Разработка неструктурированного кода для вращающихся зон на основе метода КАБАРЕ с улучшенными спектральными свойствами

Солнцев И.А., Карабасов С.А.

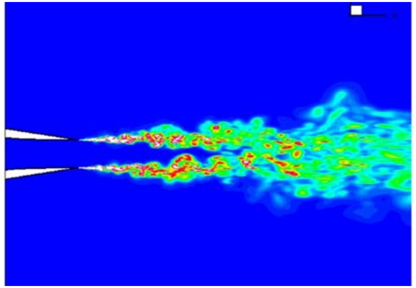
Отечественные CFD коды – 2021» (CFD Weekend-2021)
18-**19 декабря 2021г**

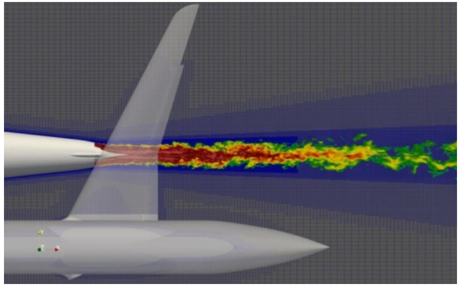
• Базовый алгоритм CABARET

Основные свойства

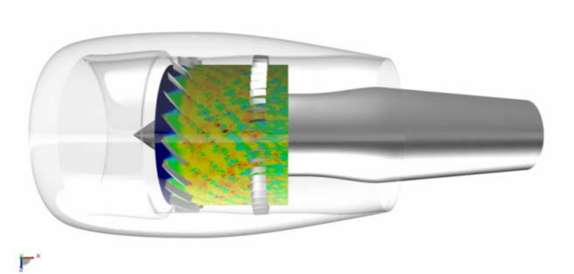
- Консервативный / характеристический метод
- явная схема
- 2й порядок точности
- компактный шаблон
- низкая дисперсия схемы
- малодиссипативная коррекция
- характеристические граничные условия
- гексаэдральные сетки в формате openFOAM

- **Алгоритм CABARET на сетках** openFoam **в задачах аэроакустики**





- **Цель: развитие метода CABARET для задач аэроакустики** с **вращающимися несущими элементами**



[1] Georgy A. Faranosov, Vasily M. Goloviznin, Sergey A. Karabasov, Vasily G. Kondakov, Victor F. Kopiev, Mihail A. Zaitsev, CABARET method on unstructured hexahedral grids for jet noise computation, Computers & Fluids 88 (2013)
[2] Anton P. Markesteijn and Sergey A. Karabasov, GPU CABARET Flow and Noise Solutions of an installed Jet Configuration, AIAA 2020-2563 (Jun 2020)
[3] SDT Fan Noise prediction, 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference
[4] CityAirbus, 75th Vetical Flight Society Forum

• Уравнения Навье-Стокса в инерциальной системе координат

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x}+\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y}+\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z}=\mathbf{Q};\quad \mathbf{U}=\begin{pmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho w\\ \rho E\end{pmatrix};\quad \mathbf{F}=\begin{pmatrix}\rho U\\ \rho u\,U+p\\ \rho v\,U\\ \rho w\,U\\ \rho E\,U+up\end{pmatrix};\quad \mathbf{G}=\begin{pmatrix}\rho V\\ \rho u\,V\\ \rho v\,V+p\\ \rho w\,V\\ \rho E\,V+vp\end{pmatrix};\quad \mathbf{H}=\begin{pmatrix}\rho W\\ \rho u\,W\\ \rho v\,W\\ \rho w\,W+p\\ \rho E\,W+wp\end{pmatrix};$$

где **U** вектор консервативных переменных, $U=u, V=v, W=w$ скорости, **F,G,H** - потоки,
Q источники вязких сил:

$$\mathbf{Q}=\begin{pmatrix}0\\ \frac{\partial}{\partial x}\tau_{xx}+\frac{\partial}{\partial y}\tau_{xy}+\frac{\partial}{\partial z}\tau_{xz}\\ \frac{\partial}{\partial x}\tau_{yx}+\frac{\partial}{\partial y}\tau_{yy}+\frac{\partial}{\partial z}\tau_{yz}\\ \frac{\partial}{\partial x}\tau_{zx}+\frac{\partial}{\partial y}\tau_{zy}+\frac{\partial}{\partial z}\tau_{zz}\\ \frac{\partial}{\partial x}(u\tau_{xx}+v\tau_{xy}+w\tau_{xz})+\frac{\partial}{\partial y}(u\tau_{yx}+v\tau_{yy}+w\tau_{yz})+\frac{\partial}{\partial z}(u\tau_{zx}+v\tau_{zy}+w\tau_{zz})\end{pmatrix};$$

• Уравнения Навье-Стокса в неинерциальной системе координат

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t}+\frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x}+\frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y}+\frac{\partial \mathbf{H}}{\partial z}=\mathbf{Q};\quad \mathbf{U}=\begin{pmatrix}\rho\\ \rho u\\ \rho v\\ \rho w\\ \rho E\end{pmatrix};\quad \mathbf{F}=\begin{pmatrix}\rho U\\ \rho u U+p\\ \rho v U\\ \rho w U\\ \rho E U+up\end{pmatrix};\quad \mathbf{G}=\begin{pmatrix}\rho V\\ \rho u V\\ \rho v V+p\\ \rho w V\\ \rho E V+vp\end{pmatrix};\quad \mathbf{H}=\begin{pmatrix}\rho W\\ \rho u W\\ \rho v W\\ \rho w W+p\\ \rho E W+wp\end{pmatrix};$$

$\mathbf{Q}=\mathbf{Q}_v+\mathbf{Q}_{nin}$; где $\mathbf{Q}_v$ источники вязких сил, $\mathbf{Q}_{nin}$ источники неинерциальных сил:

Абсолютные скорости

$$U=u-u_g, V=v-v_g, W=w-w_g;$$

(u_g, v_g, w_g скорости сетки)

$$\mathbf{Q}_{nin}=0;$$

Относительные скорости

$$U=u, V=v, W=w;$$

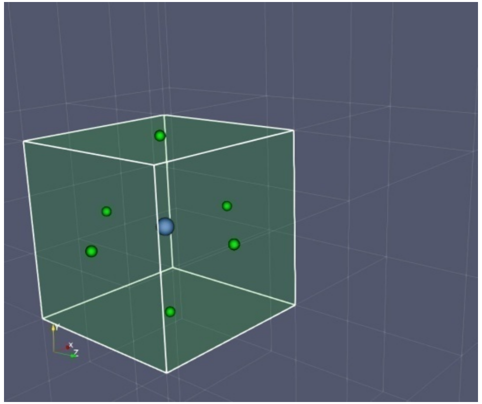
$$\mathbf{Q}_{nin}=\begin{pmatrix}0\\ q_u\\ q_v\\ q_w\\ uq_u+vq_v+wq_w\end{pmatrix};\quad X\text{-вращение:}\ \mathbf{Q}_{nin}=\begin{pmatrix}0\\ 0\\ 2\omega w+\omega^2 y\\ -2\omega v+\omega^2 z\\ \omega^2(yv+zw)\end{pmatrix}$$

где ω угловая скорость вращения сетки по X.

[3] F. Cariglino, N. Ceresola, and R. Arina, External Aerodynamics Simulations in a Rotating Frame of Reference, International Journal of Aerospace Engineering (2014)

• Алгоритм CABARET во вращающейся зоне

n $n+1/2$ $n+1$



(1) Предиктор

$$\Omega\frac{\partial\bar{\mathbf{U}}}{\partial t}+\iint_{S(\Omega)}\mathbf{F}(\mathbf{U})dn_x+\iint_{S(\Omega)}\mathbf{G}(\mathbf{U})dn_y+\iint_{S(\Omega)}\mathbf{H}(\mathbf{U})dn_z=\Omega\bar{\mathbf{Q}}(\mathbf{U})$$

где Ω контрольный объём, $\mathbf{n}=(n_x,n_y,n_z)$ внешняя нормаль к поверхности

$$\Omega_c\frac{\mathbf{U}_c^{n+1/2}-\mathbf{U}_c^n}{\tau^n/2}+(s_x\mathbf{F}_{c+}^n-s_x\mathbf{F}_{c-}^n)+(s_y\mathbf{G}_{c+}^n-s_y\mathbf{G}_{c-}^n)+(s_z\mathbf{H}_{c+}^n-s_z\mathbf{H}_{c-}^n)=\Omega_c\mathbf{Q}_c^n$$

где Ω_c объём ячейки, s_x,s_y,s_z площади граней, h_x,h_y,h_z размеры ячейки,

$\Omega_c=h_x\cdot h_y\cdot h_z$, $s_x=h_y\cdot h_z$, $s_y=h_x\cdot h_z$, $s_z=h_x\cdot h_y$

$$\frac{\mathbf{U}_c^{n+1/2}-\mathbf{U}_c^n}{\tau^n/2}+\frac{\mathbf{F}_{c+}^n-\mathbf{F}_{c-}^n}{h_x}+\frac{\mathbf{G}_{c+}^n-\mathbf{G}_{c-}^n}{h_y}+\frac{\mathbf{H}_{c+}^n-\mathbf{H}_{c-}^n}{h_z}=\mathbf{Q}_c^n$$

$$\underline{\mathbf{Q}=\mathbf{Q}_v+\mathbf{Q}_{nin}}$$

[4] S.A. Karabasov, V.M. Goloviznin, Compact accurately boundary-adjusting high-resolution technique for fluid dynamics, Journal of Computational Physics 228 (19), 7426-7451 (2009)

• Алгоритм CABARET во вращающейся зоне

n $n+1/2$ $n+1$

(2) Характеристическая экстраполяция

$$\tilde{\mathbf{R}}_{\pm}^{n+1} = 2\mathbf{R}_c^{n+1/2} - \mathbf{R}_{\mp}^{n}$$

где $\mathbf{R} = \begin{pmatrix} r \\ q \end{pmatrix}, r = \varpi + Gp^{\mu}, q = \varpi - Gp^{\mu}, \mu = \dfrac{\gamma - 1}{2\gamma}, s = \ln\left(\dfrac{p}{\rho^{\gamma}}\right), G = \dfrac{2\gamma e^{\frac{s}{2\gamma}}}{\gamma - 1}$

Нелинейная коррекция (принцип максимума)

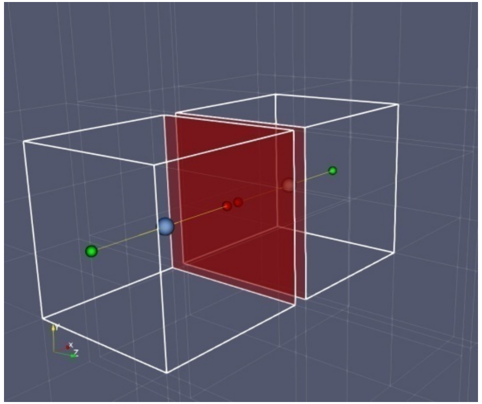
$$\mathbf{R}_{\pm}^{n+1} = \tilde{\mathbf{R}}_{\pm}^{n+1} + \delta_{minmax}(\mathbf{R}_{\mp}^{n}, \mathbf{R}_{c}^{n}, \mathbf{R}_{c}^{n+1/2})$$

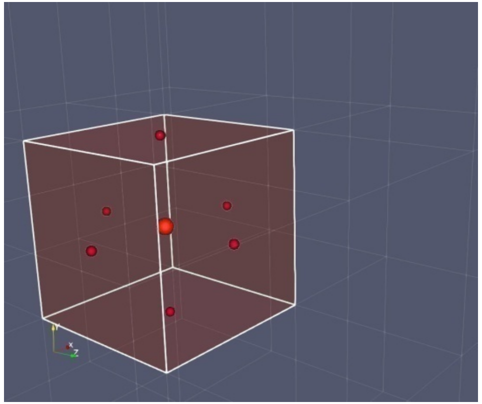
Реконструкция потоков

$$\mathbf{F}_{c+}^{n+1}, \mathbf{F}_{c-}^{n+1}, \mathbf{G}_{c+}^{n+1}, \mathbf{G}_{c+}^{n+1}, \mathbf{H}_{c+}^{n+1}, \mathbf{H}_{c+}^{n+1} = f(\mathbf{R}_{\pm}^{n+1})$$

(3) Корректор

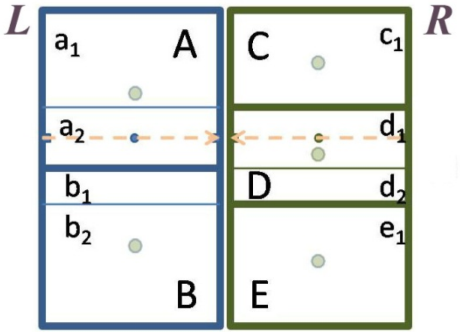
$$\frac{\mathbf{U}_c^{n+1} - \mathbf{U}_c^{n+1/2}}{\tau^n / 2} + \frac{\mathbf{F}_{c+}^{n+1} - \mathbf{F}_{c-}^{n+1}}{h_x} + \frac{\mathbf{G}_{c+}^{n+1} - \mathbf{G}_{c-}^{n+1}}{h_y} + \frac{\mathbf{H}_{c+}^{n+1} - \mathbf{H}_{c-}^{n+1}}{h_z} = \mathbf{Q}_c^{n+1/2}$$

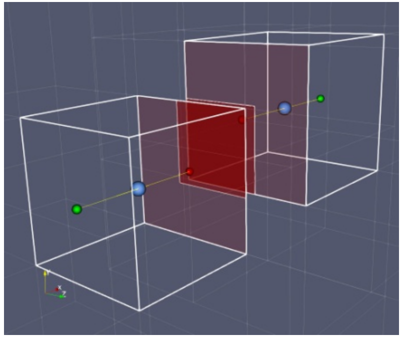


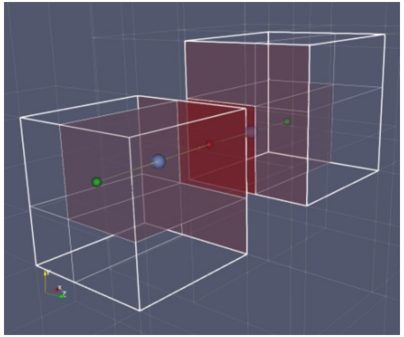


Модификация шага экстраполяции для плоского контакта сеточных зон

- Построение суб-граней «суперсетки» и подсеточное разбиение контактирующих ячеек







- Построение суперсетки гарантирует попарное равенство потоков через суб-грани «суперсетки» на шаге экстраполяции

$$\mathbf{f}^{n+1}_{m,L+} = \mathbf{f}^{n+1}_{m,R-}$$

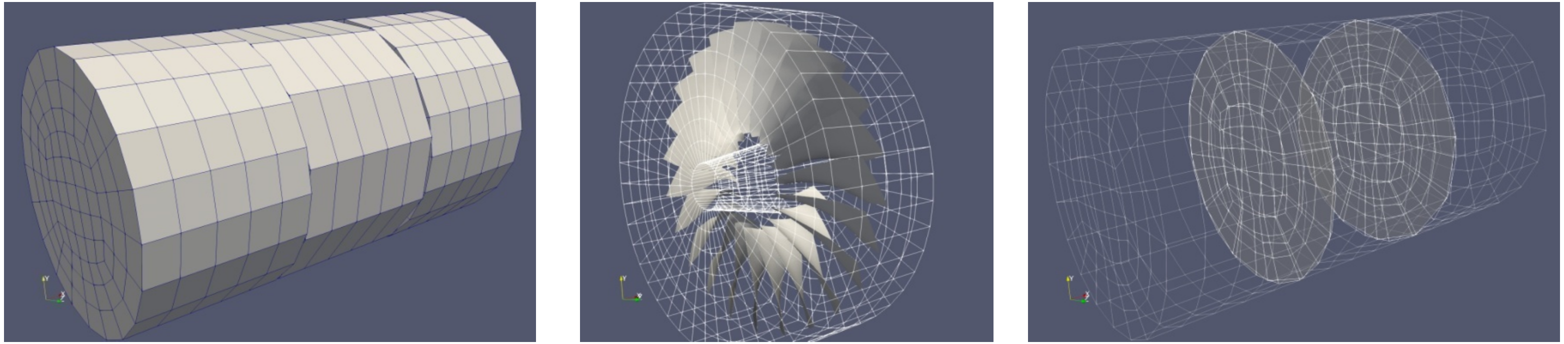
и обеспечивает сохранение суммарных потоков через всю контактную поверхность

$$\sum_{a=1}^{L}\sum_{m=1}^{Ma} s_{xam+}\mathbf{f}^{n+1}_{am+} = \sum_{d=1}^{R}\sum_{n=1}^{Nd} s_{xdn-}\mathbf{f}^{n+1}_{dn-}$$

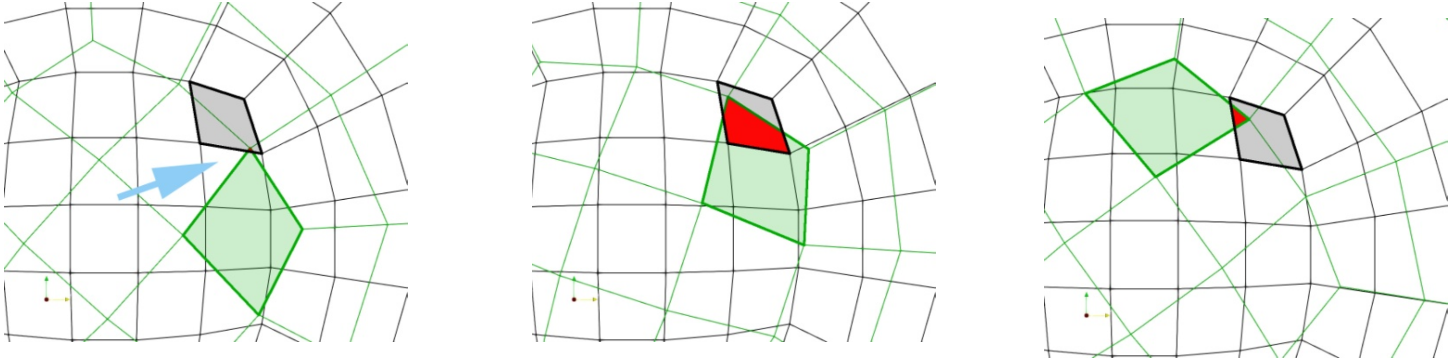
- Модифицированные шаги предиктор/корректор используют суммирование потоков через контактные суб-грани

$$\Omega_A \frac{\mathbf{U}_A^{n+1/2} - \mathbf{U}_A^{n}}{\tau^n / 2} + (\sum_{m=1}^{M} s_{xam+}\mathbf{f}^{n}_{am+} - s_{x-}\mathbf{F}^{n}_{A-}) + \ldots = \Omega_A \mathbf{Q}_A^n; \quad \Omega_A \frac{\mathbf{U}_A^{n+1} - \mathbf{U}_A^{n+1/2}}{\tau^n / 2} + (\sum_{m=1}^{M} s_{xam+}\mathbf{f}^{n+1}_{am+} - s_{x-}\mathbf{F}^{n+1}_{A-}) + \ldots = \Omega_A \mathbf{Q}_A^{n+1/2}$$

• Эволюция контактных суб-граней

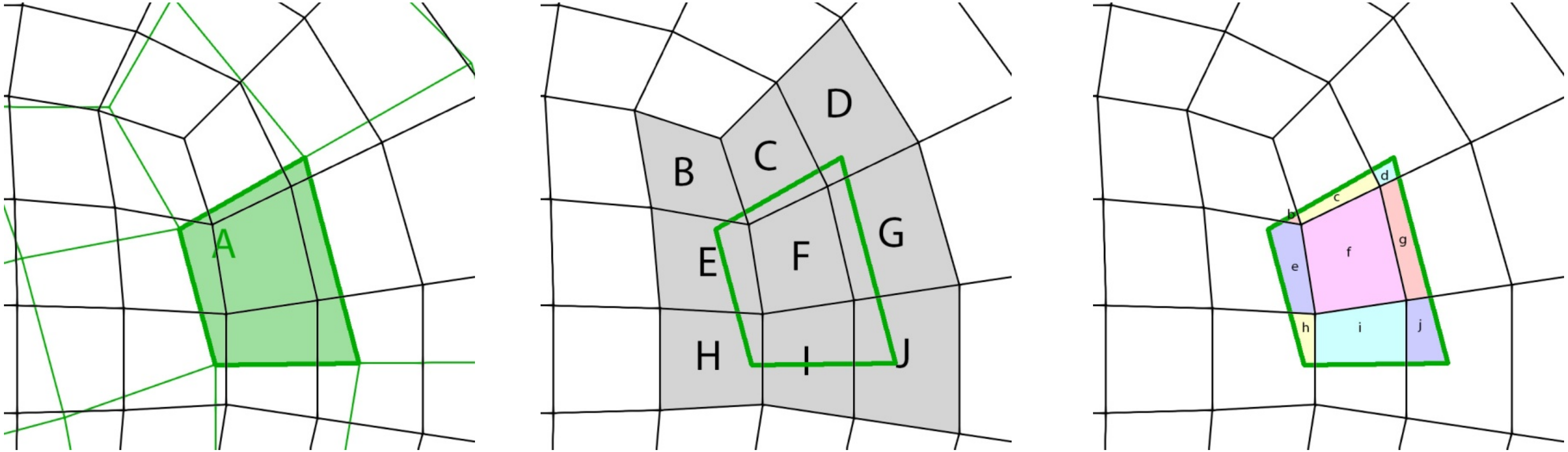


Инициализация суб-грани по характеристикам «лагранжевых» контактных частиц, эволюция «лагранжевых» суб-граней



• **Нахождение суб-граней. Алгоритм пересечения полигонов** Sutherland-Hodgmann

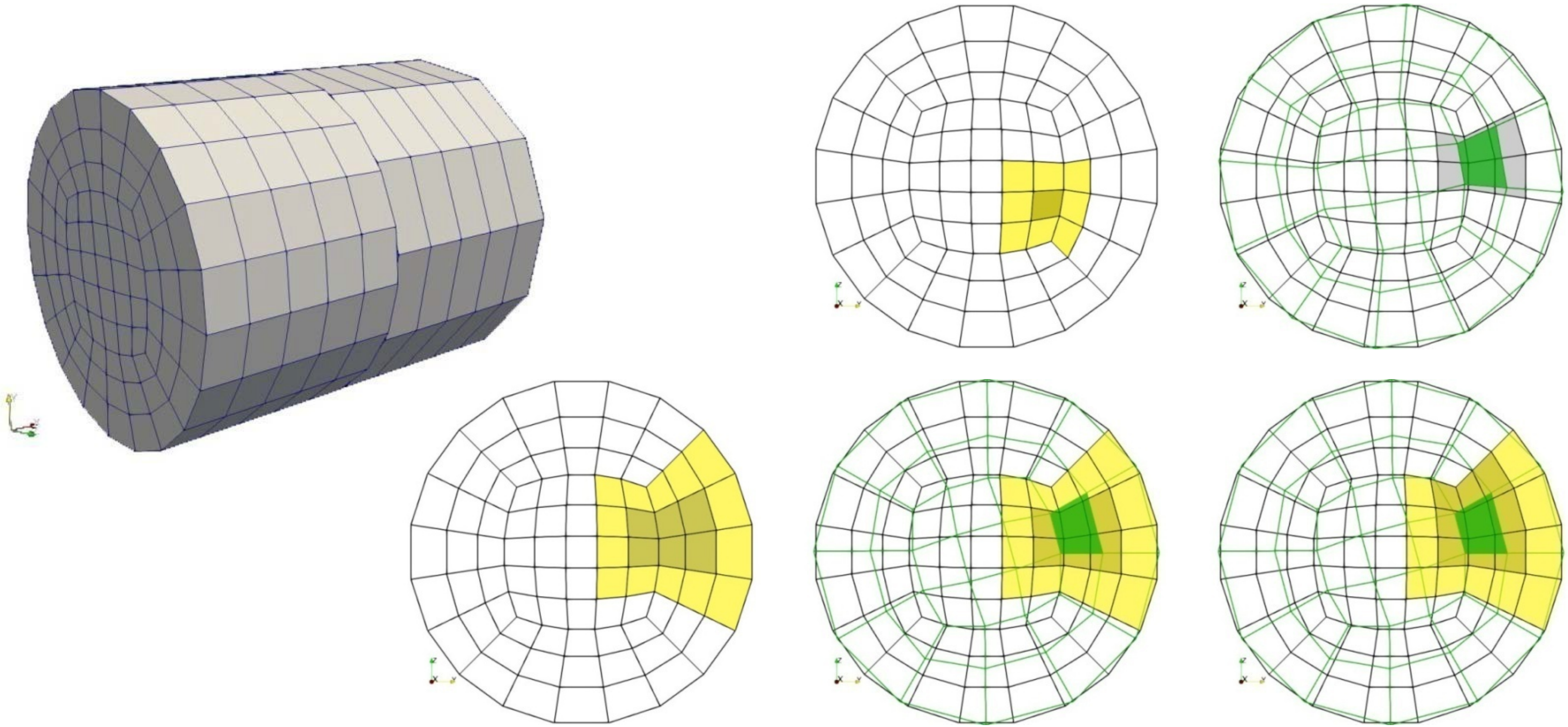
Построение списка контактов/пересечения A ⋂ B,C,D… с ненулевой площадью суб-граней пересечения (s_b,s_c,s_d…)



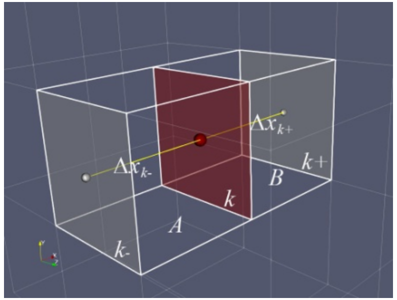
[5] I. Sutherland and G.W. Hodgman, Reentrant Polygon Clipping. Communications of the ACM, vol. 17, pp. 32–42, (1974)

• Оптимизация поиска контактов

Замена полного поиска на определение соседей и отслеживание расширенного списка контактов.



• Улучшение спектральных свойств CABARET в неподвижной/вращающейся зонах (DIC). Уменьшение дисперсии.



● Корректирующие анти-дисперсионные члены определяются производными потоков по нормали к грани. Например, для для грани k между ячейками A и B для направления x

$$\delta \mathbf{F}_k^m = -\mu_{x,k}\left[\left(\frac{\partial \mathbf{F}^m}{\partial x}\right)_B - \left(\frac{\partial \mathbf{F}^m}{\partial x}\right)_A\right]\frac{\Delta l_x}{|\Delta l|^2}; \quad CFL_{x,k+} = \frac{(a+|\mathbf{u}|)\tau^n}{\Delta x_{k-}} \text{ число Куранта по } x;$$

$$\mu_{x,k} = \frac{1}{12}\left(\Delta x_{k+}^2 - 3CFL_{x,k+}\Delta x_{k+}\Delta \overline{x}_k + 2\left(CFL_{x,k+}\Delta x_{k+}\right)^2\right); \quad m = n, n+1$$

где $\Delta l, \Delta l_x, \Delta x_{k+}, \Delta x_{k-}$ расстояния между центрами и гранями ячеек, a скорость звука, $\mathbf{u}$ вектор скорости,

$$\tilde{\mathbf{F}}_k^m = \mathbf{F}_k^m + \delta\tilde{\mathbf{F}}_k^m; \quad \partial\tilde{\mathbf{F}} = \varepsilon_{dump}\partial\mathbf{F}; \quad \varepsilon_{dump} = \frac{\langle \Delta\mathbf{x}_{k+}, \Delta\mathbf{x}_{k-}\rangle}{|\Delta\mathbf{x}_{k+}|\cdot|\Delta\mathbf{x}_{k-}|} \le 1$$

коэффициент демпфирования на криволинейных сетках

$$\begin{cases} \Omega_A \dfrac{\mathbf{U}_A^{n+1/2} - \mathbf{U}_A^n}{\tau^n/2} + \sum\limits_{S_k}\tilde{\mathbf{F}}_k^n \Delta n_{x,k} + \sum\limits_{S_k}\tilde{\mathbf{G}}_k^n \Delta n_{y,k} + \sum\limits_{S_k}\tilde{\mathbf{H}}_k^n \Delta n_{x,k} = \Omega_A \mathbf{Q}_A^n \\ \Omega_A \dfrac{\mathbf{U}_A^{n+1} - \mathbf{U}_A^{n+1/2}}{\tau^n/2} + \sum\limits_{S_k}\tilde{\mathbf{F}}_k^{n+1} \Delta n_{x,k} + \sum\limits_{S_k}\tilde{\mathbf{G}}_k^{n+1} \Delta n_{y,k} + \sum\limits_{S_k}\tilde{\mathbf{H}}_k^{n+1} \Delta n_{x,k} = \Omega_A \mathbf{Q}_A^{n+1/2} \end{cases}$$

шаги предиктор/корректор для дисперсионно-улучшенных потоков

[6] A. Chintagunta, S.E. Naghibi, and S.A. Karabasov, Flux-corrected dispersion-improved CABARET schemes for linear and nonlinear wave propagation problems, Computers & Fluids 169, 111-128 (2018)

Улучшение спектральных свойств CABARET в неподвижной/вращающейся зонах (DIC). Уменьшение диссипации.

- Стандартная процедура нелинейной коррекции потоков

$$\mathbf{m} = \min\left(R^n_{c-}, R^{n+1/2}_c, R^n_{c+},\right) + \bar{\mathbf{q}}_c \tau^n; \quad \mathbf{M} = \max\left(R^n_{c-}, R^{n+1/2}_c, R^n_{c+},\right) + \bar{\mathbf{q}}_c \tau^n; \quad \bar{\mathbf{q}}_c = \frac{\mathbf{R}^{n+1/2}_c - \mathbf{R}^n_c}{\tau^n / 2} + \lambda_c \frac{\mathbf{R}^n_{c+} - \mathbf{R}^n_{c-}}{|\Delta \mathbf{x}_c|}$$

где $\Delta \mathbf{x}_c$ расстояние между гранями в ячейке c, $\lambda_c = u_c \pm a$ определяет направление характеристики.

- Для уменьшение диссипации стандартная процедура модифицирована ведением корректирующего члена

$\tilde{\mathbf{m}} = \mathbf{m} - \varepsilon_{MR} \mathbf{d}_{MR}; \quad \tilde{\mathbf{M}} = \mathbf{M} + \varepsilon_{MR} \mathbf{d}_{MR}; \quad \mathbf{d}_{MR} = (\mathbf{M} - \mathbf{m}) / 2;$ где ε_{MR} настроечный параметр

$\varepsilon_{MR} =$ 0-2 для плоских волн на однородной сетке,

$\varepsilon_{MR} =$ 0-0.1 для неоднородных течений,

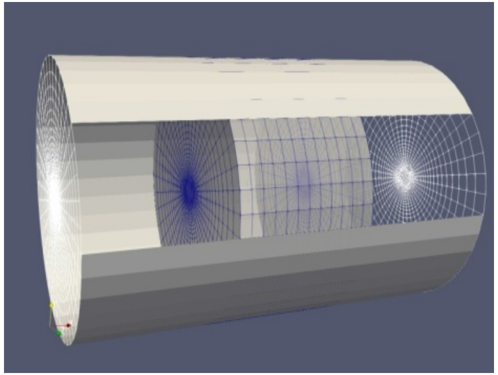
$\varepsilon_{MR} = 0$ стандартный алгоритм CABARET.

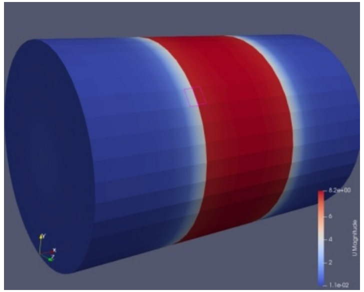
[7] A. Chintagunta, S.E. Naghibi, A.P. Markesteijn, S.A. Karabasov,A fourth-order CABARET scheme for ComputationalAeroacoustics, preprint (2018)

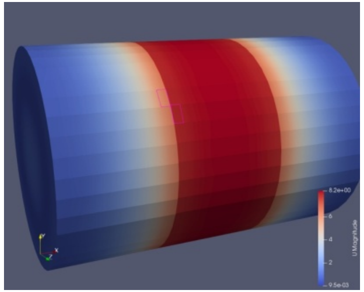
• Тестовые расчёты: плоский контакт вращающейся и неподвижных сеток «ротор-статор» (R=0.1; ω=100 рад/с)

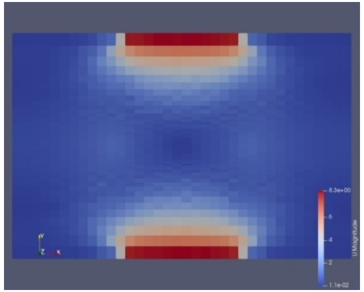
На цилиндрической поверхности ротора - условие прилипания

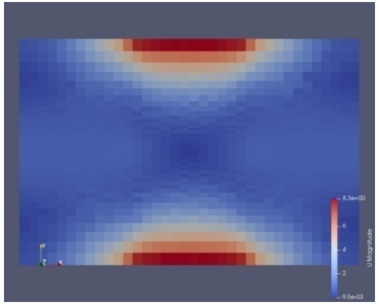
На цилиндрической поверхности статора: (а) прилипание (б) проскальзывание











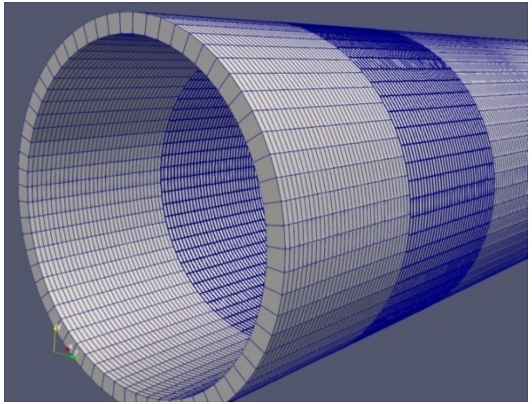
• Тестовые расчёты: прохождение плоской акустической волны через плоский контакт вращающейся и неподвижных сеток

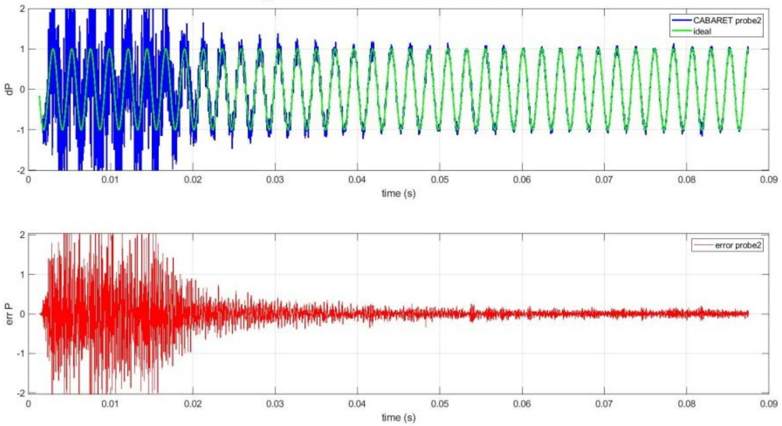
- Характеристическое условие для плоской акустической волны на левой границе:

$$p(t) = p_\infty + p'; \quad p' = \varepsilon p_\infty \sin(\varpi t); \quad p_\infty = 1.e+5Pa; \quad \varepsilon = 1e-5; \quad T_\infty = 287°C$$

$$u(t) = u_\infty + \frac{p'}{\rho_\infty a_\infty}; \quad u_\infty = 0; \quad \rho_\infty = \frac{p_\infty}{T_\infty c_v(\gamma-1)}; \quad a_\infty = \sqrt{\frac{\gamma p_\infty}{\rho_\infty}}; \quad \omega = a_\infty k; \quad k = 2\pi/\lambda; \quad \lambda = Mdx;$$

- Контакт тонких коаксиальных сеток ротор/статор, *R*=0.1м, *ω*=800рад/с, *M*=256

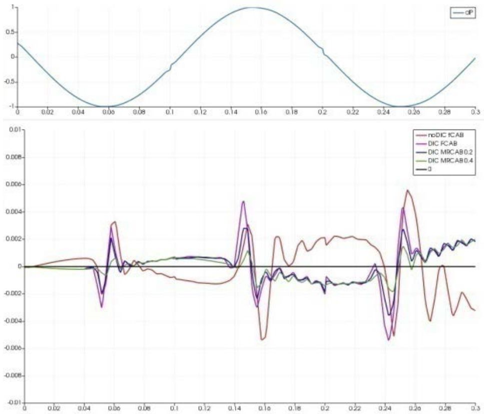




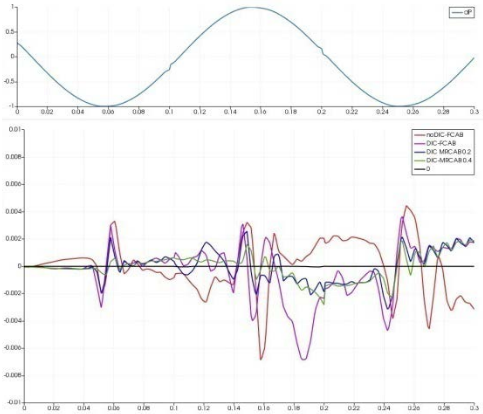
- ## **Тестовые расчёты: прохождение плоской акустической волны через плоский контакт вращающейся и неподвижных сеток**

Контакт тонких коаксиальных сеток ротор/статор, *R*=0.1м, *M*=64, ошибка прохождения волны при разных скоростях вращения

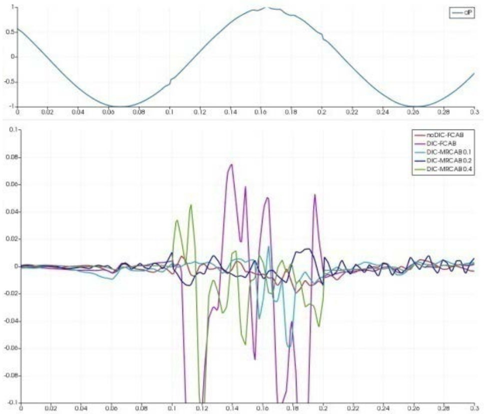
ω=1рад/с



ω=10рад/с

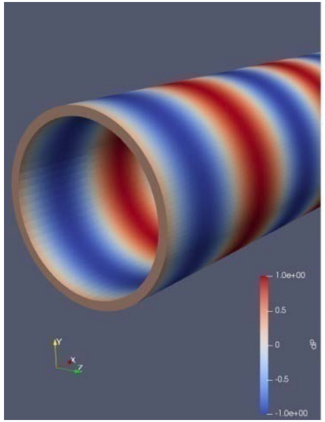


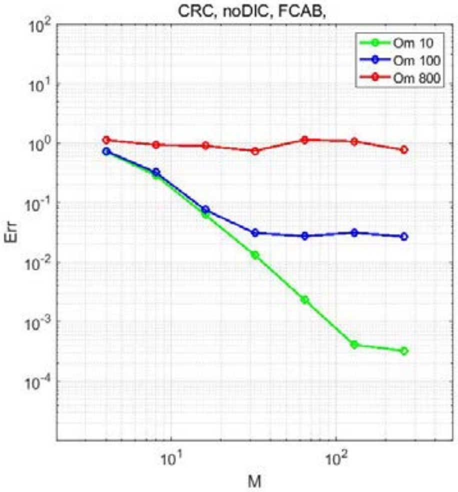
ω=100рад/с

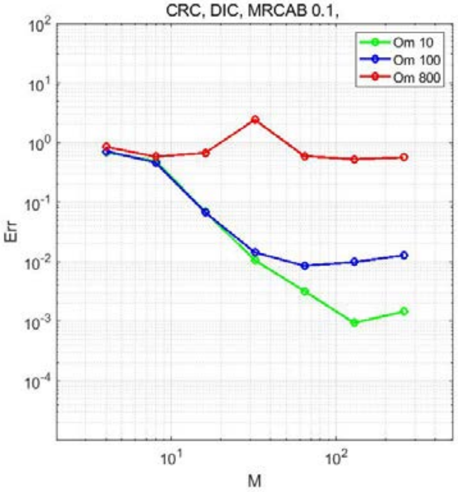


• Тестовые расчёты: прохождение плоской акустической волны через плоский контакт вращающейся и неподвижных сеток

Контакт тонких коаксиальных сеток ротор/статор, *R*=0.1м, *M*=64
(а) поле течения *M*=64, (б) Зависимость ошибки от волнового числа без DIC, (с) с DIC

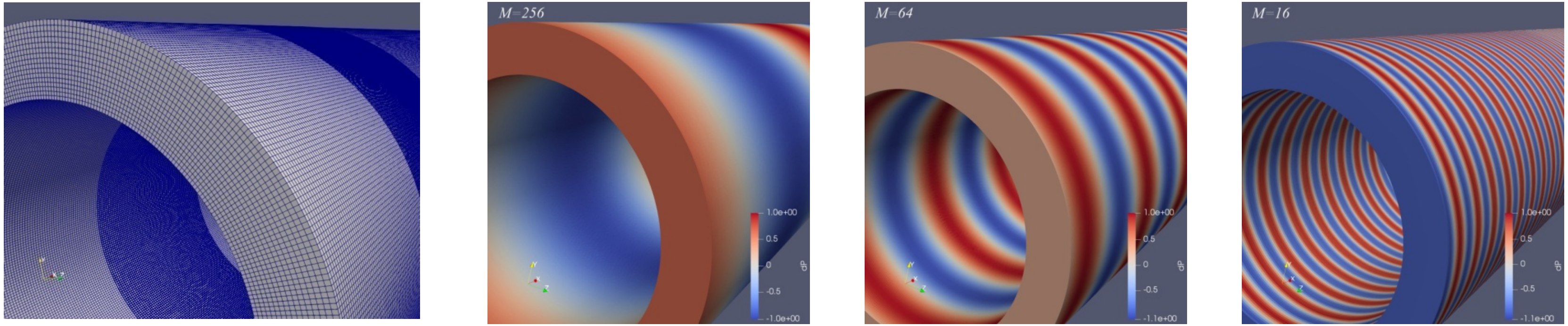




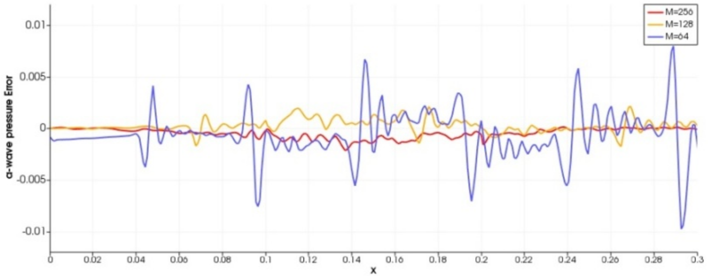


- **Тестовые расчёты: прохождение плоской акустической волны через плоский контакт вращающейся и неподвижных сеток**

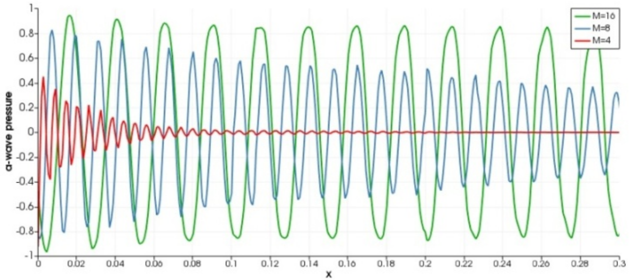
Контакт коаксиальных сеток hi-res, ротор/статор, *R*=0.1м, (а) сетка, (б,в,г) *M*=256, 64, 16, *ω*=100рад/с



(а) Ошибка прохождения волны *M*=256, 128, 64 ;



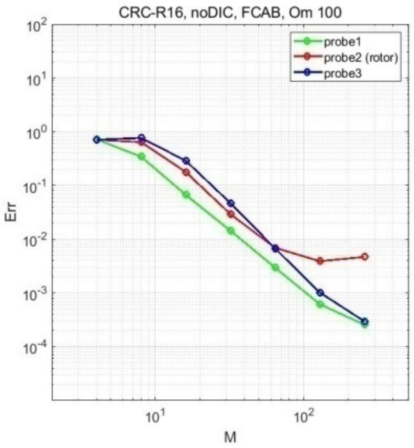
(б) форма волны *p(x)* *M*=16, 8, 4



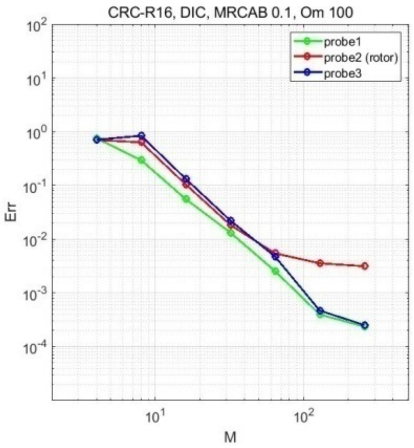
• Тестовые расчёты: прохождение плоской акустической волны через плоский контакт вращающейся и неподвижных сеток

Уменьшение ошибки при увеличении волнового числа *M*

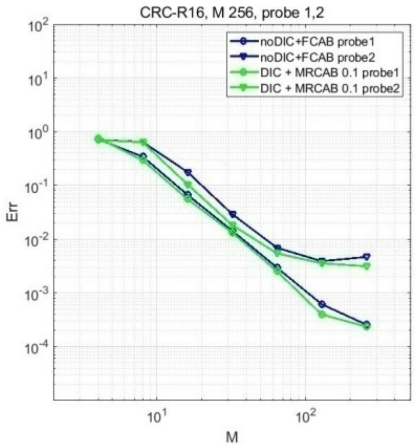
(а) без DIC,



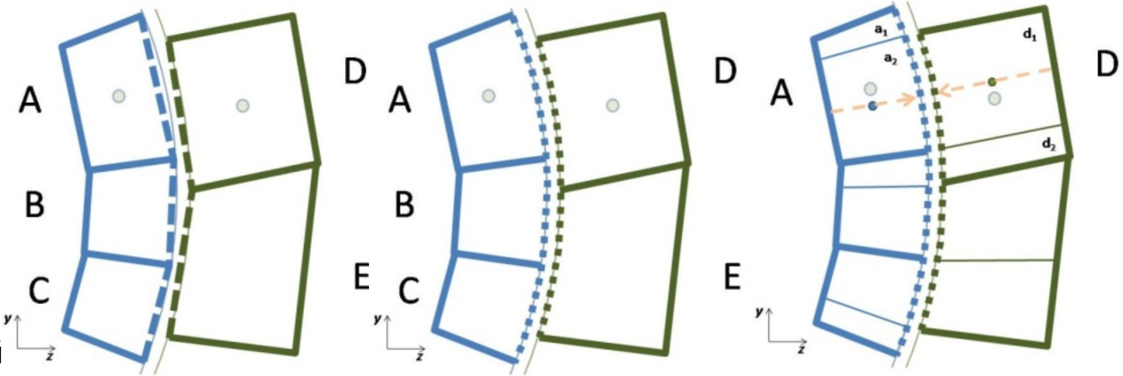
(б) с DIC;



(с) эффект DIC



• Модификация шага экстраполяции для криволинейной поверхности контакта



- Проекция граней на гладкую цилиндрическую контактную поверхность сводит построение пространственного контакта к задаче на поверхности

- Построение «суперсетки» на гладкой цилиндрической поверхности гарантирует попарное равенство потоков через суб-грани «суперсетки» на шаге экстраполяции

$$\mathbf{f}^{n+1}_{m,L+} = \mathbf{f}^{n+1}_{m,R-}$$

и обеспечивает сохранение суммарных потоков через криволинейную контактную поверхность

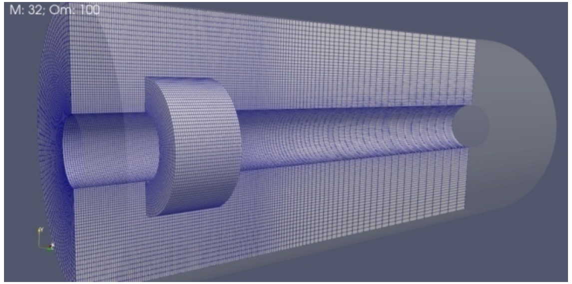
$$\sum_{a=1}^{L}\sum_{m=1}^{Ma} s_{xam+}\mathbf{f}^{n+1}_{am+} = \sum_{d=1}^{R}\sum_{n=1}^{Nd} s_{xdn-}\mathbf{f}^{n+1}_{dn-}$$

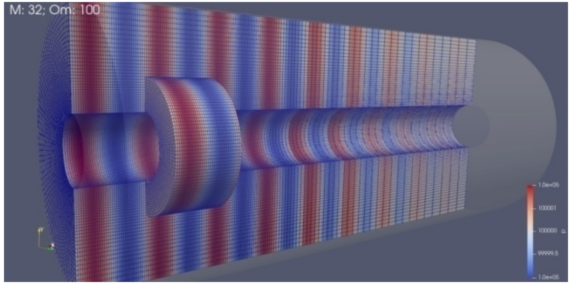
- Модифицированные шаги предиктор/корректор используют суммирование потоков через контактные суб-грани

$$\Omega_A \frac{\mathbf{U}^{n+1/2}_A - \mathbf{U}^n_A}{\tau^n/2} + \left(\sum_{m=1}^{M} s_{xam+}\mathbf{f}^n_{am+} - s_{x-}\mathbf{F}^n_{A-}\right) + \ldots = \Omega_A \mathbf{Q}^n_A;$$

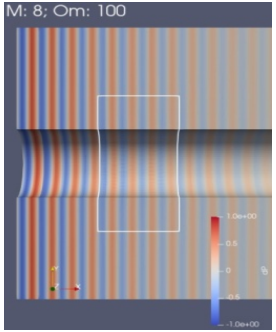
$$\Omega_A \frac{\mathbf{U}^{n+1}_A - \mathbf{U}^{n+1/2}_A}{\tau^n/2} + \left(\sum_{m=1}^{M} s_{xam+}\mathbf{f}^{n+1}_{am+} - s_{x-}\mathbf{F}^{n+1}_{A-}\right) + \ldots = \Omega_A \mathbf{Q}^{n+1/2}_A$$

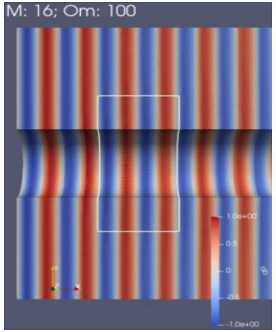
• Тестовые расчёты: прохождение плоской акустической волны вдоль скользящего цилиндрического контакта вращающейся и неподвижных сеток

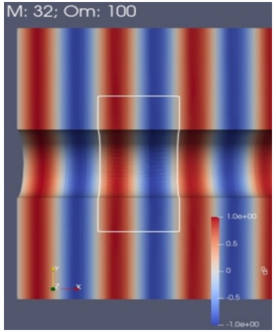


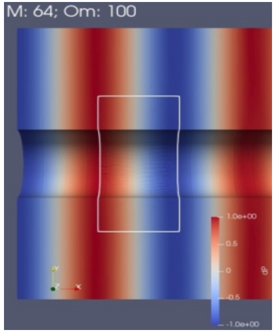


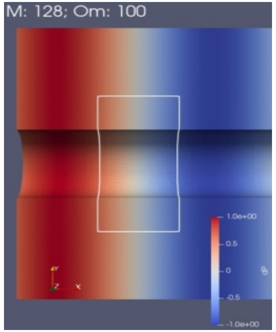
Контакт коаксиальных сеток ротор/статор (контуром выделена зона ротора), R=0.1м, ω=100рад/с, M=8-128





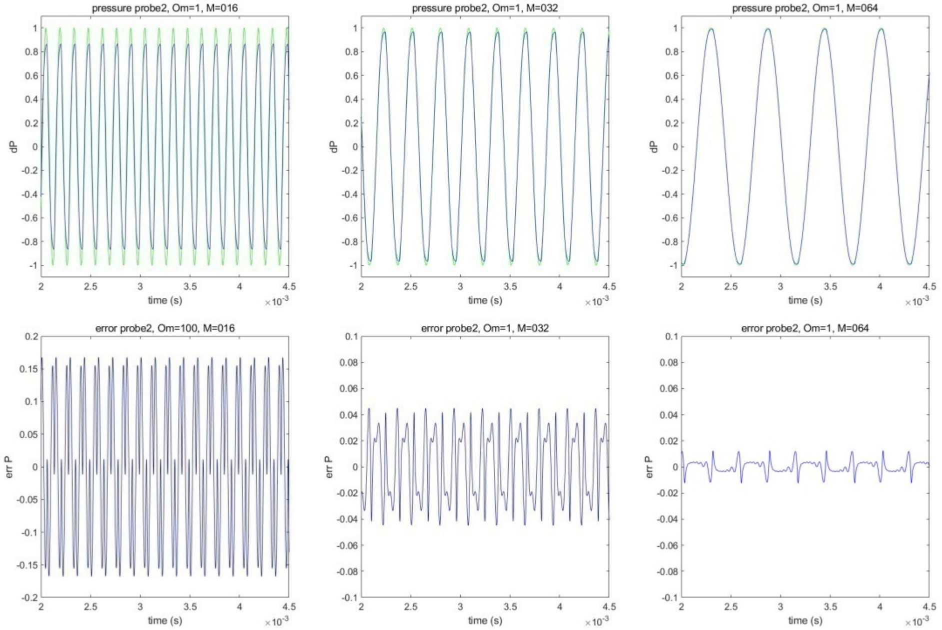




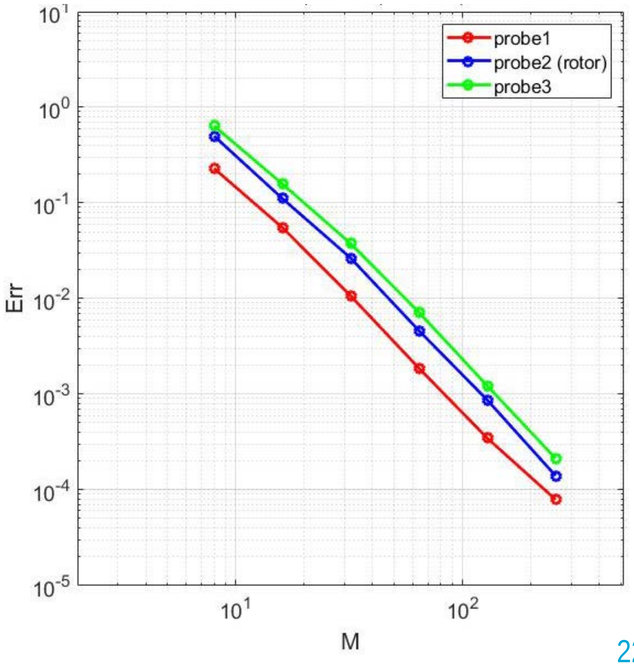


• Тестовые расчёты: прохождение плоской акустической волны вдоль скользящего контакта вращающейся и неподвижных сеток

Прохождение волны и ошибка при «медленном» вращении ω=1рад/с, M=16, 32, 64

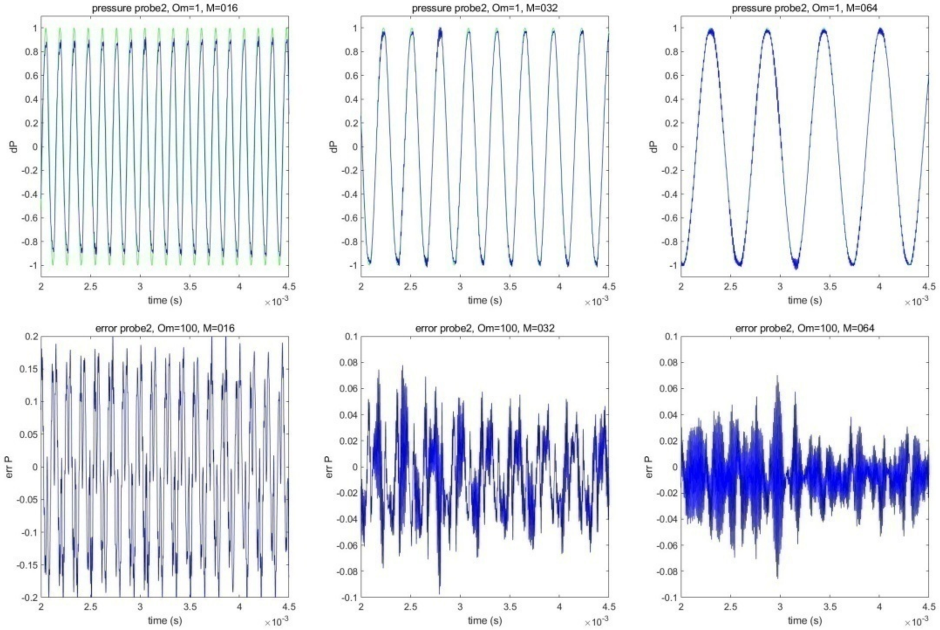


Уменьшение ошибки с ростом волнового числа M

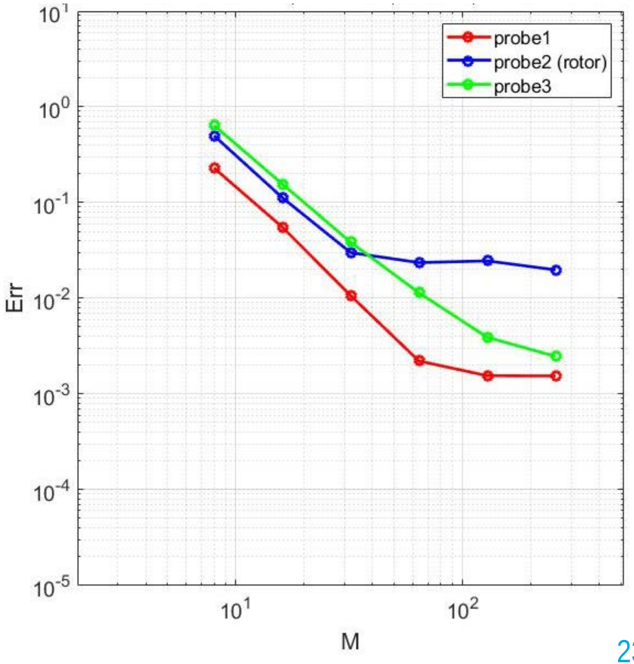


• Тестовые расчёты: прохождение плоской акустической волны вдоль скользящего контакта вращающейся и неподвижных сеток

Прохождение волны и ошибка при «быстром» вращении ω=100рад/с, M=16, 32, 64



Уменьшение ошибки с ростом волнового числа M

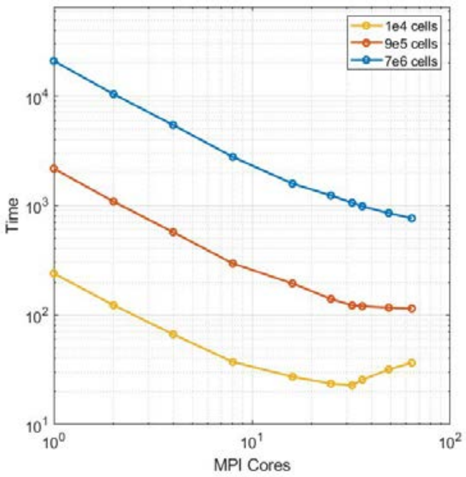


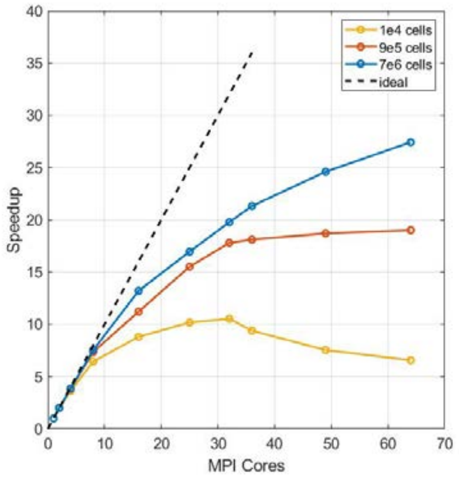
• MPI версия кода. Масштабируемость и эффективность.

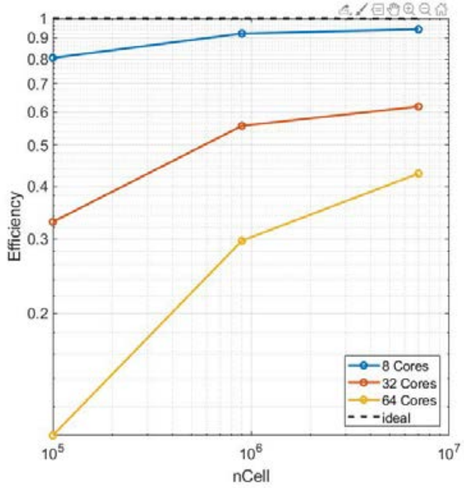
$$\textit{Время CPU}\ \ (1'000\ \textit{шагов})$$

$$Speedup = \frac{T_1}{T_N};$$

$$Efficiency = \frac{T_1}{T_N N}$$

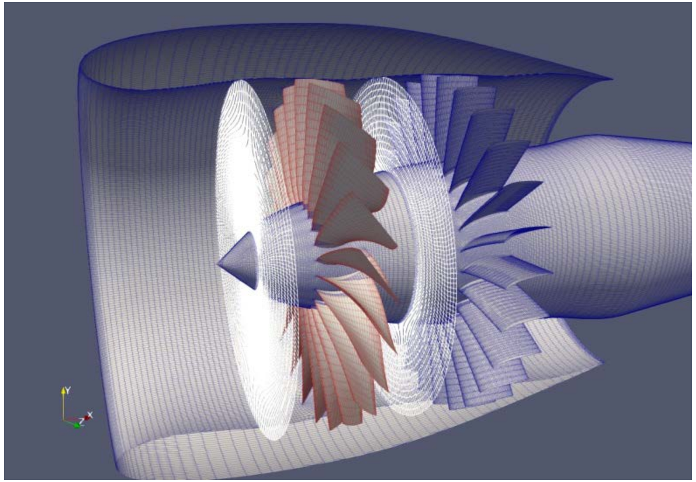


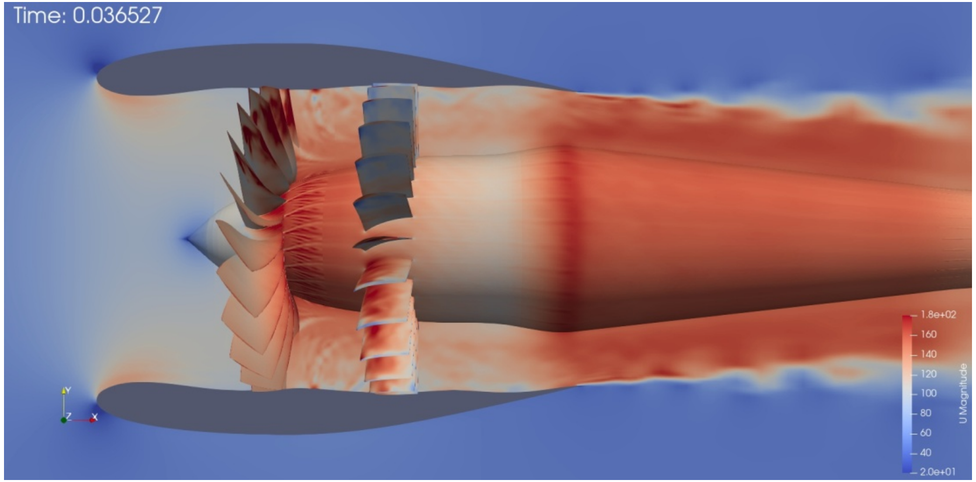




• 3d-тест ротор-статор в канале

- Тестовая конфигурация [8], R ~ 0.28м, Lduct ~ 0.88м, Ω = 7807 об/мин, Nrotor=22, Nstator=26, U=50 м/с.
  Сетка 7 млн ячеек, (ротор 1.4 млн). CPUtime(64 ядра)=230ч (250’000 шагов, 5 оборотов)
  Геометрия ротор-статора, поле скоростей в сечении.





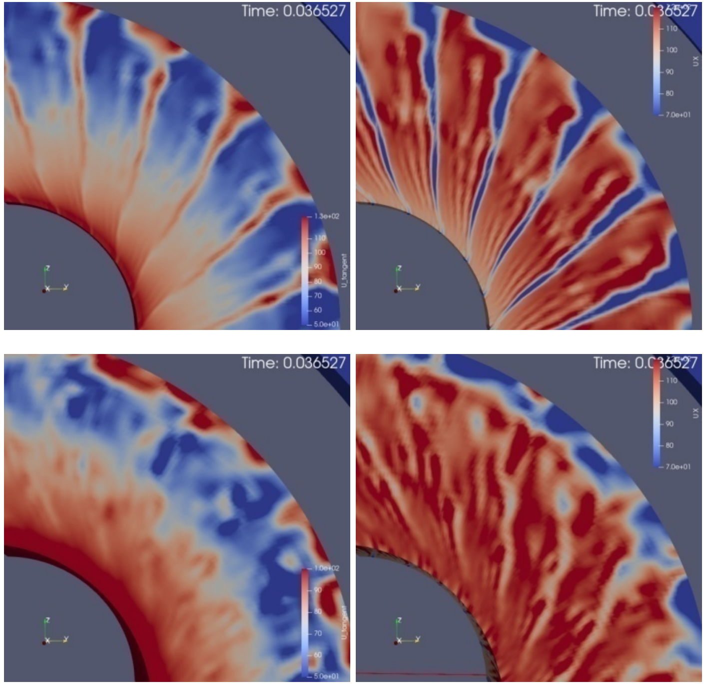
[8] Gary G. Podboy, Martin J. Krupar, Stephen M. Helland, and Christopher E. Hughes, Steady and Unsteady Flow Field Measurements Within a NASA 22-Inch Fan Model, NASA/TM—2003-212329

• 3d-тест ротор-статор в канале

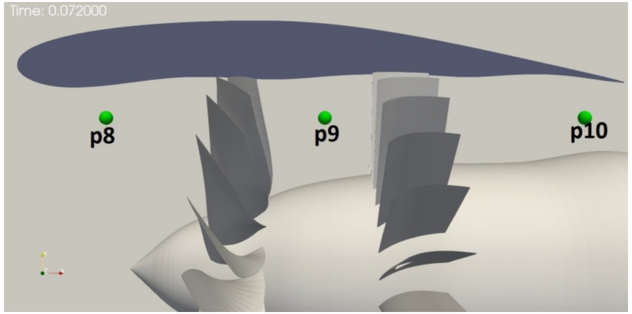
- Поля p и Ux в двух сечениях между ротором и статором

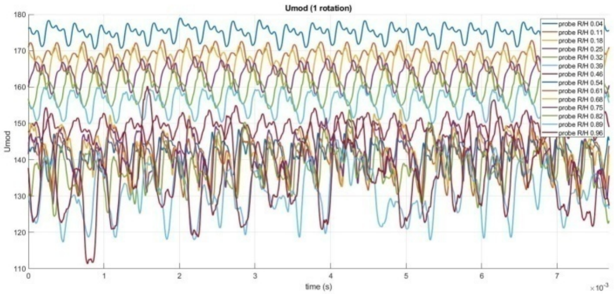
X=23mm
(TE)

X=79mm
(p9)



- Расположение контрольных сечений
  и измерения U(t) в сечении p9.



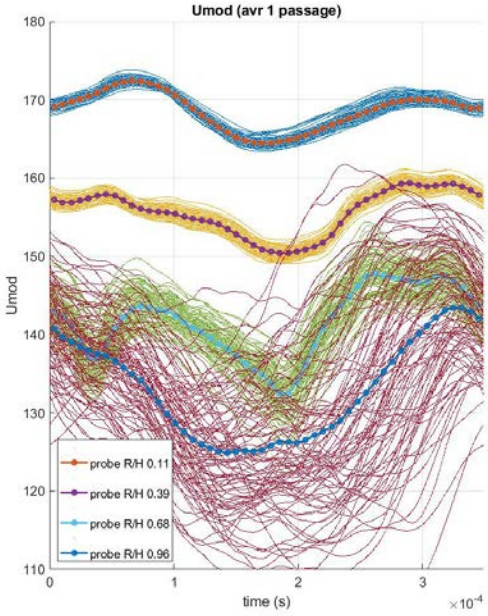


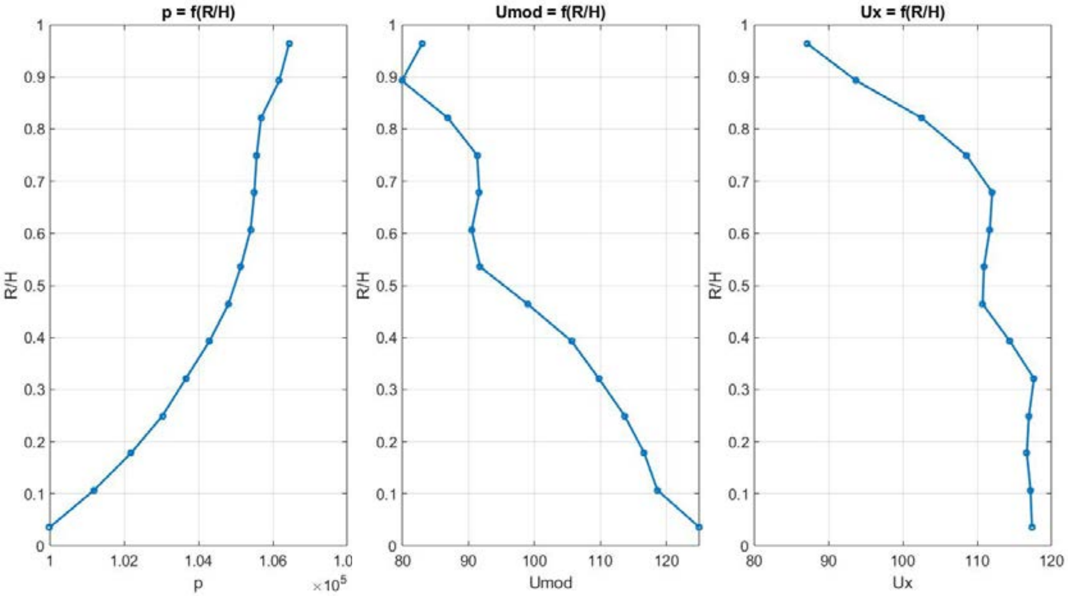
• 3d-тест ротор-статор в канале

- Осреднение результатов:

(а) Исходные данные (сечение p9) и осреднённое распределение вдоль одного пассажа для разных радиусов

(б) Распределение по радиусу (полное осреднение по 5 оборотам) p, U, Ux

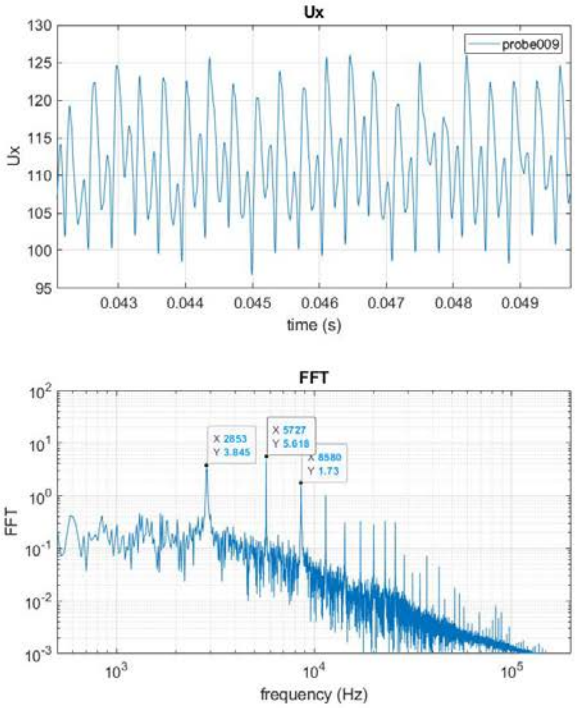


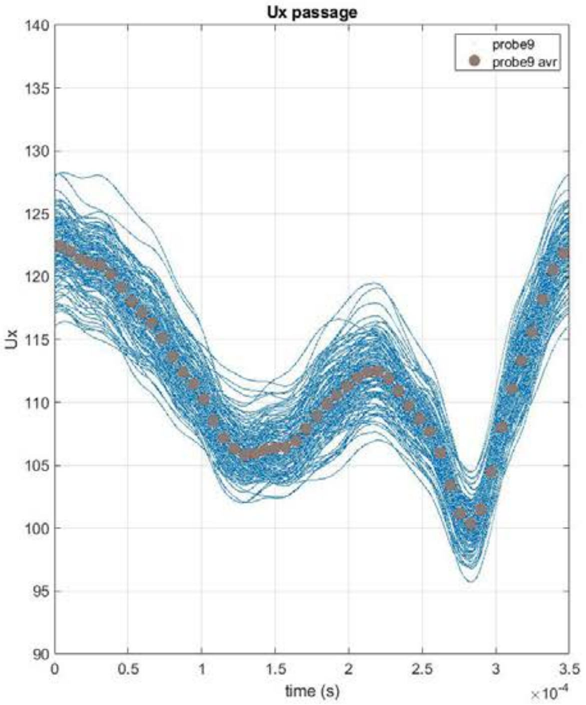


[*]

• 3d-тест ротор-статор в канале

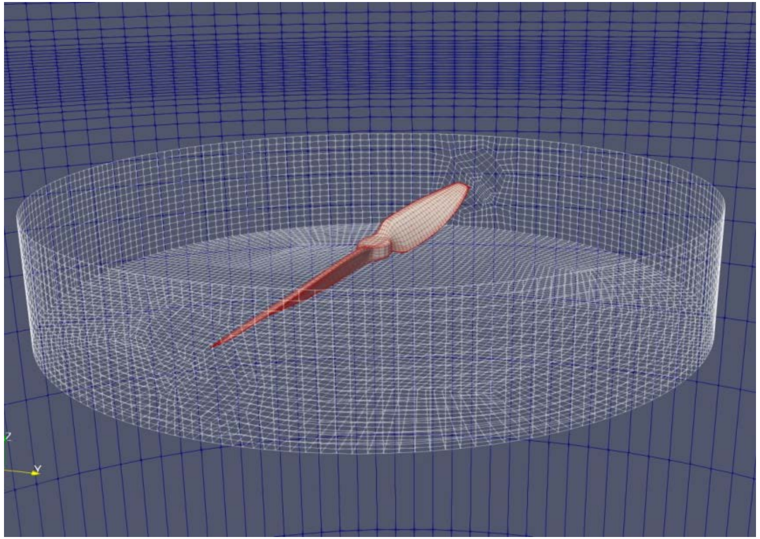
- Измерения, осреднённые и спектральные и спектральные характеристики в сечении p9 (R=0.22 м)

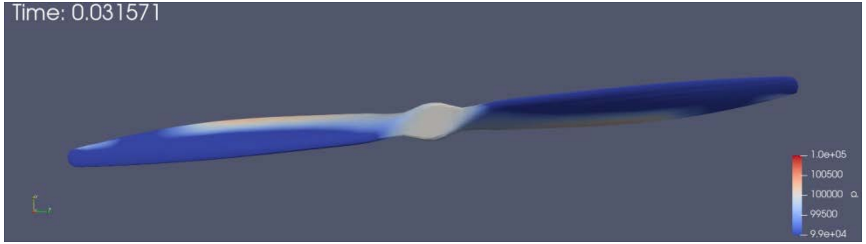


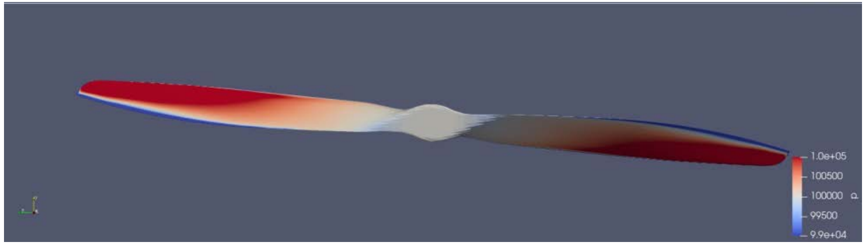


• 3d-тест открытый ротор-пропеллер

- R ~ 0.15 м, Ω = 5730 об/с, U=0 . Сетка 400’000 ячеек (ротор 100’000). Tcpu(64 ядра)=30 ч (1.5 млн шагов)
  Общий вид сетки, распределение давления на верхней и нижней поверхностях пропеллера (3 оборота)

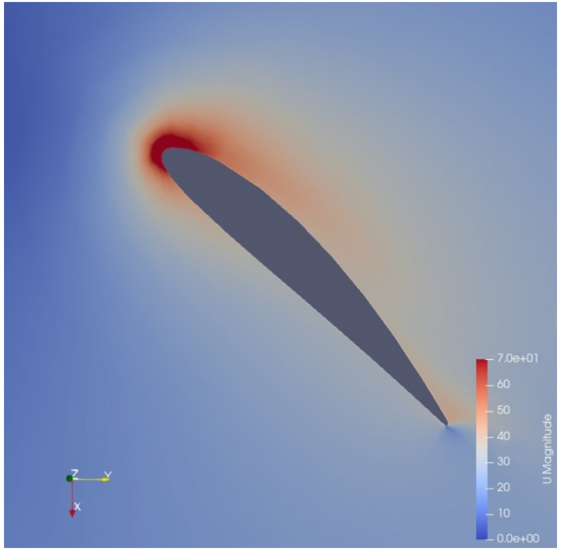


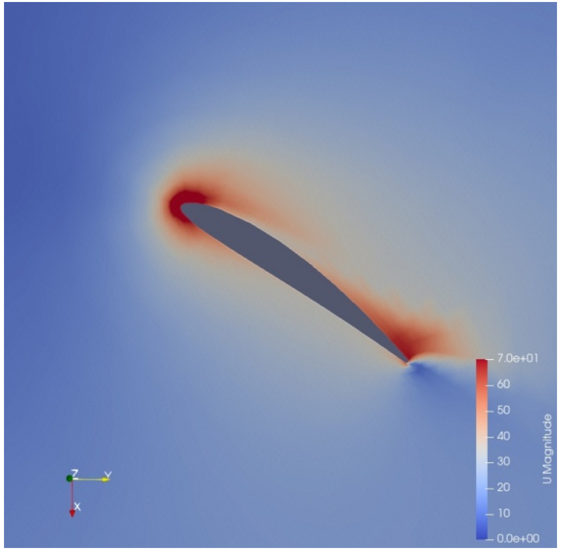


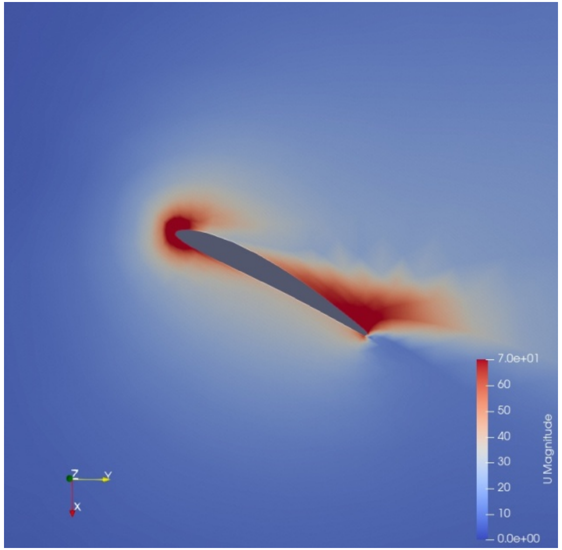


• 3d-тест открытый ротор-пропеллер

- Поле давлениz, скорости и завихренности после 3 оборотов, 50%, 70%, 90% по размаху

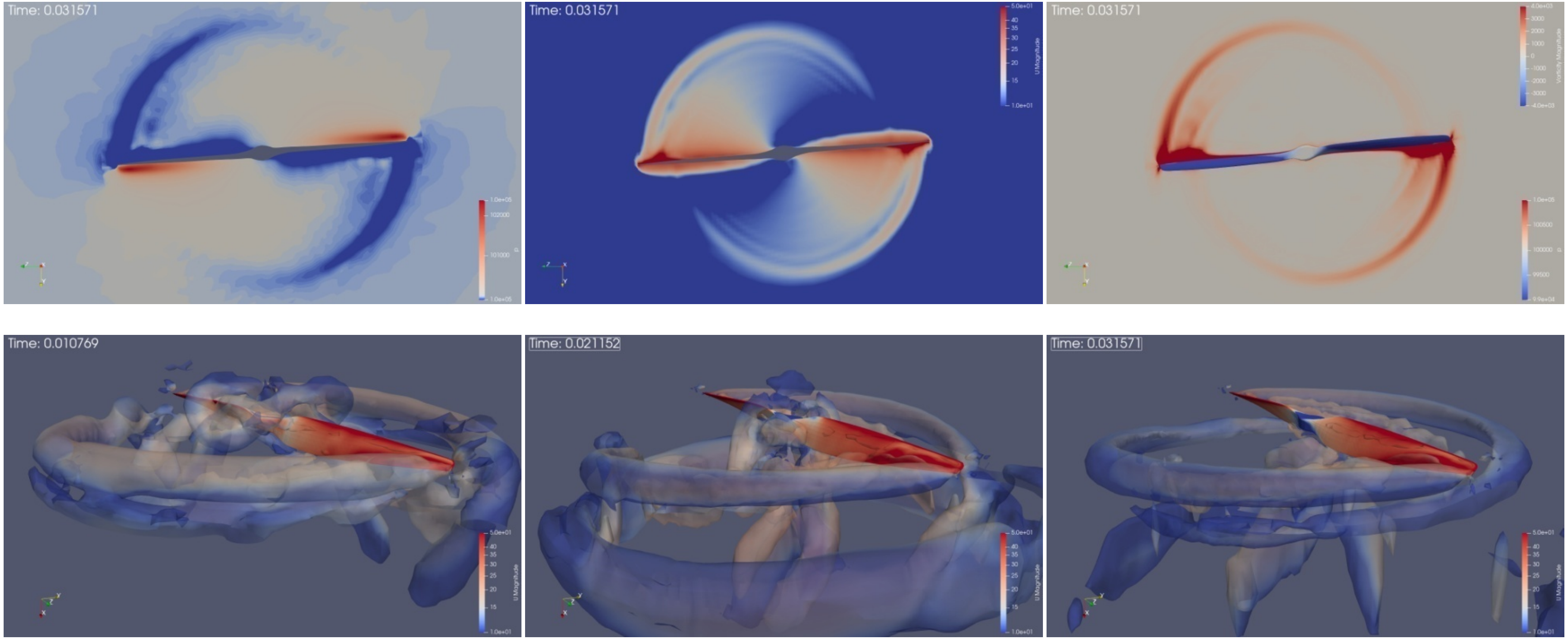






• 3d-тест открытый ротор-пропеллер

- Поле давлений, скорости и завихренности после 3 оборотов



(внизу – 1, 2, 3 оборота пропеллера)

Алгоритм CABARET решения уравнений Навье-Стокса расширен для неинерциальных вращающихся зон со скользящими границами. Расширение основано на рассмотрении законов сохранения в виде гиперболической части и нелинейных источников. Использование относительных скоростей сохраняет неизменной гиперболическую часть уравнений в неинерциальной системе координат, и добавление нелинейных источников неинерциальных сил позволяет унифицировать модификацию алгоритма CABARET.

Алгоритм CABARET решения уравнений Навье-Стокса расширен для неинерциальных вращающихся зон со скользящими границами. Расширение основано на рассмотрении законов сохранения в виде гиперболической части и нелинейных источников. Использование относительных скоростей сохраняет неизменной гиперболическую часть уравнений в неинерциальной системе координат, и добавление нелинейных источников неинерциальных сил позволяет унифицировать модификацию алгоритма CABARET.

Особое внимание уделено модификации алгоритма на скользящей границе между вращающейся и неподвижной зонами сетки. Разработан метод, обеспечивающий сохранение потока через плоскую и криволинейную скользящую контактную поверхность, который основан на введении подсеточного измельчения контактирующих ячеек, при этом зона контакта рассчитывается с использованием эволюционного подхода.

Алгоритм CABARET решения уравнений Навье-Стокса расширен для неинерциальных вращающихся зон со скользящими границами. Расширение основано на рассмотрении законов сохранения в виде гиперболической части и нелинейных источников. Использование относительных скоростей сохраняет неизменной гиперболическую часть уравнений в неинерциальной системе координат, и добавление нелинейных источников неинерциальных сил позволяет унифицировать модификацию алгоритма CABARET.

Особое внимание уделено модификации алгоритма на скользящей границе между вращающейся и неподвижной зонами сетки. Разработан метод, обеспечивающий сохранение потока через плоскую и криволинейную скользящую контактную поверхность, который основан на введении подсеточного измельчения контактирующих ячеек, при этом зона контакта рассчитывается с использованием эволюционного подхода.

Кроме того, метод CABARET с улучшенной дисперсией и модифицированной нелинейной коррекцией потоков распространён на неоднородные вращающиеся сетки, что улучшает спектральное разрешение схемы при распространении волн высокой частоты.

Алгоритм CABARET решения уравнений Навье-Стокса расширен для неинерциальных вращающихся зон со скользящими границами. Расширение основано на рассмотрении законов сохранения в виде гиперболической части и нелинейных источников. Использование относительных скоростей сохраняет неизменной гиперболическую часть уравнений в неинерциальной системе координат, и добавление нелинейных источников неинерциальных сил позволяет унифицировать модификацию алгоритма CABARET.

Особое внимание уделено модификации алгоритма на скользящей границе между вращающейся и неподвижной зонами сетки. Разработан метод, обеспечивающий сохранение потока через плоскую и криволинейную скользящую контактную поверхность, который основан на введении подсеточного измельчения контактирующих ячеек, при этом зона контакта рассчитывается с использованием эволюционного подхода.

Кроме того, метод CABARET с улучшенной дисперсией и модифицированной нелинейной коррекцией потоков распространён на неоднородные вращающиеся сетки, что улучшает спектральное разрешение схемы при распространении волн высокой частоты.

Численные примеры демонстрируют, что разработанные модификации схемы КАБАРЕ на вращающихся сетках позволяют получать решения без заметных артефактов. В тестах распространения акустических волн модифицированный алгоритм показывает ожидаемый порядок скорости уменьшения ошибки в соответствии с порядком аппроксимации как для плоских, так и для цилиндрических скользящих поверхностей контакта сеток. При этом ошибка связанная с вращением сетки не превышает нескольких процентов от амплитуды акустической волны даже на относительно грубых сетках.

Алгоритм CABARET решения уравнений Навье-Стокса расширен для неинерциальных вращающихся зон со скользящими границами. Расширение основано на рассмотрении законов сохранения в виде гиперболической части и нелинейных источников. Использование относительных скоростей сохраняет неизменной гиперболическую часть уравнений в неинерциальной системе координат, и добавление нелинейных источников неинерциальных сил позволяет унифицировать модификацию алгоритма CABARET.

Особое внимание уделено модификации алгоритма на скользящей границе между вращающейся и неподвижной зонами сетки. Разработан метод, обеспечивающий сохранение потока через плоскую и криволинейную скользящую контактную поверхность, который основан на введении подсеточного измельчения контактирующих ячеек, при этом зона контакта рассчитывается с использованием эволюционного подхода.

Кроме того, метод CABARET с улучшенной дисперсией и модифицированной нелинейной коррекцией потоков распространён на неоднородные вращающиеся сетки, что улучшает спектральное разрешение схемы при распространении волн высокой частоты.

Численные примеры демонстрируют, что разработанные модификации схемы КАБАРЕ на вращающихся сетках позволяют получать решения без заметных артефактов. В тестах распространения акустических волн модифицированный алгоритм показывает ожидаемый порядок скорости уменьшения ошибки в соответствии с порядком аппроксимации как для плоских, так и для цилиндрических скользящих поверхностей контакта сеток. При этом ошибка связанная с вращением сетки не превышает нескольких процентов от амплитуды акустической волны даже на относительно грубых сетках.

Реализована MPI-версия кода, обеспечивающая высокую эффективность для сеток высокого разрешения.

Метод опробован для моделирования течений при взаимодействия ротора и статора в канале турбомашины и для моделирования открытого ротора-пропеллера.