



Магистерская работа
по направлению 150300 «Прикладная механика»

**Численное моделирование и
исследование затопленных
до- и сверхзвуковых струй**

Выполнила студентка группы 6055/11
Руководитель, к. т. н., профессор
Соруководитель, ассистент

Богданова А.Г.
Боровков А. И.
Войнов И.Б.

Санкт-Петербург
2012 год



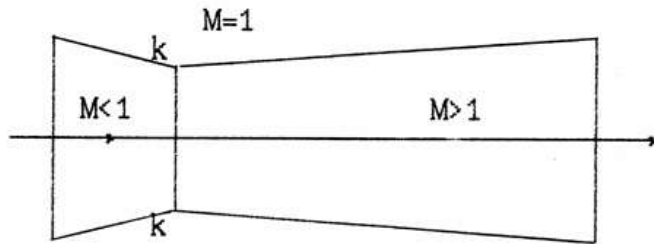
Цели магистерской работы

- численное моделирование сверхзвуковых затопленных струй
 - разработка расчетных моделей
 - изучение структуры сверхзвуковой струи
 - анализ влияния постановки граничных условий на профили физических параметров течения на выходе из сопла
 - сравнение возможностей численного моделирования сверхзвуковых турбулентных струй программными комплексами Flow Vision и ANSYS CFX
- численное моделирование дозвуковой затопленной струи
 - разработка расчетных моделей
 - изучение структуры дозвуковой струи
 - сравнение полученных численно результатов с экспериментальными данными
- изучение взаимодействия до- и сверхзвуковых струй с адиабатической стенкой

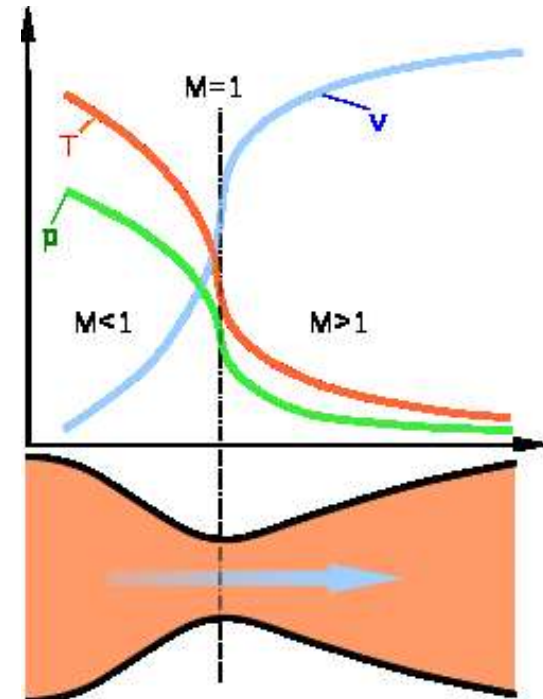
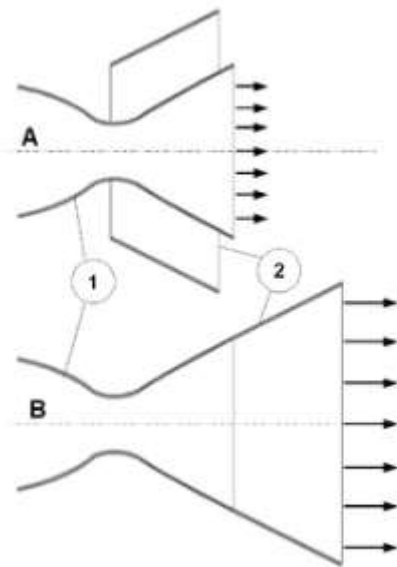
Актуальность магистерской работы



Сопло Лавала

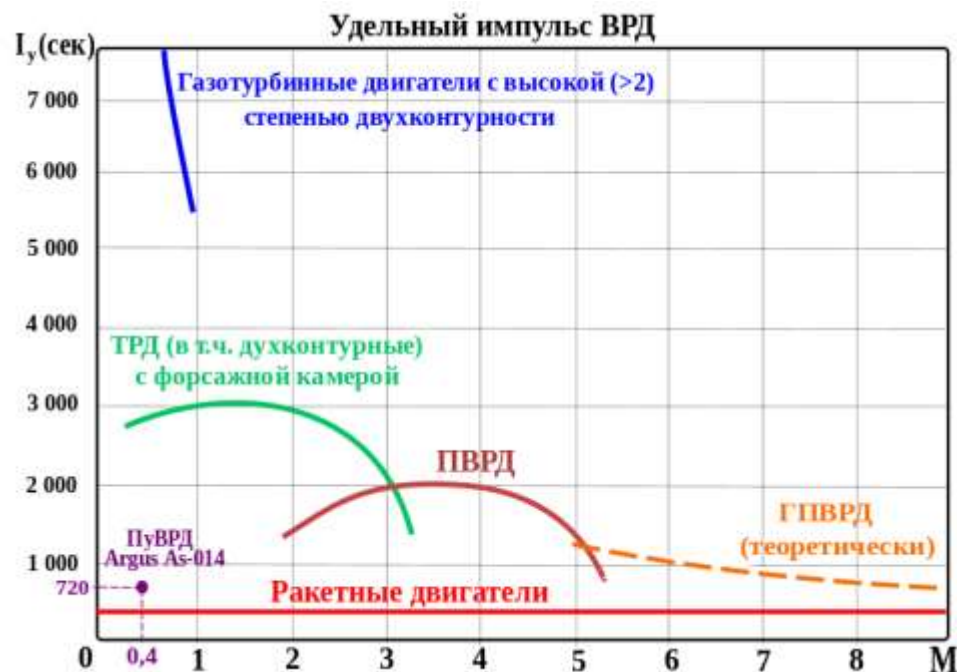
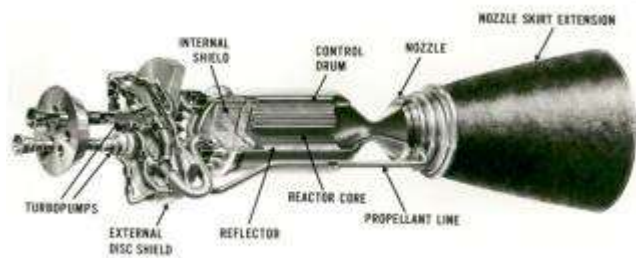


$$v_e = \sqrt{\frac{TR}{M} \frac{2k}{k-1} \left(1 - \left(\frac{P_e}{p}\right)^{(k-1)/k}\right)}$$





Реактивный двигатель

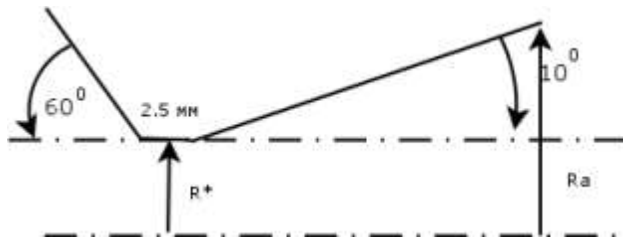


ПуВРД - пульсирующий воздушно-реактивный двигатель, ТРД - Турбореактивный двигатель, ПВРД - прямоточный воздушно-реактивный двигатель, ГПВРД - гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель

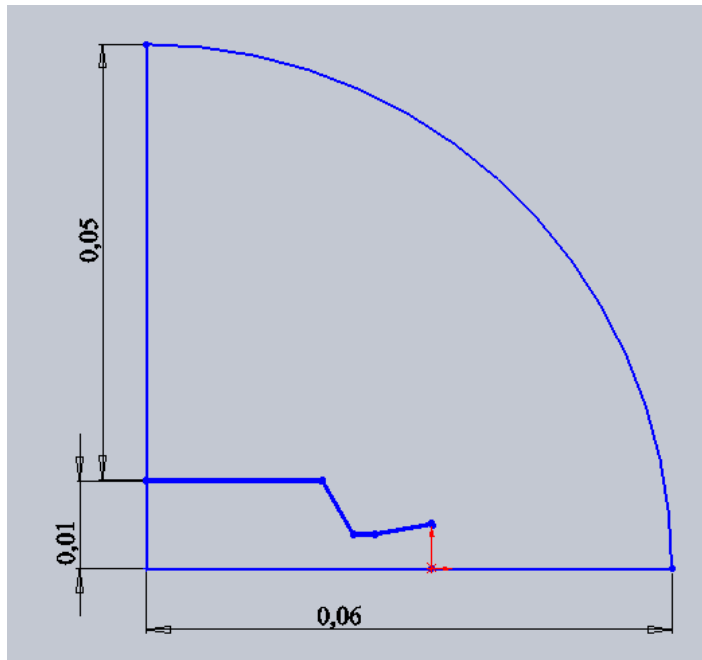


Анализ влияния постановки граничных условий на профили физических параметров течения на выходе из сопла

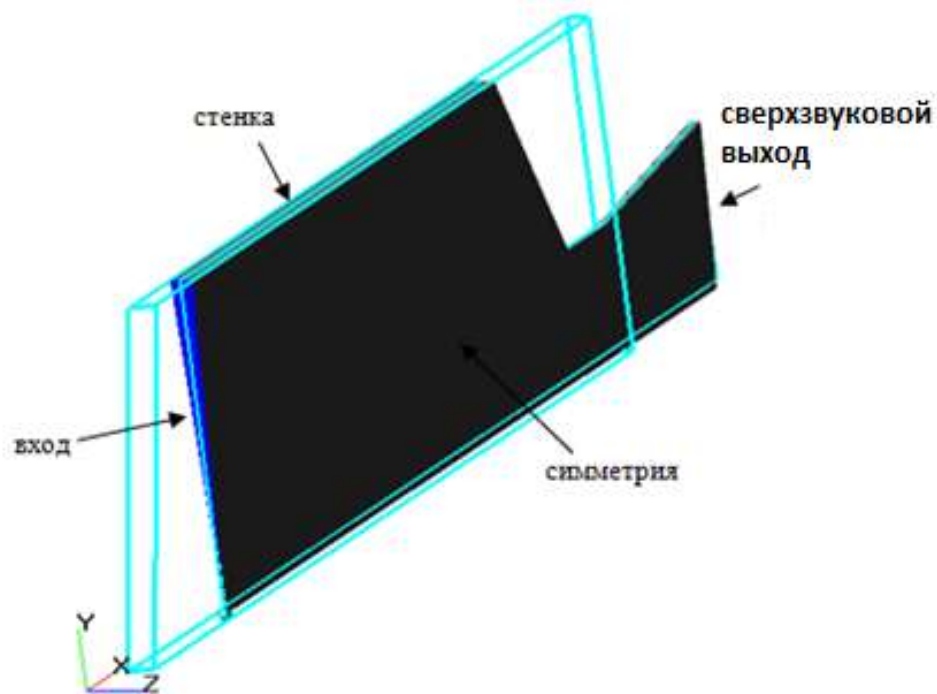
Постановка задачи



Величина	значение
число Маха на выходе	$M=2$
Ra	5мм
радиус критического сечения R^*	3.85мм
радиус конфузора Rk	10 мм
длина конфузора Dk	20мм
длина диффузора Dd	$Dd = (Ra - R^*) / \text{tg}10$
P_0	$2 \cdot 10^6$
P фоновое	0.13
T_0	600K
T фоновое	300K



Граничные условия первой постановки



Вход

- $P_{in} = 2 \cdot 10^6 \text{ Па}$

- $T_{in} = 600 \text{ К}$

Симметрия

-V - проскальзывание

-T- нулевой градиент

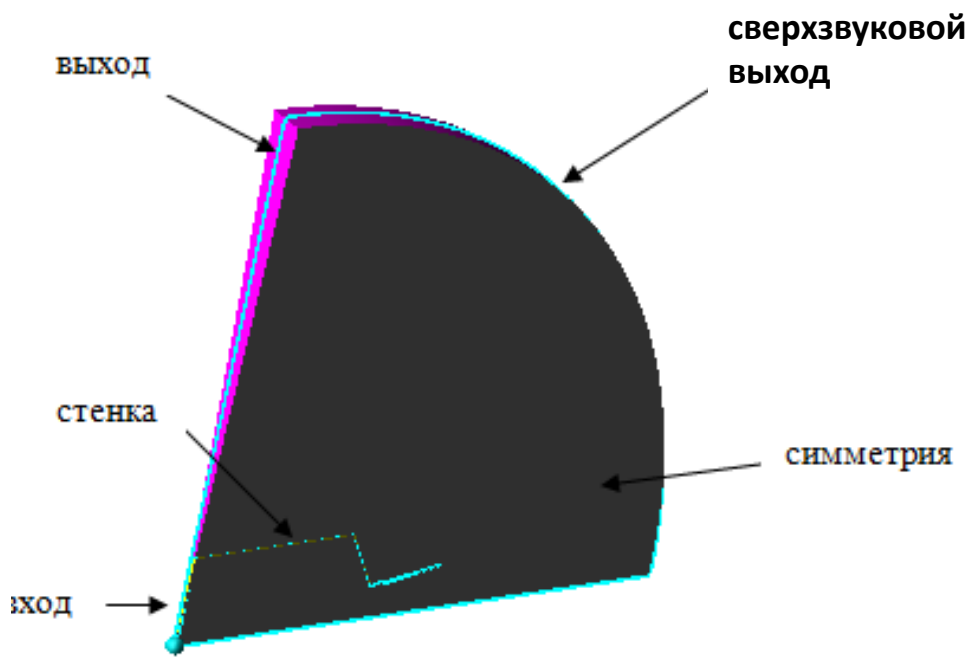
Стенка объекта

-V - прилипание

-T- нулевой градиент

Сверхзвуковой выход

Граничные условия второй постановки



Вход

$-P_{in} = 2 * 10^6 \text{ Па}$

$-T_{in} = 600 \text{ К}$

Симметрия

-V - проскальзывание

-T - нулевой градиент

Стенка

-V - прилипание

$-T_{in}$ - нулевой градиент

Выход

$-T = 0 \text{ К}$

$-P = 0.13 \text{ Па}$

Выход

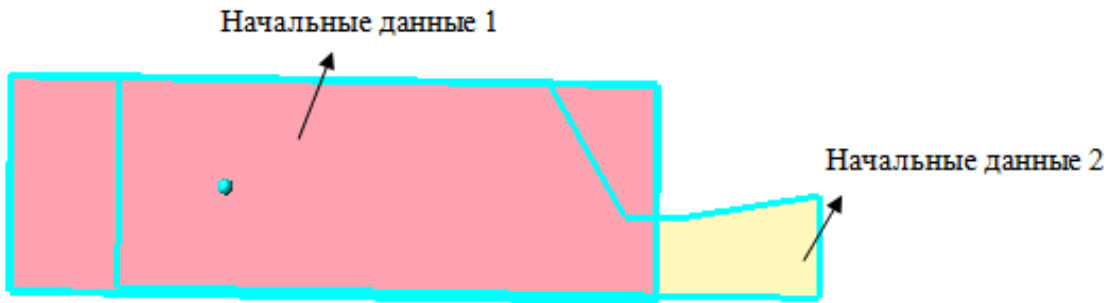
$-T = 0 \text{ К}$

$-P = 0.13 \text{ Па}$

Сверхзвуковой выход

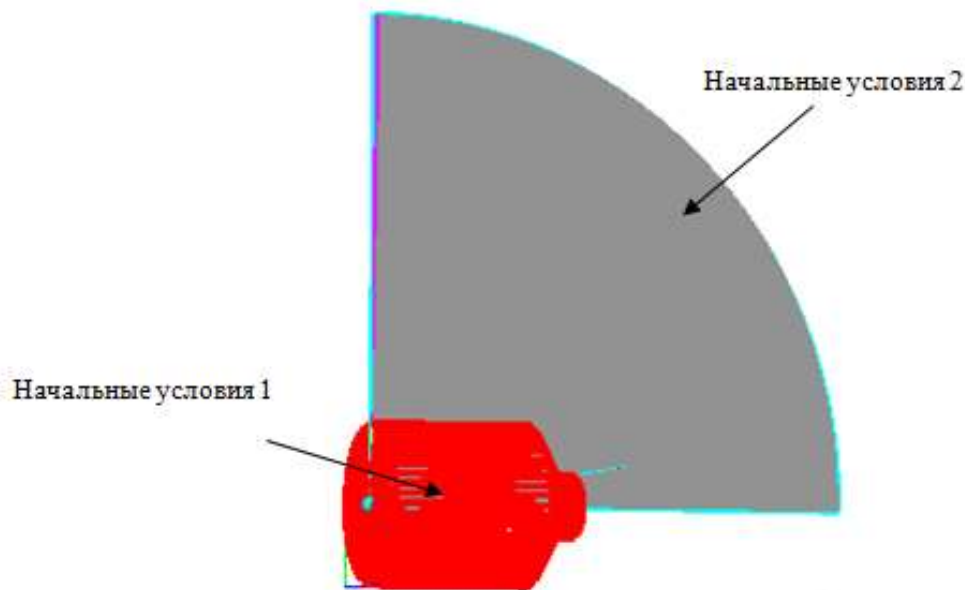


Начальные условия



Начальные данные 1:

$T_0=600\text{K}$,
 $P_0=2000000\text{Па}$,
 $v=0\text{м/с}$

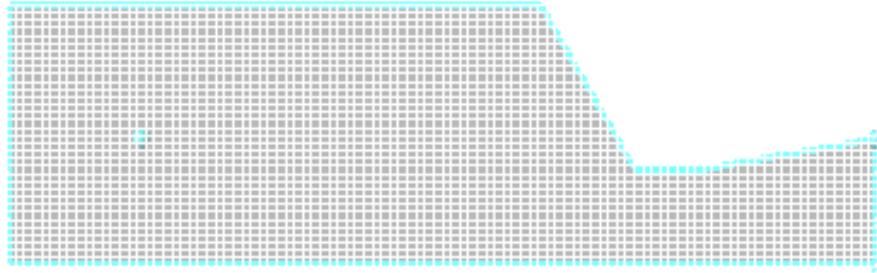


Начальные данные 2:

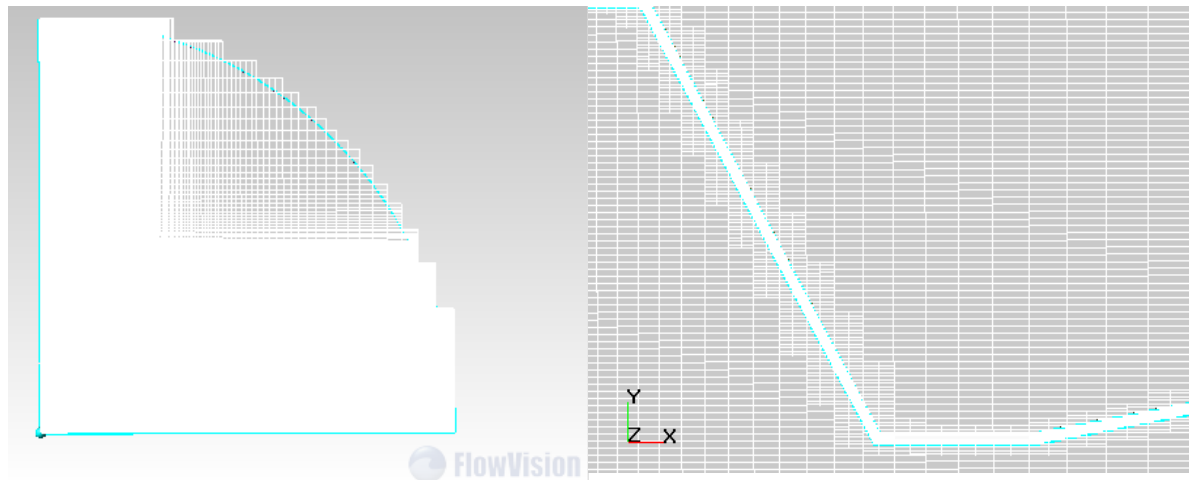
$T_0=300\text{K}$,
 $P_0=1000\text{Па}$,
 $v=0\text{м/с}$



Расчетная сетка



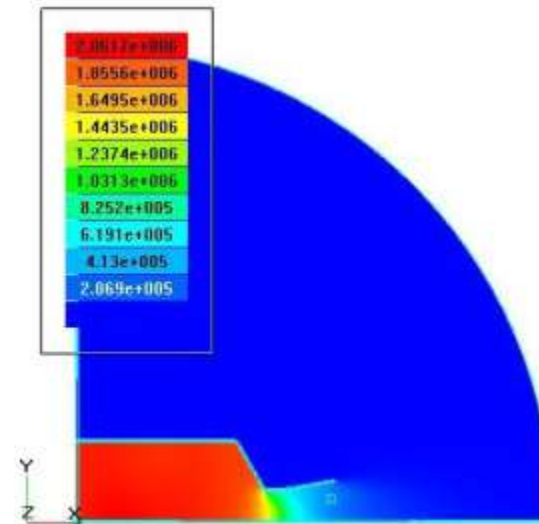
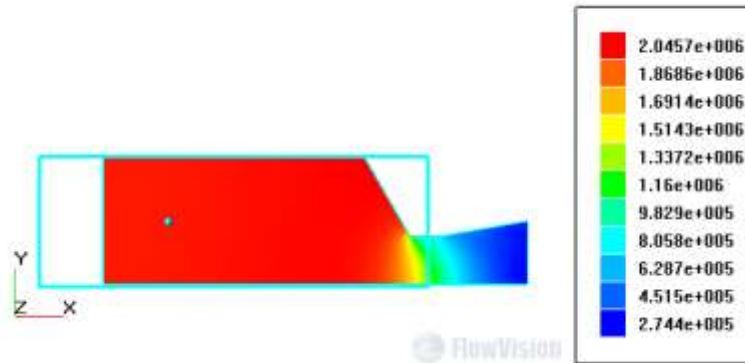
Nx	Ny	Nz
100	35	1



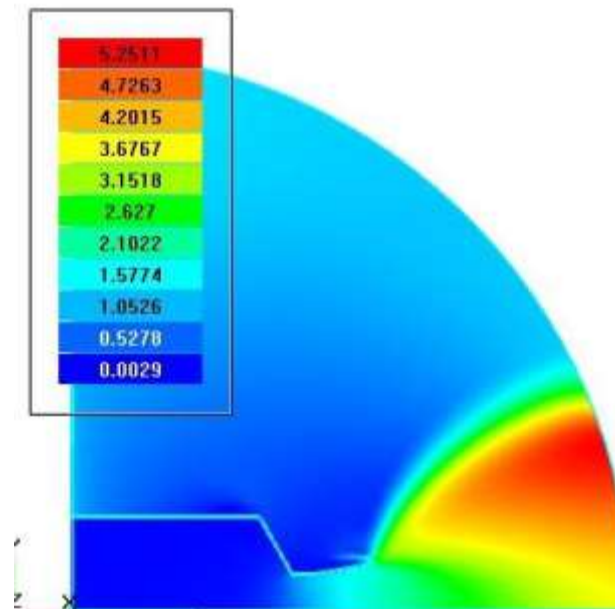
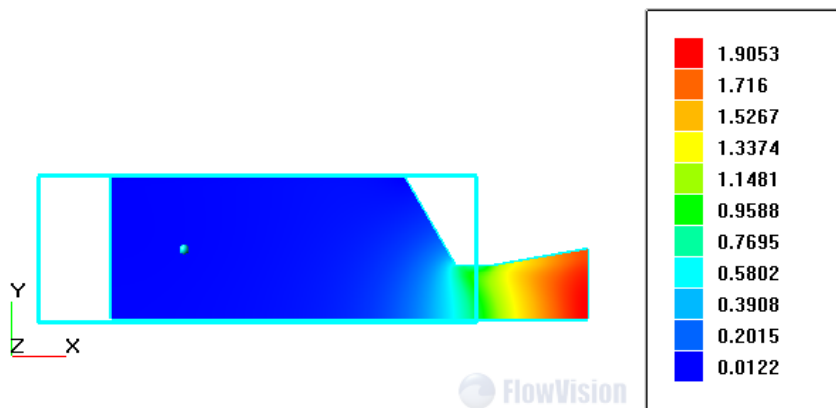
Nx	Ny	Nz
202	297	1

Результаты расчета

Распределение давления



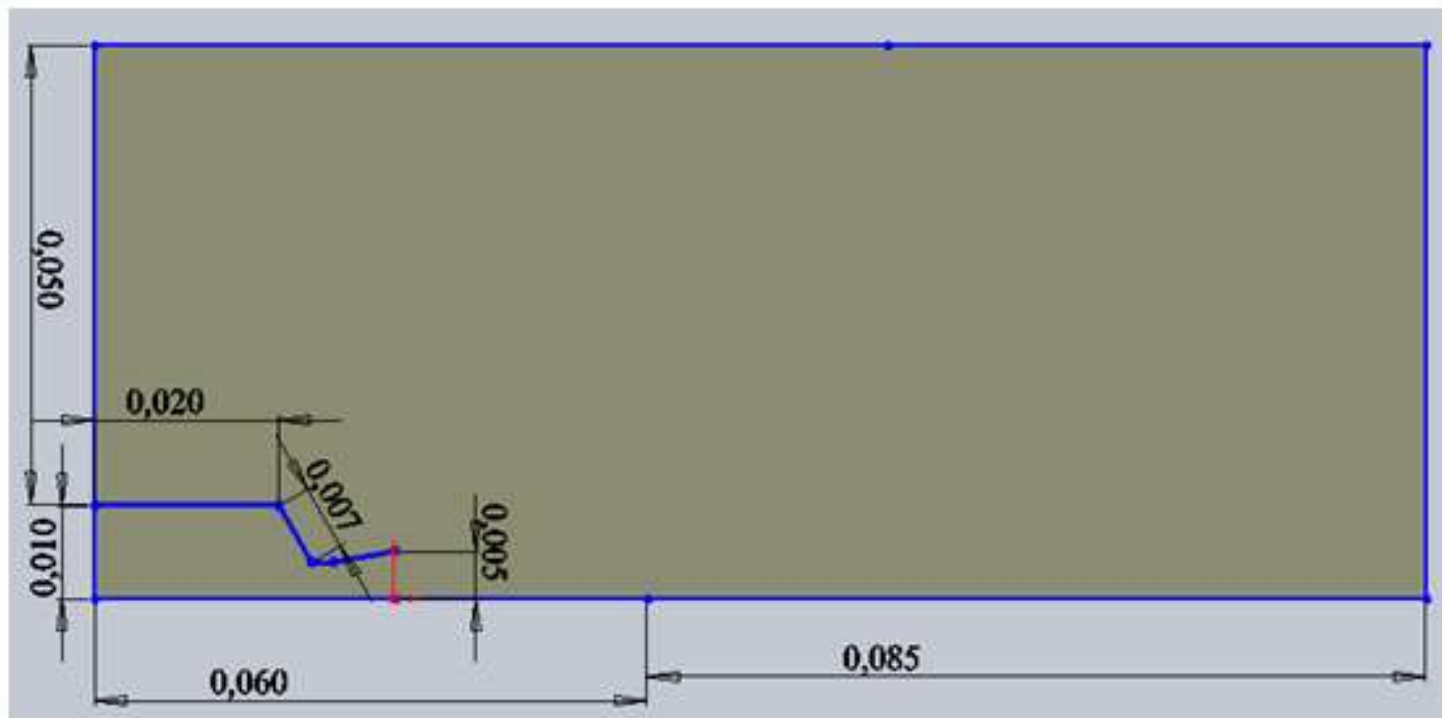
Распределение числа Маха



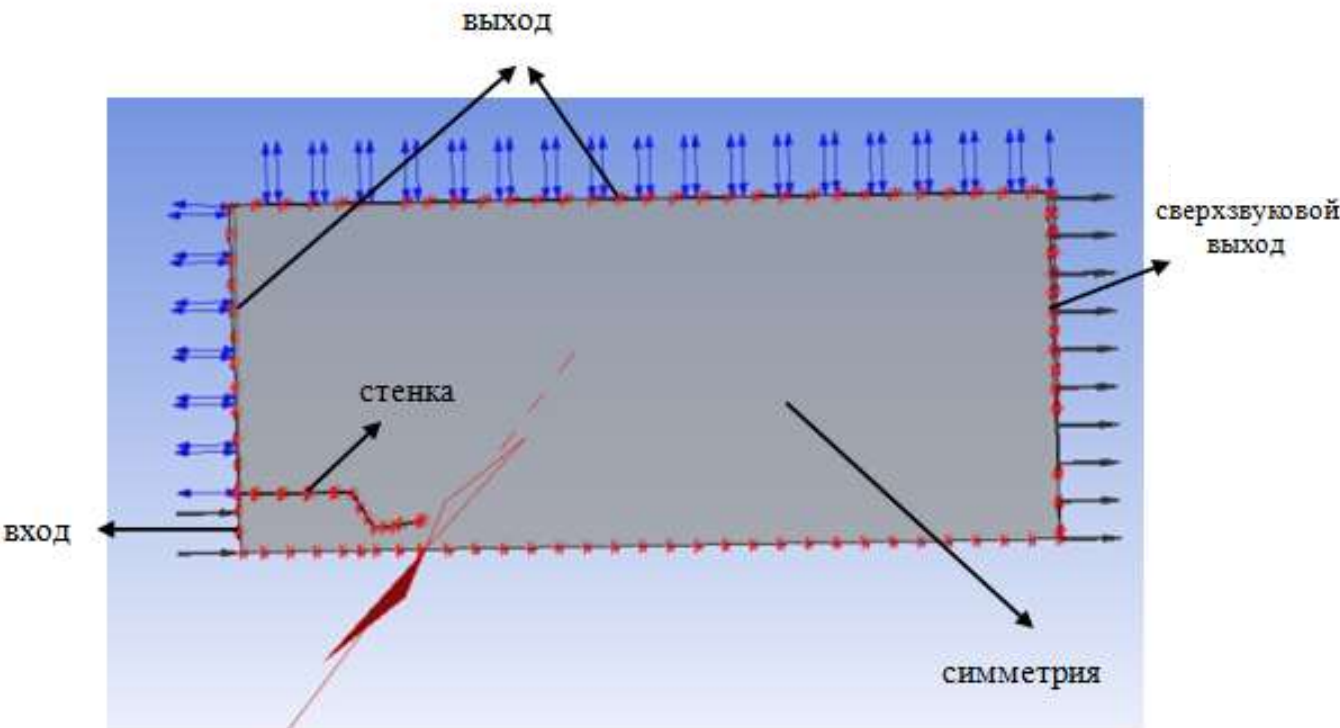


Сравнение возможностей численного моделирования сверхзвуковых турбулентных струй программными комплексами Flow Vision и ANSYS CFX

Геометрия задачи



Граничные условия



Вход

$-P_{in} = 2 \cdot 10^6 \text{ Па}$

$-T_{in} = 600 \text{ К}$

Симметрия

-V - проскальзывание

$-T_{in}$ - нулевой градиент

Стенка объекта

$-V_x$ - прилипание

$-T_{in}$ - нулевой градиент

Выход

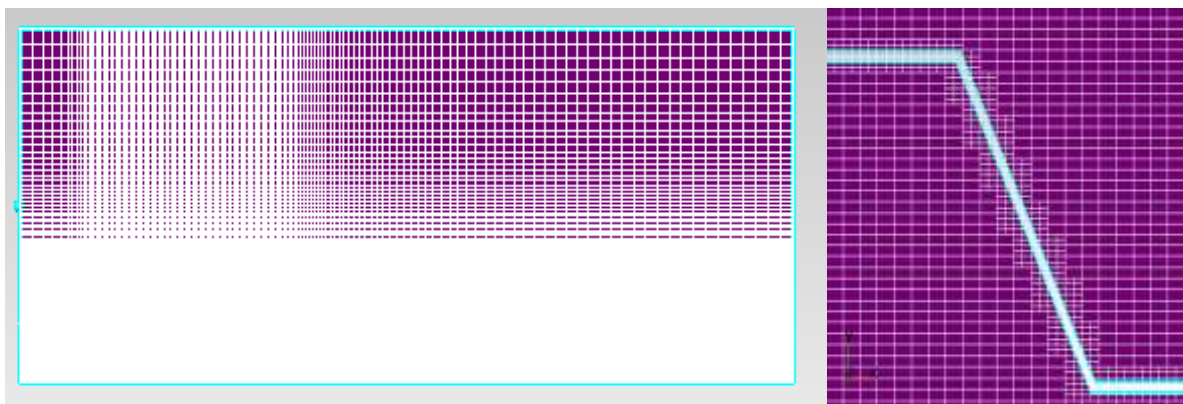
$-T = 300 \text{ К}$

$-P = 10^5 \text{ Па}$

Сверхзвуковой выход

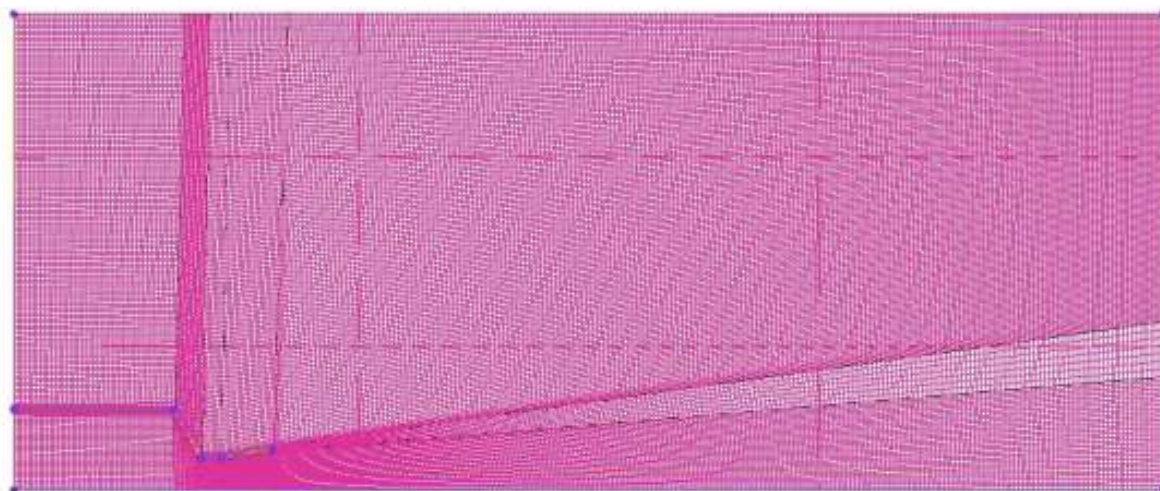


Расчетная сетка



Расчетная сетка
Flow Vision

Nx	Ny	Nz
156	138	1

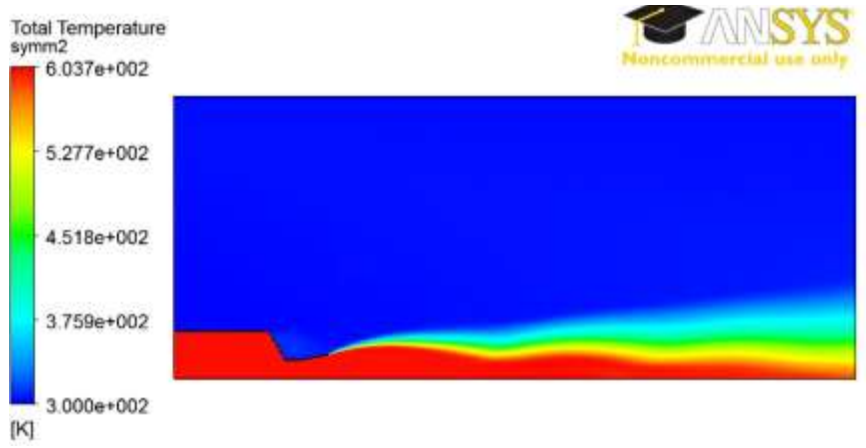


Расчетная сетка
ANSYS ICEM CFD

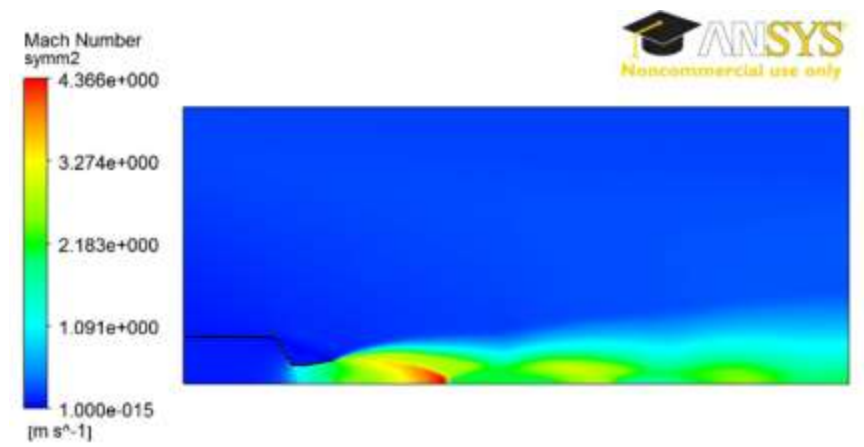
$N_{\text{elements}} = 142253,$
 $N_{\text{nodes}} = 94658$

Распределения полной температуры и числа Маха

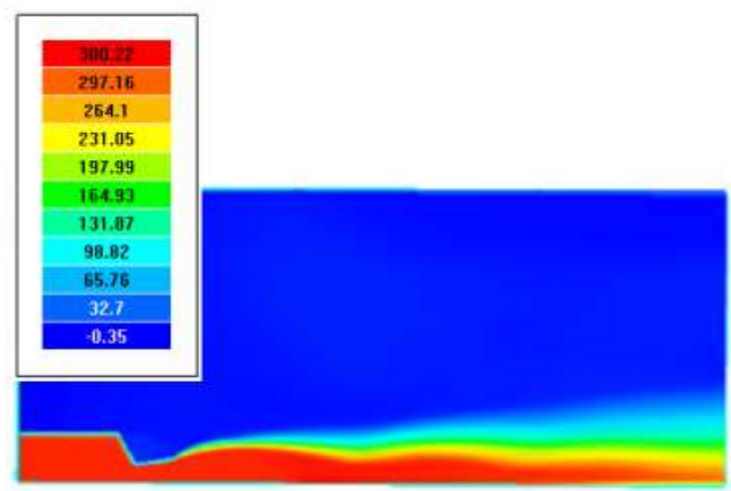
Распределение полной температуры в ANSYS CFX



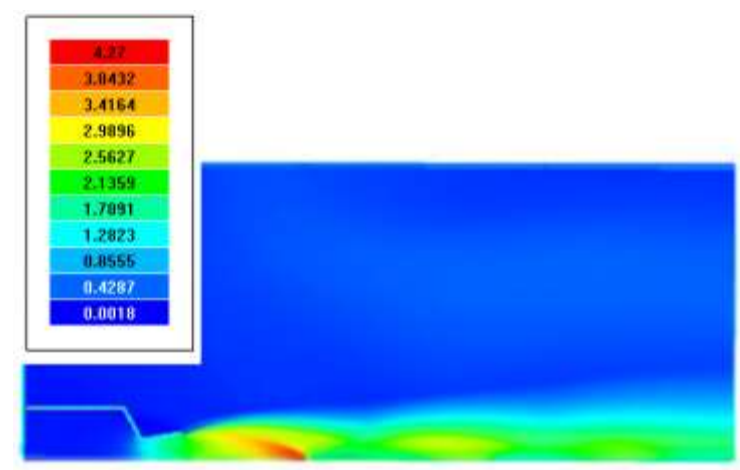
Распределение давления в ANSYS CFX



Распределение полной температуры в Flow Vision

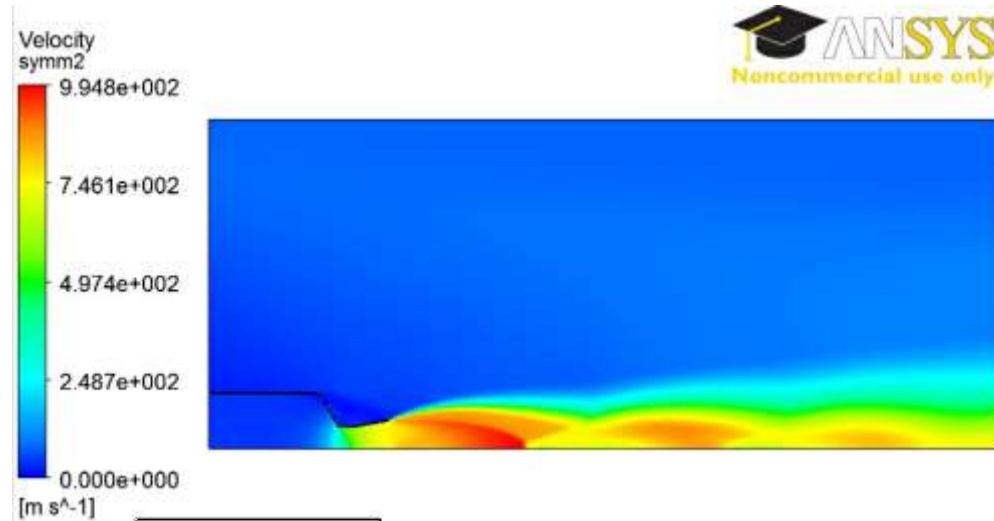


Распределение давления в Flow Vision

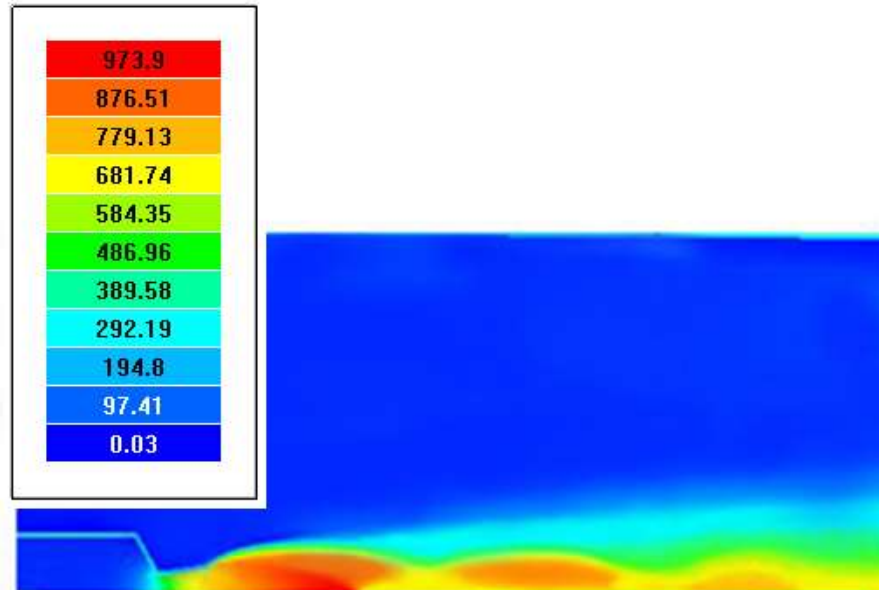


Распределения скорости

Распределение скорости в ANSYS CFX



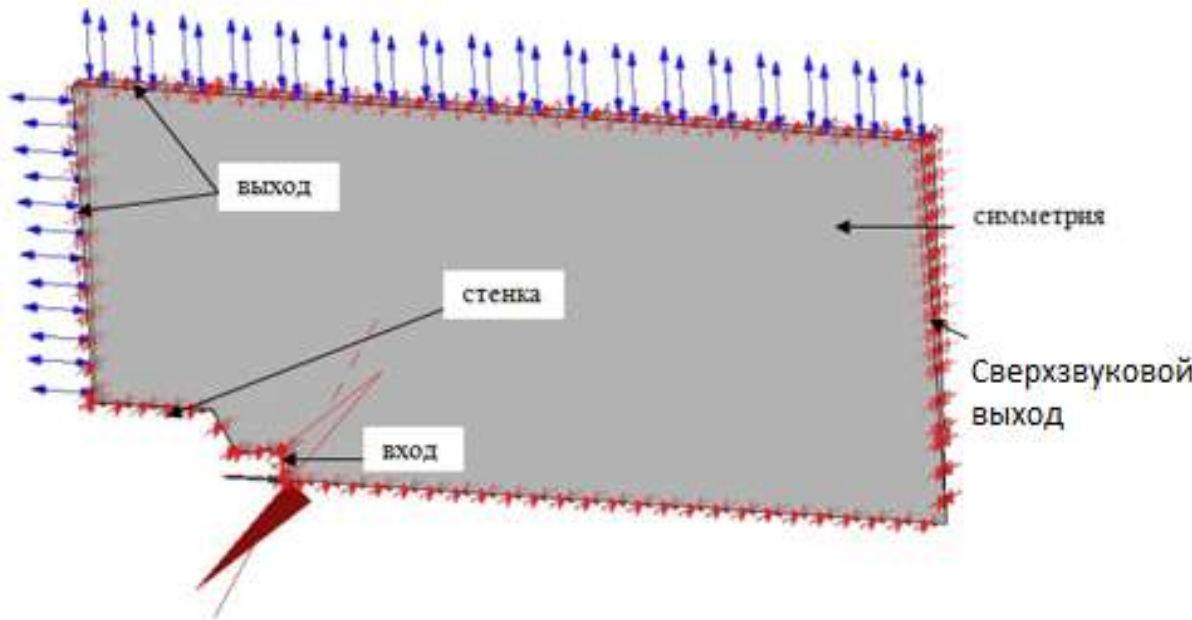
Распределение скорости в Flow Vision





Моделирование дозвуковой затопленной струи. Сравнение с экспериментальными данными

Граничные условия



Вход

- $V=185$ м/с

- $T_{in}=330$ К

Симметрия

- V_x - проскальзывание

- T_{in} - нулевой градиент

Стенка объекта

- прилипание

- T_{in} - нулевой градиент

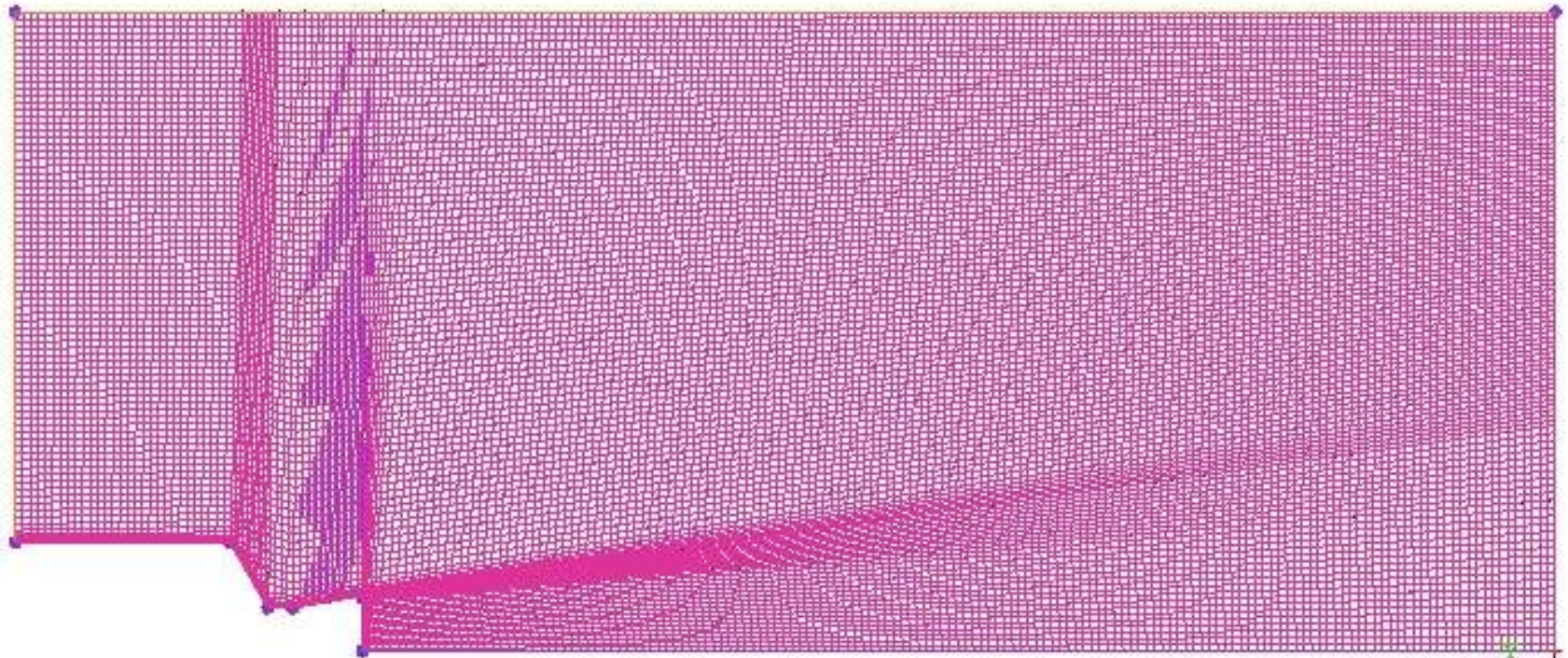
Выход

- $T=300$ К

- $P=10^5$ Па

Сверхзвуковой выход

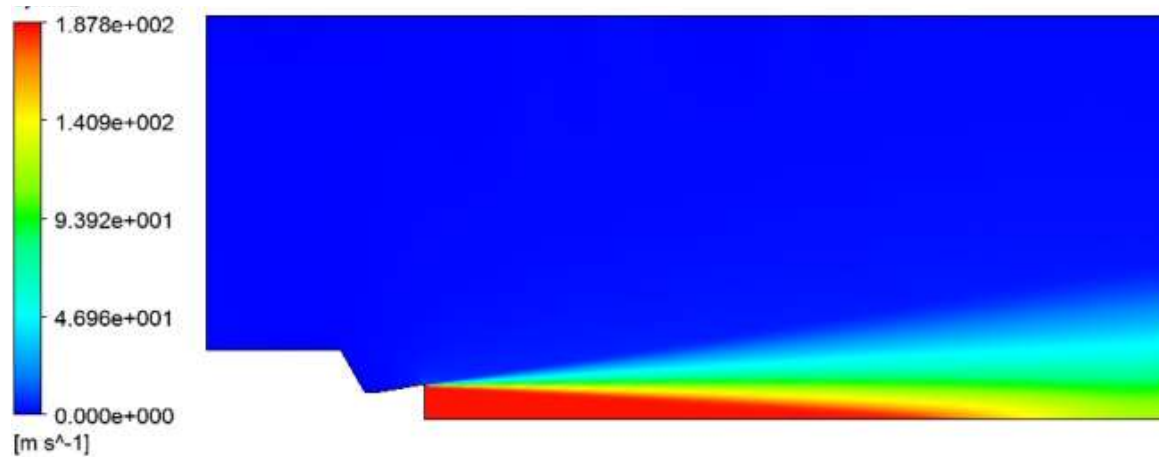
Расчетная сетка



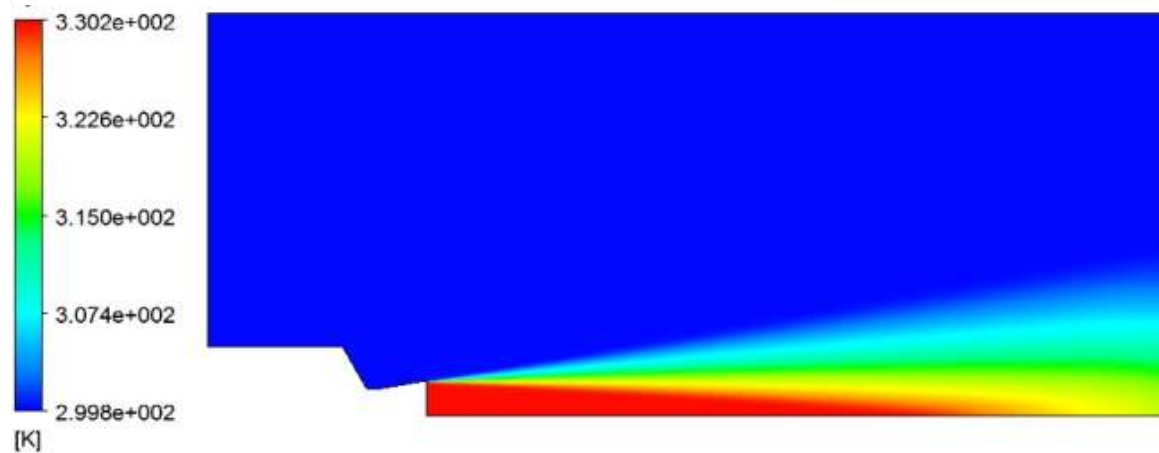
Общее количество элементов 43280,
общее количество точек 21397.

Результаты

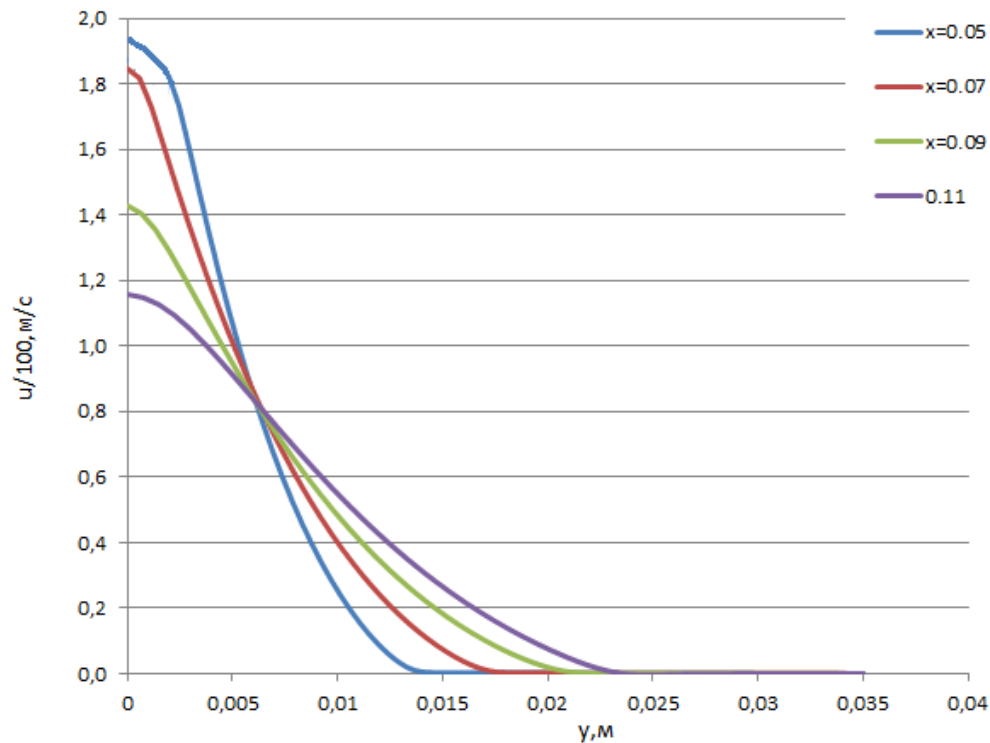
Распределение скорости



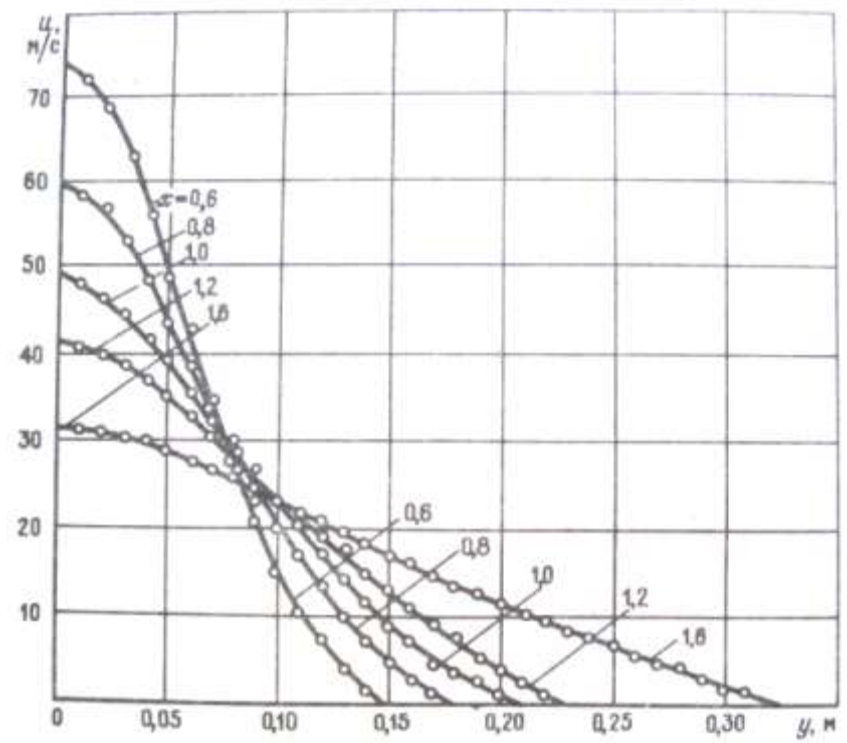
Распределение температуры



Сравнение с опытными данными

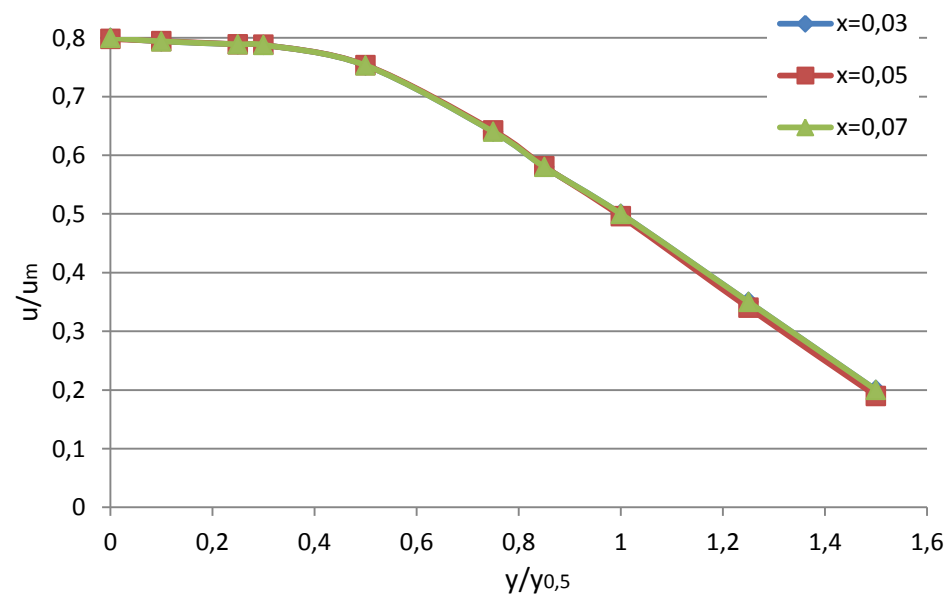


Численные данные

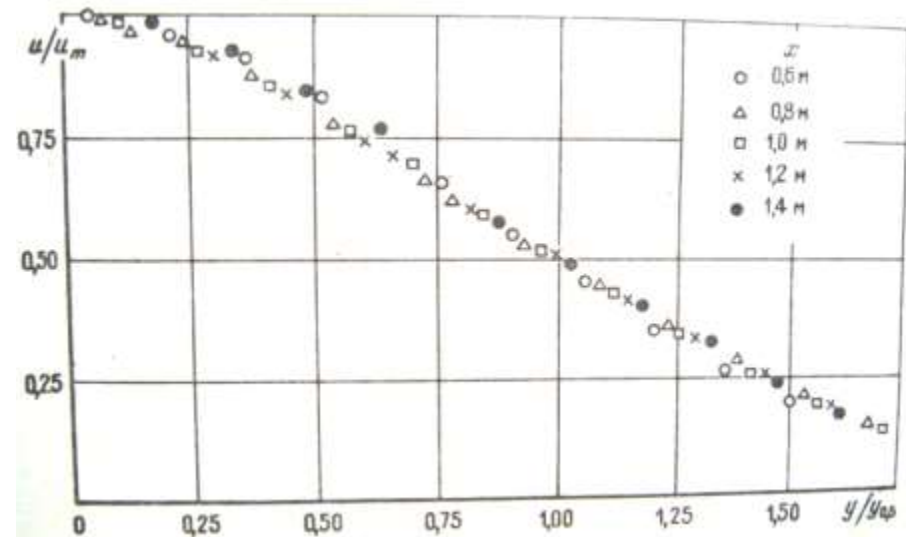


Опытные данные Трюпеля

Сравнение с опытными данными Безразмерные профили скорости



Численные данные

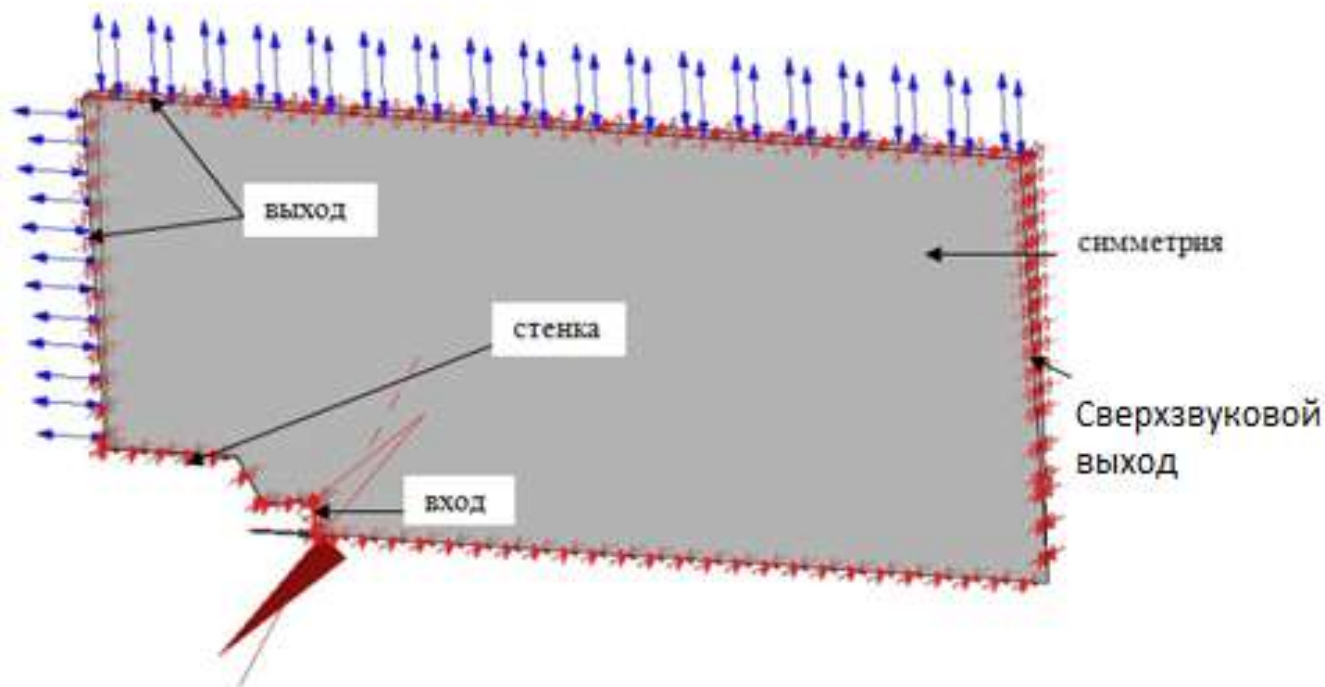


Опытные данные Трюпеля



Численное моделирование сверхзвуковой струи с параметром нерасчетности $n=1,45$

Граничные условия



Вход

$-P_{in} = 145000 \text{ Па}$

$-T_{in} = 330 \text{ К}$

$-v = 520 \text{ м/с}$

Симметрия

$-V$ - проскальзывание

$-T_{in}$ - нулевой градиент

Стенка объекта

$-V$ - прилипание

$-T_{in}$ - нулевой градиент

Выход

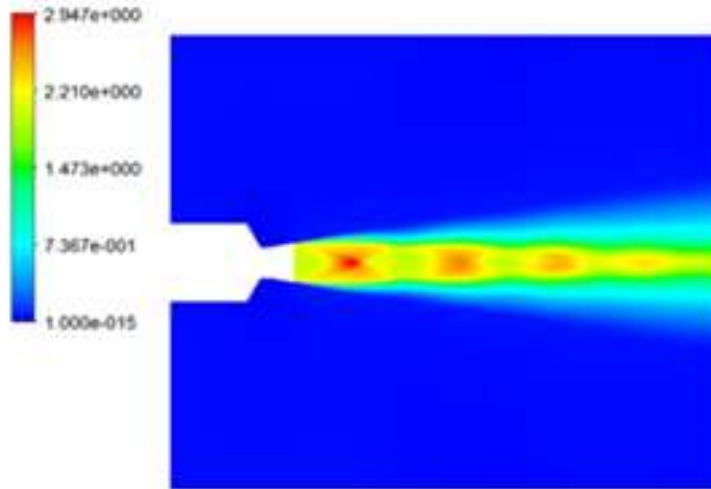
$-T = 300 \text{ К}$

$-P = 10^5 \text{ Па}$

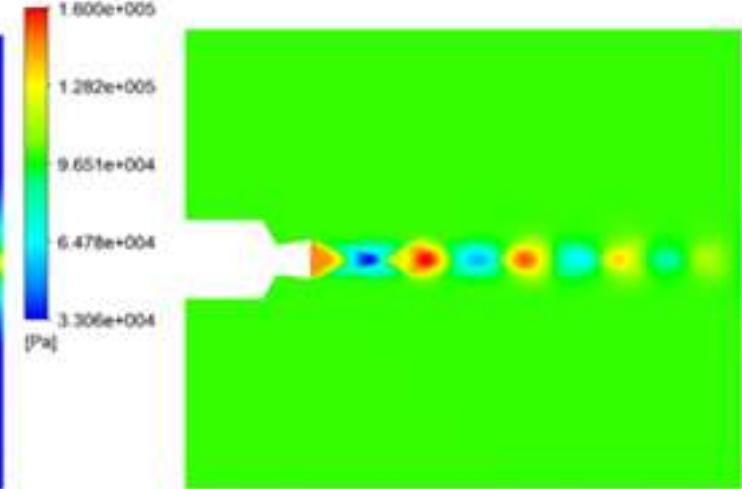
Сверхзвуковой выход

Результаты расчета

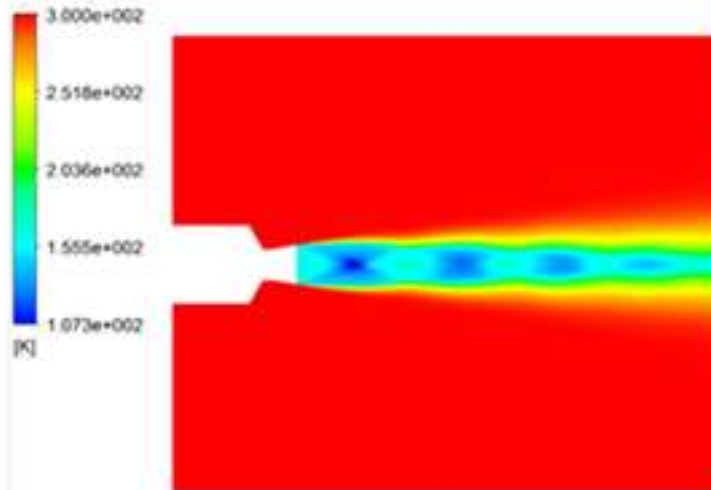
Распределение числа Маха



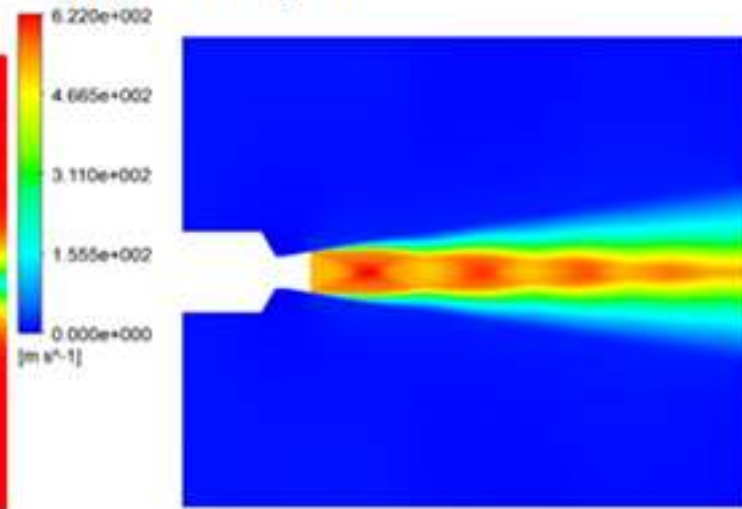
Распределение давления



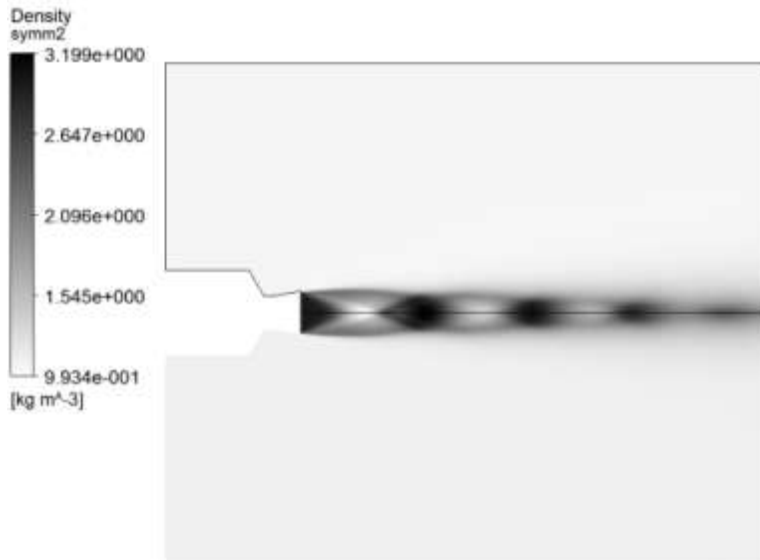
Распределение температуры



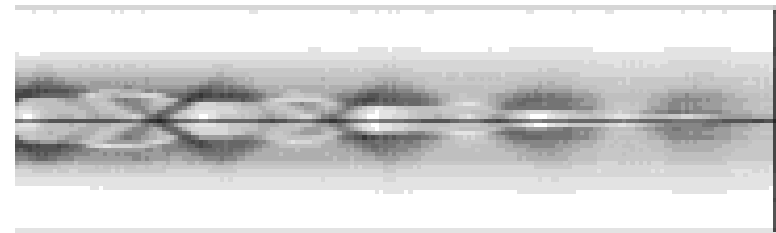
Распределение скорости



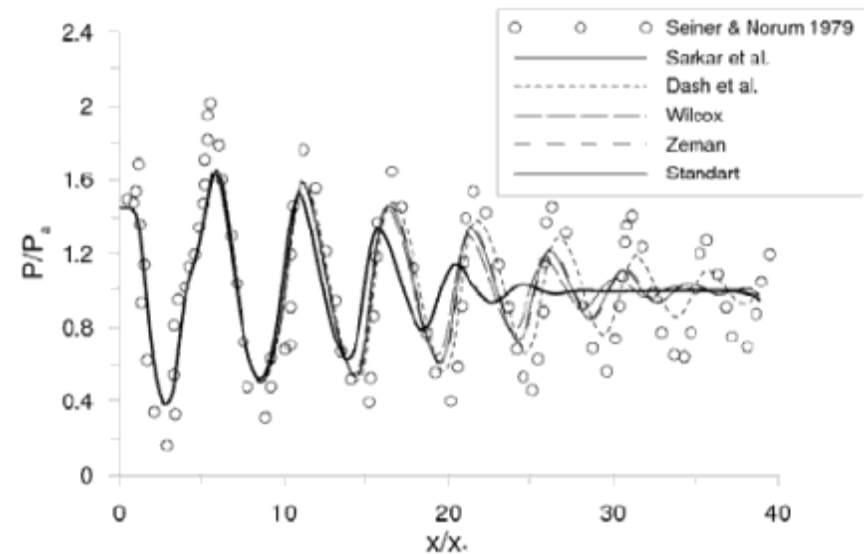
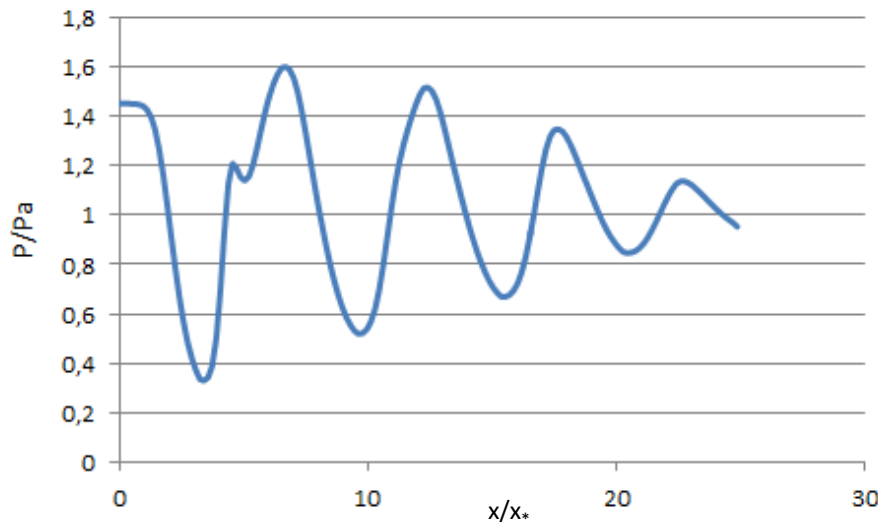
Результаты расчета



Результаты численного моделирования статьи [1]



[1] Моделирование турбулентности в сверхзвуковых струйных течениях Глушко, Иванов, Крюков

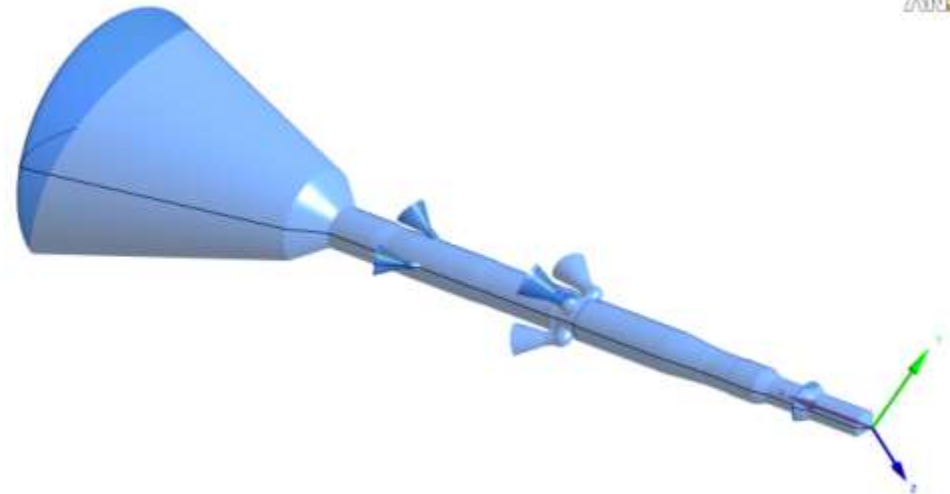




Изучение взаимодействия до- и сверхзвуковых струй с адиабатической стенкой

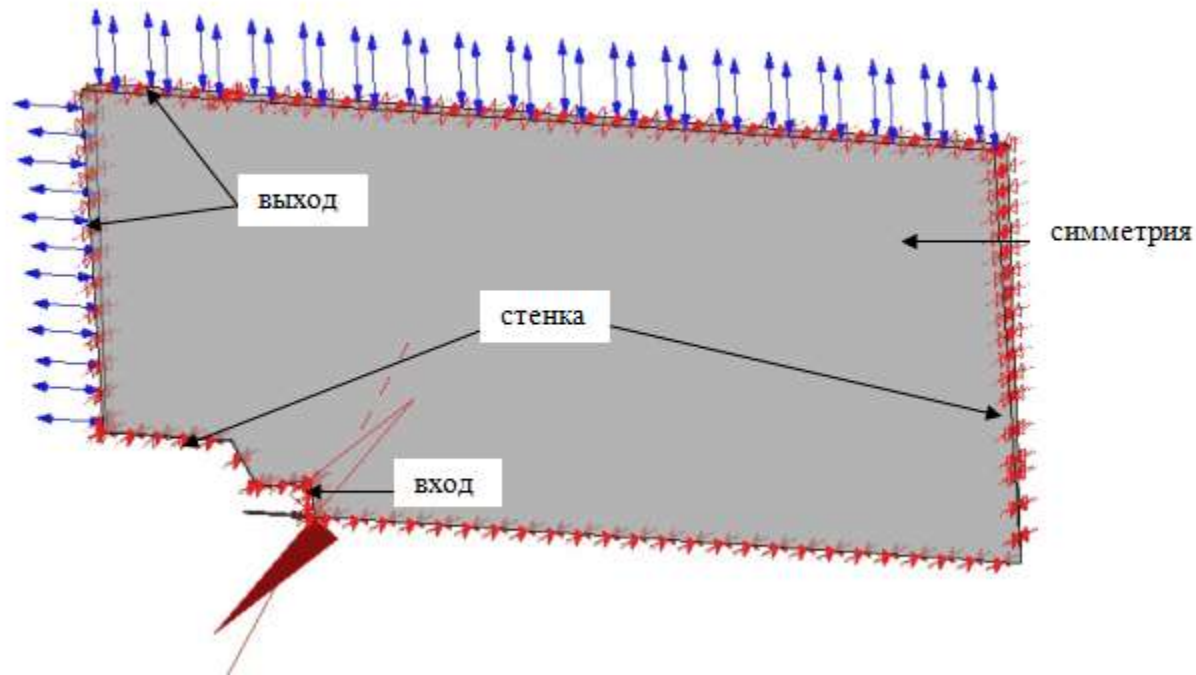


Актуальность задачи



ANSYS

Граничные условия



Вход

-V (таблица)

- $T_{in} = 330$ K

Симметрия

-V - проскальзывание

- T_{in} - нулевой градиент

Стенка объекта

-V- прилипание

- T_{in} - нулевой градиент

Выход

-T = 300 K

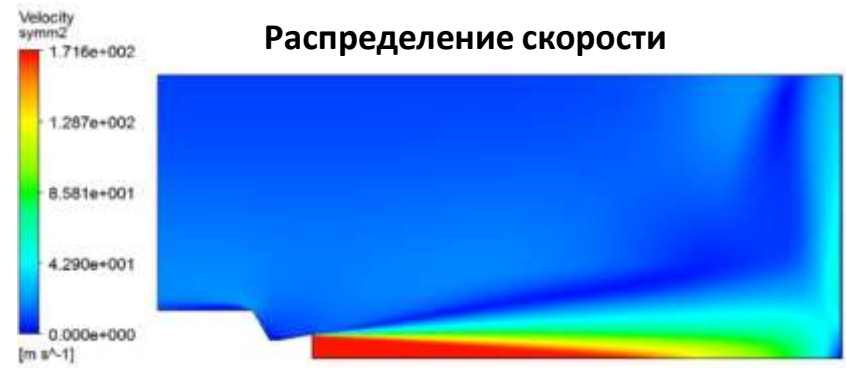
-P = 10^5 Па

M	v, м/с
0,1	37
0,45	168
1	330
2,7	1000
4,5	1685

Распределение скорости и давления

M=0,5

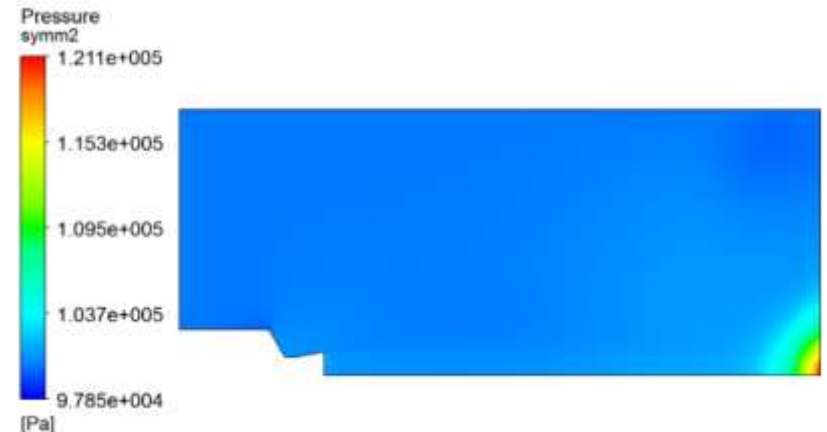
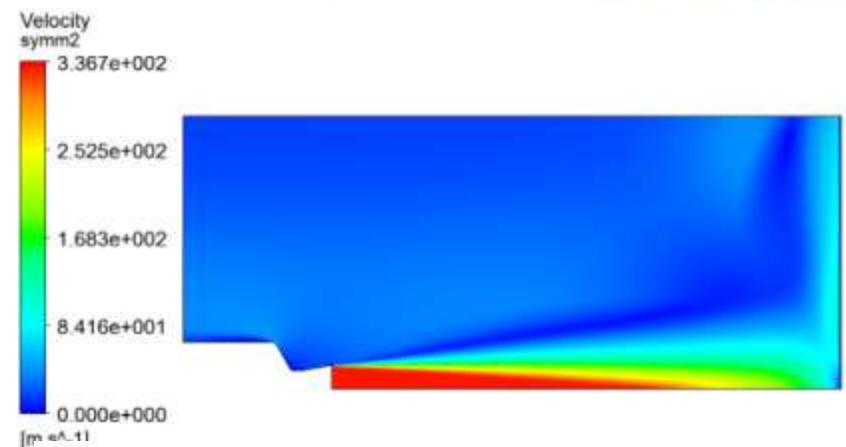
Распределение скорости



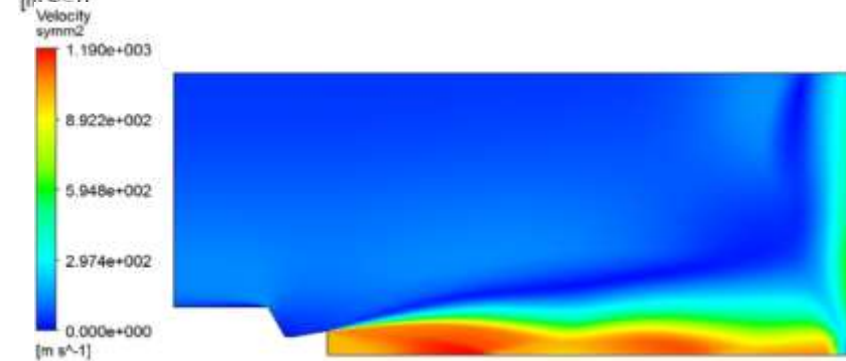
Распределение давления



M=1

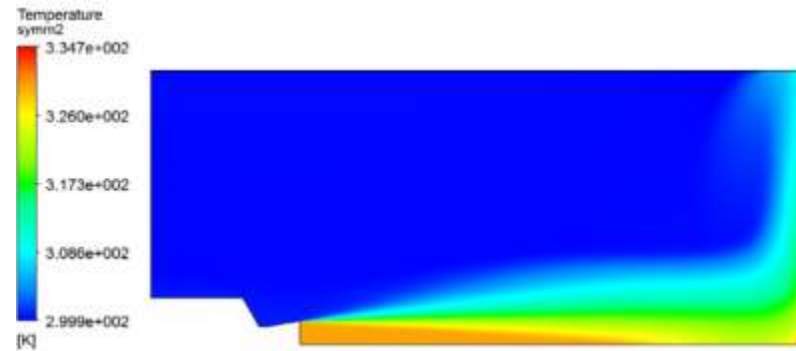


M=2,7

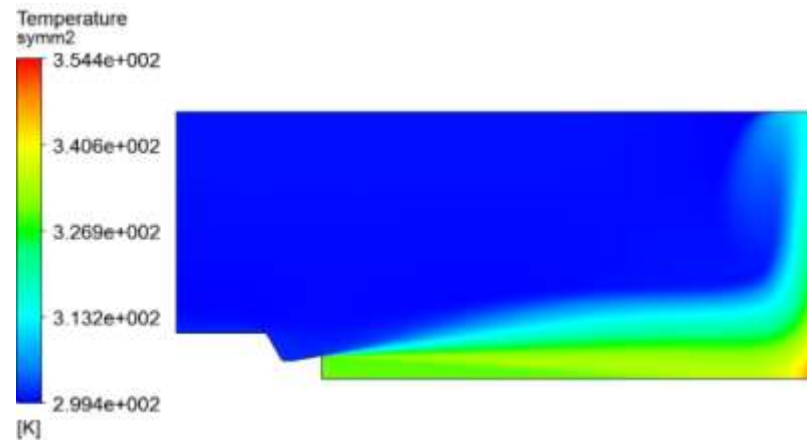


Распределение температуры

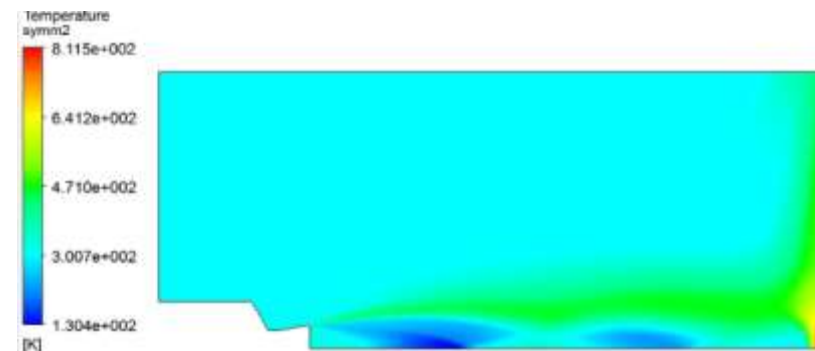
M=0,5



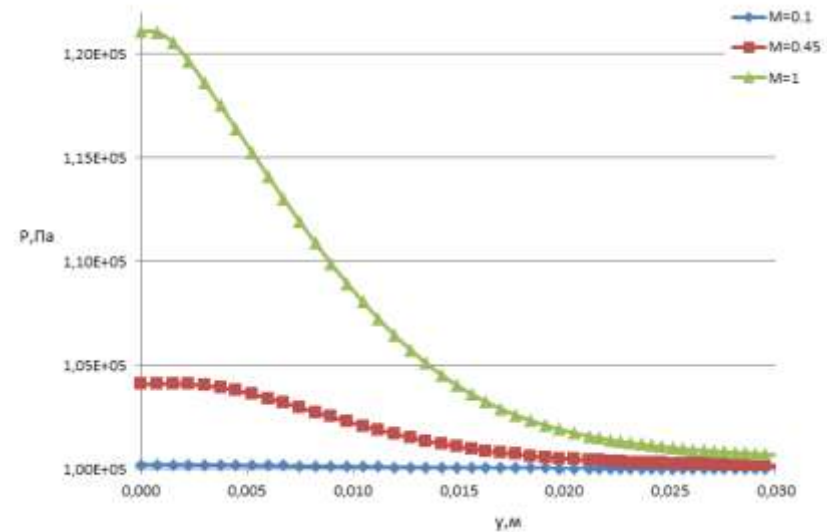
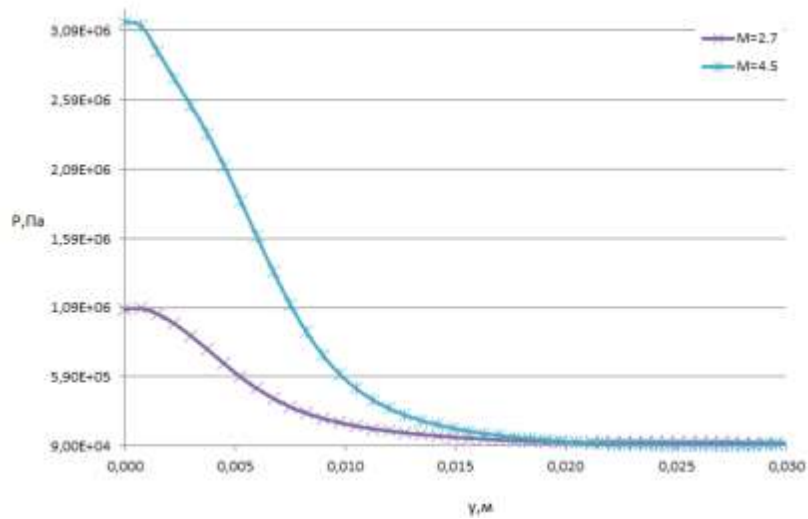
M=1



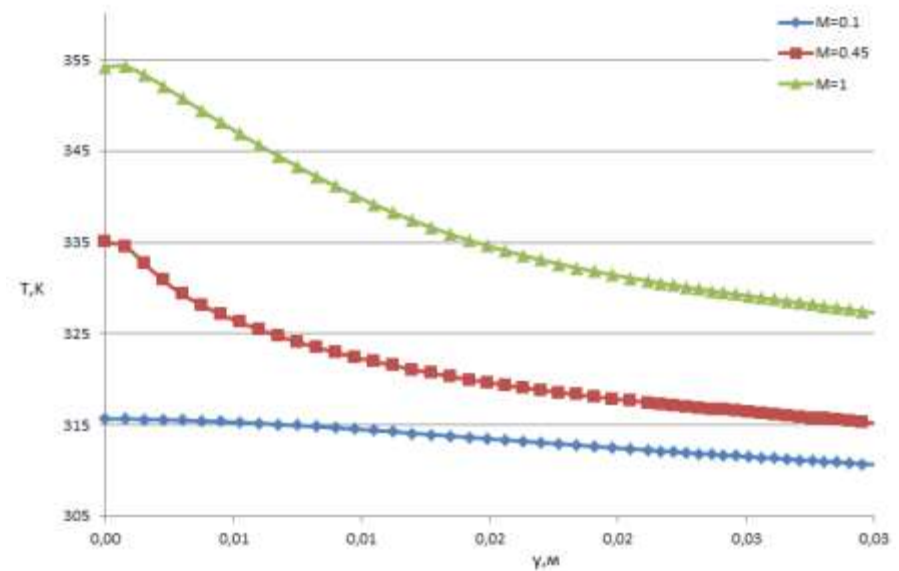
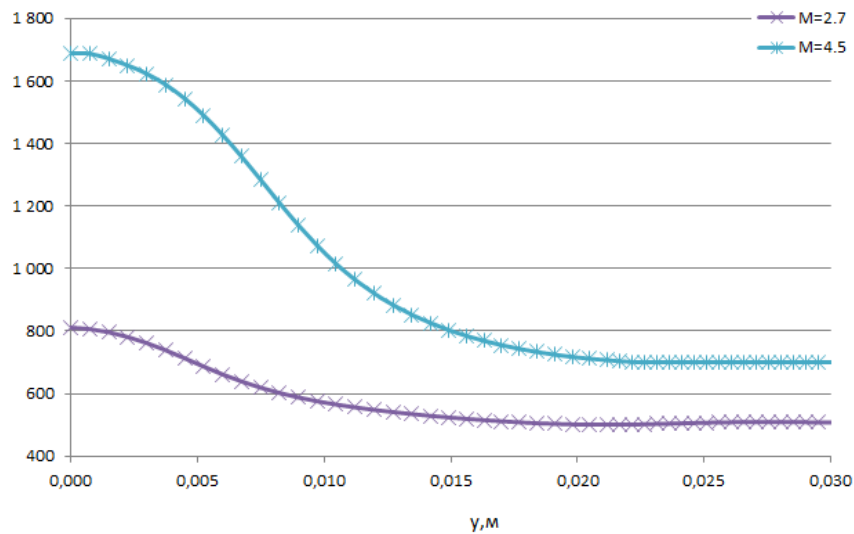
M=2.7



Профили давления вблизи адиабатической стенки



Профили температуры вблизи адиабатической стенки





Заключение

- Изучен и приведен теоритический материал, описывающий базовые основы сопла Лавалья и реактивных двигателей.
- Разработано несколько расчетных моделей для численного моделирования затопленных струй.
- Произведен анализ влияния различных модификаций постановки граничных условий на профиль течения на выходе из сопла Лавалья при моделировании течения в комплексе Flow Vision.
- Сравнены результаты численного моделирования сверхзвуковой струи $M=2$ в двух различных программных пакетах ANSYS CFX и Flow Vision, результаты сошлись в рамках погрешности 2%.
- Успешно произведено численное моделирование дозвуковой струи $M=0,5$. Результаты сошлись с опытными данными Трюпеля.
- Произведено численное моделирование сверхзвуковой струи с параметром нерасчетности $n=1,5$. Распределение давления вдоль оси струи успешно совпало с численными данными, рассчитанными в МАИ.
- Рассмотрена задача натекания до/сверхзвуковой струи на адиабатическую стенку. Проанализировано влияние профиля скорости на выходе из сопла Лавалья на распределение физических параметров вблизи стенки.



Спасибо за внимание!