

<https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202403.583-589>
УДК 517.958:531.33

Оригинальная статья

Численное моделирование обтекания систем из круговых профилей с двумя степенями свободы модифицированным методом LS-STAG

В. В. Пузикова

YADRO, г. Москва, Российская Федерация

Адрес: 123376, Российская Федерация, г. Москва, ул. Рочдельская, д. 15, стр. 15

v.puzikova@yadro.com

Аннотация

Рассмотрена сопряженная двумерная задача о моделировании обтекания системы круговых профилей с двумя степенями свободы низкоскоростным дозвуковым потоком. Для выполнения расчетов использована разработанная и реализованная авторами в виде программного комплекса модификация метода погруженных границ LS-STAG. Данная модификация позволяет производить моделирование обтекания подвижных профилей на неподвижной достаточно грубой прямоугольной структурированной сетке. Модификация LS-STAG-сетки для случая подвижных погруженных границ основана на тех же идеях, которые используются при построении лагранжево-эйлеровых сеток ALE. Метод ALE предполагает, что расчетная область изменяется при движении границы так, что сетка следует за подвижной границей лагранжевым способом и в то же время остается неподвижной, эйлеровой, на достаточном удалении от подвижной границы. В работе представлены результаты верификации модифицированного метода LS-STAG на примере решения задач в гидроупругой постановке о моделировании обтекания пары круговых профилей, имеющих две степени свободы, а также пучков таких профилей («шахматных» и «коридорных»). Исследовано поведение рассматриваемых систем при различных значениях собственной частоты. Для пары круговых профилей смоделирован ветровой резонанс и бафтинг. Для пучков труб смоделированы различия в обтекании труб в зависимости от номера ряда. Качественные особенности вышеперечисленных режимов удалось воспроизвести на достаточно грубых сетках. Полученные результаты хорошо согласуются с известными в литературе результатами. Использование параллельного алгоритма, основанного на методе декомпозиции области, позволяет получить сверхлинейное ускорение, которое объясняется хорошими предобуславливающими свойствами метода. Разработанный численный метод может быть эффективен для решения широкого класса сопряженных задач аэрогидроупругости.

Ключевые слова: аэрогидроупругость, метод LS-STAG, метод погруженных границ, метод ALE, сопряженная задача, профиль, вязкая несжимаемая среда, метод декомпозиции области, параллельный алгоритм

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Пузикова В. В. Численное моделирование обтекания систем из круговых профилей с двумя степенями свободы модифицированным методом LS-STAG // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2024. Т. 20, № 3. С. 583-589. <https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202403.583-589>

© Пузикова В. В., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.



Numerical Simulation of Flow around Systems of Circular Profiles with Two Degrees of Freedom Using the Modified LS-STAG Method

V. V. Puzikova

YADRO, Moscow, Russian Federation

Address: 15, build. 15, Rochdelskaya St., Moscow 123376, Russian Federation

v.puzikova@yadro.com

Abstract

The two-dimensional coupled problem of a low-speed subsonic flow simulation past a system of circular airfoils with two degrees of freedom is considered. To perform the computations, a modification of the immersed boundary method LS-STAG developed and implemented by the authors in the software package was used. This modification allows simulating the flow past moving airfoils on a fixed, fairly coarse rectangular structured grid. In the case of moving immersed boundaries the modification of the LS-STAG grid is based on the same ideas that are used in constructing Arbitrary Lagrangian-Eulerian ALE grids. The ALE method assumes that the computational domain changes when the boundary moves so that the grid follows the moving boundary in a Lagrangian way and at the same time remains fixed, Eulerian, at a sufficient distance from the moving boundary. The paper presents the results of the modified LS-STAG method verification on the example of a hydroelastic problem statement on simulating the flow around a pair of circular airfoils with two degrees of freedom, as well as bundles of such airfoils ("chessboard" and "corridor"). The behavior of these systems is studied at different values of the natural frequency.

Wind resonance and buffeting are simulated for a pair of circular airfoils. For tube bundles, differences in the flow around tubes depending on the row number are simulated. Qualitative features of the above-mentioned modes were reproduced on fairly coarse grids. The results obtained are in good agreement with those reported in the literature. The use of a parallel algorithm based on the domain decomposition method allows one to obtain a superlinear acceleration, which is explained by good preconditioning properties of the method. The developed numerical method is effective for solving a wide range of conjugate problems in aerohydroelasticity.

Keywords: aerohydroelasticity, the LS-STAG method, the immersed boundary method, the ALE method, coupled problem, airfoil, viscous incompressible flow, domain decomposition method, parallel algorithm

Conflict of interests: The author declares no conflict of interests.

For citation: Puzikova V.V. Numerical Simulation of Flow around Systems of Circular Profiles with Two Degrees of Freedom Using the Modified LS-STAG Method. *Modern Information Technologies and IT-Education*. 2024;20(3):583-589. <https://doi.org/10.25559/SITITO.020.202403.583-589>



Введение

Моделирование обтекания систем, состоящих из круговых профилей, является очень известной и достаточно хорошо изученной модельной задачей, для которой имеется большое количество как экспериментальных данных, так и результатов вычислительных экспериментов, проводившихся с использованием различных численных методов. Вместе с тем, в силу разнообразия возникающих режимов течения и способов закрепления профилей, данная задача остается актуальной и часто возникает во многих технических приложениях. В качестве примеров можно привести расчет обтекания и определение нагрузок, действующих на трубки теплообменников энергетических установок, стержни ядерных реакторов, цилиндрические элементы конструкций летательных аппаратов, элементы конструкций зданий и сооружений, подверженных действию ветровых нагрузок или находящихся в потоке жидкости; моделирование динамики подводных кабелей и трубопроводов, проводов воздушных линий электропередачи (ЛЭП), особенно расщепленных фаз. Режим обтекания таких систем определяется взаимным расположением профилей и их относительными перемещениями.

Ранее для моделирования обтекания неподвижных систем профилей на основе метода погруженных границ LS-STAG авторами разработан программный комплекс и была произведена его верификация на тестовых задачах о расчете обтекания и нагрузок, действующих на неподвижные цилиндрические профили, расположенные один за другим (тандемом) [1] и рядом поперек потока [2].

В работе [3] отмечено, что если обтекаемые тела являются упругими или упругозакрепленными и рассматривается сопряженная задача гидроупругости, то изменение характера обтекания может существенным образом влиять на режим колебаний тел в потоке. В данной работе рассматривается обтекание систем одинаковых круговых профилей с двумя степенями свободы при умеренном значении числа Рейнольдса (Re), и численный метод, позволяющий решать подобные гидроупругие задачи при сравнительно малых затратах вычислительных ресурсов.

В работе представлена модификация метода LS-STAG [4], которая позволяет проводить расчет течений с подвижными границами на неподвижных прямоугольных сетках. Метод LS-STAG относится к классу методов погруженных границ [5-14] и является развитием MAC-метода [15]. Положение погруженных границ в LS-STAG отслеживается при помощи удобного аппарата функций уровня [16].

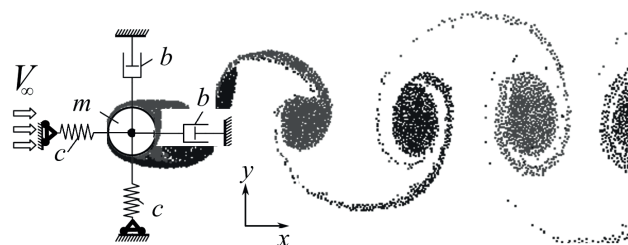
Модификация LS-STAG-сетки для случая подвижных погруженных границ основана на тех же идеях, которые используются при построении лагранжево-эйлеровых сеток (ALE – Arbitrary Lagrangian-Eulerian) [17]. Метод ALE предполагает, что расчетная область изменяется при движении границы так, что сетка следует за подвижной границей лагранжевым способом и в то же время остается неподвижной, эйлеровой, на достаточном удалении от подвижной границы.

В работе представлены результаты верификации модифицированного метода LS-STAG на примере решения задач в гидроупругой постановке о моделировании обтекания пары круговых профилей, имеющих две степени свободы, а также пучков

таких профилей («шахматных» и «коридорных»). Результаты вычислительных экспериментов хорошо согласуются с известными в литературе экспериментальными и расчетными данными других исследователей. Для распараллеливания вычислений используется метод декомпозиции области [18, 19].

Постановка задачи

Рассмотрим внешнее обтекание системы, состоящей из N круговых профилей диаметром $\bar{D}$ равномерным потоком вязкой несжимаемой среды постоянной плотности $\bar{\rho}$. Каждый профиль закреплен при помощи линейных вязоупругих связей типа Кельвина – Фойгта и имеет две степени свободы – может перемещаться вдоль и поперек потока (рис. 1). Расчетная область имеет размеры $\Omega = [0; 23\bar{D}] \times [0; 13\bar{D}]$, внешнюю границу $\Gamma = \Gamma_1 \cup \Gamma_2 \cup \Gamma_3 \cup \Gamma_4$ и границу $K = K_1 \cup \dots \cup K_N$, соответствующую обтекаемым профилям.



Р и с. 1. Круговой профиль с двумя степенями свободы и след за ним

Fig. 1. A circular profile with two degrees of freedom, and a trace behind it

Источник: здесь и далее в статье все рисунки составлены автором.

Source: Hereinafter in this article all figures were drawn up by the author.

Математическая постановка задачи в безразмерных переменных имеет вид:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{v} = 0, & \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \nabla p - \frac{1}{Re} \Delta \vec{v} = 0, \\ m \ddot{x}_{*,i} + b \dot{x}_{*,i} + c x_{*,i} = F_{xa,i}, & m \ddot{y}_{*,i} + b \dot{y}_{*,i} + c y_{*,i} = F_{ya,i}, i = \{1, N\}, \\ \vec{v}(x, y, 0) = \vec{v}_0(x, y), & (x, y) \in \Omega, \\ \vec{v}|_{\Gamma_1} = \vec{v}|_{\Gamma_2} = \vec{v}|_{\Gamma_3} = \vec{V}_\infty, & \vec{v}|_K = \vec{v}_b(t), \frac{\partial \vec{v}}{\partial \vec{n}}|_{\Gamma_4} = \vec{0}, \end{cases}$$

где $x = \bar{x}/\bar{D}$, $y = \bar{y}/\bar{D}$ – безразмерные координаты, $D = 1$; $t = \bar{t}\bar{V}_\infty/\bar{D}$ – безразмерное время; $\vec{n}$ – вектор внешней нормали к границе расчетной области; $p = p(x, y, t) = \bar{p}/(\bar{\rho} \bar{V}_\infty^2)$ – безразмерное давление, $\vec{v} = \vec{v}(x, y, t) = u \cdot \vec{e}_x + v \cdot \vec{e}_y$ – безразмерная скорость ($u = \bar{u}/\bar{V}_\infty$, $v = \bar{v}/\bar{V}_\infty$, $\bar{V}_\infty = 1$), $\vec{v}_0$ – безразмерное поле скоростей в начальный момент времени; Re – число Рейнольдса; b – коэффициент демпфирования; c – жесткость связи; $F_{xa,i}$ и $F_{ya,i}$ – действующие на i -й профиль сила лобового сопротивления и подъемная сила соответственно; $x_{*,i}$ и $y_{*,i}$ – безразмерные отклонения i -го профиля от положения равновесия по осям Ox и Oy соответственно.

Набегающий поток считается горизонтальным; участки Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 и Γ_4 соответствуют входной (левой), верхней, нижней и выходной (правой) границам расчетной области; центры обтекаемых профилей расположены на расстоянии $4\bar{D}$ от левой границы, симметрично относительно горизонтальной оси расчетной области.



Метод LS-STAG

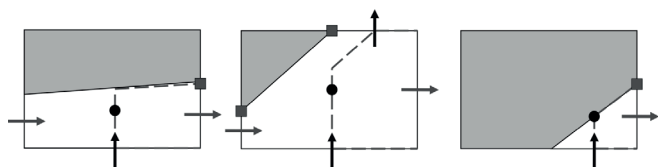
Для численного моделирования обтекания использован метод LS-STAG [4] (*Level Set STAGgered* – метод погруженных границ с функциями уровня для разнесенных сеток) и его модификация для расчетов течений с подвижными границами на неподвижной сетке, разработанная авторами данной статьи. LS-STAG сочетает в себе преимущества методов погруженных границ [5-14], не требующих совпадения границ ячеек с границами расчетной области и позволяющих решать задачи в областях сложной формы на прямоугольных сетках, и интегро-интерполяционного MAC-метода (метода маркеров и ячеек [15]).

В разработанной модификации метода LS-STAG, как и расчете ALE-методом [17], конвективный член принимает вид

$$\int_{\Gamma^*(t)} ([\vec{v} - \vec{v}^g] \cdot \vec{n}) \vec{v} dS.$$

Здесь $\vec{v}^g$ – скорость движения расчетной области (узлов сетки). При этом численная схема метода ALE сохраняет точность и устойчивость, присущие базовому методу с неподвижной сеткой, если скорость сетки и алгоритм ее перестроения выбраны так, что выполняется численный аналог геометрического закона сохранения [20].

Дискретизация ALE-конвективных потоков основана на косимметричной дискретизации конвективных потоков [4]. При этом вид дискретного аналога зависит от типа усеченной ячейки (рис. 2).



Р и с. 2. Примеры типов усеченных ячеек в двумерном случае: северная трапеция (слева), северо-западный треугольник (в центре), северо-западный пятиугольник (справа)

Fig. 2. Examples of truncated cell types in the two-dimensional case: northern trapezoid (left), northwest triangle (center), northwest pentagon (right)

Для интегрирования по времени используется схема предиктор-корректор первого порядка точности: шаг предиктора приводит к решению разностного аналога уравнения Гельмгольца для прогноза скорости, а шаг корректора – к решению разностного аналога уравнения Пуассона для поправки давления. Поскольку расчет происходит на неподвижной прямоугольной сетке, возможно появление «новых» ячеек, т.е. жидких ячеек, которые на предыдущем шаге были полностью внутри твердой границы. В этих ячейках для аппроксимации течения применяются специальные процедуры [4], [21-24]. В данной работе, как и в [4], в подобных ячейках прогнозируемая скорость полагается равной скорости погруженной границы вместо выполнения шага предиктора, в то время как шаг корректора остается неизменным.

Вычислительные эксперименты

Бафтинг и ветровой резонанс кругового профиля

Рассмотрим обтекание системы из двух одинаковых круговых профилей диаметром $D = 1,0$ и массой $m = 4,7273$, расположенных под небольшим углом выноса в $7,25^\circ$. Расстояние между центрами профилей по вертикали равно $T = 0,7$, а по горизонтали – $L = 5,5$. Скорость набегающего потока $V_\infty = 1,0$. Линейные вязкоупругие связи, при помощи которых закреплены профили, имеют следующие характеристики: $b = 4\pi m \xi \text{Sh}_\omega$ – коэффициент демпфирования; $c = m(2\pi \text{Sh}_\omega)^2$ – жесткость связи. Здесь $\xi = 3,3 \cdot 10^{-4}$ – безразмерная приведенная вязкость связи; Sh_ω – безразмерная частота собственных колебаний системы. Такое течение при $\text{Re} = 1000$ было исследовано численно в работе [25].

Была проведена серия расчетов при $\text{Re} = 1000$. Собственная частота системы менялась в диапазоне

$$\text{Sh}_\omega / \text{Sh} = 0,50 \dots 2,00.$$

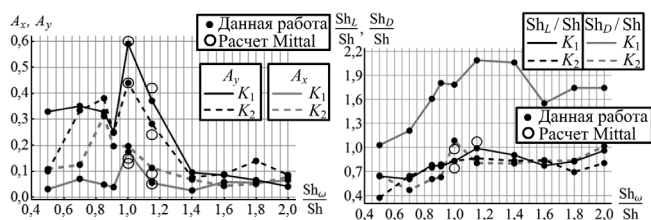
Здесь Sh – значение числа Струхала, вычисленное для неподвижной системы профилей (по диаметру профиля и частоте схода вихрей).

Расчеты проводились на неравномерной сетке 666×344 ячеек с шагом по времени $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$ при $\text{Sh}_\omega / \text{Sh} = 0,85 \dots 1,15$ и $\Delta t = 10^{-4}$ при $\text{Sh}_\omega / \text{Sh} = \{0,50, 0,70, 1,40 \dots 2,00\}$. На диаметр профиля приходилось 64 ячейки.

Для проведения расчетов использовалась рабочая станция, построенная на платформе Intel Z97 с использованием 4-ядерного процессора Intel Core i7-4790K (Devil's Canyon) с поддержкой технологии HyperThreading (8 логических ядер), работающего на частоте 4400 МГц. Рабочая станция оснащена 16 Гбайт оперативной памяти DDR3-1600 и двумя SSD-накопителями Crucial объемом 256 Гбайт и 1 Тбайт. Внешние графические карты в рабочей станции не использовались. При указанных выше параметрах расчета для моделирования сотни единиц безразмерного времени при $\text{Sh}_\omega \approx \text{Sh}$ продолжительность расчета на данной рабочей станции без использования параллельного алгоритма составила около 150 часов, а при остальных значениях Sh_ω – около 10 часов. Использование для распараллеливания метода декомпозиции подобласти, описанного в [18, 19], приводит к ускорению почти в 9 раз в случае декомпозиции на четыре подобласти и проведении расчетов на четырех потоках: время счета сокращается до 17 и 1,2 часов соответственно. Такое сверхлинейное ускорение вызвано хорошими предобуславливающими свойствами метода декомпозиции области [18, 19]: мы не только распараллеливаем вычисления, но и значительно увеличиваем скорость сходимости итерационного метода.

Поскольку расстояние между центрами профилей достаточно велико (превышает $5D$), наветренный профиль K_1 практически не испытывает влияния подветренного и ведет себя как одиночный профиль, а профиль K_2 , расположенный ниже по потоку в следе профиля K_1 , совершает вынужденные колебания, вызванные периодическим сходом вихрей с профиля K_1 , т.е. наблюдается бафтинг профиля K_2 . При этом амплитуда колебаний профиля K_2 вдоль оси Oy оказывается меньше амплитуды колебаний профиля K_1 (рис. 3), что согласуется с результатами, приведенными в работе [25]. Для профиля K_1 наибольшая амплитуда колебаний наблюдается в режиме ветрового резонанса при $\text{Sh}_\omega \approx \text{Sh}$.





Р и с 3. Зависимость характеристик колебаний профилей от Sh_ω при $Re = 1000$: максимум амплитуды колебаний вдоль осей Ox и Oy (слева) и частоты колебаний подъемной силы и силы лобового сопротивления (справа)

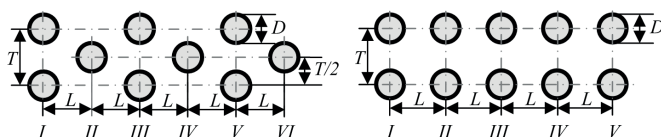
Fig. 3. The dependence of the characteristics of profile vibrations Sh_ω on the $Re = 1000$: maximum amplitude of oscillations along the axes Ox and Oy (leftward) and the frequencies of oscillations of lift and drag forces (on the right)

В рассматриваемом диапазоне чисел Sh_ω , соответствующих собственным частотам колебаний системы, для профиля K_2 наблюдается совпадение частот колебаний подъемной силы и силы лобового сопротивления, в то время как для профиля K_1 сила лобового сопротивления изменяется с удвоенной частотой колебаний подъемной силы, как и должно быть при обтекании одиночного профиля (рис. 3). По этой причине траектории движения профиля K_2 имеют овальную форму, а траектории профиля K_1 напоминают «восьмерку». Кроме того, при $Sh_\omega / Sh > 0,70$ наблюдается известное явление захвата частоты (рис. 3): сход вихрей происходит с частотой, приближающейся к собственной частоте системы.

Обтекание пучков труб

Рассмотрим обтекание систем из нескольких одинаковых круговых профилей с двумя степенями свободы диаметром $D = 1,0$ и массой $m = 40,0$. Скорость набегающего потока $V_\infty = 1,0$. В экспериментах¹ установлено, что пучки труб могут разрушаться при $Sh \approx Sh_\omega$, если демпфирование оказывается достаточно малым (коэффициент демпфирования $b < 0,1$). В данной работе примем $m = 40,0$ и $\xi = 3,3 \cdot 10^{-4}$, тогда коэффициент демпфирования $b = 4\pi m \xi Sh_\omega$ при $Sh_\omega > 0,09$ не принимает значения, меньшие чем 0,14.

Режимы обтекания труб в пучке зависят от расположения труб и местоположения трубы в пучке². По этой причине моделировалось обтекание шести рядов труб шахматного пучка и пяти рядов – коридорного пучка (рис. 4).



Р и с 4. Рассматриваемые пучки труб: шахматный (слева) и коридорный (справа)

Fig. 4. The tube bundles under consideration are: staggered (left) and the corridor (right)

Расстояние между центрами профилей в начальный момент времени по вертикали равно T , а по горизонтали – L . Результаты моделирования при $T/D > 4,0$, как и эксперимент³, показали, что при таких больших расстояниях между трубами, вихревые дорожки практически не взаимодействуют друг с другом. Если же $L/D > 4,0$, можно считать, что трубы в пучке ведут себя в потоке как одиночные профили.

Таким образом, пучок труб в потоке ведет себя как единая система при небольших значениях T и L . В качестве примера в данной работе представлены результаты расчетов при $T/D = 2,0$. В случае коридорного пучка $L = T$, а в случае шахматного пучка $L = T\sqrt{3}/2$. В первом случае это соответствует расположению соседних труб в пучке в вершинах квадрата, а во втором – в вершинах правильного треугольника.

Была проведена серия расчетов при $Re = 1000$. Расчеты проводились на неравномерной сетке 846×424 в случае шахматного пучка и на неравномерной сетке 816×424 в случае коридорного. В окрестности каждого профиля из рассматриваемых систем использовался блок равномерной сетки с шагом дискретизации по пространству $h = D/64$. Шаг расчета по времени был выбран равным $\Delta t = 5 \cdot 10^{-5}$. Для проведения расчетов использовался сервер, построенный на платформе Intel C610 с использованием 4-ядерного процессора Xeon E5-1620 V3 с поддержкой технологии HyperThreading (8 логических ядер), работающего на частоте 3500 МГц. Сервер оснащен 16 Гбайт оперативной памяти ECC DDR4-2133 и двумя жесткими дисками объемом 2 Тбайт, объединенными в дисковый том RAID1. Сервер работает под управлением операционной системы Windows Server 2012 R2. При указанных выше параметрах расчета для моделирования 50 единиц безразмерного времени при $Sh_\omega \approx Sh$ продолжительность расчета составила около 137 часов в последовательном режиме без декомпозиции подобласти. При использовании параллельного алгоритма, основанного на декомпозиции подобласти и описанного в [18, 19], время счета сокращается до 25 часов при использовании четырех подобластей и четырех потоков. Сверхлинейное ускорение (почти 5,5 раз) объясняется хорошими предобуславливающими свойствами метода декомпозиции области, на которые указывалось в работах [18, 19]. Собственная частота системы менялась в диапазоне

$$Sh_\omega / Sh = 0,50 \dots 2,00.$$

Здесь Sh – значение числа Струхала, вычисленное для пучка неподвижных труб при рассматриваемом значении числа Рейнольдса. Расчеты показали, что $Sh \approx 0,205$ в случае рассматриваемого коридорного пучка. Это хорошо согласуется с тем, что для коридорных пучков на основании экспериментальных данных в работе⁴ была получена следующая зависимость:

$$Sh = Sh(T/D) = 0,2 + \exp[-1,2 \cdot (T/D)^{1,8}].$$

Это означает, что $Sh(2,0) \approx 0,215$.

¹ Жукаускас А., Улинскас Р., Катинас В. Гидродинамика и вибрации обтекаемых пучков труб. Вильнюс: Москлас, 1984. 312 с.

² Там же.

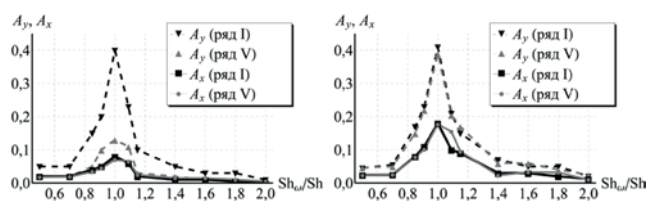
³ Там же.

⁴ Там же.



В случае шахматного пучка для труб из четных и нечетных рядов (рис. 4), как и в работе⁵, наблюдаются две различные частоты. Верхняя частота наблюдается для труб из нечетных рядов и соответствует частоте схода вихрей. Таким образом, было получено, что для рассматриваемого шахматного пучка $Sh \approx 0,280$. Это хорошо согласуется с тем, что в эксперименте⁶ максимум амплитуды колебаний наблюдается при частоте равной $(0,4 + 2 \cdot \exp[-0,44 \cdot (T/D)^{1,8}])/3$, т.е. $Sh \approx 0,277$ при $T/D = 2,0$. Нижняя частота наблюдается для труб из четных рядов и составляет $Sh/2$. Она соответствует частоте взаимодействия вихревых дорожек.

Результаты расчетов (рис. 5) хорошо согласуются с экспериментальными данными⁷. Трубы из первых рядов ведут себя в потоке как одиночные профили. В случае шахматных пучков амплитуда колебаний труб по вертикали сильно уменьшается при возрастании номера ряда.



Р и с. 5. Максимум амплитуды колебаний вдоль осей Ox и Oy труб из различных рядов рассматриваемых пучков: шахматного (слева) и коридорного (справа)

Fig. 5. The maximum amplitude of oscillations along the axes Ox and Oy tubes from different rows of the bundles under consideration: staggered (left) and corridor (right)

References

- [1] Puzikova V.V. The LS-STAG Immersed Boundary Method Modification for Viscoelastic Flow Computations. *Trudy ISP RAN = Proc. ISP RAS*. 2017;29(1):71-84. (In Russ., abstract in Eng.) [https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2017-29\(1\)-5](https://doi.org/10.15514/ISPRAS-2017-29(1)-5)
- [2] Puzikova V.V. Numerical simulation of flow past two moving circular airfoils by using the LS-STAG immersed boundary method. *Matematicheskoe modelirovanie*. 2017;29(10):60-74. (In Russ., abstract in Eng.) EDN: ZHVCEZ
- [3] Kaplunov S.M., Val'es N.G., Chentsova N.A., et al. A mathematical model for the fluidelastic mechanism exciting vibrations in a system of blunt bodies placed in cross flow of liquid. *Thermal Engineering*. 2021;59:462-467. <https://doi.org/10.1134/S0040601512060031>
- [4] Cheny Y., Botella O. The LS-STAG method: A new immersed boundary/level-set method for the computation of incompressible viscous flows in complex moving geometries with good conservation properties. *Journal of Computational Physics*. 2010;229(4):1043-1076. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2009.10.007>
- [5] Mittal R., Iaccarino G. Immersed boundary methods. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2005;37:239-261. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.37.061903.175743>
- [6] Verzicco R. Immersed Boundary Methods: Historical Perspective and Future Outlook. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2023;55:129-155. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-120720-022129>
- [7] Zeng Y., Wang Y., Yang D., Chen Q. Immersed Boundary Methods for Simulations of Biological Flows in Swimming and Flying Bio- Locomotion: A Review. *Applied Sciences*. 2023;13(7):4208. <https://doi.org/10.3390/app13074208>
- [8] Zhang Y., Pu T., Jia H., et al. Extension of a sharp-interface immersed-boundary method for simulating parachute inflation. *Advances in Aerodynamics*. 2024;6:3. <https://doi.org/10.1186/s42774-023-00162-0>
- [9] Owens S.O., Majumdar D., Wilson C.E., Bartholomew P., Reeuwijk M. A conservative immersed boundary method for the multi-physics urban large-eddy simulation model uDALES v2.0. *Geoscientific Model Development*. 2024;17(16):6277-6300. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-6277-2024>

⁵ Там же.

⁶ Там же.

⁷ Там же.

⁸ Там же.



- [10] Başkaya A.O., Capriati M., Turchi A., Magin T., Hickel S. Assessment of immersed boundary methods for hypersonic flows with gas-surface interactions. *Computers & Fluids*. 2024;270:106-134. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2023.106134>
- [11] Yildiran I.N., Beratlis N., Capuano F., Loke Y.-H., Squires K., Balaras E. Pressure boundary conditions for immersed-boundary methods. *Journal of Computational Physics*. 2024;510:113-157. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2024.113057>
- [12] Hausmann M., Elmestikawy H., van Wachem B. Physically consistent immersed boundary method: A framework for predicting hydrodynamic forces on particles with coarse meshes. *Journal of Computational Physics*. 2024;519:113-448. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2024.113448>
- [13] Mittal R., Jung Hee S. Origin and evolution of immersed boundary methods in computational fluid dynamics. *Physical Review Fluids*. 2023;8:100-501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.8.100501>
- [14] Hua H., Song Z., Xiong W., Shang J., Zhang L., Han L. Parallel Immersed Boundary Method for Two-Phase Flows on DCU Clusters. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 2023;37:711-728. <https://doi.org/10.1080/10618562.2024.2356776>
- [15] Harlow F.H., Welch J.E. Numerical calculation of time-dependent viscous incompressible flow of fluid with free surfaces. *Physics of Fluids*. 1965;8(12):2181-2189. <https://doi.org/10.1063/1.1761178>
- [16] Osher S., Fedkiw R.P. Level set methods: an overview and some recent results. *Journal of Computational Physics*. 2001;169(2):463-502. <https://doi.org/10.1006/jcph.2000.6636>
- [17] Donea J., Huerta A., Ponthot J.-Ph., Rodriguez-Ferran A. Arbitrary Lagrangian-Eulerian Methods. *Encyclopedia of Computational Mechanics*. 2004;1:413-437. <https://doi.org/10.1002/0470091355.ecm009>
- [18] Fu M., Zhao G.-F. A sparse domain decomposition method for parallel computing of a four-dimensional lattice spring model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*. 2021;45(17):2581-2601. <https://doi.org/10.1002/nag.3278>
- [19] Chen C., Biros G. Overlapping Domain Decomposition Preconditioner for Integral Equations. *IAM Journal on Scientific Computing*. 2022;44(6):A3617-A3644. <https://doi.org/10.1137/21M1442917>
- [20] Lesoinne M., Farhat C. Geometric conservation laws for flow problems with moving boundaries and deformable meshes, and their impact on aeroelastic computations. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2003;134(1-2):71-90. [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(96\)01028-6](https://doi.org/10.1016/0045-7825(96)01028-6)
- [21] Balaras E. Modeling complex boundaries using an external force field on fixed Cartesian grids in large-eddy simulations. *Computers & Fluids*. 2004;33(3):375-404. [https://doi.org/10.1016/S0045-7930\(03\)00058-6](https://doi.org/10.1016/S0045-7930(03)00058-6)
- [22] Chung M.H. Cartesian cut cell approach for simulating incompressible flows with rigid bodies of arbitrary shape. *Computers & Fluids*. 2006;35(6):607-623. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2005.04.005>
- [23] Udaykumar H.S., Mittal R., Rampunggoon P., Khanna A. A sharp interface Cartesian grid method for simulating flows with complex moving boundaries. *Journal of Computational Physics*. 2001;174(1):345-380. <https://doi.org/10.1006/jcph.2001.6916>
- [24] Udaykumar H.S., Mittal R., Shyy W. Computation of solid-liquid phase fronts in the sharp interface limit on fixed grids. *Journal of Computational Physics*. 1999;153(2):535-574. <https://doi.org/10.1006/jcph.1999.6294>
- [25] Mittal S., Kumar V. Vortex Induced Vibrations of a Pair of Cylinders at Reynolds Number 1000. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*. 2004;18(7):601-614. <https://doi.org/10.1080/1061856031000137017>

Поступила 19.05.2024; одобрена после рецензирования 20.07.2024; принята к публикации 13.09.2024.

Submitted 19.05.2024; approved after reviewing 20.07.2024; accepted for publication 13.09.2024.

Об авторе:

Пузикова Валерия Валентиновна, эксперт по разработке программного обеспечения, YADRO (123376, Российская Федерация, г. Москва, ул. Рочдельская, д. 15, стр. 15), кандидат физико-математических наук, **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0712-4519>**, v.puzikova@yadro.com

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

About the author:

Valeria V. Puzikova, Software Developer, YADRO (15, build. 15, Rochdelskaya St., Moscow 123376, Russian Federation), Cand. Sci. (Phys.-Math.), **ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0712-4519>**, v.puzikova@yadro.com

The author has read and approved the final manuscript.

