

Код Jet3D: некоторые задачи 2015 года

Бендерский Л.А., Любимов Д.А., Потехина И.В., Федоренко А.Э.

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

**CFD weekend «Отечественные CFD-коды 2015»
ИПМ им. М.В. Келдыша, Москва, 28-29 ноября 2015**

Характеристики кода:

Название кода:

JET3D

Что моделируется (классы течений):

несжимаемые течения

сжимаемые течения: дозвук - гиперзвук
аэроакустика

Модели:

H-C

Моделирование турбулентных течений:

URANS DES RANS/ILES

Сетки и сеточные технологии:

структурированные многоблочные криволинейные сетки

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

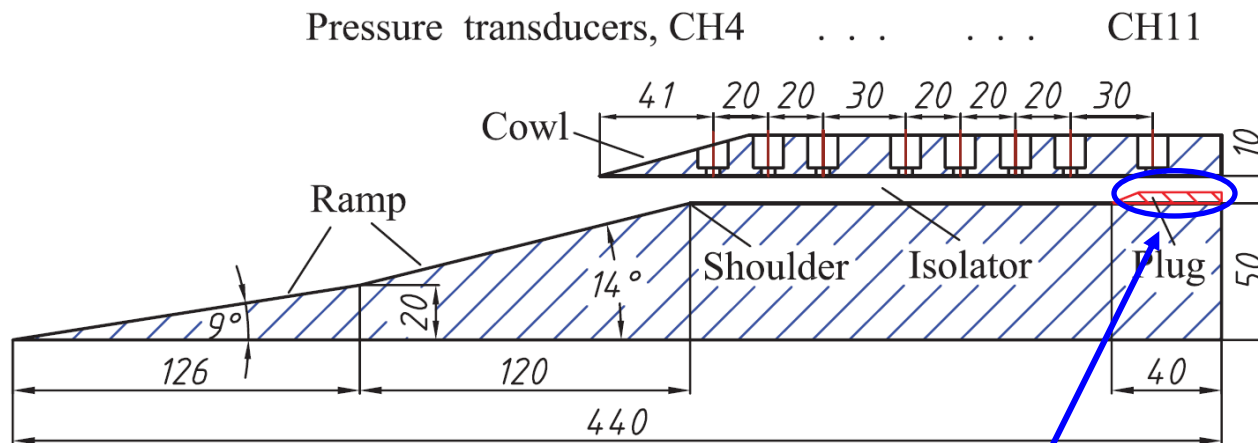
URANS-ветвь JET3D

Исследование с помощью URANS течения в модельном сверхзвуковом воздухозаборнике (ВЗ) смешанного сжатия при $M_0=5.9$ при различных степенях дросселирования

Фотография и схема модели ВЗ 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.

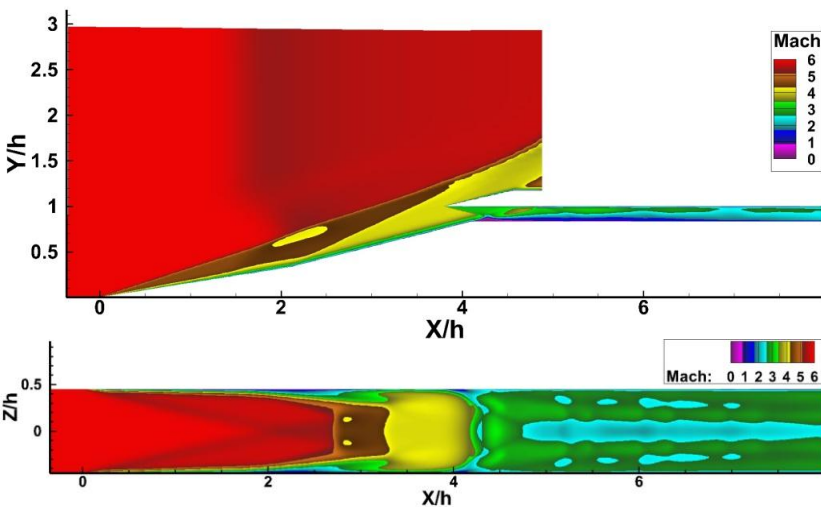
Боковые стенки по мысли экспериментаторов должны были обеспечить двумерное течение на входе в ВЗ .



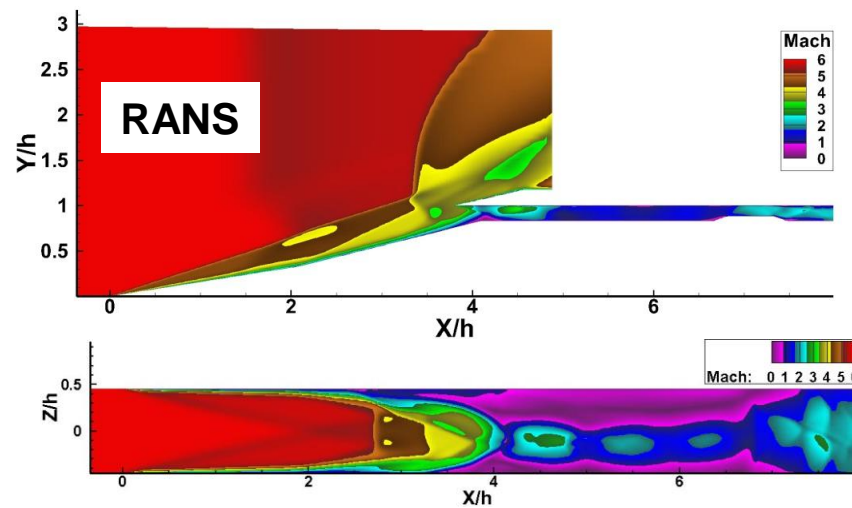
Дроссельные вставки различной высоты

Влияние дросселирования на течение в канале ВЗ. Поля чисел Маха.

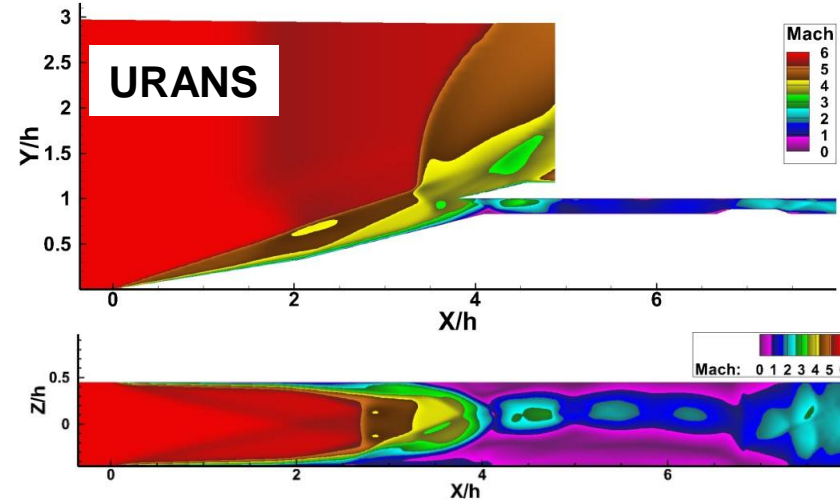
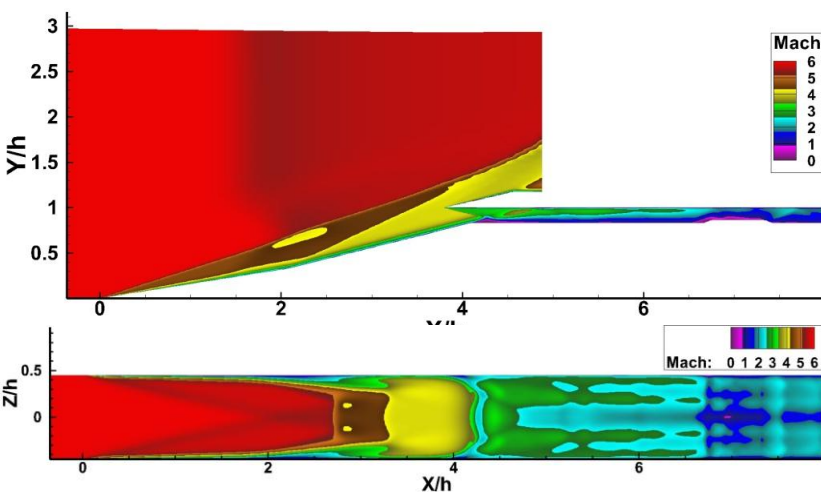
TR=0



TR=0.3



TR=0.2

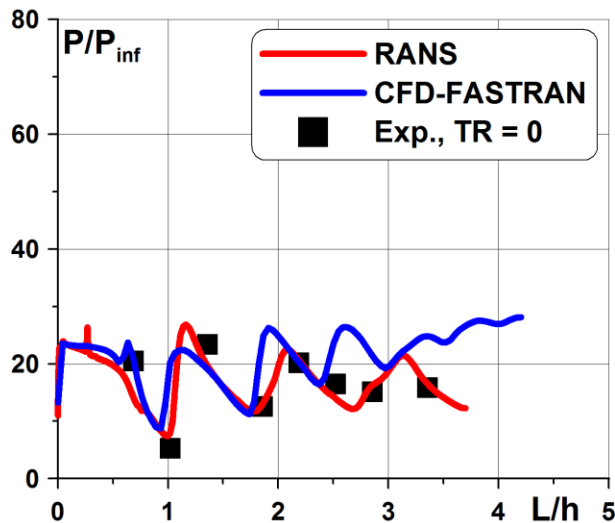


От пограничного слоя на щеках ВЗ идут скачки уплотнения, в результате в канале ВЗ наблюдается сложная трехмерная структура течения

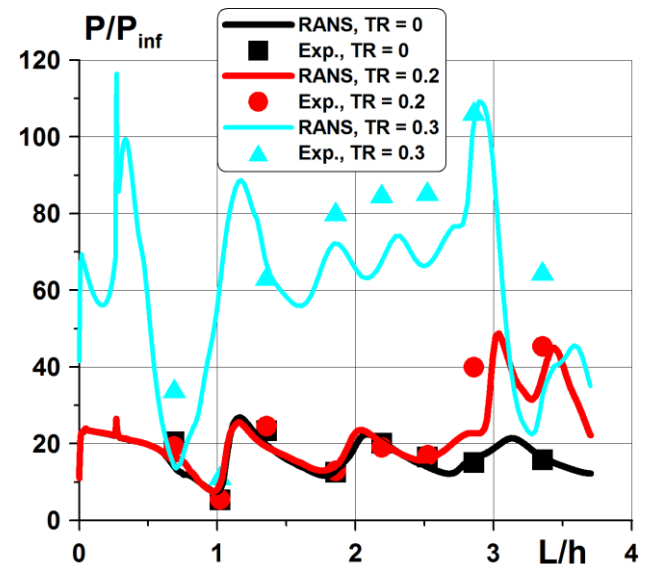
Разрушается система скачков уплотнения; течение теряет устойчивость и становится асимметричным

Сравнение результатов расчетов с экспериментом

Распределение статического давления вдоль верхней стенки ВЗ

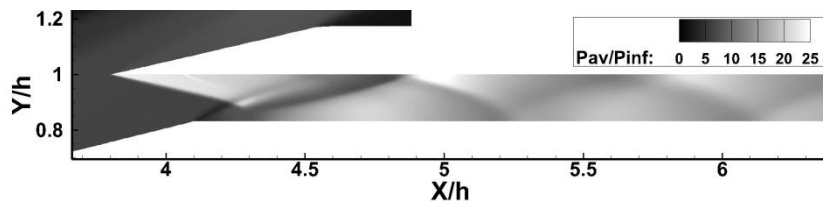


Сравнение расчетов настоящим методом и пакетом FASTRAN с данными эксперимента для $TR=0$.

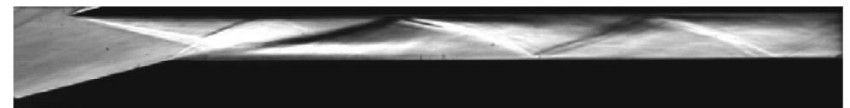


Влияние дросселирования. Сравнение расчетов настоящим методом с экспериментом.

Поля статического давления в ВЗ при $TR=0$.



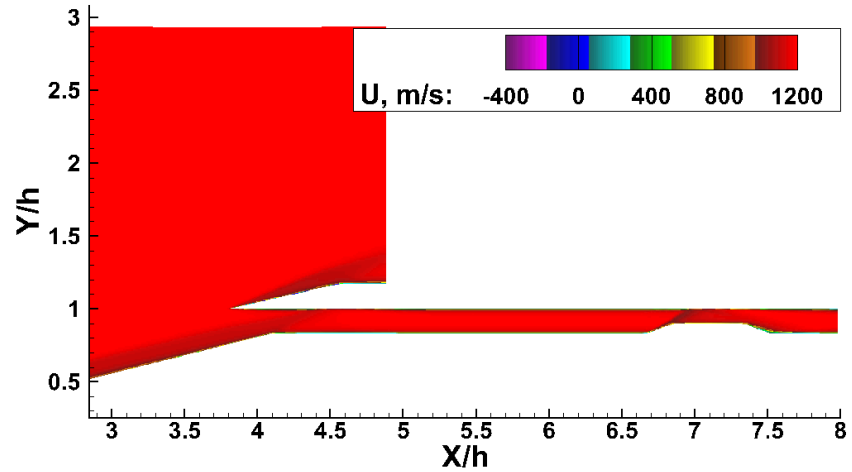
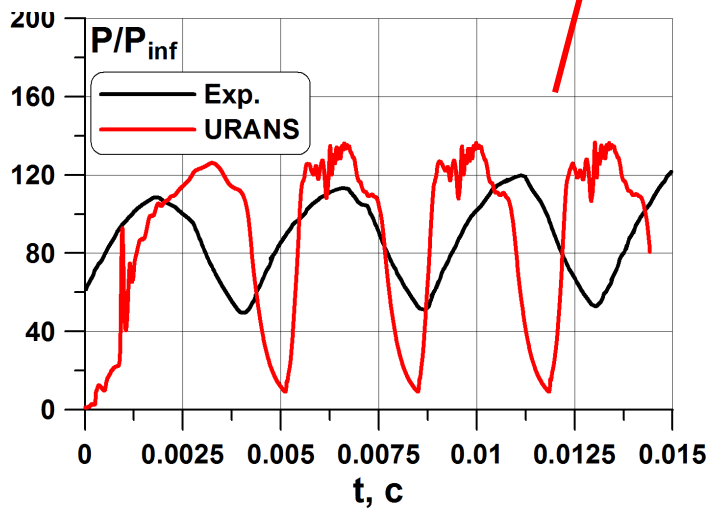
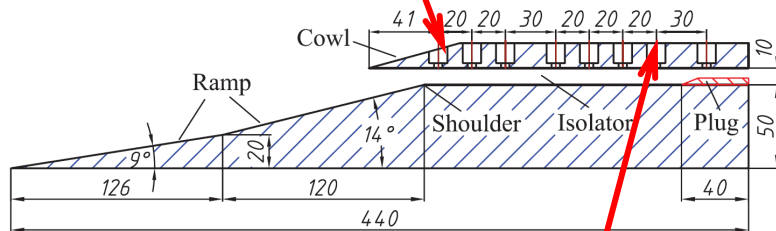
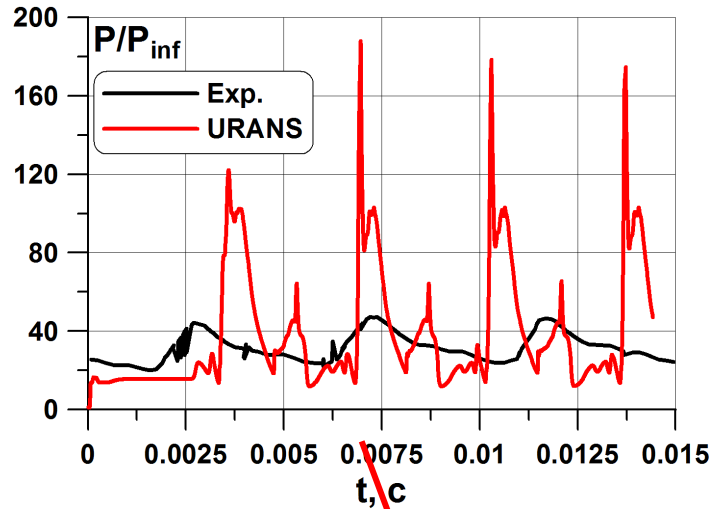
Расчет



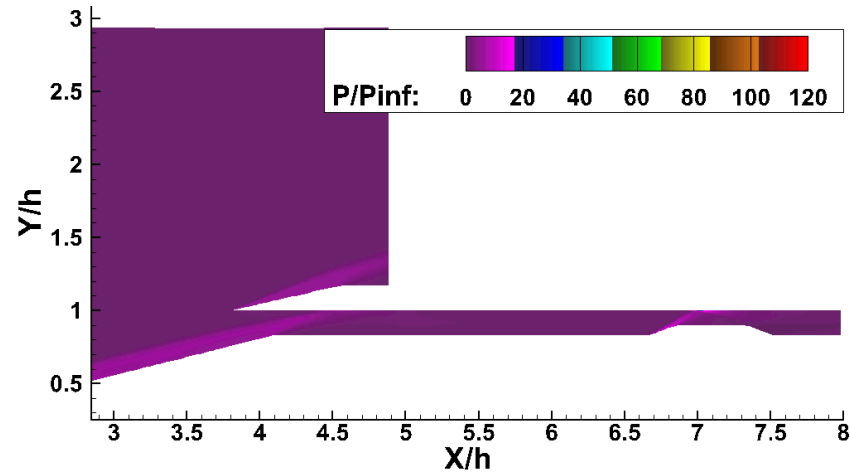
Эксперимент

Помпаж ВЗ. TR=0.4

Осциллограмма давления, сравнение с экспериментом



Мгновенное поле скорости



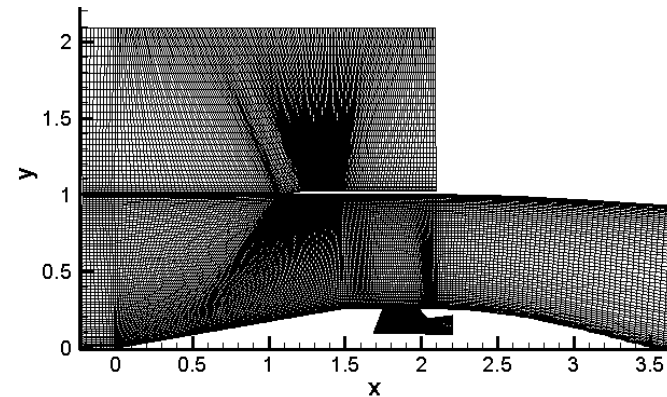
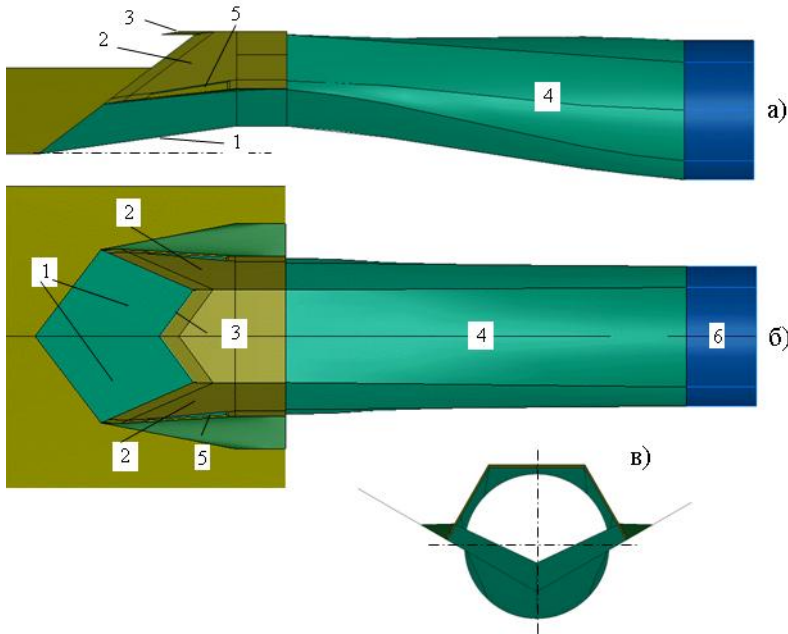
Мгновенное поле давления

Частота помпажа в расчете 300Гц,
в эксперименте – 220Гц

RANS/ILES-вѢТВѢ JET3D

Влияние дросселирования на течение и уровень турбулентных пульсаций в конвергентном сверхзвуковом ВЗ $M_p=1.8$

Геометрия воздухозаборника (ВЗ)



Число ячеек 3.5×10^6

$M=1.82$

$Re=1.6 \times 10^6$

Общий вид воздухозаборника *

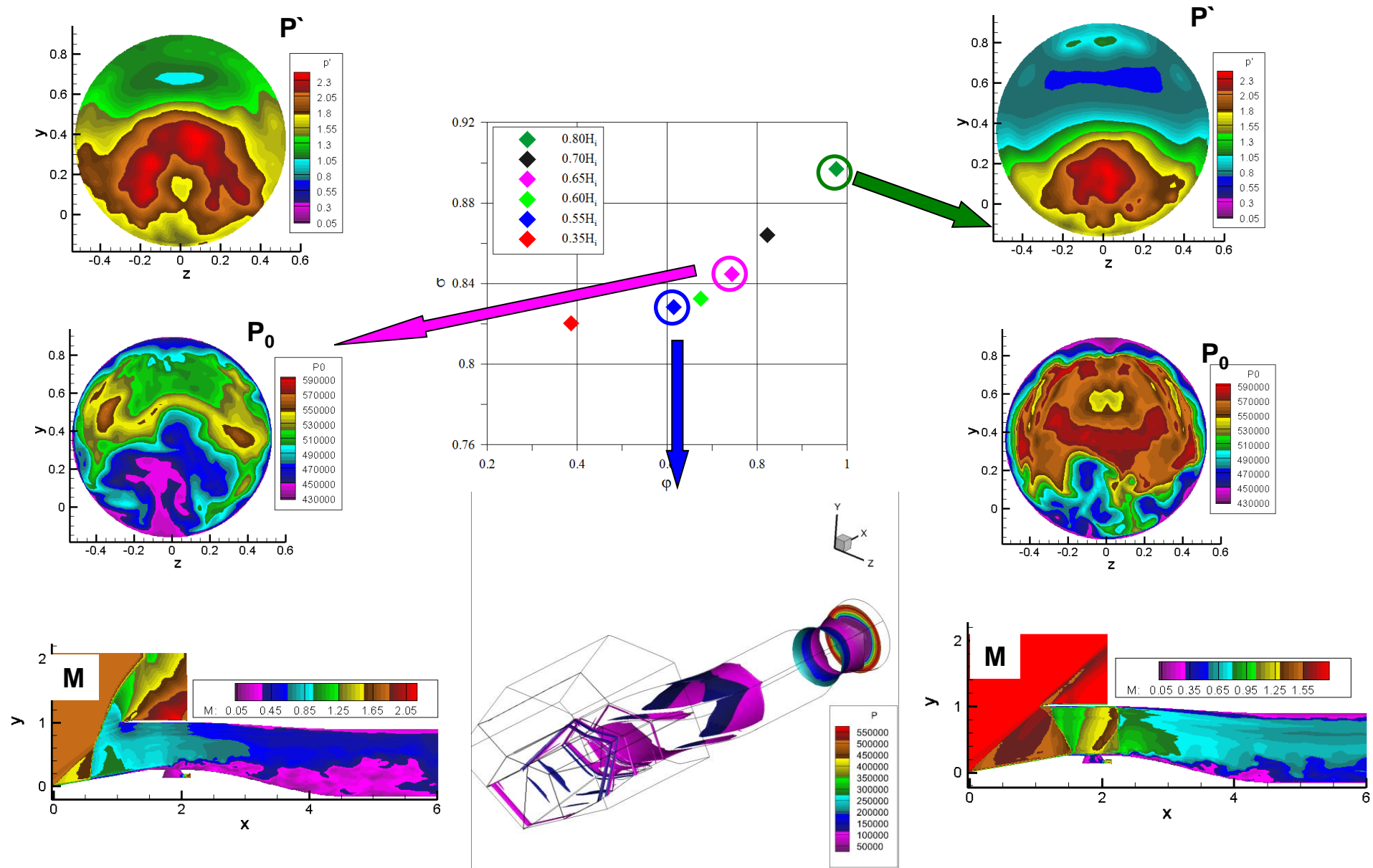
а – вид сбоку в плоскости симметрии, б – вид сверху, в – вид спереди

1 – поверхности торможения, 2 – боковые стенки, 3 – обечайка, 4 – дозвуковой диффузор, 5 – окна перепуска 6 – цилиндрическая секция перед входом в двигатель

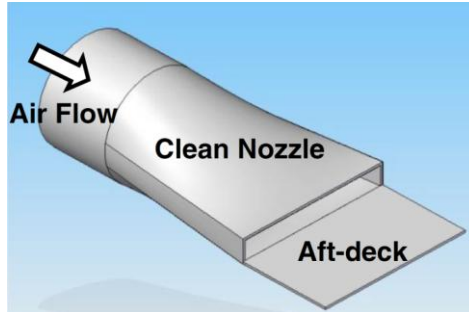
Рассматривались два варианта системы слива пограничного слоя с $H_{\text{bleed}}=0.05H_i$ и $H_{\text{bleed}}=0.1H_i$. H_i – высота входа ВЗ.

* Геометрия предоставлена Степановым В.А., Виноградовым В.А.(ЦИАМ)

Влияние дросселирования на течение в канале ВЗ для $H_{\text{bleed}}=0.05H_i$



Влияние температуры струи и экрана течение в нерасчетной сверхзвуковой струе из прямоугольного сопла

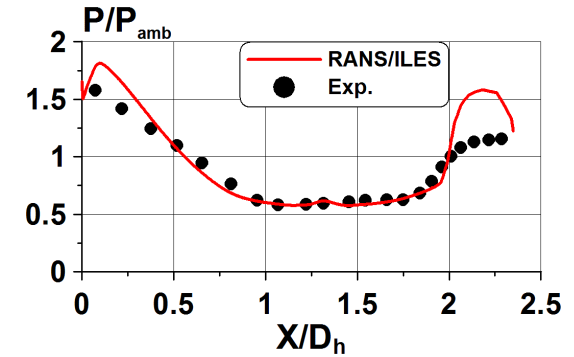


Расчетные сетки $(7.4-7.8) \times 10^6$

$$M_j = 1.467$$

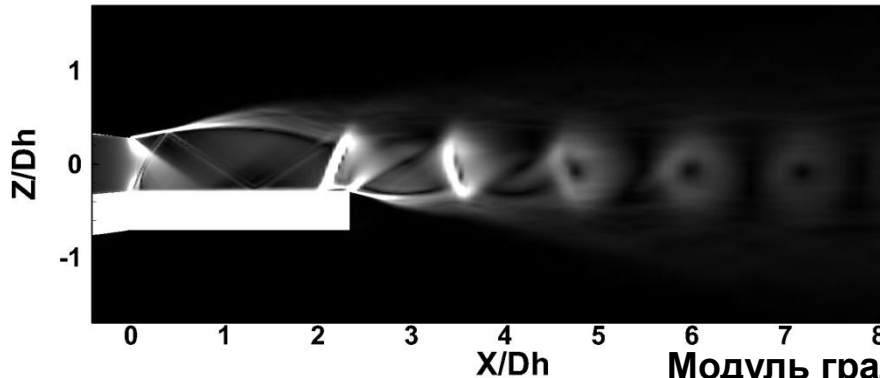
$$T_0 = 300K, Re = 1.142 \times 10^6$$

$$T_0 = 600K, Re = 0.466 \times 10^6$$

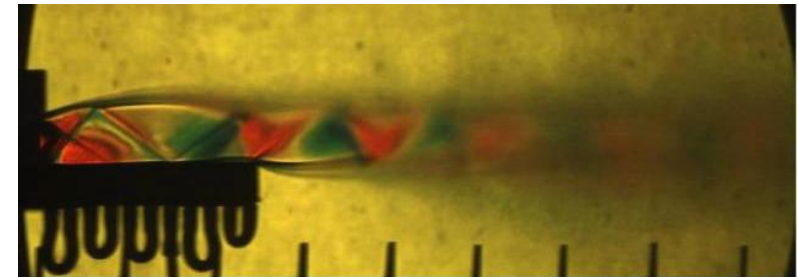


Распределение статического давления вдоль экрана

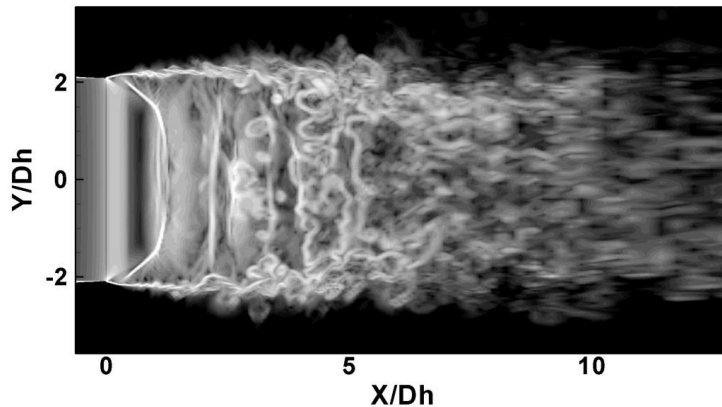
RANS/ILES



Эксперимент

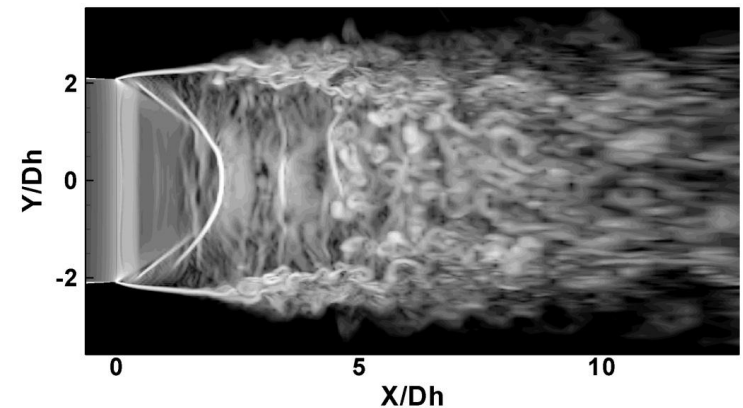


Модуль градиента плотности



Сопло без экрана

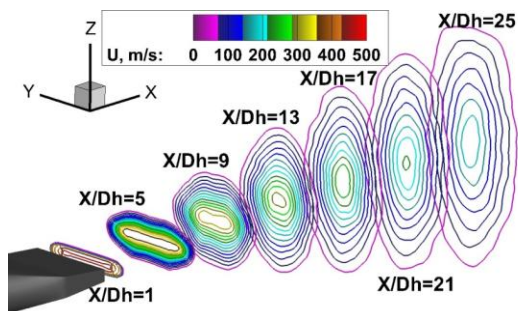
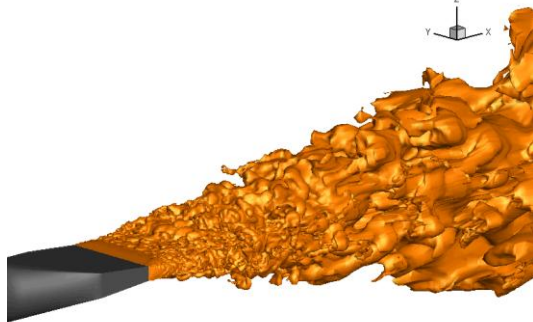
Поле $\log |\overline{grad \rho}|$



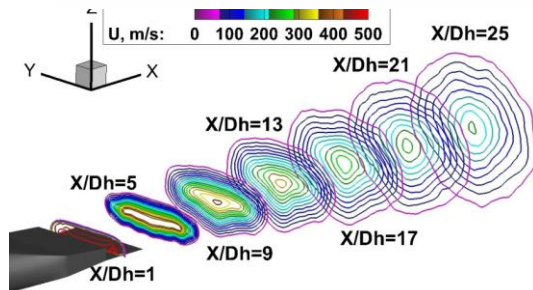
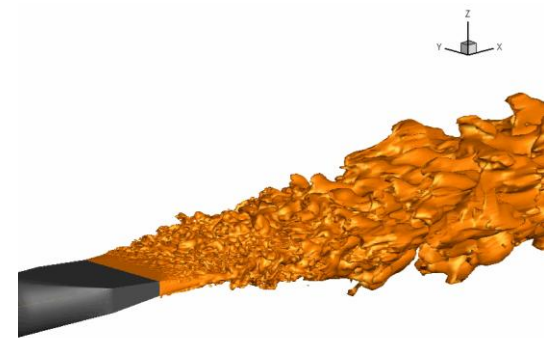
Сопло с экраном

Влияние температуры струи и экрана течение в нерасчетной сверхзвуковой струе из прямоугольного сопла (продолжение)

Сопло без экрана. $T_{0in}=300K$

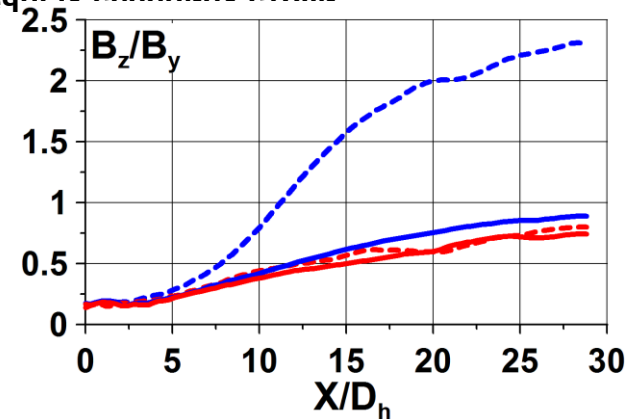
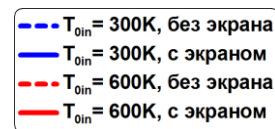
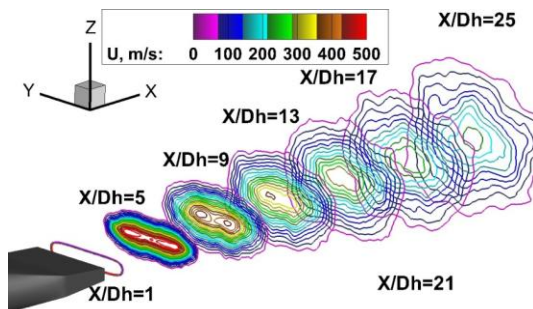


Сопло с экраном, $T_{0in}=300K$



Изолинии осредненной продольной скорости в поперечных сечениях струй

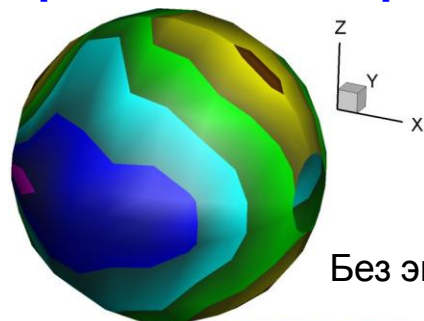
Сопло без экрана, $T_{0in}=600K$



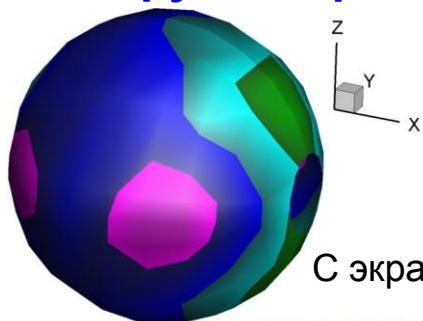
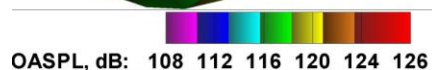
Отношение размеров струй в вертикальном и горизонтальном направлении

Влияние температуры струи и экрана на общий уровень шума в нерасчетной сверхзвуковой струе из прямоугольного сопла ($R/Dh=200$)

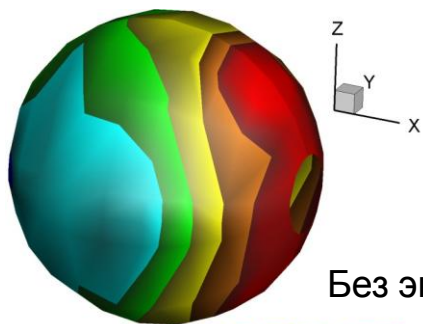
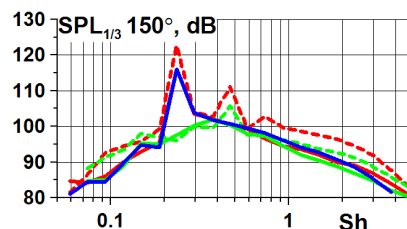
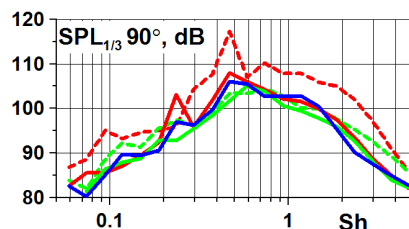
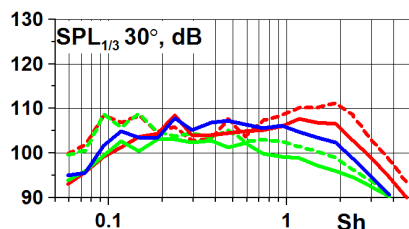
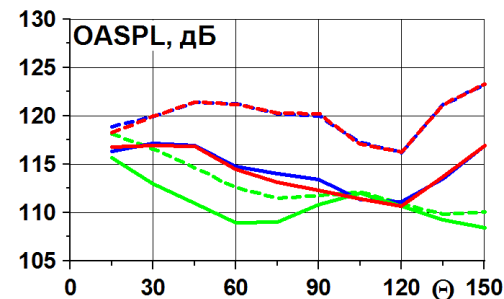
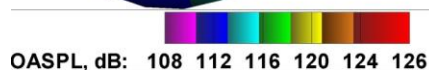
Холодные струи



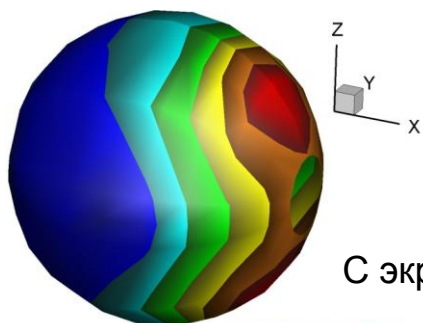
Без экрана



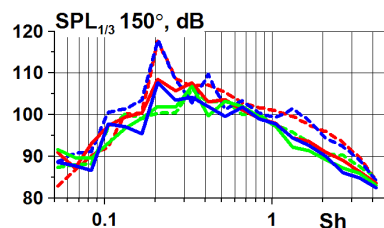
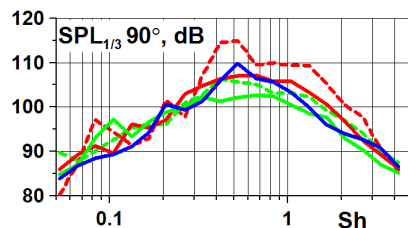
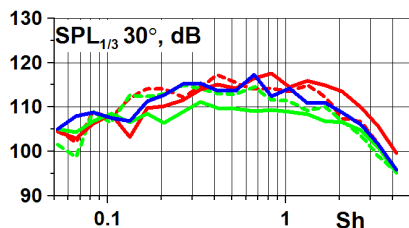
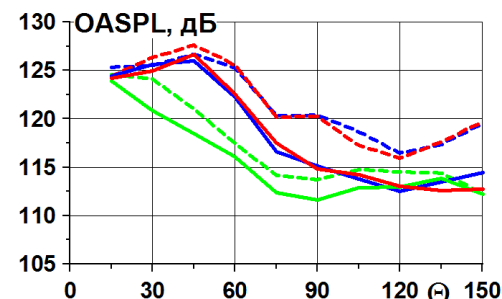
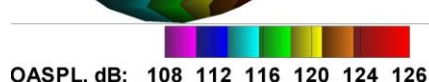
С экраном



Без экрана

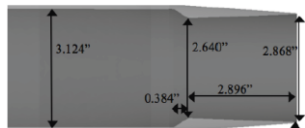


С экраном



Горячие струи

Холодные и горячие нерасчетные сверхзвуковые пристеночные струи и пристеночная струя с отбойником $\pi=4$, $M_j=1.56$



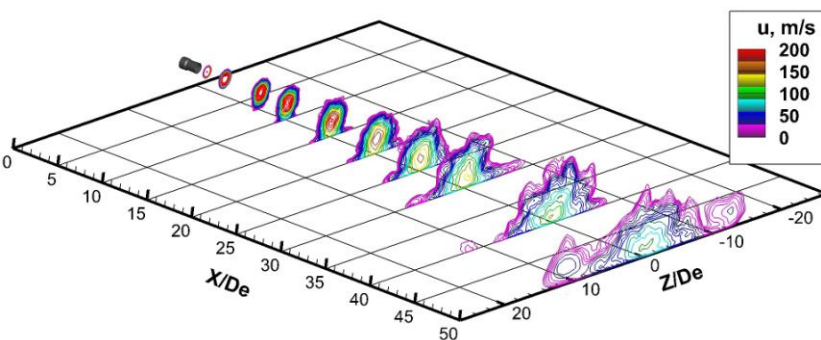
Геометрия C-D сопла
(AIAA P. 2013. №323) $M_p=1.5$



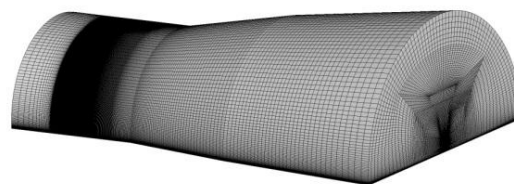
Схема расположения сопла, поверхности аэродрома и отбойника

Холодная, $T=300K$, $Re=2.4 \times 10^6$

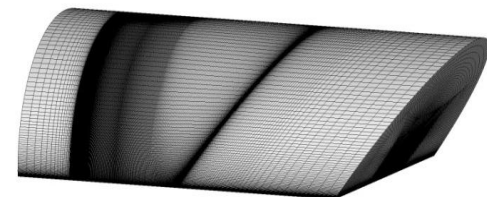
Горячая, $T=600K$, $Re=1.5 \times 10^6$



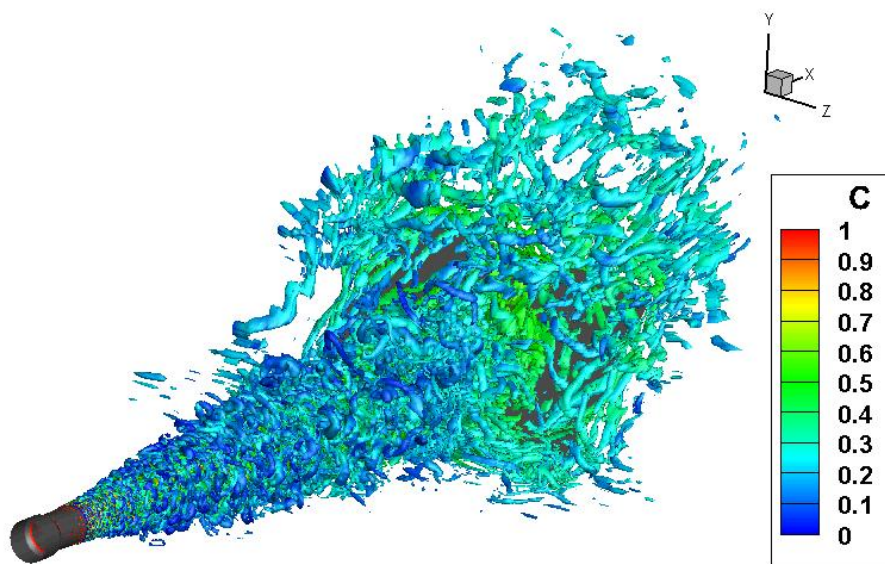
Трансверсальное растекание пристеночной холодной струи. Мгновенная продольная скорость.



Пристеночная струя.
Сетка 6.7×10^6 ячеек.



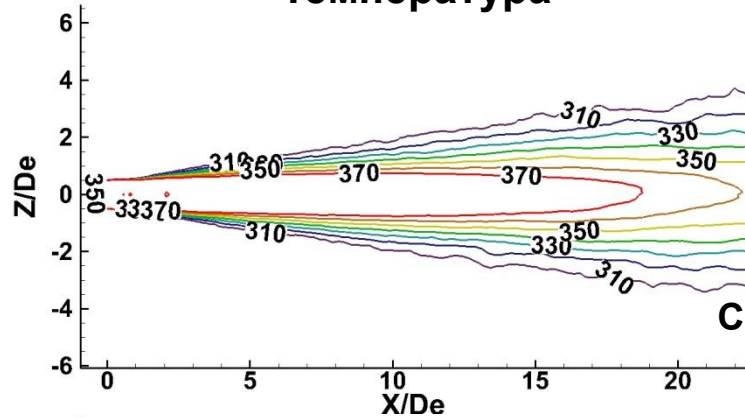
Пристеночная струя с отбойником.
Сетка 8.5×10^6 ячеек.



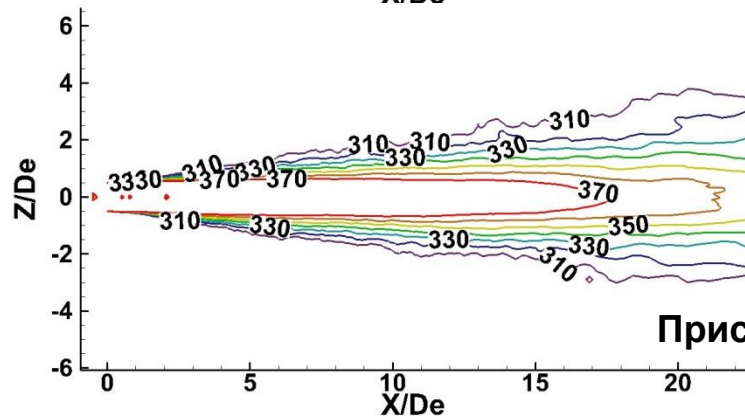
Натекание струи на отбойник. Анимация Q-критерия (в цветах концентрации пассивной примеси, которой помечена струя).

Изолинии осредненной статической температуры и пульсаций давления для горячих струй. *Определение зоны безопасности.*

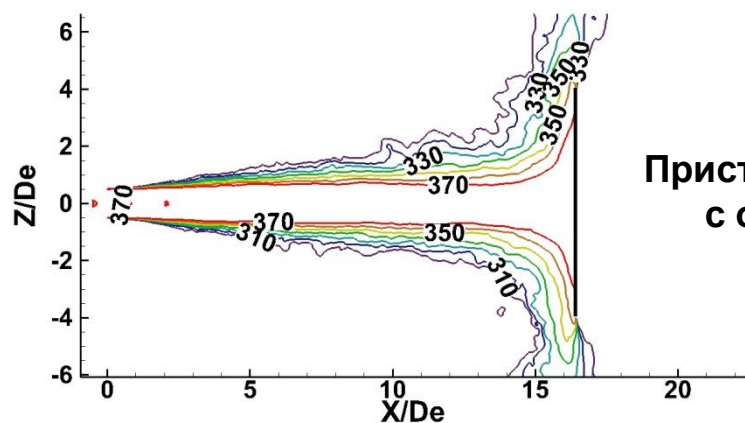
Температура



Свободная струя

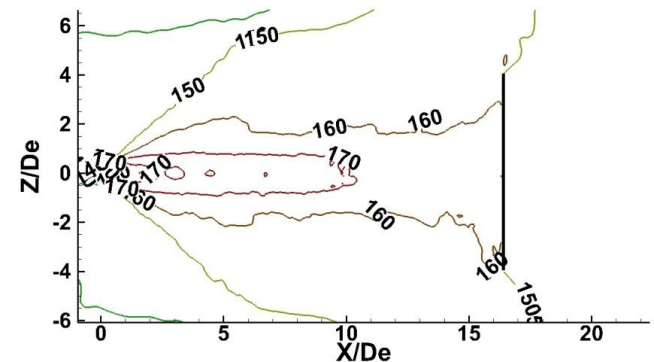
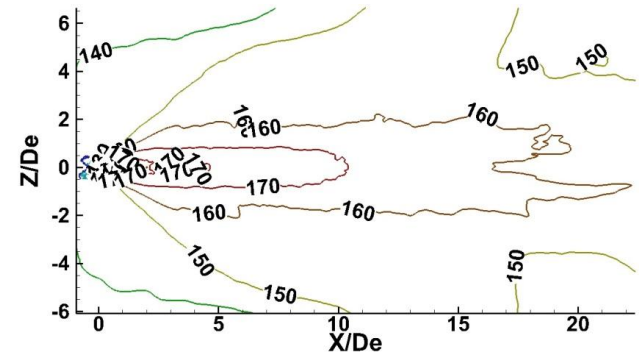
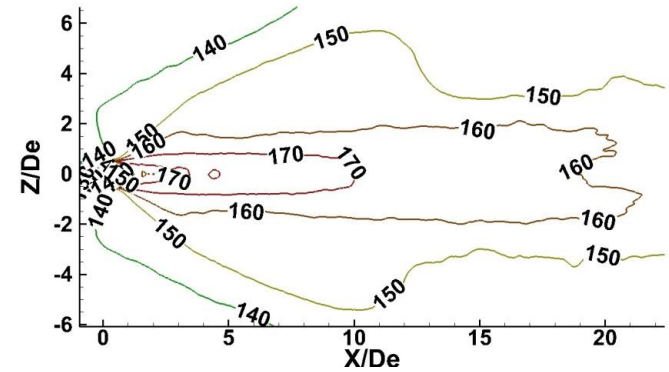


Пристеночная струя



Пристеночная струя с отбойником

Пульсации давления



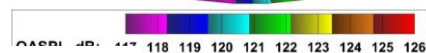
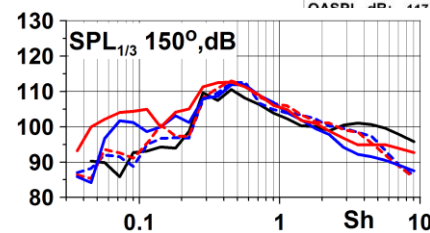
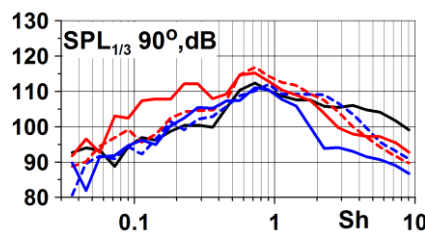
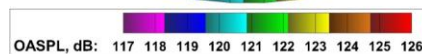
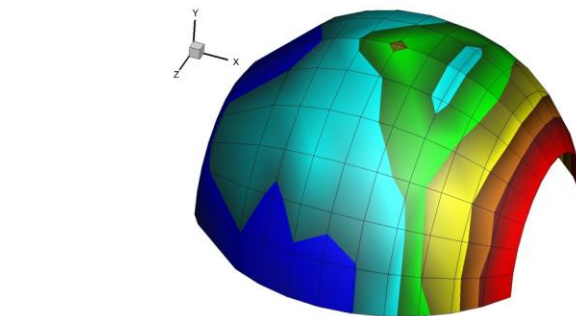
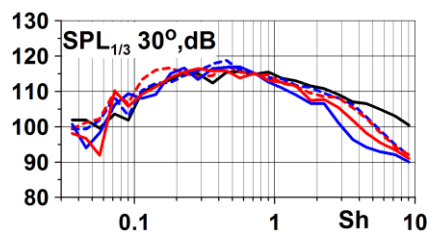
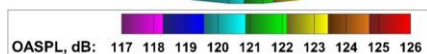
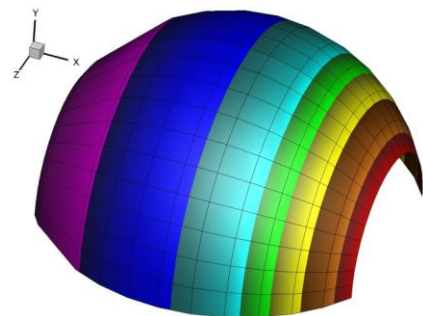
Болевой порог 120 дБ, смертельный уровень 200дБ

Уровень шума в дальнем поле струй на расстоянии $R/D_e=49$

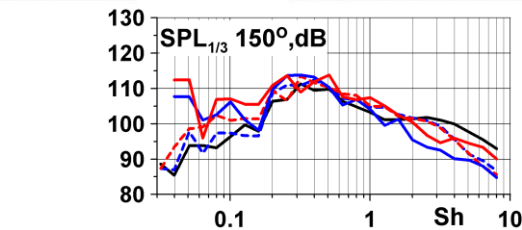
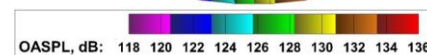
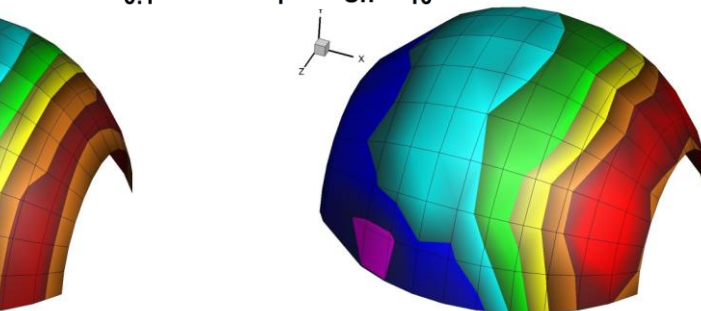
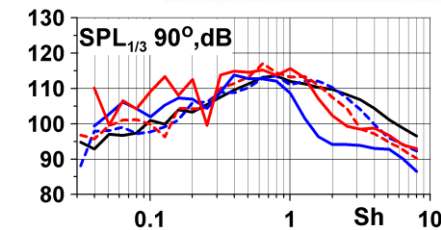
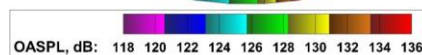
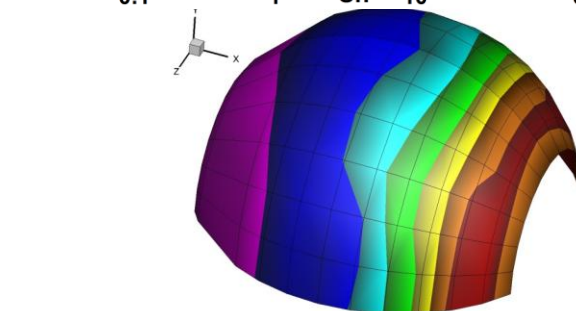
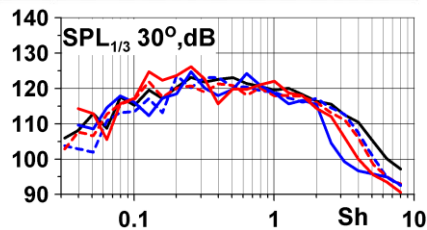
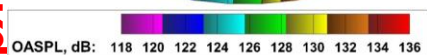
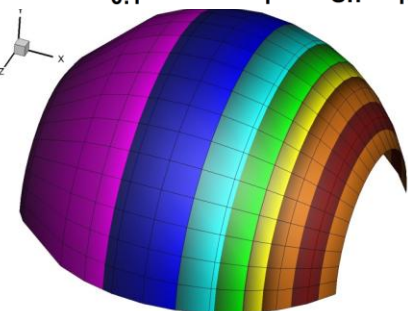
Свободная струя

Пристеночная струя

Пристеночная струя с отбойником



- free jet, grid 4.5M
- - - desk, 6.7M, сбоку
- - - desk, 6.7M, сверху
- JBD, 8.5M, сбоку
- JBD, 8.5M, сверху

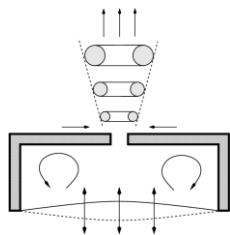


Холодные струи

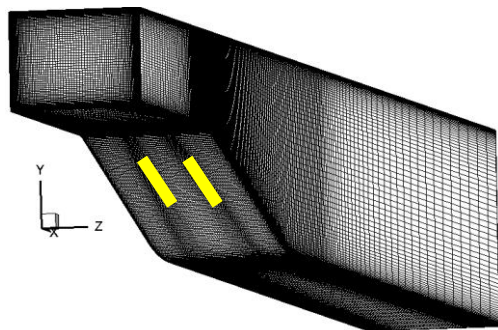
Горячие струи

В холодных струях влияние поверхности аэродрома и отбойника на уровень шума и диаграмму направленности сильнее, чем в горячих. В пристеночных струях шум меньше на высоких частотах, но меньше на низких.

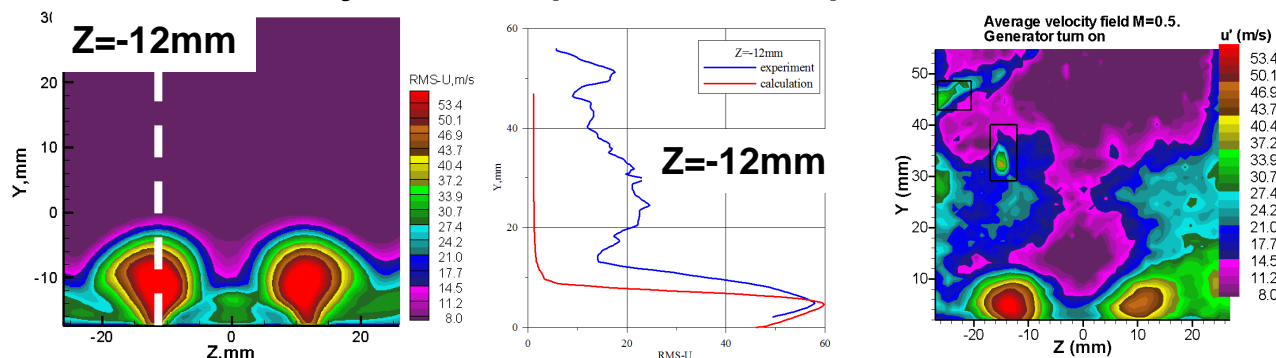
Оценка точности модифицированного граничного условия для моделирования генератора синтетических струй



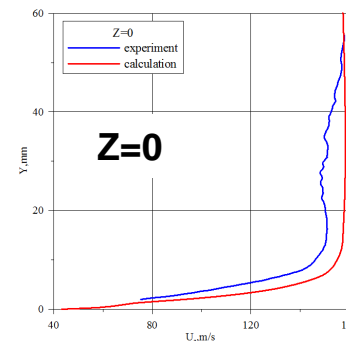
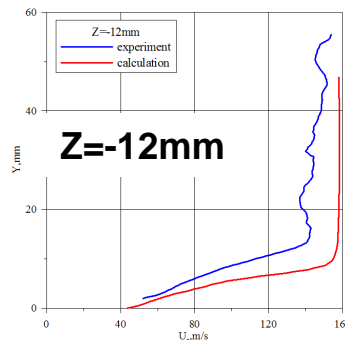
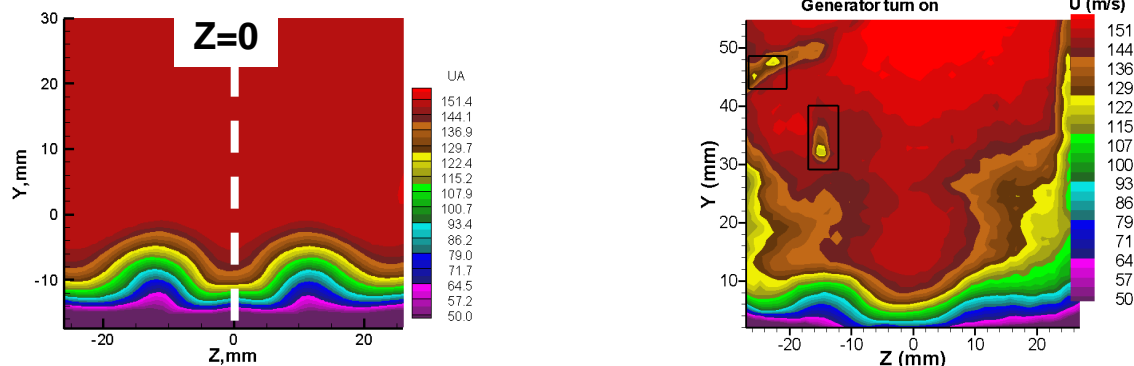
Вместо экспансивного расчета течения в ГСС, использовано модифицированное граничное условие на стенке:
 $V_n = q \times \sin(2 \times \pi \times f \times t)$



Пульсации продольной скорости



Осредненная продольная скорость



- Прямоугольный диффузор
- Отношение площади выхода к площади входа: 2
- Угол наклона нижней стенки: 15°
- Высота входа: 75мм
- Ширина канала: 100мм
- Расчетная сетка: $(1.8-3.5) \times 10^6$ ячеек

Замена ГСС граничными условиями обеспечило приемлемую точность расчетов

Исследование влияния синтетических струй на течение в каверне M219 при дозвуковой и сверхзвуковой скорости внешнего потока

$D=W=L/5$, L – длина каверны, D – высота, W – ширина

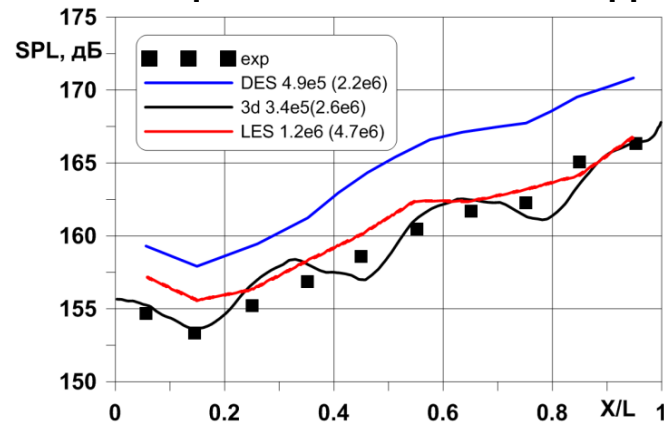
Сетка всего 2.626×10^6 ячеек, в каверне 3.4×10^5 ячеек

$T=300\text{K}$; $P=0.1\text{МПа}$

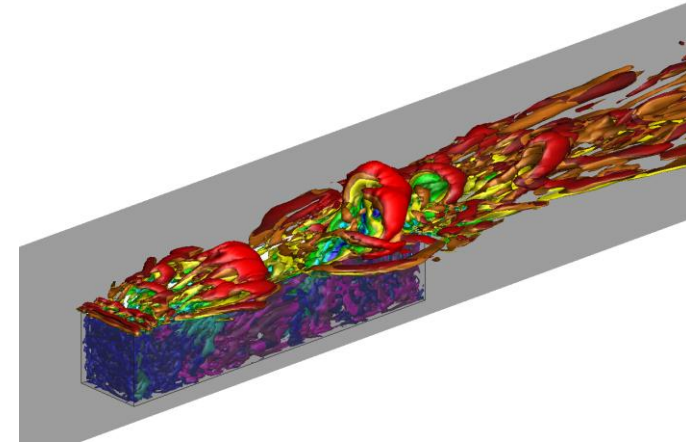
$M=0.85$, $Re=1.36 \times 10^6$

$M=1.5$, $Re=2.39 \times 10^6$

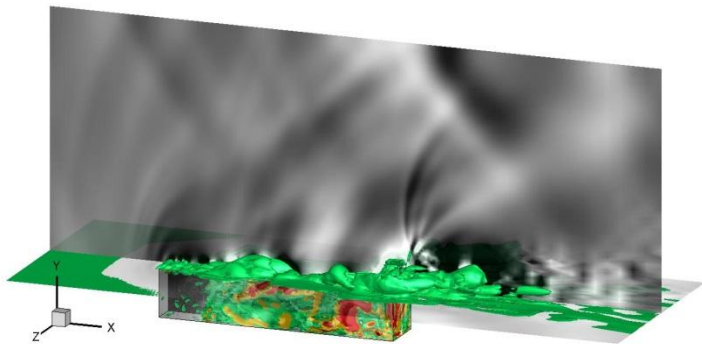
Оценка точности метода



Анимация Q-критерия



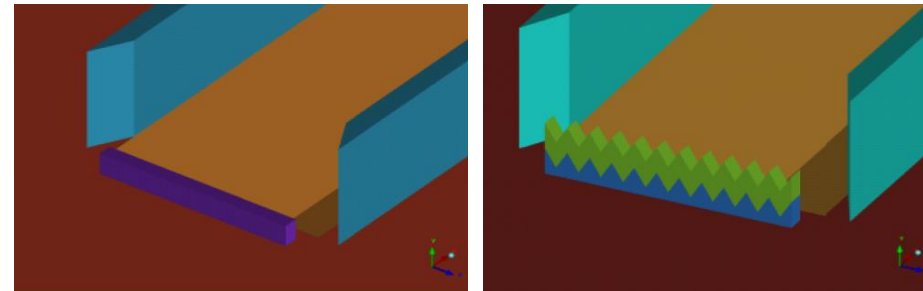
Изоповерхности градиента плотности (цветные) и поле $\partial P/\partial t$ (черно-белое)



Взаимодействие нестационарного слоя смешения с дозвуковым внешним потоком вызывает разгон последнего, что приводит к образованию ударных волн.

Каверна выполняет роль турбулизатора для внешнего течения

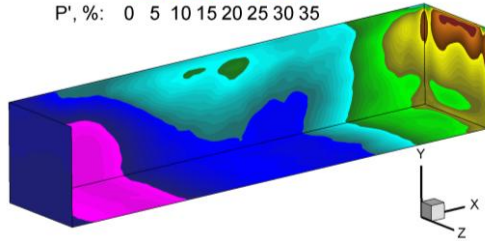
Примеры пассивного управления течением



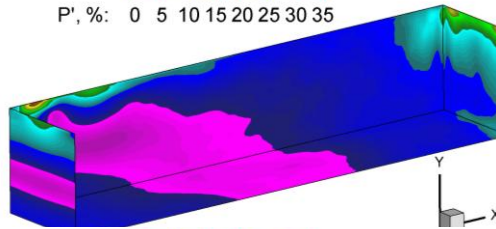
Влияние положения и режимных параметров синтетических струй на пульсации давления на стенках каверны

M=0.85

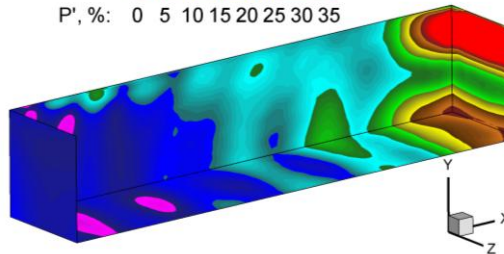
$P', \%$: 0 5 10 15 20 25 30 35



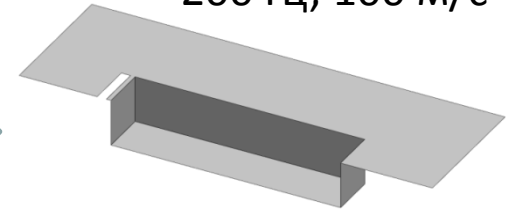
$P', \%$: 0 5 10 15 20 25 30 35



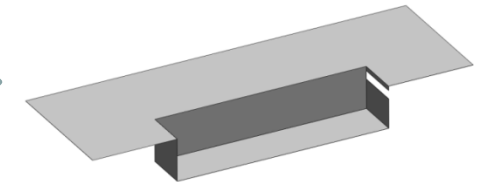
$P', \%$: 0 5 10 15 20 25 30 35



200 Гц, 100 м/с

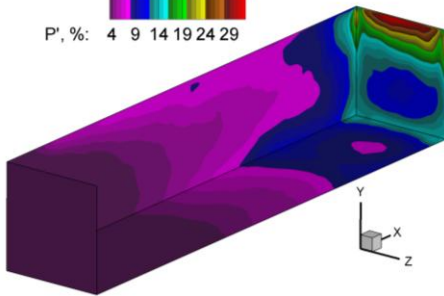


200 Гц, 100 м/с

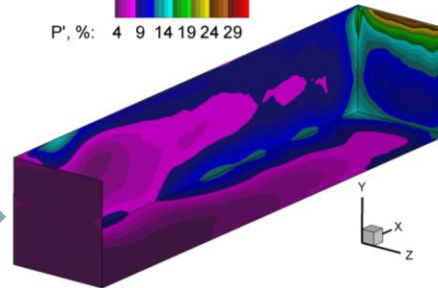


M=1.5

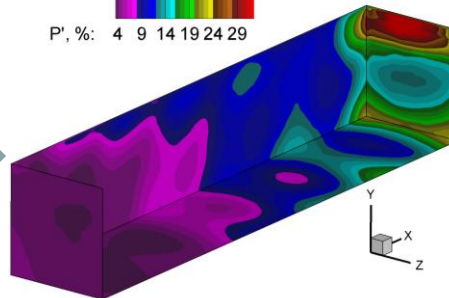
$P', \%$: 4 9 14 19 24 29



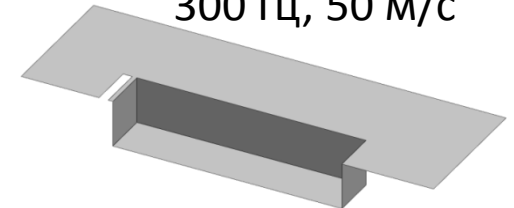
$P', \%$: 4 9 14 19 24 29



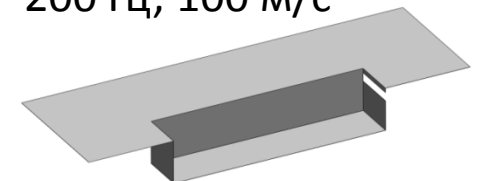
$P', \%$: 4 9 14 19 24 29



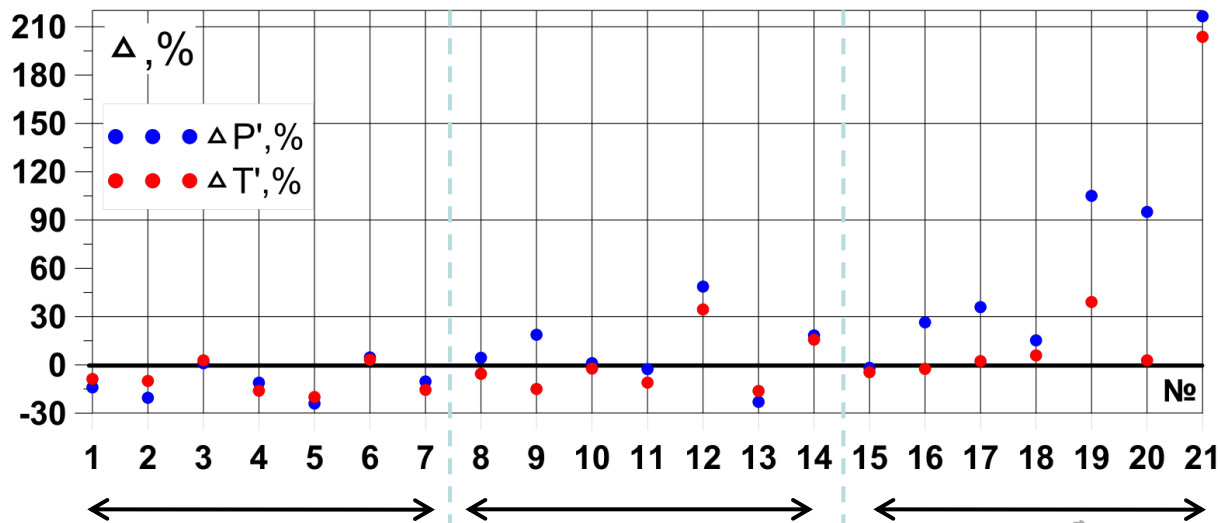
300 Гц, 50 м/с



200 Гц, 100 м/с

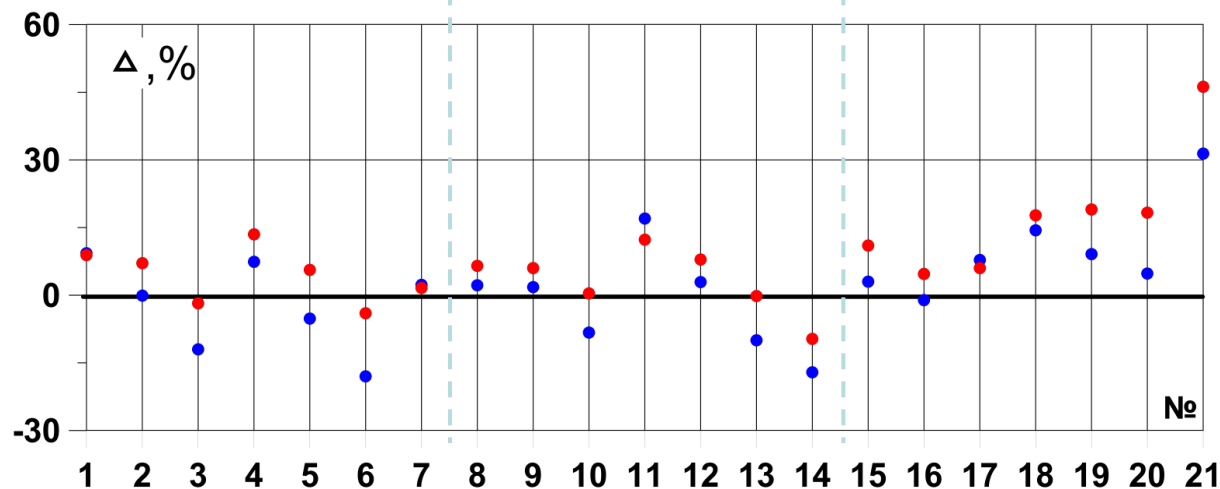


Влияние расположения и режимных параметров на пиковые значения пульсаций статического давления и температуры на стенках каверны



← M=0.85

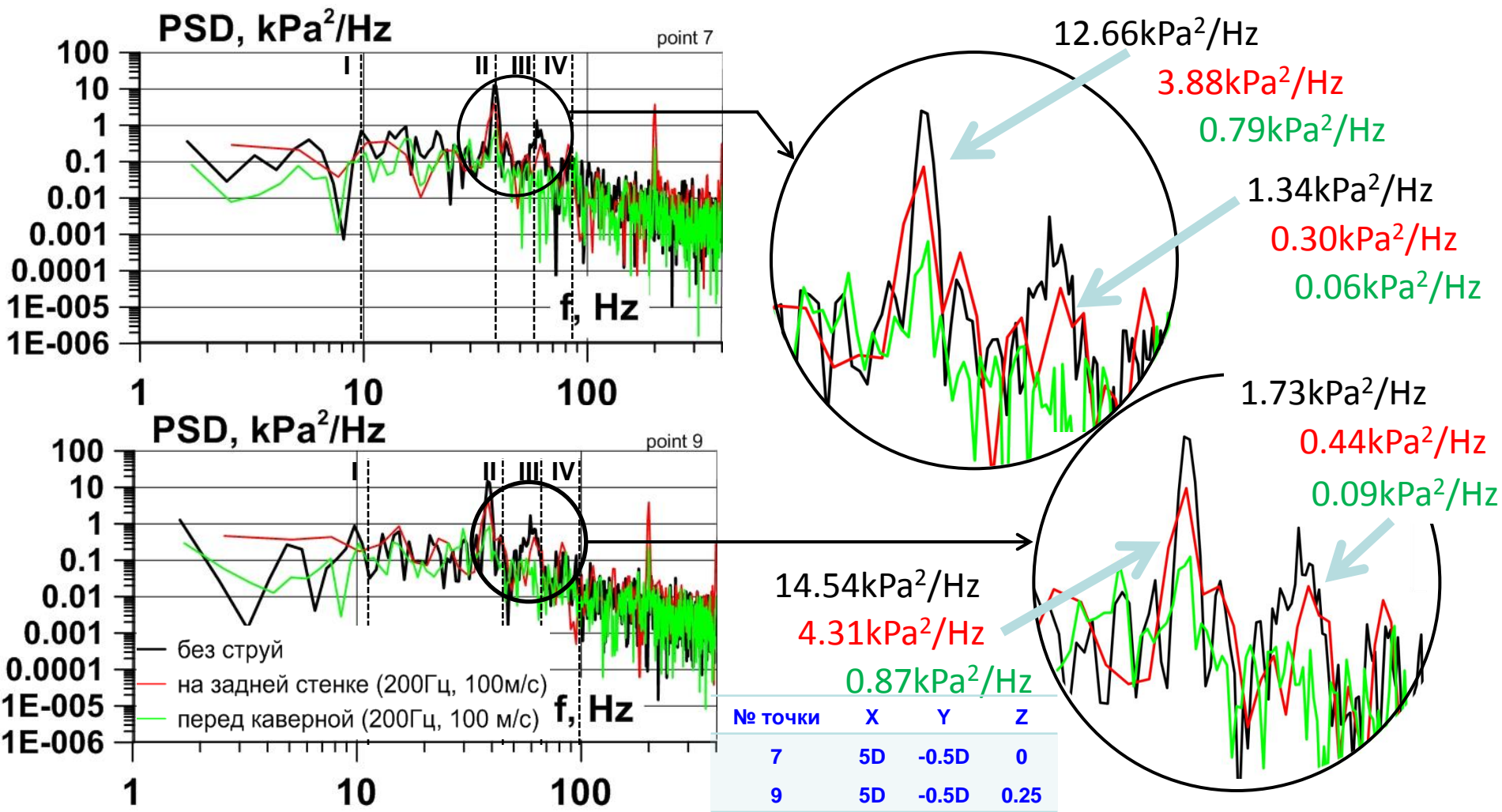
№			f, Гц	q, м/с
1	8	15	100	50
2	9	16	200	
3	10	17	300	
4	11	18	100	100
5	12	19	200	
6	13	20	300	
7	14	21	1000	



← M=1.5

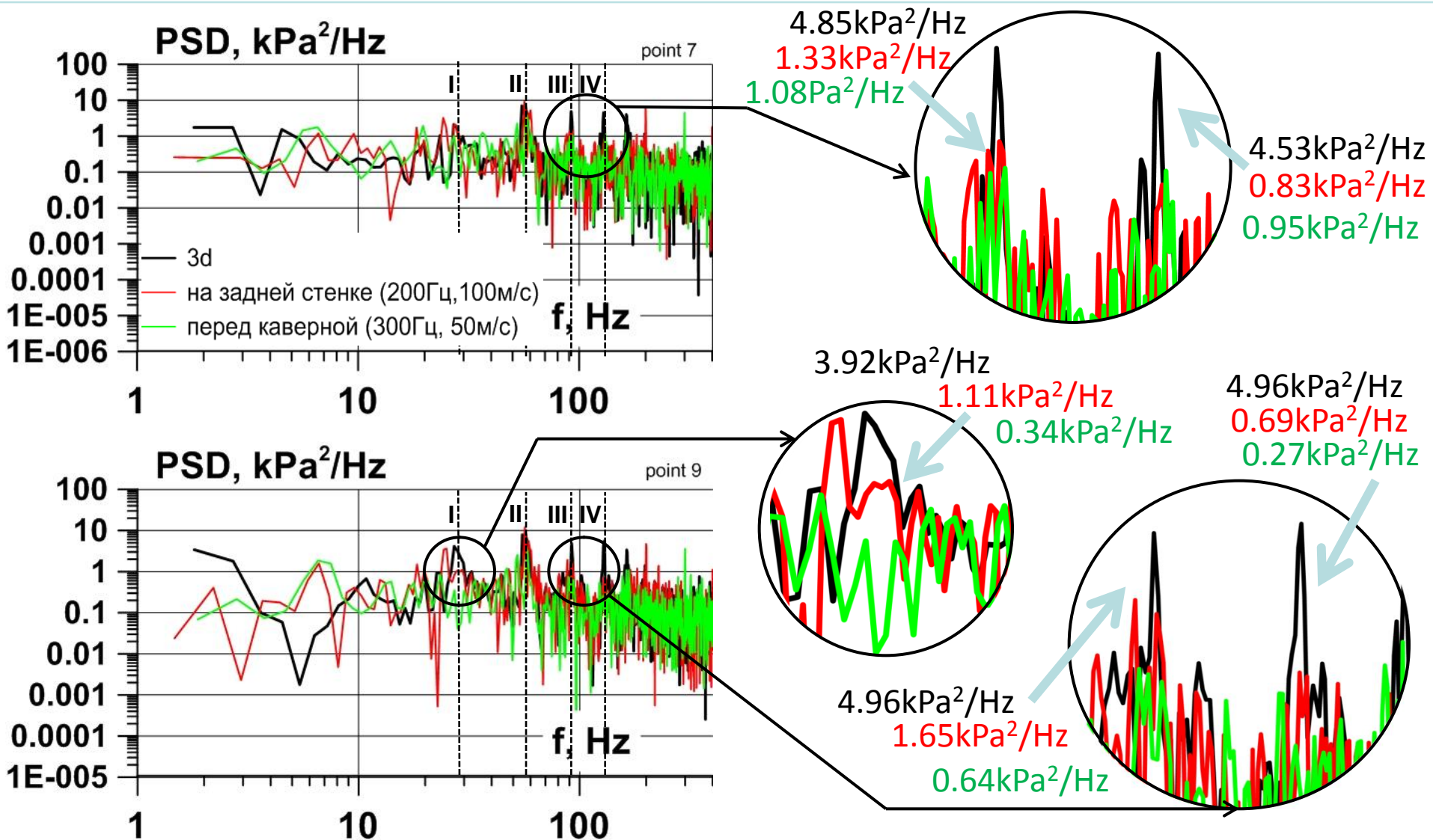
M=0.85. Точность расчета мод собственных колебаний. Влияние синтетических струй на спектр пульсации давления на задней стенке каверны.

	I мода, Гц	II мода, Гц	III мода, Гц	IV мода, Гц
Эксперимент	18.0	38.2	62.5	83.7
LES 4.7×10 ⁶ ячеек (1.6×10 ⁶)	19.6	40.3	62.5	83.7
DES 2.2×10 ⁶ ячеек (4.9×10 ⁵)	20.7	40.3	63.6	84.8
Формула Росситера	14.9	36.0	57.0	78.1
RANS/ILES 2.6×10⁶ ячеек (3.4×10⁵)	9.8	39.0	59.4	84.1



M=1.5. Точность расчета мод собственных колебаний. Влияние синтетических струй на спектр пульсации давления на задней стенке каверны

	I мода, Гц	II мода, Гц	III мода, Гц	IV мода, Гц
Формула Росситера	21.2	51.0	80.8	110.6
RANS/ILES	27.1	55.0	92.0	129.1



Спасибо за внимание!