

УДК 629.572

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КРИВОЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ И ПОСАДКИ СУДНА НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

© 2014 г.

А.А. Болотин

*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева*

alexanderbolotin@mail.ru

Поступила в редакцию 15.05.2014

Разработана расчетная методика построения буксировочной кривой и посадки судна на подводных крыльях, движущегося в крыльевом режиме. Приведен пример расчета по предложенной методике для судна на подводных крыльях «Полесье». Представлено сравнение результатов расчета с экспериментом.

Ключевые слова: судно на подводных крыльях, буксировочная кривая, посадка судна, гидродинамические силы, дифферент, погружение.

Введение

Одним из важнейших этапов проектирования судов на подводных крыльях (СПК) является построение кривой сопротивления (буксировочной кривой), а также зависимости погружения носового и кормового крыльевых устройств (посадки) от скорости движения судна. Обычно эта задача решается путем проведения буксировочных испытаний модели судна, что является достаточно трудоемким процессом, затратным по времени и финансам.

В настоящей статье представлена методика теоретического определения буксировочной кривой и посадки судна. Предлагаемый подход является развитием применяемого при исследовании динамики движения самолета метода расчета балансирующих режимов движения. С этой целью в крыльевую систему судна на подводных крыльях вводится фиктивный орган управления – аналог руля высоты самолета. В дальнейшем будем его называть рулем высоты.

Постановка задачи и ее решение

Расчет посадки и кривой сопротивления судна при движении в крыльевом режиме проводится на основе решения системы уравнений установившегося продольного движения судна. Для равномерного прямолинейного движения на крыльях эти уравнения можно представить в следующем виде:

$$P - R_x = 0, \quad G - R_y = 0, \quad M_z = 0, \quad (1)$$

где P – сила тяги движителей, G – вес судна, $R_x = C_x \rho V^2 S / 2$ – сила сопротивления всей крыльевой системы, $R_y = C_y \rho V^2 S / 2$ – подъемная сила всей крыльевой систе-

мы, $M_z = m_z \rho V^2 SL/2 + P y_p + m_z^{\delta_b} \delta_b \rho V^2 SL/2$ – продольный момент сил; C_x, C_y – коэффициенты сопротивления и подъемной силы всей крыльевой системы; ρ – плотность воды, V – скорость движения судна, y_p – плечо силы тяги, m_z – коэффициент гидродинамического продольного момента, δ_b – угол отклонения руля высоты, $m_z^{\delta_b}$ – эффективность руля высоты, S – суммарная площадь крыльев, L – расстояние между крыльями.

Суммарные коэффициенты сопротивления и подъемной силы определяются как сумма коэффициентов носового и кормового крыла с учетом гидродинамической интерференции носового крыла на кормовое крыло:

$$C_x = \frac{C_{x1} S_1 + C_{x2} S_2}{S}, \quad C_y = \frac{C_{y1} S_1 + C_{y2} S_2}{S}.$$

Суммарный безразмерный коэффициент гидродинамического продольного момента определяется через сумму моментов, создаваемых подъемной силой и сопротивлением носового и кормового крыльев:

$$m_z = \frac{C_{x1} S_1 Y_1 + C_{x2} S_2 Y_2 + C_{y1} S_1 L_1 + C_{y2} S_2 L_2}{SL}.$$

Параметры с индексом 1 относятся к носовому крылу, с индексом 2 – к кормовому; Y_1, Y_2 – отстояние точек приложения гидродинамической силы сопротивления крыльев от центра тяжести по вертикали; L_1, L_2 – отстояние точки приложения гидродинамической подъемной силы крыльев от центра тяжести по горизонтали.

Взаимодействие между крыльями учитывается введением дополнительного угла атаки на кормовом крыле, обусловленного сходом потока α_1 [1]:

$$\alpha_1 = \frac{0,75 \cdot C_{y_{\text{нос}}}}{\text{Fr}^*} \cdot \exp\left(\frac{-\bar{h}}{b \cdot \text{Fr}^*} + \frac{\text{Fr}^* - 2}{2\lambda}\right) \cos \frac{d}{\text{Fr}^*},$$

где $\text{Fr}^* = \text{Fr}^{2e^a}$, $a = -0,73/\lambda^{0,2}$, $\text{Fr} = V/\sqrt{gb}$ – число Фруда; b – хорда носового крыла; g – ускорение свободного падения; d – расстояние между крыльями; $C_{y_{\text{нос}}}$ – коэффициент подъемной силы носового крыла; \bar{h} – погружение носового крыла; $\lambda = l^2/s_n$ – удлинение носового крыла; l – размах крыла; s_n – площадь носового крыла.

Из системы уравнений (1) можно получить формулы для определения параметров движения:

$$V = \sqrt{\frac{2G}{\rho S C_y}}, \quad P = \frac{C_x \rho V^2 S}{2}, \quad \delta_b = \frac{m_z}{m_z^{\delta_b}}.$$

Значения коэффициентов гидродинамических сил в зависимости от угла атаки и погружения определяются на предыдущих стадиях проектирования для носового и кормового крыльевых устройств. Теоретическое определение гидродинамических характеристик крыльев возможно с помощью вихревых методов [2] или современных методов вычислительной гидромеханики [3]. Вместе с тем при неизвестной искомой посадке судна значения коэффициентов гидродинамических сил и моментов неизвестны, и решение необходимо искать итерационным способом. В результате решения находят зависимость тяги (сопротивления) от скорости движения при $\delta_b = 0$ и значения параметров, определяющих посадку, соответствующих условию $\delta_b = 0$.

Для построения необходимых графических зависимостей выбирается диапа-

зон кинематических параметров движения СПК, в котором должны находиться параметры искомых режимов движения. В качестве таких параметров выбираются дифферент судна ψ и отстояние от линии, соединяющей кормовые кромки носового и кормового крыльев в диаметральной плоскости, до поверхности воды в районе центра тяжести H . В дальнейшем параметр H будем называть погружением судна. Для каждого из рассмотренных режимов определяются угол атаки и погружения носового и кормового крыльев, гидродинамические характеристики и значения параметров движения P , V , δ_b . Погружения носового H_n и кормового H_k крыльевых устройств определяются по формулам: $H_n = H - L_1 \operatorname{tg} \psi$, $H_k = H + L_2 \operatorname{tg} \psi$.

Далее строятся зависимости $\delta_b = f(V)$ и $P = f(V)$ при постоянных значениях дифферента и погружения судна. На зависимости $\delta_b = f(V)$ выбираются значения скорости для $\delta_b = 0$, и соответствующие им значения дифферента и погружения судна переносятся на зависимость $P = f(V)$. Полученные значения дифферента и погружения определяют посадку судна, а кривая, проведенная по перенесенным точкам на зависимости $P = f(V)$, является буксировочной кривой судна.

Пример расчета и сравнение расчета с экспериментом

В качестве примера представлены результаты расчета кривой сопротивления и посадки судна на подводных крыльях «Полесье». Массовые характеристики судна и геометрические характеристики крыльевой системы приняты согласно [4].

Гидродинамические характеристики крыльевых устройств получены расчетом с использованием метода дискретных вихрей [2]. Расчеты проводились в диапазоне углов атаки α от 0° до 4° и безразмерных значений погружений крыльев h от 0,2 до 0,6. В качестве значения погружения принимается отстояние задней кромки крыла в диаметральной плоскости (ДП) от поверхности воды, отнесенное к хорде крыла в ДП. В качестве характерных площадей приняты площади крыльев в плане. Результаты расчетов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Гидродинамические характеристики крыльев

		Носовое крыло		Кормовое крыло	
h	α , град	C_x	C_y	C_x	C_y
0,2	0	0,0092	0,1505	0,0064	0,0730
0,2	2	0,0132	0,2367	0,0085	0,1147
0,2	4	0,0190	0,3222	0,0114	0,1562
0,4	0	0,0104	0,1778	0,0113	0,1418
0,4	2	0,0151	0,2758	0,0163	0,2218
0,4	4	0,0218	0,3726	0,0230	0,2967
0,6	0	0,0125	0,2012	0,0128	0,1622
0,6	2	0,0177	0,3113	0,0188	0,2573
0,6	4	0,0250	0,4210	0,0272	0,3485

Для расчета кривой сопротивления и посадки выбраны следующие значения дифферента и погружения судна: $\Psi = 0,7^\circ, 0,8^\circ, 0,9^\circ, 1,0^\circ$, $H = 0,16 \text{ м}, 0,2 \text{ м}, 0,24 \text{ м}, 0,28 \text{ м}, 0,32 \text{ м}, 0,36 \text{ м}$.

Эффективность органа управления принята $m_z^{\delta_a} = 0,01 \text{ 1/град}$. Результаты расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета параметров движения СПК «Полесье»

Ψ , град	H , м	V , м/с	δ_b , град	P , кН	H_n , м	H_k , м
0,7	0,16	74,9	0,55	14,71	0,05	0,28
0,8	0,16	73,7	0,25	14,67	0,03	0,29
0,9	0,16	72,8	-0,02	14,67	0,02	0,31
1,0	0,16	72,0	-0,29	14,67	0,01	0,32
0,7	0,20	70,4	0,48	14,11	0,09	0,32
0,8	0,20	69,7	0,23	14,15	0,07	0,33
0,9	0,20	68,9	-0,02	14,17	0,06	0,35
1,0	0,20	68,2	-0,27	14,19	0,05	0,36
0,7	0,24	67,1	0,44	13,65	0,13	0,36
0,8	0,24	66,3	0,22	13,67	0,11	0,37
0,9	0,24	65,7	0,03	13,71	0,10	0,39
1,0	0,24	65,1	-0,19	13,76	0,09	0,40
0,7	0,28	64,6	0,38	13,39	0,17	0,40
0,8	0,28	63,7	0,21	13,37	0,15	0,41
0,9	0,28	63,0	0,03	13,37	0,14	0,43
1,0	0,28	62,5	-0,16	13,41	0,13	0,44
0,7	0,32	62,9	0,34	13,25	0,21	0,44
0,8	0,32	62,2	0,22	13,23	0,19	0,45
0,9	0,32	61,5	0,05	13,22	0,18	0,47
1,0	0,32	60,9	-0,08	13,22	0,17	0,48
0,7	0,36	61,6	0,37	13,17	0,25	0,48
0,8	0,36	60,9	0,25	13,14	0,23	0,49
0,9	0,36	60,3	0,14	13,12	0,22	0,51
1,0	0,36	59,8	0,04	13,11	0,21	0,52

Представленные значения погружения носового и кормового крыла позволяют контролировать моменты касания корпусом судна поверхности воды и выход носового крыла в режим глиссирования.

По результатам расчета построены зависимости $\delta_b = f(V)$ и $P = f(V)$ (рис. 1). Точки, соответствующие $\delta_b = 0^\circ$, переносятся на зависимость $P = f(V)$ согласно схеме, представленной на рис. 1. Соединяя полученные точки плавной кривой, получаем буксировочную кривую судна. Режимы движения, соответствующие этой кривой, определяют посадку судна.

На рис. 2 представлена буксировочная кривая, полученная в результате проведенного графического решения. На этом же рисунке приведена кривая силы сопротивления, построенная по результатам буксировочных испытаний модели СПК «Полесье» [2]. Представленные результаты свидетельствуют о хорошем согласовании теоретических и экспериментальных результатов и, следовательно, о практической значимости предлагаемой методики.

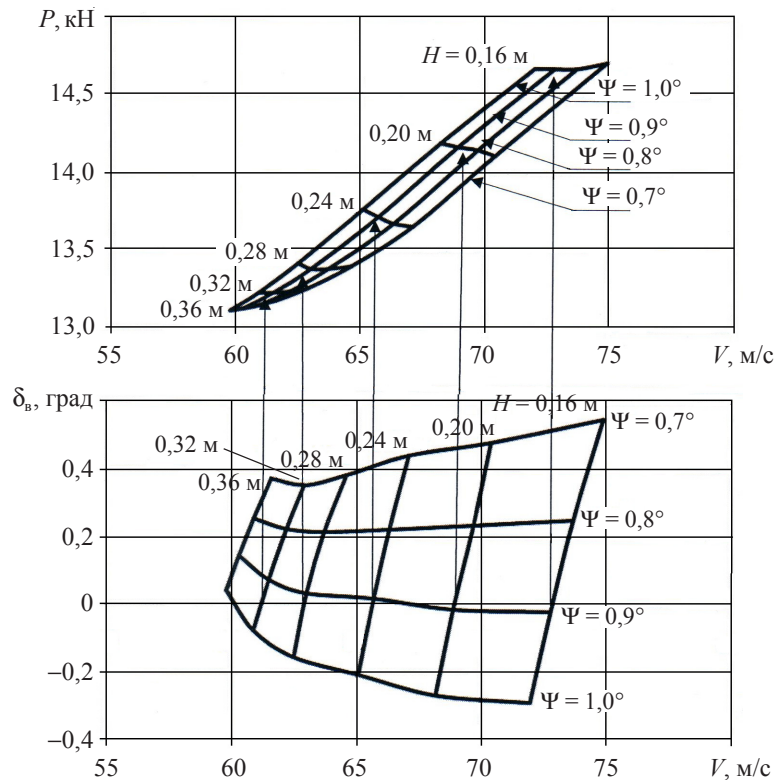


Рис. 1. Зависимости сопротивления и угла отклонения руля высоты от скорости

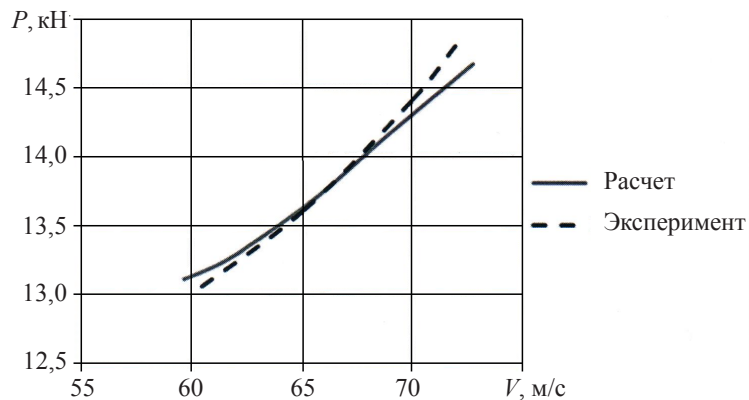


Рис. 2. Расчетная и экспериментальная буксировочные кривые

Список литературы

1. Соколов В.В., Егоров И.Т. Гидродинамика быстроходных судов. Л.: Судостроение, 1971. 424 с.
2. Болотин А.А. Определение гидродинамических характеристик системы крыльев, движущихся вблизи свободной поверхности при произвольных числах Струхала // Проблемы гидродинамики и динамики судна: Труды ЛКИ. 1990. С. 25–31.
3. Константинов П.В., Шабаров В.В. Оценка возможностей применения технологий вычислительного эксперимента для определения гидродинамических характеристик подводных крыльев при проектировании судов на подводных крыльях (СПК) // Вестник ВГАВТ. 2012. № 31. С. 171–177.

4. Отработка модельными испытаниями гидродинамического комплекса СПК типа «Полесье» с уменьшенной габаритной осадкой: Технич. отчет ЦКБ по СПК. Инв. № 31.323-89. 1989. 70 с.

THE HYDROFOIL RESISTANCE CURVE AND SHIP LANDING CALCULATION METHOD

A.A. Bolotin

The calculation method for constructing the towing curve and ship landing of the moving in the wing mode hydrofoil is developed. An example of usage of the proposed method for hydrofoil «Polesie» presented. The comparison of evaluation and experimental results presented.

Keywords: hydrofoil, towing curve, ship landing, hydrodynamic forces, trim, dive.