

УДК 629.572

DOI:10.46960/62045_2021_2_26

А.А. Болотин РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСТОЙЧИВОСТИ СУДОВ НА ПОДВОДНЫХ КРЫЛЬЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлено описание методики расчета остойчивости судов на подводных крыльях, приведены его результаты. Описаны изменения параметров бокового движения при действии кренящего момента. В качестве расчетной модели выбрано СПК «Полесье».

Ключевые слова: судно на подводных крыльях, гидродинамические характеристики, динамика движения, остойчивость.

Введение

Период активного развития судов на подводных крыльях (СПК) приходится на 1960-1980-е гг. Методы оценки гидродинамических сил и динамики движения в данный период опирались на экспериментальные исследования. В настоящее время начинается новый этап развития скоростного флота, и методы математического моделирования позволяют существенно расширить и упростить методику исследования движения судов. В данной работе представлен метод оценки остойчивости судна на подводных крыльях.

Методика расчета

Остойчивость судна на подводных крыльях при движении на основном режиме можно выразить зависимостью угла крена от величины кренящего момента. Определить характеристики остойчивости отдельного крыльевого устройства несложно при помощи любого из численных методов, позволяющих рассчитать гидродинамические характеристики крыла. В предлагаемой методике используется метод дискретных вихрей [1]. В качестве примера предлагаются результаты расчета коэффициента кренящего момента m_x от угла крена γ для носового и кормового крыльевых устройств СПК «Восход» при угле дифферента 0 и различных безразмерных (отнесенных к хорде крыла) погружениях h (рис. 1, а, б).

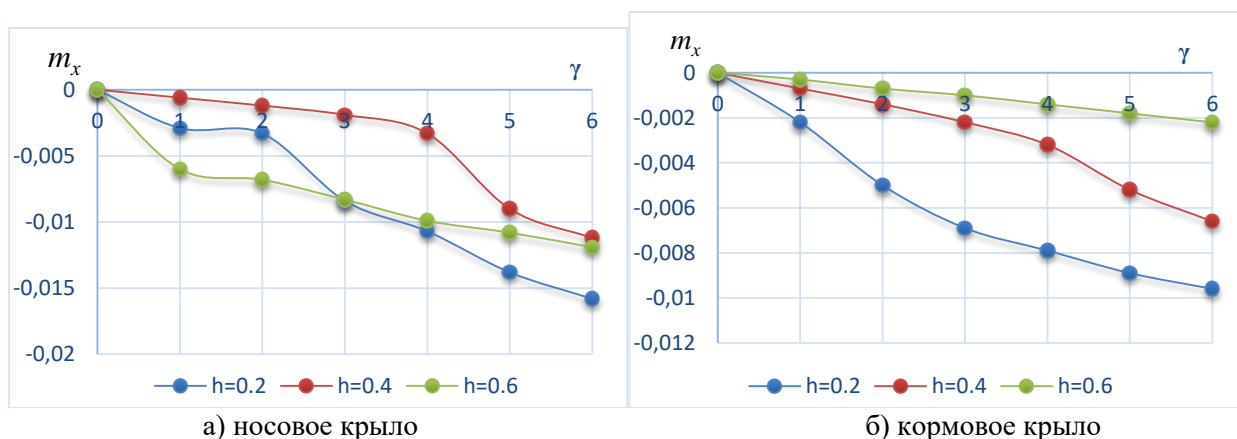


Рис. 1. Зависимость коэффициента кренящего момента от угла крена при различных погружениях

Необходимо отметить, что представленная зависимость существенно нелинейна, что связано с геометрией входящих в воду при накренинии элементов крыльевой системы.

Для получения значения кренящего момента в зависимости от угла крена необходимо знать скорость движения судна и посадку судна на данной скорости. Если скорость и погружение заранее известны, достаточно выполнить расчеты для носового и кормового крыла и определить зависимость угла крена от значений кренящего момента. Если скорость и посадка неизвестны, задача определения остойчивости разбивается на несколько этапов.

1. Расчетное определение гидродинамических характеристик носового и кормового крыльевых устройств в широком диапазоне углов дифферента погружений и углов крена.
2. Определение зависимости посадки от скорости. Для этого можно воспользоваться методикой [2].
3. Выбор расчетного режима движения и определение зависимости угла крена от кренящего момента по результатам расчета, выполненным на первом этапе.

Результаты, полученные таким образом, позволяют оценить остойчивость судна на крыльях, но не учитывают неизбежно возникающего при наличии крена дрейфа, который в свою очередь существенно влияет на кренящий момент.

Для более точного анализа остойчивости СПК необходимо решить задачу динамики движения судна в боковой плоскости при действии возмущающего кренящего момента. Для этого воспользуемся уравнениями движения судна в боковой плоскости. В боковом движении СПК имеет три степени свободы: поперечные поступательные перемещения вдоль оси Z и два вращательных движения вдоль осей X и Y (ось X направлена вдоль скорости движения, ось Y вверх, ось Z вправо). Вращательное движение рассмотрим в системе осей координат, связанных с главными центральными осями инерции. Учитывая существенную нелинейность зависимости кренящего момента от крена и погружения m_x входит в уравнения в виде параметрической зависимости от крена, погружения и дифферента. Полагая углы дифферента малыми, уравнения движения можно представить в следующем виде:

$$mV(\dot{\beta} - \omega_y) = \frac{\rho V^2}{2} S(C_z^\beta \beta + C_y \gamma);$$

$$J_x \dot{\omega}_x = \frac{\rho V^2}{2} SL(m_x^\beta \beta + m_x(\gamma, \psi, \bar{h}) + m_x^{\bar{\omega}_x} \bar{\omega}_x + m_x^{\bar{\omega}_y} \bar{\omega}_y) + M_{\text{хвост}}; \quad (1)$$

$$J_y \dot{\omega}_y = \frac{\rho V^2}{2} SL(m_y^\beta \beta + m_y^\gamma \gamma + m_y^{\bar{\omega}_x} \bar{\omega}_x + m_y^{\bar{\omega}_y} \bar{\omega}_y),$$

где J_x и J_y - моменты инерции относительно соответствующих осей;

$$\bar{\omega}_x = \frac{\omega_x L}{2V} \text{ и } \bar{\omega}_y = \frac{\omega_y L}{2V} \text{ - безразмерные угловые скорости;}$$

$C_z^\beta, m_x^\beta, m_y^\beta$ - производные аэродинамических коэффициентов всей крыльевой системы по углу дрейфа;

$m_x(\gamma, \psi, \bar{h})$ - зависимость коэффициента кренящего всей крыльевой системы от углов крена, дифферента и погружения;

$m_x^{\bar{\omega}_x}, m_y^{\bar{\omega}_x}$ - производные аэродинамических коэффициентов всей крыльевой системы по безразмерной угловой скорости крена;

$m_x^{\bar{\omega}_y}, m_y^{\bar{\omega}_y}$ - производные аэродинамических коэффициентов всей крыльевой системы по безразмерной угловой скорости курса.

В качестве характерного линейного размера L принято значение $L=(L_1+L_2)/2$, где L_1 - размах носового крыла, L_2 - размах кормового крыла. В качестве характерной площади S принята суммарная площадь крыльев. Производные аэродинамических коэффициентов для всей крыльевой системы определяются следующим образом:

$$C_z^\beta = (C_{z_1}^\beta S_1 + C_{z_2}^\beta S_2) / S \cdot 57.3$$

$$m_x^\beta = (m_{x_1}^\beta S_1 L_1 + m_{x_2}^\beta S_2 L_2) / S / L \cdot 57.3$$

$$m_y^\beta = (C_{z_1}^\beta S_1 x_1 + C_{z_2}^\beta S_2 x_2) / S / L \cdot 57.3$$

$$m_x = (m_{x_1} S_1 L_1 + m_{x_2} S_2 L_2) / S / L \cdot 57.3$$

$$m_y^\gamma = 0$$

$$m_x^{\bar{\omega}_x} = -(114.6 \cdot C_{y_1}^\alpha S_1 z_1^2 + C_{z_1}^\beta S_1 y_1^2 + 114.6 \cdot C_{y_2}^\alpha S_2 z_2^2 + C_{z_2}^\beta S_2 y_2^2) / S / L^2$$

$$m_x^{\bar{\omega}_y} = 0$$

$$m_y^{\bar{\omega}_x} = 0$$

$$m_y^{\bar{\omega}_y} = (114.6 \cdot C_{z_1}^\beta S_1 x_1^2 + 114.6 \cdot C_{z_2}^\beta S_2 x_2^2) / S / L^2$$

Индекс 1 соответствует носовому крылу, индекс 2 – кормовому;

x_1 – отстояние от центра тяжести до точки приложения боковой силы на носовом крыльевом устройстве;

x_2 – отстояние от центра тяжести до точки приложения боковой силы на кормовом крыльевом устройстве;

z_1, z_2 – расстояние от ДП до точки приложения подъемной силы на половине крыла;

y_1, y_2 – расстояние от ц.т. до точки приложения боковой силы вдоль оси OY .

В качестве возмущения рассмотрим кренящий момент: $M_{\text{хвост}}$. Представленная система уравнений позволяет выполнить расчет бокового возмущенного движения и оценить устойчивость СПК по значению угла крена при заданном кренящем моменте.

Результаты расчета

Для расчета выбрано СПК «Полесье». Водоизмещение судна в полном грузе составляет 20 100 кг, продольная центровка находится на расстоянии 1,19 м в корму от диаметральной плоскости судна, вертикальная центровка – 1,14 м вверх от основной плоскости.

Гидродинамические силы и моменты, а также их производные по параметрам движения и для носового и кормового крыльевых устройств рассчитаны согласно [1] и представлены в таблицах 1 и 2 и на рис. 1. Результаты расчета гидродинамических характеристик всей крыльевой системы представлены в табл. 3. При этом, если гидродинамические характеристики изолированных крыльев зависят только от погружения крыла ($\bar{h} = h/b$, где b – хорда крыла), то характеристики системы крыльев зависят и от погружения и от дифферента Ψ . В качестве погружения $H(\text{м})$ принято отстояние точки, расположенной на линии, соединяющей крылья и расположенной под центром тяжести от поверхности воды.

Таблица 1. Гидродинамические и геометрические характеристики носового крыла

\bar{h}_1	C_{y_1}	$C_{z_1}^\beta$	$m_{x_1}^\beta$	$S_1, \text{м}^2$	$L_1, \text{м}$	$x_1, \text{м}$
0.2	0.043	-0.00078	-0.00072	3.47	4.76	7.26
0.4	0.049	-0.00262	-0.00012			
0.6	0.055	-0.00594	0.00044			

Таблица 2. Гидродинамические и геометрические характеристики кормового крыла

\bar{h}_1	C_{y_2}	$C_{z_2}^\beta$	$m_{x_2}^\beta$	$S_2, \text{м}^2$	$L_2, \text{м}$	$x_2, \text{м}$
0.2	0.02	-0.0009	0.0006	2.86	3.3	7.21
0.4	0.037	-0.0026	0.00014			
0.6	0.045	-0.0055	0.00013			

Таблица 3. Гидродинамические и характеристики крыльевой системы

$H, \text{м}$	0.20			0.25			0.30		
$\Psi, ^\circ$	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2	0.8	1.0	1.2
C_y	0.167	0.175	0.183	0.181	0.189	0.196	0.192	0.199	0.206
C_z^β	-0.073	-0.080	-0.089	-0.097	-0.102	-0.110	-0.129	-0.133	-0.139
m_x^β	-0.035	-0.039	-0.044	-0.028	-0.032	-0.037	-0.021	-0.025	-0.028
m_y^β	-0.084	-0.101	-0.117	-0.103	-0.127	-0.151	-0.116	-0.148	-0.179
$m_x^{\bar{\omega}_x}$	-1.203	-1.202	-1.201	-1.265	-1.264	-1.263	-1.313	-1.312	-1.311
$m_y^{\bar{\omega}_y}$	-0.469	-0.514	-0.573	-0.623	-0.658	-0.707	-0.828	-0.854	-0.893
$C_z^{\delta_H}$	-0.045	-0.052	-0.060	-0.060	-0.068	-0.077	-0.077	-0.086	-0.095
$m_x^{\delta_H}$	0.015	0.017	0.020	0.020	0.022	0.025	0.025	0.028	0.031
$m_y^{\delta_H}$	-0.081	-0.094	-0.107	-0.107	-0.122	-0.137	-0.137	-0.153	-0.170

На рис. 2 представлена зависимость угла крена от величины кренящего момента рассчитанная для СВП «Полесье» при движении со скоростью 60 км/ч без учета динамических процессов в боковом движении. Посадка при этой скорости определяется следующими параметрами: погружение носового крыла 0.2 м, кормового 0.5 м, дифферент судна -1° .

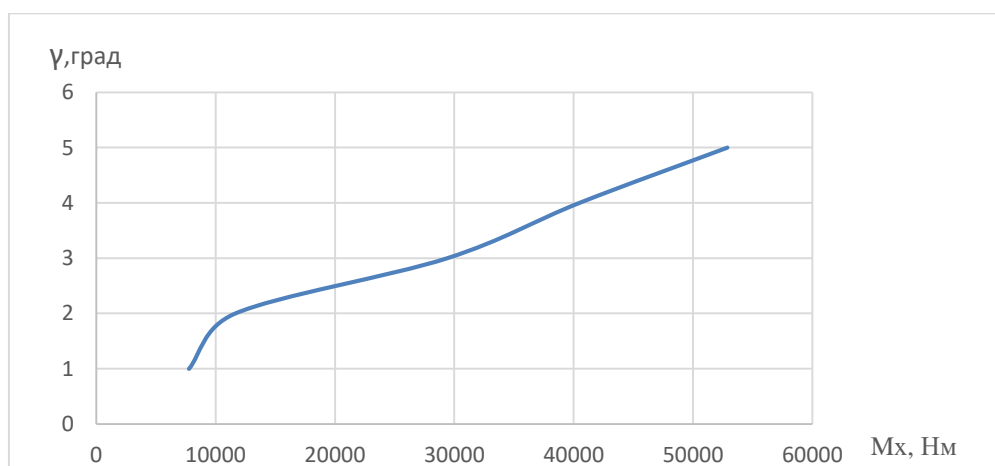


Рис. 2. Зависимость угла крена от величины кренящего момента

На рис. 3 приведены переходные процессы по крену (γ), дрейфу (β) и угловой скорости (ω_y) в горизонтальной плоскости, происходящие с судном двигающимся при той же скорости с такой же посадкой при нагружении его на первой секунде кренящим моментом $M_{кр} = 25\ 000$ Н•м. Из представленных результатов видно, что судно выходит на установившийся крен $\gamma = 2.3^\circ$, а также входит в циркуляцию, и появляется угол дрейфа $\beta = 4.0^\circ$. Значения угла крена без учета динамики движения, представленные на рис. 2, дают при том же кренящем моменте близкие результаты.

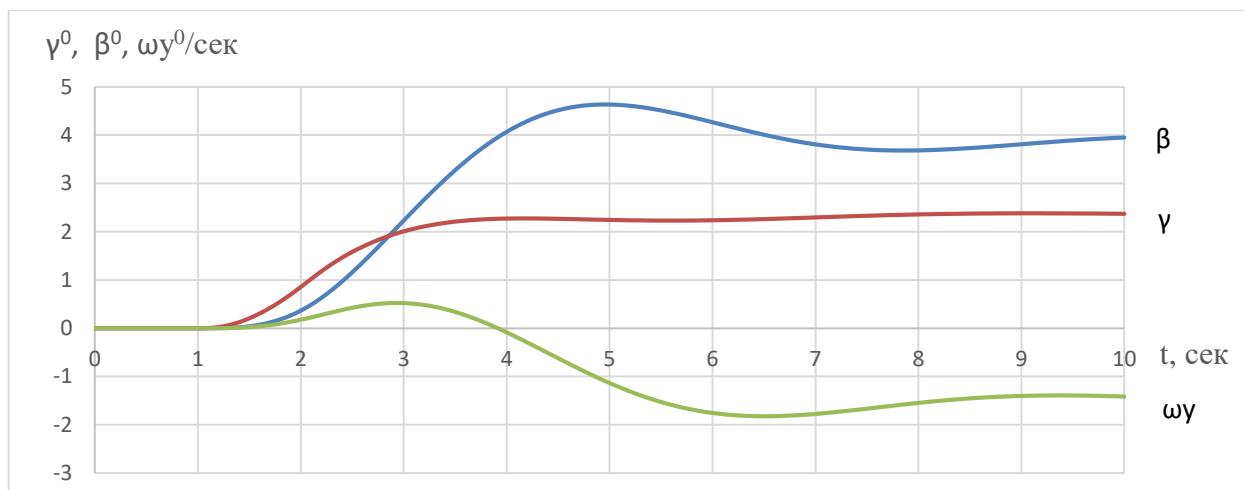


Рис. 3. Изменение параметров бокового движения при действии кренящего момента

Из результатов видно, что значения углов крена, полученные различными методами, близки между собой.

Выводы

1. Представлена методика, позволяющая оценить остойчивость судов на подводных крыльях.
2. Проведены расчетные исследования по оценке остойчивости для СПК «Полесье».

Библиографический список

1. Болотин, А.А. Применение метода дискретных вихрей для исследования подводных крыльев // Труды НГТУ им Р.Е. Алексеева, 2015. №3(110). С. 209-213.
2. Болотин, А.А. Методика расчета кривой сопротивления и посадки судна на подводных крыльях // Проблемы прочности и пластичности: Мевжуз. сб. Нижегород. ун-т, 2014. Вып. 76. С. 172-177.