

CFD-weekend ИПМ им. М.В.Келдыша 15.11.28-29

Код «Труба»
Центр теплообмена и аэрогазодинамики
ЦНИИмаш, Королев

Разработка ведется при поддержке грантов РФФИ
проекты 10-01-00677, 13-01-00299.

Руководитель проектов д.т.н. Липницкий Ю.М.



2. Код «Труба». Краткая характеристика

Назначение: вычислительная поддержка экспериментов в АДТ и решение смежных задач по определению АДХ моделей и изделий РКТ

Архитектура: локальный РС, Linux

Средства разработки: Fortran

Параллельные вычисления: Open MP

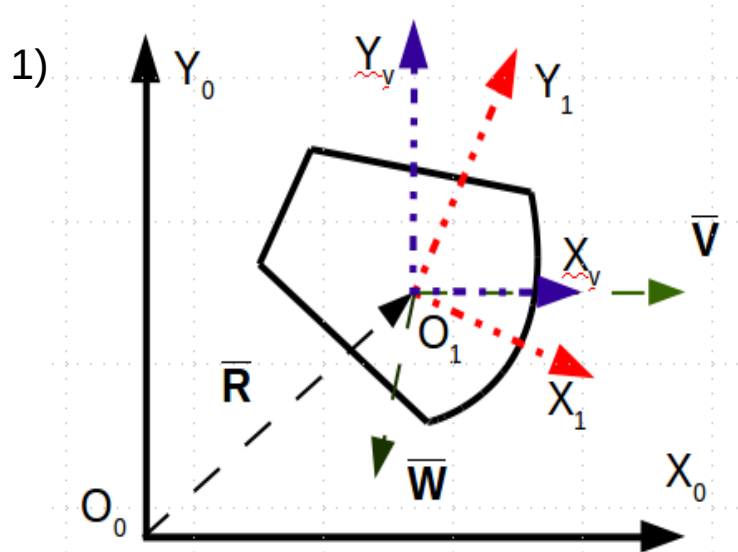
3. Код «Труба». Основные подходы к разработке

- а) Направления разработки определяются текущими задачами предприятия
- б) Заказчики расчетов — ответственные исполнители экспериментов в АДТ (до и после экспериментов, перенос результатов на натурные условия, предварительные оценки АДХ, динамики модели, выбор геометрии и параметров потока)
- в) Совмещение или тесное взаимодействие постановщика, расчетчика и разработчика
- г) Непрерывное проектирование. Настройка на несколько конкретных задач
- д) Ежегодное упорядочивание структуры основных данных и высокоуровневых алгоритмов
- е) Расширение специальных данных и низкоуровневых алгоритмов для конкретной задачи (струйные и щитковые ОУ, колебания моделей на державке, перфорированные стенки АДТ)
- ж) Интеграция с внешними библиотеками и данными для конкретной задачи
- з) Отчуждаемость специальных сборок, предназначенных для отдельных узких задач
- и) Директивы Open MP сосредоточены в одной процедуре. Структура данных разрабатывается под Open MP для исключения «блокировок»
- ж) Версии - по годам

4. Код «Труба». Составные части

- 1) Интерфейс - текстовые файлы с управляющими и исходными данными. Настройки управляющих данных под конкретные задачи
- 2) Динамический модуль
- 3) Модуль обратной задачи динамики
- 4) Сеточный модуль
- 5) Аэродинамический модуль
- 6) Графические скрипты Python, GNUplot

5. Код «Труба». Динамический модуль



2)

$$\frac{d\mathbf{R}}{dt} = \mathbf{V}$$

$$m \frac{d\mathbf{V}}{dt} = \mathbf{F} - m \mathbf{j}_e - m \mathbf{j}_c$$

$$\frac{d'\mathbf{K}}{dt} + \mathbf{Q} \times \mathbf{K} = \mathbf{M}$$

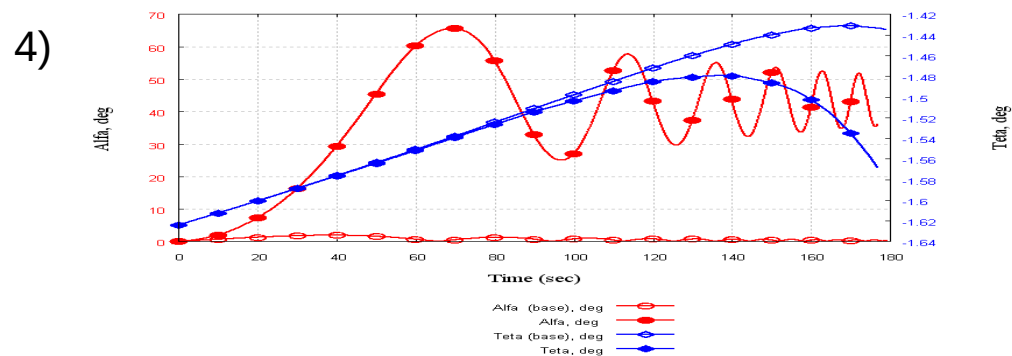
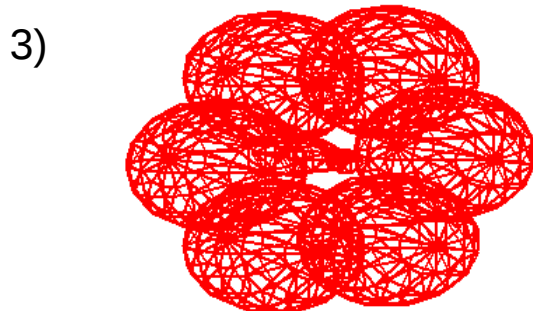
$$\frac{d\mathbf{Y}}{dt} = \frac{1}{2} \mathbf{W}_0 \circ \mathbf{Y}$$

Мгновенные АДХ могут определяться разными способами:

- по табличным функциям,
- методом Ньютона по трехмерной модели,
- методом совместного расчета аэродинамики

Расчет кинематики для определения матриц перехода между системами координат.

Вспомогательные процедуры (определения параметров атмосферы и т.д.)



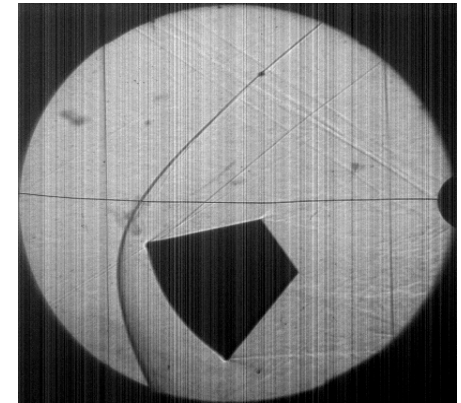
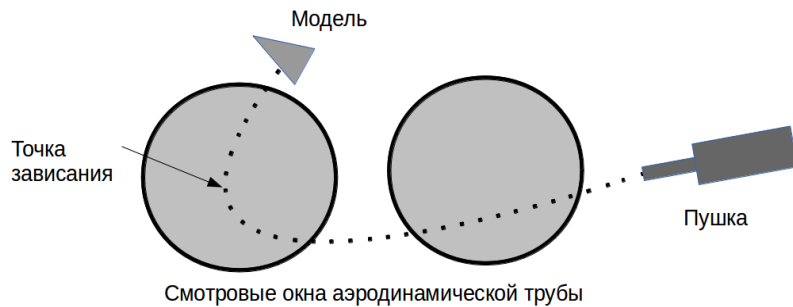
1. Лебедев А.А., Герасюта Н.Ф. Баллистика ракет. – Москва,: Машиностроение, 1970.

2. Лысенко Л.Н., Наведение и навигация баллистических ракет. - М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2007.

6. Код «Труба». Модуль обратной задачи динамики.

Определение АДХ (других параметров) по кинематическим данным

1. Эксперименты бросковых испытаний в АДТ



2. Видеокадры, измерения: $S_i(t, x, y, \psi)$, $i=1, \dots, n$

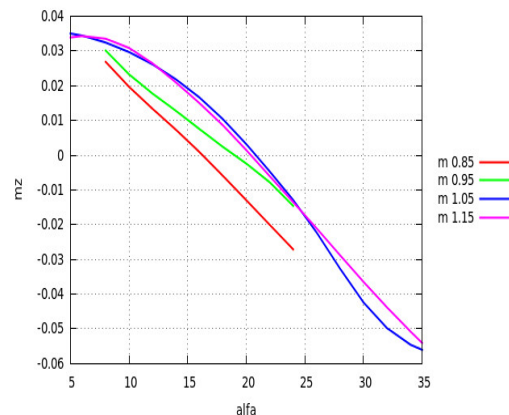
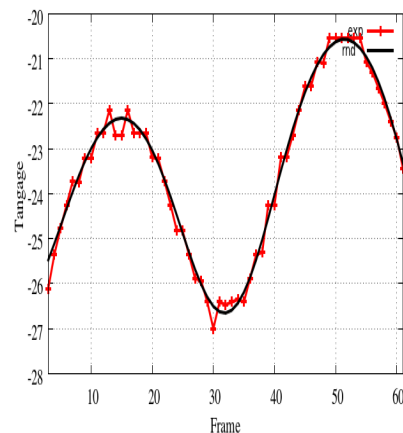
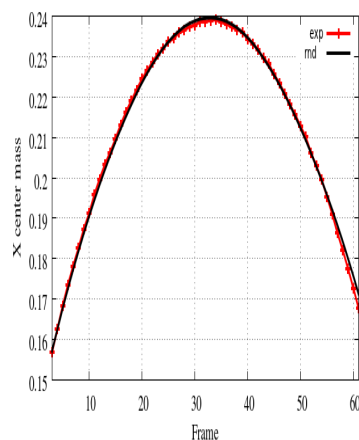
3. Модель движения(2D) : $X(t) = (R(t), V(t), \varphi(t), \omega(t))$

4. Варьируемые параметры: $\Lambda = (m, J_{zz}, X_0, f(C_x), f(C_y), f(M_z), f(M_z^{wz}))$

5. Критерий качества

$$\tilde{W} = \sum_{t=t_1}^{t=t_N} \frac{1}{\sigma_x} (x(t)_{\text{exp}} - x(t)_{\text{itr}})^2 + \frac{1}{\sigma_y} (y(t)_{\text{exp}} - y(t)_{\text{itr}})^2 + \frac{1}{\sigma_\alpha} (\alpha(t)_{\text{exp}} - \alpha(t)_{\text{itr}})^2$$

6. Итерационный случайный поиск (метод Монте-Карло)



Функции АДХ могут задаваться полиномами или таблицами.

Набор измерений, вектор вариации, параметры распределения, параметры метода Монте-Карло настраиваются (определение АДХ по летным испытаниям).
Таблицы АДХ (M , Re , α , β)

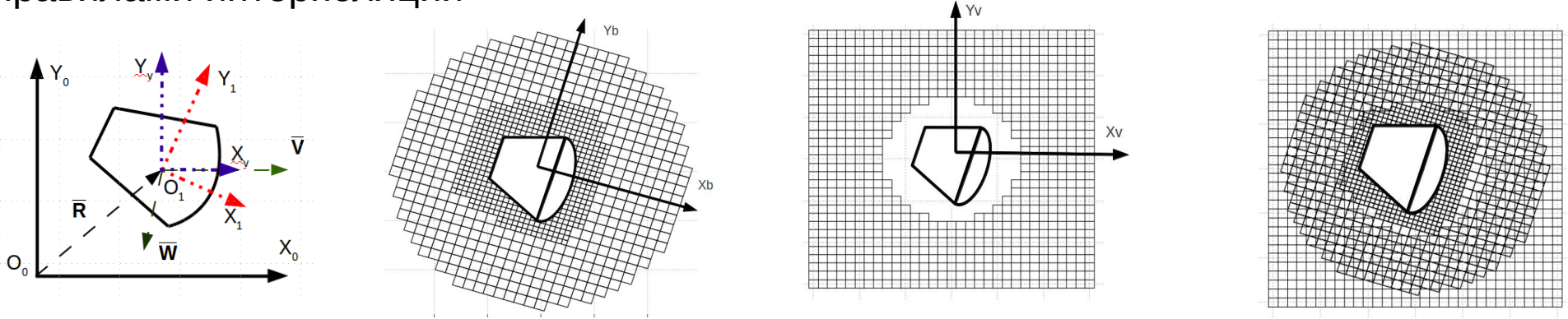
???

Единственность решения
Корреляция искомых параметров
Разная значимость параметров

7. Код «Труба». Сеточный модуль.

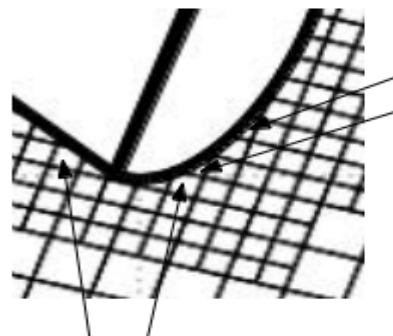
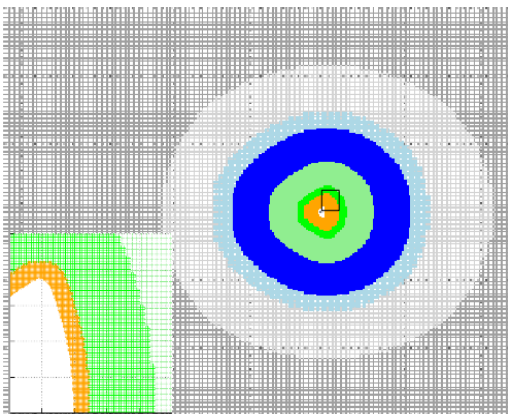
Блочные равномерные декартовы сетки

1. Сетка в целом = сумма перекрывающихся сеточных блоков, связанных правилами интерполяции



2. С каждым блоком связывается блочная система координат
3. Внутри блока сетка может содержать несколько уровней (внутренних блоков)
4. Пристеночный слой сетки - усеченные кубы (дробные ячейки)
4. Ячейки - расчетные, интерполяционные, нерасчетные.
5. Между блоками трехмерная интерполяция (линейная, (методы ОК, Шепарда))
6. Исходные данные: набор элементарных тел, фасеточные поверхности

Границы блоков — эквидистанты, выделенные области.
Ручная настройка сетки автоматическими процедурами

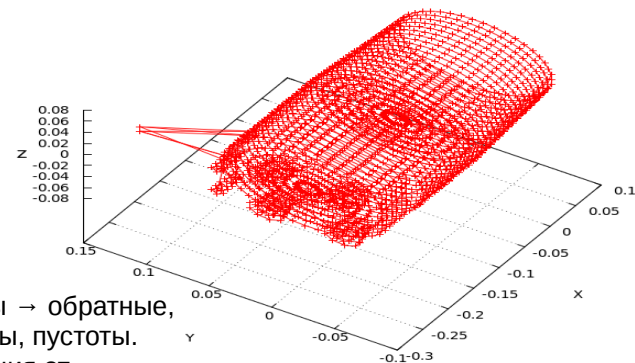


Расчётные дробные ячейки

Присоединённые дробные ячейки

???

FreeCAD → фасеты → обратные, вырожденные, шипы, пустоты.
Зависимость решения от топологии сетки



8. Код «Труба». Аэродинамический модуль

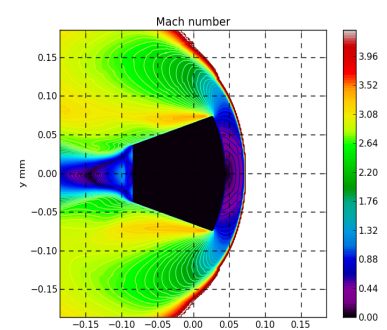
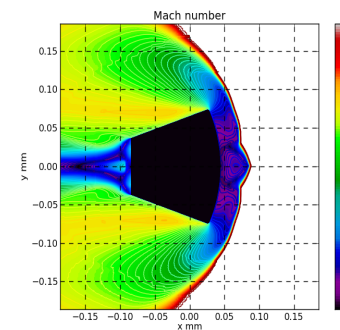
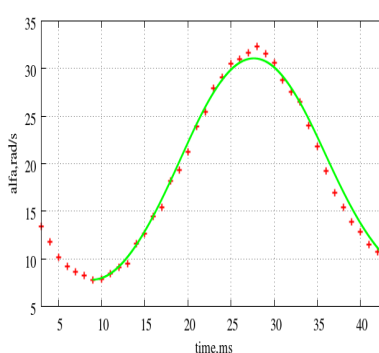
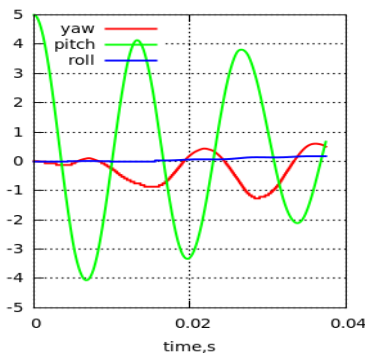
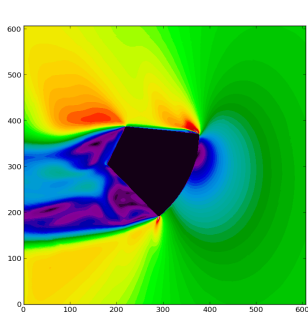
1. Однокомпонентный газ.
2. Уравнения Эйлера, Навье-Стокса в неинерциальных системах координат⁽¹⁾
3. Сквозной счет методом контрольного объема⁽¹⁾
4. Невязкие потоки : Метод С.К.Годунова⁽²⁾, HLL, HLLC⁽³⁾, JST⁽⁴⁾
Методы второго порядка WAF-TVD⁽³⁾, WENO3⁽⁵⁾.
Карбункул: Hybrid methods HLL-WAF-HLLC⁽⁶⁾
5. Вязкие потоки: центральные разности 2-го порядка.
6. Турбулентность: LES⁽⁷⁾, стандартные пристеночные функции⁽⁷⁾
7. Нестационарность: методы Эйлера, Рунге Кутты (2-го и 4-го п.), сеточный шаг⁽⁸⁾
8. Граничные условия для блоков: фиктивные ячейки
9. Совместный расчет динамики и аэродинамики

???

M=0, P=0 в донной области на сверхзвуке.

Анизотропия дискретных операторов по направлениям. Чем можно пренебречь при расчетах.

Диссипативные свойства МКО и методов

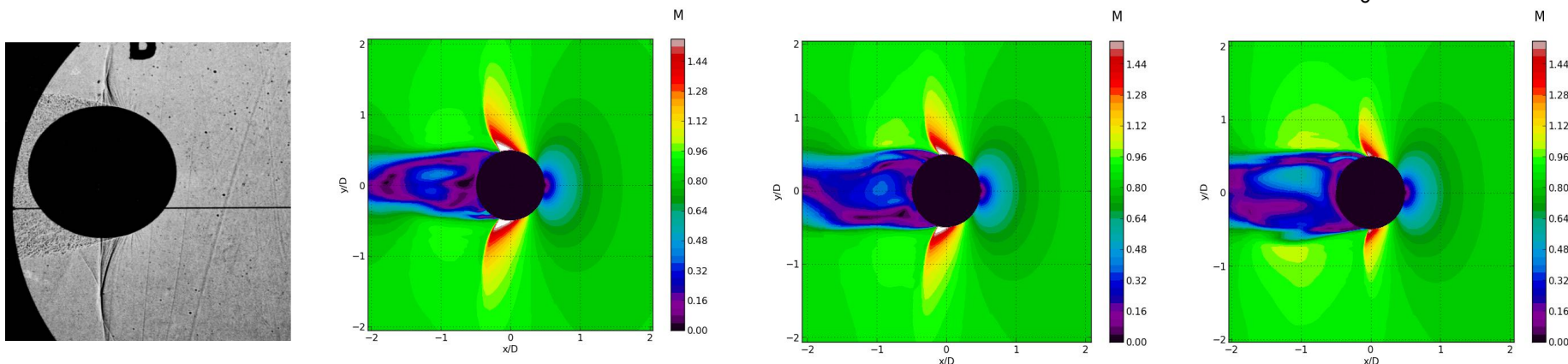


1. Hirsch C. Numerical Computation of Internal and External Flows. - Oxford, 2007.
2. Годунов С.К. Разностный метод численного расчёта разрывных решений уравнений гидродинамики // Матем. сб. 1959.Т. 47.
3. Toro E.F. Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. — Springer-Verlag. Second Edition, 1999
4. Jameson, A., Schmidt, W., and Turkel, E. . Numerical solutions of the Euler equations by finite volume methods using Runge-Kutta time-stepping schemes, AIAA Paper (1981) 81-1259
5. X.D.Liu, S.Osher, and T.Chan, "Weighted essentially non-oscillatory schemes," J.Comput.Phys., vol. 126, pp. 200–212, 1994.
6. K. Huang, H. Wu, H. Yu, D. Yan, Cures for numerical shock instability in HLLC solver, Int. J. Numer. Methods Fluids 65 (2011)
7. Волков К.Н, Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. - М. Физматлит. 2008.
8. A. Harten, Multiresolution algorithms for the numerical solution of hyperbolic conservation laws, Comm. Pure Appl. Math. 48 (1995) 1305–1342

9. Код «Труба». Моделирование бросковых испытаний аппарата Met-Net(1)

M_0 0.857
 Re_0 0.91e6

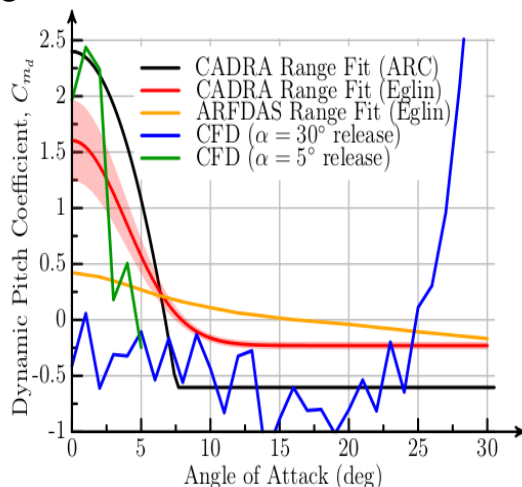
1)



$M=1.25$, $Re= 1e6$

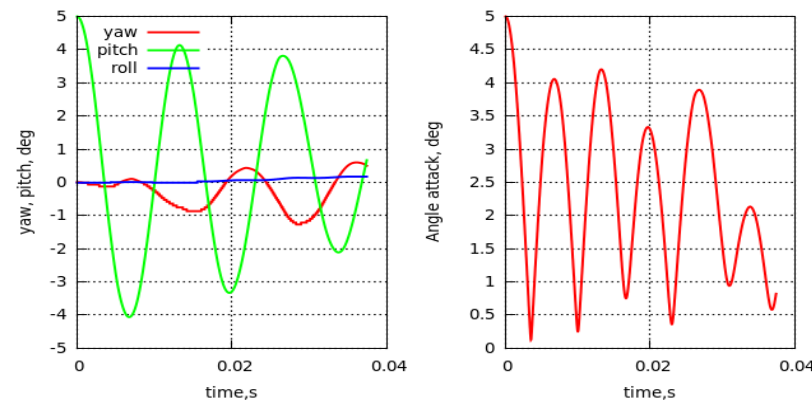
3)

Orion



WAF-HLLC, LES $C_{smg} = 0.1$

4)



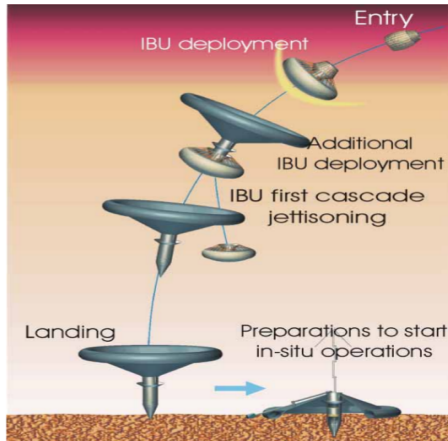
???

Зависимость АДХ от числа Струхала
Движение в реальной атмосфере

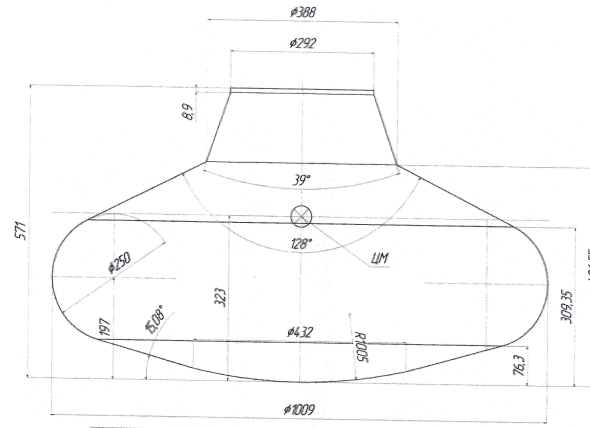
1. «An Album of Fluid Motion» Assembled by Milton Van Dake.
2. Bailey B., Hiatt J., Free-Flight Measurements of Sphere Drag at Subsonic, Transonic , Supersonic and Hypersonic Speeds Flow Condition, Tennessee, 1971
4. Murman, S.M. and Aosmis, M.J., “Dynamic Analysis of Atmospheric-Entry Probes and Capsules,” AIAA Paper 2007-0074, January 2007.
5. Murman, S.M., «Dynamic Viscous Simulations of Atmospheric-Entry Capsules», AIAA Paper 2008-6911, August 2008.
6. Kazemba, C.D., Braun, D.R., Clark, I.G., Schoenenberger, M. «Survey of Blunt Body Dynamic Stability in Supersonic Flow».

9. Код «Труба». Моделирование бросковых испытаний аппарата Met-Net(2)

1)

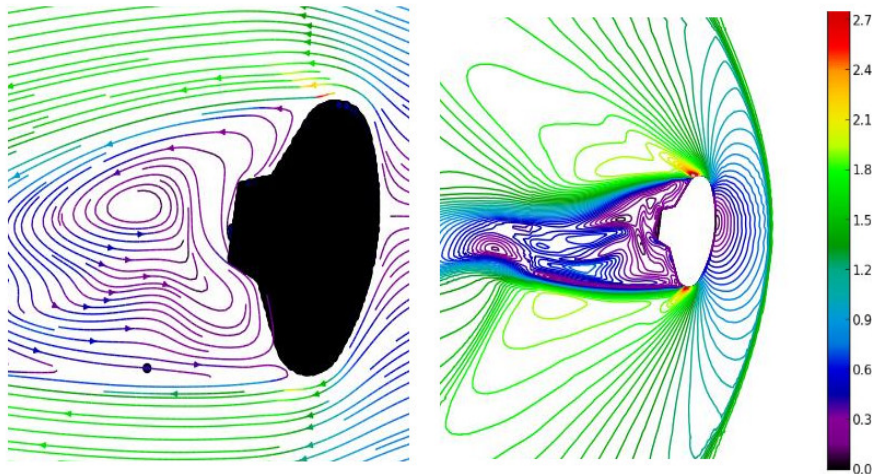


2)

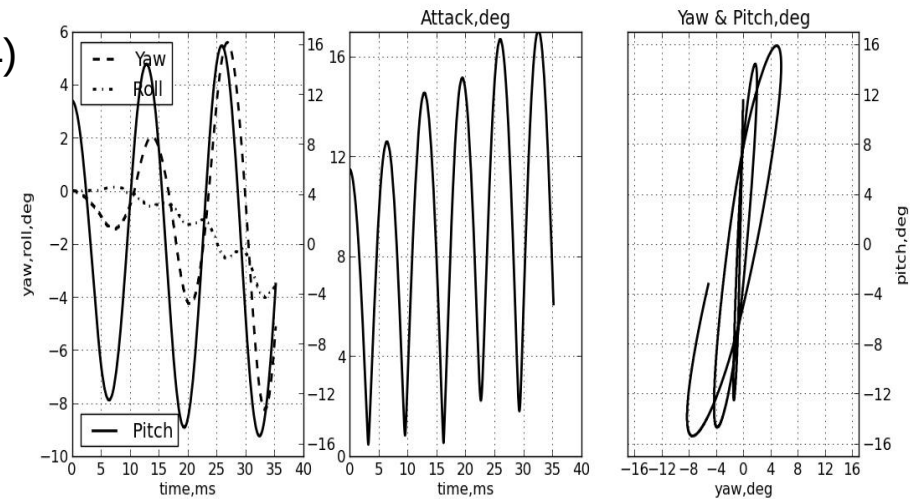


M_0 1.5
 Re_0 2.5e5

3)



4)



1. A.-M Harri et al., Sputnik 50-year Jubilee, Moscow, Oct-2007.

10. Код «Труба». Моделирование эксперимента с поперечной звуковой струей ⁽¹⁻³⁾

1)

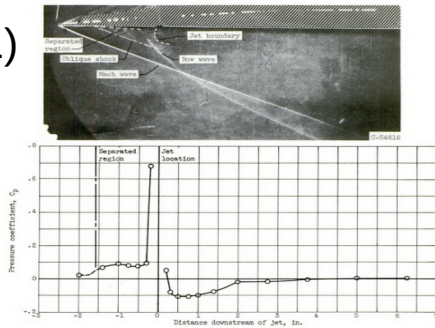
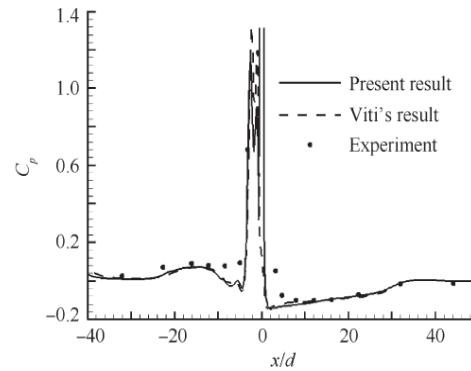
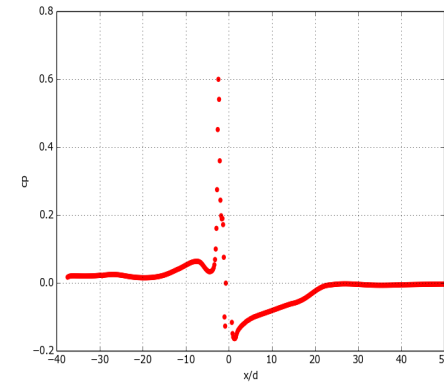


Figure 5. - Schlieren photograph of flat-plate configuration at Mach number of 2.92 and Reynolds number of 0.64×10^6 per foot.

2)

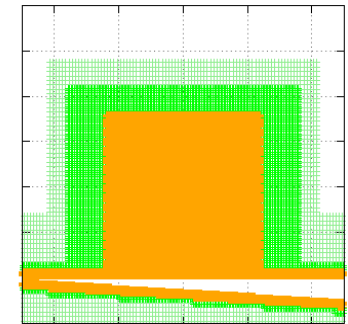
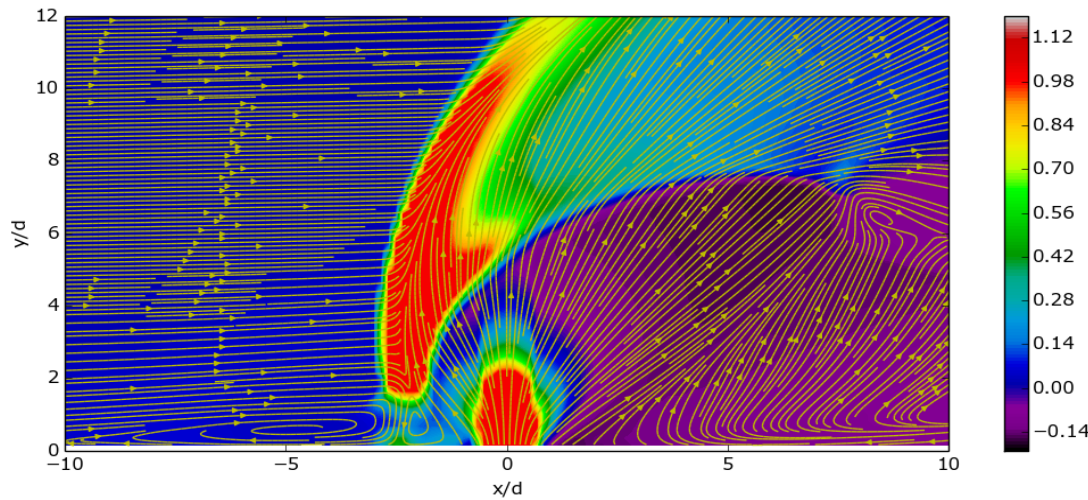


3)



Набегающий поток:
M 2.92
P 1.05 кПа
T 107.6 K

Струя:
M 1
P 357 кПа
T 280 K



1. Cubbison R.W., Anderson B.H., Ward J.J. Surface pressure distribution with a sonic jet normal to adjacent flat surfaces at Mach 2.92 to 6.4. NASA; 1961 Report No.: TND-580

2. Zhen H., Gao Z., Lee C. Numerical investigation on jet interaction with a compression ramp, Chinese Journal of Aeronautics, 2013,26(4): 898–908

3. Viti V. Numerical studies of the jet interaction flowfield with a main jet and an array of smaller jets [dissertation]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University; 2002.

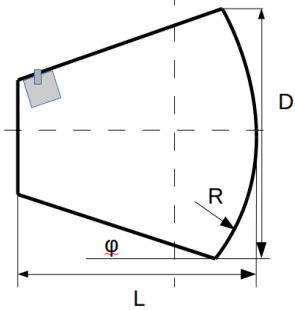
11. Код «Труба». Моделирование бросковых испытаний моделей с дымогенератором

???

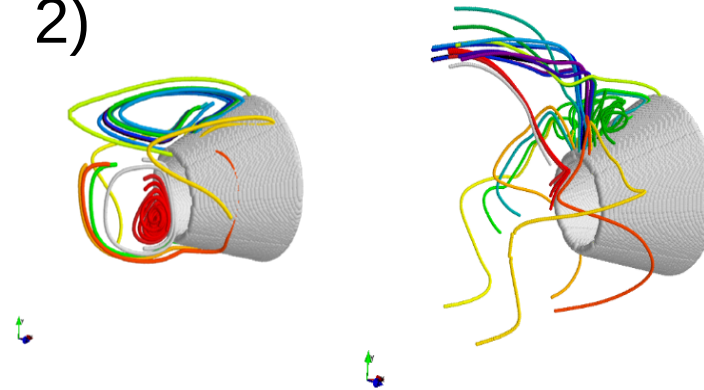
«Легкие» модели

Резкое изменение кф. усиления струи в подветренной/наветренной области

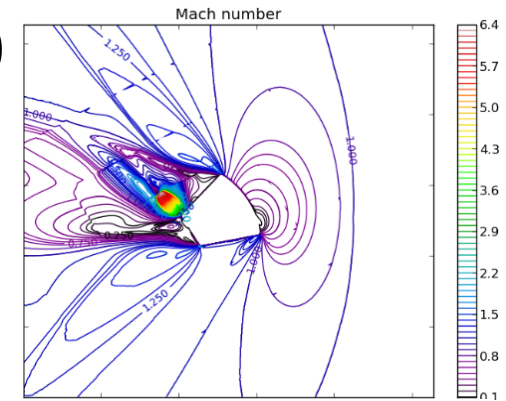
1)



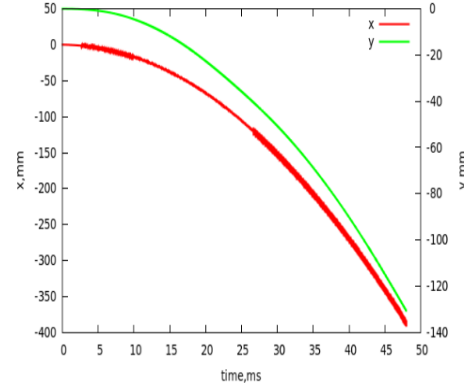
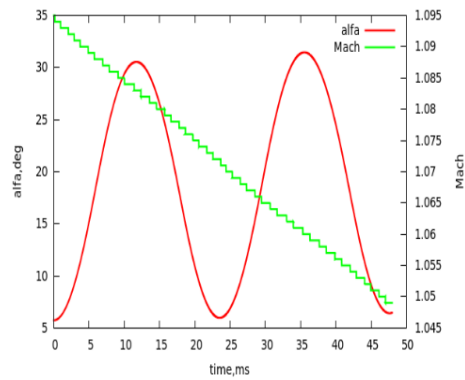
2)



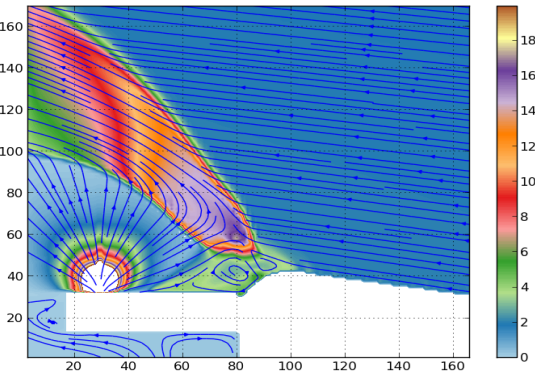
3)



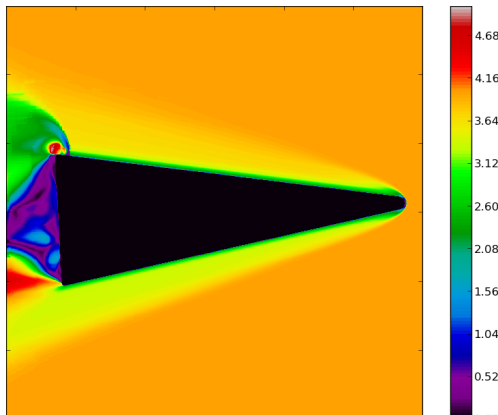
4)



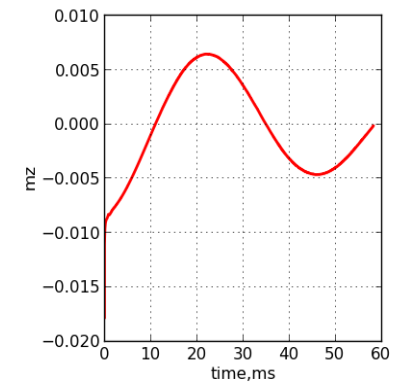
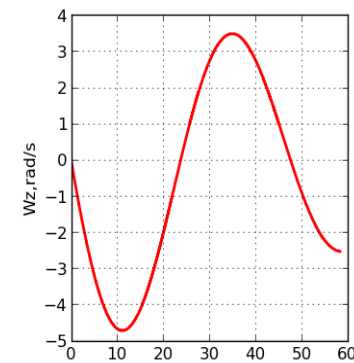
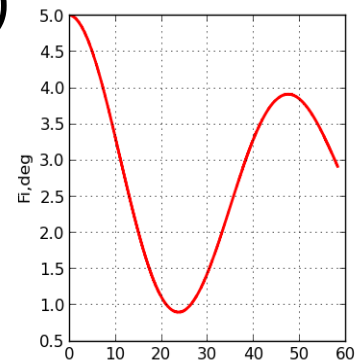
5)



6)

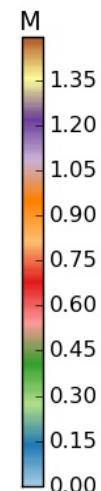
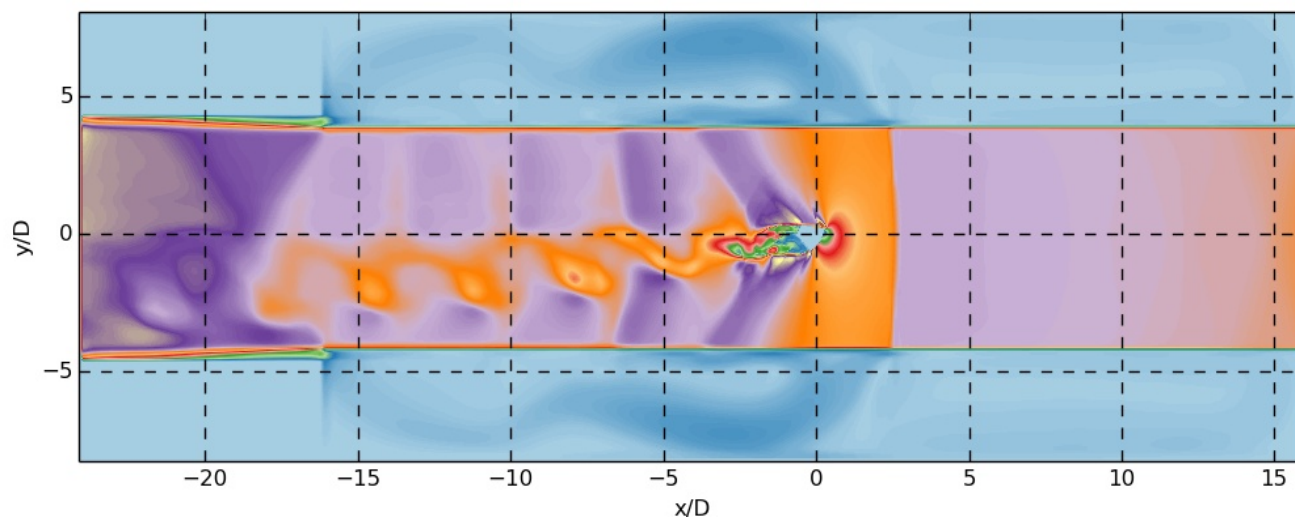


7)



12. Код «Труба». Моделирование эксперимента свободных колебаний (1)

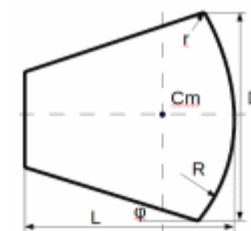
1)



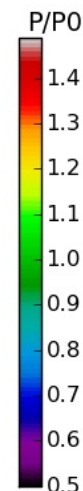
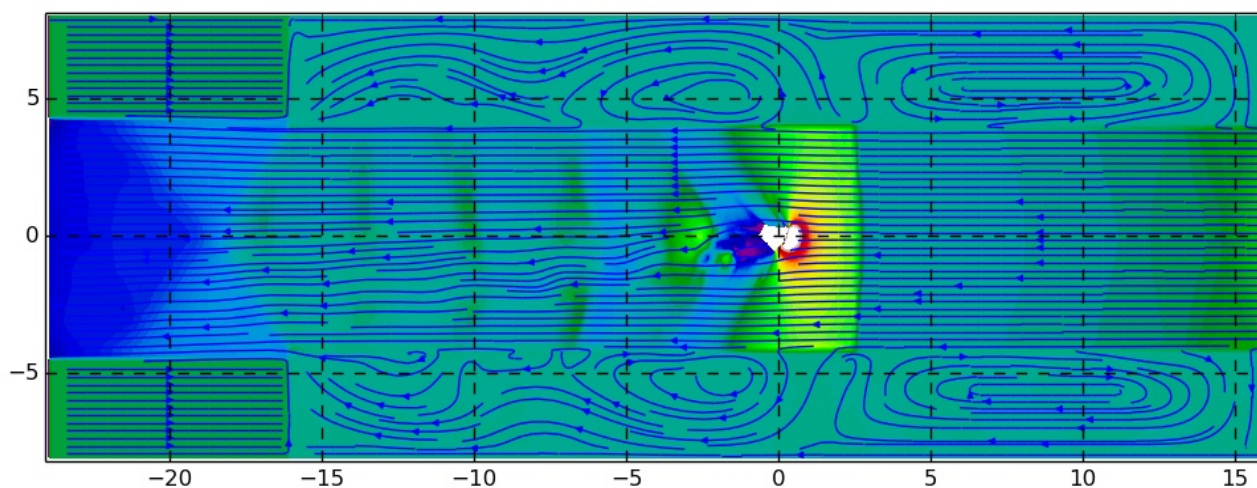
АДТ р.ч. 0.6*0.6*2.7
Кф. загрузки 0.03
Кф. перфорации 0.2
Балансировка 21°
Камера Эйфеля
двухобъемная

M 1.1
WENO3-HLLC

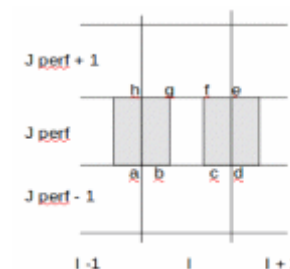
3)



2)



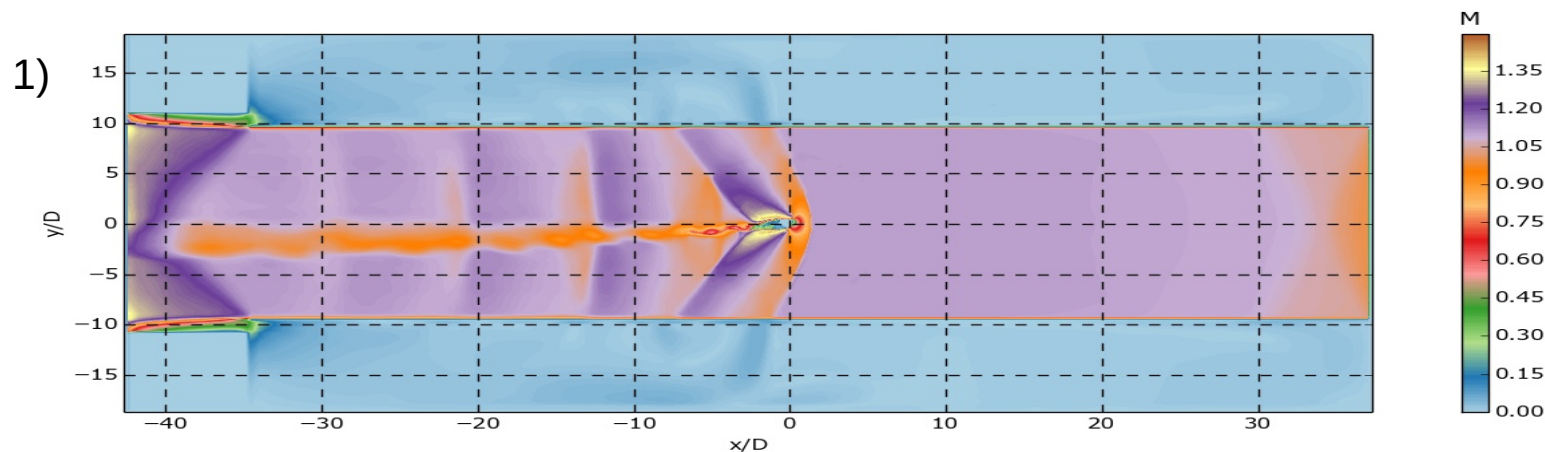
4)



???
Упрощенная геометрия камеры
Эйфеля без «сабли» и узла
управления диффузором.
Державка не рассчитывалась.

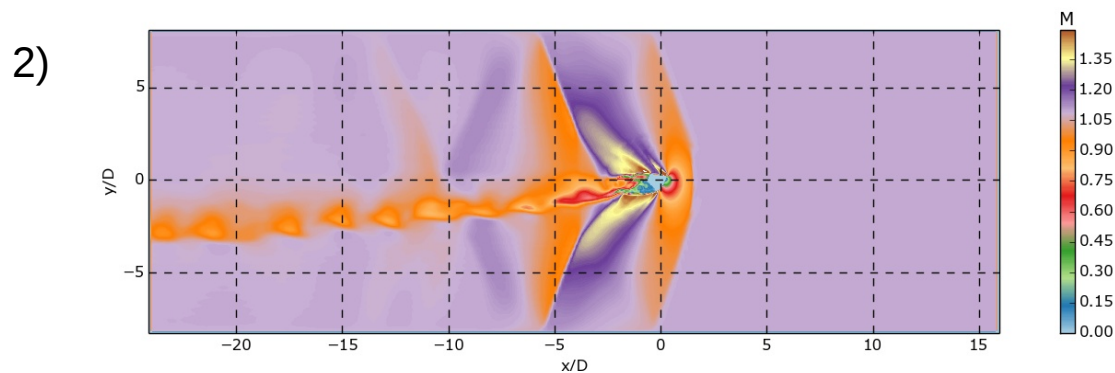
1. Гродзовский Г.Л., Никольский Л.А., Таганов Г.И., Свищёв Г.П. Сверхзвуковое течение газа в перфорированных границах. - М.: Машиностроение, 1967.
2. Neyland V., Bosniakov S., Glazkov S., Ivanov A., Matyah S., Mikhailov S., Vlasenko V. Conception of electronic wind tunnel and first results of its implementation // Progress in Aerospace Sciences. 2001. V. 37, Issue 2, p. 121 — 145.
3. Козловский В.А. Экспериментальное определение в аэродинамических трубах методом свободных колебаний характеристик демпфирования спускаемых в атмосфере планет аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2005. Вып. №1(38). С. 81-94.

13. Код «Труба». Моделирование эксперимента свободных колебаний (2)



АДТ р.ч. 1.4*1.4*6.3
Кф. загрузки 0.002
Кф. перфорации 0.2
Балансировка 21⁰

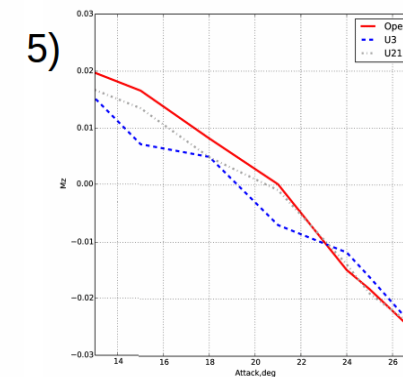
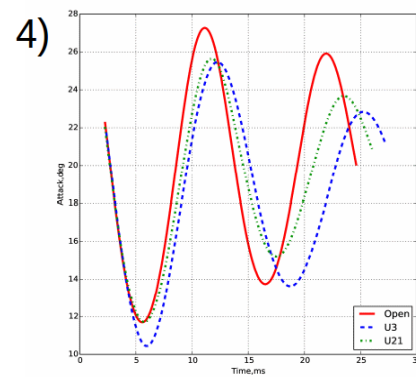
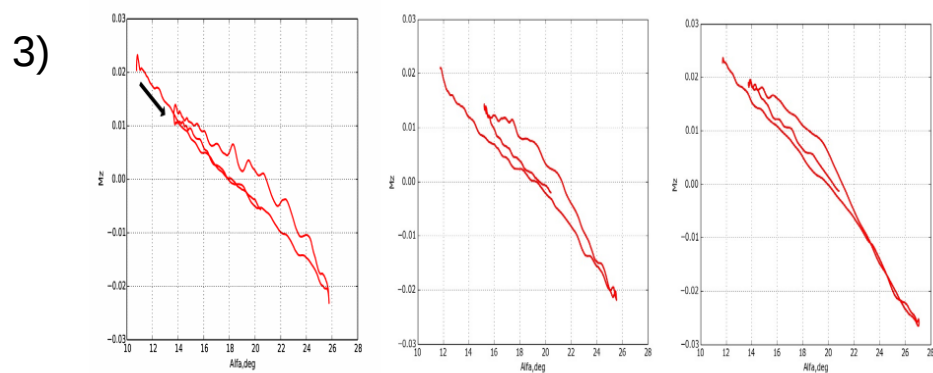
M 1.1
WENO3-HLLC



$$M_z^{WZ}(0.03) = -0.22$$

$$M_z^{WZ}(0.002) = -0.24$$

$$M_z^{WZ}(\text{free}) = -0.12$$



Заключение

- а) Когда библиотека процедур становится CFD кодом (пакетом)?
- б) Оценка погрешности расчетов и оценка погрешности экспериментов.
Какая погрешность удовлетворяет заказчика?
- в) Расчеты до эксперимента и расчеты после эксперимента.

Калибровка CFD методов

Планы

- а) Направления развития пакета будет следовать за программой экспериментов ЦНИИмаш

Спасибо за внимание