

Модифицированный метод расчета течений в областях с подвижными границами

И. П. Бойчук¹, А. В. Гринек², И. М. Данцевич³

Государственный морской университет им. адм. Ф.Ф. Ушакова
г. Новороссийск

¹igor_boichuk@mail.ru, ²grinyokann@gmail.com, ³dantsevich65@mail.ru

Аннотация. В статье рассмотрен метод расчета потоков в областях с криволинейными границами. Твердое тело в потоке моделируется как непрерывно распределенное по объему силовое поле. Реакция потока на твердое тело находится из решения задачи о взаимодействии однородного потока газа с преградой. Для повышения точности вычислений на грубых декартовых сетках предложен метод отображения направляющих свойств гладких границ. Продемонстрирована возможность применения данного подхода для моделирования обтекания тел с подвижными границами.

Ключевые слова: декартовы сетки; подвижные границы; направляющие свойства; численный метод; расчет течений

I. ВВЕДЕНИЕ

Отыскание решений в областях со сложной геометрией является одной из важнейших проблем вычислительной гидродинамики. Большинство методов расчета гидродинамических течений предполагает наличие расчетной сетки, в которой твердые тела отслеживаются с помощью граничных сеточных узлов. Криволинейные границы представляются с помощью структурированных или неструктурированных сеток. Построение качественной сетки само по себе является непростой задачей, решение которой зачастую оформляется в виде отдельного сеточного генератора, при этом качество выполнения этого этапа влияет на точность конечных результатов. В тех случаях, когда твердые тела имеют сложную форму, время построения сетки может быть соизмеримо со временем расчета. В задачах оптимизации геометрии тела, где применяются еще и адаптивные сетки [1], затраты времени на построение и перестроение сетки могут быть особенно критичны.

Альтернативой методам, основанным на применении адаптивных сеток, являются конечно-разностные методы, которые позволяют получать решения уравнений в геометрически сложных областях на декартовых сетках [2]. Построение декартовых сеток достаточно экономично. Кроме того, методы декартовых сеток дают возможность получения решения задач с подвижными границами и изменением геометрии тела без их многократного перестроения. Основной недостаток такого подхода состоит в трудности аппроксимации достаточно сложных расчетных областей прямоугольными границами. В этом случае декартовы сетки из-за локального вырождения либо

не могут быть построены в принципе, либо оказываются далекими от оптимальных, что приводит к большим погрешностям.

Авторами предлагается для моделирования обтекания движущихся тел с криволинейными поверхностями использовать разработанный и проверенный подход для расчета течений в турбомашинах [3], т.н. «метод несущего диска», который заключается в замене турбины при моделировании непрерывным силовым полем.

II. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

А. Постановка задачи

Пространственное течение вязкой сжимаемой жидкости в области Ω_f (рис. 1) описывается системой уравнений, выражающей законы сохранения массы и импульса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_j)}{\partial x_j} = \delta_1, \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho w_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_j w_k)}{\partial x_k} + \frac{\partial p}{\partial x_j} = \delta_{2j}, \quad j = \overline{1,3}, \text{ в } \Omega_f, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \alpha w_j + \beta \frac{\partial w_j}{\partial n} &= \gamma \text{ на } \Sigma_f, \\ w_i(\vec{x}, t_0) &= w_{0i}, \\ w_i(\vec{x}, t) \Big|_{\Sigma_b} &= U_i(t), \end{aligned} \quad (3)$$

где Ω_f – расчетная область с границей Σ_f , Ω_b – обтекаемое тело с границей Σ_b , w_j – компоненты вектора скорости потока, p – давление, x_j – координаты, ρ – плотность, δ_1 – источник плотности, δ_{2j} – источники импульса, α, β, γ – коэффициенты, зависящие от типа известных краевых условий, U_i – компоненты вектора скорости тела. Замыкается система (1)-(2) уравнением состояния среды.

Для решения системы (1)-(3) на криволинейной сетке необходимо произвести дискретизацию границы Σ_b тела Ω_b и после этого построить сетку для пространства Ω_f .

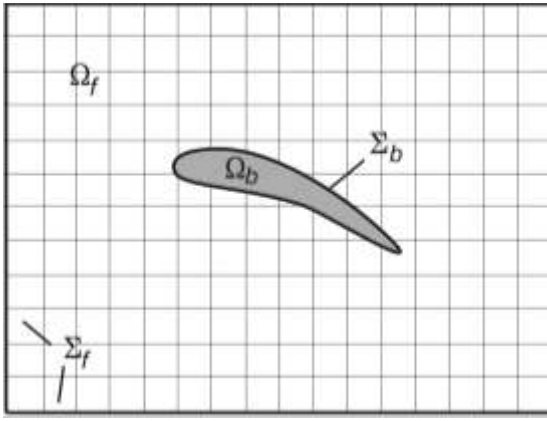


Рис. 1. Геометрия расчетной области

Согласно [4], влияние тела Ω_b на поток можно учитывать путем добавления объемной силы $f(x_1, x_2, x_3, t)$ в уравнения движения. Тогда уравнение импульсов приобретает следующий вид

$$\frac{\partial(\rho w_j)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho w_j w_k)}{\partial x_k} + \frac{\partial p}{\partial x_j} = \delta_{2j} + f_j(x_1, x_2, x_3, t). \quad (4)$$

Вместо условия непроницаемости поверхности тела Ω_b вводится непрерывно распределенное по объему силовое поле, эквивалентное исходному в каждый момент времени. Граница области, занятой силовым полем, совпадает с границей рассматриваемого тела Ω_b . Выражение для силы $f(x_1, x_2, x_3, t)$ определяется на основе физических свойств конкретной задачи [5-15].

В. Движение плоской пластинки

Рассмотрим движение тонкой пластинки, мгновенно погружаемой в поток (рис. 2). При этом пластинка движется со скоростью U . В процессе обтекания тела на контуре тела возникает газодинамическая нагрузка $\delta P = p_+ - p_-$, где p_{\pm} — давление на контуре. Изменение давления на контуре зависит от параметров невозмущенного течения и взаимной ориентации потока и тела. При этом направление действия силы совпадает с внешней нормалью $(f \parallel n_{\pm})$ к профилю в соответствующей точке приложения силы.

Значения давления на контуре определяются решением автомодельной задачи [16] о взаимодействии однородного потока газа с преградой [3]. В результате получается сила, определяемая через разрыв давлений за и перед профилем. Это позволяет получить в рассматриваемой области течения поле скоростей и давлений с учетом влияния на поток твердого тела.

Течение перед профилем. Перед пластинкой должно происходить торможение потока. Очевидно, что процесс торможения должен осуществляться в волне сжатия.

Течение за профилем. За пластинкой течение очевидным образом связано с появлением волны разрежения.

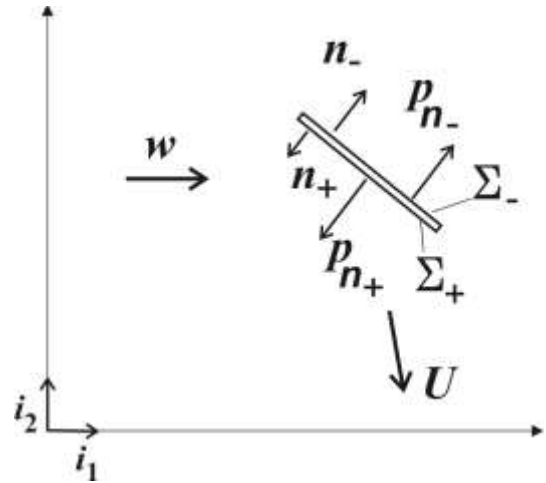


Рис. 2. Модель силового взаимодействия контура с потоком сжимаемой среды

Характеристики потока (скорость и давление) определяются согласно [3].

С. Отображение направляющих свойств поверхности

Вообще говоря, построенное течение происходит вдоль линий тока, несовпадающих с контурами тела, т.е. через тело происходит перетекание массы. Для учета направляющих свойств поверхностей тел на относительно грубых сетках используется изоэнтропическая модель взаимодействия, учитывающая, что поверхностные силы не совершают работы в системе отсчета, связанной с обтекаемым объектом: $(f, w) = 0$. Такая модель оперирует представлением о силовом воздействии на лагранжеву частицу, которая из начального положения по истечении малого промежутка времени приобретает заданное направление движения. Данная модель позволяет найти вектор скорости с учетом поворота потока (рис. 3), что дает возможность далее определить давление и температуру.

Используя модель взаимодействия, получаем в области, прилегающей к телу, вектор скорости с учетом направляющих свойств профиля [5]:

$$\begin{cases} w_1^{(v)} = w^{(v_m)} \cos \alpha_{2,3} \sin \alpha_{1,3} \\ w_2^{(v)} = w^{(v_m)} \cos \alpha_{1,3} \sin \alpha_{2,3} \\ w_3^{(v)} = w^{(v_m)} \cos \alpha_{1,3} \cos \alpha_{2,3} \end{cases}$$

где $\alpha_{i,j}$ — косинусы углов между вектором скорости и осями системы координат, связанной с профилем.

В результате моделирования получена картина плавного обтекания тела, которая построена с детальным учетом кривизны поверхности (рис.4).

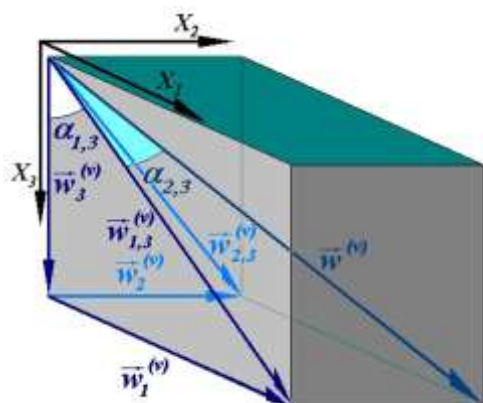


Рис. 3. Компоненты вектора скорости в заданном поле направлений

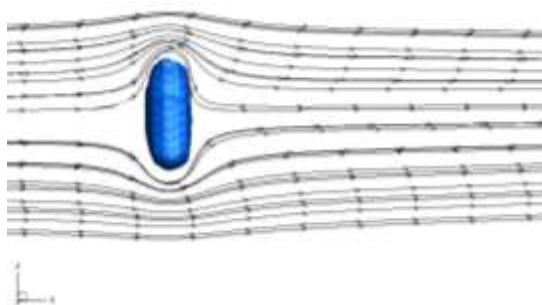


Рис. 4. Обтекание тела с учетом направляющих свойств поверхности

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

При помощи предложенного модифицированного метода проводилось моделирование работающего в потоке сжимаемой жидкости двухлопастного воздушного винта.. Результаты расчета, полученные при помощи разработанного метода, приведенные на рис. 5, показали хорошее качественное и количественное совпадение с экспериментальными данными.

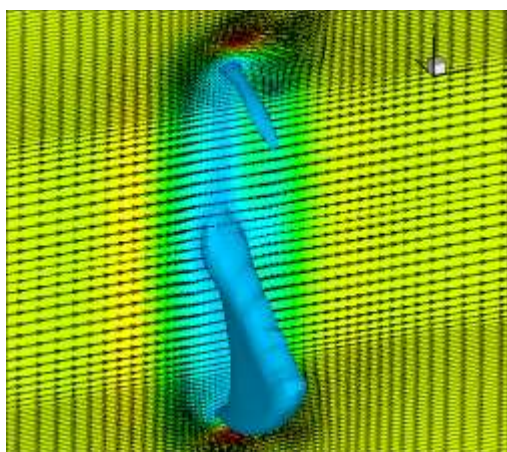


Рис. 5. Исоповерхности скорости, векторы скорости и поле скоростей в расчетной области

Предложенный метод позволил моделировать подвижные объекты с криволинейными границами без многократного перестроения расчетной сетки. При этом скорость расчета увеличилась на порядок [17].

ВЫРАЖЕНИЕ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТИ

Авторы выражают благодарность профессору Амброжевичу А.В. за идейное вдохновение и полезные критические замечания при выполнении данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Weizhang, H., Russell, R. D. (2011) Adaptive Moving Mesh Methods. Springer-Verlag New York.
- [2] Винников, В.В., Ревизников, Д.Л. Применение декартовых сеток для решения уравнений Навье–Стокса в областях с криволинейными границами // Матем. моделирование. 2005, Т. 17, номер 8. С. 15-30.
- [3] Амброжевич, А. В. Численное моделирование комплекса нестационарных газодинамических процессов в тепловых двигателях. Харьков: изд-во ХГАДТУ, 1999. 77 с.
- [4] Амброжевич, А. В. Численное моделирование теплофизических процессов в двигателестроении. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 2005. 233 с.
- [5] Мортиков, Е.В. Применение метода погруженной границы для решения системы уравнений Навье–Стокса в областях сложной конфигурации // Вычислительные методы и программирование. 2010, Т. 11. С. 32-42.
- [6] A.T. Conlisk / Progress in Aerospace Sciences 37 (2001) 419–476
- [7] Mikkelsen, R. Actuator Disc Methods Applied to Wind Turbines, MEK-FM-PHD 2003-02, 2003
- [8] Mikkelsen R, Sørensen JN. Yaw Analysis Using a Numerical Actuator Disc Model. Proc. 14th IEA Symp. on the Aerodynamics of Wind Turbines, Boulder, Col, USA, 2000; 53.59
- [9] Mikkelsen R, Sørensen JN, Shen WZ. Yaw Analysis Using a 3D Actuator Line Model. European Wind Energy Conf., Copenhagen, Denmark, 2001; 478.480
- [10] Verweij A.P. (2010). An investigation in actuator disc CFD solution applicability for aeroacoustics analysis of propellers and rotors. Internship report, CIRA.
- [11] Renaud, Thomas & O'Brien, David & Smith, Marilyn & Potsdam, Mark. (2008). Evaluation of Isolated Fuselage and Rotor-Fuselage Interaction Using Computational Fluid Dynamics. Journal of the American Helicopter Society. 53. 3-17. 10.4050/JAHS.53.3.
- [12] G.T. Housby, S. Draper and M.L.G. Oldfield. Application of Linear Momentum Actuator Disc Theory to Open Channel Flow. Report No. 2296/08, OUEL.
- [13] Simisioglou N., Breton, S-P., Ivanell S. Validation of the actuator disc approach using small-scale model wind turbines Wind Energ. Sci., 2, 587–601, 2017. <https://doi.org/10.5194/wes-2-587-2017>
- [14] Conway JT. Analytical solutions for the actuator disc with variable radial distribution of load. J. Fluid Mech., 1995; **297**: 327.355.
- [15] Conway JT. Exact actuator disc solutions for non-uniform heavy loading and slipstream contraction. J. Fluid Mech., 1998; **365**: 235.267.
- [16] Pope S.B. (2000) "Turbulent Flows", Cambridge University Press.
- [17] Бойчук, И.П. Комплексное аэродинамическое моделирование транспортных систем с двигателями прямой реакции. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 230 с.