

УДК 629.124.9.011.17-112

А. Ю. Панов, Вик. И. Хазова, Вер. И. Хазова

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ПРЯМОМ КУРСЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КАТАМАРАНА С ПОДВОДНЫМИ КРЫЛЬЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изучена устойчивость на курсе высокоскоростного катамарана с подводными крыльями. Показано, что подобные суда обладают неасимптотической устойчивостью на курсе.

Ключевые слова: высокоскоростные катамараны, устойчивость на курсе.

Устойчивость движения судов на прямом курсе является совместно с поворотливостью составной частью управляемости судов. Поворотливость высокоскоростного катамарана с подводными крыльями исследовалась в [1]. В данной работе рассматривается численными методами по параметру угла курса φ устойчивость движения этого же катамарана. Отличительной особенностью высокоскоростных судов, в том числе и высокоскоростных катамаранов с подводными крыльями, является зависимость посадки и, следовательно, водоизмещения от скорости судна. Каждому значению скорости соответствуют свои значения угла дифферента и вертикальной координаты центра масс катамарана, которые определялись по данным модельного эксперимента [2]. В этом случае при каждом значении скорости катамарана допускается, что судно совершает плоское движение, которое описывается системой дифференциальных уравнений движения судна в горизонтальной плоскости [3]:

$$\begin{aligned}
 (M_c + \lambda_{11}) \frac{dV_x}{dt} - (M_c + \lambda_{22}) V_y \omega_z &= (-X_k - X_{ky}) \cos \beta - (Y_k + Y_{ky}) \sin \beta + \sum_{i=1}^n P_{bi} \cos \alpha_i - \\
 - \sum_{j=1}^m P_{xpj} \cos \beta + \sum_{j=1}^m P_{ypj} \sin \beta, \\
 (M_c + \lambda_{22}) \frac{dV_y}{dt} + (M_c + \lambda_{11}) V_x \omega_z &= (X_k + X_{ky}) \sin \beta - (Y_k + Y_{ky}) \cos \beta + \sum_{j=1}^m P_{xpj} \sin \beta + \\
 + \sum_{j=1}^m P_{ypj} \cos \beta, \\
 (J_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega_z}{dt} + (\lambda_{22} - \lambda_{11}) V_x V_y &= M_k + M_{ky} - M_\omega + \sum_{j=1}^m P_{ypj} l_{xp},
 \end{aligned} \quad (1)$$

где M_c – масса судна; λ_{sk} – обобщенные присоединенные массы жидкости; J_x, J_y, J_z – моменты инерции судна относительно осей связанной с судном системы координат; $V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции векторов скорости центра масс и угловой скорости судна на оси связанной системы координат $Gxyz$; X_k, Y_k, M_k – гидродинамические силы и момент на корпусе высокоскоростного судна соответственно; P_b – упор гребного винта; P_{xp}, P_{yp} – сопротивление и боковая сила на рулях; M_ω – демпфирующий момент; n – число гребных валов; m – число средств управления; l_{xp} – расстояние от центра масс судна G до центра давления средств управления, измеренное вдоль оси Gx связанной с центром масс судна системы координат $Gxyz$.

В левую часть уравнений движения (1) входят присоединенные массы и моменты инерции катамарана. Они определяются по методике [4]:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{11к} &= 2f_{11к}\lambda_{111}; \quad \lambda_{22к} = 2f_{22к}\lambda_{221}; \\ \lambda_{66к} &= 2f_{66к} \left[\lambda_{661} + \lambda_{111} \left(\frac{\bar{h}_B}{2} \right)^3 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где λ_{111} , λ_{221} , λ_{661} – присоединенные массы одного корпуса катамарана; $f_{11к}$, $f_{22к}$, $f_{66к}$ – относительные коэффициенты присоединенных масс катамарана $\lambda_{11к}$, $\lambda_{22к}$, $\lambda_{66к}$.

Относительные коэффициенты присоединенных масс находятся по формулам

$$\left. \begin{aligned} f_{11к} &= 1; \quad f_{22к} = -0,097\bar{h}_B^2 + 0,650\bar{h}_B - 0,053; \\ f_{66к} &= -0,047\bar{h}_B^2 + 0,340\bar{h}_B + 0,387. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\bar{h}_B = \frac{h_B}{B_1}$ – относительный клиренс; h_B – клиренс катамарана – расстояние между диаметрными плоскостями корпусов катамарана; B_1 – ширина одного корпуса катамарана.

Присоединенные массы и моменты инерции одиночных корпусов определяются по формулам

$$\begin{aligned} \lambda_{22} &= m_{022} \rho \pi T^2 L \frac{\beta_{шп}^2}{1 + \beta_{шп}}, \\ \lambda_{66} &= m_{022} \frac{\rho \pi T^2}{12} L^3 \frac{\beta_{шп}^2}{(3 - \beta_{шп})(3 - 2\beta_{шп})^2}, \\ \lambda_{11} &= m_{\delta 1} \rho \pi T^2 B \frac{\delta^2}{1 + \delta}, \end{aligned} \quad (4)$$

где T , B – осадка и ширина корпуса по действующей ватерлинии; $\alpha_{вл}$ – коэффициент полноты действующей ватерлинии; $\beta_{шп}$ – коэффициент полноты наибольшего по площади шпангоута при действующей ватерлинии; δ – коэффициент полноты погруженной части диаметрального батокса; m_{0sk} – поправки Льюиса.

Поправка Льюиса для λ_{11} определяется по диаметральному батоксу [5]:

$$m_{022} = \frac{(1 + p)^2 + 3q^2}{(1 + p + q)^2}. \quad (5)$$

Параметры p и q определяются для миделевого шпангоута по формулам

$$\frac{1 + p + q}{1 - p + q} = \frac{2T}{B}, \quad \frac{(1 - p^2 - 3q^2)2T}{(1 + p + q)^2 B} = \beta_{\delta 1}. \quad (6)$$

Значения параметров p и q приведены в [5], либо их получают, решая два уравнения (6) совместно.

Поправка Льюиса $m_{\delta 1}$ также, по аналогии с m_{022} будет

$$m_{\delta 1} = \frac{(1 + p_{\delta})^2 + 3q_{\delta}^2}{(1 + p_{\delta} + q_{\delta})^2}, \quad (7)$$

$$\frac{1 + p_{\delta} + q_{\delta}}{1 - p_{\delta} + q_{\delta}} = \frac{2T}{L}; \quad \frac{\pi(1 - p_{\delta}^2 - 3q_{\delta}^2)}{4(1 + p_{\delta} + q_{\delta})^2} \cdot \frac{2T}{B} = \delta. \quad (8)$$

Коэффициенты полноты α , β определяются для каждого значения посадки катамарана.

В правые части уравнений (1) входят гидродинамические силы и моменты, действующие на катамаран (рис. 1).

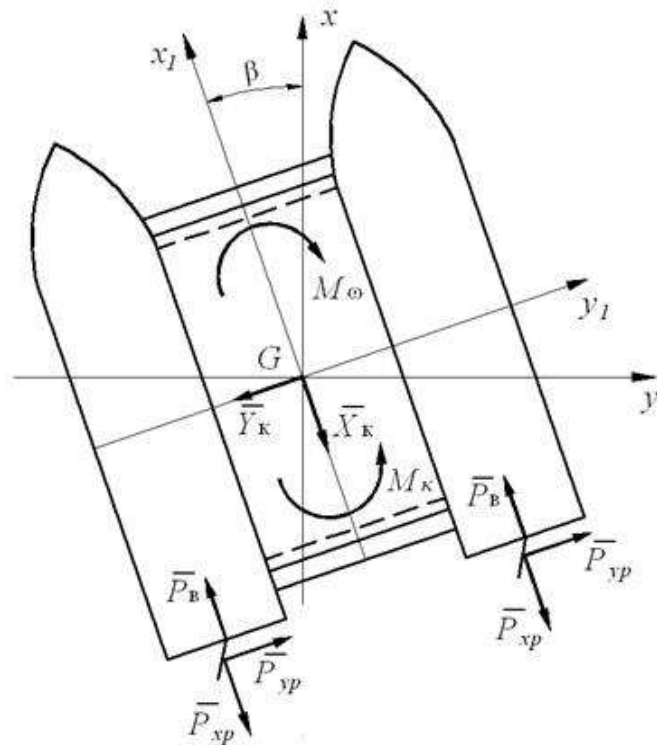


Рис. 1. Схема сил, действующих на высокоскоростной катамаран

Эксперимент для нахождения коэффициентов гидродинамических сил и моментов проводился в опытовом бассейне Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева [2]. Буксировка модели осуществлялась с помощью буксировочной тележки на скоростях 1, 1,5 и 2 м/с. Модель крепилась к тележке с помощью пилона, на модель дополнительно устанавливался двухкомпонентный динамометр, позволяющий измерить составляющую гидродинамической реакции X_k либо Y_k (в зависимости от схемы установки динамометра) и момент M_k . Прогоны модели осуществлялись с углами дрейфа $0 \dots 30^\circ$. Полученные по результатам эксперимента зависимости гидродинамических коэффициентов от угла дрейфа β приведены на рис. 2–4.

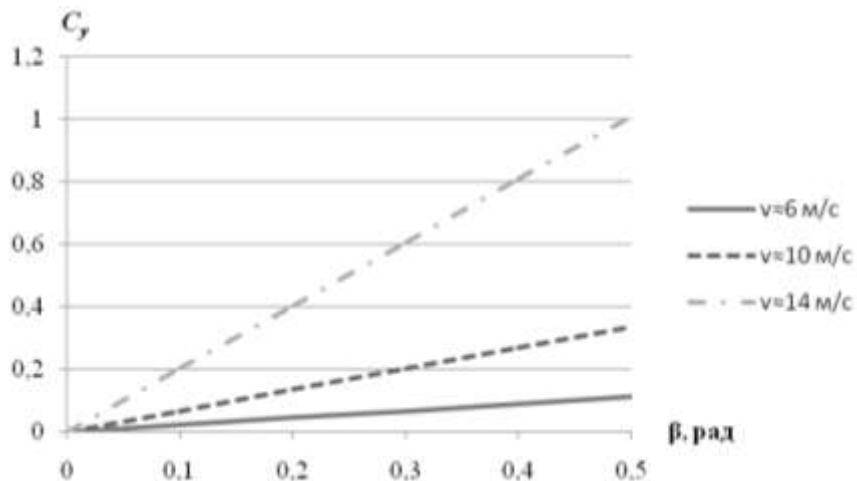
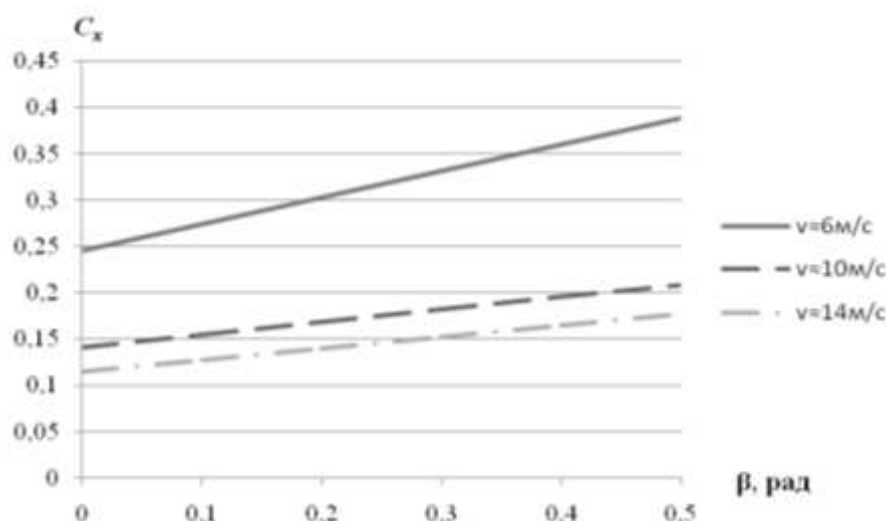
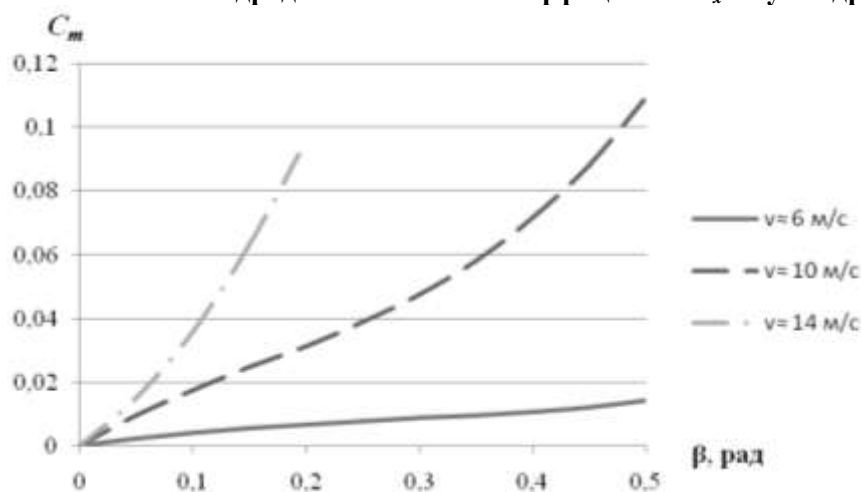


Рис. 2. Зависимость гидродинамического коэффициента C_y от угла дрейфа β

Рис. 3. Зависимость гидродинамического коэффициента C_x от угла дрейфа β Рис. 4. Зависимость гидродинамического коэффициента C_m от угла дрейфа β

Демпфирующий момент корпусов катамарана определялся по методике [6]:

$$M_{\omega} = -C_m^{\omega} \frac{\rho}{2} V S_d L^2 \omega, \quad (9)$$

где S_d – площадь погруженного в воду диаметрального батокса судна, определяемая по формуле $S_d = \frac{\sigma_d}{LT}$; σ_d – коэффициент полноты площади S_d ; C_m^{ω} – коэффициент демпфирующего момента, определяемый по работе [6].

Гидродинамические силы на рулях определялись по методике [6], а упор гребных винтов – по работе [7].

Пусть катамаран движется прямолинейно, равномерно, поступательно. В соответствии с принципом Галилея, такое движение не отличается от состояния равновесия. Система (1) тождественно выполняется и является системой уравнений равновесия. В этом случае устойчивость движения можно исследовать по А.М. Ляпунову. Если задать какому-либо параметру движения катамарана малое возмущение, то система (1) становится системой дифференциальных уравнений возмущенного движения, на основе которой выполняется численное исследование устойчивости движения катамарана.

Расчет возмущенного движения высокоскоростного катамарана производился на скоростях 3, 4, 5, 8 и 14 м/с при переключке руля в течение 20 с на 5° . График зависимости угла переключки α от времени при мгновенном возмущении представлен на рис. 5.

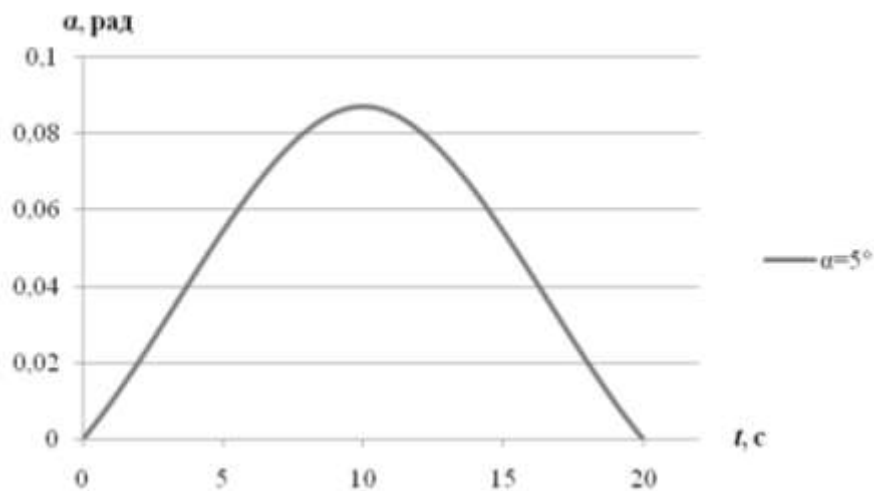


Рис. 5. Зависимость углов перекадки руля α от времени t

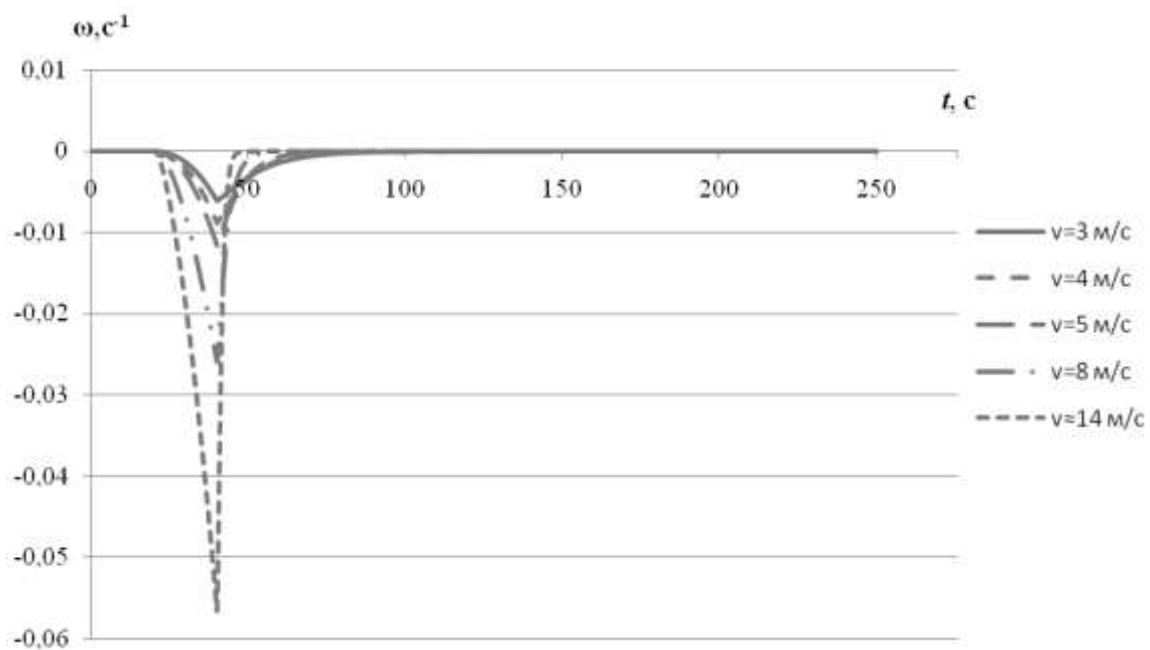


Рис. 6. Зависимость угловой скорости ω от времени при $\alpha=5^\circ$

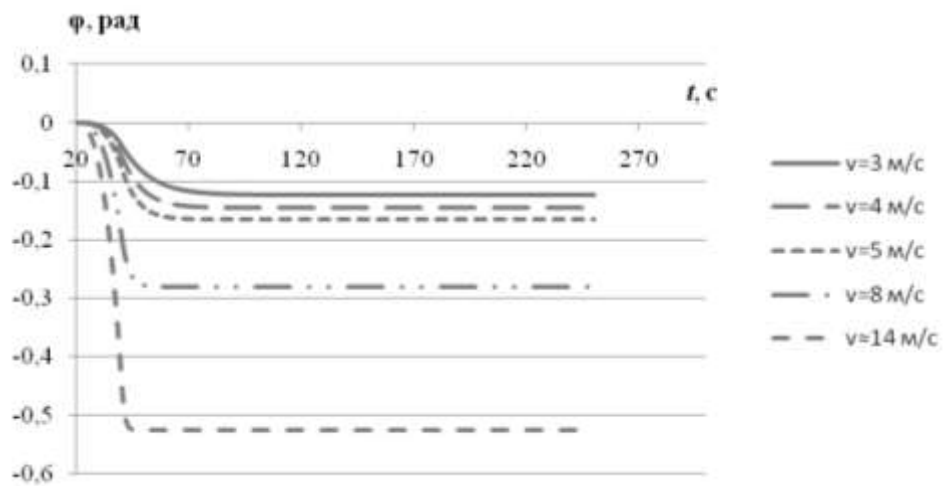


Рис. 7. Зависимость угла курса ϕ от времени при $\alpha=5^\circ$

При этом рассчитывались скорость центра масс катамарана, угловая скорость катамарана ω и угол курса φ .

На рис. 6 и рис. 7 приведены полученные зависимости угловой скорости ω и угла курса φ от времени на различных скоростях возмущенного движения.

На рис. 8 представлена сводная диаграмма, демонстрирующая зависимость угла курса φ от времени на различных скоростях возмущенного движения.

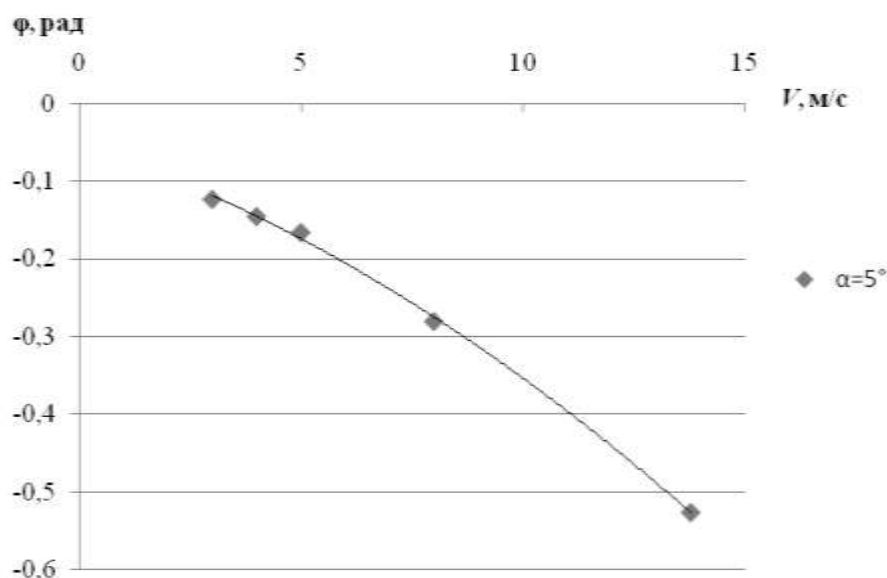


Рис. 8. Диаграмма курсовых углов

Полученная диаграмма курсовых углов может использоваться для определения угла курса на различных скоростях возмущенного движения катамарана.

По результатам численного исследования возмущенного движения катамарана можно сделать следующие выводы.

После прекращения возмущающего воздействия катамаран выходит на новый курс и продолжает устойчиво двигаться с этим курсовым углом, то есть судно обладает неасимптотической устойчивостью.

Полученные зависимости $\varphi = f(t)$ не имеют экстремумов. Это означает, что после прекращения возмущения рули катамарана переключаются в исходное положение, но угол курса не приводится к первоначальному значению, что демонстрирует наличие у катамарана гидродинамического люфта, отмеченного для водоизмещающих судов профессором В.Г. Павленко [8].

Для возвращения катамарана на исходный курс необходимо дополнительное симметричное возмущение в виде переключки рулей на аналогичный угол той же продолжительности.

С увеличением скорости катамарана при одинаковых возмущениях рулей отклонение от первоначального курса нарастает.

Библиографический список

1. **Хазова, Вик. И.** Исследование управляемости высокоскоростных пассажирских катамаранов на подводных крыльях // Транспортное дело России. 2011. №2. С. 58–61.
2. **Хазова, Вер. И.** Экспериментальное определение гидродинамических характеристик скоростного катамарана / Вер. И. Хазова, Вик. И. Хазова, И. Д. Краснокутский // Современные технологии в кораблестроит. и авиац. образовании, науке и производстве: матер. Всеросс. научно-техн. конф.; НГТУ. – Н. Новгород, 2009. С. 137–141.
3. **Басин, А.М.** Ходкость и управляемость судов / А.М. Басин. – М.: Транспорт. 1977. – 451 с.

4. **Васильев, А.В.** Управляемость судов / А.В. Васильев. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
5. **Хаскинд, М.Д.** Гидродинамическая теория качки корабля / М. Д. Хаскинд. – М.: Наука, 1973. – 328 с.
6. **Войткунский, Я.И.** Справочник по теории корабля. Судовые движители и управляемость / Я. И. Войткунский, Р. Я. Першиц, И. А. Титов. – Л.: Судостроение. 1973. – 512 с.
7. **Панов, А.Ю.** Расчет упора кавитирующих гребных винтов быстроходных судов // НТО им. акад. А. Н. Крылова. – Л., 1978. Вып. 282. С. 78–83.
8. Ходкость и управляемость судов / под ред. В.Г. Павленко. – М.: Транспорт, 1991. – 397 с.

*Дата поступления
в редакцию 18.10.2011*

Alexey Y. Panov, Vic. I. Khazova, Ver. I. Khazova

**NUMERIC RESEARCH ON STABILITY OF HIGH-SPEED HYDROFOIL
CATAMARAN AT DIRECT COURSE MOVEMENT**

Course stability of high-speed hydrofoil catamarans is studied. It is shown that nonasymptotic course stability is characteristic of such type of vessel.

Key words: high-speed catamarans, course stability.