

ВСЕРОССИЙСКИЙ
АЭРОАКУСТИЧЕСКИЙ
ФОРУМ

20-25 сентября, 2021 г., ГЕЛЕНДЖИК



VIII РОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ
ЭКСПЕРИМЕНТ
В АЭРОАКУСТИКЕ
И АЭРОДИНАМИКЕ



20 - 25 сентября 2021 года, Геленджик

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

Солнцев И.А., Карabasов С.А.

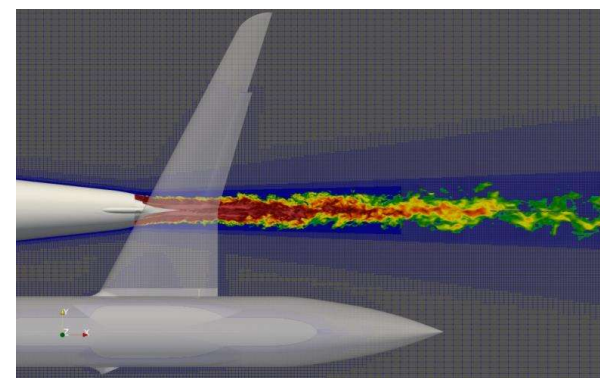
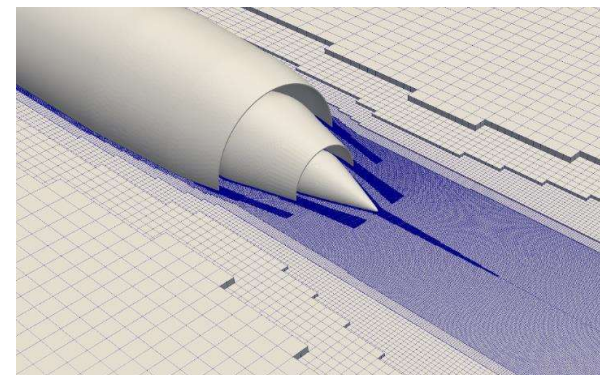
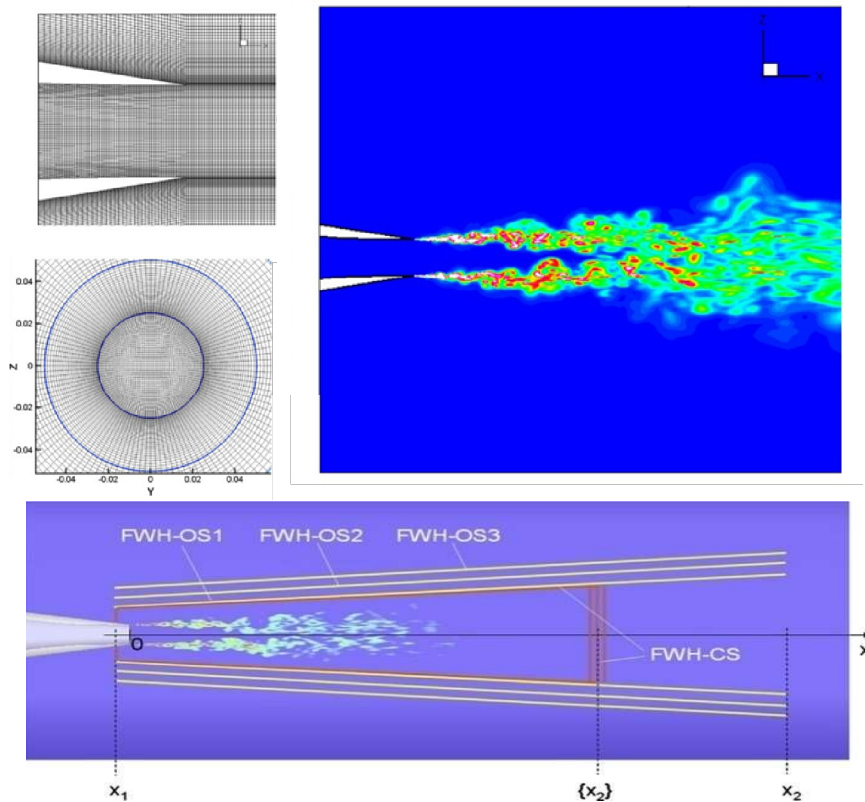
Подготовлена в рамках реализации Программы создания и развития научного центра мирового уровня «Сверхзвук» на 2020-2025 годы при финансовой поддержке Минобрнауки России (соглашение от 8 декабря 2020 г. № 075-11-2020-023)

● Базовый алгоритм SABARET

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

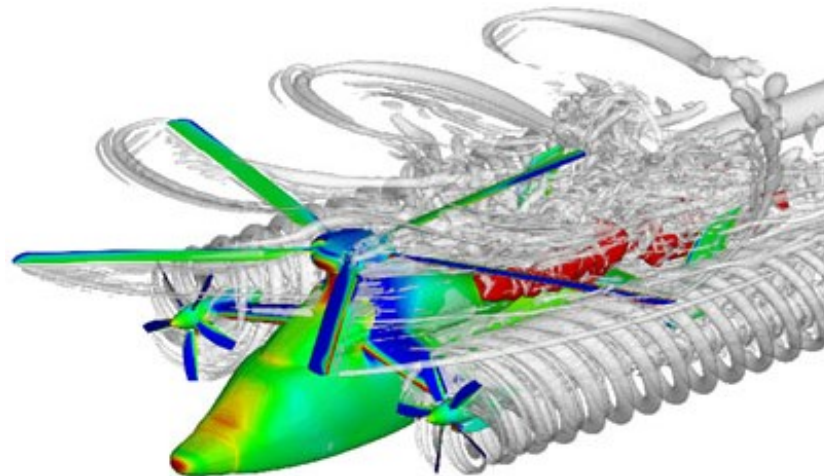
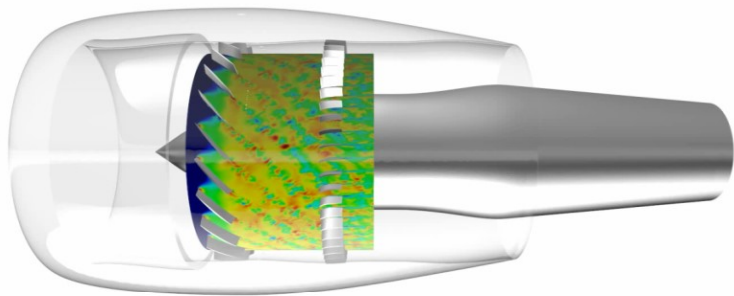
• Алгоритм CABARET на сетках openFoam в задачах аэроакустики



[1] Georgy A. Faranosov, Vasily M. Goloviznin, Sergey A. Karabasov, Vasily G. Kondakov, Victor F. Koviev, 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)

● Цель: развитие метода SABARET для задач аэроакустики с вращающимися несущими элементами



(1) SDT Fan Noise prediction*; (2) CityAirbus; (3) Urban Elevate; (4) Airbus Racer**

* 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference; ** 75th Vertical 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 \mathbf{U} вектор консервативных переменных, $U = u, V = v, W = w$ скорости, $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{H}$ - потоки, \mathbf{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 SAVARET во вращающейся зоне

●ⁿ ●^{n+1/2} ●ⁿ⁺¹

(1) Предиктор

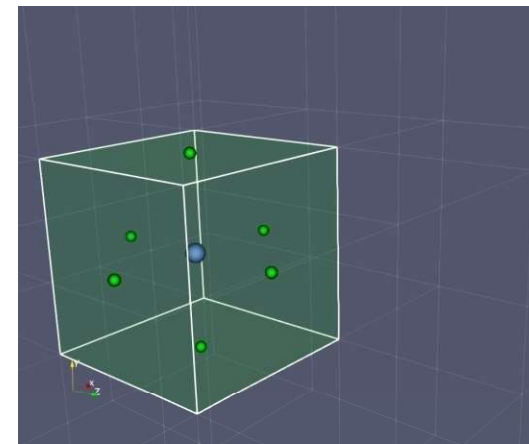
$$\Omega \frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \iint_{S(\Omega)} \mathbf{F}(\mathbf{U}) dn_x + \iint_{S(\Omega)} \mathbf{G}(\mathbf{U}) dn_y + \iint_{S(\Omega)} \mathbf{H}(\mathbf{U}) dn_z = \Omega \bar{Q}(\mathbf{U})$$

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

$$\Omega_c \frac{U_c^{n+1/2} - U_c^n}{\tau^n / 2} + (s_x F_{c+}^n - s_x F_{c-}^n) + (s_y G_{c+}^n - s_y G_{c-}^n) + (s_z H_{c+}^n - s_z H_{c-}^n) = \Omega_c Q_c^n$$

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

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



$$\frac{U_c^{n+1/2} - U_c^n}{\tau^n / 2} + \frac{F_{c+}^n - F_{c-}^n}{h_x} + \frac{G_{c+}^n - G_{c-}^n}{h_y} + \frac{H_{c+}^n - H_{c-}^n}{h_z} = Q_c^n$$

$$\underline{Q = Q_v + Q_{nin}}$$

● Алгоритм SABARET во вращающейся зоне

(2) Характеристическая экстраполяция

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

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

Нелинейная коррекция (принцип максимума)

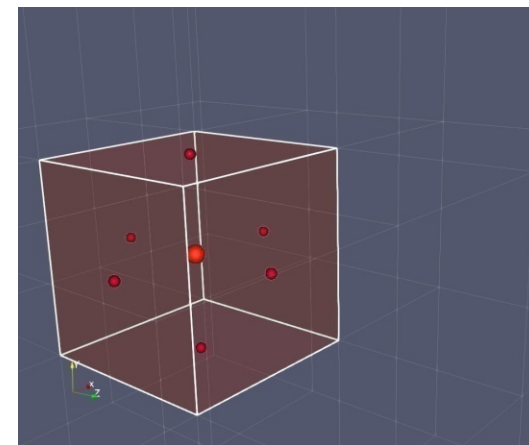
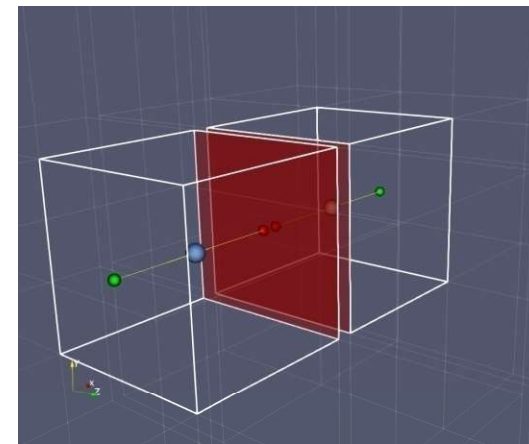
$$\mathbf{R}_{\pm}^{n+1} = \tilde{\mathbf{R}}_{\pm}^{n+1} + \delta_{\min\max}(\mathbf{R}_{\mp}^n, \mathbf{R}_c^n, \mathbf{R}_c^{n+1/2})$$

Реконструкция потоков

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

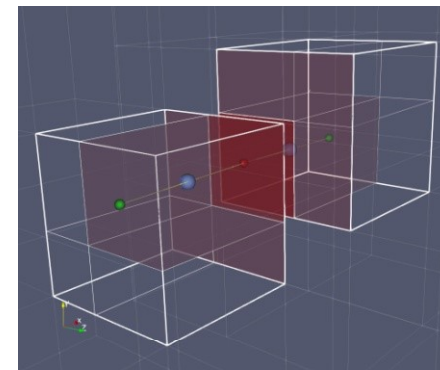
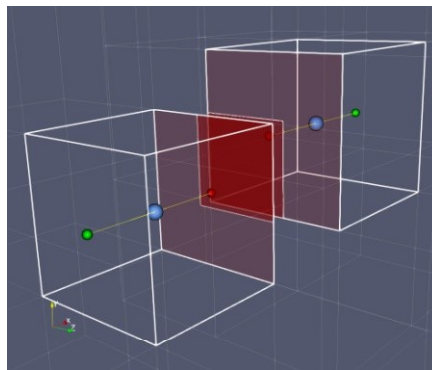
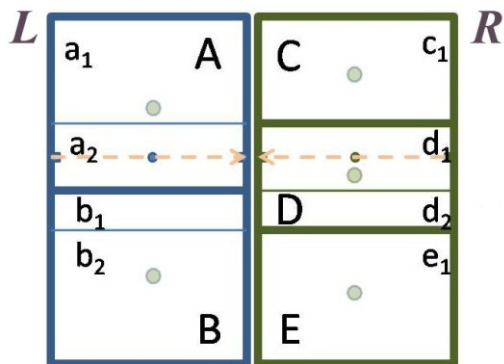
(3) Корректор

$$\frac{U_c^{n+1} - U_c^{n+1/2}}{\tau^n / 2} + \frac{F_{c+}^{n+1} - F_{c-}^{n+1}}{h_x} + \frac{G_{c+}^{n+1} - G_{c-}^{n+1}}{h_y} + \frac{H_{c+}^{n+1} - H_{c-}^{n+1}}{h_z} = Q_c^{n+1/2}$$



• 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-границы «суперсетки» на шаге экстраполяции

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

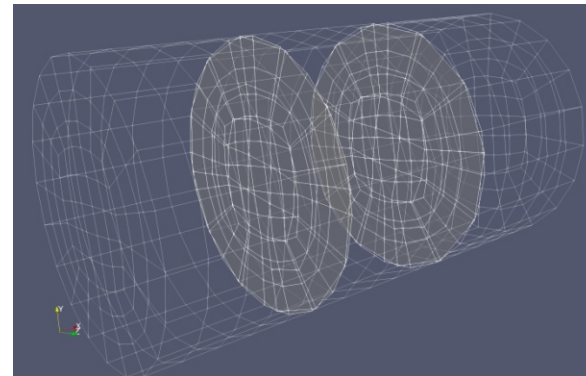
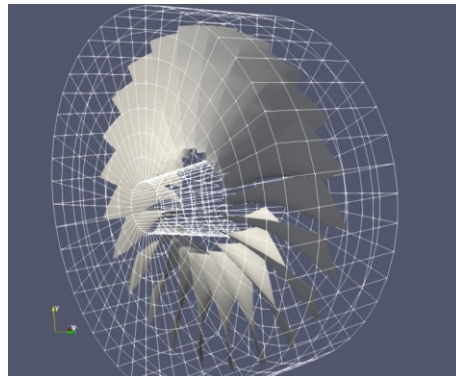
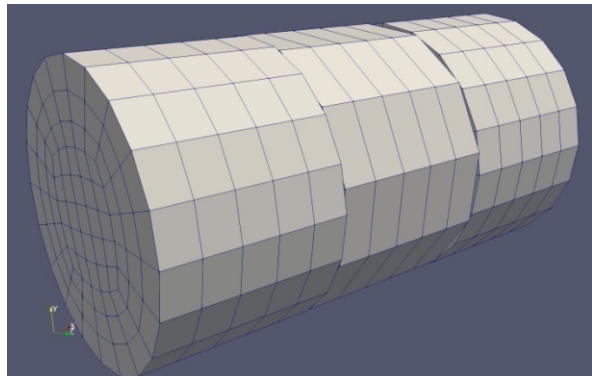
и обеспечивает сохранение суммарных потоков через всю контактную поверхность

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

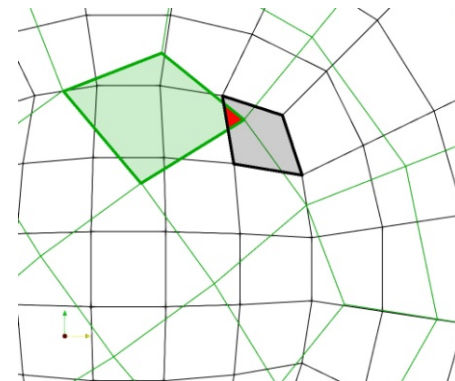
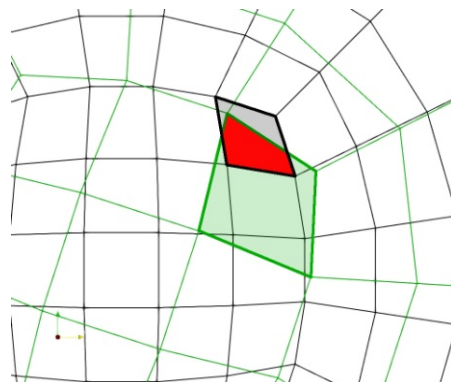
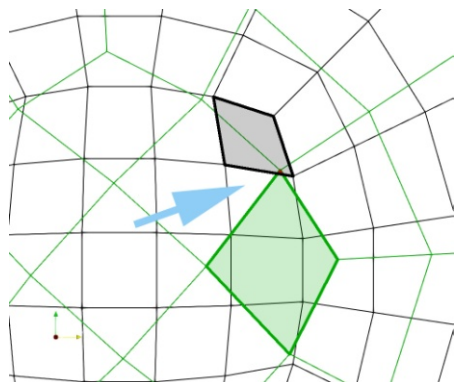
- Модифицированные шаги предиктор/корректор используют суммирование потоков через контактные суб-границы

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

• Эволюция контактных суб-граней

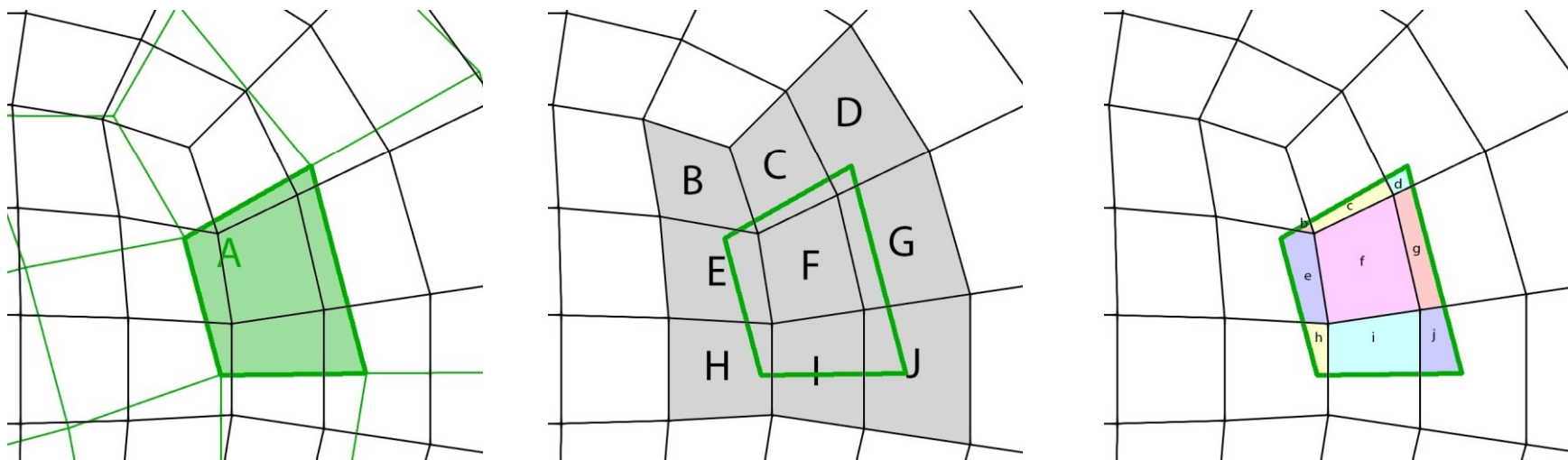


Инициализация суб-граней по характеристикам «лагранжевых» контактных частиц, эволюция «лагранжевых» суб-граней



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

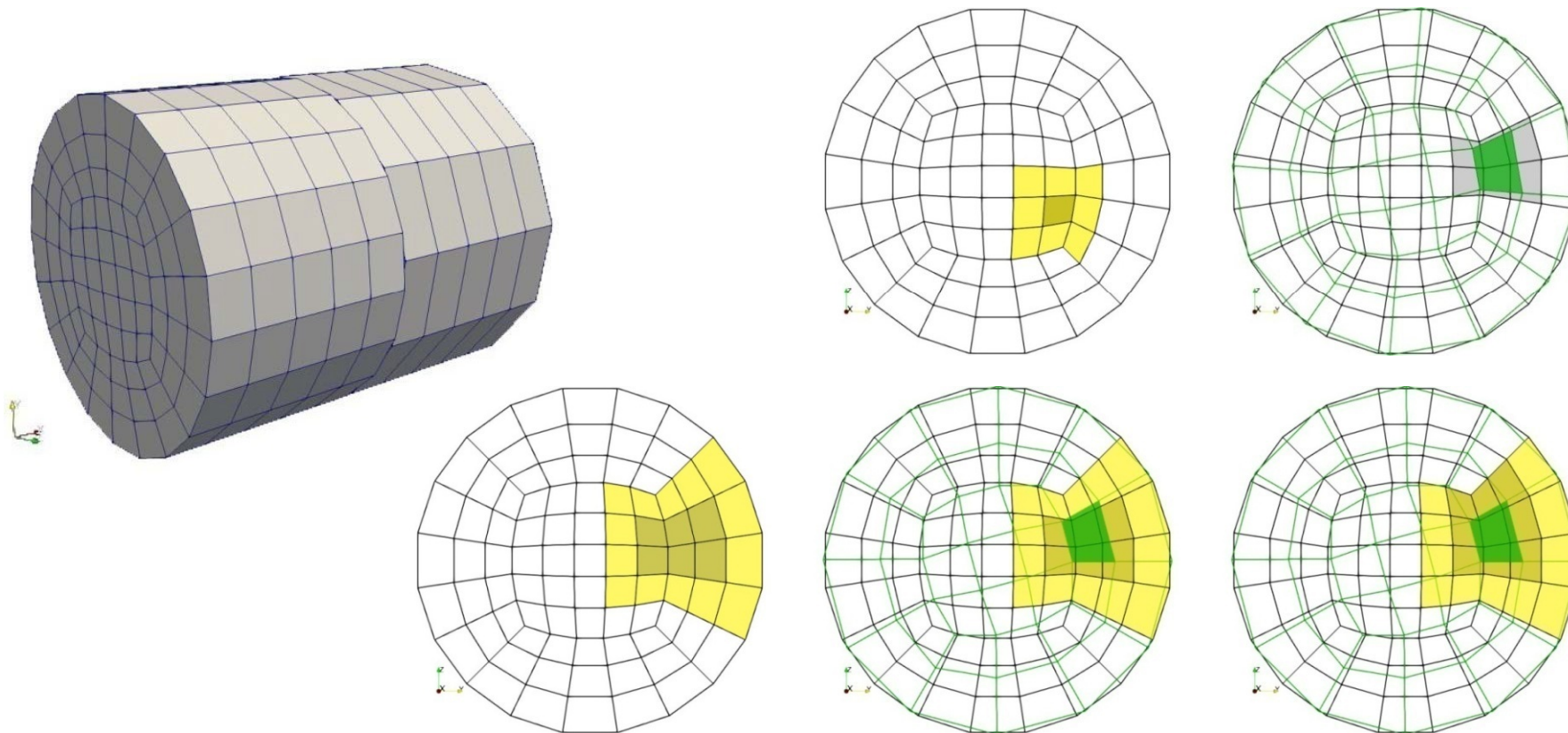
Построение списка контактов/пересечения $A \cap B, C, D, \dots$ с ненулевой площадью суб-граней/пересечения (S_b, S_c, S_d, \dots)



[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

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

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

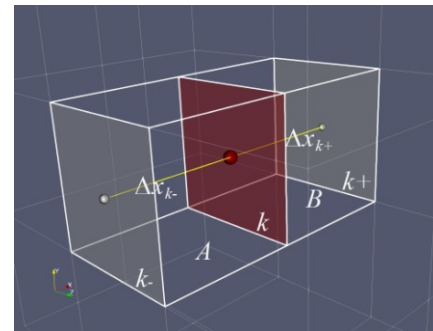
где $\Delta l, \Delta l_x, \Delta x_{k+}, \Delta x_{k-}$ расстояния между центрами и гранями ячеек, a скорость звука, \mathbf{u} вектор скорости,

$$\tilde{\mathbf{F}}_k^m = \mathbf{F}_k^m + \delta \tilde{\mathbf{F}}_k^m; \quad \partial \tilde{\mathbf{F}} = \varepsilon_{dump} \partial \mathbf{F}; \quad \varepsilon_{dump} = \frac{\langle \Delta \mathbf{x}_{k+}, \Delta \mathbf{x}_{k-} \rangle}{|\Delta \mathbf{x}_{k+}| \cdot |\Delta \mathbf{x}_{k-}|} \leq 1 \text{ коэффициент демпфирования на криволинейных сетках}$$

$$\left(\begin{array}{l} \Omega_A \frac{\mathbf{U}_A^{n+1/2} - \mathbf{U}_A^n}{\tau^n / 2} + \sum_{S_k} \tilde{\mathbf{F}}_k^n \Delta n_{x,k} + \sum_{S_k} \tilde{\mathbf{G}}_k^n \Delta n_{y,k} + \sum_{S_k} \tilde{\mathbf{H}}_k^n \Delta n_{x,k} = \Omega_A \mathbf{Q}_A^n \\ \Omega_A \frac{\mathbf{U}_A^{n+1} - \mathbf{U}_A^{n+1/2}}{\tau^n / 2} + \sum_{S_k} \tilde{\mathbf{F}}_k^{n+1} \Delta n_{x,k} + \sum_{S_k} \tilde{\mathbf{G}}_k^{n+1} \Delta n_{y,k} + \sum_{S_k} \tilde{\mathbf{H}}_k^{n+1} \Delta n_{x,k} = \Omega_A \mathbf{Q}_A^{n+1/2} \end{array} \right)$$

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

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

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

- Для уменьшения диссипации стандартная процедура модифицирована введением корректирующего члена

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

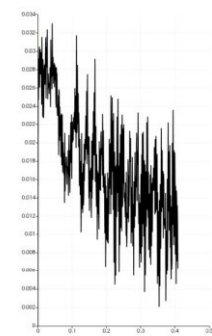
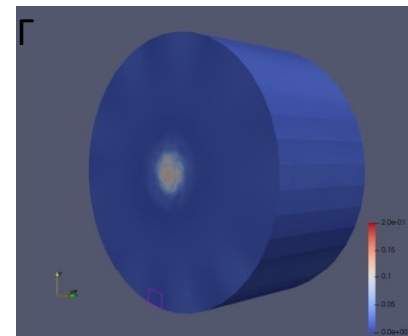
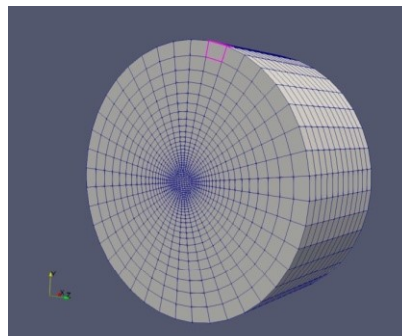
$\varepsilon_{MR} = 0-2$ для плоских волн на однородной сетке,

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

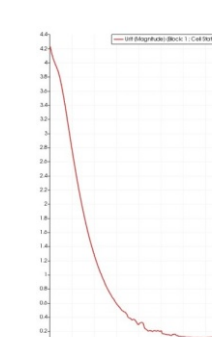
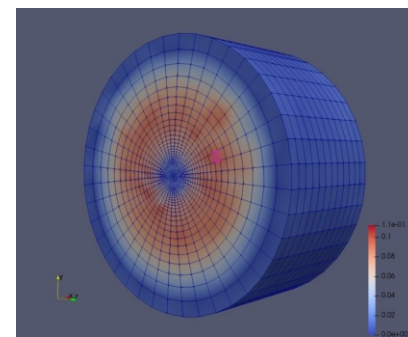
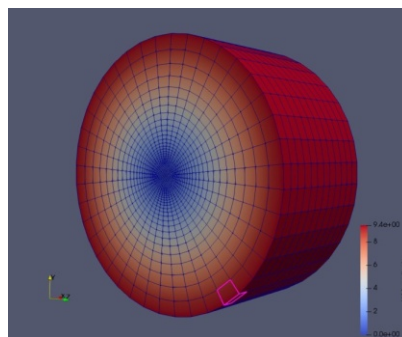
$\varepsilon_{MR} = 0$ стандартный алгоритм CABARET.

• Тестовые расчёты: вращающаяся сетка без контактных поверхностей ($R=0.1$; $\omega=100$ рад/с)

• Вращение сетки в неподвижном потоке (условие проскальзывания на цилиндре)



• Вращение сетки вместе с вращающимся потоком (условие прилипания на цилиндре)



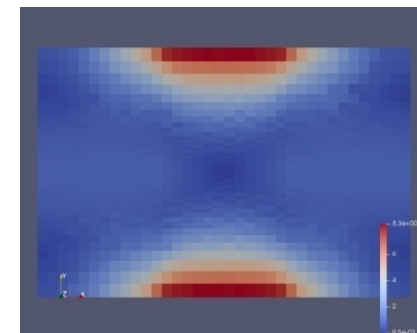
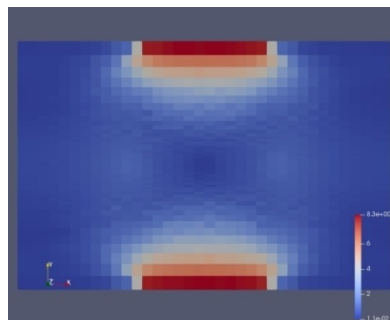
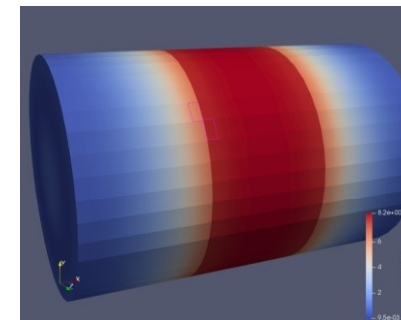
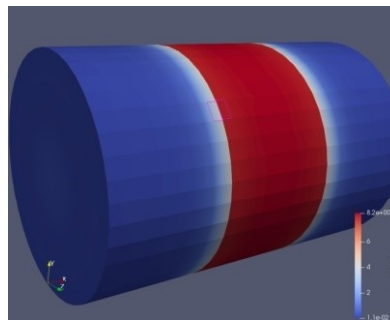
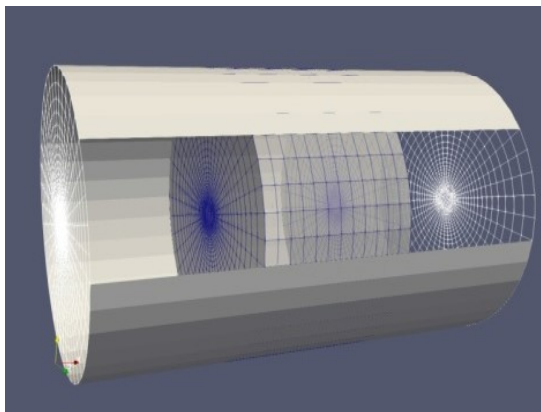
• Тестовые расчёты: плоский контакт вращающейся и неподвижных сеток «ротор-статор» ($R=0.1$; $\omega=100$ рад/с)

На цилиндрической поверхности ротора - условие прилипания

На цилиндрической поверхности статора:

(а) прилипание

(б) проскальзывание



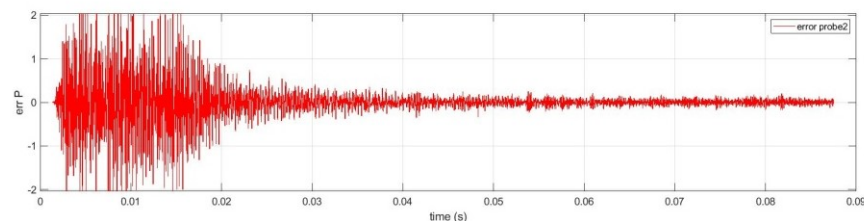
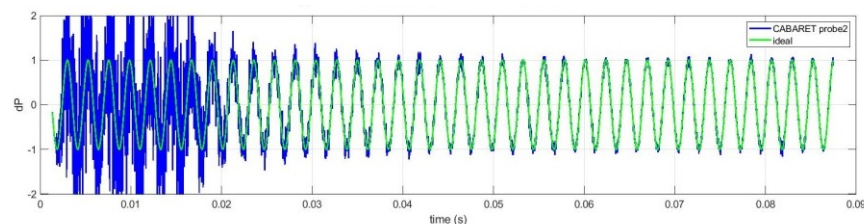
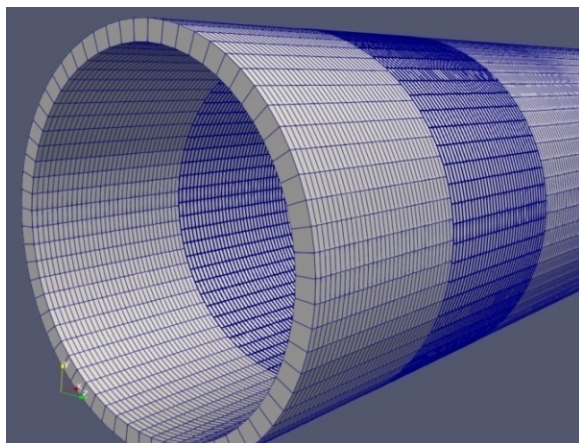
• Тестовые расчёты: прохождение плоской акустической волны через плоский контакт вращающейся и неподвижных сеток

• Характеристическое условие для плоской акустической волны на левой границе:

$$p(t) = p_{\infty} + p'; \quad p' = \varepsilon p_{\infty} \sin(\omega t); \quad p_{\infty} = 1.e + 5Pa; \quad \varepsilon = 1e - 5; \quad T_{\infty} = 287^{\circ}C$$

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

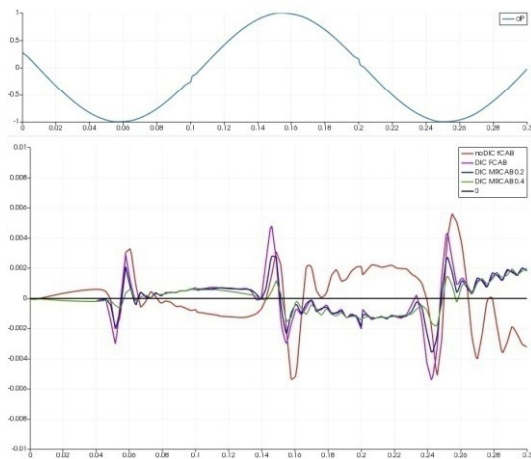
• Контакт тонких коаксиальных сеток ротор/статор, $R=0.1m$, $\omega=800rad/c$, $M=256$



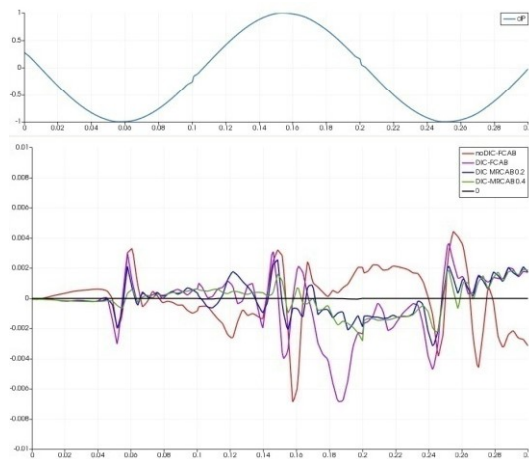
• Тестовые расчёты: прохождение плоской акустической волны через плоский контакт вращающейся и неподвижных сеток

Контакт тонких коаксиальных сеток ротор/статор, $R=0.1\text{м}$, $M=64$, ошибка прохождения волны при разных скоростях вращения

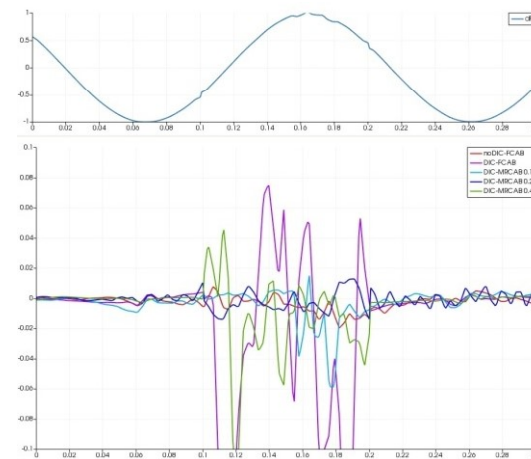
$\omega=1\text{рад/с}$



$\omega=10\text{рад/с}$



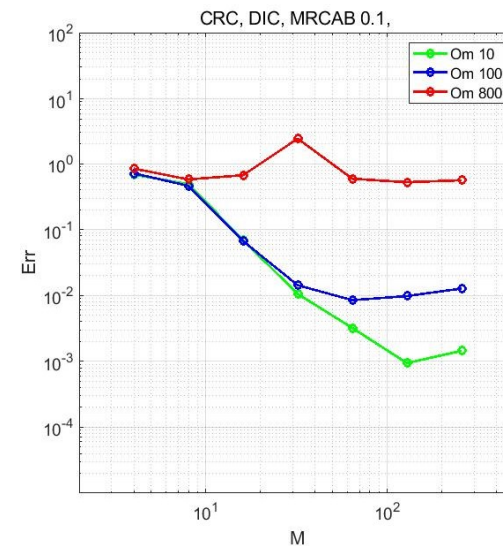
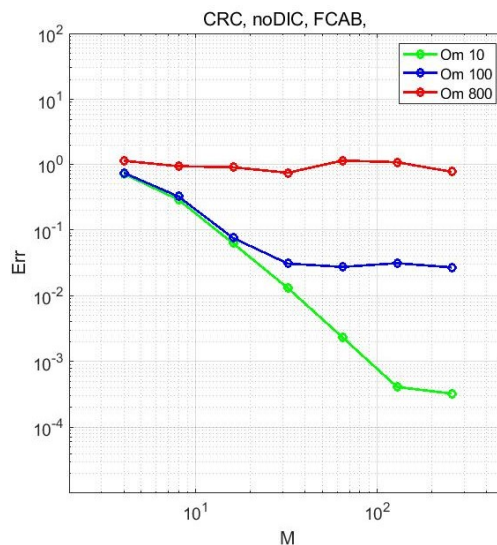
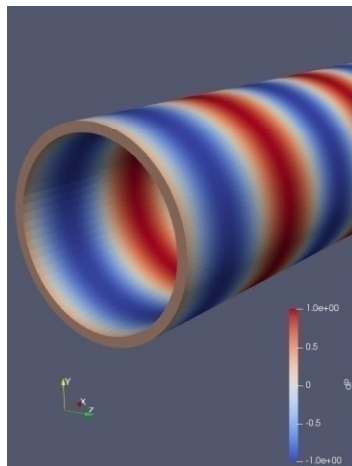
$\omega=100\text{рад/с}$



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

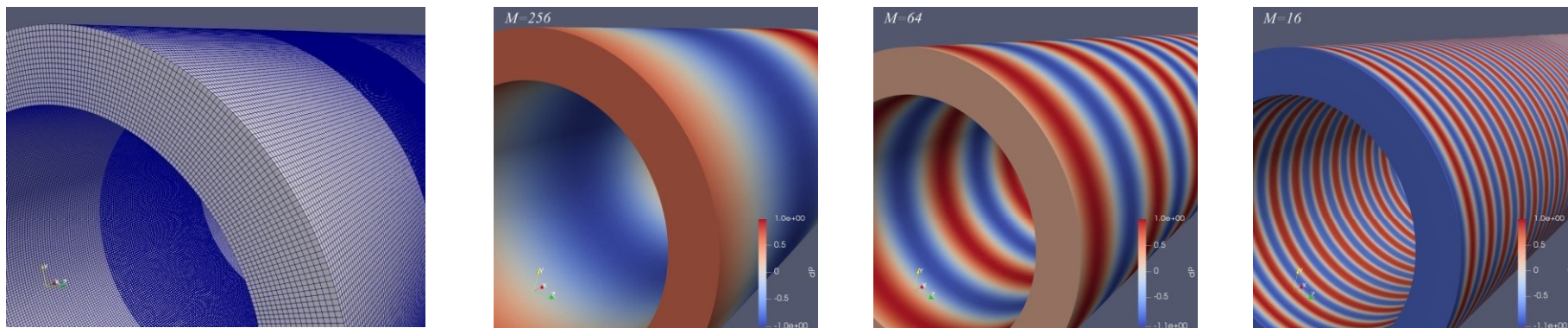
Контакт тонких коаксиальных сеток ротор/статор, $R=0.1\text{м}$, $M=64$

(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

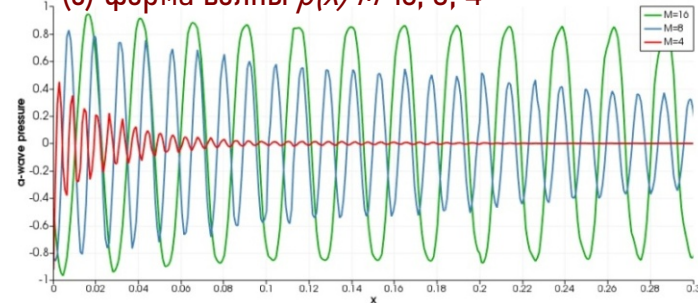
Контакт коаксиальных сеток hi-res, ротор/статор, $R=0.1\text{м}$, (а) сетка, (б,в,г) $M=256, 64, 16$, $\omega=100\text{рад/с}$



(а) Ошибка прохождения волны $M=256, 128, 64$:



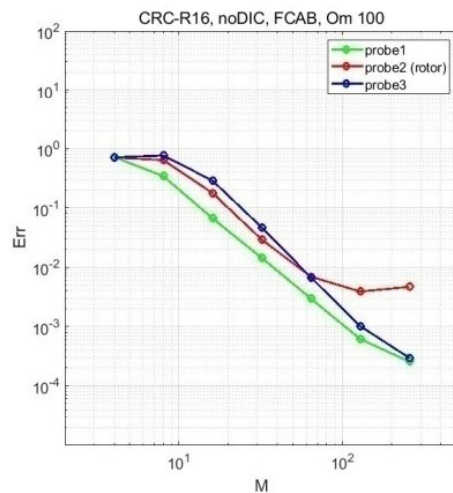
(б) форма волны $p(x)$ $M=16, 8, 4$



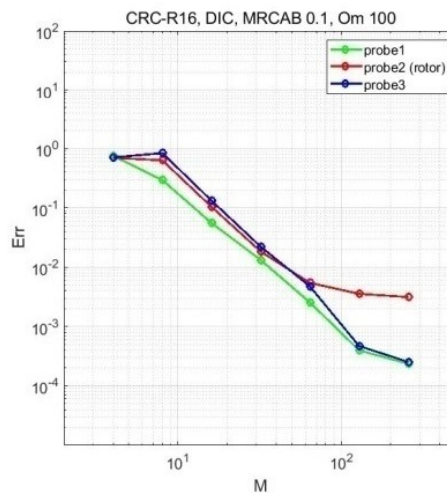
• Тестовые расчёты: прохождение плоской акустической волны через плоский контакт вращающейся и неподвижных сеток

Уменьшение ошибки при увеличении волнового числа M

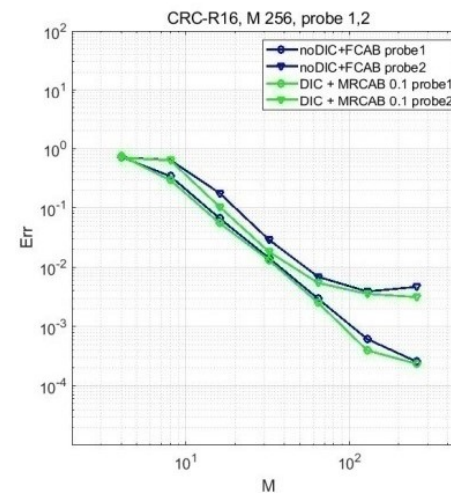
(а) без DIC,



(б) с DIC;

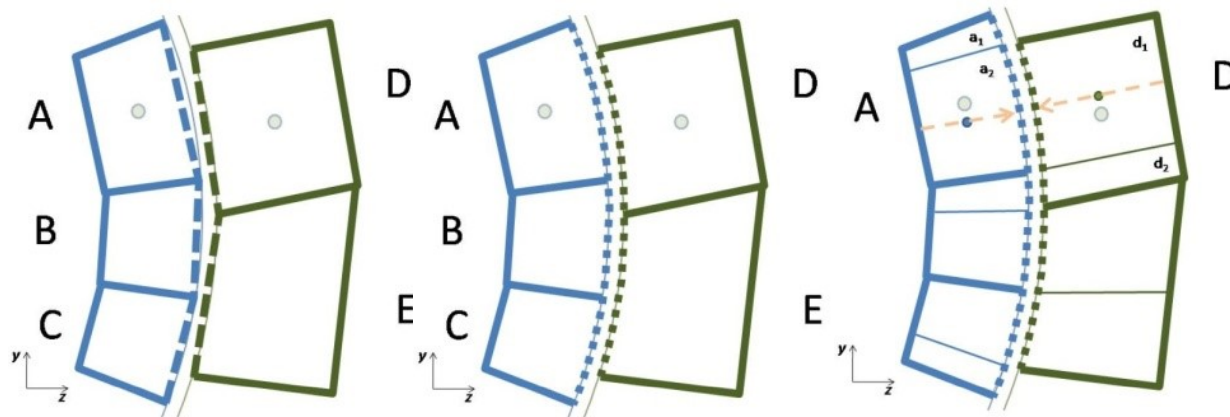


(с) эффект DIC



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-границы «суперсетки» на шаге экстраполяции $\mathbf{f}_{m,L+}^{n+1} = \mathbf{f}_{m,R-}^{n+1}$ и обеспечивает сохранение суммарных потоков через криволинейную контактную поверхность

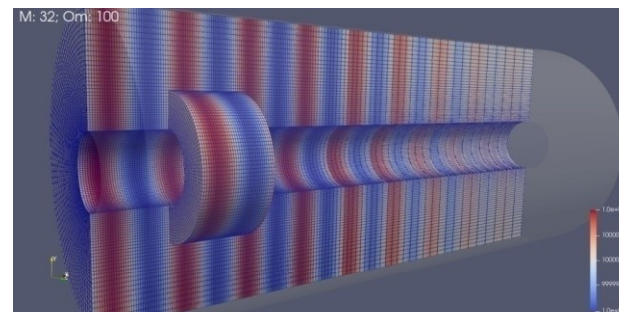
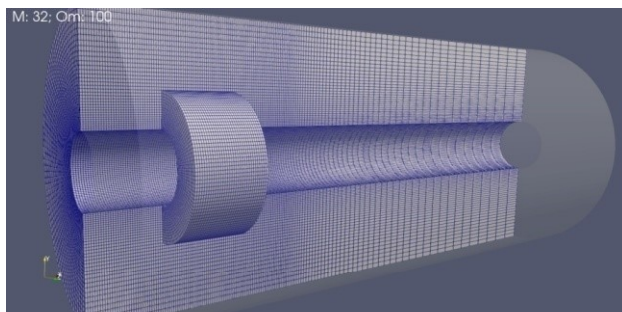
$$\sum_{a=1}^L \sum_{m=1}^{Ma} S_{xam+} \mathbf{f}_{am+}^{n+1} = \sum_{d=1}^R \sum_{n=1}^{Nd} S_{xdn-} \mathbf{f}_{dn-}^{n+1}$$

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

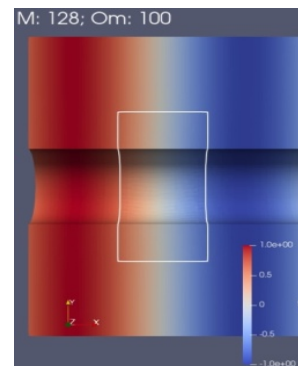
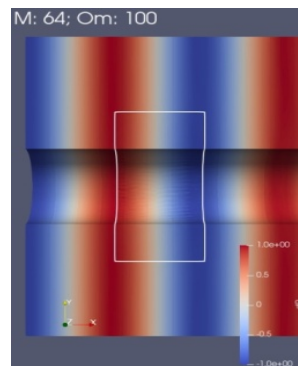
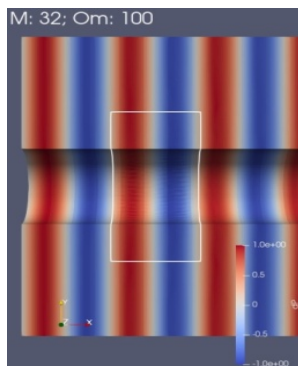
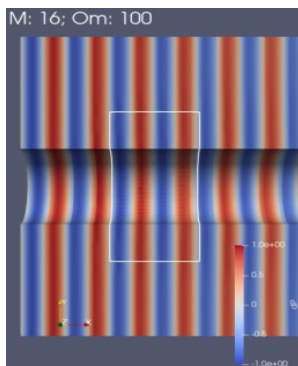
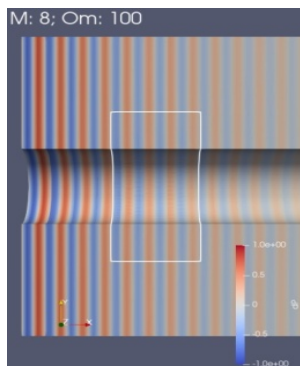
$$\Omega_A \frac{\mathbf{U}_A^{n+1/2} - \mathbf{U}_A^n}{\tau^n / 2} + \left(\sum_{m=1}^M S_{xam+} \mathbf{f}_{am+}^n - s_{x-} \mathbf{F}_{A-}^n \right) + \dots = \Omega_A \mathbf{Q}_A^n;$$

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

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



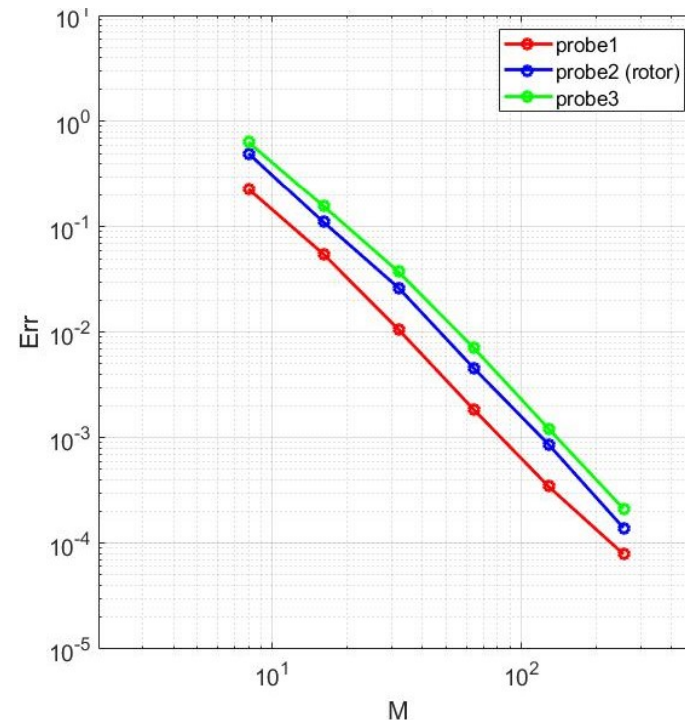
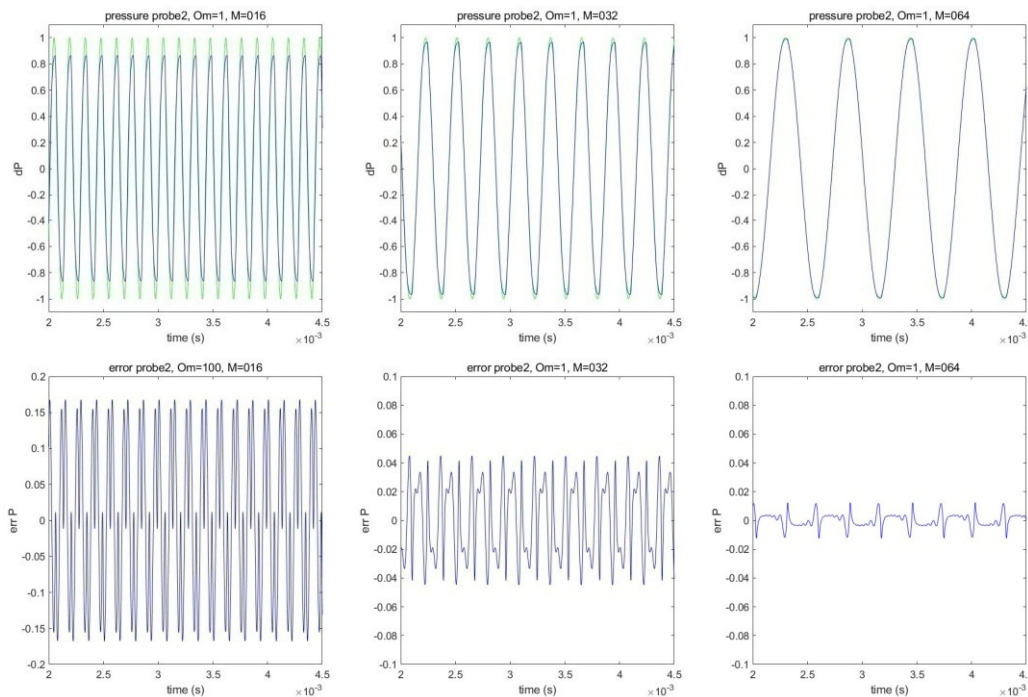
Контакт коаксиальных сеток ротор/статор (контуром выделена зона ротора), $R=0.1\text{м}$, $\omega=100\text{рад/с}$, $M=8-128$



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

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

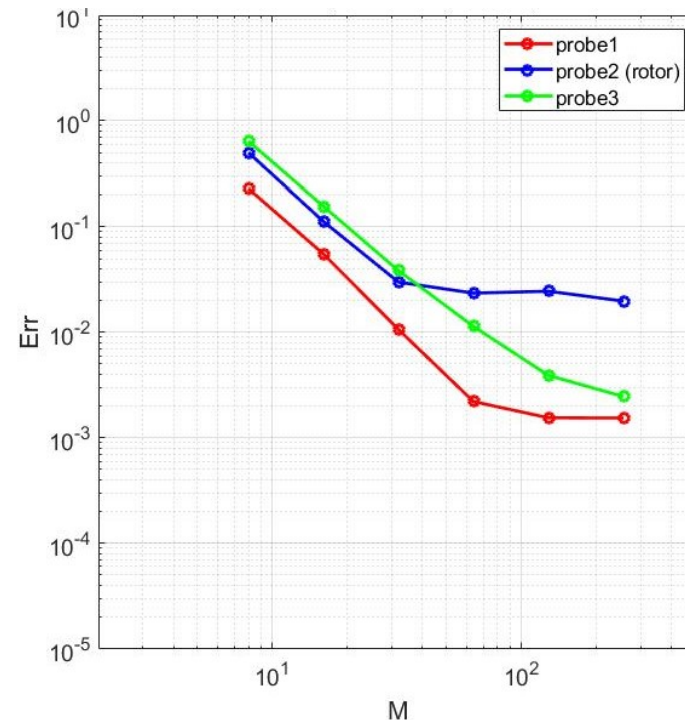
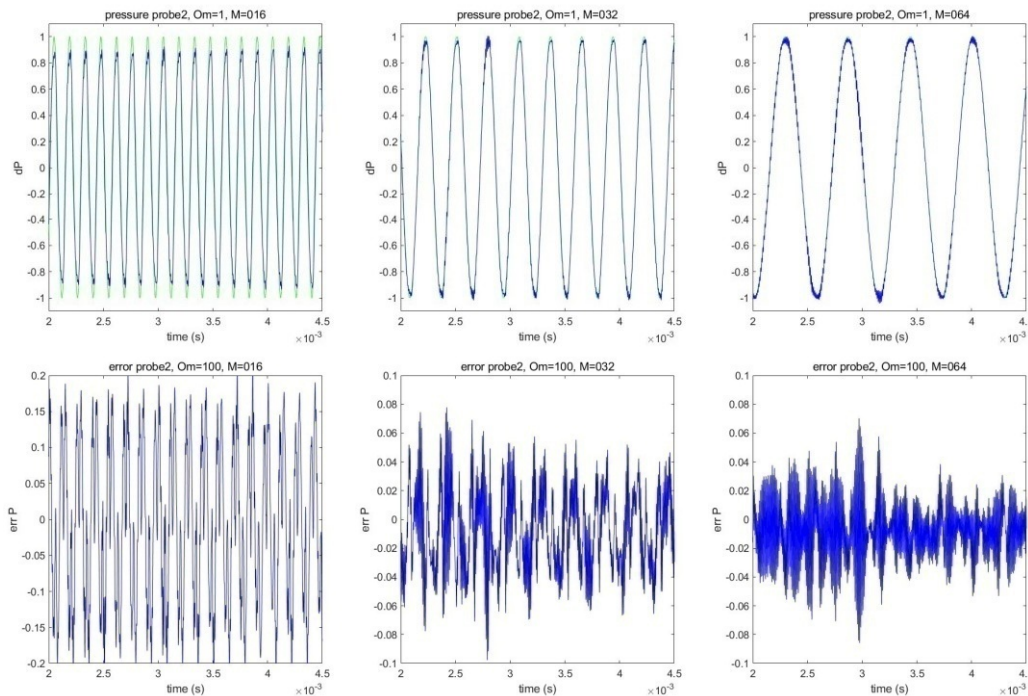
Уменьшение ошибки с ростом волнового числа M



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

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

Уменьшение ошибки с ростом волнового числа M



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.