

VIII Российская конференция
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
В АЭРОАКУСТИКЕ И АЭРОДИНАМИКЕ



20—25 сентября 2021 г., ГЕЛЕНДЖИК



ПРЕДСКАЗАНИЕ ШИРОКОПОЛОСНОГО ШУМА ВИНТОВ ПРИ ПОМОЩИ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Бойчук Игорь Петрович, Гринек Анна Владимировна,

*Государственный морской университет им. адмирала Ф.Ф. Ушакова,
Новороссийск*





Объект моделирования



Метод расчета течений в областях с подвижными границами

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_j)}{\partial x_j} = \delta_1,$$

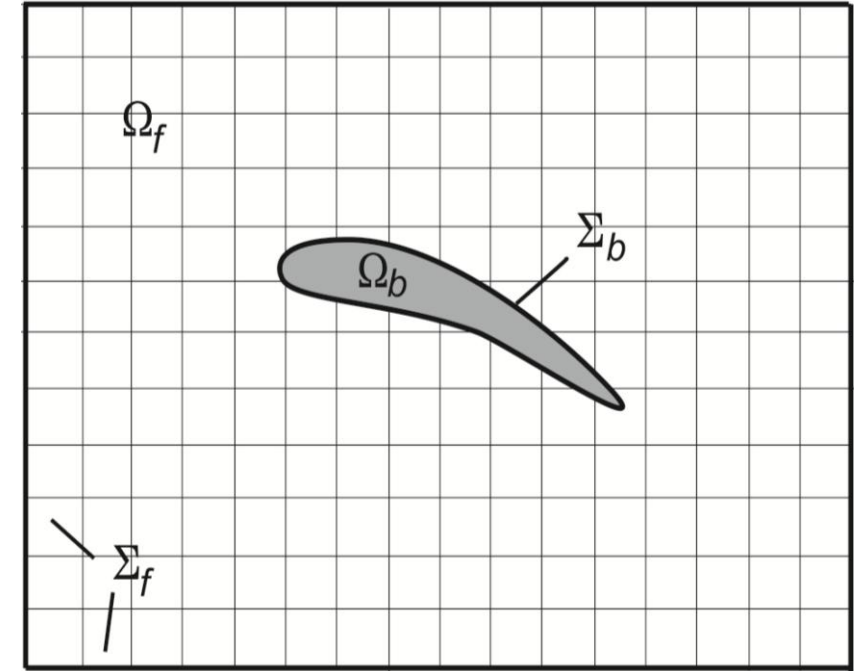
$$\frac{\partial(\rho w_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_j w_k)}{\partial x_k} + \frac{\partial p}{\partial x_j} = \delta_{2j}, \quad j = \overline{1,3}, \text{ в } \Omega_f,$$

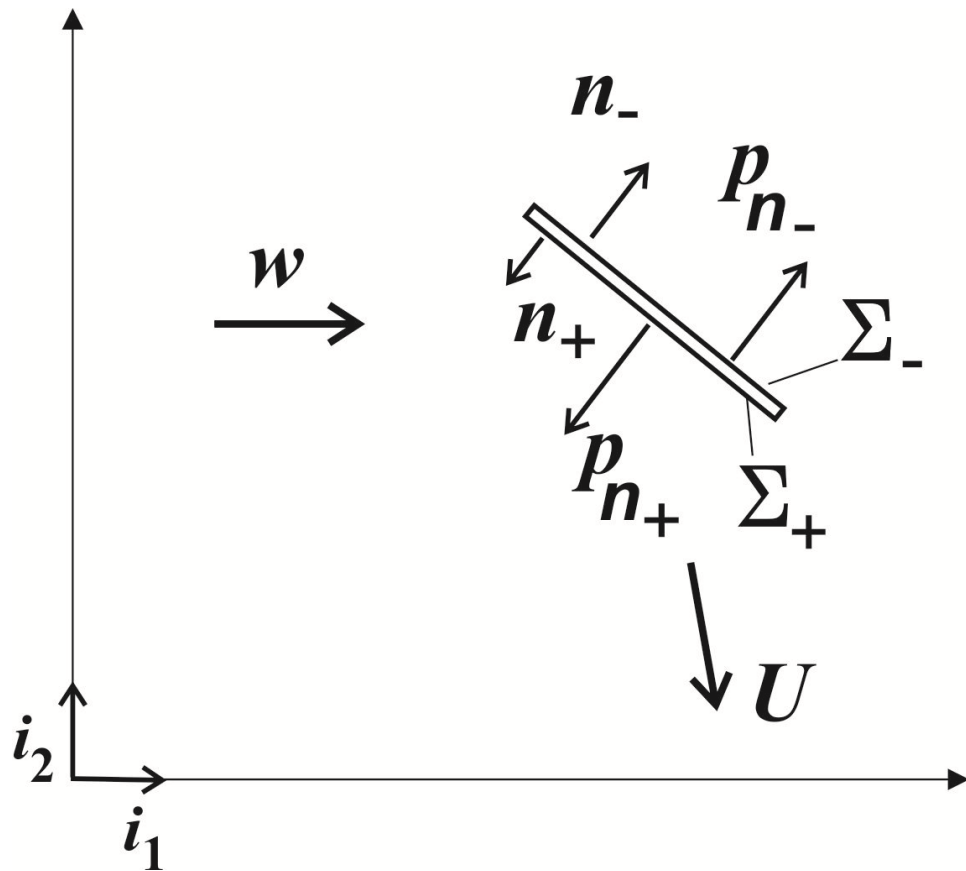
$$\alpha w_j + \beta \frac{\partial w_j}{\partial n} = \gamma \text{ на } \Sigma_f,$$

$$w_i(\vec{x}, t_0) = w_{0i},$$

$$w_i(\vec{x}, t)|_{\Sigma_b} = U_i(t),$$

$$\frac{\partial(\rho w_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_j w_k)}{\partial x_k} + \frac{\partial p}{\partial x_j} = \delta_{2j} + f_j(x_1, x_2, x_3, t).$$





Модель силового взаимодействия контура с потоком сжимаемой среды

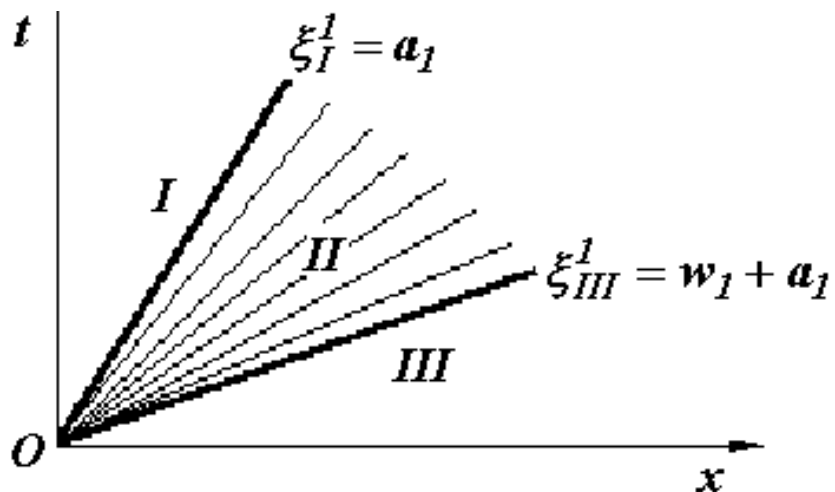
Случай 1: Течение за профилем

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \left\{ \frac{r+s}{2} - a \right\} \frac{\partial s}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} + \left\{ \frac{r+s}{2} + a \right\} \frac{\partial r}{\partial x} = 0, \quad a = \psi(r-s)$$

$$\{w(x,0)=w_1, p(x,0)=p_1, \rho(x,0)=\rho_1\} \equiv \vec{\Pi}_1(x,0), x \in (0, \infty);$$

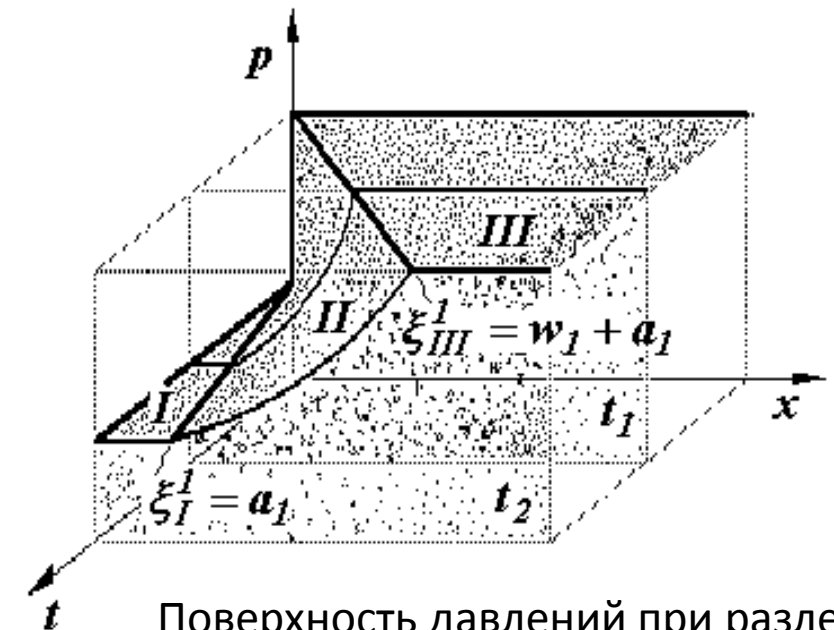
$$w(0,t) = 0.$$



Структура течения при разлете газа от стенки

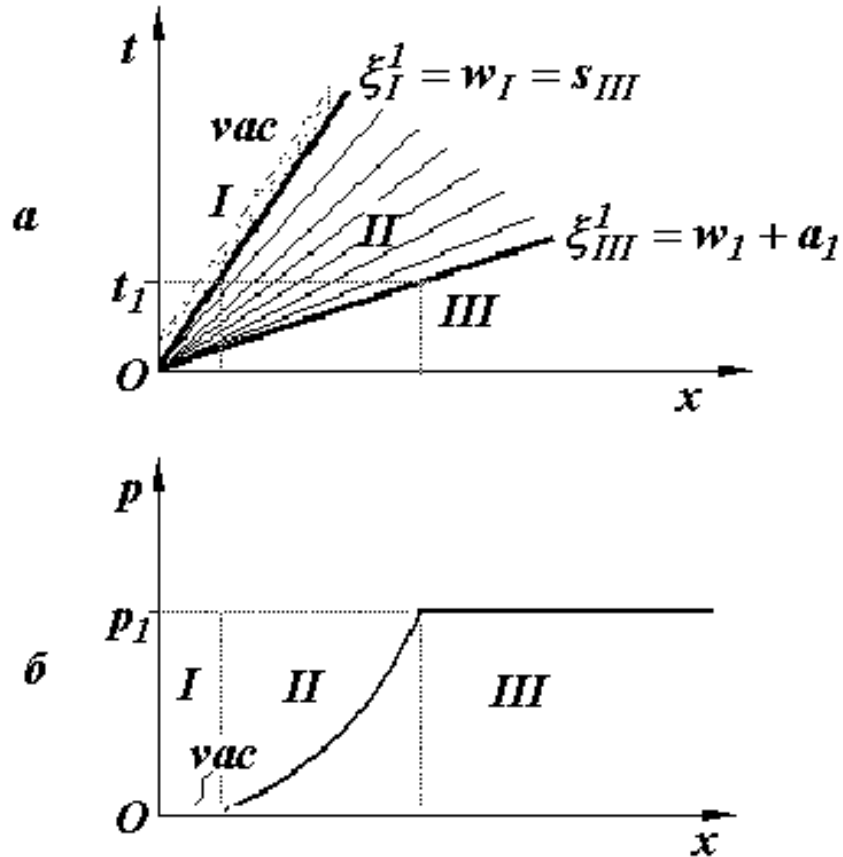
$$p_1 = p_1 \left[1 - \frac{\gamma-1}{2} \frac{w_1}{a_1} \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}}$$

$$-\frac{2}{\gamma-1} a_I = w_{III} - \frac{2}{\gamma-1} a_{III} + a_I = a_i - \frac{\gamma-1}{\gamma} w_1$$



Поверхность давлений при разлете от стенки

Случай 1: Течение за профилем

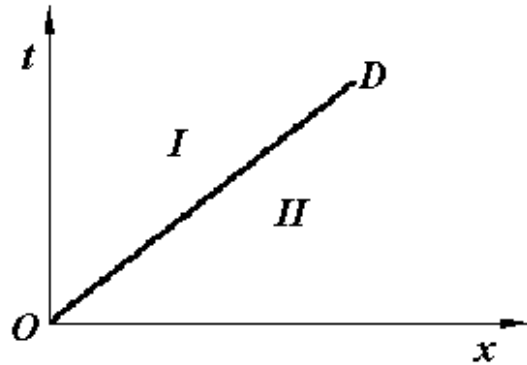


На границе каверны:

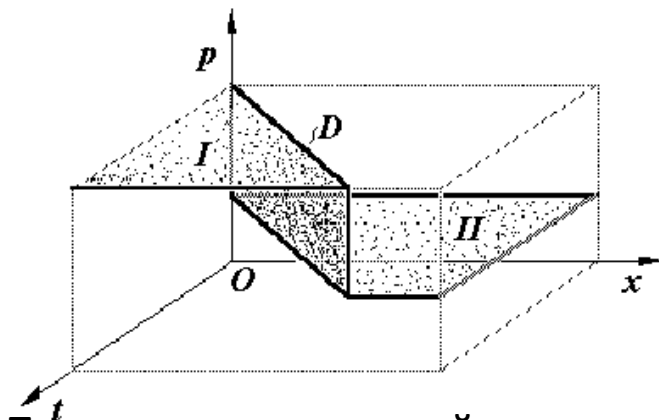
$$p_I = 0 = p_1 \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} \frac{w_I - w_1}{a_1} \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}} \rightarrow w_I = a_1 - \frac{\gamma - 1}{2} w_1 = s \neq 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow a_I = 0 \Rightarrow \xi_{III}^I = w_I + a_I = w_I$$

Случай 2: Течение перед профилем



Фазовая диаграмма процесса при торможении столба газа



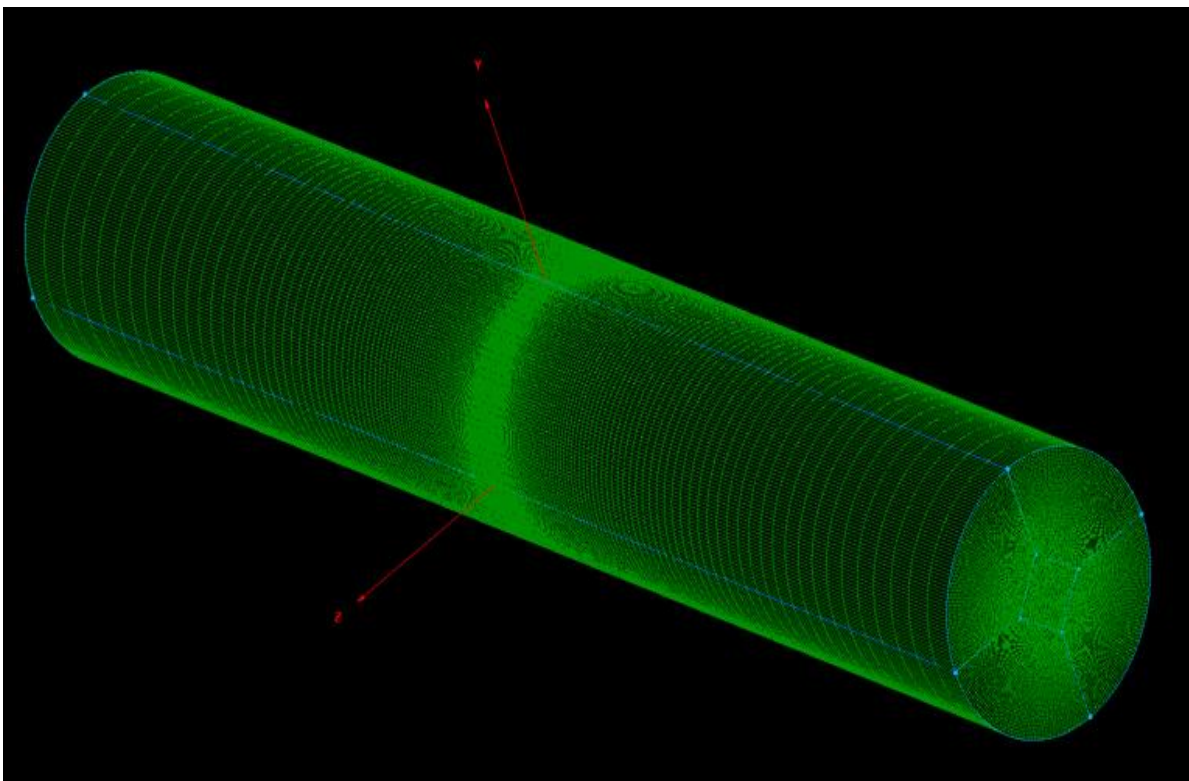
Поверхность давлений при торможении потока газа стенкой

$$p = p_1 [(1+h)M_1^2 - h],$$

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \frac{V_1}{V} = \frac{p + hp_1}{p_1 + hp} = \frac{M_1^2}{1 - h + hM_1^2},$$

$$\frac{a^2}{a_1^2} = \frac{p\rho}{p_1\rho} = \frac{[(1+h)M_1^2 - h][(1-h) + hM_1^2]}{M_1^2},$$

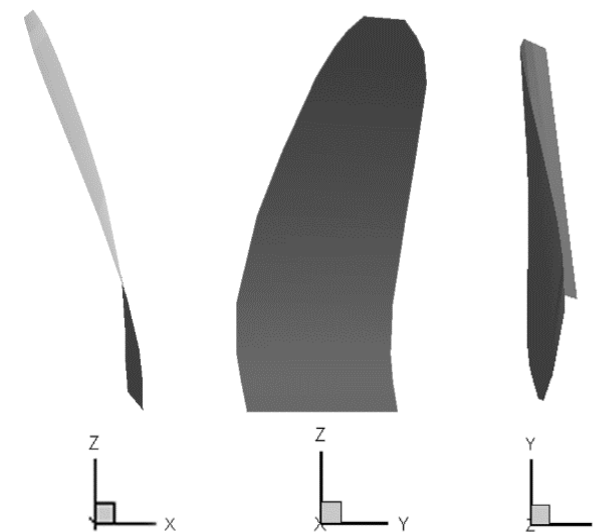
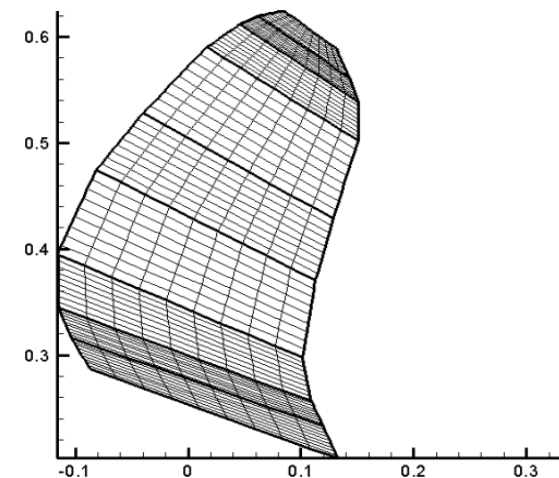
$$h = \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1}, \quad V_1 = \frac{1}{\rho_1}, \quad a_1^2 = \gamma p_1 V_1 = \frac{1+h}{1-h} p_1 V_1.$$



$$x_i = x'_k (\vec{i}'_k \cdot \vec{i}_i) + x_i^{01} = \alpha_{k'i} x'_k + x_i^{01}$$

$$x'_i = x'_k (\vec{i}'_k \cdot \vec{i}'_i) + x_i'^0 = \alpha_{i'k} x'_k + x_i'^0$$

Задание области, занятой силовым полем



Построение области



Существующая проблема – перетекание массы через область, занятую силовым полем!

Законы сохранения в интегральной форме:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = - \int_{S_{\Omega}} \bar{Q}_U ds, \quad U = [M, \vec{P}, E]$$

где S_{Ω} – боковая поверхность объема Ω , \bar{Q}_U – вектор плотности потока величин

Проводя расщепление вектора плотности на «конвективную» и «диссипативную» составляющие, удастся построить консервативные схемы расчета второго порядка точности, правильно учитывающие области влияния и характер взаимодействия рассматриваемых величин.

Численное решение задачи:

$$\frac{U^{n+1} - U^n}{\tau} = -L_n \left(\int_{S_{\Omega}} \bar{Q}_U ds \right)$$

оператор L_n осуществляет осреднение (сглаживание) характеристик среды для элементарного (но конечного) размер расчетной сетки

Для двумерного случая уравнения имеют вид (получены с помощью дифференциальных приближений для простейших схем метода расщепления):

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \Delta(\rho \vec{v}) &= 0, \\ \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \Delta(\rho u \vec{v}) + \frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \varepsilon_x \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \varepsilon_y \frac{\partial u}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \Delta(\rho v \vec{v}) + \frac{\partial p}{\partial y} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \varepsilon_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \varepsilon_y \frac{\partial v}{\partial x} \right), \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla((\rho E + p)\vec{v}) &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho \varepsilon_x \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho \varepsilon_y \frac{\partial E}{\partial x} \right),\end{aligned}$$

где $\varepsilon_x = |u| \Delta x / 2$, $\varepsilon_y = |v| \Delta y / 2$ – коэффициенты аппроксимационной вязкости

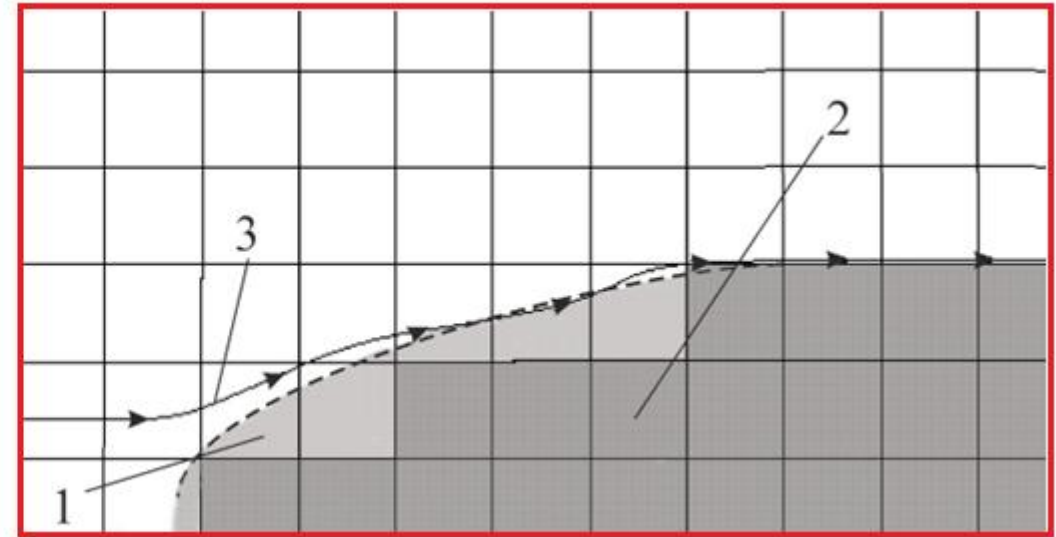
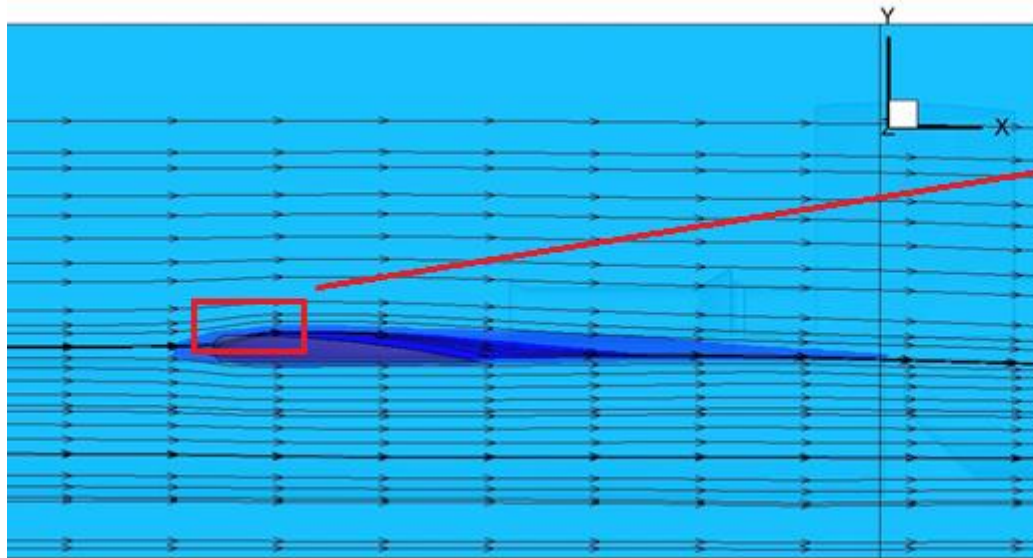
Трёхмерный случай

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x_1} + \frac{\partial G}{\partial x_2} + \frac{\partial H}{\partial x_3} = S$$

$$U = \begin{pmatrix} \rho \\ \rho w_1 \\ \rho w_2 \\ \rho w_3 \\ \rho \varepsilon^o \\ \rho S \end{pmatrix} \quad F = \begin{pmatrix} \rho w_1 \\ \rho w_1^2 + p \\ \rho w_2 w_1 \\ \rho w_3 w_1 \\ \rho w_1 i^o \\ \rho w_1 S \end{pmatrix} \quad G = \begin{pmatrix} \rho w_2 \\ \rho w_1 w_2 \\ \rho w_2^2 + p \\ \rho w_2 w_3 \\ \rho w_2 i^o \\ \rho w_2 S \end{pmatrix} \quad H = \begin{pmatrix} \rho w_3 \\ \rho w_1 w_3 \\ \rho w_2 w_3 \\ \rho w_3^2 + p \\ \rho w_3 i^o \\ \rho w_3 S \end{pmatrix}$$

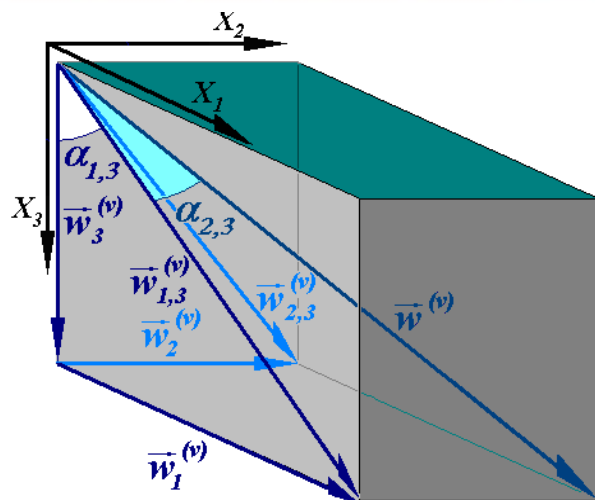
Метод решения – метод Годунова

Метод повышения гладкости решений в пристеночных зонах течений



Обтекание гладкой поверхности:

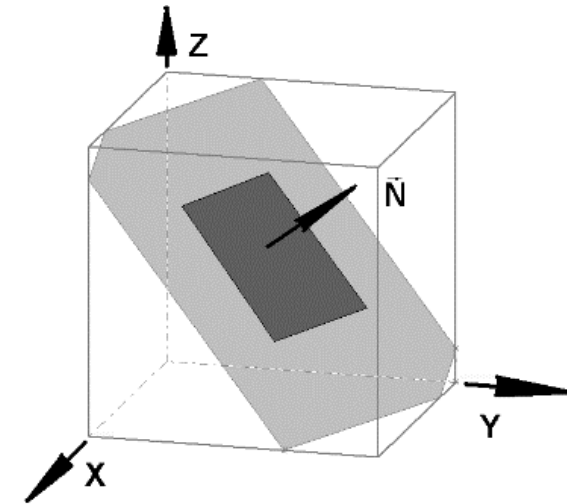
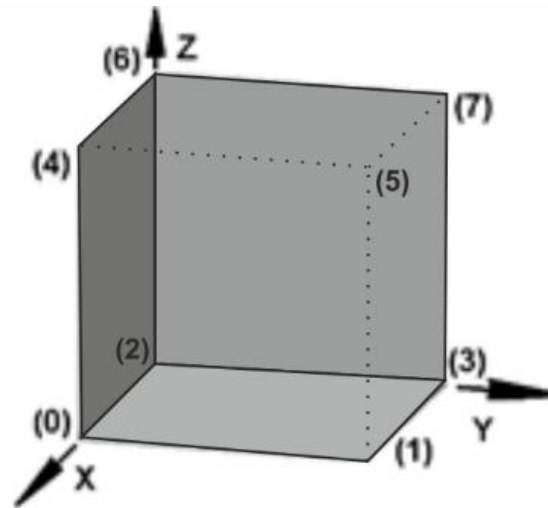
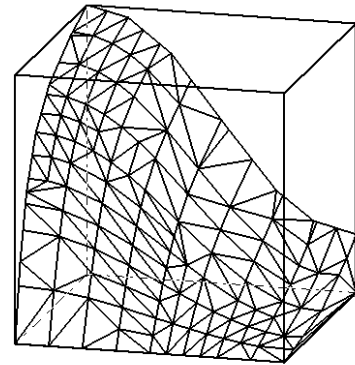
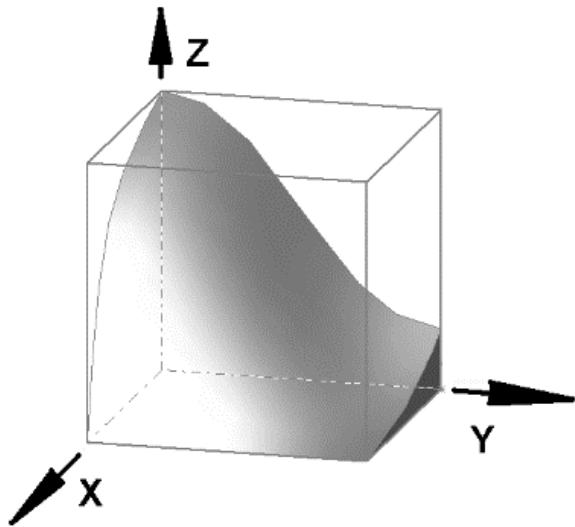
1 – гладкая поверхность, 2 – сеточное представление, 3 – линия тока



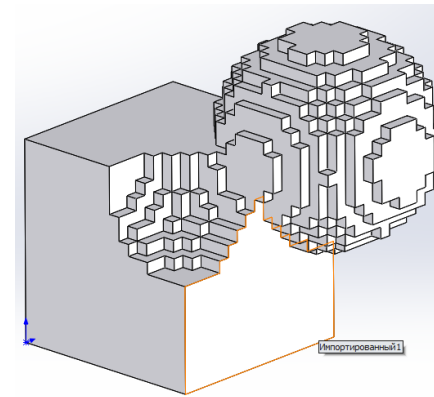
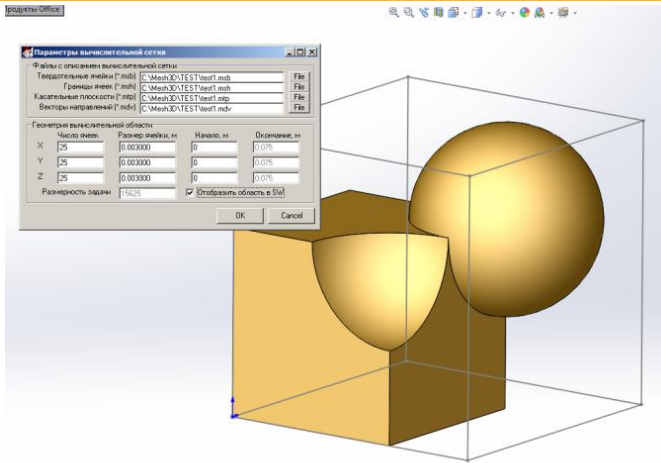
$$\begin{cases} w_1^{(v)} = w^{(v)} \cos \alpha_{2,3} \sin \alpha_{1,3} \\ w_2^{(v)} = w^{(vm)} \cos \alpha_{1,3} \sin \alpha_{2,3} \\ w_3^{(v)} = w^{(vm)} \cos \alpha_{1,3} \cos \alpha_{2,3} \end{cases}$$

Компоненты вектора скорости в заданном поле направлений

ГЕНЕРАТОР РЕГУЛЯРНЫХ ОРТОГОНАЛЬНЫХ СЕТОК

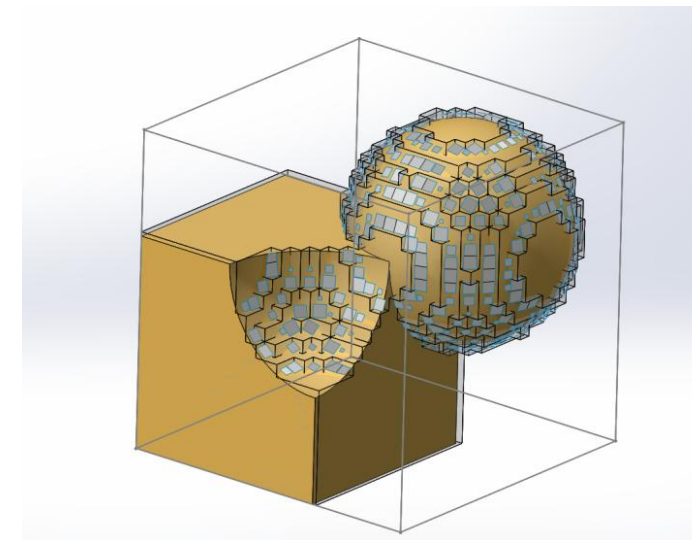
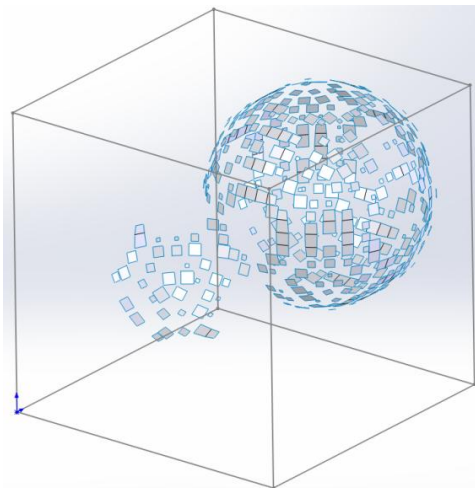


Вычислительная ячейка



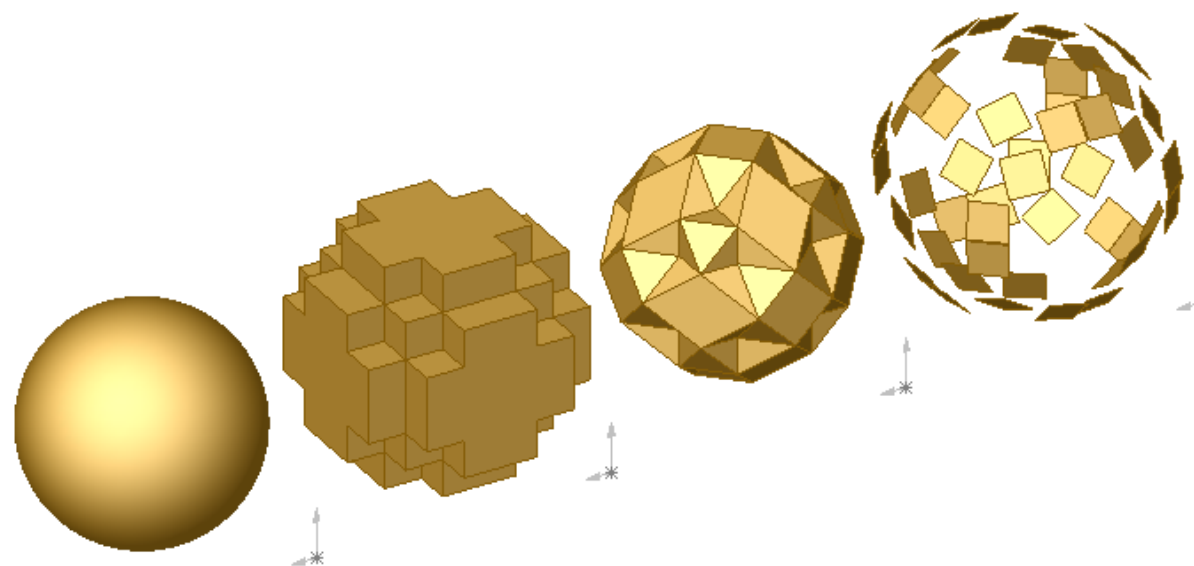
Ортогональная сетка

Окно задания параметров создания сетки



Сборка SolidWorks из загруженных сеток для оценки качества полученных сеток

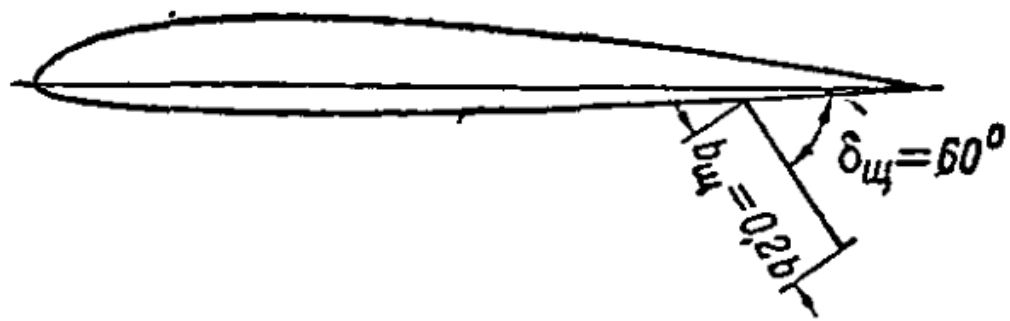
Сетка направляющих поверхностей



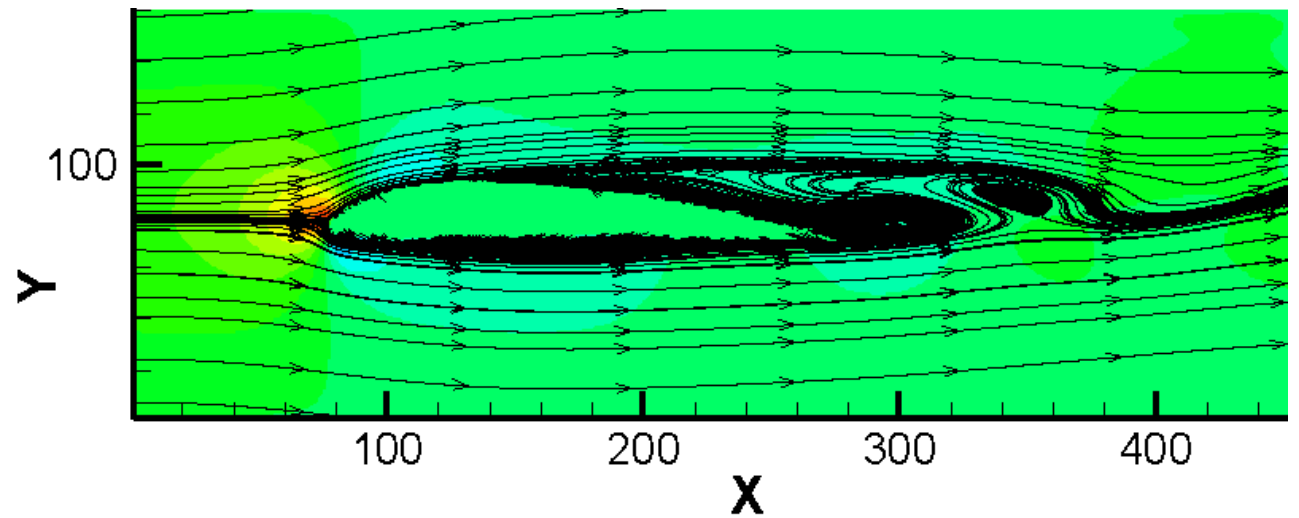
Сеточные отображения гладких поверхностей

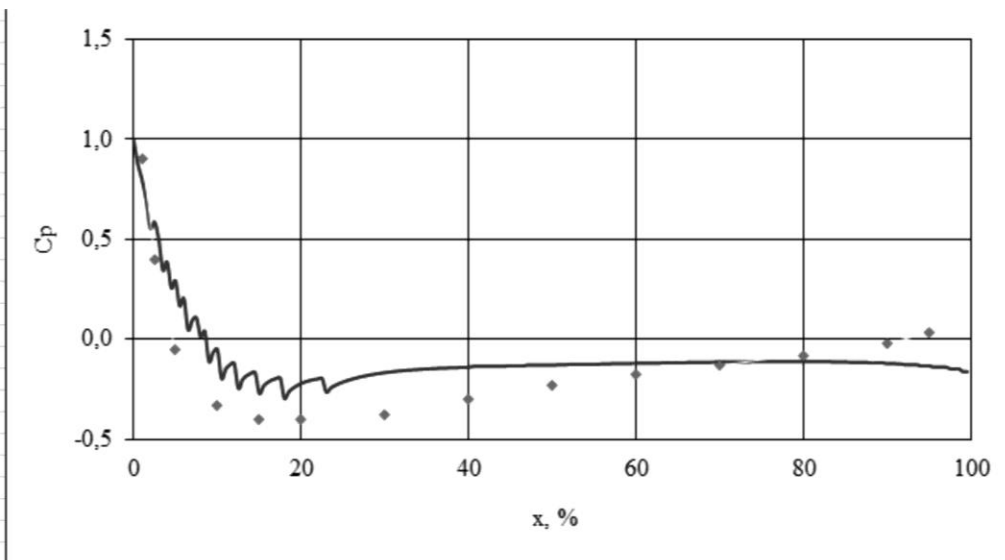
Обтекание профиля NASA-2211

Профиль NASA-2211

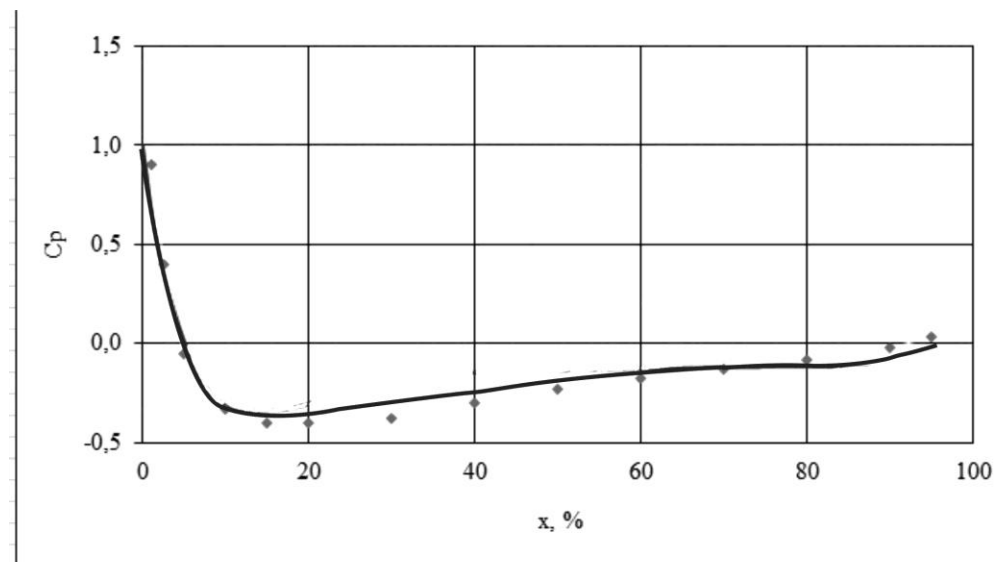


$\alpha = 0,$
 $Re = 1407757$

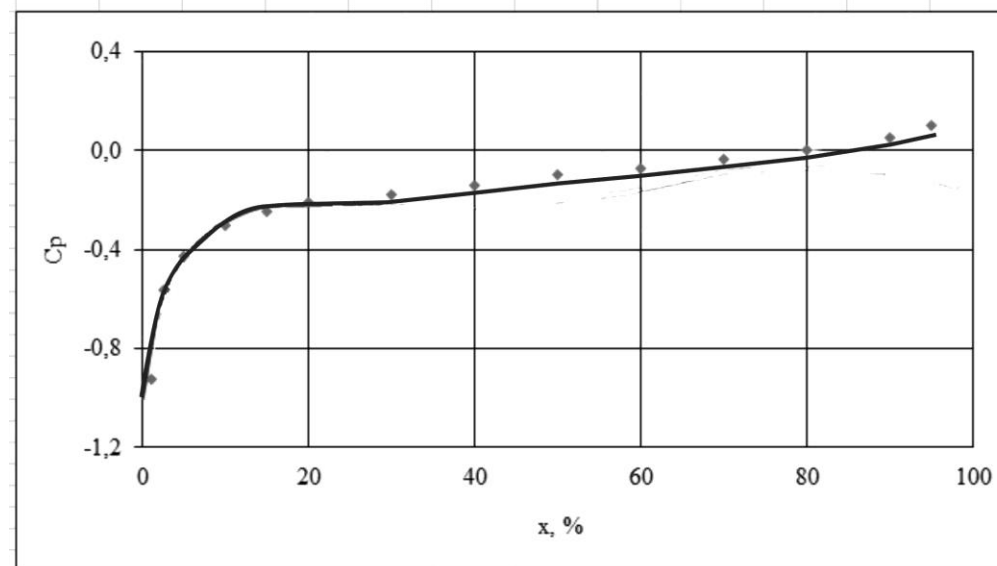
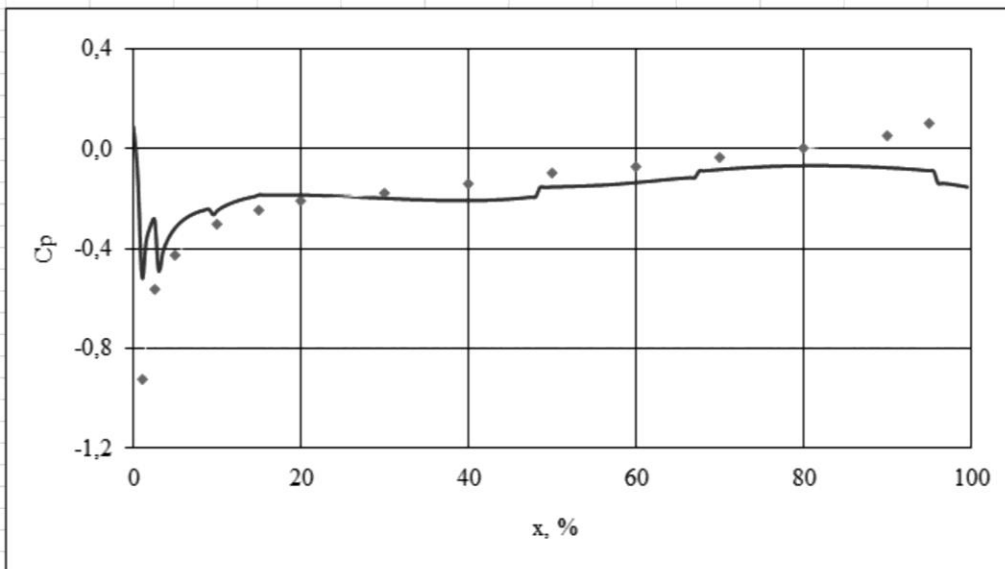




НИЗ

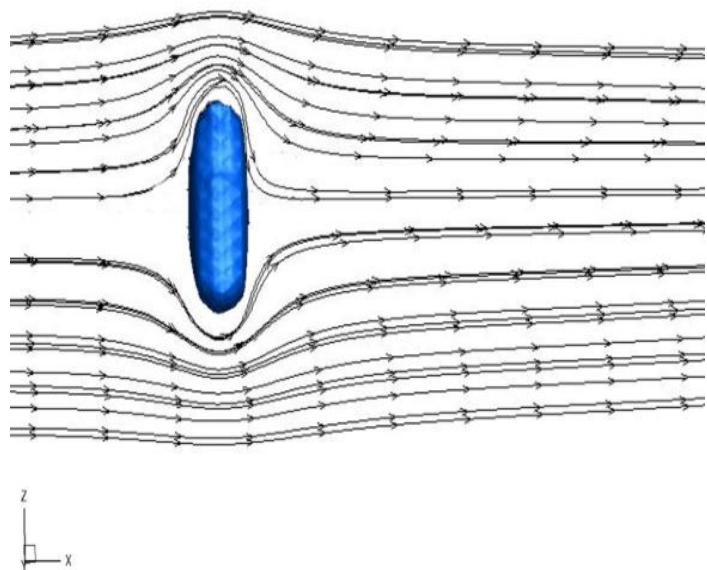


верх

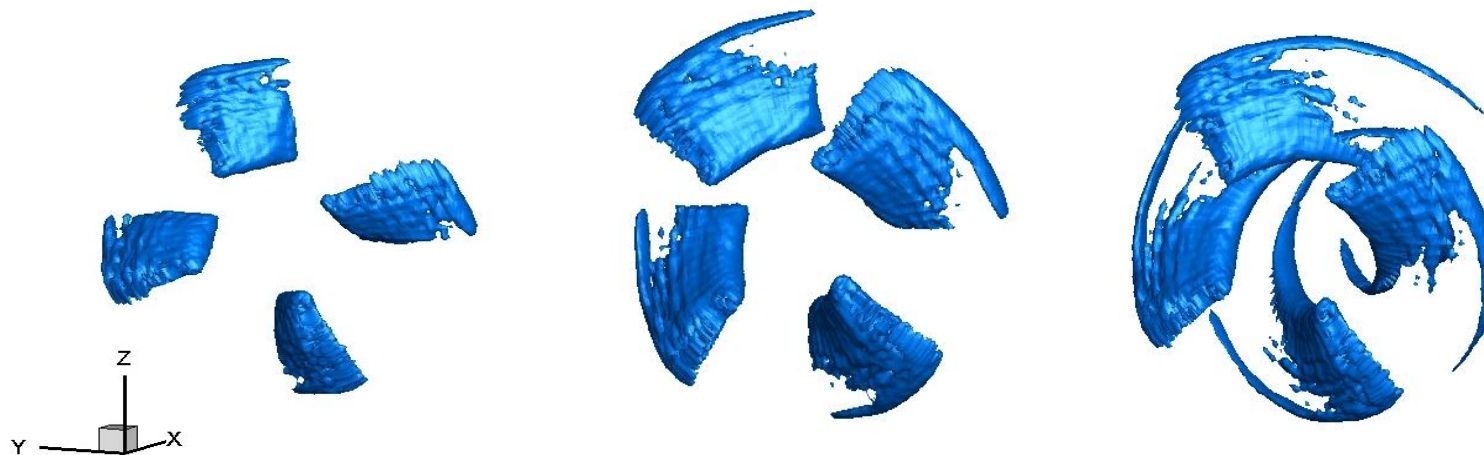


без маски направляющих свойств

с маской направляющих свойств



Обтекание пластинки (без перетекание массы)



Моделирование динамики винта

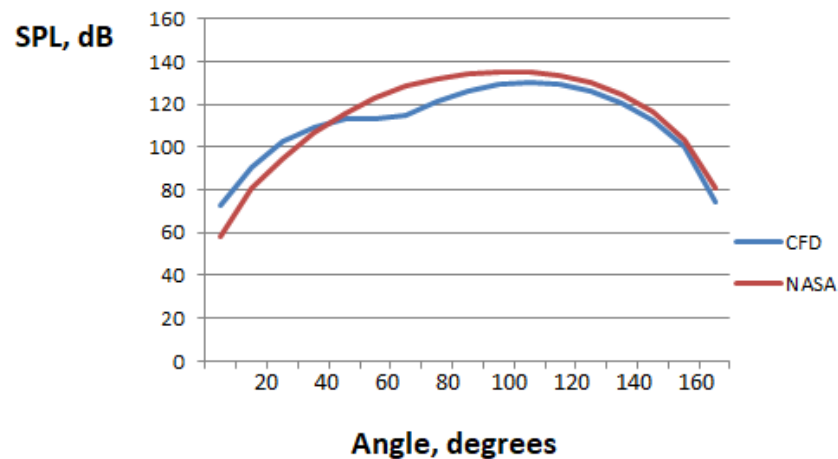
Решение акустической задачи – явные формулы Фарассата

$$p(\vec{x}) = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} \int_{\partial\Omega} \left[\frac{\rho_0 v_n c + (\vec{L}, \vec{e}_r)}{cr(1-M_r)} \right]_{ret} dS + \frac{1}{4\pi} \int_{\partial\Omega} \left[\frac{(\vec{L}, \vec{e}_r)}{r^2(1-M_r)} \right]_{ret} dS,$$

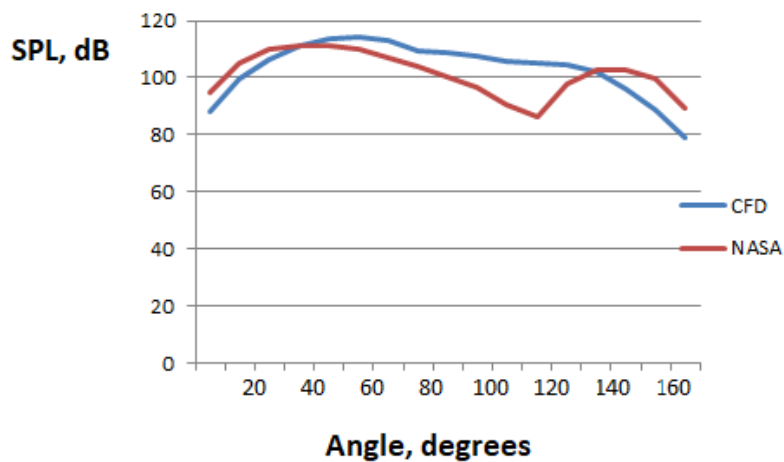
$$\vec{L} = p\vec{n} + \rho_0(v_n - u_n)\vec{v}, \vec{r} = \vec{x} - \vec{y}, \vec{e}_r = \vec{r}/r, M_r = (\vec{u}, \vec{e}_r)/c.$$



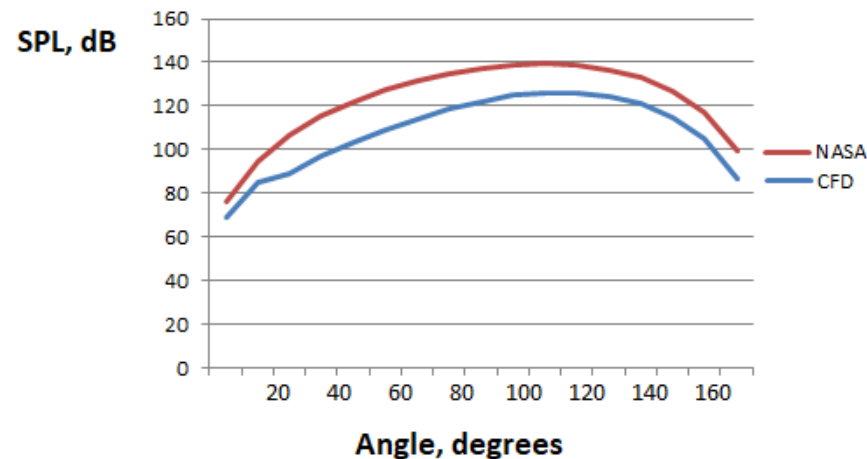
Ротор F7 / A7 (3 + 2 лопасти)



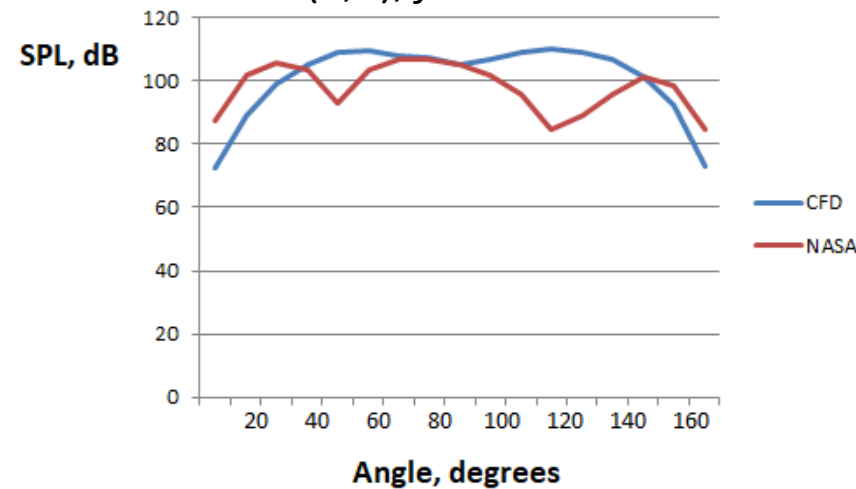
tone (1,0), $f = 381.65$



tone (1,1), $f = 638.15$

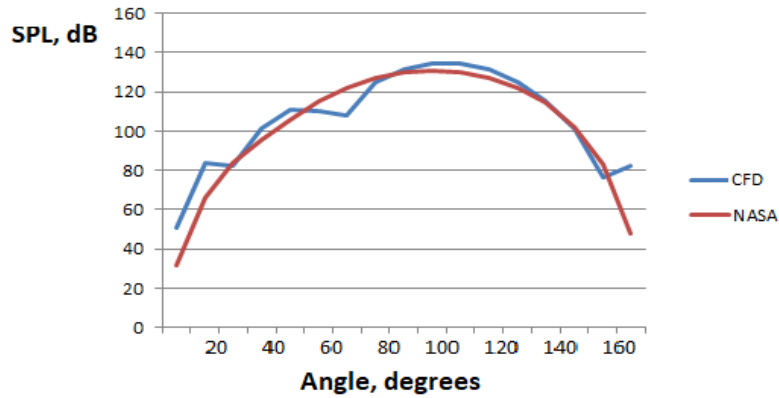


tone (0,1), $f = 256.50$



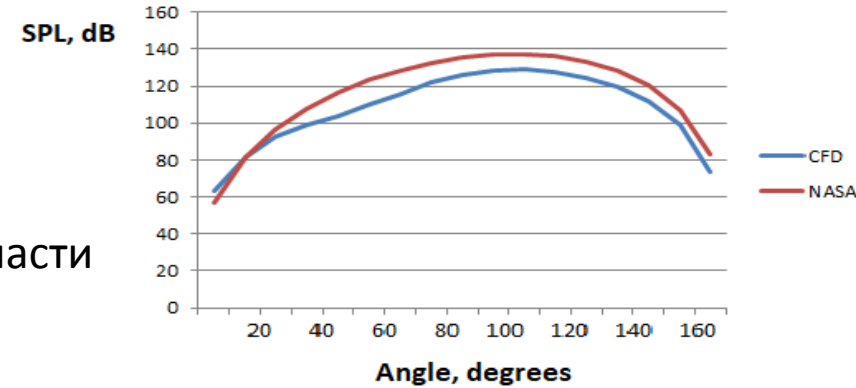
tone (2,2), $f = 1276.30$

Ротор F7 / A7

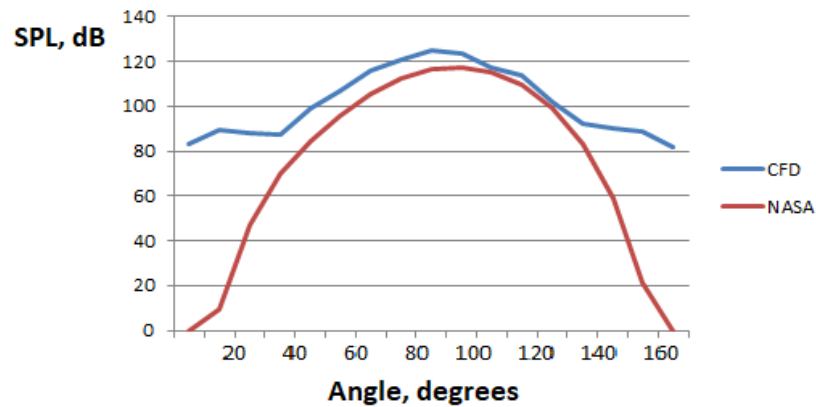


tone (1,0), $f = 636.0$

5 + 3 лопасти

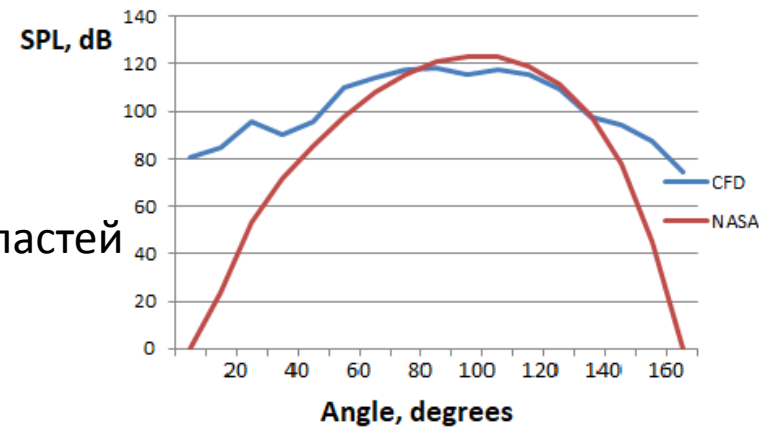


tone (0,1), $f = 384.75$



tone (1,0), $f = 1399.38$

11 + 9 лопастей



tone (0,1), $f = 1154.25$

Выводы

- Представлен гибридный метод предсказания широкополосного шум соосных противовращающихся винтов.
- Представлен метод расчет течений в областях с подвижными границами, реализованный на декартовых сетках.
- Решения гидродинамической задачи – «разностный Эйлер», решение акустической задачи – метод FWH.
- Предложен метод повышения точности вычислений в пристеночных зонах течения.
- Проведен расчет акустики для модельного винта тип F7/A7 для различных тонов.
- Проведено сравнение с экспериментальными данными:
 1. Whitfield, C. E., Manl, R., Gllebe, P.R. (1990) High Speed Turboprop Aeroacoustic Study (Counterrotation). Volume I - Model Development. NASA Contractor Report **185241**
 2. Whitfield, C. E., Manl, R., Gllebe, P.R. (1990) High Speed Turboprop Aeroacoustic Study (Counterrotation). Volume II - Computer Programs. NASA Contractor Report **185242**



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!