

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА СУДОВОЙ ВАЛОПРОВОД

*Г. А. Кушнер, В. А. Мамонтов, Д. А. Волков*

*Астраханский государственный технический университет,  
Астрахань, Российская Федерация*

Проектирование инженерных систем в современном судостроении основано на использовании систем автоматизированного проектирования. В современных условиях не все инженерные расчеты возможно реализовать в виде алгоритма определенной проектной процедуры. Одним из таких расчетов является определение резонансной частоты поперечных колебаний судового валопровода. Вычисление некоторых параметров такой динамической системы представляет собой серьезную задачу еще на этапе предварительного эскизного проектирования. Актуальным вопросом при проектировании и прочностных расчетах валопровода становится вычисление гидродинамических изгибающих моментов, возникающих в результате работы гребного винта в неравномерном поле скоростей. Предлагается программная реализация полуэмпирической инженерной методики для определения гидродинамических изгибающих моментов, действующих на валопроводы судов. Изложены основные положения методики, исходные данные по корпусу судна и величины, характеризующие режим работы гребного винта, предложена последовательность и программная реализация методики определения гидродинамических изгибающих моментов в среде символьных вычислений Maple. Решена задача по представлению эмпирических данных применением билинейной интерполяции и интерполяционного полинома. Представлены результаты численного эксперимента для определения постоянных и амплитудных значений гидродинамических изгибающих моментов для валопроводов натуральных судов. Предложенная программная реализация методики позволила автоматизировать процесс определения внешних сил в расчетах циклической прочности гребного вала на ранних стадиях проектирования судна. Результаты исследования являются дополнением к существующим средствам автоматизации.

**Ключевые слова:** судовой валопровод, гидродинамический момент, изгибающий момент, гребной вал, колебания, автоматизация.

**Для цитирования:** Кушнер Г. А., Мамонтов В. А., Волков Д. А. Методика определения гидродинамических изгибающих моментов, действующих на судовый валопровод // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 3. С. 47–53. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-47-53.

### **Введение**

Проектирование современных инженерных систем в судостроении невозможно представить без систем автоматизированного проектирования. Требования к повышению производительности труда и качества выпускаемой продукции обуславливают необходимость максимальной автоматизации всех проектных процедур, начиная с этапа технического предложения и эскиза вплоть до составления рабочей конструкторской документации.

Определенную сложность для современных средств автоматизации инженерных расчетов представляют вычисления, где математическая постановка проектной процедуры неочевидна; соответственно, и последующая их алгоритмическая реализация часто неудовлетворительна [1]. Одним из таких расчетов является определение собственной частоты поперечных колебаний системы судового валопровода. Несмотря на большое количество научных работ, посвященных этой теме, даже вычисление некоторых параметров такой динамической системы представляет собой серьезную задачу.

Основными факторами, влияющими на характер и интенсивность колебаний судовых валопроводов, являются статические, динамические и циклические внешние нагрузки [2]. К таким факторам относятся переменные гидродинамические изгибающие моменты, возникающие в результате работы гребного винта в неравномерном поле скоростей [3, 4]. Подобные моменты

действуют в вертикальной и горизонтальной плоскостях, воспринимаются валопроводом и дейдвудным устройством и оказывают непосредственное влияние на возникновение резонансного состояния системы.

В настоящей работе предложена программная реализация полуэмпирической методики определения гидродинамических изгибающих моментов, действующих на валопроводы судов. Расчет изгибающих моментов является одной из основ повышения достоверности расчетов поперечных колебаний, а использование программного пакета компьютерной алгебры Maple позволяет повысить точность и существенно сократить затраты времени инженера-проектировщика.

### Материалы и методы исследования

В работе [5] предложена полуэмпирическая методика определения гидродинамических моментов, возникающих на гребном винте при работе в неравномерном поле скоростей за корпусом судна.

Определение постоянной составляющей изгибающего момента основано на результатах тензометрирования валопроводов крупнотоннажных транспортных судов в натуральных условиях. Периодическая составляющая установлена на основе анализа результатов измерений полей скоростей за корпусом транспортных судов на моделях в опытовом бассейне.

Исходные данные по корпусу судна для расчета, а также элементы гребного винта и величины, характеризующие режим его работы, представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры для определения гидродинамических изгибающих моментов**

Параметр	Обозначение	Единица измерения
Коэффициент общей полноты	$\delta$	–
Коэффициент формы кормовых шпангоутов	$\tau$	–
Диаметр гребного винта	$D$	м
Число лопастей	$z$	–
Шаг винта	$H$	м
Шаговое отношение	$H/D$	–
Дисковое отношение	$A/Ad$	–
Скорость судна	$V_S$	уз
	$V$	м/с
Число оборотов винта	$n_m$	об/мин
	$n$	об/с
Коэффициент попутного потока	$W$	–
Коэффициент упора винта	$K_1$	–
Коэффициент крутящего момента винта	$K_2$	–
Расстояние между сечением гребного вала, в котором определяется изгибающий момент от плоскости диска винта	$L$	м
Сила упора гребного винта на расчетном режиме	$P$	Н
Крутящий момент (момент силы) гребного винта на расчетном режиме	$M_{кр}$	Н·м
Приведенная характеристика осевой неравномерности поля скоростей	$\alpha$	–
Приведенная характеристика окружной неравномерности поля скоростей	$\beta$	–
Косинусные составляющие гармоник порядка $Z \pm 1$ в разложении поля скоростей в ряд Фурье	$a_{Z \pm 1}$	–
Значения тангенсов углов наклона кривых действия гребного винта в свободной воде на расчетном режиме работы винта	$C_1, C_2$	–
Относительная поступь гребного винта по скорости судна $V/(nD)$	$\lambda$	–

Коэффициент формы кормовых шпангоутов  $\tau$  может быть установлен согласно принятым в транспортном судостроении формам кормовых шпангоутов: для  $V$ -образной  $\tau \leq 0,1$ ; умеренно  $V$ -образной  $\tau = 0,1 \div 0,3$ ; умеренно  $U$ -образной  $\tau = 0,3 \div 0,4$ ;  $U$ -образной  $\tau \geq 0,4$ . Также коэффициент  $\tau$  может быть определен как отношение  $a/b$  (рис. 1).

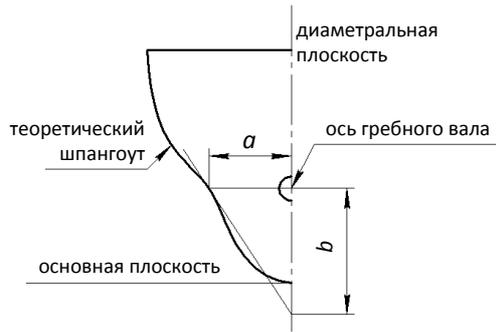


Рис. 1. Построения для определения коэффициента формы кормовых шпангоутов

Заметим, что вспомогательные величины  $C_1$  и  $C_2$  получены как функции шагового и дискового отношения гребного винта в результате обработки диаграмм натуральных испытаний гребных винтов [6] и представлены графически на рис. 2, 3.

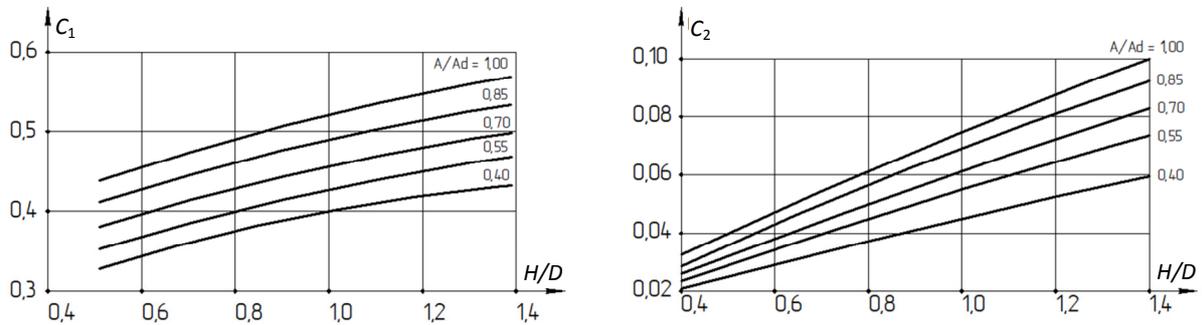


Рис. 2. Графики для определения коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$

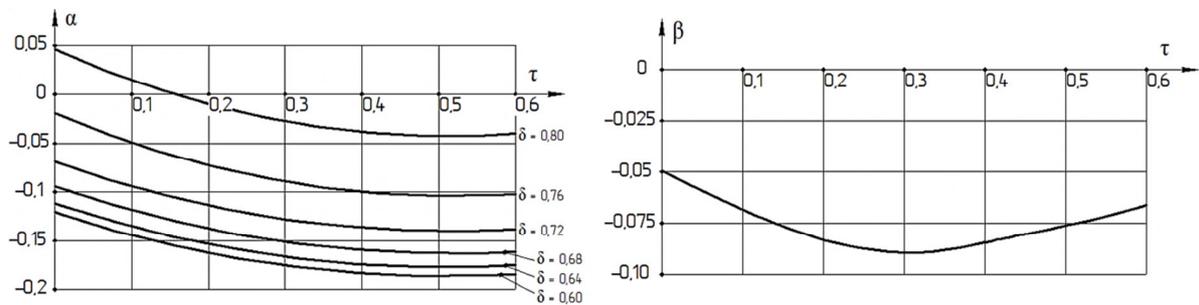


Рис. 3. Графики для определения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$

Постоянная составляющая изгибающего момента в вертикальной плоскости:

$$\frac{M_{во}}{PD} = \frac{\lambda}{2K_1} \left\{ 0,335C_1\alpha + 1,492 \left[ (1-W)C_2 + \frac{zK_2}{\lambda} \right] L\beta \right\}. \quad (1)$$

Постоянная составляющая изгибающего момента в горизонтальной плоскости:

$$\frac{M_{го}}{PD} = \frac{\lambda}{2K_1} \left\{ 1,492C_2L\alpha - 0,335 \left[ (1-W)C_1 + \frac{zK_1}{\lambda} \right] \beta \right\}. \quad (2)$$

Амплитуда колебаний изгибающего момента на лопастной частоте в вертикальной плоскости:

$$\frac{M_{вz}}{PD} = \frac{\lambda}{2K_1} \sqrt{\left[ 0,335C_1(a_{z-1} + a_{z+1}) \right]^2 + \left[ 1,492C_2L(a_{z-1} - a_{z+1}) \right]^2}. \quad (3)$$

Амплитуда колебаний изгибающего момента на лопастной частоте в горизонтальной плоскости:

$$\frac{M_{Iz}}{PD} = \frac{\lambda}{2K_1} \sqrt{[0,335C_1(a_{z-1} - a_{z+1})]^2 + [1,492C_2L(a_{z-1} + a_{z+1})]^2}, \quad (4)$$

где для определения коэффициента  $a_{z\pm 1}$  использованы результаты анализа имеющихся экспериментальных материалов по неравномерности поля скоростей судов [7, 8], представленные в табл. 2.

Таблица 2

Определение коэффициента  $a_{z\pm 1}$

$n = z \pm 1$	2	3	4	5	6	7
$a_n$	-0,180	0,025	-0,085	0,015	-0,035	0,005

Изгибающие моменты, действующие в вертикальной ( $M_{Bo}$ ) и в горизонтальной ( $M_{Go}$ ) плоскостях в сечении гребного вала могут быть найдены из соотношений (1) и (2), а по формулам (3) и (4) с использованием приведенных в табл. 2 данных возможно выполнение расчета амплитудных значений колебаний изгибающего момента в вертикальной ( $M_{Bz}$ ) и горизонтальной ( $M_{Iz}$ ) плоскости в гребных валах для судов.

### Программная реализация методики в среде Maple

Произведем описание программной реализации полуэмпирической методики определения гидродинамических изгибающих моментов. Расчет изгибающих моментов выполним с помощью программного пакета компьютерной алгебры Maple. Для вычисления коэффициентов  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $\tau$  применен метод билинейной интерполяции с целью обобщения интерполяции одной переменной для функции двух переменных.

Суть метода состоит в следующем. Пусть известны значения функции  $f$  в вершинах прямоугольника  $A_{11}$ ,  $A_{12}$ ,  $A_{21}$ ,  $A_{22}$ , где точка  $A_{ij}$  имеет координаты  $(x_i, y_j)$ , а  $i, j = 1, 2$  (рис. 4).

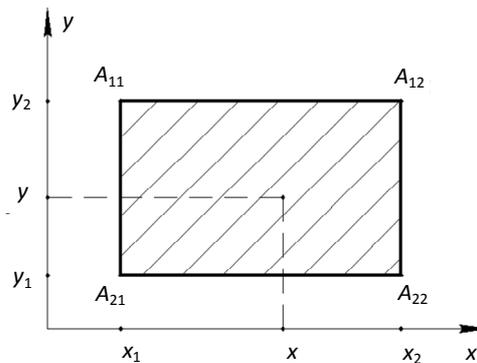


Рис. 4. Интерполированное значение исходной функции в точке  $(x, y)$

Требуется найти приближенное значение функции  $f$  в точке, лежащей внутри прямоугольника, с координатами  $(x, y)$ . Для этого используем формулу

$$f(x, y) = \frac{1}{(A_{21} - A_{11})(A_{22} - A_{12})} \times \\ \times [f_{11}(A_{21} - x)(A_{22} - y) + f_{21}(x - A_{11})(A_{22} - y) + f_{12}(A_{21} - x)(y - A_{12}) + f_{22}(x - A_{11})(y - A_{12})],$$

где  $f_{ij} = f(x_i, y_j)$  – значения функции  $f$  в точке  $(x_i, y_j)$ .

Последовательность расчета приведена в табл. 3.

Последовательность вычисления гидродинамических изгибающих моментов в среде Maple

№	Этапы	Программная реализация
1	Определение функций согласно уравнениям (1)–(4)	<i>with(Linear Algebra):</i> $U1 := P * D * (\lambda / (2 * K1)) * (0.355 * C1 * \alpha + 1.492 * ((1 - W) * C2 + (z * K2 / \lambda)) * L * \beta);$ $U2 := P * D * (\lambda / (2 * K1)) * (1.492 * C2 * L * \alpha - 0.335 * ((1 - W) * C1 + (z * K1 / \lambda)) * \beta);$ $U3 := P * D * (\lambda / (2 * K1)) * \sqrt{(0.335 * C1 * (a2 + a1))^2 + (1.492 * C2 * L * (a2 - a1))^2};$ $U4 := P * D * (\lambda / (2 * K1)) * \sqrt{(0.335 * C1 * (a2 - a1))^2 + (1.492 * C2 * L * (a2 + a1))^2};$
2	Задание значений параметров $K_1, K_2, \lambda, \tau, L, z, W, P, D, a_{z+1}, a_{z-1}$	$K1:=0.198; K2:=0.029; \lambda:=0.795; \tau:=0; L:=0.3; z:=4;$ $W:=0.34; a1:=0.015; a2:=0.025; P:=478; D:=4.5;$
3	Вычисление коэффициентов $C_1, C_2, \tau$ методом билинейной интерполяции	
3.1	Задание вершин прямоугольника матрицей $A$	$A := \text{Matrix}(2, 2, [[0.6, 0.85], [0.8, 1.0]]);$
3.2	Задание значений функции в вершинах прямоугольника матрицей $F$	$F := \text{Matrix}(2, 2, [[0.46, 0.495], [0.433, 0.465]]);$
3.3	Задание интерполирующей функции	$f := (x, y) \rightarrow (F[1, 1] * (A[2, 1] - x) * (A[2, 2] - y) + F[2, 1] * (x - A[1, 1]) * (A[2, 2] - y) + F[1, 2] * (A[2, 1] - x) * (y - A[1, 2]) + F[2, 2] * (x - A[1, 1]) * (y - A[1, 2])) / ((A[2, 1] - A[1, 1]) * (A[2, 2] - A[1, 2]));$
3.4	Вычисление приближенного значения функции в точке с заданными координатами	$C1 := f(0.7, 0.9);$ <i>функции <math>C2(H/D)</math> и <math>\alpha(\tau)</math> интерполируются аналогично</i>
4	Задание эмпирической зависимости $\beta(\tau)$ в виде интерполяционного полинома	$X := \text{ExcelTools}:-\text{Import}("/Users/Kushner/Desktop/beta.xls", "Sheet1", "A4:A10");$ $Y := \text{ExcelTools}:-\text{Import}("/Users/Kushner/Desktop/beta.xls", "Sheet1", "B4:B10");$ <i>for i from 1 by 1 to 7 do A:=[op(A), X[i, 1]] end do;</i> <i>for i from 1 by 1 to 7 do B:=[op(B), Y[i, 1]] end do;</i> $f := x \rightarrow \text{interp}(A, B, x);$ $\beta := f(\tau);$
5	Задание точности вычислений	$\text{Digits} := 5;$
6	Подстановка численных параметров в уравнения (1)–(4) и вычисление значений изгибающих моментов	$\text{eval}(U1); \text{eval}(U2); \text{eval}(U3); \text{eval}(U4);$

Результат выполненного численного эксперимента по вычислению постоянных и амплитудных значений гидродинамических изгибающих моментов для судов при  $L = 0,3$  представлен в табл. 4.

Таблица 4

Результаты вычислений гидродинамических изгибающих моментов

Судно проекта	$PD, \text{кН}\cdot\text{м}$	$M_{\text{вот}}, \text{кН}\cdot\text{м}$	$M_{\text{гв}}, \text{кН}\cdot\text{м}$	$M_{\text{вд}}, \text{кН}\cdot\text{м}$	$M_{\text{гд}}, \text{кН}\cdot\text{м}$
1351	843	-25,290	33,720	17,716	5,058
13490	1 508	-76,908	54,288	48,256	16,588
503	322	-5,602	13,202	6,792	1,288
1590	2 278	-97,954	45,560	24,374	6,834
1597	2 154	-79,698	66,343	23,909	6,462

Рассмотренная в настоящей работе полуэмпирическая методика определения гидродинамических изгибающих моментов, возникающих на гребном винте при работе в неравномерном поле скоростей за корпусом судна, предназначена для одновальных морских судов с наиболее употребительной традиционной формой кормовой оконечности в диапазоне измерения коэффициента общей полноты корпуса  $\delta = 0,6 \div 0,8$  и коэффициента формы кормовых шпангоутов  $\tau = 0 \div 0,6$ .

**Заключение**

Предложенная программная реализация методики позволила алгоритмизировать и автоматизировать процесс определения внешних сил в расчетах циклической прочности гребного вала на ранних стадиях проектирования судна в условиях отсутствия данных по измерению полей скоростей в месте расположения гребного винта. Разработанная последовательность вычисления может быть применима для валопроводов многовальных судовых установок при наличии эмпирически полученных величин, характеризующих работу гребного винта на расчетном режиме. Результаты исследования являются дополнением к существующим средствам автоматизации инженерных расчетов и позволяют более подробно моделировать напряженно-деформированное состояние системы валопровода судна.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Щербаков Н. П. Автоматизация технологического проектирования. Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2002. 431 с.
2. Сапига В. В., Кирюхин А. Л., Черпига П. В. Совершенствование методов анализа динамики судовых валопроводов // Водный трансп. 2014. № 1. С. 52–61.
3. Мамонтов В. А., Миронов А. И., Халявкин А. А. Исследование параметрических колебаний валопроводов судов // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. 2011. № 4-5. С. 2333–2334.
4. Кукарина А. Ю., Миронов А. И., Рубан А. Р. Влияние износов дейдвудных подшипников и гидродинамического момента на устойчивость вращения гребного вала // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адм. С. О. Макарова. 2016. № 1 (35). С. 145–153.
5. Шпаков В. С., Турбал В. К., Поляков В. И. Разработка полуэмпирической методики определения гидродинамических изгибающих моментов, действующих на валопроводы одновальных судов с традиционной формой оконечности А-ХП-130 (Приложение 3) // Тр. ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова. 1973. № 16077. С. 1–33.
6. Войткунский Я. И., Першиц Р. Я., Титов И. А. Справочник по теории корабля. Л.: Судостроение, 1973. Т. 1. 511 с.
7. Minsaas K. J. Propellteori // Skipmodelltanken meddelse. Skipmodelltanken Norges Tekniske Hogskole Trondheim. 1967. N. 96. P. 34–65.
8. Hadler J. B., Cheng H. M. Analysis of Experimental Wake Date in Way of Propeller Plane of Single and Twin – Screw Ship Models. TrSNAME. 1965. Vol. 73. P. 287–414.

Статья поступила в редакцию 15.07.2020

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кушнер Гурий Алексеевич** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; канд. техн. наук; доцент кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; guriy.kushner@mail.ru.

**Мамонтов Виктор Андреевич** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; д-р техн. наук, доцент; профессор кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; sormat112@mail.ru.

**Волков Дмитрий Александрович** – Россия, 414056, Астрахань; Астраханский государственный технический университет; аспирант кафедры судостроения и энергетических комплексов морской техники; volkovdima95@mail.ru.



## METHODS OF DETERMINING HYDRODYNAMIC BENDING MOMENTS HAVING EFFECT ON SHIP SHAFT

*G. A. Kushner, V. A. Mamontov, D. A. Volkov*

*Astrakhan State Technical University,  
Astrakhan, Russian Federation*

**Abstract.** The paper considers the problem of engineering systems design in modern shipbuilding, which is based on using the computer-aided design systems. In today's environment, not all engineering calculations can be implemented in the form of an algorithm for a specific design procedure. One of these calculations is determining the resonant frequency of transverse vibrations of a ship shaft line. Analyzing the parameters of such a dynamic system is a serious task even at the stage of preliminary design. The urgent task in the design and strength calculations of the shaft line is to calculate the hydrodynamic bending moments resulting from the operation of the propeller in an uneven velocity field. There has been presented a software implementation of the semi-empirical methodology for determining the hydrodynamic bending moments acting on ship shaft lines. The main principles of the methodology, the initial data on the vessel hull, and the quantities characterizing the operating mode of the propeller are described. There is proposed a sequence and software implementation of the method for determining hydrodynamic bending moments in the en-

vironment of Maple computer algebra. The problem of representing empirical data in the form of bilinear interpolation and interpolation polynomial is solved. The results of a numerical experiment to determine the constant and amplitude values of the hydrodynamic bending moments for shaft shafts of full-scale vessels are presented. The software implementation of the technique proposed made it possible to automate the process of determining external forces in the calculations of the cyclic strength of the propeller shaft at the early stages of the design of the vessel. The research results are in addition to existing automation tools.

**Key words:** ship shaft, hydrodynamic moment, bending moment, propeller shaft, vibrations, automation.

**For citation:** Kushner G. A., Mamontov V. A., Volkov D. A. Methods of determining hydrodynamic bending moments having effect on ship shaft. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2020;3:47-53. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-47-53.

#### REFERENCES

1. Shcherbakov N. P. *Avtomatizatsiia tekhnologicheskogo proektirovaniia* [Process design automation]. Barnaul, Izd-vo AltGTU, 2002. 431 p.
2. Sapiga V. V., Kiriukhin A. L., Cherpita P. V. Sovershenstvovanie metodov analiza dinamiki sudovykh valoprovodov [Improving methods for analyzing dynamics of ship shafting]. *Vodnii transport*, 2014, no. 1, pp. 52-61.
3. Mamontov V. A., Mironov A. I., Khaliavkin A. A. Issledovanie parametricheskikh kolebaniy valoprovodov sudov [Studying parametric vibrations of ship shafting]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N. I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4-5, pp. 2333-2334.
4. Kukarina A. Iu., Mironov A. I., Ruban A. R. Vliianie iznosov deidvudnykh podshipnikov i gidrodinamicheskogo momenta na ustoichivost' vrashcheniia grebnogo vala [Influence of wear of stern bearings and hydrodynamic torque on propeller shaft rotation]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2016, no. 1 (35), pp. 145-153.
5. Shpakov V. S., Turbal V. K., Poliakov V. I. Razrabotka poluempiricheskoi metodiki opredeleniia gidrodinamicheskikh izgibaiushchikh momentov, deistvuiushchikh na valoprovody odnoval'nykh sudov s traditsionnoi formoi okonechnosti A-KhP-130 (Prilozhenie 3) [Development of semi-empirical methods for determining hydrodynamic bending moments acting on shaft lines of single-shaft vessels with traditional tip shape A-KhP -130 (Appendix 3)]. *Trudy ordena Lenina i ordena Trudovogo Krasnogo Znameni TsNII imeni akademika A. N. Krylova*, 1973, no. 16077, pp. 1-33.
6. Voitkunskaia I. I., Pershits R. Ia., Titov I. A. *Spravochnik po teorii korablia* [Ship theory handbook]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1973. Vol. 1. 511 p.
7. Minsaas K. J. Propellteori. *Skipmodelltanken meddelse. Skipmodelltanken Norges Tekniske Hogskole Trondheim*, 1967, no. 96, pp. 34-65.
8. Hadler J. B., Cheng H. M. Analysis of Experimental Wake Date in Way of Propeller Plane of Single and Twin – Screw Ship Models. *TrSNAME*, 1965, vol. 73, pp. 287-414.

The article submitted to the editors 15.07.2020

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Kushner Guriy Alekseevich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Candidate of Technical Sciences; Assistant Professor of the Department of Shipbuilding and Marine Power Complexes; guriy.kushner@mail.ru.

**Mamontov Victor Andreevich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Shipbuilding and Marine Power Complexes; sopromat112@mail.ru.

**Volkov Dmitry Aleksandrovich** – Russia, 414056, Astrakhan; Astrakhan State Technical University; Postgraduate Student of the Department of Shipbuilding and Marine Power Complexes; volkovdima95@mail.ru.

