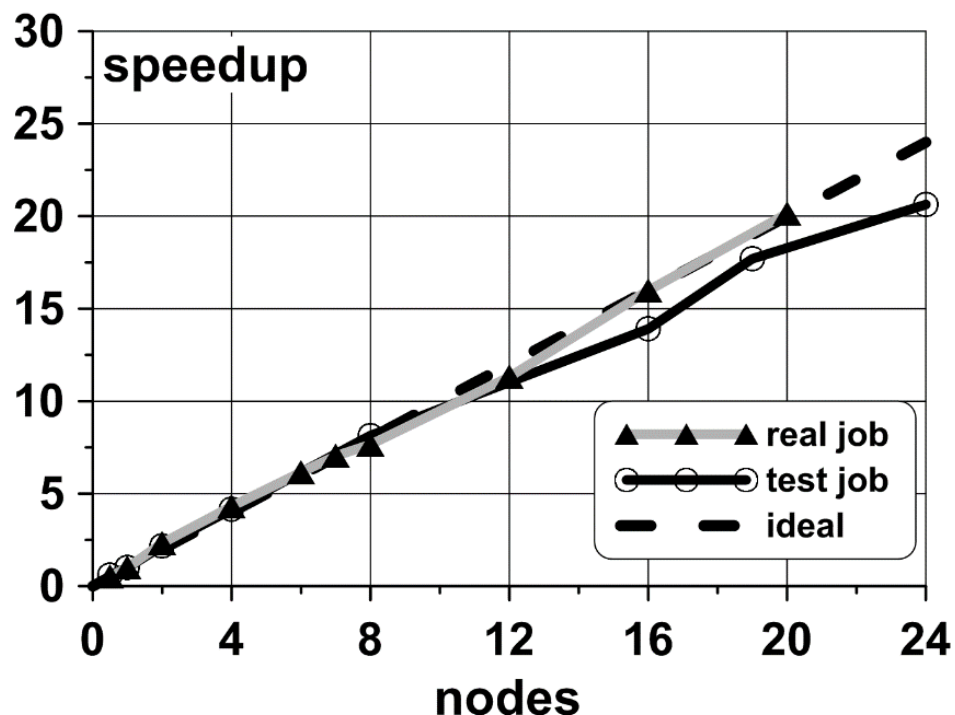
Масштабируемость на E5-2697v3



Сравнение быстродействия

Параметры запусков:  
Сетка 10М – 121 блок.  
Сетка 50М – 605 блоков.  
Один узел – 2 MPI процесса.  
Для каждого процесса использовалось по 16 или 28 OpenMP процессов.

# Сравнение масштабируемости на тестовой и реальной задачи



Анимация Q-критерия

Параметры запусков:

Тестовая задача – 10М, 121 блок.

Реальная задача – 8.8М, ~800 блоков.

Один узел – 2 MPI процесса.

Для каждого процесса использовалось по 16 OpenMP процессов.

Архитектура узлов: E5-2690.