КОМПЬЮТЕРНАЯ МАТЕМАТИКА

УДК 532.5:51-37

Я.В. ЗАГУМЕННЫЙ, Г.А. ВОРОПАЕВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ НЕСТАЦИОНАРНО ДВИЖУЩИХСЯ ТЕЛ

Предложены алгоритмы решения нестационарных задач обтекания колеблющихся тел на основе прямого численного моделирования трехмерных уравнений Навье – Стокса с использованием библиотек динамических расчетных сеток и программ собственной разработки открытого пакета OpenFOAM. Приведены результаты расчетов возмущенного поля течения на обтекаемой поверхности с активно колеблющейся вставкой и крыловом профиле, совершающем периодические вращательно-колебательные движения в набегающем потоке. Показана возможность управления структурой пограничного слоя и вихревого следа путем варьирования частотными и амплитудными характеристиками колеблющейся поверхности.

Введение. Длительная биологическая эволюция, стимулируемая и поддерживаемая борьбой за существование, могла привести к развитию у живых организмов наиболее рациональных способов плавания и полета, изучение особенностей которых дает идеи к решению задач по созданию эффективных транспортных средств, в том числе и с деформирующейся поверхностью, и с колеблющимся крылом в качестве рабочих элементов.

Большое количество исследований по данной тематике появилось в 60-х годах прошлого столетия, объединивших исследования биологии и гидроаэромеханики, и составивших основу сформировавшегося научного направления – гидробионики.

История метода управления потоком, основанного на деформирующихся поверхностях, начинается с экспериментальной работы Крамера [1], в которой получено существенное уменьшение сопротивления твердого тела вращения с вязкоупругим покрытием, моделирующим кожу дельфина, по сравнению с сопротивлением твердого тела той же формы, обтекаемого турбулентным потоком. Этими результатами Крамер предложил объяснить парадокс Грея, утверждавшего, что дельфин не способен плавать с такими скоростями по энергетическим возможностям, не обладая неким механизмом, понижающим сопротивления тел до ламинарного режима обтекания.

Первые теоретические и экспериментальные исследования посвящены преимущественно задачам устойчивости ламинарного потока на деформирующейся поверхности, а затем исследования были сосредоточены на изучении способности упругодемпфирующих покрытий изменять характеристики потока при турбулентном режиме обтекания [2 – 6].

Интерес к изучению физических механизмов, лежащих в основе генерации подъемной силы и тяги при движении аэро- и гидробионтов, стимулировали большое число научных работ по исследованию динамических характеристик колеблющихся упругих крыльев [7 – 10]. Обнаруженные особенности вихреобразования на поверхности машущего крыла по сравнению с вихревой структурой течения на неподвижном профиле и в следе за ним, позволило не только объяснить механизм образования пропульсивной силы гидробионтами, но и сформулировать задачи по поиску оптимальных законов движения тел в водной и воздушных средах для их безотрывного обтекания.

Однако численное моделирование рассматриваемых задач является достаточно проблематичным, поскольку требует реализации методов динамических расчетных сеток, высокого пространственно-временного разрешения расчетной области и мощных вычислительных ресурсов.

В данной работе представлена методология построения численного решения задач обтекания колеблющихся тел и представлены некоторые полученные результаты расчета вихревой структуры течения на обтекаемой поверхности с активно колеблющейся вставкой и крыловом профиле, совершающем вращательно-колебательные движения в набегающем потоке жидкости.

Постановка задачи. Для определения волновой и вихревой структуры потока при обтекании нестационарно движущегося тела используется классическая система нестационарных трехмерных уравнений Навье – Стокса и уравнение неразрывности для несжимаемой вязкой среды:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \left(\nabla \cdot \mathbf{U}\right)\mathbf{U} + \frac{1}{\rho}\nabla P - \frac{1}{\mathrm{Re}}\Delta \mathbf{U} = 0\,, \qquad \nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \tag{1}$$

где $\mathbf{U} = \{U, V, W\}$, P, ρ, ν, U_0, $\mathrm{Re}_\delta = U_0\delta/\nu$ и $\mathrm{Re}_L = U_0 L/\nu$ – вектор скорости, давление, плотность, кинематическая вязкость жидкости, скорость набегающего потока, числа Рейнольдса, определенные по толщине пограничного слоя δ и длине обтекаемого тела L, соответственно.

Изучается возмущенное течение жидкости при воздействии вынужденных колебаний обтекаемого тела либо части его поверхности в соответствии с заданным законом движения. На большом расстоянии от обтекаемой поверхности задаются граничные условия невозмущенного натекающего потока, а непосредственно на самой поверхности – условия прилипания:

$$\mathbf{U}\big|_{x,y\to\pm\infty} = \{U_0, 0, 0\}, \qquad \mathbf{U}\big|_S = \left\{\frac{\partial \xi_x}{\partial t}, \frac{\partial \xi_y}{\partial t}, \frac{\partial \xi_z}{\partial t}\right\}, \tag{2}$$

где $\vec{\xi} = \left\{\xi_x, \xi_y, \xi_z\right\}$ – вектор перемещения поверхности обтекаемого тела.

При рассмотрении задачи обтекания поверхности с колеблющейся вставкой нестационарные деформации задаются в виде плоской бегущей волны:

$$\xi_y = A \cdot \sin\left(2\pi/\lambda \cdot \left(x - t \cdot C_{ph}\right)\right),$$

где λ и C_{ph} – длина и фазовая скорость генерируемой волны.

В случае рассмотрения задачи обтекания крыла, совершающего периодические вращательно-колебательные движения, перемещения точек его поверхности задаются следующими аналитическими выражениями:

$$\begin{cases} \xi_x = x_0 \cdot \cos\left(\alpha\left(t\right)\right) - y_0 \cdot \sin\left(\alpha\left(t\right)\right), \\ \xi_y = y_0 \cdot \cos\left(\alpha\left(t\right)\right) + x_0 \cdot \sin\left(\alpha\left(t\right)\right), \\ \xi_z = 0, \end{cases}$$

где $\alpha\left(t\right) = \alpha_{\max} \cdot \sin\left(2\pi \cdot f \cdot t\right)$ – мгновенный угол атаки профиля, f – частота его колебаний, $\left(x_0, y_0, z_0\right)$ – координаты точек поверхности профиля в исходном положении. Традиционно периодический процесс вихреобразования около обтекаемых тел характеризуется числом Струхаля: $St = \frac{f \cdot L}{U_0}$ – безразмерным параметром, связывающим скорость набегающего потока жидкости, частоту колебаний и длину хорды крыла. В данной работе исследуется такой диапазон изменения числа Струхаля: $St = 0 \div 1.2$, что соответствует вариации размерной частоты в диапазоне: $f = 0 \div 5$ Гц.

Численное моделирование течений жидкостей в условиях, когда обтекаемое тело совершает вынужденные нестационарные колебания в потоке, практически невозможно реализовать на базе статических расчетных сеток. Поэтому для численного решения рассматриваемых задач был разработан алгоритм расчета с использованием библиотек динамических расчетных сеток и программ собственной разработки в рамках открытого пакета OpenFOAM [11] на основе прямого численного решения системы уравнений (1) с граничными условиями (2).

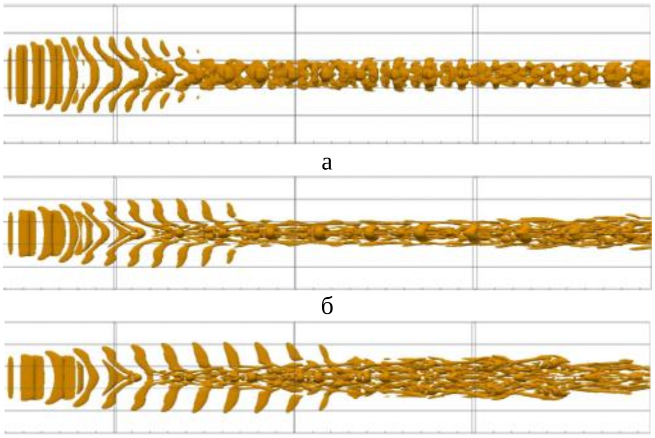
Разработанные библиотеки динамических расчетных сеток позволяют определять положения узлов расчетной сетки на новом временном слое при изменении положения тела в пространстве. Рассмотрено три различных способа построения динамических сеток: 1) на основе определенным образом задаваемых пользователем аналитических зависимостей, предполагающих движение сетки вместе с телом вблизи его поверхности с постепенным затуханием перемещения узлов с удалением от его поверхности; 2) путем численного решения уравнения Лапласа для компонент вектора перемещений узлов сетки; 3) разбиением расчетной сетки на неподвижную и движущуюся вместе с телом области с применением специальных периодических граничных условий на контактирующих границах. Предварительные тестовые расчеты показали, что наиболее точной методикой построения динамических расчетных сеток является подход 2), поскольку позволяет строить ортогональную сетку на каждом временном слое, тогда как применение методики 1 может давать значительные скосы сетки, что негативно влияет на точность результатов, а в подходе 3) проявляются нефизичные возмущения на стыке подвижной и статичной подобластей.

Решение результирующей системы линейных алгебраических уравнений проводится с наперед устанавливаемой точностью с помощью итерационных солверов PCG и PBiCG, реализующих методы сопряженных градиентов для симметричных и асимметричных матриц, соответственно, и задаваемым количеством внутренних и внешних итераций процедуры PIMPLE, связывающей поля скорости и давления. Для интерполяции конвективных членов применяется TVD схема с ограничителем, обеспечивающая минимальную численную диффузию и отсутствие осцилляций решения. Для дискретизации производной по времени используется неявная трехточечная несимметричная схема второго порядка с разностями назад, обеспечивающая хорошее разрешение физического процесса во времени.

Расчеты поставленных задач проводились в параллельном режиме с применением метода декомпозиции расчетной области на многоядерных персональных компьютерах и кластерных системах. Обработка и визуализация результатов расчетов выполнялась с использованием графического интерфейса ParaView и пакета прикладных программ Origin.

Результаты расчетов. Результаты трехмерного численного моделирования нестационарной задачи развития возмущений потока, генерированных локальными деформациями обтекаемой поверхности в форме бегущей волны ($C_{ph}/U_0 = 0.5, \quad \mathrm{Re}_\delta \approx 10^3, \quad A/\delta \approx 0.1$), показали наличие сложной трехмерной структуры возмущенного течения, развивающейся вниз по потоку. На рис. 1 показано изменение вихревой структуры течения при увеличении длины бегущей волны, локализованной на участке обтекаемой поверхности в форме квадрата площадью 0.2×0.2 м^2 с затухающими амплитудами по краям. Источник возмущений изначально генерирует плоские волновые возмущения, которые по мере развития вниз по потоку достаточно быстро искажаются, трансформируясь в характерные Λ-структуры и продольно ориентированные вихревые образования. Эти структуры по мере дальнейшего развития вниз по потоку теряют четкость своих форм и постепенно разрушаются, приводя к потере изначально детерминированного характера возмущений и хаотизации течения вниз по потоку.

С увеличением фазовой скорости бегущей волны на обтекаемой поверхности ($\mathrm{C_{ph}/U_0} > 0.7$) изначально генерируемая плоская форма волновых возмущений практически сохраняется вниз по потоку, однако возмущения имеют сравнительно малые амплитуды и практически затухают на расстоянии ~ 0.5 м от задней кромки осциллирующей вставки.



а

б

в

РИС. 1. Трехмерная вихревая структура течения на деформирующейся поверхности для различных значений длины волны: $\lambda/\lambda_{TS} \approx 1.2$ (а), 1.78 (б), 2.38 (в), при $\mathrm{Re}_\delta \approx 10^3$, $A/\delta \approx 0.1$, $C_{ph}/U_0 = 0.5$, $\lambda/\lambda_{TS} \approx 1.2, 1.78, 2.38$

Двухмерный численный расчет обтекания крылового профиля под углом атаки демонстрирует классические результаты нарастания возмущений завихренности и давления в пограничном слое за миделем профиля при переходных числах Рейнольдса практически симметрично на обеих сторонах профиля при нулевом угле атаки с небольшим сдвигом по фазе. Смена знака завихренности вдоль поверхности профиля говорит о появлении локальных отрывов пограничного слоя на соответствующей стороне профиля. Возмущенная завихренность соответствующего знака, сформировавшаяся на каждой стороне профиля, сходит с его острой кромки, образуя возмущенный след в виде сворачивающихся с определенной периодичностью пар дискетных вихрей. С увеличением угла атаки вихреобразование на подветренной стороне профиля подавляется влиянием натекающего потока, а зона отрыва течения на наветренной стороне смещается ближе к носовой части крыла, при этом происходит интенсификация спутных вихревых элементов и расширение возмущенной области следа.

Результаты трехмерных расчетов эволюции во времени вихревой структуры течения, представленной в форме изоповерхности второго инварианта тензора градиента скорости: $Q = 0.5\left\|\Omega\right|^2 - \left|S\right|^2\right|$, за неподвижным профилем, установленным под различными углами атаки, показывают, что на подветренной стороне крыла формируются сравнительно мелкомасштабные трехмерные вихревые структуры, которые по мере развития вниз по потоку трансформируются в более крупномасштабные продольные вихревые образования. Несмотря на существенные различия структуры течений в плоской и трехмерной постановках, интегральные характеристики обтекаемого профиля, при этом, различаются несущественно.

При периодических вращательно-колебательных движениях профиля на формирование вихреобразования оказывают влияние все компоненты сложного движения, включая разгон, колебание без изменения угла атаки, вращение вокруг переменного центра вращения (рис. 2). При малых частотах колебания крыла структура вихревого течения слабо отличается от такового на неподвижном крыле при различных углах атаки с тем единственным отличием, что вихревой след перемещается не прямолинейно в направлении натекающего потока, а осциллирует вниз по потоку с частотой вынужденных колебаний крыла. Однако при больших частотах в результате активного взаимодействия двух нестационарных процессов изменяется интенсивность нарастания завихренности вниз по потоку, что приводит к вырождению трехмерных возмущений и уменьшению зоны отрыва вплоть до ее полного устранения.

а

б

в

РИС. 2. Трехмерная вихревая структура течения при обтекании колеблющегося крыла для различных частот колебаний: $St = 0.12$ (а), 0.36 (б), 0.72 (в) при $\mathrm{Re}_L = 6 \cdot 10^4$, $St = 0.12, 0.36, 0.72$, $\alpha_{\max} = 15^\circ$

Выводы. Предложены алгоритмы решения нестационарных задач обтекания колеблющихся тел на основе прямого численного моделирования трехмерных уравнений Навье – Стокса с использованием программных кодов собственной разработки в рамках открытого пакета OpenFOAM.

Разработаны библиотеки динамических расчетных сеток, позволяющие генерировать ортогональные структурированные сетки на каждом временном слое в соответствии с задаваемым законом движения поверхности обтекаемого тела.

Исследована трехмерная структура течений на обтекаемой поверхности с активно колеблющейся вставкой и крыловом профиле, совершающем периодические вращательно-колебательные движения в набегающем потоке, при изменении параметров вынужденных возмущений.

Показана возможность управления структурой пограничного слоя и вихревого следа путем варьирования частотными и амплитудными характеристиками колеблющейся поверхности.

Я.В. Загуменний, Г.О. Воропаєв

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОБТІКАННЯ НЕСТАЦІОНАРНО РУХОМИХ ТІЛ

Запропоновано алгоритми розв’язання нестаціонарних задач обтікання коливних тіл на основі прямого чисельного моделювання тривимірних рівнянь Нав’є – Стокса з використанням бібліотек динамічних розрахункових сіток і програм власної розробки відкритого пакета OpenFOAM. Наведено результати розрахунків збуреного поля течії на обтічній поверхні з активно коливною вставкою і крилового профілю, що здійснює періодичні обертально-коливні рухи в натікаючому потоці рідини. Показано можливість керування структурою примежового шару і вихрового сліду шляхом варіювання частотними і амплітудними характеристиками коливної поверхні.

Ya.V. Zagumennyi, G.A. Voropaiev

NUMERICAL SIMULATION OF FLOWS AROUND UNSTEADY MOVING BODIES

The algorithms are proposed for solving non-stationary problems of flows around oscillating bodies based on direct numerical simulation of 3D Navier–Stokes equations using dynamic mesh libraries and program codes of own development in the frame of the OpenFOAM tools with open source. The calculation results are shown on perturbed flow field around an actively oscillating surface and a wing profile performing periodic rotational-oscillating movement in the oncoming free stream. The possibility of controlling the boundary layer structure and the vortex wake is shown by varying the frequency and amplitude characteristics of the oscillating surface.

Список литературы

1. Kramer M.O. Boundary layer stabilization by distributed damping. *J. Nav. Eng.* 1962. Vol. 74. P. 341 – 348.
2. Landahl M.T. On the stability of laminar incompressible boundary layer over a flexible surface. *J. Fluid Mech.* 1962. Vol. 13. P. 609 – 632.
3. Duncan J.H., Waxman A.M., Tulin M.P. The dynamics of waves at the interface between a viscoelastic coating and a fluid flow. *J. Fluid Mech.* 1985. Vol. 158. P. 177 – 197.

4. Воропаев Г.А. Структура вынужденных возмущений в ламинарном пограничном слое при источнике возмущений на обтекаемой поверхности. *Прикладная гидромеханика*. 2007. Том 9(81), № 2–3. С. 52 – 68.
5. Voropaev G.A., Zagumennyi Ia.V. Wave and vortex structure of transitional boundary layer over deformable surface. *Physica Scripta*. 2010. T. 142. 014010.
6. Воропаев Г.А., Загуменный Я.В. Численное моделирование взаимодействия локальных возмущений пограничного слоя с деформирующейся поверхностью. *Вестник Донецкого университета*, *Сер. А: Естественные науки*. 2009. Вып. 1. С. 154 – 165.
7. Горелов Д.Н. Движитель типа машущего крыла. *Прикладная механика и техническая физика*. 2014. Т. 55, № 6. С. 120 – 126.
8. Ахмедов Т.Х. Летательные и подводные аппараты с машущими движителями. *Монография*. М.: Инфра-Инженерия, 2017. 192 с.
9. Young J., Lai J., Platzer M. A review of progress and challenges in flapping foil power generation. *Prog. Aerosp. Sci.* 2017. Vol. 67. P. 2 – 28.
10. Воропаев Г.А., Зайнер-Гундерсен Д., Коробов В.И. Гидродинамические характеристики колеблющегося крыла. *Прикладная гидромеханика*. 2015. Том 17, № 3. С. 3 – 9.
11. Jasak H. OpenFOAM: open source CFD in research and industry. *Int. J. Naval Architecture and Ocean Engineering*. 2009. Vol. 1(2). P. 89 – 94.

Получено 29.11.2018

Об авторах:

Загуменный Ярослав Викторович,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Института гидромеханики НАН Украины,
E-mail: zagumennyi@gmail.com

Воропаев Геннадий Александрович,
доктор физико-математических наук, профессор, член-кор. НАН Украины,
зам. директора по научной работе Института гидромеханики НАН Украины.
E-mail: voropaiev.gena@gmail.com