

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗВУКА ОТ КОЛЕБЛЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ДЕФОРМИРУЕМЫХ СЕТОК И ПОГРУЖЕННЫХ ГРАНИЦ

И.В. Абалакин¹, **В.А. Вершков²**, Н.С. Жданова¹

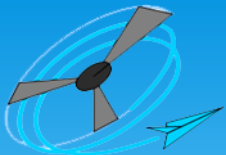
¹ ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва

² ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, Московская область

Седьмая всероссийская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике»

г. Светлогорск,

18.09.20018



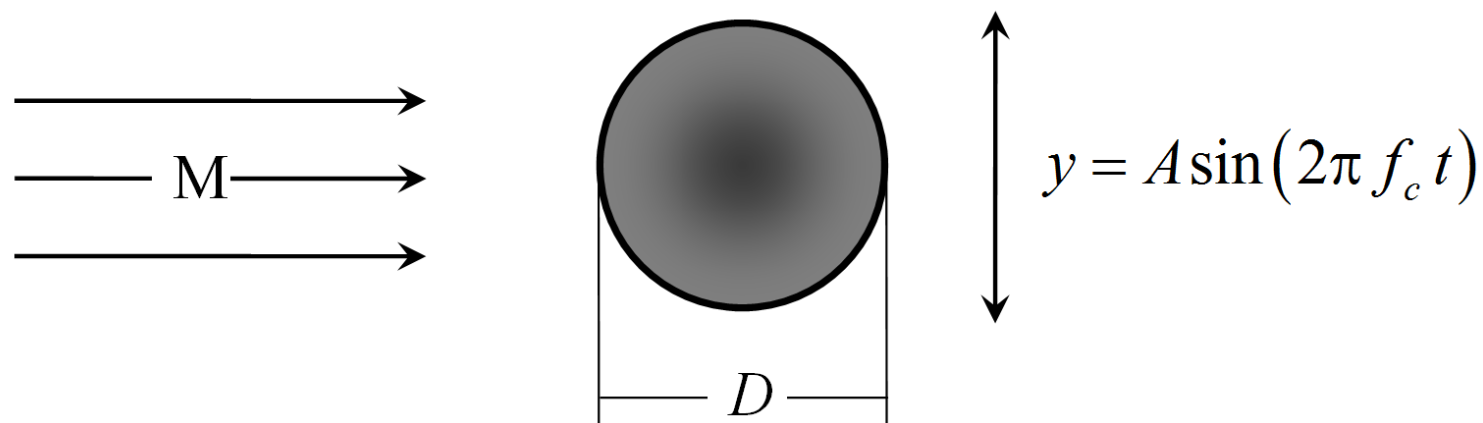
Задача о распространении звуковой волны, генерируемой колеблющимся цилиндром в потоке

Число Рейнольдса: $Re = \frac{\rho_0 U_0 D}{\mu_0} = 150$

Число Маха: $M = \frac{U_0}{c_0} = 0.2$

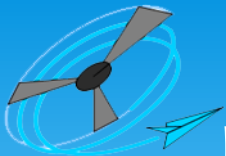
Амплитуда колебаний цилиндра: $A = 0.2D$

Частота колебаний: $\bar{f}_c = \frac{U_0}{D} \quad f = 0.15$



Источник:

Komatsu R., Iwakami W., Hattori Y. Direct numerical simulation of aeroacoustic sound by volume penalization method (Comput. Fluids, 2016, 130, 24-36)



Задача о распространении звуковой волны, генерируемой колеблющимся и покоящимся цилиндрами в потоке

Число Рейнольдса $Re = 150$:

Число Маха $M = 0.2$

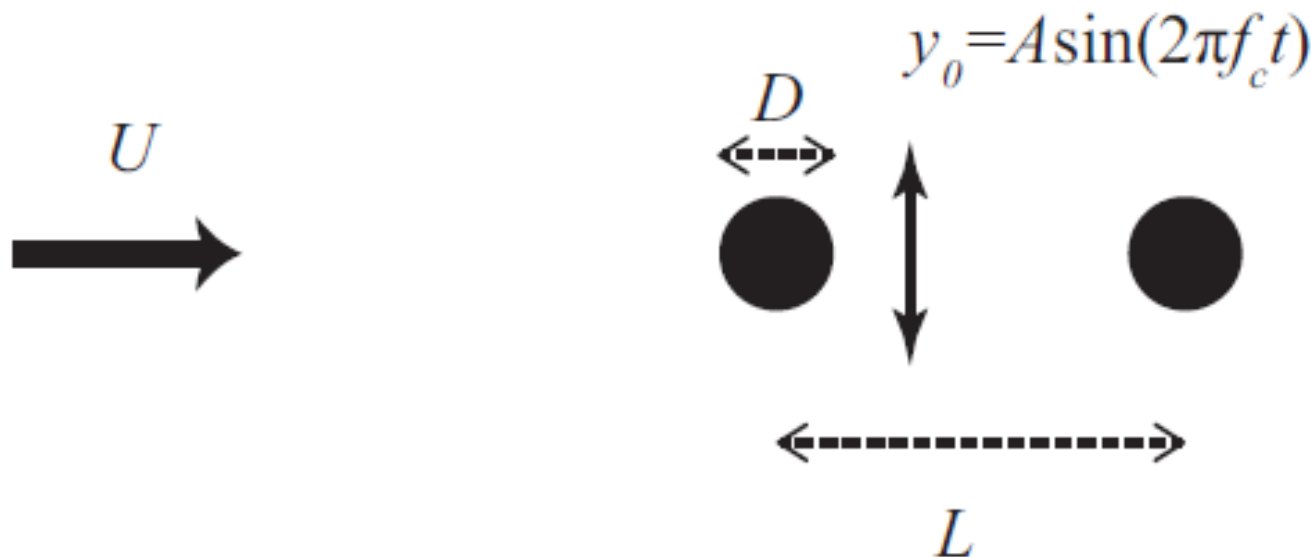
Амплитуда колебаний цилиндра:

- 1) $A = 0.5D$
- 2) $A = 0.2D$

Расстояние между центрами цилиндров:

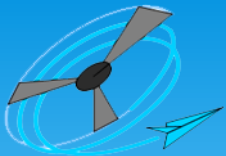
- 1) $L = 1.5D$
- 2) $L = 3D$

Частота колебаний $f = 0.1833$



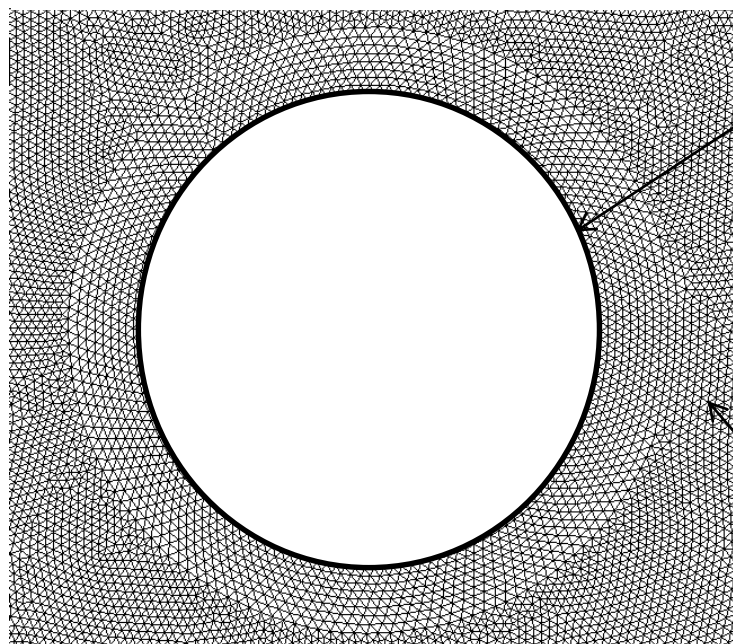
Источник:

Komatsu R., Iwakami W., Hattori Y. Direct numerical simulation of aeroacoustic sound by volume penalization method (Comput. Fluids, 2016, 130, 24-36)

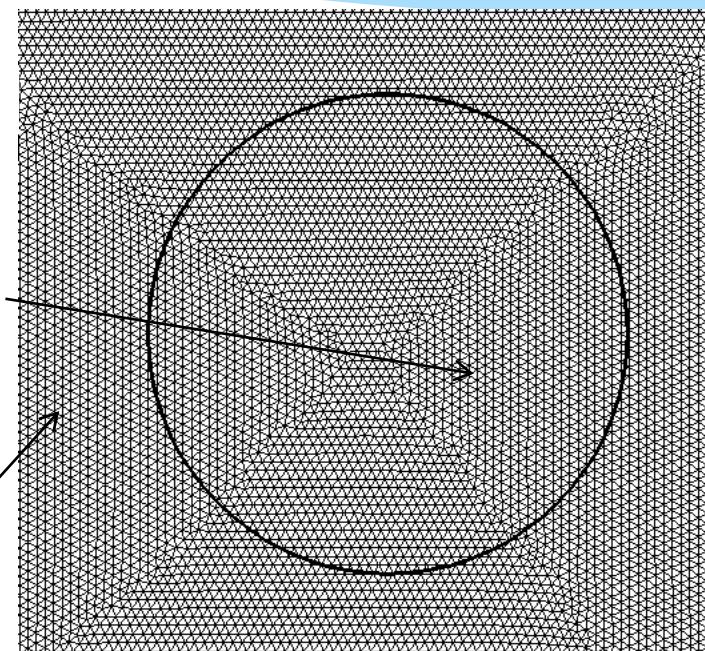


Моделирование граничных условий в задачах обтекания твердых тел (IBC)

Согласованная
с границей сетка



Погруженные
граничные условия

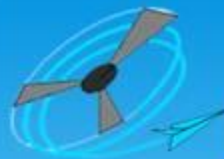


граничные условия

система уравнений
гидродинамики +
штрафные функции

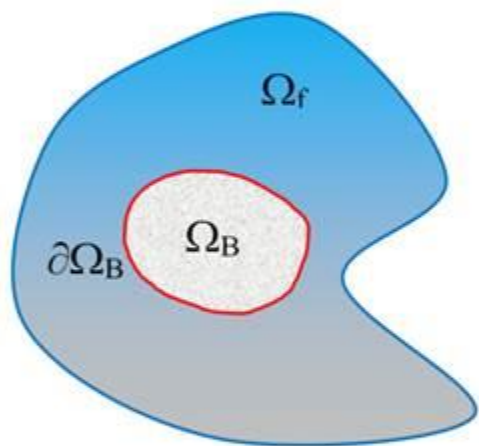
система уравнений
гидродинамики

- не требует построения расчетной сетки, описывающей геометрию препятствия
- подходит для моделирования подвижных препятствий



Метод Бринкмана штрафных функций

Вид штрафных функций для системы уравнений Навье-Стокса



$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} + \frac{\partial p_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \tilde{\mu} \tau_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\chi}{\eta} \rho (u_i - u_{B_i}) \\ \frac{\partial E}{\partial t} + \frac{\partial (E + p) u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial u_j \tilde{\mu} \tau_{ij}}{\partial x_i} + \frac{\partial q_i}{\partial x_i} - \frac{\chi}{\eta} \rho (u_i - u_{B_i})^2 \end{cases}$$

• $\eta \ll 1$

— штрафной параметр

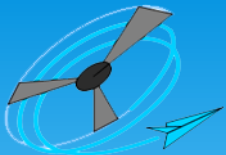
• χ

— характеристическая функция

$$\chi = \begin{cases} 1, & \mathbf{x} \in \Omega_B \cup \partial\Omega_B \\ 0, & \mathbf{x} \in \Omega_f \end{cases}$$

• \mathbf{u}_B

— скорость обтекаемого препятствия



Метод деформируемых сеток (MovingMesh)

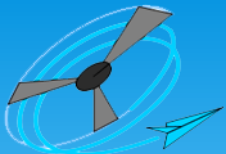
Метод деформируемой сетки заключается в переопределении координат узлов сетки в каждый момент времени. При этом в аппроксимации системы уравнений Навье-Стокса появляется член, отвечающий за изменение контрольного объема. Способ вычисления изменения контрольного объема выбирается из соображений выполнения консервативности и геометрической консервативности схемы.*

$$\frac{d}{dt} \int_{K(t)} \mathbf{Q} dV + \int_{\partial K(t)} (\mathbf{F}_c(\mathbf{Q}) - \mathbf{v}\mathbf{Q}) \cdot \mathbf{n} dS = \int_{K(t)} \nabla \cdot \mathbf{F}_v(\mathbf{Q}, \nabla \mathbf{Q}) dV$$

$$\mathbf{v}_{ij}(t) = \frac{1}{|\mathbf{n}_{ij}|} \int_{\partial K_i(t) \cap \partial K_j(t)} \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} dS,$$

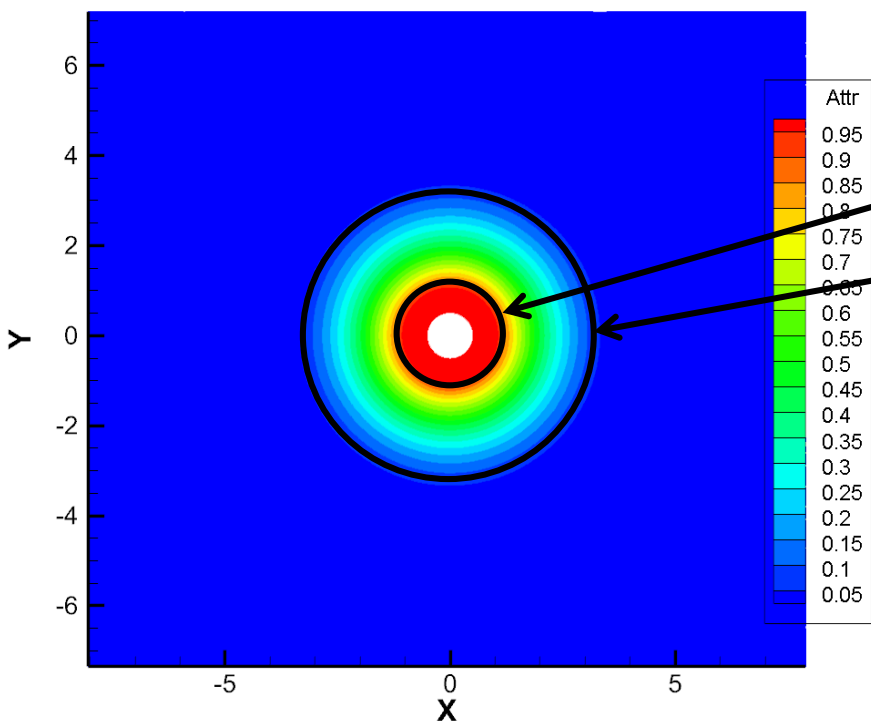
$$\mathbf{h}_{ij}(t) = \underbrace{\left[\frac{\mathbf{F}(\mathbf{Q}_i) + \mathbf{F}(\mathbf{Q}_j)}{2} \cdot \tilde{\mathbf{n}}_{ij} - \mathbf{v}_{ij} \frac{\mathbf{Q}_i + \mathbf{Q}_j}{2} \right]}_{\text{перенос}} - \delta \underbrace{\left[\frac{1}{2} \mathbf{S}^{-1} |\mathbf{\Lambda} - \mathbf{v}_{ij}| \mathbf{S} (\mathbf{Q}_j - \mathbf{Q}_i) \right]}_{\text{диссипация}},$$

*П.А. Бахвалов, В.А. Вершков. Рёберно-ориентированные схемы на подвижных гибридных сетках в коде NOISEtte. Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша, 2018, №127.



Алгоритм деформации сетки

Законы выделения 2D подобласти:



$$R1 = \text{Max}[chord, A \cdot chord]$$

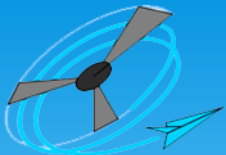
$$R2 = \text{Max}[1.1 \cdot chord, B \cdot chord]$$

$$frad = \text{Max} \left[0, \text{Min} \left[1, \frac{R2 - \sqrt{(y/c)^2 + x^2}}{R2 - R1} \right] \right]$$

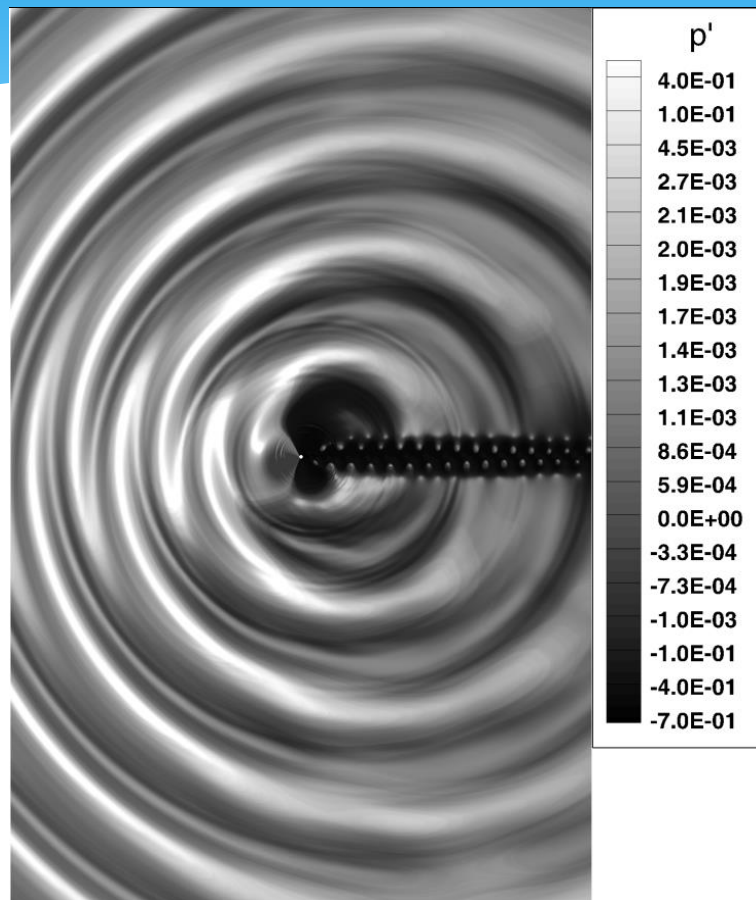
Закон 2D управления:

$$\begin{cases} x' = x \cdot \cos(d\varphi(\psi) \cdot frad) + y \cdot \sin(d\varphi(\psi) \cdot frad) + d\xi(\psi) \cdot frad \\ y' = y \cdot \cos(d\varphi(\psi) \cdot frad) - x \cdot \sin(d\varphi(\psi) \cdot frad) + d\beta(\psi) \cdot frad \\ z' = z \end{cases}$$

Подобласть деформации сетки
Около 2D цилиндра



Результаты моделирования обтекания колеблющегося цилиндра



Распределение пульсаций давления вокруг колеблющегося цилиндра

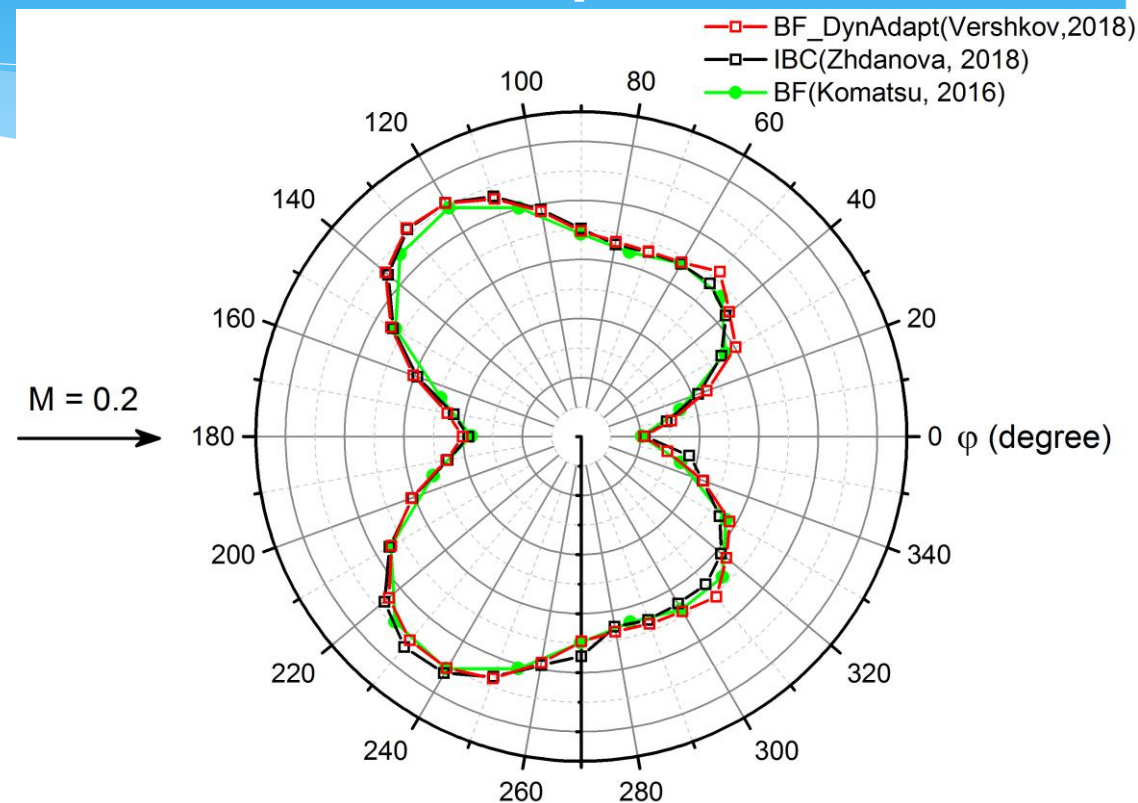
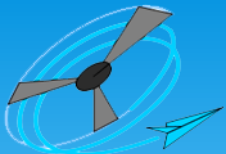
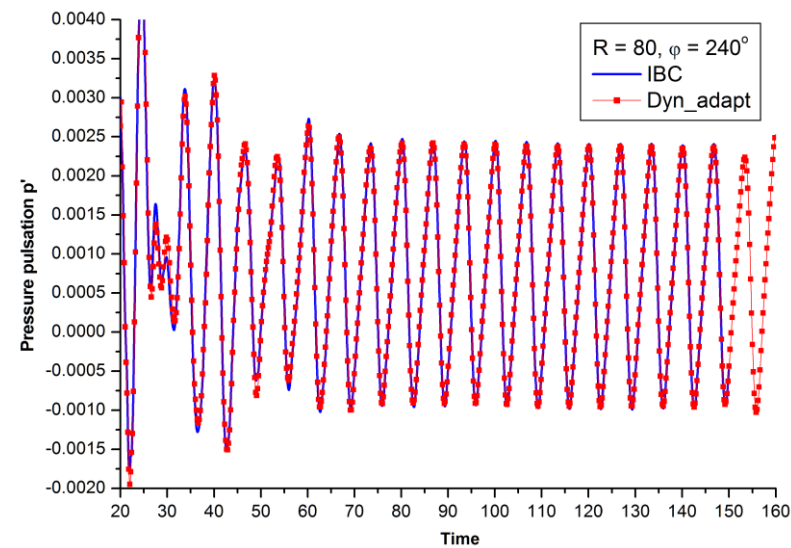
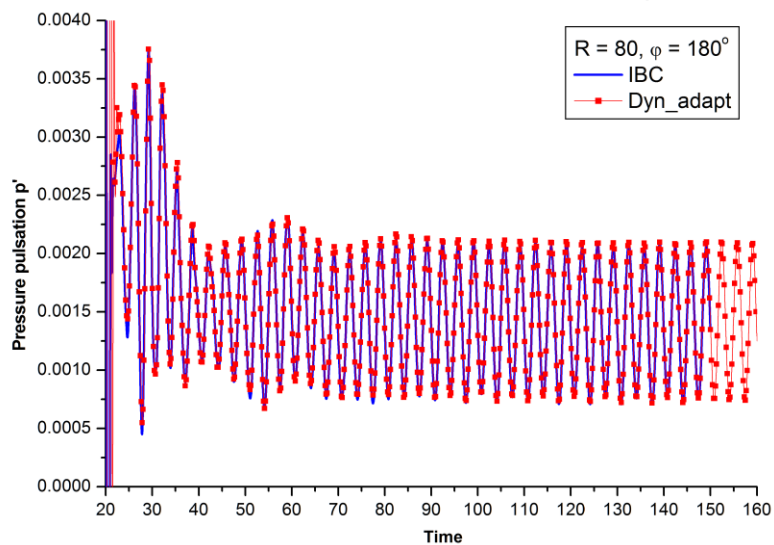
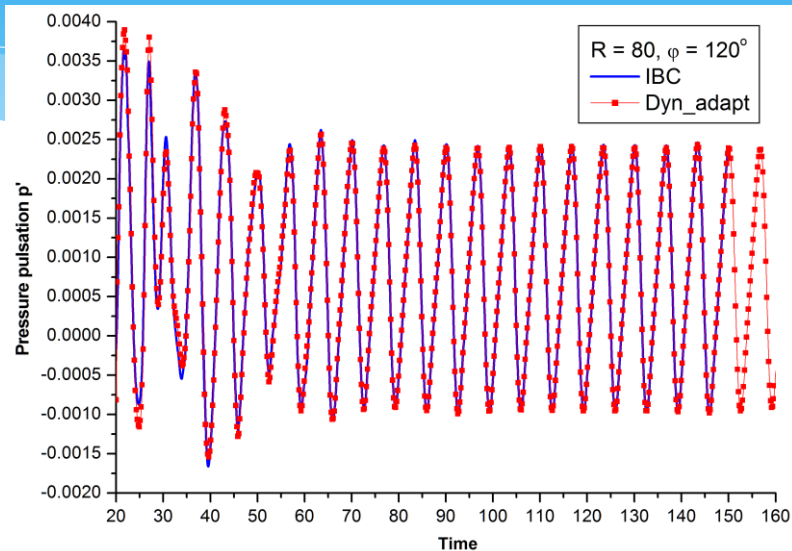
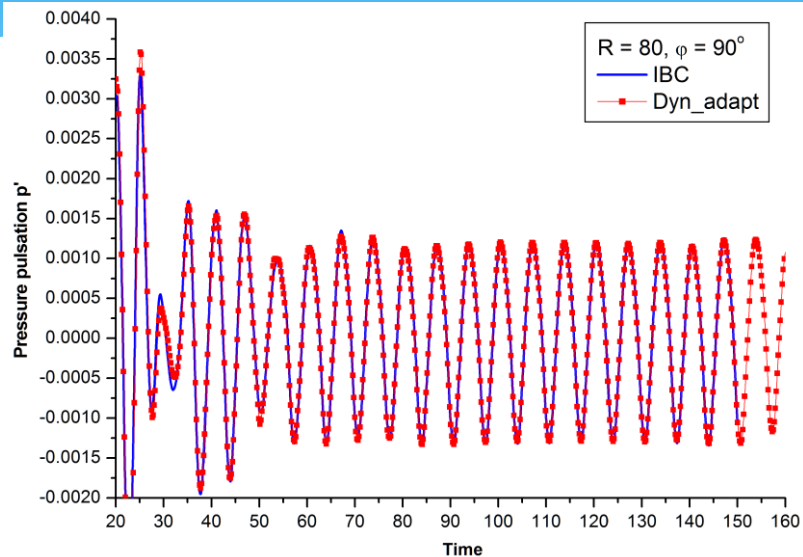


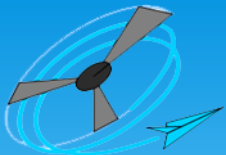
Диаграмма направленности $R = 80$: $p'_{rms}(\phi) = \sqrt{\langle p'^2_{num} \rangle - \langle p'_{num} \rangle^2}$

Диаграмма направленности для колеблющегося цилиндра (сравнение результатов)

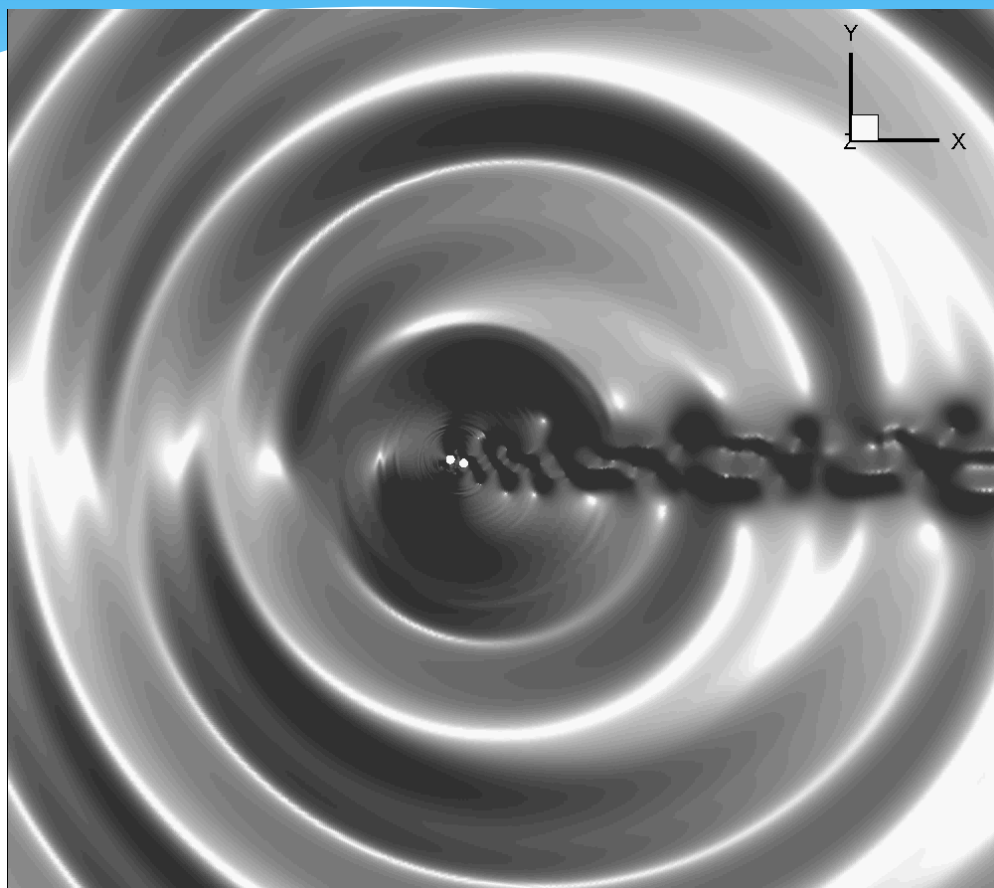


Результаты моделирования обтекания колеблющегося цилиндра





Результаты моделирования обтекания цилиндров на расстоянии $1.5D$



Поле пульсации давления

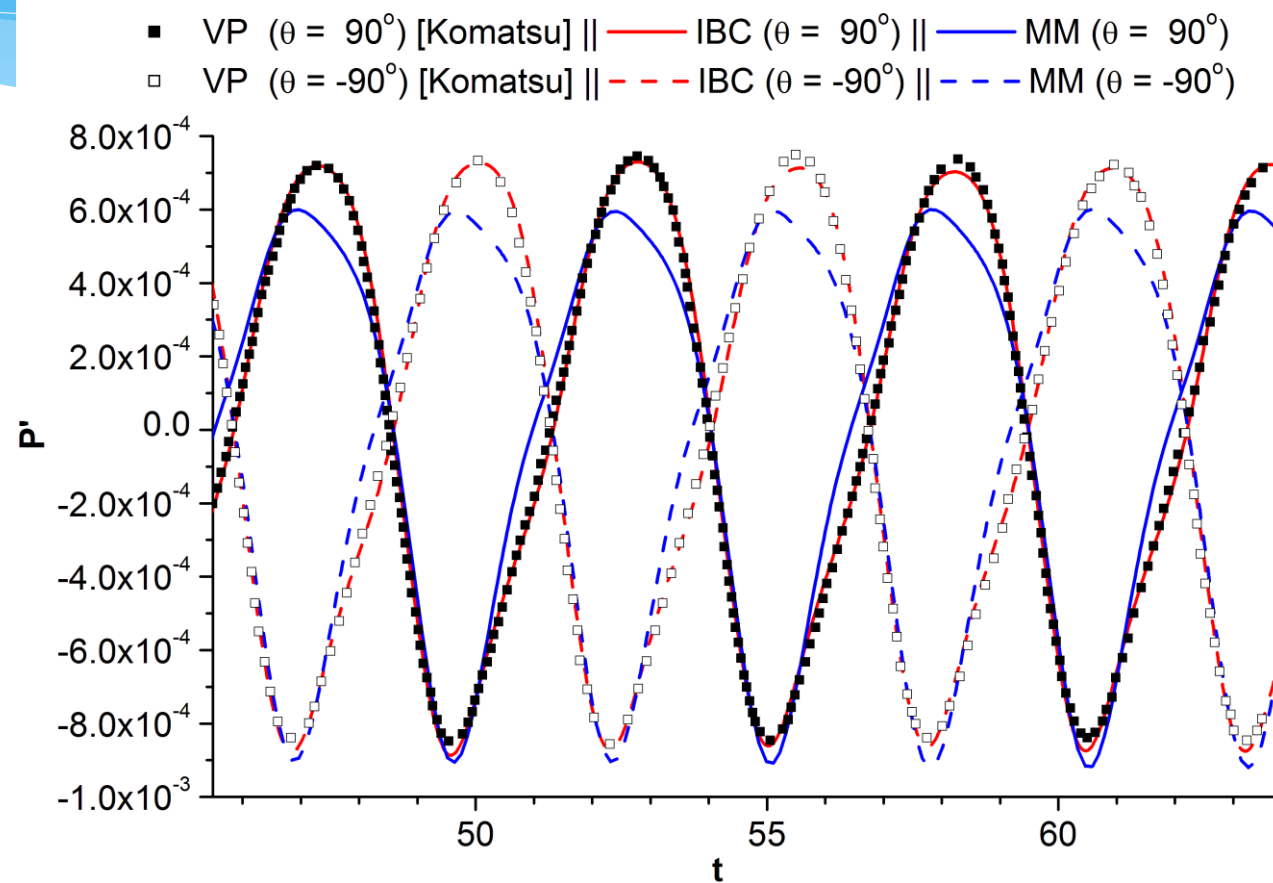


График пульсации давления $R=80$, $\varphi=90^\circ$

- VP ($\theta = 90^\circ$) [Komatsu] || — IBC ($\theta = 90^\circ$) || — MM ($\theta = 90^\circ$)
- VP ($\theta = -90^\circ$) [Komatsu] || - - IBC ($\theta = -90^\circ$) || - - MM ($\theta = -90^\circ$)

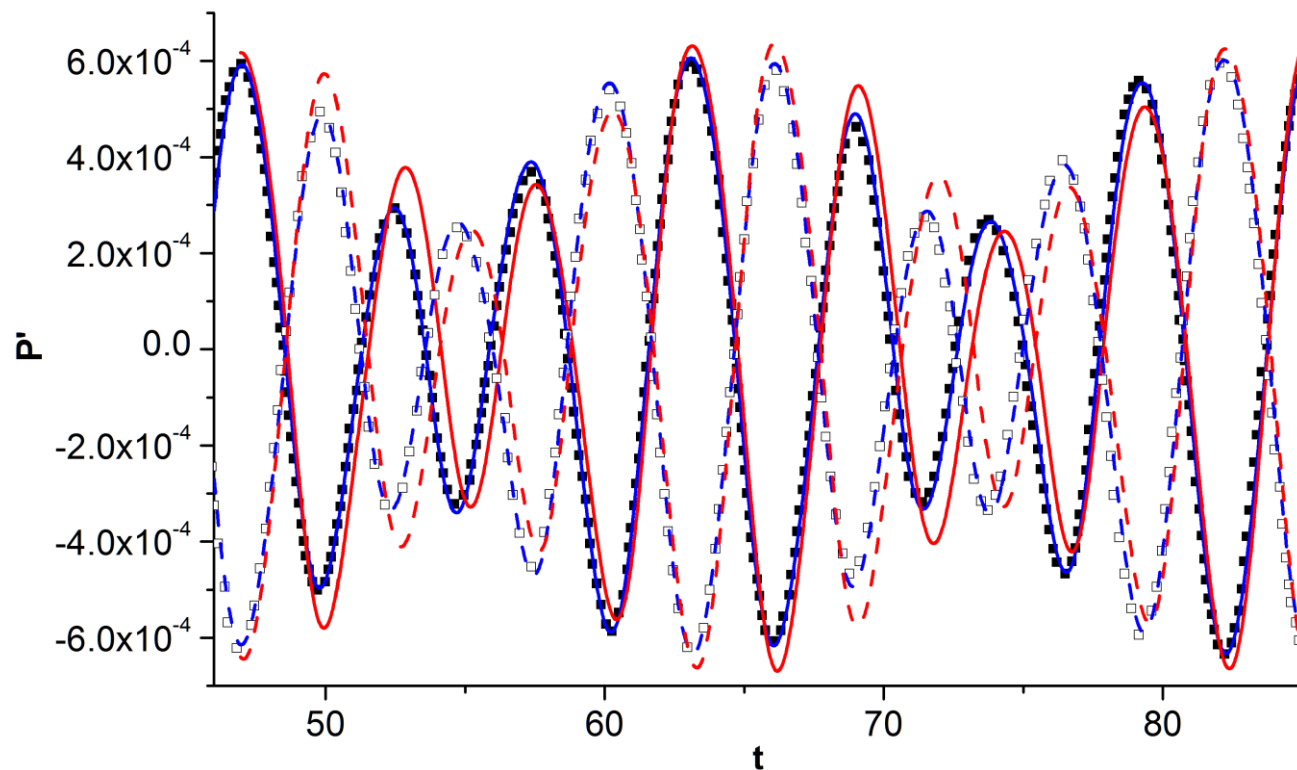
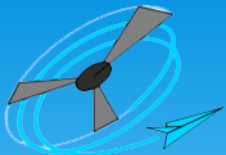
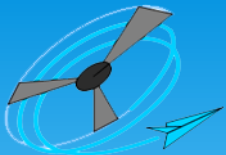


График пульсации давления $R=80$, $\varphi=90^\circ$



Выводы

1. Сопоставлены возможности применения методов погруженных границ и деформируемых сеток для моделирования акустики подвижных тел.
2. Проведена верификация методов на задачах распространения акустической волны, генерируемой, как одиночным колеблющимся в потоке цилиндром, так и в тандеме с неподвижным цилиндром. Получено хорошее качественное и количественное соответствие с источником верификационных данных.
3. В случае колебания одного тела обе методики дают одинаковые результаты, однако метод деформируемой сетки обеспечивает более точное решение вблизи его границы.
4. В случае больших амплитуд колебания и/или при наличии неподвижных твердых тел, расположенных вблизи движущихся границ, лучшие результаты показывает метод погруженных границ.



Спасибо за внимание!