
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.572

А.А. Болотин

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ВИХРЕЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЕВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Применение математического моделирования – необходимое условие для успешного проектирования судов на подводных крыльях в настоящее время. Представлено описание методики расчета гидродинамических характеристик подводных крыльев при помощи метода дискретных вихрей и приведены результаты расчетов.

Ключевые слова: подводные крылья, метод дискретных вихрей, гидродинамические характеристики, подъемная сила, лобовое сопротивление.

Идея поставить судно на крылья, безусловно, стала революционной в скоростном судостроении. Сочетание скорости, комфорта, экономичности в свое время сделали суда на подводных крыльях (СПК) очень популярным видом водного транспорта как у нас в стране, так и за рубежом. Долгие годы эксплуатации подтвердили эффективность этих судов, и возросший в последнее время интерес к СПК совершенно закономерен. Новый этап в развитии крылатых судов требует и новых методов в проектировании, в частности, более широкого внедрения методов математического моделирования.

Задача создания гидродинамического комплекса является основной при проектировании СПК. Выбор гидродинамической схемы и доведение ее до требуемых показателей – это результат многолетнего труда опытейших специалистов. В основе этой работы в течение многих лет лежал модельный эксперимент, в частности, испытания буксируемых моделей на открытой воде. Использование математического моделирования, несомненно, способно во много раз сократить сроки и стоимость процесса создания подводных крыльев.

Первым этапом этой работы должно являться расчетное определение гидродинамических характеристик крыльев, как необходимых исходных данных для исследования динамики движения СПК, устойчивости и управляемости. Значения гидродинамических нагрузок и их распределение вдоль крыла необходимы для расчетов прочности.

В данной работе представлены результаты расчета гидродинамических характеристик подводных крыльев методом дискретных вихрей [1]. Вихревые методы расчета несущих поверхностей достаточно прочно вошли в процесс проектирования летательных аппаратов, но не очень активно используются для исследования подводных крыльев. Тем не менее, крыльевая система СПК является очень удобным объектом исследования. Тонкие несущие поверхности трапецевидной формы, отсутствие объемных элементов позволяют уверенно применять вихревые методы для расчета гидродинамических характеристик. Метод дискретных вихрей отличается относительной простотой и наглядностью, а также легко распространяется на сложные крыльевые системы, какими являются подводные крылья. Некоторая некорректность при определении распределения нагрузки вдоль профиля для подводного крыла является неактуальной, так как это сказывается на точности определения продольного мо-

мента крыла относительно его передней (или задней) кромки, а его величина ввиду большого расстояния крыла от центра тяжести судна незначительна.

В качестве объекта исследования выбрано носовое крыльевое устройство СПК «Комета», являющееся основой для крыльев большинства морских СПК. Схема крыла представлена на рис. 1. Профиль крыла – плоско-выпуклый сегмент с максимальной толщиной 5,5%.

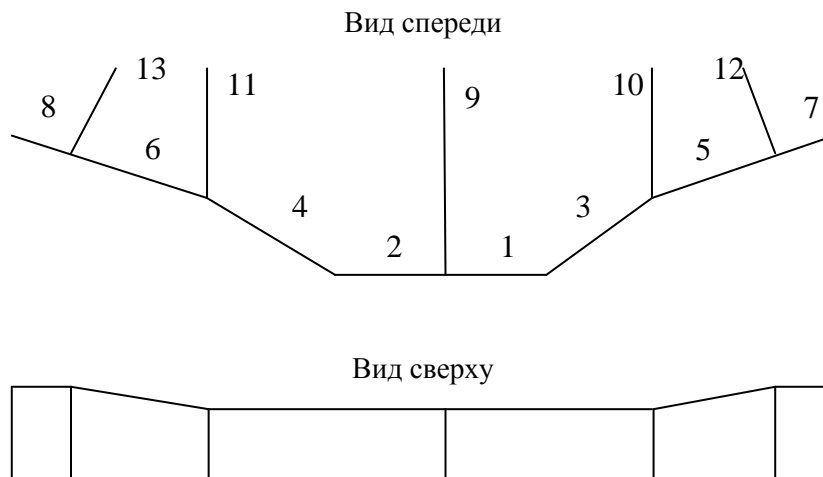


Рис. 1. Схема крыльевого устройства

Метод дискретных вихрей предполагает разбиение крыла на площадки, размещение на площадке вихря с неизвестной циркуляцией, определение этих циркуляций и гидродинамических сил, действующих на каждую площадку, а затем определение сил, действующих на все крыло. Для моделирования рассмотренное крыльевое устройство разбито на 13 трапециевидных участков. Нумерация участков представлена на схеме. Профилированные участки крыла (с 1 по 8) заменяются криволинейными несущими поверхностями, расположенными вдоль средней линии профиля, стойки крыла – плоскими несущими поверхностями. Криволинейные несущие поверхности разбиваются на 6 частей по хорде, плоские на 5. Разбиение по размаху определяется удлинением рассматриваемого участка и меняется от 8 до 1. Граница раздела моделируется зеркальной вихревой системой с циркуляцией того же знака, что и у основной вихревой системы. Задача решается в линейной постановке, свободные вихри лежат в плоскости хорд крыла. Результатами расчета являются гидродинамические коэффициенты трех проекций гидродинамической силы: лобового сопротивления (C_x), подъемной силы (C_y) и боковой силы (C_z), а также три проекции коэффициентов гидродинамического момента (m_x , m_y , m_z). Коэффициенты связаны с гидродинамическими силами соотношениями:

$$C_x = \frac{2R_x}{\rho V^2 S}; C_y = \frac{2R_y}{\rho V^2 S}; C_z = \frac{2R_z}{\rho V^2 S}; m_x = \frac{2M_x}{\rho V^2 SL}; m_y = \frac{2M_y}{\rho V^2 SL}; m_z = \frac{2M_z}{\rho V^2 SL},$$

где R_x, R_y, R_z – проекции гидродинамической силы;

M_x, M_y, M_z – проекции гидродинамического момента;

V – скорость судна;

ρ – плотность воды;

S – характерная площадь;

L – характерный линейный размер.

Из составляющих лобового сопротивления в рамках представленного метода определяется только индуктивное сопротивление крыльевого устройства. Для определения полного

гидродинамического сопротивления необходимо определить составляющие вязкостного $C_{\text{хв}}$ и волнового сопротивления $C_{\text{хвол}}$.

Согласно [2], вязкостное сопротивление :

$$C_{\text{хв}} = 2C_{\text{хпл}} \left\{ 1 + \left(\frac{U}{K_u} - 0.5 \right) C_y \right\},$$

где $C_{\text{хпл}} = 0,455 / (\lg Re)^{2,58}$;

$$Re = V b_{\text{ср}} / \nu;$$

$$U = 1 - e^{-2(\bar{h}_{\text{ср}})^{0,6}};$$

$$K_u = 1 + (0,5 + \bar{c}) e^{-2(\bar{h}_{\text{ср}})^{0,6}},$$

$$\bar{h}_{\text{ср}} = \frac{h_{\text{ср}}}{b_{\text{ср}}},$$

где \bar{c} – относительная толщина профиля;

ν – кинематическая вязкость воздуха;

$b_{\text{ср}}$ – средняя хорда крыла;

$h_{\text{ср}}$ – среднее погружение крыла.

Волновое сопротивление

$$C_{\text{хвол}} = \frac{C_y^2}{2Fr^2} e^{-\frac{2\bar{h}_{\text{ср}}}{Fr^2}} \left(1 - \frac{2\pi}{Fr^2} e^{-\frac{2\bar{h}_{\text{ср}}}{Fr^2}} \right),$$

где $Fr = \frac{V}{\sqrt{gb_{\text{ср}}}}$ – число Фруда.

На рис. 2 приведены результаты расчета коэффициента подъемной силы в зависимости от угла атаки α и погружения крыльцевого устройства. За величину погружения \bar{h} принято отстояние задней кромки крыла в диаметральной плоскости от поверхности воды в долях хорды. В качестве характерной площади принята горизонтальная проекция всей несущей части крыльцевого устройства.

На этом же рисунке приведены результаты модельных испытаний данного крыльцевого устройства, полученные в опытовом бассейне ЦНИИ им. акад. Крылова [3]. Испытания проводились на модели масштаб 1:10 при скорости буксировки 5,5 м/с.

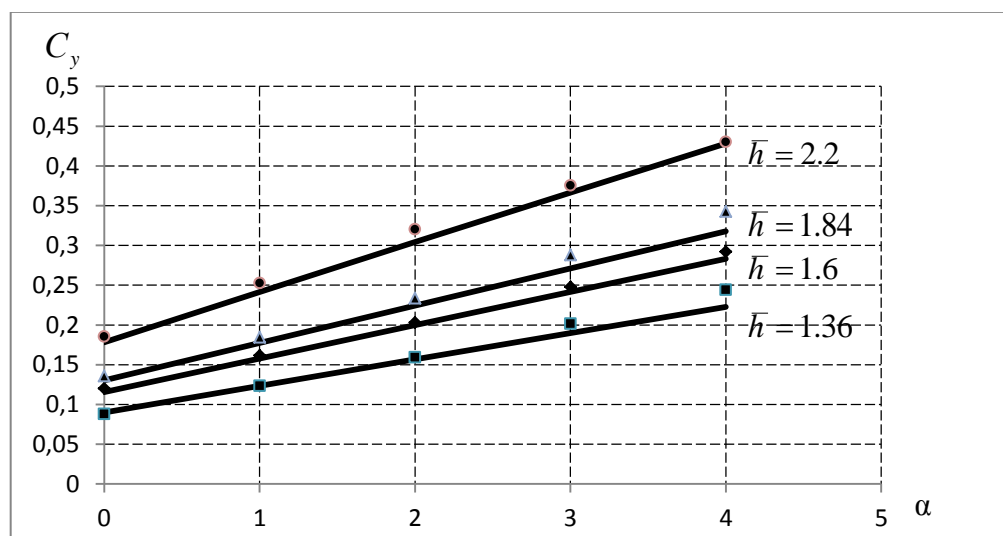


Рис 2. Расчетные и экспериментальные значения коэффициента подъемной силы от угла атаки

С целью идентификации расчетных и экспериментальных данных расчет проводился при тех же числах Рейнольдса, что и эксперимент. Расчетные углы атаки и погружения выбраны такими же, как в эксперименте. Результаты расчета представлены на рисунке сплошными линиями. Экспериментальные данные показаны отдельными точками.

Представленные результаты свидетельствуют об удовлетворительной сходимости результатов расчета и испытаний, что подтверждает целесообразность использования метода дискретных вихрей для расчета подводных крыльев.

Несомненным достоинством предлагаемой методики является пространственная постановка задачи. Расчет гидродинамических характеристик при крене и дрейфе не требует введения дополнительных условий. В качестве примера на рис. 3, 4 представлены зависимости коэффициента кренящего момента m_x рассмотренного крыльевого устройства от угла крена γ и от угла дрейфа β при различных погружениях. В качестве характерного линейного размера принят размах крыла. Зависимости, представленные на рис. 3, отслеживают вход в воду и выход из воды элементов крыльевого устройства с различными углами V-образности.

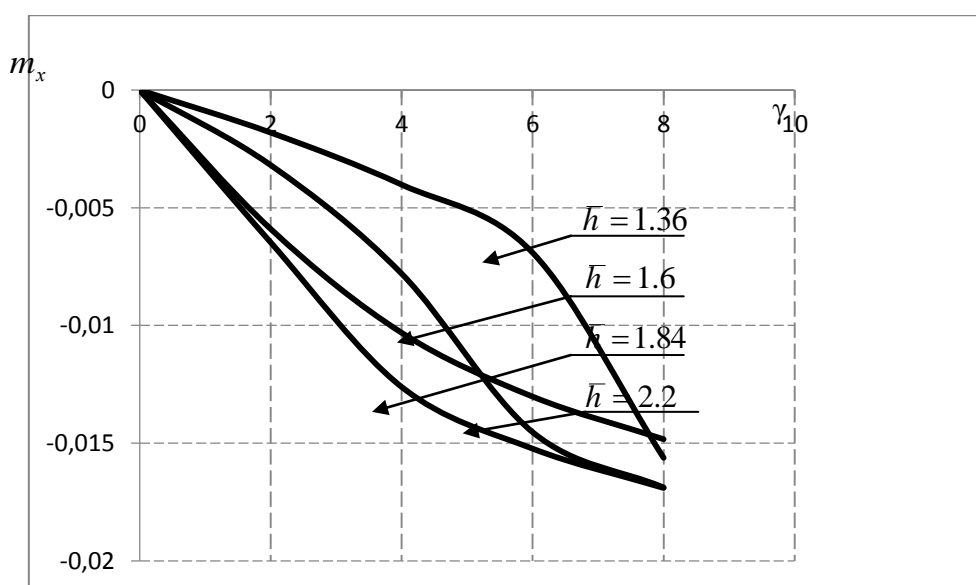


Рис. 3. Зависимость коэффициента кренящего момента от угла крена

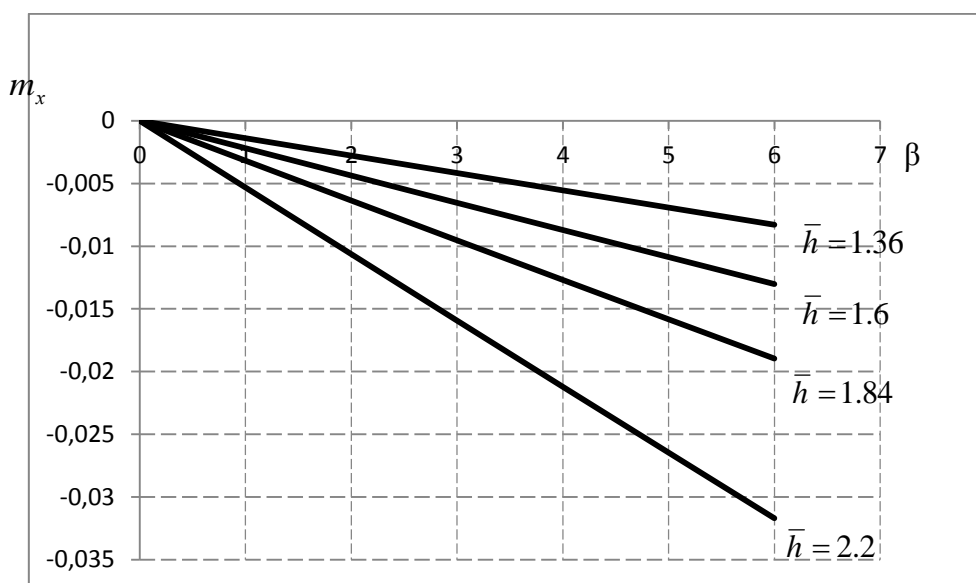


Рис. 4. Зависимость коэффициента кренящего момента от угла дрейфа

Проведенные методические исследования свидетельствуют о высокой степени достоверности расчета боковых гидродинамических характеристик.

Для расчета гидродинамических характеристик с отклоненными органами управления достаточно изменить форму несущей поверхности в соответствии с углом отклонения управляющего элемента. При этом необходимо часть несущей поверхности, обслуживаемую органом управления, выделить отдельным участком, и разбиение по хорде провести таким образом, чтобы отклоненная часть несущей поверхности моделировалась отдельными площадками. Проведенные исследования показали, что расчетные результаты хорошо согласуются с экспериментальными в области углов отклонения органов управления, не превышающих 10^0 .

Как указывалось ранее, получение гидродинамических характеристик производится путем интегрирования нагрузки, распределенной по площади крыла. Определение значений нагрузок, распределенных вдоль размаха крыла и вдоль стоек крыла, является отдельной задачей, достаточно эффективно решаемой при помощи данной методики.

Таким образом, предложенная методика позволяет с достаточной точностью получить полный спектр гидродинамических характеристик крыльевых устройств СПК, что значительно упрощает процесс проектирования судов. Полученные результаты являются исходными данными для математического моделирования динамики движения СПК, для решения задач получения кривой сопротивления [4], устойчивости, остойчивости и управляемости судна, а также получить исходные данные для расчета прочности.

Библиографический список

1. Белоцерковский, С.М. Тонкая несущая поверхность в дозвуковом потоке газа / С.М. Белоцерковский. – М.: Наука, 1965. – 244 с.
2. Егоров, И.Т. Гидродинамика быстроходных судов / И.Т. Егоров, В.Т. Соколов. – Л.: Судостроение, 1971. – 424 с.
3. Отчет по испытаниям в гидроканале моделей крыльевых устройств с поворотным закрылком. Технический отчет, ЦКБ по СПК, инв. № ОР 224-020-009, 1968.
4. Болотин, А.А. Методика расчета кривой сопротивления и посадки судна на подводных крыльях / А.А. Болотин // Проблемы прочности и пластичности: межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. – Н. Новгород, 2014. Вып. 76. С. 172–177.

*Дата поступления
в редакцию 02.06.2015*

A.A. Bolotin

THE USE OF DISCRETE VORTICES METHOD FOR THE HYDROFOILS RESEARCH

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The aim of this work is the development of methodology for hydrofoil hydrodynamic characteristics calculation. The method of discrete vortices, widely used in the aircraft industry, was chosen for calculation. The features of this method associated with its usage for hydrofoil calculation were distinguished. The hydrodynamic characteristics calculation for the fore wing device of the hydrofoil craft "Kometa" were done. The comparison of the calculation results and the results of towing tests of this wing device in Krylov Shipbuilding Research Institute is demonstrated. The comparison concluded that the usage of this method for the hydrofoils calculations is feasible. The proposed method allows obtaining the raw data for mathematical modeling of the dynamics of hydrofoil craft motion, for the calculation of the resistance, landing, stability, controllability and strength curves.

Key words: hydrofoil, method of discrete vortices, hydrodynamic characteristics, dynamic lift, drag.