

Санкт-Петербургский политехнический
университет

*Высшая школа прикладной математики и
вычислительной физики*

Развитие комплекса программ SINF/Flag-S

Обзор текущего состояния и планы на будущее

Е.М. Смирнов, Е.В. Колесник, А.А. Смирновский, И.А. Шишкина

CFD Weekend 2020, 28 ноября 2020 года



Комплексы программ SINF и SINF/Flag-S

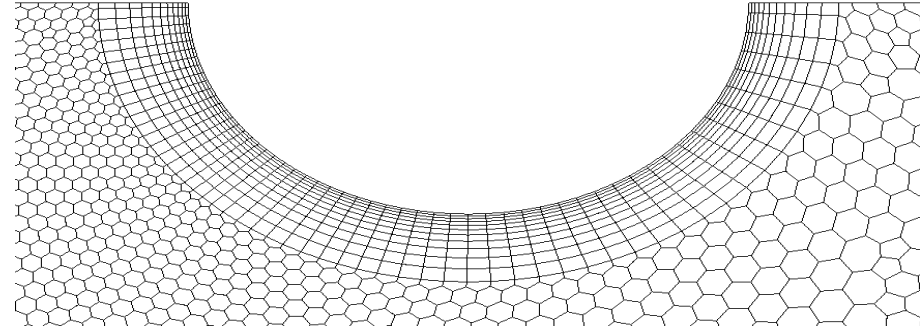
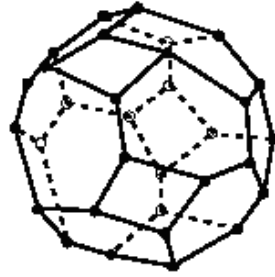
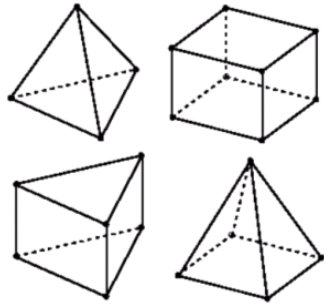
SINF

- Блочнo-структурированные сетки
- Разрабатывался с 1992 по 2010 гг
- Утилиты: интерактивный 2D генератор сеток + 3D утилиты; визуализатор FLAG (Flow Analysis Graphics)
- Специализированные программы:
 - **FLOS**: интегрированный учебный пакет FLOS (Flow Studio)
 - **ПГС-ТК**: многокомпонентная парогазовая смесь, СПб АЭП 2009-2012

SINF/Flag-S

- Неструктурированные (полиэдральные) сетки
- Flag-S: **F**luids **a**nd **g**ases — **S**imulations
- Разрабатывается с 2005 г. по настоящее время
- Специализированные программы:
 - **Flag-FS**: течения со свободной поверхностью; 2009-2014
 - **ТЕМБР**: жидкие металлы, для ГК Росатом, 2012-2013
 - **СКАТ³**: сопряженный теплоперенос; Роскосмос, 2014-2015

Сетки и сеточные технологии, используемые в SINF/Flag-S



- Неструктурированные многоблочные (стыкуемые) сетки
- Регулярная («узел в узел») стыковка на межблочных границах
- Собственная утилита для декомпозиции расчётной области и « сборки » решения с применением библиотеки METIS
- «Нативная» поддержка формата сетки Fluent

Классы задач, решаемых с использованием кода SINF/Flag-S

- Ламинарные и турбулентные течения жидкости
- Теплообмен при вынужденной, свободной и смешанной конвекции в полях массовых сил (гравитационной, центробежной и силы Кориолиса)
- Задачи сопряженного теплообмена (без радиационного), включая процессы испарения и конденсации на границах раздела сред
- Течения со свободной поверхностью (метод Volume of Fluid)
- Течения в пористых средах

Моделирование турбулентности:

- RANS-модели (k , v_t -SA, k - ω MSST)
- Расширенные («автоматические») пристенные функции
- Вихреразрешающие модели (LES, DES, IDDES)
- Генератор входной синтетической турбулентности

Дополнительная информация

- Языки программирования: Fortran-90, C
- Параллелизация на основе MPI
- Тестирование кода: база основных рабочих тестов – около 30
- Для хранения кода и его ответвлений используется система контроля версий Mercurial
- Можно подключать внешние библиотеки (BLAS, LAPACK, HYPRE)

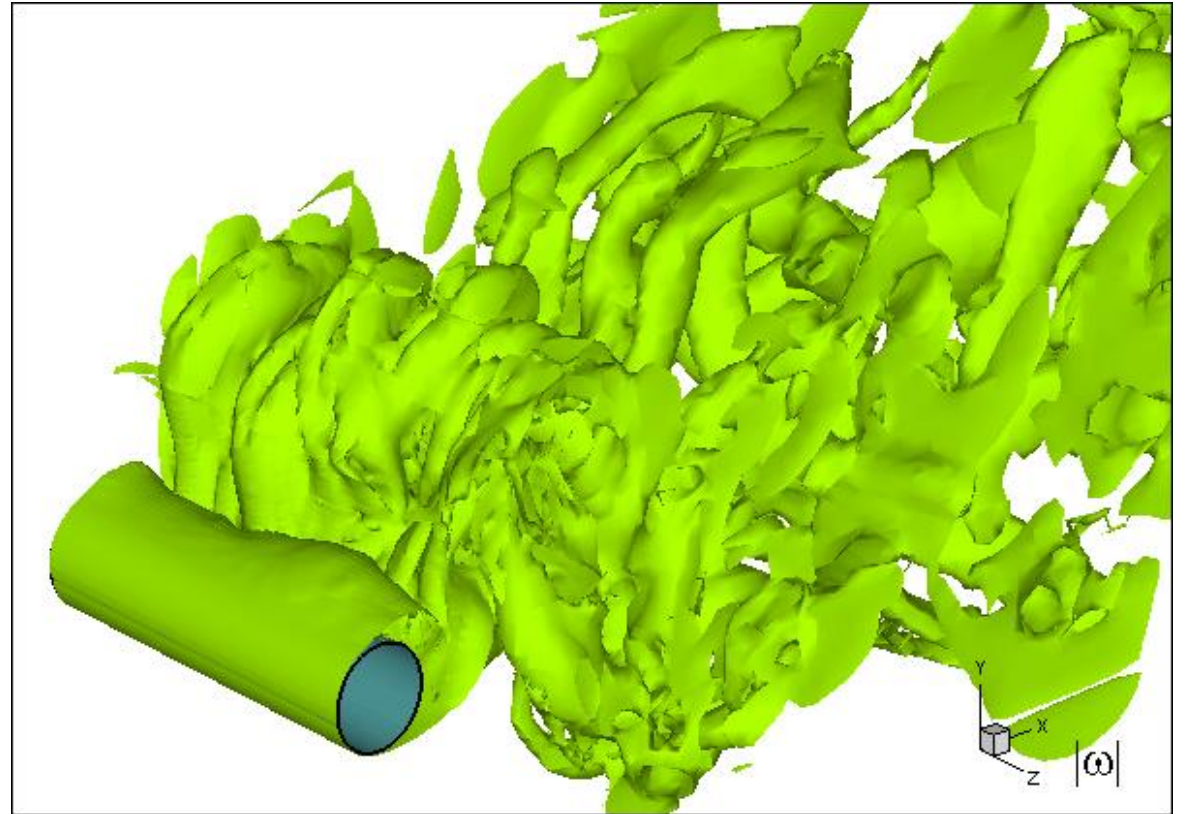
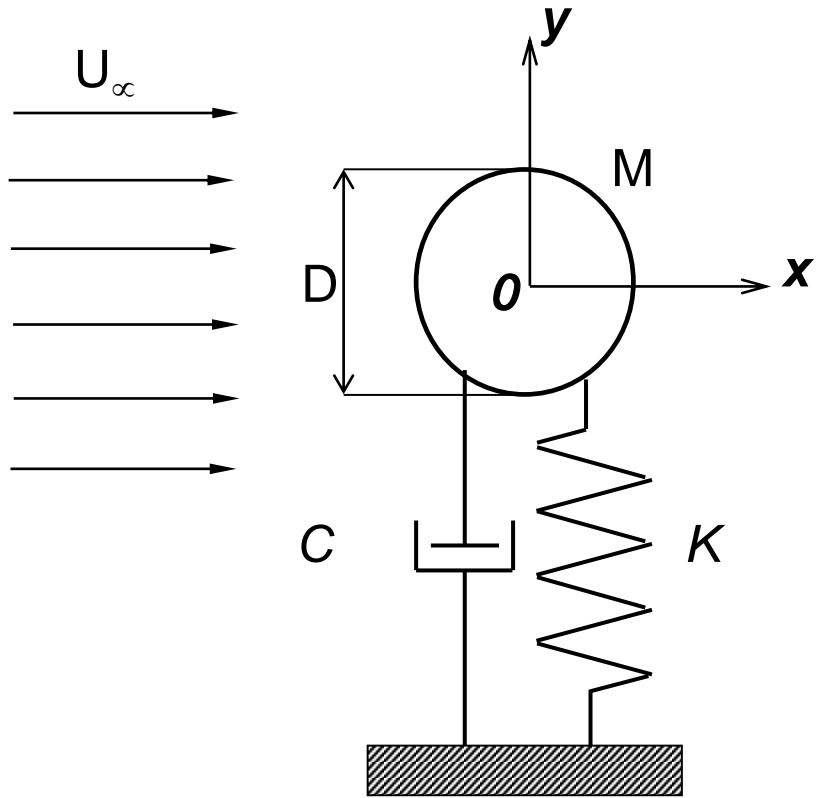
В активной разработке

- Модули для расчёта сжимаемых течений однородного газа (существенно дозвуковые, дозвуковые, трансзвуковые, сверхзвуковые) на базе единого подхода
- Подвижные деформируемые сетки

Опыт разработки и использования алгоритмов расчёта на деформируемых сетках на базе структурированного кода SINF

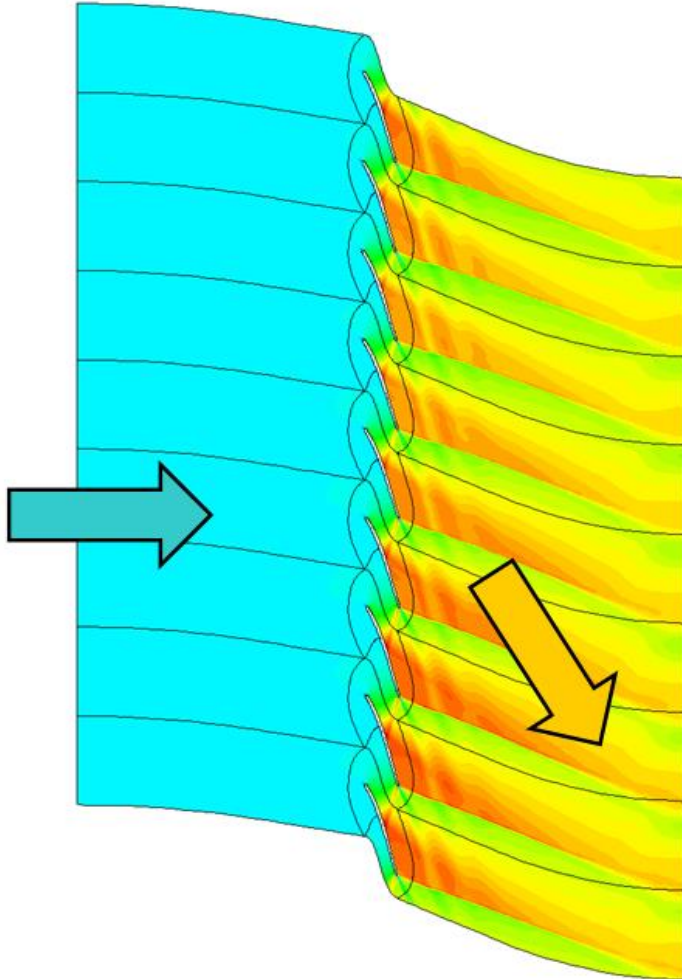
- В рамках кандидатской диссертации (Щур Н.А., 2004-2007 гг) реализован и протестирован метод деформации блочно-структурированных сеток
- Реализовано совместное интегрирование уравнений гидродинамики с уравнениями движения цилиндра и пластины (fluid-structure interaction)

Пример расчёта на деформируемых сетках при помощи структурированного кода SINF: автоколебания цилиндра в потоке

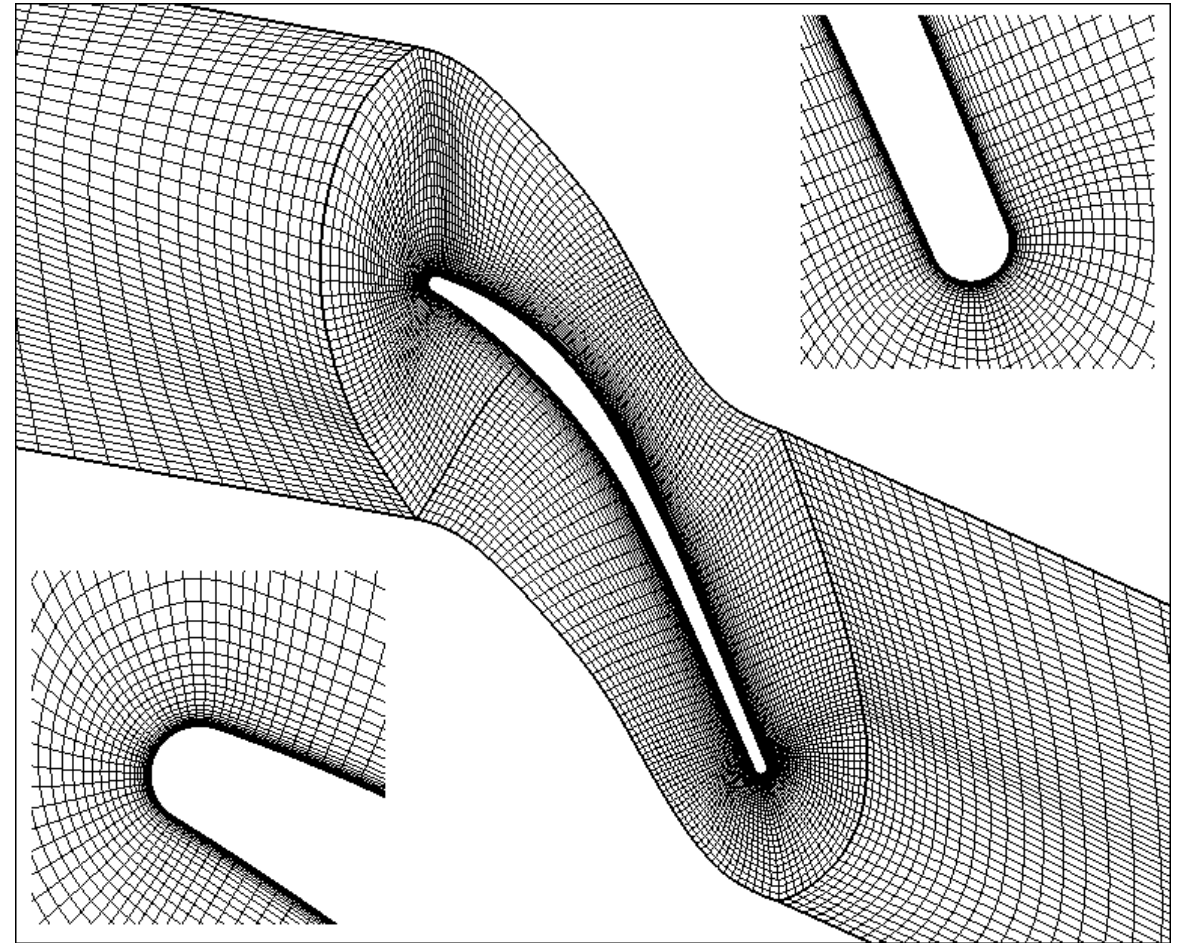


Пример расчёта на деформируемых сетках при помощи структурированного кода SINF: вынужденные колебания лопаток

Распределение числа Маха

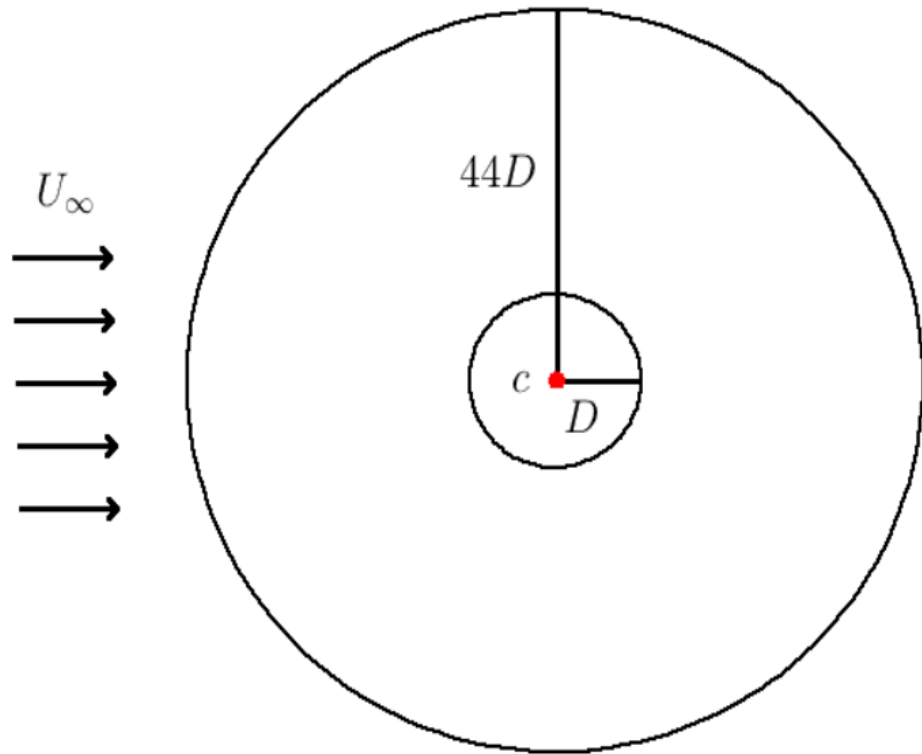


Деформация сетки



Реализация и тестирование алгоритма расчёта на деформируемых сетках в неструктурированном коде SINF/Flag-S

Обтекание поперечно колеблющегося цилиндра

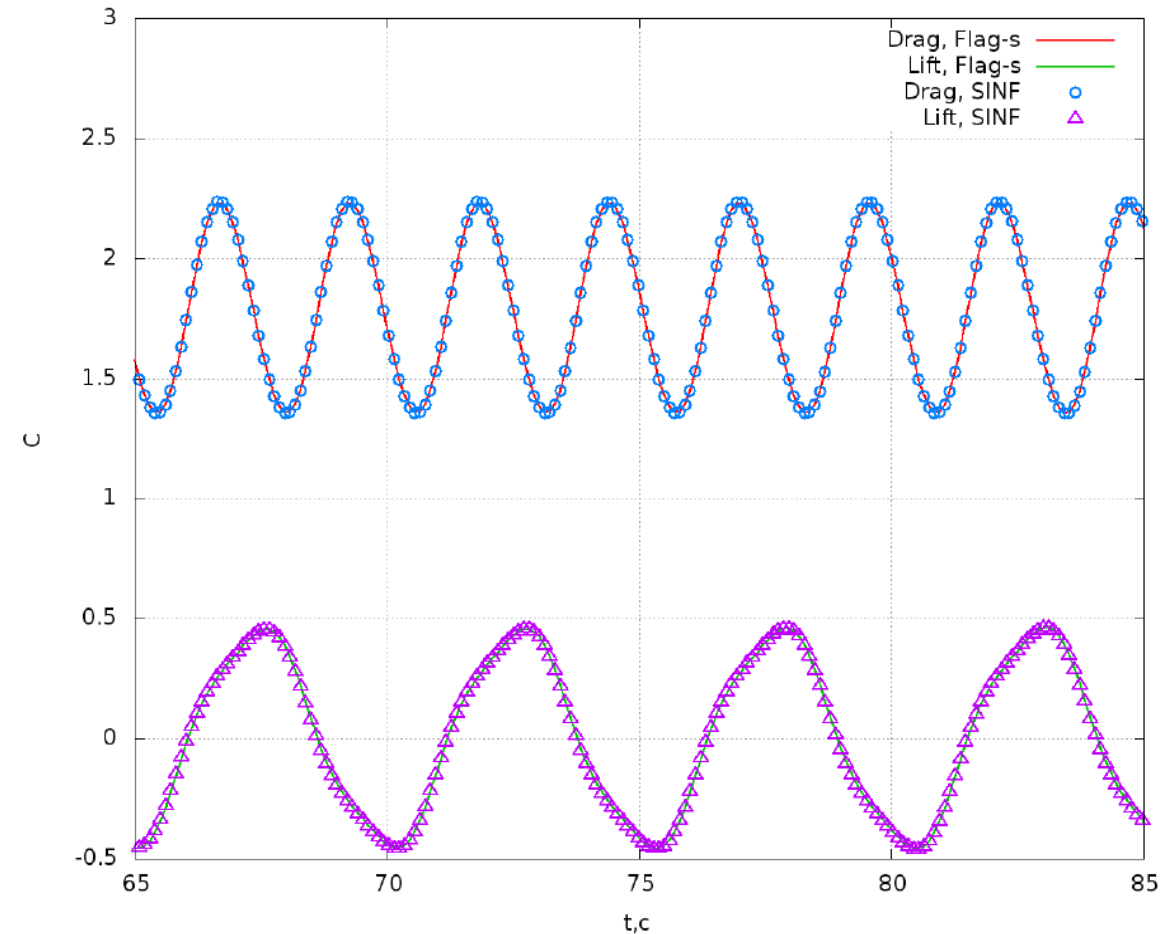


$$Re = \frac{U_\infty D}{\nu}$$

$$Sh = \frac{fD}{U_\infty}$$

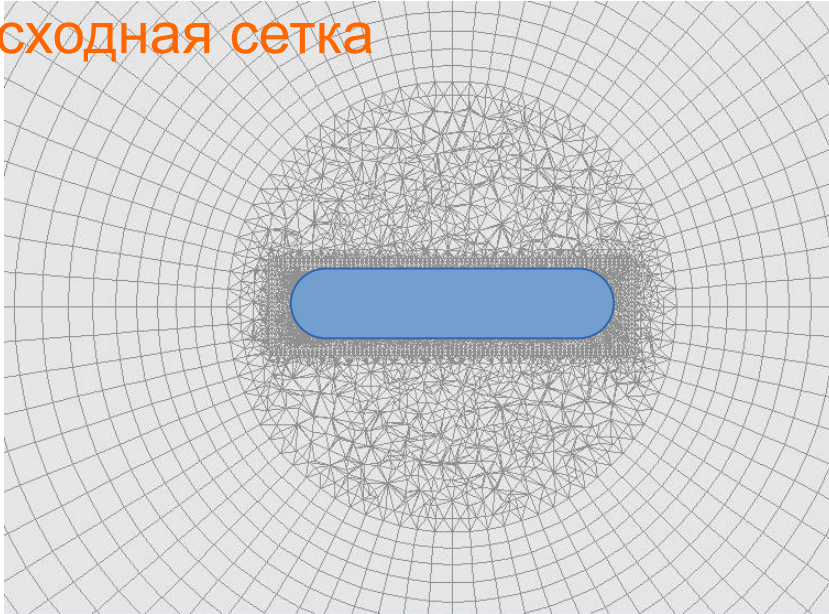
$$y_c = A_e \sin 2\pi f\tau$$

$$A_e = 0.4$$

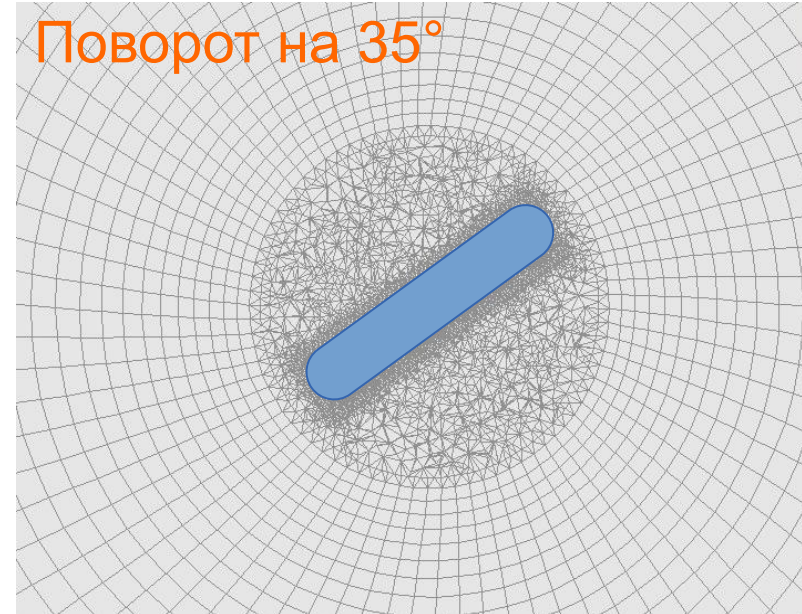


Планы на будущее: реализация в неструктурированном коде SINF/Flag-S оригинального алгоритма деформации сетки

Исходная сетка



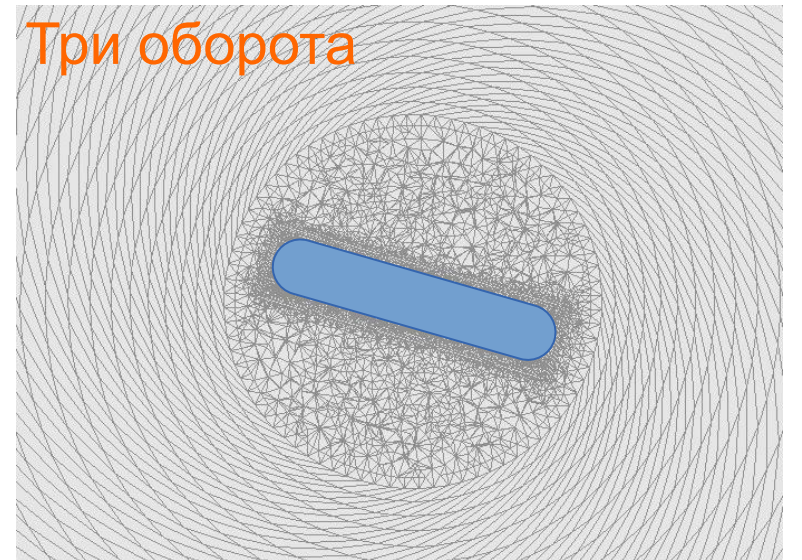
Поворот на 35°



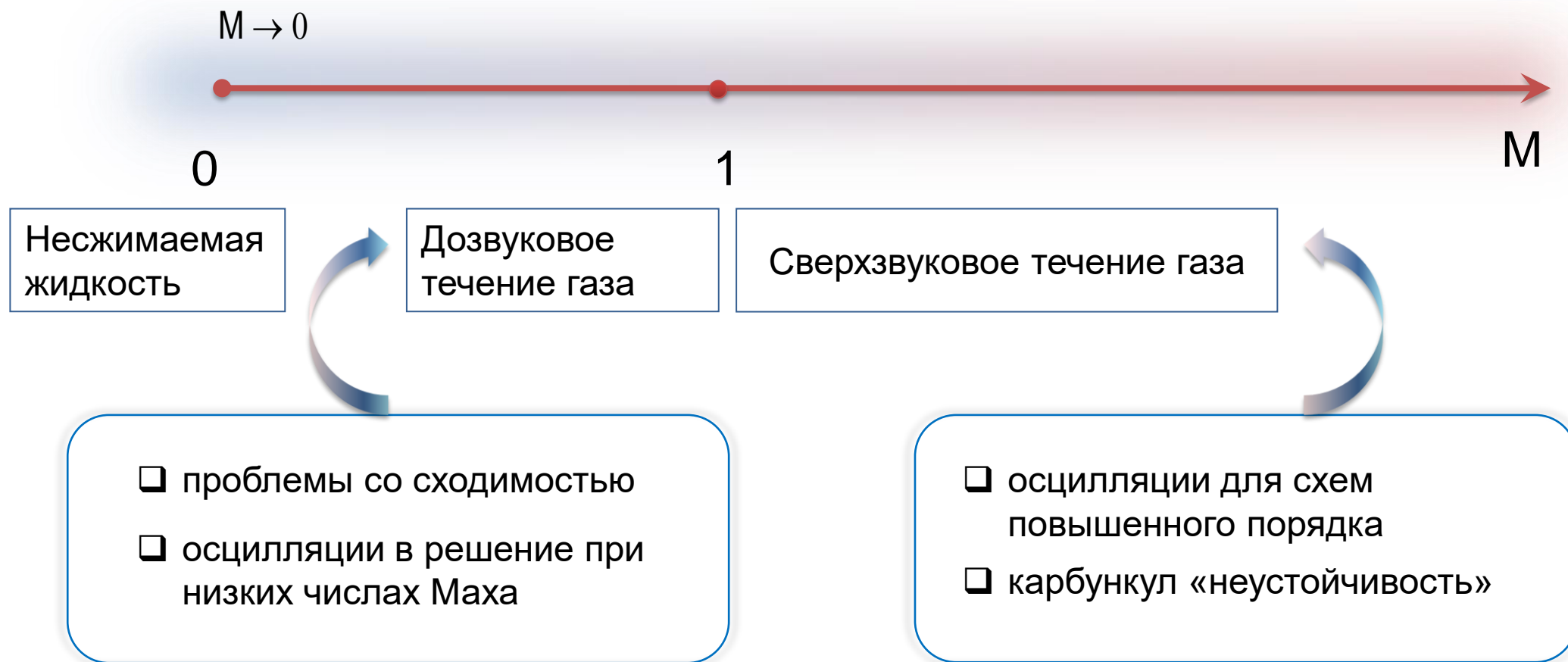
Поворот на 90°
(сетка целиком)



Три оборота



Численный метод для расчета сверх-, и гиперзвуковых течений совершенного газа со скачками уплотнения



МЕТОД КОНЕЧНОГО ОБЪЕМА

$$\frac{\mathbf{w}_P^{k+1} - \mathbf{w}_P^k}{\Delta\tau} + \frac{1}{\Omega} \left(\sum_m \mathbf{F}_f^\Sigma S_f \right)^{k+1} = 0$$

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ \rho E \end{bmatrix}$$

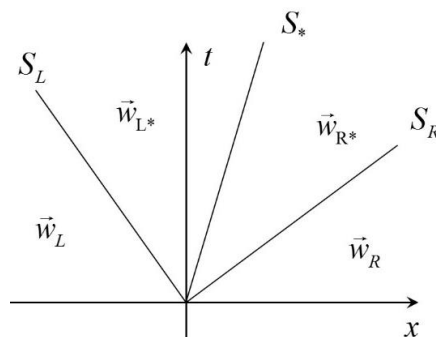
$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} \\ \rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} u + p \mathbf{n} \cdot \mathbf{i} \\ \rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} v + p \mathbf{n} \cdot \mathbf{j} \\ \rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} w + p \mathbf{n} \cdot \mathbf{k} \\ \rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} H \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}^{visc} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{i} \\ -\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{j} \\ -\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{k} \\ -\mathbf{n} \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{V} - \mathbf{q}) \end{bmatrix}$$

Схемы расчета невязки потоков

Решения задачи Римана о распаде разрыва

- **Godunov** - точное решение
 - **ROE** - точное решение линеаризованной задачи
 - **HLL(E)**
 - **HLLC**
 - **Rusanov**
- } приближенное решение



Схемы расщепления векторов потоков

- **AUSM**
- **AUSM+**
- **AUSM+-up**
- **AUSMD**
- **SLAU**

$$\mathbf{F}_f = \mathbf{F}_f^{(c)} + \mathbf{F}_f^{(p)}$$

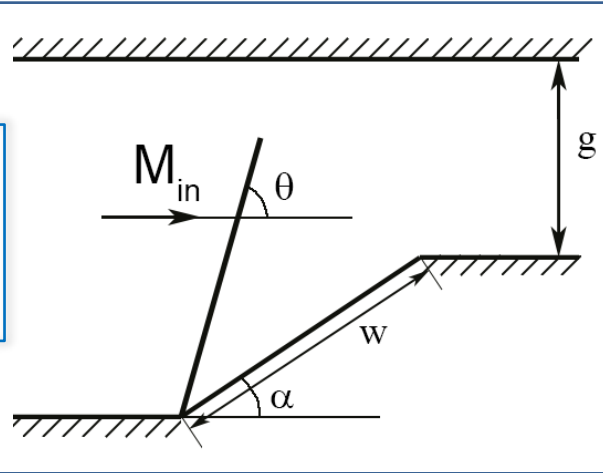
Конвективное слагаемое

Слагаемое с давлением

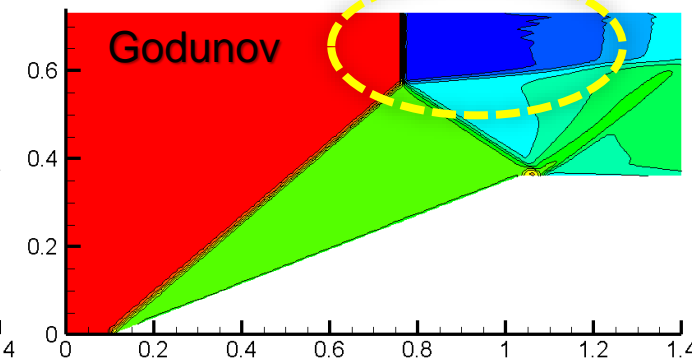
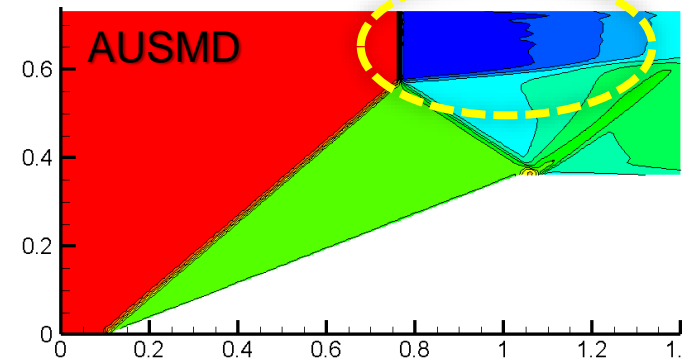
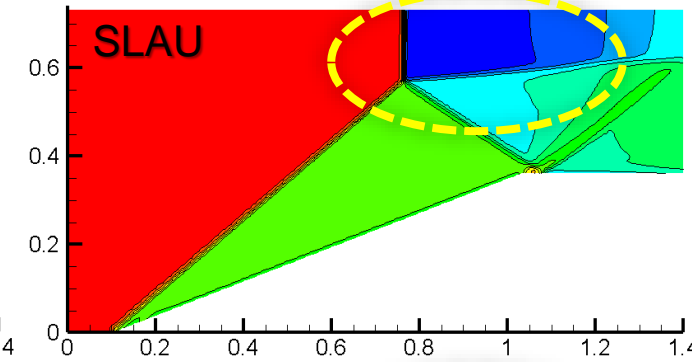
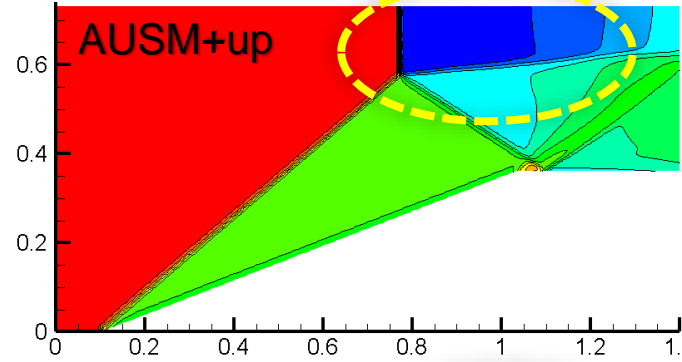
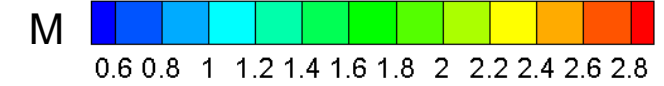
ТЕСТИРОВАНИЕ СХЕМ AUSM

Схема течения

$M_{in}=2.84$
 $\alpha=21.3^\circ (\Theta =40.7^\circ)$
 $g/w=0.37$

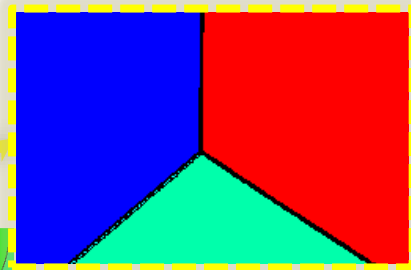
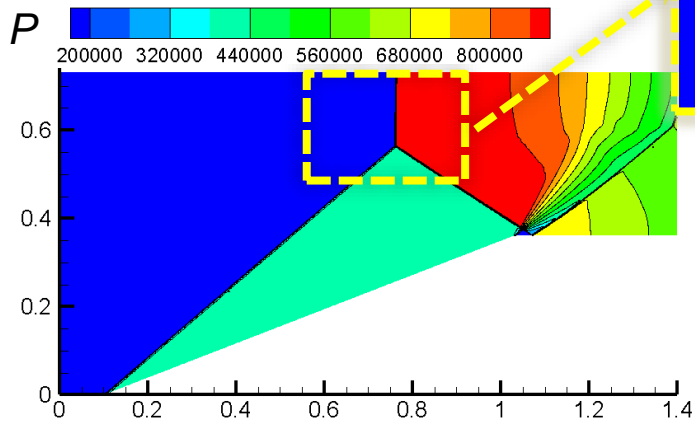


Сетка: 80x240 ячеек



Сетка: 320x960 ячеек

Длина «ножки Маха»



[7] B. John, G. Sarath, V. Kulkarni, G. Natarajan Performance comparison of flux schemes for numerical simulation of high-speed inviscid flows, 2014.

	AUSM	AUSM+	AUSM+up	SLAU	AUSMD
H_m/w	0.160	0.160	0.155	0.161	0.160
	Godunov	AUSM+ ANSYS Fluent		AUSM, расчет [7]	
H_m/w	0.160	0.161		0.165	

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ («КАРБУНКУЛ») НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

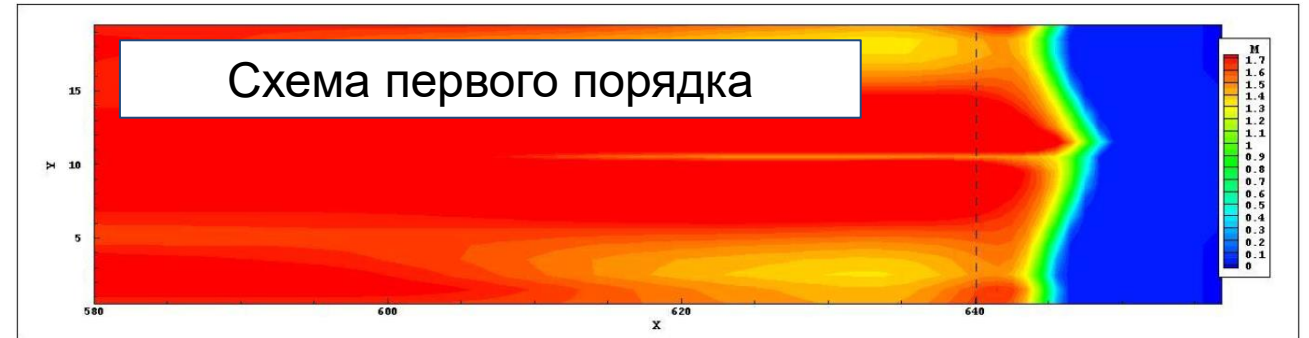
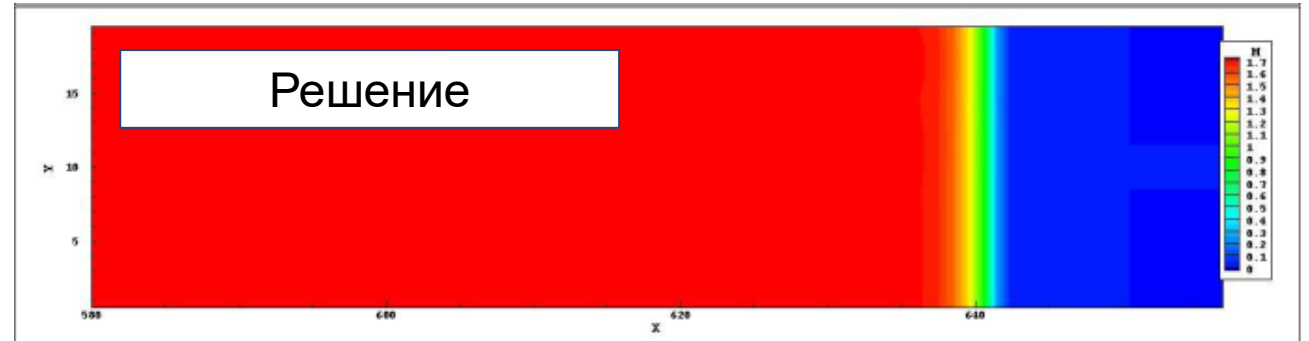
B. van Leer.

“...greatest unresolved problem of classical finite-volume schemes...”

The development of numerical fluid mechanics and aerodynamics since the 1960s: US and Canada”. Notes on Num. Fluid Mech., Springer-Verlag, Berlin, 2009

- J.J. Quirk (1994); H.-C. Lin (1995); M. Abouziarov (1999); J. Gressier, J.-M. Moschetta (2000); M. Pandolfi, D. D’Ambrosio (2001); A.B. Карпов, Е.И. Васильев Е.И. (2002); S.-s. Kim, C. Kim, O.-H. Rho, S.K. Hong (2003); S.H. Park, J.H. Kwon (2003); Y.-X. Ren (2003); M. Dumbser, J.-M. Moschetta (2004); P. Roe, H. Nishikawa, F. Ismail, L. Scalabrin (2005); V. Elling (2006); J.A. Menart, S.J. Henderson (2008); H. Nishikawa, K. Kitamura (2008); K. Kitamura, P. Roe, F. Ismail (2009); C.Y. Loh, P.C.E. Jorgenson (2009); Y. Shen, G. Zha, M.A. Huerta (2011); K. Huang, H. Wu, H. Yu, D. Yan (2011), ...

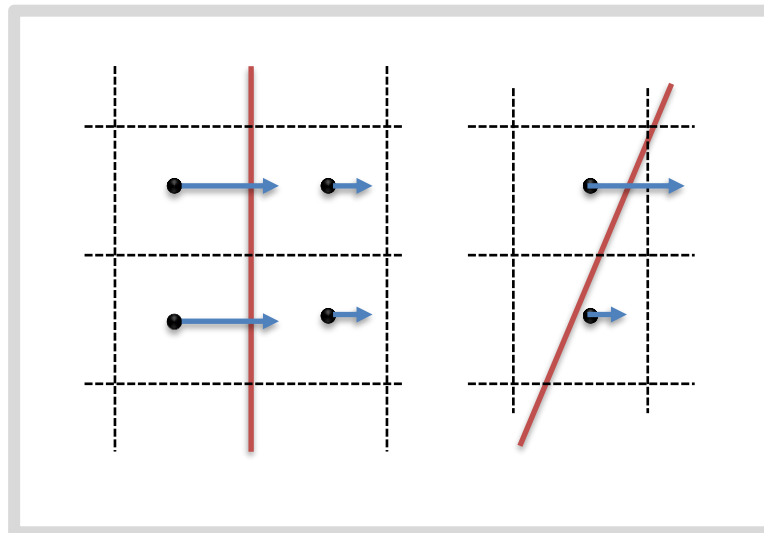
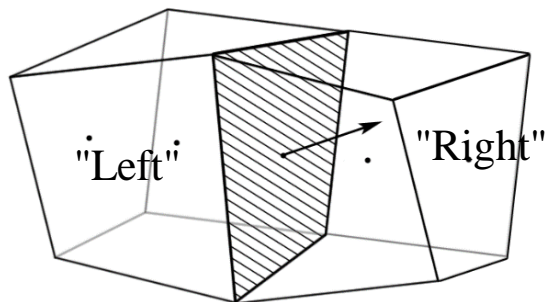
K.M. Peery, S.T. Imlay. “Blunt body flow simulations”. AIAA Paper 88-2924, 1988.



УДАРНО-ВОЛНОВАЯ («КАРБУНКУЛ») НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

Механизм образования

Квазиодномерный подход

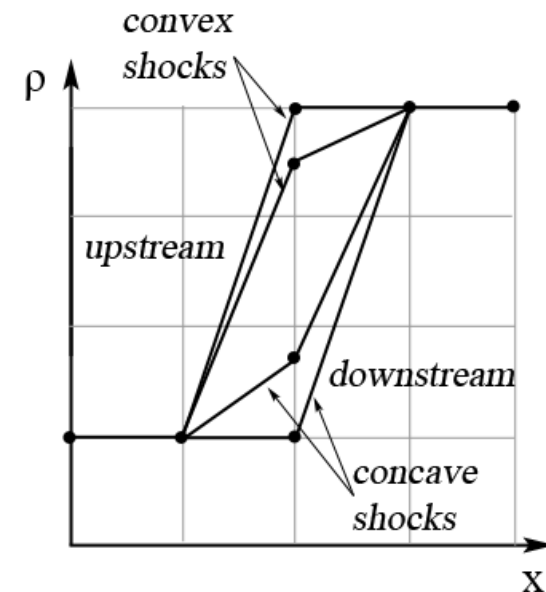
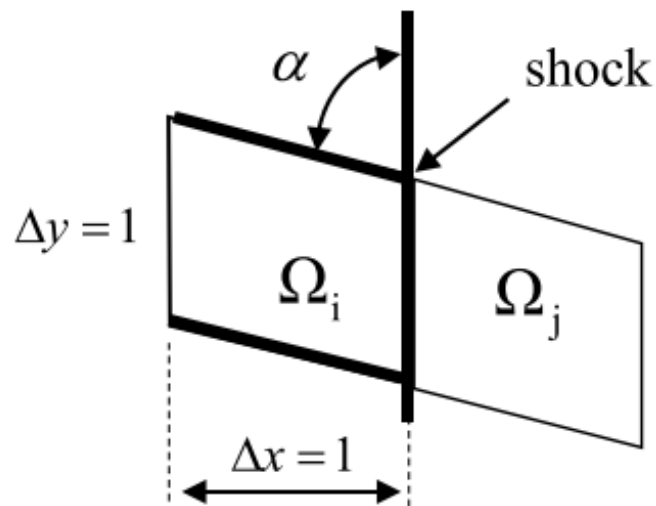
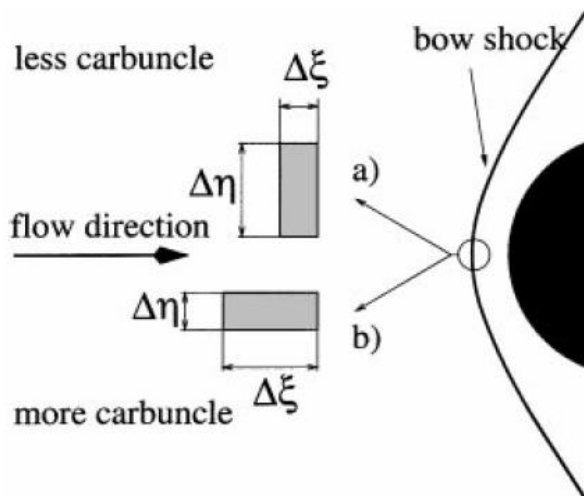


нет никакой обратной связи, которая бы подавляла неустойчивость

если «карбункул»-неустойчивость возникла в решении, то потом только увеличивается

$$\rho E = \rho C_v T + \rho V^2 / 2$$

Численные аспекты



МЕТОДЫ ПОДАВЛЕНИЯ «КАРБУНКУЛ»-НЕУСТОЙЧИВОСТИ

- Переход от уравнений Эйлера к уравнениям Навье-Стокса
- «Rotated» Riemann solver
- Использование диссипативных схем вне области вязкого взаимодействия
- Расчет на «испорченных» сетках

Методы, реализованные в коде SINF/Flag-S

Искусственная вязкость (AV)

Родионов А.В., 2019

$$\mu \equiv \mu_{AV} = \begin{cases} C_1 \rho l^2 (|\nabla \mathbf{V}| - C_2 a / l), & -\nabla \mathbf{V} > C_2 a / l \\ 0, & -\nabla \mathbf{V} \leq C_2 a / l \end{cases} \quad C_1=0.5, C_2=0.02$$

$$l = \max_i (d_i) / \sqrt{3}$$

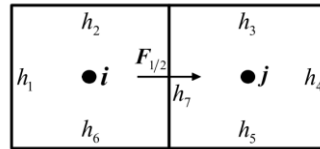
Гибридные схемы (HS)

$$\mathbf{F} = \alpha^2 \mathbf{F}_1 + (1 - \alpha^2) \mathbf{F}_2 \quad \alpha = \Delta \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} / |\Delta \mathbf{V}|$$

O. R. Tutty, G. T. Roberts, 2013

Метод Чена и др. (SV)

$$\mathbf{SV} = -g \cdot \frac{1}{2} \tilde{\rho} \tilde{a} \cdot \boldsymbol{\phi} \cdot \Delta V \begin{bmatrix} 0 & -n_y & n_x & \tilde{V} \end{bmatrix}^T$$



$$\boldsymbol{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n_y \\ n_x \end{bmatrix}$$

$$V = u \cdot \tau_x + v \cdot \tau_y$$

$$h_k = \min \left(\frac{p_{Lk}}{p_{Rk}}, \frac{p_{Rk}}{p_{Lk}} \right)$$

$$\phi = \max \left(1 - |\tilde{\mathbf{M}}|, 1 - |\mathbf{M}_L|, 1 - |\mathbf{M}_R| \right) \quad \mathbf{M} = \frac{\mathbf{V} \cdot \mathbf{n}}{a} \quad g = \frac{1 + \cos(\pi h)}{2} \quad h = \min_k (h_k)$$

Chen S.-S., Yan C., Lin B.-X., Liu L.-Y., Yu J., 2018

оригинальный метод: для **2D** случая

предложено обобщение для 3D случая

$$\mathbf{F}_f^{\text{Scheme+SV}}(\mathbf{Q}_L, \mathbf{Q}_R) = \mathbf{F}_f^{\text{Scheme}}(\mathbf{Q}_L, \mathbf{Q}_R) + \mathbf{SV}$$

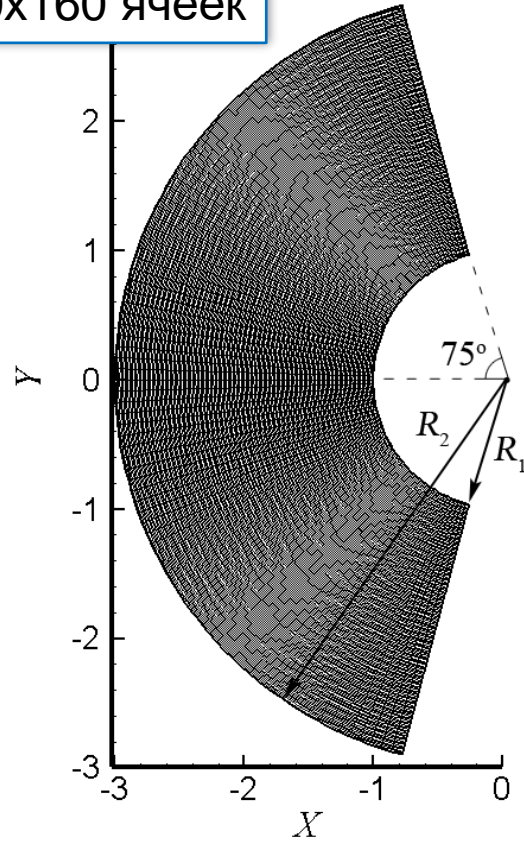
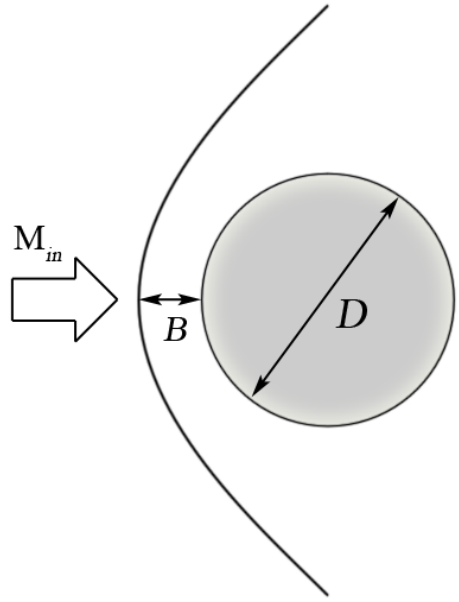
Тестирование методов подавление ударно- волновой неустойчивости

ГИПЕРЗВУКОВОЕ ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА: ДВУМЕРНАЯ ПОСТАНОВКА

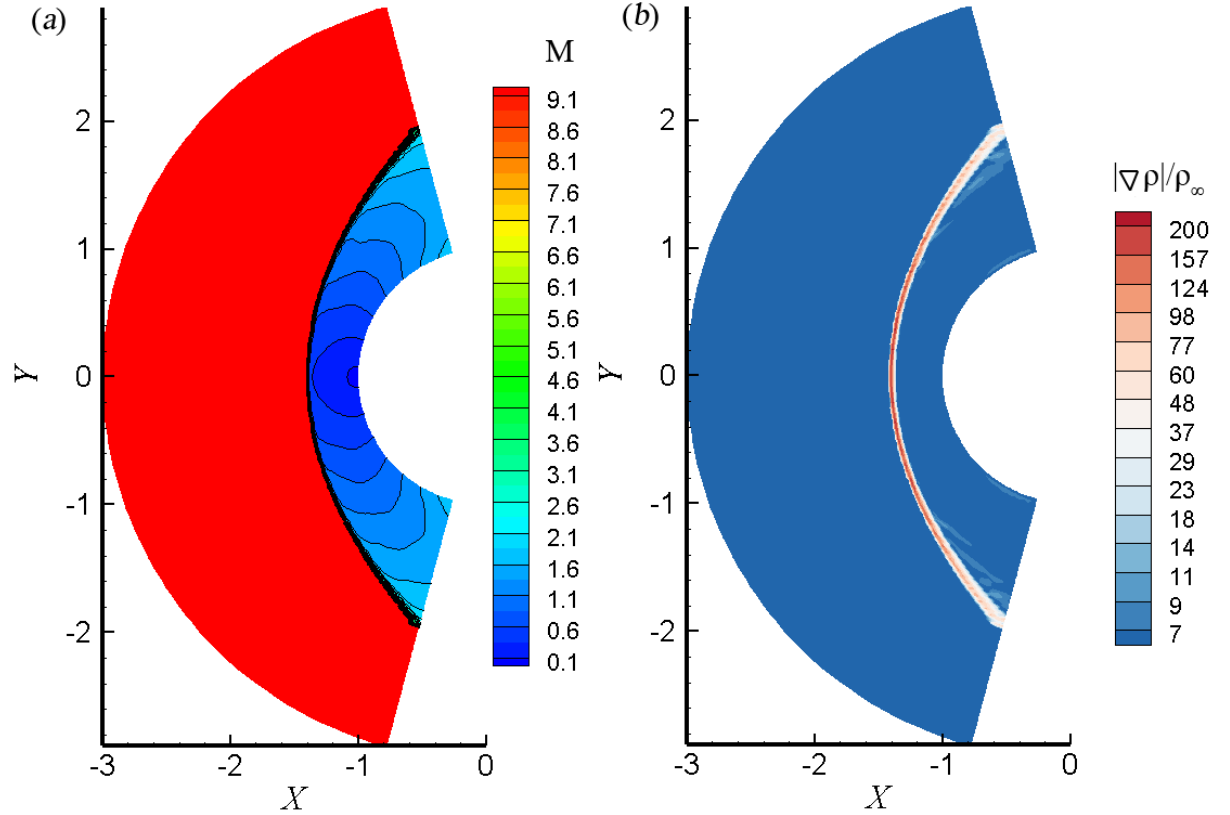
Схема течения

$M_{in}=10, 20$

90x160 ячеек



HLL, 2 порядок



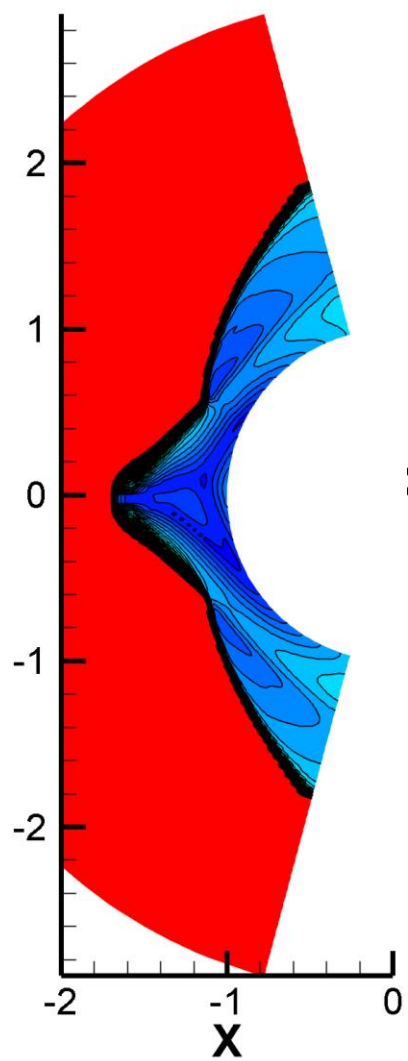
- неявная схема «в приращениях»
- метод установления

$$[1]: \frac{B}{D} = 0.19 + \frac{1.2}{M^2 - 1} + \frac{0.7}{(M^2 - 1)^2}$$

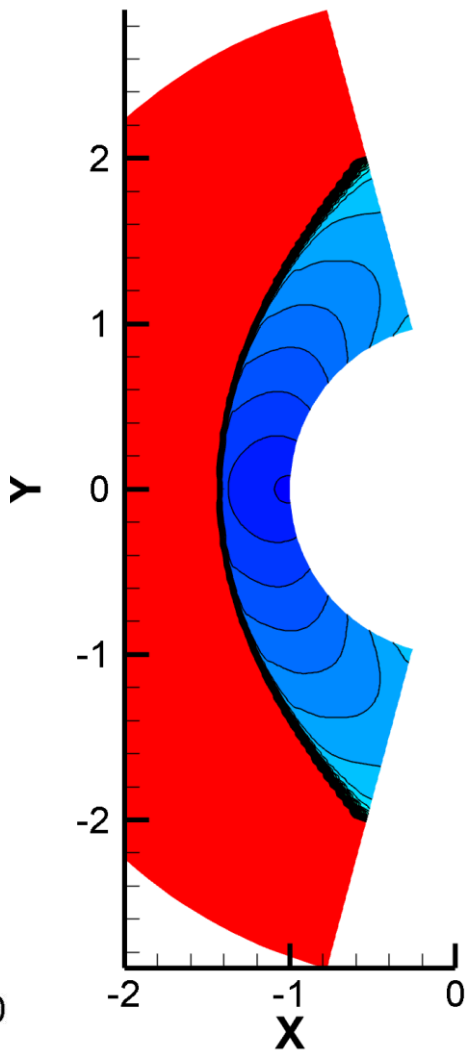
[1] J. L. Amick Pressure measurements on sharp and blunt 5° and 15° half cone at Mach number 3.86 and angles of attack to 100, 1961

ТЕСТИРОВАНИЕ СХЕМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА ТОЧНОСТИ

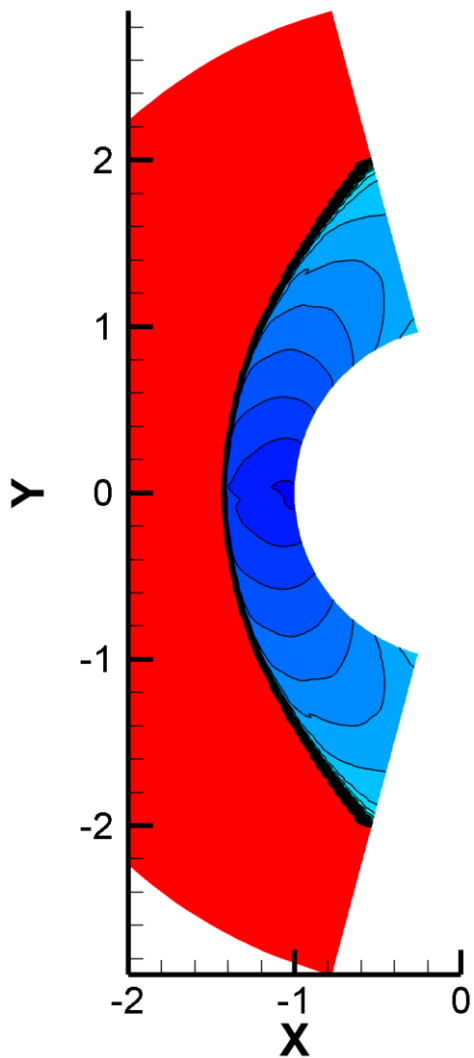
Roe



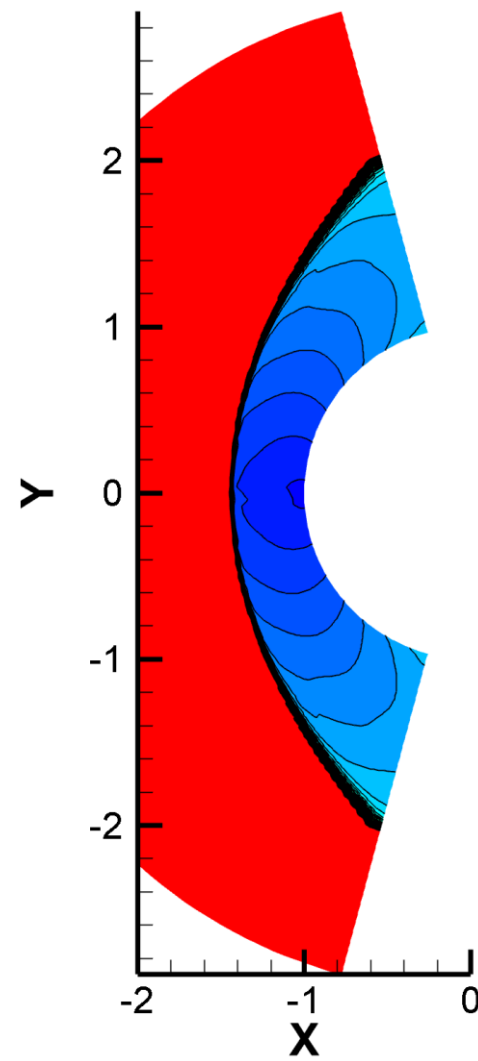
AUSM



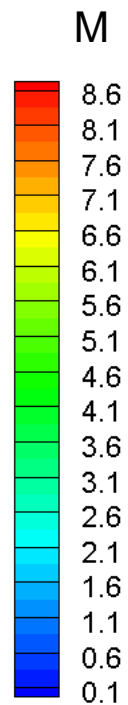
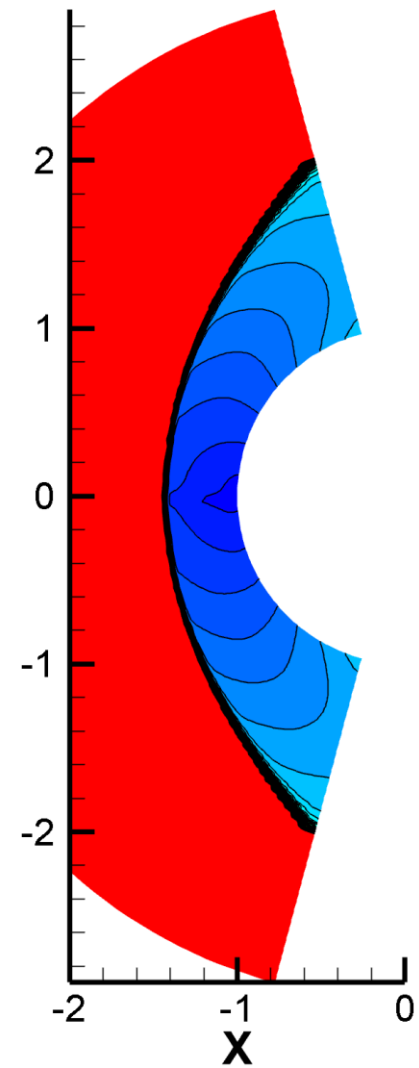
HLLC



AUSM+-up

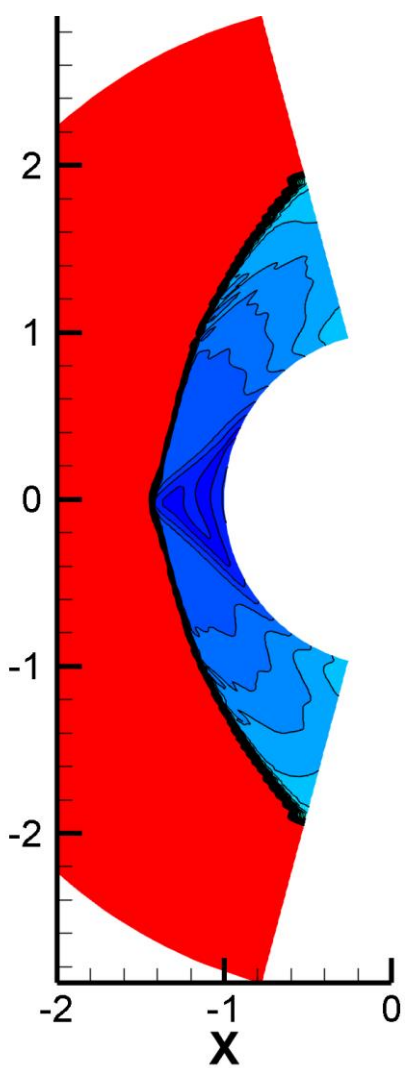


AUSMD

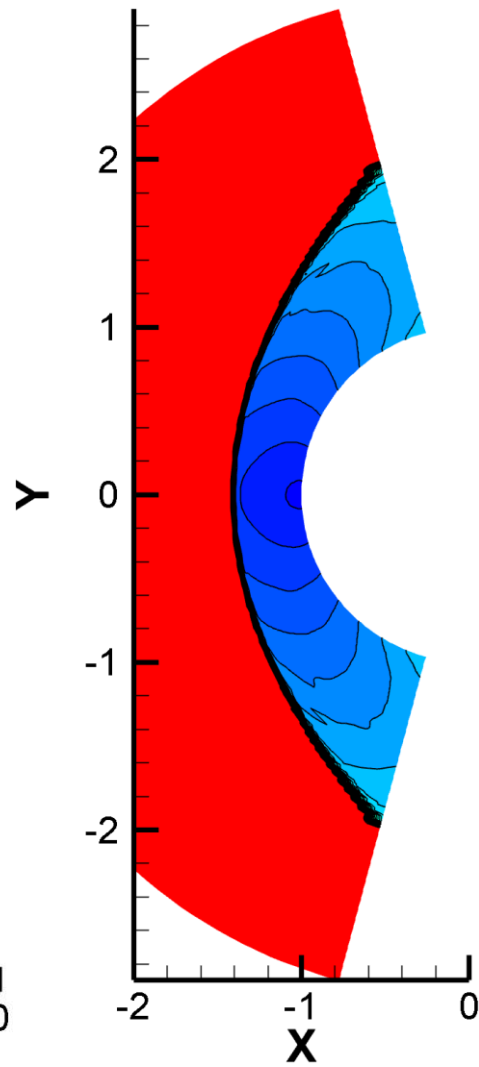


ТЕСТИРОВАНИЕ СХЕМ ВТОРОГО ПОРЯДКА ТОЧНОСТИ

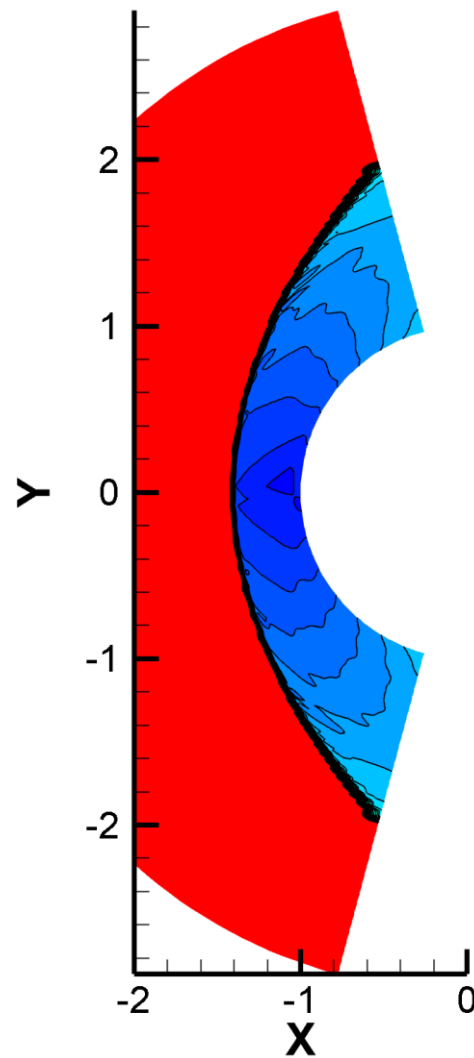
Roe



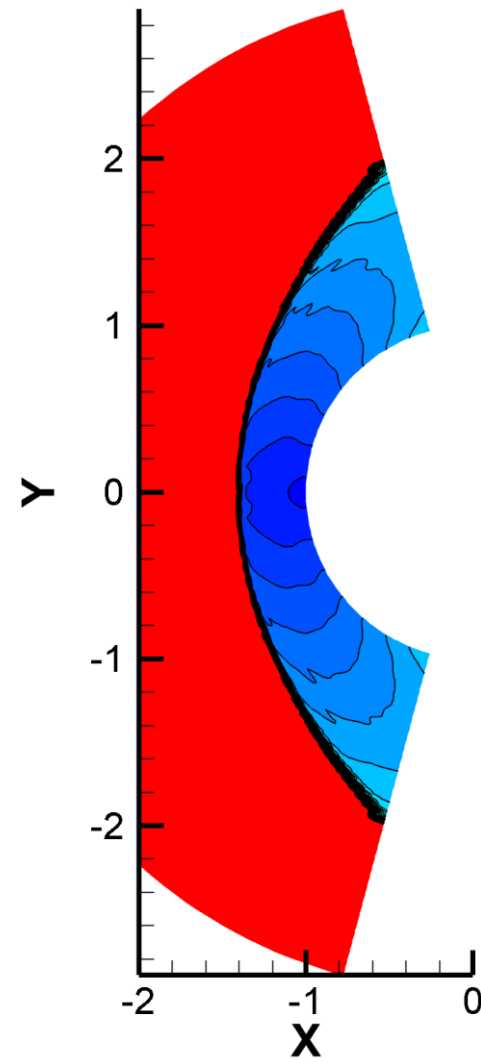
AUSM



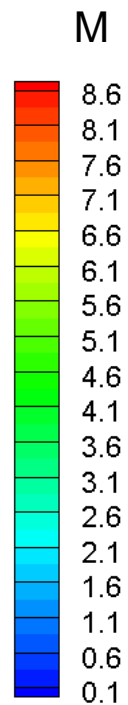
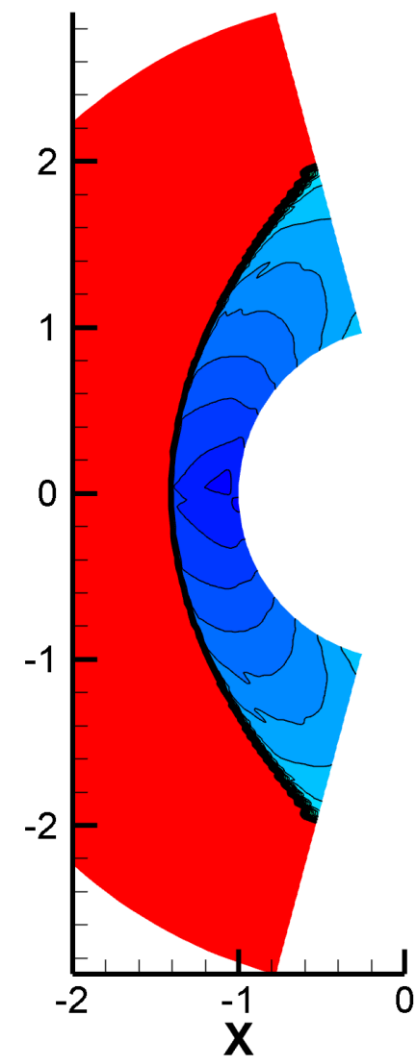
HLLC



AUSM+up



AUSMD

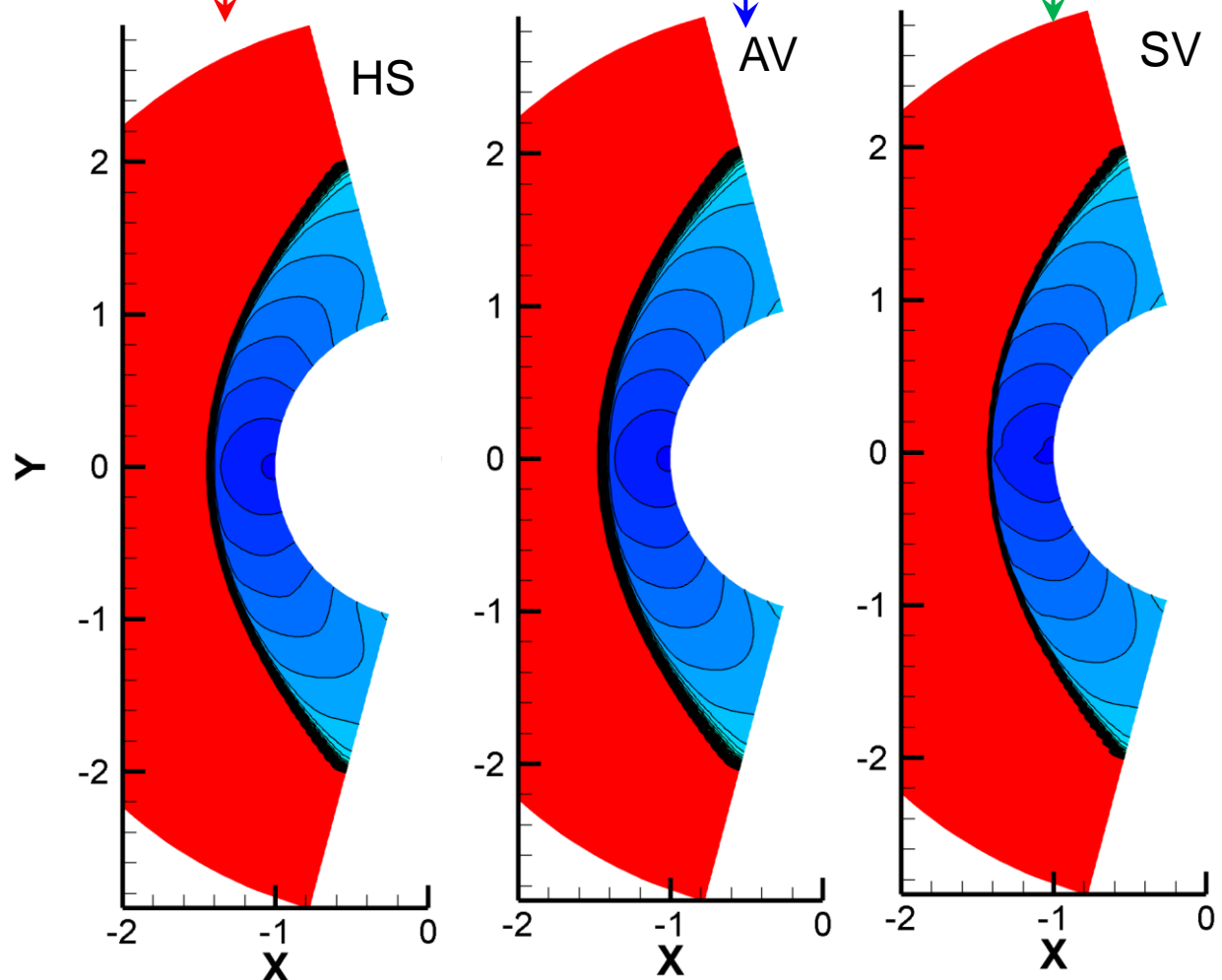


РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ ПОДАВЛЕНИЯ ДЛЯ СХЕМЫ ROU

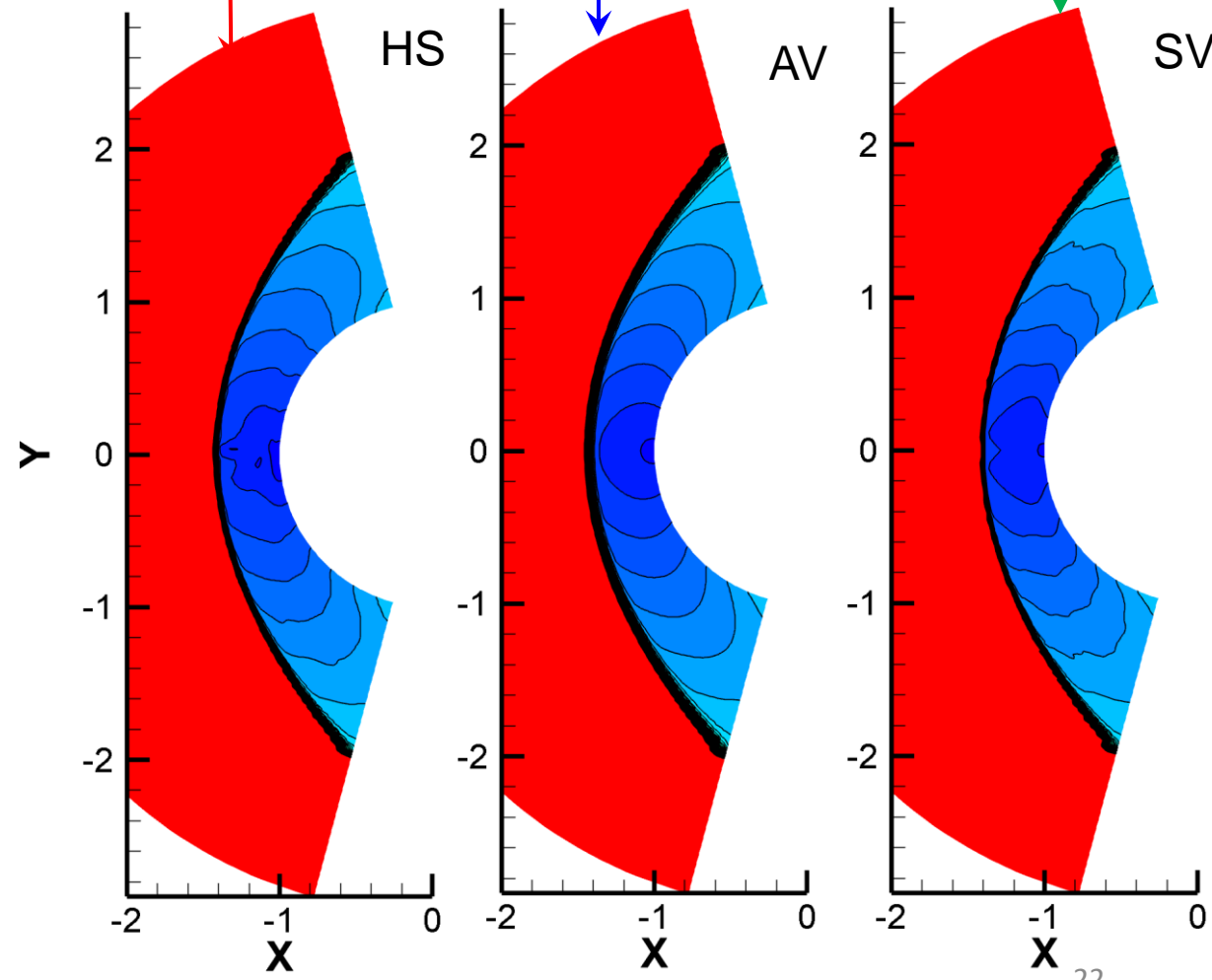
гибридная схема

искусственная вязкость

метод Чена и др.

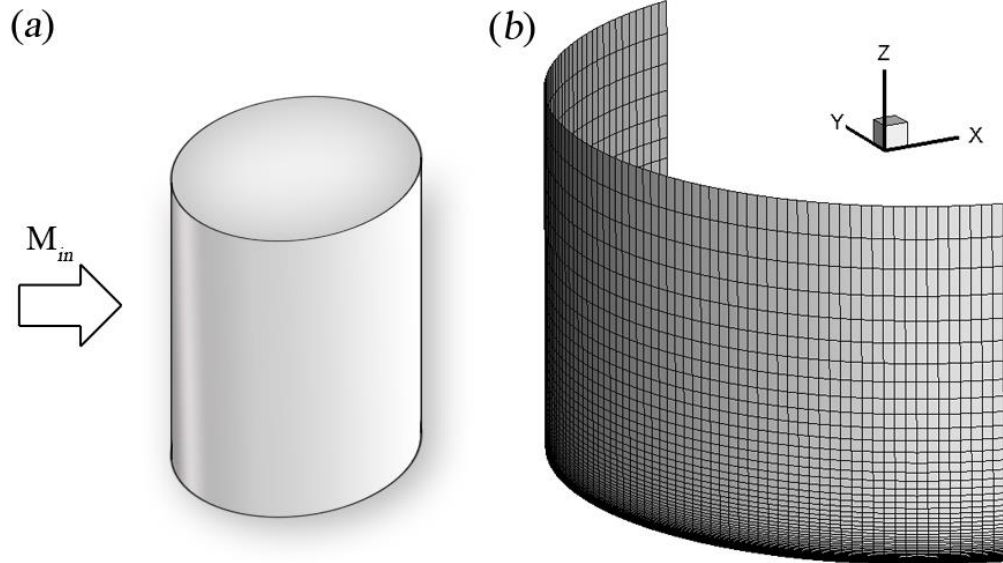


схемы первого порядка



схемы второго порядка

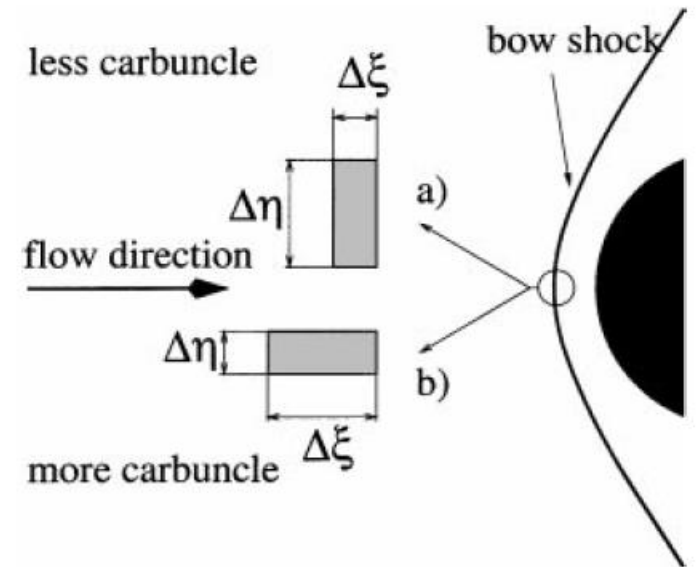
ГИПЕРЗВУКОВОЕ ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА: ТРЕХМЕРНАЯ ПОСТАНОВКА



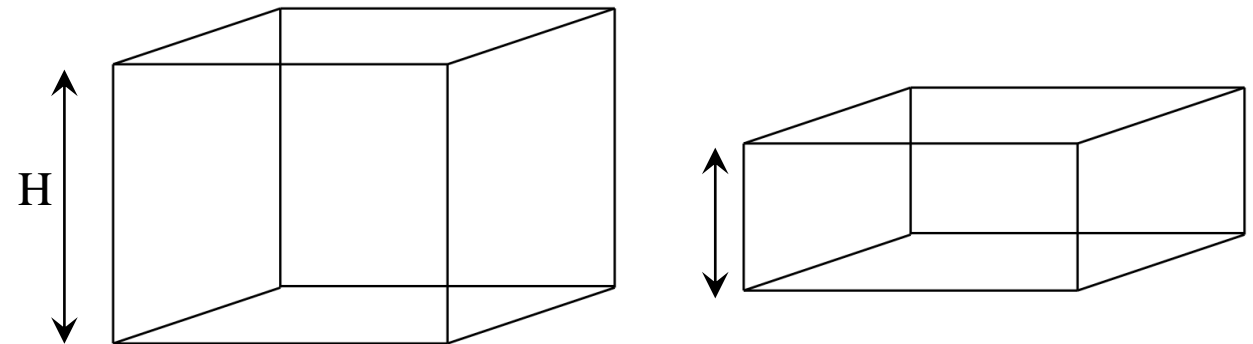
$N=50$, коэффициент сгущения 1.1

- сгущение сетки к нижней границе
- влияние соотношений сторон ячеек
- важно при рассмотрении задач вязкого течения газа

2D постановка



3D постановка

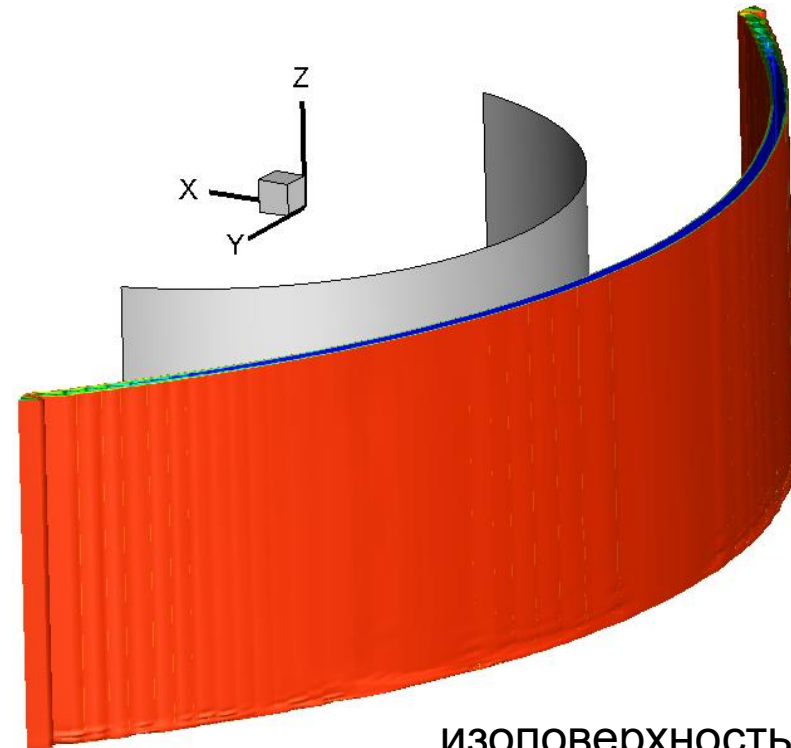
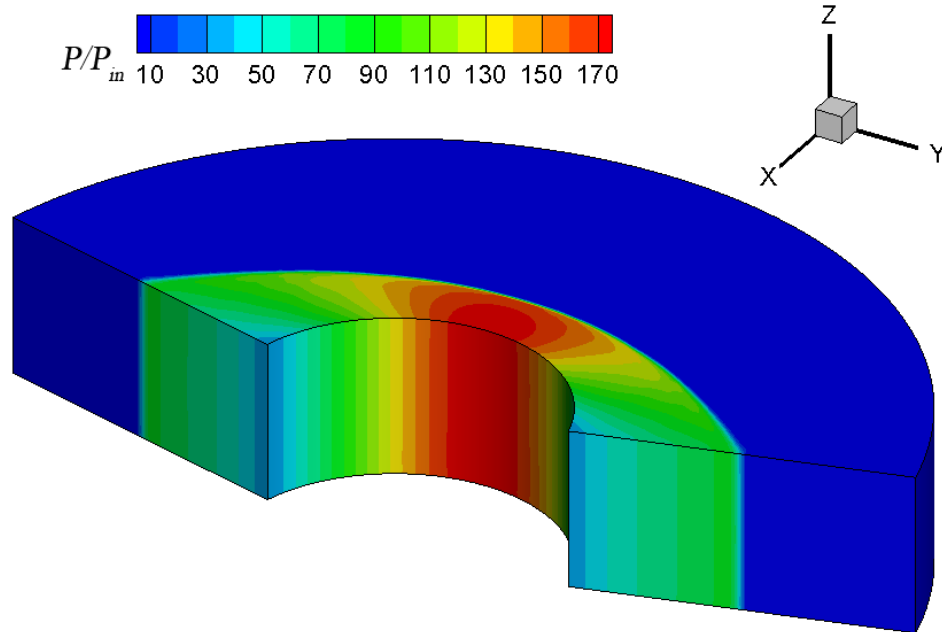


ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ПО СХЕМЕ HLL

Поле течения

➤ схема HLL

- решение однородно вдоль оси z
- решение совпадает с решением в 2D постановке

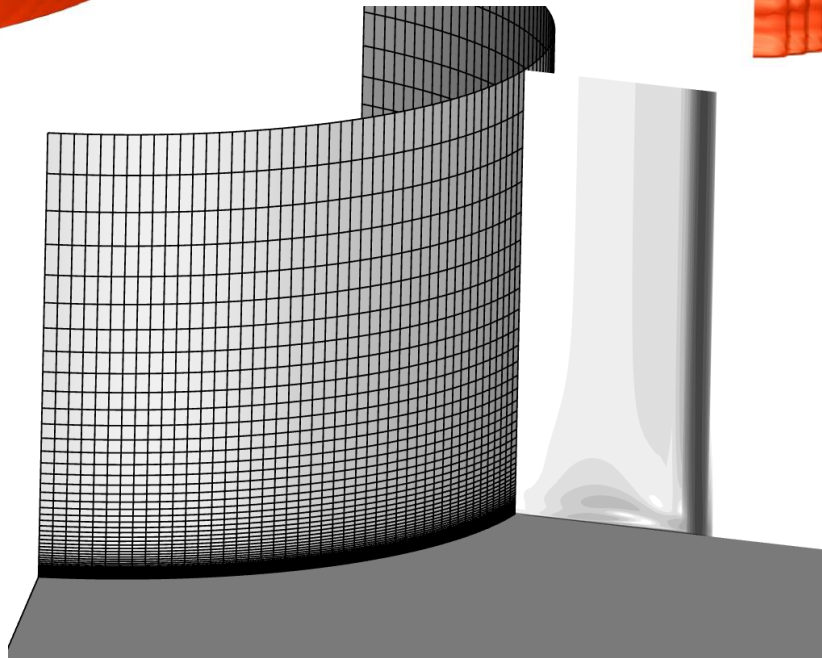
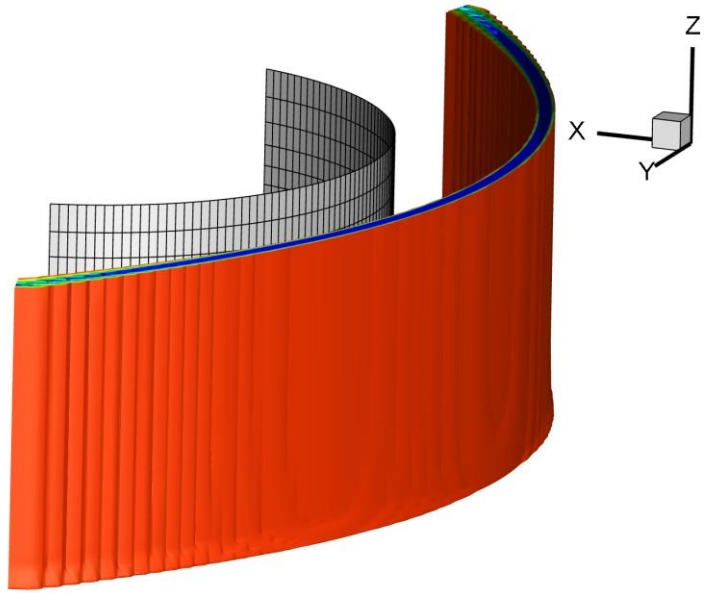


изоповерхность
дивергенции скорости

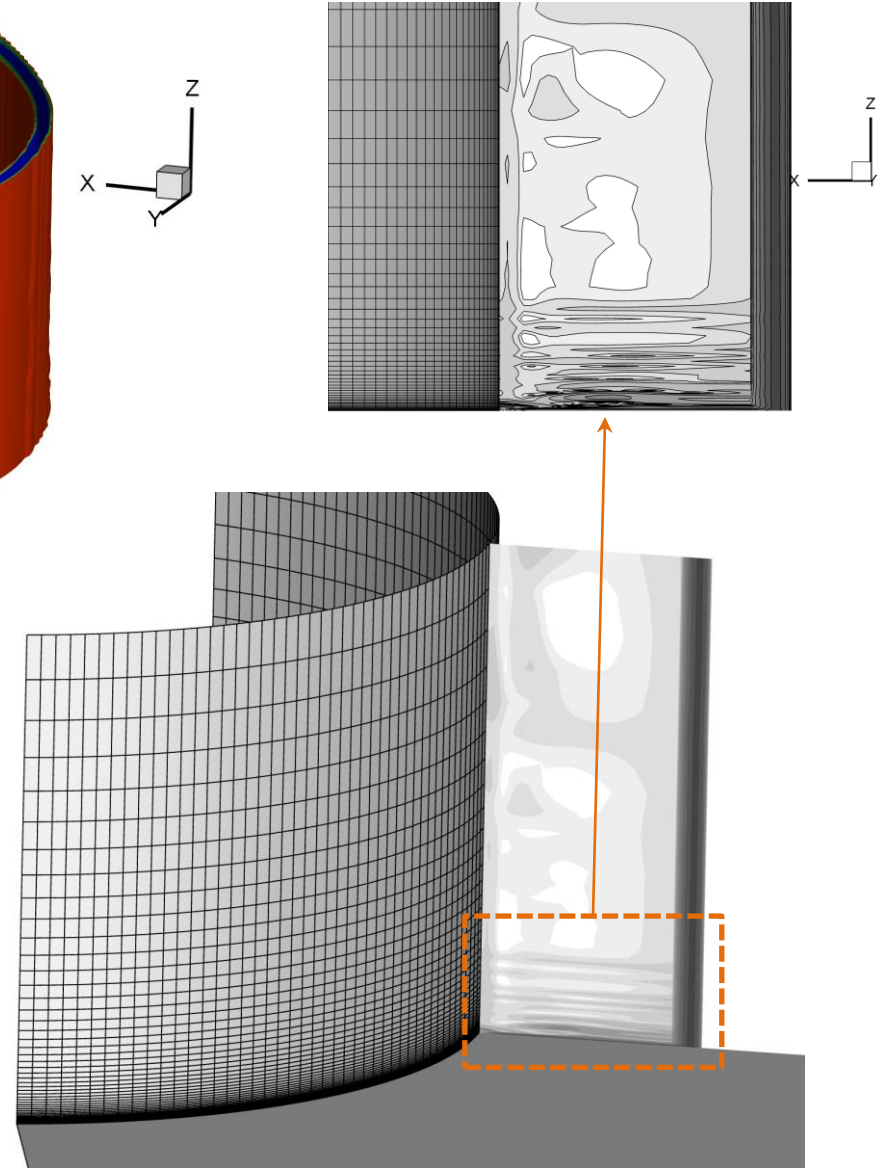
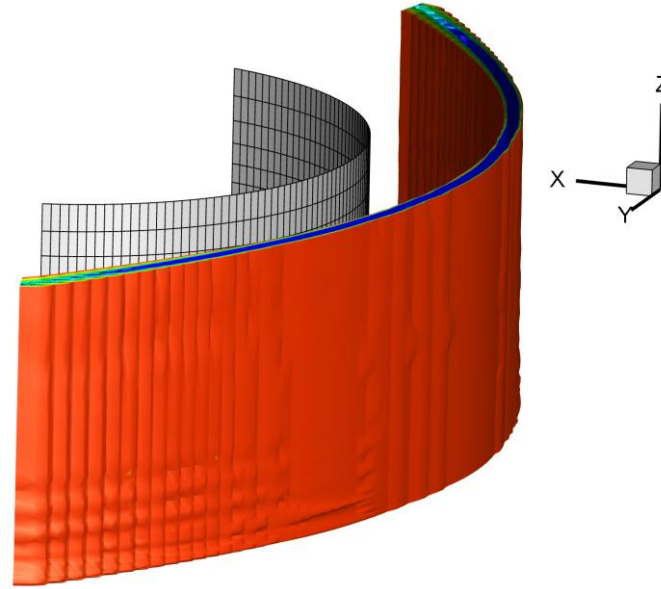
$\text{div} \mathbf{V}$

ТЕСТИРОВАНИЕ СХЕМ

AUSM, 1 order

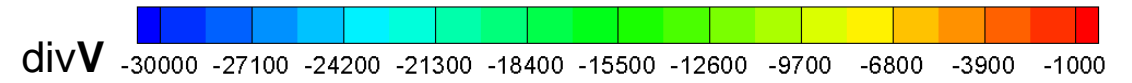


HLLC, 1 order

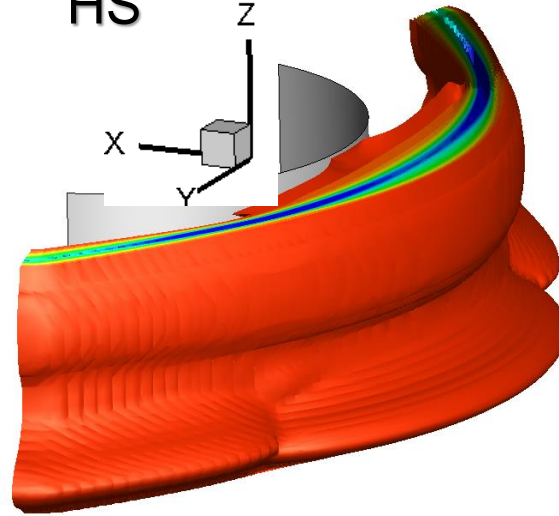


Результаты применения методов подавления: 3D постановка

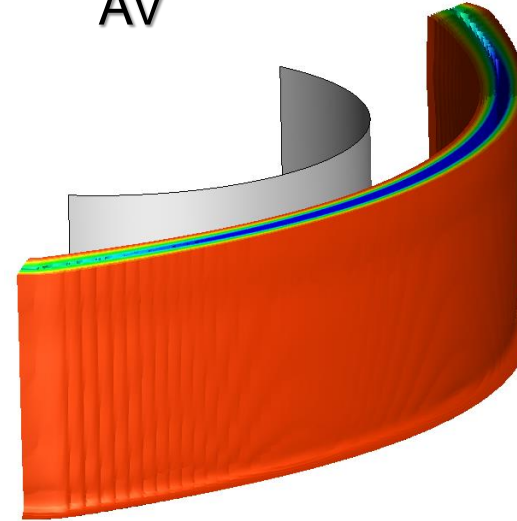
Поля дивергенции скорости



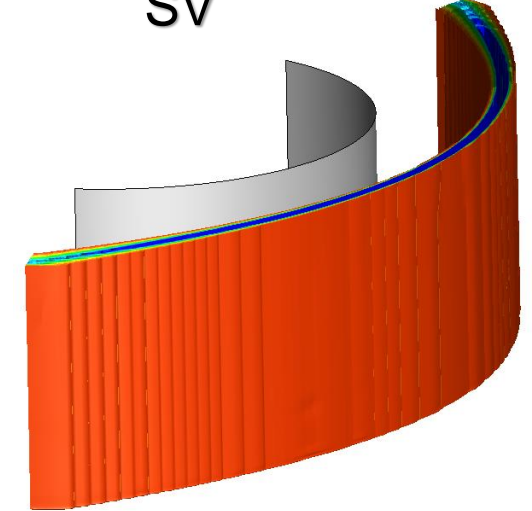
HS



AV



SV



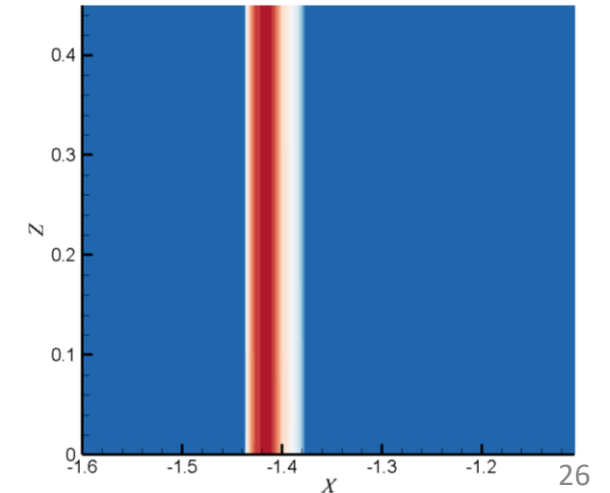
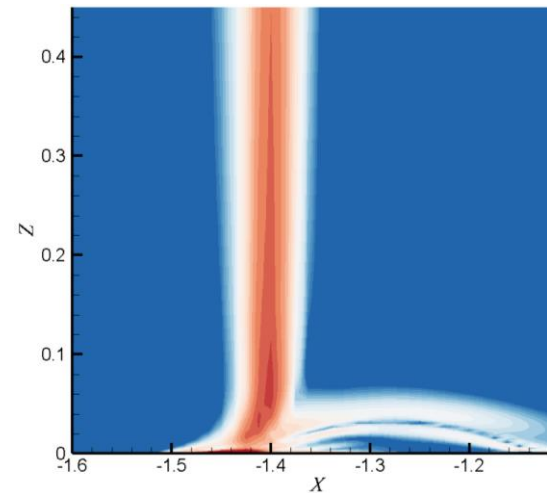
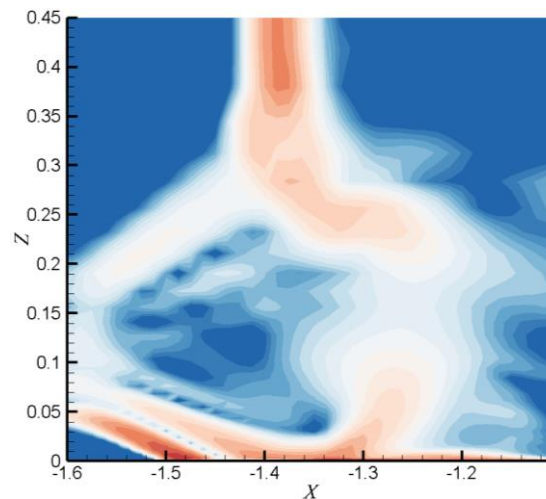
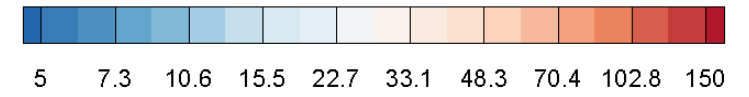
M=10

схема Poу

1 порядок

Поля модуля градиента плотности

$|\text{grad} \rho| / \rho_\infty$:



РАЗВИТИЕ КОДА SINF/FLAG-S-COMPRESSIBLE ЗА 2020 ГОД

- Добавлены схемы расщепления векторов потоков из семейства AUSM (AUSM+, AUSM+-up, AUSMD, SLAU)
- Реализован метод Чена и др. (2017) подавления ударно-волновой неустойчивости
- Предложено обобщение метода Чена и др. на трехмерный случай

❑ Продолжаются расчеты вязко-невязкого взаимодействия в трехмерных течениях с подковообразными вихревыми структурами (исследование двойственности численного решения, исследование нестационарных режимов течения)

❑ Численное моделирование применительно к задачам энергомашиностроения

