

УДК 629.12

© А. Л. Сухоруков, М. А. Титов, И. А. Чернышев

ОАО Центральное конструкторское бюро морской техники «Рубин», Санкт-Петербург

su_andr@yahoo.com

ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ ДИНАМИКИ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ВРАЩАТЕЛЬНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ И МОМЕНТОВ

В статье рассмотрены методологические аспекты определения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов подводных объектов. Показано, что механизм «скользящих вычислительных сеток», реализованный во многих расчетных комплексах механики жидкости и газа, позволяет задавать колебания объекта в потоке по углу дифферента и, на основе численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса, определять гидродинамические воздействия на объект. Указаны основные этапы создания расчетной модели для решения подобных задач. Верификация расчетной модели осуществлялась на примере обтекания профиля крыла малого удлинения, совершающего вращательные колебания в потоке. Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Выявлен сдвиг фазы между законом движения крыла и соответствующими гидродинамическими воздействиями. В результате нестационарного расчета обтекания подводного объекта вязкой жидкостью определены поля скоростей и давлений в потоке. Получены соотношения, позволяющие по заданным значениям гидродинамических воздействий определять коэффициенты вращательных производных гидродинамических сил и моментов. Представленный подход позволяет оценить обоснованность гипотезы стационарности при исследовании движения подводного объекта.

Ключевые слова: гидродинамические характеристики, подводный объект, численное решение уравнений Навье—Стокса, коэффициенты вращательных производных гидродинамических сил и моментов.

A. L. Sukhorukov, M. A. Titov, I. A. Chernyshev

Central Design Bureau for Marine Engineering «Rubin», Saint Petersburg, Russia

THE USE OF NUMERIC METHODS OF VISCOUS FLUID DYNAMICS FOR DETERMINATION OF COEFFICIENTS OF ROTARY DERIVATIVES OF HYDRODYNAMIC FORCES AND MOMENTS

This paper presents the consideration of methodological aspects of determination of coefficients of rotary derivatives of hydrodynamic forces and moments of underwater objects. The article shows that mechanism of «sliding computation meshes» implemented in many computing software packages of mechanics of fluids allows setting oscillations of the object in the flow by trim angle and determining hydrodynamic impacts on the object based upon numeric solution of Reynolds-averaged Navier—Stokes equation. The paper contains the main stages of the development of the calculation model for solving similar tasks. The calculation model has been verified using as an example the flow around a wide airfoil profile producing rotary oscillations in the stream. The calculated and experimental data have been compared. Phase difference between the law of airfoil motion and corresponding hydrodynamic impacts has been identified. The non-stationary calculation of the flow of viscous fluid past the underwater object resulted in determination of velocity and pressure fields in the stream. Ratios have been obtained which allows determination of coefficients of rotary derivatives of hydrodynamic forces and moments based on the preset values of hydrodynamic impacts. The presented approach allows the validity of the stationary state hypothesis to be estimated when studying underwater object motion.

Key words: hydrodynamic characteristics, underwater object, numerical solution of equations of Navier—Stokes, coefficients of rotary derivatives of hydrodynamic forces and moments.

Сухоруков А. Л., Титов М. А., Чернышев И. А. Об использовании численных методов динамики вязкой жидкости для определения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2016. Т. 9, № 2. С. 52—61.

Sukhorukov A. L., Titov M. A., Chernyshev I. A. The use of numeric methods of viscous fluid dynamics for determination of coefficients of rotary derivatives of hydrodynamic forces and moments. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2016, 9, 2, 52—61.

В настоящее время при определении гидродинамических характеристик подводных объектов все шире используются численные методы. Значительный прогресс достигнут в определении коэффициентов позиционных гидродинамических сил и моментов, действующих на подводные объекты, движущиеся в жидкости, на основе численного решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса [1—7]. Вместе с тем определение коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов до сих пор остается проблемным вопросом. Практическая необходимость знания этих характеристик связана с тем, что без них невозможно определение параметров устойчивости и управляемости подводного объекта. Экспериментальное определение коэффициентов вращательных производных сопряжено со значительными материальными и временными затратами, но оценку этих параметров необходимо проводить уже на ранних стадиях проектирования. Поэтому разработка численных методов определения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов является весьма актуальной задачей.

Экспериментальное определение коэффициентов вращательных производных сегодня, как правило, осуществляется на ротативных установках. Ранее исследователями были предложены и другие экспериментальные методы — метод свободных или вынужденных колебаний, метод искривленных моделей [8—11]. Однако эти подходы обладают большей погрешностью по сравнению с испытаниями на ротативных установках и в настоящее время практически не используются.

Предложенные исследователями численные методы определения коэффициентов вращательных производных также не лишены недостатков. Так, используемый в ряде работ «метод вращающейся стенки», по сути, эквивалентен заданию на поверхности движущегося поступательно подводного объекта системы распределенных источников и стоков, обеспечивающих заданные вращательные компоненты скорости и не учитывает воздействие объекта на поток в дальнем поле, что может приводить к определенным погрешностям [12]. Ряд исследователей при численном определении коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов рассматривают обтекание подводного объекта жидкостью в криволинейном канале [13, 14]. Однако центробежные силы, действующие на частицы жидкости, приводят к повышению гидродинамического давления у стенки канала большего радиуса, что также влияет на распределение давления по поверхности подводного объекта и является дополнительным источником погрешностей.

В данной работе для численного определения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов исследуются колебания подводного объекта в потоке при кинематическом возбуждении на основе реализованного во многих программных комплексах механизма «скользящих вычислительных сеток». Полученные результаты сопоставляются с экспериментальными данными.

Теоретическое обоснование метода определения коэффициентов вращательных производных при кинематическом возбуждении подводного объекта по углу дифферента. Для начала рассмотрим модельную задачу об определении гидродинамических характеристик твердого тела, совершающего горизонтальные колебания в жидкости на идеально гладкой поверхности и соединенного пружиной с вертикальной стенкой. Уравнения движения тела с учетом линеаризованного коэффициента вязкого трения жидкости может быть записано в виде:

$$(m + m_a)\ddot{x} + \eta\dot{x} + cx = 0, \quad (1)$$

где x — перемещение тела; m — масса тела; m_a — присоединенная масса жидкости при горизонтальных колебаниях; η — линеаризованный коэффициент вязкого трения жидкости; c — коэффициент жесткости пружины.

Обозначим гидродинамическое воздействие на тело при его движении:

$$F_{gd} = -m_a\ddot{x} - \eta\dot{x}. \quad (2)$$

Пусть тело подвергается кинематическому возбуждению заданного вида:

$$x = A \sin \tilde{\omega} t \quad (3)$$

и мы можем каким-либо способом определить гидродинамическое силовое воздействие на него и представить в виде:

$$F_{gd} = \tilde{B} \sin(\tilde{\omega} t + \phi) = B_1 \sin \tilde{\omega} t + B_2 \cos \tilde{\omega} t. \quad (4)$$

Подставляя (3) и (4) в (2), получим:

$$B_1 \sin \tilde{\omega} t + B_2 \cos \tilde{\omega} t = m_a A \tilde{\omega}^2 \sin \tilde{\omega} t - \eta A \tilde{\omega} \cos \tilde{\omega} t. \quad (5)$$

Приравнивая коэффициенты при одинаковых тригонометрических функциях, будем иметь:

$$m_a = \frac{B_1}{A\tilde{\omega}^2}; \quad \eta = -\frac{B_2}{A\tilde{\omega}}. \quad (6)$$

Таким образом, могут быть определены гидродинамические характеристики тела.

Не уменьшая общности, рассмотрим теперь определение вращательных гидродинамических характеристик подводного объекта в вертикальной плоскости. Линеаризованные уравнения движения удифференцированного подводного объекта при малых углах атаки без переключений рулей могут быть записаны в виде [8]:

$$-m(1+k_{22})v_0 \frac{d\alpha}{dt} + m(1+k_{11})v_0 \frac{d\phi}{dt} = c_y^\alpha \alpha \frac{\rho v_0^2}{2} V^{2/3} + c_y^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \frac{d\phi}{dt} V; \quad (7)$$

$$J_z(1+k_{66}) \frac{d^2\phi}{dt^2} = m_z^\alpha \alpha \frac{\rho v_0^2}{2} V + m_z^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \frac{d\phi}{dt} V^{4/3} - Dh\phi, \quad (8)$$

где m — масса подводного объекта; J_z — момент инерции объекта относительно поперечной оси; v_0 — линейная скорость движения подводного объекта; k_{11} , k_{22} , k_{66} — коэффициенты присоединенных масс объекта при продольном, поперечном и вращательном движении; α — угол атаки; ω_z — угловая скорость подводного объекта; ϕ — угол дифферента; ρ — плотность воды; V — водоизмещение подводного объекта; c_y^α , m_z^α — коэффициенты позиционных производных гидродинамических сил и моментов по углу атаки α ; $c_y^{\omega_z}$, $m_z^{\omega_z}$ — коэффициенты вращательных производных гидродинамических сил и моментов по угловой скорости ω_z ; $Dh\phi$ — момент остойчивости.

Тогда, в силу приведенных выше рассуждений, нормальная гидродинамическая сила и продольный момент равны:

$$F_{gd} = mk_{22}v_0 \frac{d\alpha}{dt} - mk_{11}v_0 \frac{d\phi}{dt} + c_y^\alpha \alpha \frac{\rho v_0^2}{2} V^{2/3} + c_y^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \frac{d\phi}{dt} V; \quad (9)$$

$$M_{gd} = -J_z k_{66} \frac{d^2\phi}{dt^2} + m_z^\alpha \alpha \frac{\rho v_0^2}{2} V + m_z^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \frac{d\phi}{dt} V^{4/3}. \quad (10)$$

Выразим угол атаки α из соотношения (10):

$$\alpha = \frac{M_{gd} + J_z k_{66} \frac{d^2\phi}{dt^2} - m_z^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \frac{d\phi}{dt} V^{4/3}}{m_z^\alpha \frac{\rho v_0^2}{2} V}. \quad (11)$$

Подставляя (11) в (9), получим:

$$F_{gd} = \frac{mk_{22}v_0}{m_z^\alpha \frac{\rho v_0^2}{2} V} \left[\dot{M}_{gd} + J_z k_{66} \frac{d^3\phi}{dt^3} - m_z^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \frac{d^2\phi}{dt^2} V^{4/3} \right] - mk_{11}v_0 \frac{d\phi}{dt} + c_y^\alpha \frac{\rho v_0^2}{2} V^{2/3} \frac{M_{gd} + J_z k_{66} \frac{d^2\phi}{dt^2} - m_z^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \frac{d\phi}{dt} V^{4/3}}{m_z^\alpha \frac{\rho v_0^2}{2} V} + c_y^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \frac{d\phi}{dt} V. \quad (12)$$

Соотношение (12) может быть представлено в виде:

$$F_{gd} = n_1 \frac{d^3\phi}{dt^3} + (n_2 m_z^{\omega_z} + n_3) \frac{d^2\phi}{dt^2} + (n_4 m_z^{\omega_z} + n_5 c_y^{\omega_z} + n_6) \frac{d\phi}{dt} + m_1 \dot{M}_{gd} + m_2 M_{gd}, \quad (13)$$

где $n_1 = \frac{mk_{22}J_z k_{66}}{m_z^\alpha \frac{\rho v_0^2}{2} V}$; $n_2 = -\frac{mk_{22}V^{1/3}}{m_z^\alpha}$; $n_3 = \frac{c_y^\alpha}{m_z^\alpha V^{1/3}} J_z k_{66}$; $n_4 = -\frac{c_y^{\omega_z}}{m_z^\alpha} \frac{\rho v_0}{2} V$; $n_5 = \frac{\rho v_0}{2}$; $n_6 = -mk_{11}v_0$; $m_1 = \frac{mk_{22}}{m_z^\alpha \frac{\rho v_0^2}{2} V}$; $m_2 = \frac{c_y^\alpha}{m_z^\alpha V^{1/3}}$.

Пусть подводный объект совершает гармонические колебания по углу дифферента с частотой $\tilde{\omega}$:

$$\phi = A \sin \tilde{\omega} t, \quad (14)$$

а гидродинамические воздействия на него, полученные исходя из численного решения уравнений движения вязкой жидкости, представимы в виде колебаний с той же частотой и сдвигом фазы:

$$F_{gd} = \tilde{B} \sin(\tilde{\omega} t + \phi_F) = \tilde{B} \sin \phi_F \cos \tilde{\omega} t + \tilde{B} \cos \phi_F \sin \tilde{\omega} t = B_1 \cos \tilde{\omega} t + B_2 \sin \tilde{\omega} t; \quad (15)$$

$$M_{gd} = \tilde{C} \sin(\tilde{\omega} t + \phi_M) = \tilde{C} \sin \phi_M \cos \tilde{\omega} t + \tilde{C} \cos \phi_M \sin \tilde{\omega} t = C_1 \cos \tilde{\omega} t + C_2 \sin \tilde{\omega} t. \quad (16)$$

Подставляя (14)—(16) в (13), будем иметь:

$$B_1 \cos \tilde{\omega} t + B_2 \sin \tilde{\omega} t = -n_1 \tilde{\omega}^3 A \cos \tilde{\omega} t - (n_2 m_z^{\omega_z} + n_3) \tilde{\omega}^2 A \sin \tilde{\omega} t + (n_4 m_z^{\omega_z} + n_5 c_y^{\omega_z} + n_6) \tilde{\omega} A \cos \tilde{\omega} t - m_1 C_1 \tilde{\omega} \sin \tilde{\omega} t + m_1 C_2 \tilde{\omega} \cos \tilde{\omega} t + m_2 C_1 \cos \tilde{\omega} t + m_2 C_2 \sin \tilde{\omega} t. \quad (17)$$

Приравнявая коэффициенты при одинаковых тригонометрических функциях, получим систему для определения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов:

$$B_1 = -n_1 \tilde{\omega}^3 A + n_4 m_z^{\omega_z} \tilde{\omega} A + n_5 c_y^{\omega_z} \tilde{\omega} A + n_6 \tilde{\omega} A + m_1 C_2 \tilde{\omega} + m_2 C_1; \quad (18)$$

$$B_2 = -n_2 m_z^{\omega_z} \tilde{\omega}^2 A - n_3 \tilde{\omega}^2 A - m_1 C_1 \tilde{\omega} + m_2 C_2. \quad (19)$$

На основе соотношений (18), (19) получим окончательные выражения для соответствующих коэффициентов:

$$m_z^{\omega_z} = -\frac{B_2 + n_3 \tilde{\omega}^2 A + m_1 C_1 \tilde{\omega} - m_2 C_2}{n_2 \tilde{\omega}^2 A}; \quad (20)$$

$$c_y^{\omega_z} = \frac{B_1 + n_1 \tilde{\omega}^3 A - n_4 m_z^{\omega_z} \tilde{\omega} A - n_6 \tilde{\omega} A - m_1 C_2 \tilde{\omega} - m_2 C_1}{n_5 \tilde{\omega} A}. \quad (21)$$

Видно, что для определения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов на основе последних соотношений, необходимо знать значения коэффициентов позиционных производных, которые, в свою очередь, определяются с некоторой погрешностью, таким образом, происходит накопление погрешности [15]. Попытаемся исключить влияние этого фактора. Для этого рассмотрим колебательное движение объекта вблизи нулевого угла дифферента и предположим, что его угловая скорость ω столь мала, что можно допустить равенство нулю угла атаки при нулевом угле дифферента $\phi = \alpha = 0$, а угловая скорость может быть определена как $\omega = \frac{d\phi}{dt} = \frac{d\alpha}{dt}$. Тогда, исходя из (9), (10) при $\phi = 0$, получим:

$$F_{gd} = mk_{22} v_0 \omega - mk_{11} v_0 \omega + c_y^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \omega V; \quad (22)$$

$$M_{gd} = m_z^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \omega V^{4/3}. \quad (23)$$

Таким образом, для определения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов на основе численного решения уравнений динамики вязкой жидкости необходимо определить закон изменения гидродинамической силы и момента при гармоническом кинематическом возбуждении подводного объекта, а затем определить эти характеристики на основе соотношений (22), (23) при угле дифферента равном нулю. Значение угловой скорости объекта в этот момент равно $\frac{d\phi}{dt} \Big|_{\phi=0} = \omega = A \tilde{\omega}$, где $\tilde{\omega}$ — циклическая чистота угловых колебаний подводного объекта. Тогда:

$$m_z^{\omega_z} = \frac{M_{gd} \Big|_{\phi=0}}{\frac{\rho v_0}{2} \omega V^{4/3}}; \quad (24)$$

$$c_y^{\omega_z} = \frac{F_{gd} \Big|_{\phi=0} - mk_{22} v_0 \omega + mk_{11} v_0 \omega}{\frac{\rho v_0}{2} \omega V}. \quad (25)$$

Отметим, что уравнения движения подводного объекта (7), (8) получены с использованием гипотезы стационарности, согласно которой гидродинамические силы и моменты, действующие на подводный объект при его неустановившемся движении, полностью определяются кинематическими параметрами движения в этот момент и не зависят от производных по времени этих параметров. Другими словами, не существует различий в гидродинамическом воздействии на объект при его установившемся и неустановившемся движении с соответствующими кинематическими параметрами. Так как рассматриваются линеаризованные уравнения, полученные расчетные зависимости, а значит и выводы справедливы в рамках линейного приближения.

При отказе от гипотезы стационарности в уравнениях движения подводного объекта (7), (8) появляются слагаемые, зависящие от производных по времени кинематических параметров, определяющихся коэффициентами $c_y^{\dot{\alpha}}$, $c_y^{\dot{\omega}_z}$, $m_z^{\dot{\alpha}}$, $m_z^{\dot{\omega}_z}$. Тогда гидродинамические воздействия на подводный объект, в свою очередь, определяются на основе соотношений:

$$F_{gd} = mk_{22}v_0 \frac{d\alpha}{dt} - mk_{11}v_0 \frac{d\phi}{dt} + c_y^{\alpha} \frac{\rho v_0^2}{2} V^{2/3} + c_y^{\dot{\alpha}} \frac{\rho v_0}{2} V + c_y^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \frac{d\phi}{dt} V + c_y^{\dot{\omega}_z} \frac{\rho}{2} \frac{d^2\phi}{dt^2} V^{4/3}; \quad (26)$$

$$M_{gd} = -J_z k_{66} \frac{d^2\phi}{dt^2} + m_z^{\alpha} \frac{\rho v_0^2}{2} V + m_z^{\dot{\alpha}} \frac{\rho v_0}{2} V^{4/3} + m_z^{\omega_z} \frac{\rho v_0}{2} \frac{d\phi}{dt} V^{4/3} + m_z^{\dot{\omega}_z} \frac{\rho}{2} \frac{d^2\phi}{dt^2} V^{5/3}. \quad (27)$$

С учетом тех же допущений, что были рассмотрены выше, значения гидродинамических воздействий при нулевом угле дифферента будут равны:

$$m_z^{\omega_z} + m_z^{\dot{\alpha}} = \frac{M_{gd} \Big|_{\phi=0}}{\frac{\rho v_0}{2} \omega V^{4/3}}; \quad (28)$$

$$c_y^{\omega_z} + c_y^{\dot{\alpha}} = \frac{F_{gd} \Big|_{\phi=0} - mk_{22}v_0\omega + mk_{11}v_0\omega}{\frac{\rho v_0}{2} \omega V}. \quad (29)$$

Как показал С. М. Белоцерковский [16], при определении вращательных производных гидродинамических сил и моментов методом малых колебаний определяются именно комплексы $m_z^{\omega_z} + m_z^{\dot{\alpha}}$, $c_y^{\omega_z} + c_y^{\dot{\alpha}}$. Видно, что правые части соотношений (24), (25) и (28), (29) равны между собой. Таким образом, определяя комплексы и варьируя частотой колебаний объекта, можем определить степень влияния нестационарных гидродинамических факторов на динамику подводного объекта.

Параметры и верификация расчетной модели. Определение гидродинамических воздействий при колебаниях подводного объекта по углу дифферента проводилось в программном комплексе Ansys/Fluent. Базовые расчетные процедуры комплекса основаны на численном решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса методом контрольных объемов. Для замыкания данной системы уравнений использовалась $k - \varepsilon$ Realizable модель турбулентности с применением стандартных пристеночных функций. Величина безразмерной нормальной дистанции от стенки y^+ при построении вычислительной сетки составляла около 50 единиц. Как показывают результаты тестовых расчетов, данная модель обладает весьма малой чувствительностью к изменению сеточных параметров в допустимых интервалах их изменения, хорошо верифицирована, однако при расчете отрывных явлений излишне диссипативна [2—4]. Так как в работе рассматривается обтекание объекта с плавными обводами и невысокими частотами возбуждения, интенсивного вихреобразования в кормовой оконечности не наблюдается, поэтому использование $k - \varepsilon$ Realizable модели приемлемо. При увеличении частоты возбуждения и, следовательно, возрастании интенсивности отрывных явлений целесообразно переходить на модели турбулентности, лучше разрешающие эти физические явления (например, k - ω SST).

Для верификации расчетной модели был проведен тестовый расчет обтекания профиля крыла малого удлинения совершающего вращательные колебания с амплитудой $\phi_0 = 10^\circ$. Эксперименты по определению гидродинамических воздействий на такое крыло проводились в ЛПИ [17]. Прямоугольное крыло с симметричным 20 %-ным профилем Жуковского было закреплено в вибрационном стенде и совершало колебания относительно оси вращения, расположенной на 35 % хорды от носка крыла. Размах

крыла был равен 267 мм, хорда $b = 200$ мм, так что удлинение крыла $\lambda = 1.335$. Крыло было снабжено концевыми шайбами. Для удобства монтажа датчиков давления крыло было выполнено из четырех отдельных блоков (рис. 1, *а*). Изменения мгновенного распределения давления проводились при помощи безынерционных индуктивных цилиндрических датчиков в аэродинамической трубе с открытой рабочей частью. Гидродинамическое силовое воздействие определялось интегрированием замеренных давлений по контуру крыла. Скорость потока была $v_0 = 22.8$ м/с, так что число Рейнольдса, при котором проводились исследования, равнялось $Re = 3.14 \cdot 10^5$. Частота колебаний равнялась $n = 7.46$ Гц, соответственно, число Струхала $Sh = \frac{2\pi nb}{v_0} = 0.411$.

Трехмерная модель крыла разработана в системе трехмерного моделирования Catia (рис. 1, *б*), затем был осуществлен ее экспорт в сеточный генератор ICFM CFD и построена соответствующая вычислительная сетка. Внешняя граница расчетной области представляла собой параллелепипед со встроенной сферической расчетной областью, содержащей рассматриваемый объект (рис. 2). Используемый скользящий интерфейс на границе сферической расчетной области обеспечивал возможность вращения крыла относительно внешней расчетной области.

На рис. 3 представлены поля гидродинамического давления, как при нулевом угле перекладки, так и в моменты времени, когда крыло занимает крайние положения $\pm 10^\circ$. Характерным является то, что при нулевом угле перекладки поле является несимметричным и зависит от направления вращательного движения крыла. Так, при угловом перемещении крыла в область положительных перекладок на нижней кормовой поверхности профиля наблюдается область повышенного давления (рис. 3, *а*), что приводит к возникновению положительной нормальной силы и обуславливает сдвиг фаз между углом перекладки и изменением коэффициента нормальной силы (рис. 4). Амплитудное значение коэффициента нормальной силы, полученное при расчете, равно $c_y = 0.27$ и очень хорошо согласуется с соответствующим экспериментальным значением $c_y = 0.26$, что подтверждает возможность использования данного подхода для определения гидродинамических воздействий при колебаниях подводных объектов.

Модель подводного объекта разработана в системе трехмерного моделирования Catia, как и для крыла, был осуществлен ее экспорт в сеточный генератор ICFM CFD и построена соответствующая вычислительная сетка. Внешняя граница расчетной области представляла собой параллелепипед со встроенной сферической расчетной областью, содержащей рассматриваемый подводный объект (рис. 5). Используемый скользящий интерфейс на границе сферической расчетной области обеспечивал возможность вращения подводного объекта относительно внешней расчетной области. Для лучшего разрешения структуры турбулентного пограничного слоя на основе рекомендаций [7] задавалось сгущение вычислительной сетки вблизи поверхности объекта.

Расчет обтекания подводного объекта турбулентным потоком проводился при числе Рейнольдса $Re = 2 \cdot 10^6$. Установлено, что для большинства безразмерных коэффициентов вязких гидродинамических сил и моментов, кроме коэффициента сопротивления c_x и в определенной мере коэффициента момента крена m_x , наблюдается явление автомодельности по этому критерию, если $Re > 10^6$. На этом основании рассчитанные коэффициенты могут быть перенесены на натуру практически без изменений [18].

На входных границах расчетной области задавалась скорость набегающего потока 2 м/с, на выходных — статическое давление в потоке на бесконечности. На поверхности объекта ставились условия прилипания и непротекания. При проведении расчета задавались гармонические колебания подводного объекта по углу дифферента с амплитудами 2 и 4 градуса и безразмерными угловыми скоростями

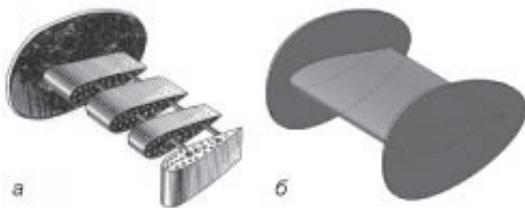


Рис. 1. Экспериментальная и расчетная модели.
а — прямоугольное разъемное крыло с шайбами;
б — трехмерная модель крыла.

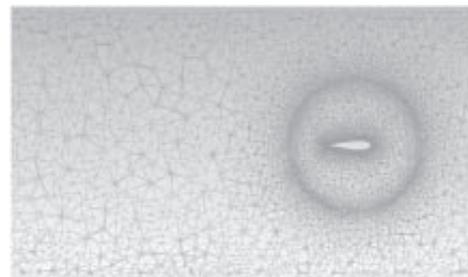


Рис. 2. Вычислительная сетка около крыла.

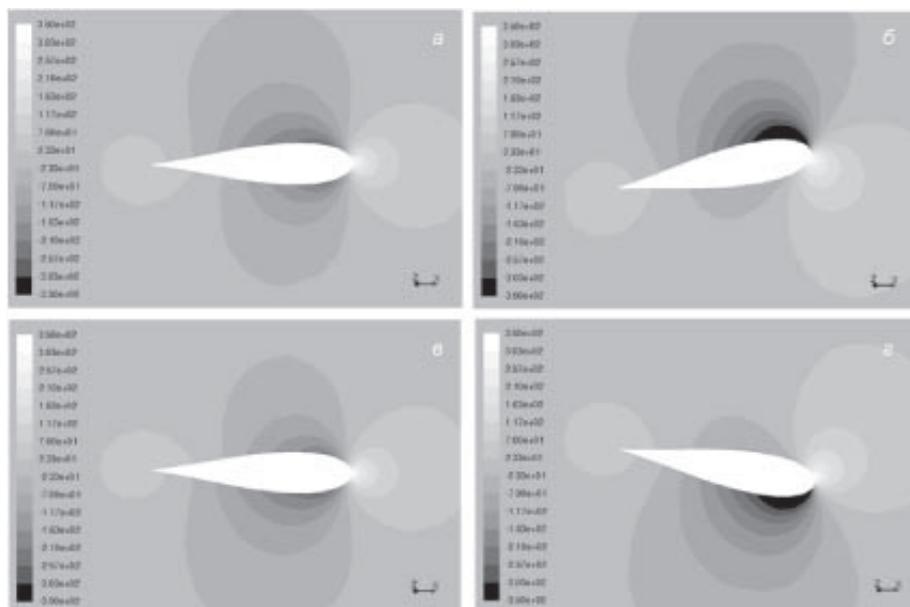


Рис. 3. Поля гидродинамических давлений (Па) при различных углах перекадки крыла: *a* — $\phi = 0^\circ$, перекадка на положительные углы; *b* — $\phi = 10^\circ$; *v* — $\phi = 0^\circ$, перекадка на отрицательные углы; *z* — $\phi = -10^\circ$.

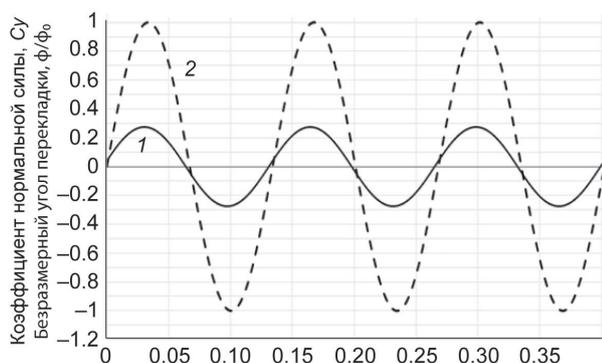


Рис. 4. Изменение коэффициента нормальной силы c_y (1) и безразмерного угла перекадки ϕ/ϕ_0 (2).

$\omega \frac{V^{1/3}}{v_0}$ равными 0.0125; 0.025 и 0.05. В ходе выполнения расчета значения гидродинамической силы и момента выходили на установившейся режим гармонических колебаний с частотой соответствующей частоте колебаний угла дифферента $\tilde{\omega}$ и сдвигом фаз ϕ_F, ϕ_M .

Результаты расчета и сопоставление с экспериментальными данными. В результате нестационарного расчета обтекания подводного объекта вязкой жидкостью получены поля скоростей и давлений в потоке. На рис. 6 приведены изменения соответствующих полей в течение одного периода колебаний подводного объекта. При прохождении объек-

том нулевого угла дифферента характерно существенное повышение гидродинамического давления на нижней или верхней (в зависимости от знака угловой скорости) поверхности кормового оперения, которое и обуславливает возникновение демпфирующих воздействий при таком движении.

На рис. 7, 8 для примера приведены характерные графики изменения гидродинамических воздействий при колебаниях подводного объекта по углу дифферента. Четко выражен сдвиг фаз между колебаниями угла дифферента и соответствующими гидродинамическими воздействиями.

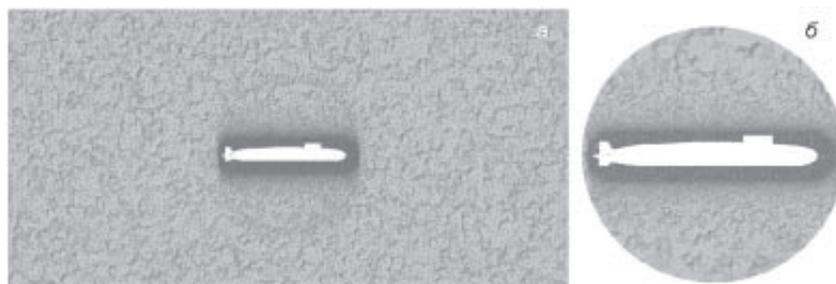


Рис. 5. Вычислительная сетка около подводного объекта. *a* — полная расчетная область; *b* — сферическая расчетная область.

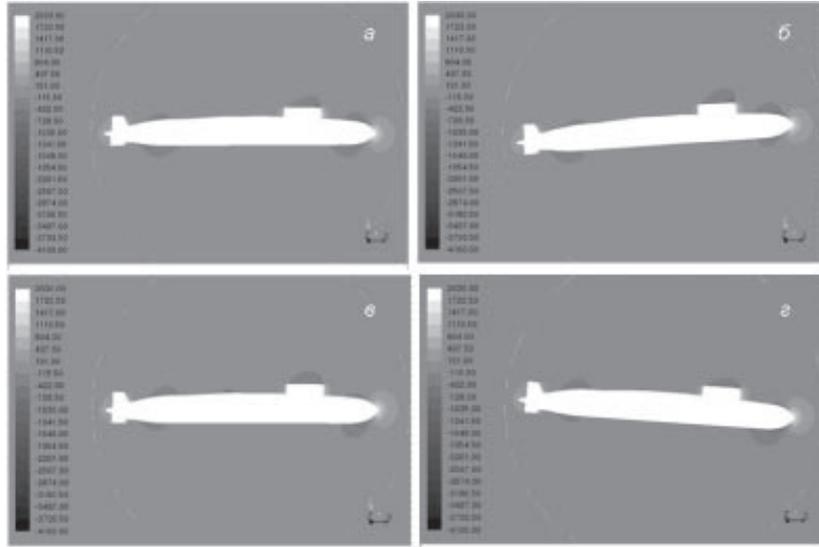


Рис. 6. Поля гидродинамических давлений (Па) при различных углах дифферента подводного объекта и безразмерной угловой скорости 0.025.

a — $\phi = 0^\circ$, переход на положительные углы дифферента; *б* — $\phi = 4^\circ$;
в — $\phi = 0^\circ$, переход на отрицательные углы дифферента; *з* — $\phi = -4^\circ$.

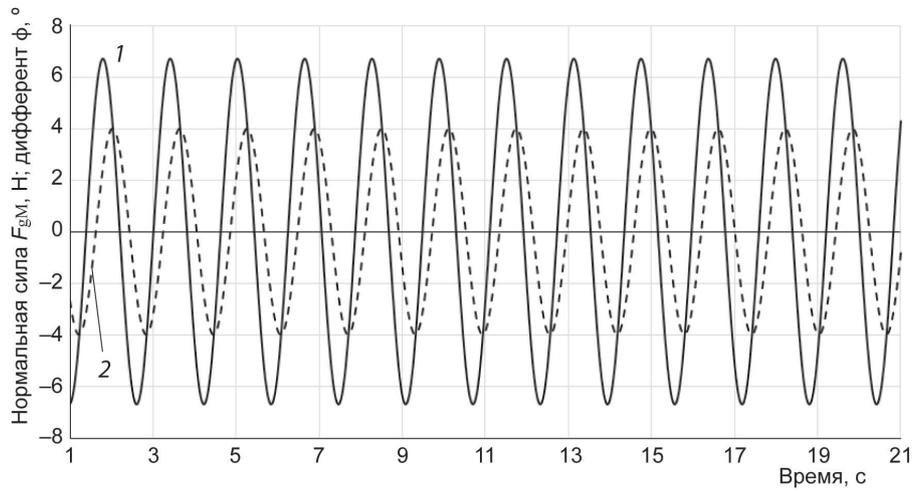


Рис. 7. Изменение нормальной силы (*I*) при колебаниях объекта. Безразмерная угловая скорость 0.025; амплитуда угла дифферента 4° (*2*).

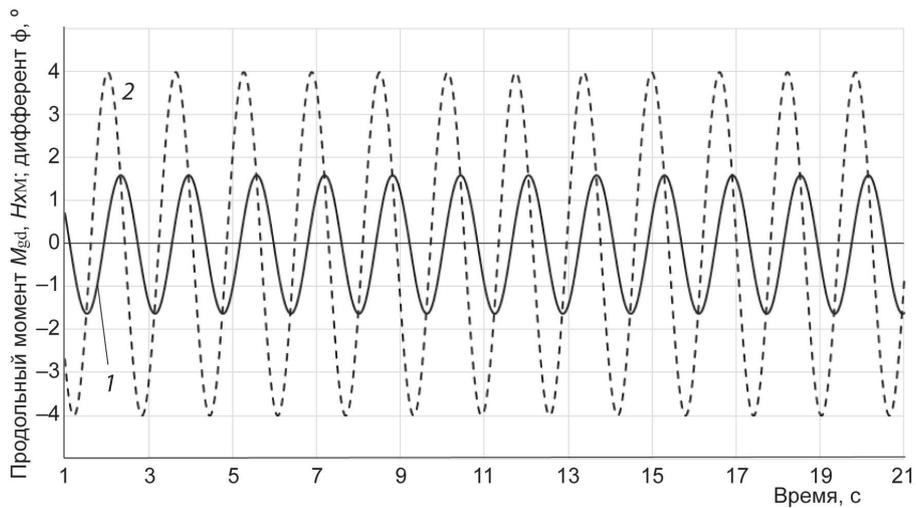


Рис. 8. Изменение продольного момента (*I*) при колебаниях объекта. Безразмерная угловая скорость 0.025; амплитуда угла дифферента 4° (*2*).

В таблице приведены расчетные значения комплексов $m_z^{\omega_z} + m_z^{\dot{\alpha}}$, $c_y^{\omega_z} + c_y^{\dot{\alpha}}$, полученные на основе соотношений (28), (29). Анализ табл. 1 показывает, что при заданных значениях угловых скоростей комплексы остаются практически постоянными и приблизительно равными $c_y^{\omega_z} + c_y^{\dot{\alpha}} \approx 1.2$; $m_z^{\omega_z} + m_z^{\dot{\alpha}} \approx -4.4$. Это говорит о слабом влиянии нестационарных факторов на значения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов, и подтверждает обоснованность гипотезы стационарности для таких движений. Следует отметить, что экспериментальные значения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов, полученные при проведении испытаний на ротативной установке, равны: $c_y^{\omega_z} = 0.8$; $m_z^{\omega_z} = -3.0$. Приведенное расхождение между расчетными и экспериментальными данными может быть связано с методологическими особенностями: с погрешностями, возникающими при линеаризации системы уравнений движения подводного объекта, с погрешностями численного решения уравнений Рейнольдса, возможным завышенным влиянием схемной вязкости характерным для $k - \epsilon$ моделей турбулентности (косвенно это подтверждается тем, что расчетные значения коэффициентов оказываются выше соответствующих экспериментальных значений), а также с возможными погрешностями самого эксперимента.

Расчетные значения коэффициентов вращательных производных

Безразмерная угловая скорость $\omega \left(\frac{V^{1/3}}{v_0} \right)$	Амплитудное значение угловой скорости ω , c^{-1}	Амплитуда угла дифферента ϕ , градусы	Циклическая частота колебаний $\tilde{\omega}$, c^{-1}	$c_y^{\omega_z} + c_y^{\dot{\alpha}}$	$m_z^{\omega_z} + m_z^{\dot{\alpha}}$
0.0125	0.135	2	3.88	1.24	-4.42
0.0125	0.135	4	1.94	1.25	-4.44
0.025	0.271	2	7.75	1.23	-4.35
0.025	0.271	4	3.88	1.20	-4.41
0.050	0.541	2	15.5	1.18	-4.42
0.050	0.541	4	7.75	1.18	-4.18

В работе рассмотрены методологические аспекты определения коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов подводных объектов на основе численного решения уравнений динамики вязкой жидкости. Показано, что механизм «скользящих сеток», реализованный во многих расчетных комплексах механики жидкости и газа, позволяет задавать колебания объекта в потоке по углу дифферента и, на основе решения осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье—Стокса, определять гидродинамические воздействия на объект.

В результате нестационарного расчета обтекания подводного объекта вязкой жидкостью определены поля скоростей и давлений в потоке. Получены соотношения, позволяющие по заданным значениям гидродинамических воздействий определять коэффициенты вращательных производных гидродинамических сил и моментов. Представленный подход позволяет оценить обоснованность гипотезы стационарности при исследовании движения подводного объекта.

Проведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Отмечено, что определенное расхождение между расчетными и экспериментальными данными может быть связано с методологическими особенностями, а также с возможными погрешностями самого эксперимента. В дальнейшем, для подтверждения достоверности метода требуется сопоставление расчетных и экспериментальных значений коэффициентов вращательных производных гидродинамических сил и моментов подводных объектов различной формы.

Литература

1. Гурьев Ю. В., Ткаченко И. В. Компьютерные технологии в корабельной гидродинамике. Монография. СПб.: Изд-во ВУНЦ ВМФ «ВМА», 2010. 326 с.
2. Волков К. Н., Емельянов В. Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.

3. Белов И. А., Исаев С. А. Моделирование турбулентных течений. СПб.: Изд-во БГТУ «Военмех», 2001. 109 с.
4. Снегирев А. Ю. Численное моделирование турбулентных течений. СПб.: Изд-во СПбПУ, 2009. 143 с.
5. Сухоруков А. Л., Каверинский А. Ю. Численное моделирование обтекания корпуса подводной лодки в программной среде «Star-CD» // Сборник трудов второй конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM. М., 2001. С. 23—28.
6. Сухоруков А. Л., Каверинский А. Ю. Опыт использования программного комплекса «Star-CD» при решении некоторых практических задач гидродинамики подводной лодки // Сборник трудов третьей конференции пользователей программного обеспечения CAD-FEM. М., 2002. С. 119—126.
7. Сухоруков А. Л. Использование вычислительных программных комплексов для определения гидродинамических характеристик подводных лодок // Труды конференции «Межотраслевая научно-практическая конференция ВОКОР-2006». СПб.: 1 ЦНИИ МО РФ, 2006. С. 45—54.
8. Рождественский В. В. Динамика подводной лодки. Т. 1. Л.: Судостроение, 1970. 352 с.
9. Федяевский К. К. Избранные труды. Л.: Судостроение, 1975. 440 с.
10. Федяевский К. К., Соболев Г. В. Управляемость корабля. Л.: Судпромгиз, 1963. 376 с.
11. Фирсов Г. А. Управляемость корабля. Л.: Изд-во ВМИУ им. Ф. Э. Дзержинского, 1954. 176 с.
12. Bellevre D., Diaz de Tuesta A., Perdon P. Submarine manoeuvrability assessment using Computational Fluid Dynamic tools // Twenty-Third Symposium on Naval Hydrodynamics, France, 2001.
13. Ray A., Singh S. N., Seshadri V. Evaluation of linear and nonlinear hydrodynamic coefficients of underwater vehicles using CFD // Proc. 28th ASME Conf. On Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Honolulu, Hawaii, USA, 2009.
14. Vaz G., Toxopeus S., Holmes S. Calculation of manoeuvring forces on submarines using two viscous-flow solvers // Proc. 29th ASME Conf. On Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai, China, 2010.
15. Каверинский А. Ю., Сухоруков А. Л. О влиянии погрешностей в определении гидродинамических коэффициентов на расчетное значение силового воздействия на подводный аппарат // XXXVI Всероссийская конференция «Управление движением морскими судами и специальными аппаратами», Труды конференции, Северодвинск, 2009. С. 167—173.
16. Белоцерковский С. М. О коэффициентах вращательных производных // Труды ЦАГИ. 1958. Вып. 725.
17. Яковенко В. В. О распределении давления по поверхности профиля, гармонически колеблющегося в поступательном потоке // Труды Ленинградского политехнического института. 1953. № 5.
18. Гурьев Ю. В., Слуцкая М. З., Ткаченко И. В. Гидродинамические проблемы создания компьютерных тренажеров морских объектов и пути их решения // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2008. № 2. С. 29—44.

Статья поступила в редакцию 18.03.2015 г.