

COMPARATIVE ANALYSIS OF METHODS FOR CALCULATING THE HYDRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A SHIP'S HULL

Yu. I. Yudin

Admiral Ushakov Maritime State University, Novorossiysk, Russian Federation

Based on the results of model experiments, this study investigates the potential for their application in mathematical models of a vessel, considering that one of the most critical elements of a ship's mathematical model is the description of the hydrodynamic force loads acting on the hull during controlled motion. These loads are represented as functions of dimensionless hydrodynamic coefficients dependent on various dimensionless kinematic parameters of the vessel's motion. In applied research practice, two main calculation approaches are commonly used to determine the hydrodynamic characteristics of a ship's hull, differing in the specific combination of non-dimensional kinematic parameters: the first uses the drift angle and angular velocity, while the second is based on the transverse component of the ship's linear velocity and angular velocity. The relationships between the dimensionless hydrodynamic characteristics of the hull and the corresponding kinematic parameters of motion are expressed in polynomial form as products of expansion coefficients — i. e., the first and higher-order partial derivatives with respect to the kinematic parameters — by the corresponding motion variables. Model experiments are performed using the harmonic oscillation method, mainly on planar motion mechanisms (PMM) in experimental towing tanks. The results of these experiments yield the partial derivatives of hydrodynamic coefficients. The study explores the possibility of integrating model test data to develop generalized computational formulas that are independent of the specific kinematic parameters considered. A comparative analysis of several calculation methods for determining non-dimensional hydrodynamic characteristics as functions of various dimensionless kinematic parameters is presented. The adequacy of these methods is verified using full-scale experimental data obtained from ships of different displacements and hull configurations. Simulations of controlled ship motion were carried out using the developed mathematical models, taking into account external environmental factors observed during sea trials.

Keywords: mathematical model of a vessel, model experiment, kinematic motion parameters, hydrodynamic forces on the hull, applied problems, standardized circulation parameters, zigzag maneuver, external factors, determination of expansion coefficients, systems analysis.

For citation:

Yudin, Yuri I. "Comparative analysis of methods for calculating the hydrodynamic characteristics of a ship's hull." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 17.5 (2025): 691–703. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-691-703

УДК 629.12.075

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРПУСА СУДНА

Ю. И. Юдин

ФГБОУ ВО «ГМУ имени адмирала Ф. Ф. Ушакова»,
Новороссийск, Российская Федерация

На основе результатов модельных экспериментов исследованы возможности их использования в конкретных математических моделях судна с учетом того, что одним из важнейших элементов математической модели судна является описание силовой нагрузки на корпус судна при его управляемом движении, рассматриваемом в виде зависимости безразмерных гидродинамических характеристик от различных безразмерных кинематических параметров движения судна. Отмечается, что в практике прикладных научных исследований, выполняемых с использованием математической модели судна, предпочтение отдается двум вариантам расчетных методов определения гидродинамических характеристик корпуса судна, отличительной особенностью которых является определенное сочетание кинематических параметров движения судна в безразмерной форме: в первом варианте это угол дрейфа и угловая скорость, во втором —

поперечная составляющая линейной скорости судна и угловая скорость. При этом зависимости безразмерных гидродинамических характеристик корпуса судна от безразмерных кинематических параметров движения представляются в полиномиальной форме в виде произведений коэффициентов разложения, т. е. первых и последующих частных производных по кинематическим параметрам движения, на соответствующие параметры движения. Модельные эксперименты проводятся с использованием метода гармонических колебаний преимущественно на планарных механизмах (Planar Motion Mechanism — PMM) в опытовых бассейнах. Результатами таких экспериментов являются значения частных производных гидродинамических характеристик. В работе исследована возможность совокупного использования результатов модельных экспериментов для получения расчетных формул вне зависимости от рассматриваемых в них кинематических параметров движения судна. Приведены результаты сравнительного анализа использования ряда расчетных методов определения безразмерных гидродинамических характеристик в зависимости от различных безразмерных кинематических параметров движения судна. Для оценки адекватности расчетных методов использованы результаты натурных экспериментов на судах различного водоизмещения и с различной конфигурацией конструкции корпуса. Симуляции управляемого движения рассматриваемых судов выполнены с использованием их математических моделей с учетом воздействия внешних факторов при проведении морских испытаний.

Ключевые слова: математическая модель судна, модельный эксперимент, кинематические параметры движения, усилия на корпусе, практические задачи, нормируемые параметры циркуляции, маневр зигзаг, внешние факторы, определение коэффициента разложения, системный анализ.

Для цитирования:

Юдин Ю. И. Сравнительный анализ методов расчета гидродинамических характеристик корпуса судна / Ю. И. Юдин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2025. — Т. 17. — № 5. — С. 691–703. DOI: 10.21821/2309-5180-2025-17-5-691-703. — EDN HQTREY.

Введение (Introduction)

Для решения многих практических задач в области управления движением судна в реальных условиях плавания необходимо проведение соответствующих экспериментов. Наиболее эффективным способом экспериментальных исследований следует считать симуляции движения судна в заданных условиях плавания, т. е. с учетом воздействия внешних факторов: ветра, волнения, течения и мелководья.

При планировании экспериментальных исследований с использованием математических моделей судна (ММС) необходимо иметь определенные гарантии адекватности ММС [1], [2] как основного инструмента исследования. В этой связи необходимо прежде всего обратить внимание на параметры ММС, так как структура большинства моделей является однотипной, построенной с учетом известных законов динамики движения твердого тела. При этом структура модели обычно зависит от характерных особенностей решаемой с ее помощью практической задачи. Структуры ММС приведены в статье [3].

Параметры базовой ММС, как правило, определяются с использованием результатов ряда натурных и модельных экспериментов, процедура выполнения которых достаточно подробно описана в ряде работ отечественных и зарубежных ученых, выполняющих исследования в области управляемости судна, поэтому в данном случае не требует подробного рассмотрения.

Основным предметом данного исследования является изучение влияния структуры расчетных зависимостей, определяющих значения силовых составляющих нагрузки на корпус судна при его управляемом движении, на основные параметры поворотливости, к которым, в первую очередь, относятся *нормируемые параметры циркуляции* и *параметры маневра зигзаг*. Как известно, расчетные зависимости, определяющие значения гидродинамических характеристик корпуса судна при его движении в ММС, представлены в полиномиальной форме в виде суммы произведений частных производных различного порядка по кинематическим параметрам движения судна (коэффициенты разложения) на соответствующие безразмерные параметры движения. Наибольшее распространение получили два варианта указанных расчетных зависимостей, отличительной особенностью которых является состав кинематических параметров движения судна: первый вариант — угол дрейфа β и угловая скорость r ; второй вариант — поперечная составляющая линейной скорости

судна v и угловая скорость r . При этом в первом варианте используются два расчетных метода определения коэффициентов разложения: β — расчетный метод, не учитывающий форму кормовой части корпуса судна; β_1 — расчетный метод, учитывающий форму кормовой части корпуса судна. Во втором варианте используется один расчетный метод, в текстовой части рис. 2 расчетные параметры обозначены буквой v .

В данной статье рассмотрены оба варианта указанных расчетных зависимостей с целью оценки их влияния на параметры поворотливости судна, так как в данном случае предметом исследования является возможность выбора конкретной ММС без вероятности потери ее адекватности при решении практической задачи управления движением судна. Более того, при выполнении системного анализа результатов модельных экспериментов необходимо иметь максимально возможное количество экспериментальных данных, вне зависимости от того, измерение каких кинематических параметров движения осуществлялось в процессе проведения экспериментов. Следует отметить, что убедительным примером в данном случае является системный анализ результатов модельных экспериментов по определению влияния мелководья на коэффициенты разложения.

Для проведения модельных испытаний выбраны три танкера различного водоизмещения, а именно: BRIGHTOIL GLORY (318000 DWT), FRONT CLIPPER (158000 DWT); ENERGY CENTAUER (75000 DWT), далее в текстовой части рисунков BG, FC, EC соответственно. Выбор судов обусловлен наличием необходимых для численных экспериментов геометрических характеристик корпуса судна и, что немаловажно, данных натурных испытаний.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Существует несколько расчетных методов определения гидродинамических характеристик корпуса судна. Отличительной особенностью этих методов является состав переменных, входящих в расчетные зависимости, т. е. *состав кинематических параметров движения* (рис. 1), частные производные которых представляют собой коэффициенты разложения в формульных выражениях,

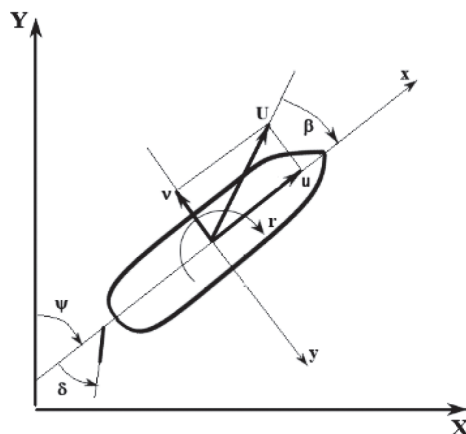


Рис. 1. Координатные системы, кинематические параметры движения

используемых для расчета безразмерных значений гидродинамических характеристик корпуса X'_H , Y'_H , N'_H , имеющих следующий вид:

1-й вариант — кинематические параметры движения: линейная скорость судна U ; угол дрейфа β ; угловая скорость движения r [4]:

$$X'_H = X'_{\beta r} r' \sin \beta + X'_{uu} \cos^2 \beta; \quad (1)$$

$$Y'_H = Y'_{\beta} \beta + Y'_{r'} r' + Y'_{\beta\beta} \beta |\beta| + Y'_{rr} r' |r'| + (Y'_{\beta\beta r} \beta + Y'_{\beta r r'} r') \beta r'; \quad (2)$$

$$N'_H = N'_{\beta} \beta + N'_{r'} r' + N'_{\beta\beta} \beta |\beta| + N'_{rr} r' |r'| + (N'_{\beta\beta r} \beta + N'_{\beta r r'} r') \beta r'. \quad (3)$$

2-й вариант — кинематические параметры движения: продольная составляющая линейной скорости движения судна u ; поперечная составляющая линейной скорости движения судна v ; угловая скорость движения r [5]:

$$X'_H = X'_{vr} v' r' + X'_{uu} u^2; \quad (4)$$

$$Y'_H = Y'_v v' + Y'_r r' + Y'_{vv} v' |v'| + Y'_{rr} r' |r'| + (Y'_{vvr} v' + Y'_{vrr} r') v' r'; \quad (5)$$

$$N'_H = N'_v v' + N'_r r' + N'_{vv} v' |v'| + N'_{rr} r' |r'| + (N'_{vvr} v' + N'_{vrr} r') v' r' \quad (6)$$

в выражения (1)–(6) входят коэффициенты разложения (частные производные по соответствующим кинематическим параметрам движения, например, $X'_{vr} = X'_H / \partial v' \partial r'$): $X'_{\beta r}$, X'_{uu} , X'_{vr} , Y'_{β} , Y'_r , $Y'_{\beta\beta}$, ..., Y'_{vrr} , N'_{β} , N'_r , $N'_{\beta\beta}$, ..., N'_{vrr} ; безразмерные значения кинематических параметров движения: $r' = rL / U$ (L — длина между перпендикулярами, далее по тексту — длина), $v' = v/U$.

Как известно, значения коэффициентов разложения являются предметом модельных испытаний с последующим преобразованием их значений в аналитическую форму в зависимости от основных геометрических параметров корпуса судна. Основные геометрические характеристики корпусов танкеров, использованных в настоящем исследовании, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Геометрические параметры корпусов танкеров

Основные геометрические параметры корпуса	Тип судна		
	Танкер BRIGHTOIL GLORY (318000 DWT)	Танкер FRONT CLIPPER (158000 DWT)	Танкер ENERGY CENTAUR (75000 DWT)
Длина между перпендикулярами L , м	319	270,4	219
Ширина B , м	60	48	32,2
Осадка d , м	22,6	15,97	12,24
Коэффициент полноты водоизмещения C_b	0,8204	0,7978	0,8170
Коэффициент полноты кормовой части площади ватерлинии C_{wa}	0,882	0,912	0,922
Коэффициент продольной полноты кормовой части корпуса C_{pa}	0,740	0,780	0,780

Аналитическая форма зависимостей для определения составляющих гидродинамической силы, образующейся на корпусе судна при его движении, и ее момента относительно вертикальной оси z координатной системы, связанной с судном:

$$X_H = 0,5\rho L d U^2 X'_H;$$

$$Y_H = 0,5\rho L d U^2 Y'_H;$$

$$N_H = 0,5\rho L^2 d U^2 N'_H.$$

Здесь ρ — массовая плотность воды (в расчетах принято значение $\rho = 1,025$ т/м³); d — осадка судна.

Формульные выражения для определения значений коэффициентов разложения при различных вариантах состава кинематических параметров движения, предложенные авторами работ [4]–[11], выглядят следующим образом:

1-й вариант (содержит два вида выражений):

– без учета формы кормовой части корпуса судна (далее в обозначениях — β) [7]:

$$Y'_\beta = 0,5\pi k + 1,4C_b B / L; \quad (7)$$

$$Y'_r - (m' + m'_x) = -1,5C_b B / L; \quad (8)$$

$$Y'_{\beta\beta} = 2,5d(1 - C_b) / B + 0,5; \quad (9)$$

$$Y'_{rr} = 0,343dC_b / B - 0,07; \quad (10)$$

$$Y'_{\beta rr} = 5,95d(1 - C_b) / B; \quad (11)$$

$$Y'_{\beta\beta r} = 1,5dC_b / B - 0,65; \quad (12)$$

$$N'_\beta = k; \quad (13)$$

$$N'_\beta = -0,54k + k^2; \quad (14)$$

$$N'_{\beta\beta} = -0,96d(1 - C_b) / B + 0,066; \quad (15)$$

$$N'_{rr} = 0,5C_b B / L - 0,09; \quad (16)$$

$$N'_{\beta rr} = -(0,5dC_b / B - 0,05); \quad (17)$$

$$N'_{\beta\beta r} = [57,5(C_b B / L)^2 - 18,4C_b B / L + 1,6], \quad (18)$$

Здесь $k = 2d/L$, $m', m'_x = m, m_x / 0,5\rho L^2 d$ (m — масса судна; m_x — присоединенная масса корпуса судна при его продольном движении);

— с учетом формы кормовой части корпуса судна (далее в обозначениях — $\beta 1$) [4]:

$$Y'_\beta = 0,5\pi k + 1,9257(C_b B / L)\sigma_a;$$

$$Y'_r = 0,25\pi k + 0,052e'_a - 0,457 + (m' + m'_x);$$

$$Y'_{\beta\beta} = \begin{cases} 52,9[d(1 - C_b) / B]K - 0,125, \\ \text{если } C_b < 0,6; \\ -0,170e'_a K(B / d) + 1,08, \\ \text{если } 0,6 < C_b \leq 0,75; \\ 4,17kC_b e'_a - 0,4475, \\ \text{если } C_b > 0,75 \text{ и } K \leq 0,35; \\ 0,92kC_b e'_a + 0,373, \\ \text{если } C_b > 0,75 \text{ и } kC_b e'_a \leq 0,28; \\ -0,4784K(B / d) + 1,3 - \text{в остальных случаях;} \end{cases}$$

$$Y'_{rr} = \begin{cases} -0,755kC_b e'_a + 0,248, \\ \text{если } kC_b e'_a \leq 0,28; \\ 0,243(dC_b / B)e'_a - 0,131, \\ \text{если } kC_b e'_a > 0,28; \end{cases}$$

$$Y'_{\beta rr} = -1,386C_b e'_a K + 1,29;$$

$$Y'_{\beta \beta r} = \begin{cases} 306,52(C_b B / L)K - 2,315, \\ \text{если } C_b \leq 0,6 \text{ и } (C_b B / L)K < 0,008; \\ -186,14(C_b B / L)K + 0,902, \\ \text{если } C_b \leq 0,6 \text{ и } (C_b B / L)K \geq 0,008; \\ 13,018C_b - 9,278, \\ \text{если } 0,6 < C_b \leq 0,75; \\ -42,654(C_b B / L) + 5,9, \\ \text{если } C_b > 0,75 \text{ и } K \leq 0,3; \\ -6,92kC_b e'_a + 1,87, \\ \text{если } C_b > 0,75 \text{ и } kC_b e'_a \geq 0,28; \\ 0,781e'_a K - 0,432 - \text{в остальных случаях;} \end{cases}$$

$$N'_\beta = k \left\{ 150,668 \left[\frac{d(1-C_b)}{B} e'_a K \right]^2 - 23,819 \left[\frac{d(1-C_b)}{B} e'_a K \right] + C \right\};$$

$$C = \begin{cases} 1,976, & \text{если } (C_b B / L) e'_a K \geq 0,137; \\ 1,802, & \text{если } (C_b B / L) e'_a K < 0,137; \\ 1,902, & \text{если } e'_a k C_b \geq 0,28; \end{cases}$$

$$N'_r = -0,54k + k^2 - 0,048e'_a K + 0,037;$$

$$N'_{\beta \beta} = 43,857 \left\{ \left[d(1-C_b) / B \right] e'_a K \right\}^2 - 3,671 \left[d(1-C_b) / B \right] e'_a K + 0,086;$$

$$N'_{rr} = 0,15K - 0,068;$$

$$N'_{\beta rr} = -0,409C_b + 0,27;$$

$$N'_{\beta \beta r} = -0,826 \left[d(1-C_b) / B \right] e'_a - 0,026;$$

$$e'_a = \frac{e_a}{\sqrt{\frac{1}{4} + \frac{1}{(B+d)^2}}};$$

$$e_a = \frac{L}{B} (1 - C_{pa});$$

$$K = \left(\frac{1}{e'_a} + \frac{1,5}{L/B} - 0,33 \right) (0,95\sigma_a + 0,40);$$

$$\sigma_a = \frac{1 - C_{wa}}{1 - C_{pa}};$$

2-й вариант (далее в обозначениях — ν) [7]:

$$Y'_\nu = -(0,5\pi k + 1,4C_b B / L); \quad (19)$$

$$Y'_r = -1,5C_b B / L + (m' + m'_x); \quad (20)$$

$$Y'_{vv} = -[2,5d(1 - C_b) / B + 0,5]; \quad (21)$$

$$Y'_{rr} = 0,343dC_b / B - 0,07; \quad (22)$$

$$Y'_{vrr} = -[5,95d(1 - C_b) / B]; \quad (23)$$

$$Y'_{vvr} = 1,5dC_b / B - 0,65; \quad (24)$$

$$N'_v = -k; \quad (25)$$

$$N'_r = -0,54k + k^2; \quad (26)$$

$$N'_{vv} = -[-0,96d(1 - C_b) / B + 0,066]; \quad (27)$$

$$N'_{rr} = 0,5C_bB / L - 0,09; \quad (28)$$

$$N'_{vrr} = 0,5dC_b / B - 0,05; \quad (29)$$

$$N'_{vvr} = -[57,5(C_bB / L)^2 - 18,4C_bB / L + 1,6]. \quad (30)$$

Нетрудно заметить, что идентичность выражений (7)–(18) и (19)–(30), неслучайна так как $v' = -\sin \beta$.

Результаты (Results)

Результаты расчетов значений гидродинамических производных для рассматриваемых танкеров представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения гидродинамических производных

Производные	Тип судна								
	Танкер BRIGHTOIL GLORY (318000 DWT)			Танкер FRONT CLIPPER (158000 DWT)			Танкер ENERGY CENTAUR (75000 DWT)		
	«β1»	«β»	«v»	«β1»	«β»	«v»	«β1»	«β»	«v»
$Y'_{\beta(v)}$	0,357	0,439	-0,439	0,287	0,384	-0,384	0,295	0,344	-0,344
Y'_r	0,119	0,118	0,118	0,058	0,102	0,102	0,012	0,083	0,083
$Y'_{\beta\beta(vv)}$	0,609	0,669	-0,669	0,548	0,668	-0,668	0,564	0,674	-0,674
Y'_{rr}	0,054	0,036	0,036	0,101	0,021	0,021	0,091	0,037	0,037
$Y'_{\beta rr(vrr)}$	0,445	0,403	-0,403	0,541	0,400	-0,400	0,534	0,414	-0,414
$Y'_{\beta\beta r(vvr)}$	0,149	-0,186	-0,186	0,078	-0,252	-0,252	0,776	-0,184	-0,184
$N'_{\beta(v)}$	0,140	0,142	-0,142	0,122	0,118	-0,118	0,114	0,112	-0,112
N'_r	-0,055	-0,056	-0,056	-0,044	-0,050	-0,050	-0,043	-0,048	-0,048
$N'_{\beta\beta(vv)}$	0,012	0,001	-0,001	0,009	0,0014	-0,0014	0,010	-0,0008	0,0008
N'_{rr}	-0,018	-0,013	-0,013	-0,020	-0,019	-0,019	-0,024	-0,030	-0,030
$N'_{\beta rr(vrr)}$	-0,066	-0,105	0,105	-0,053	-0,083	0,083	-0,064	-0,105	0,105
$N'_{\beta\beta r(vvr)}$	-0,149	-0,130	-0,130	-0,140	-0,147	-0,147	-0,157	-0,219	-0,219

Результаты расчетов усилий на корпусах танкеров в зависимости от угла дрейфа представлены на рис. 2.

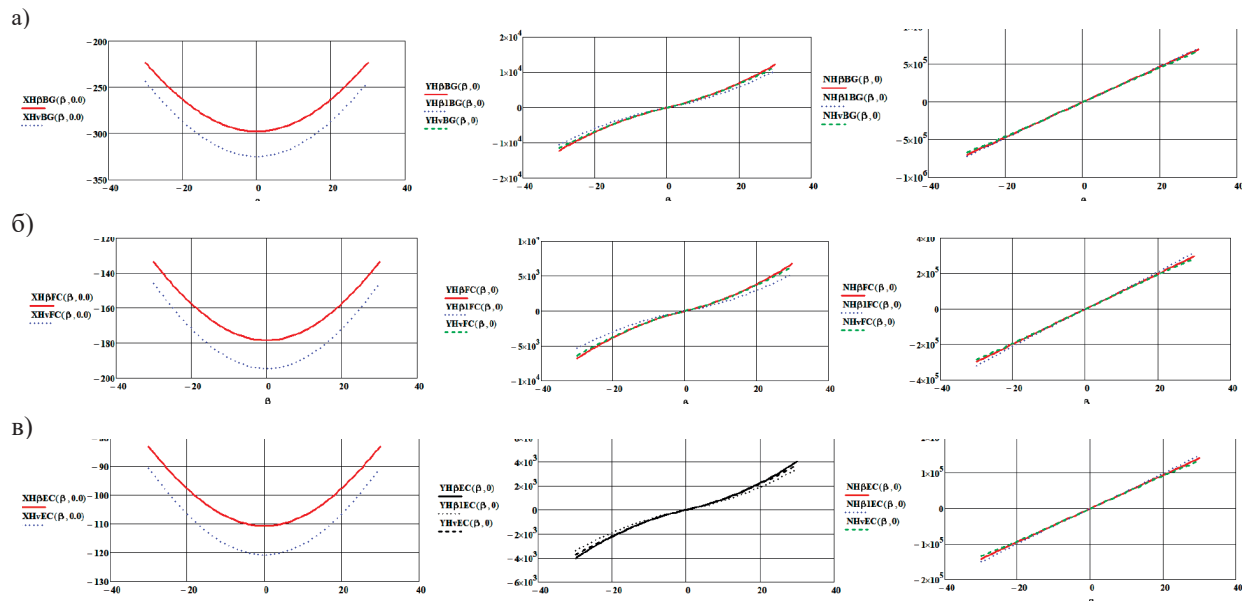


Рис. 2. Зависимость усилий от угла дрейфа на корпусе танкеров:
а — BRIGHTOIL GLORY; б — FRONT CLIPPER; в — ENERGY CENTAUER

Видно, что существенных расхождений в значениях усилий на корпусах танкеров в зависимости от использованного расчетного метода не наблюдается. Существуют некоторые расхождения в крайних точках, т. е. на границах выбранного интервала значений угла дрейфа ($-30^\circ \leq \beta \leq 30^\circ$). Для убедительности в табл. 3 приведены значения поперечной составляющей гидродинамической силы на корпусе танкеров и ее момента, которые подтверждают несущественные отклонения значений указанных параметров, рассчитанных с использованием различных расчетных методов.

Таблица 3

Значения гидродинамической силы Y_H (кН) и вращающего момента N_H (кН·м) на корпусе при движении со скоростью $U = 5,5$ уз (2,827 м/с) и с углом дрейфа $\beta = 30^\circ$

По результатам симуляции движения судна	По результатам расчета производных «β1»	По результатам расчета производных «β»	По результатам расчета производных «v»
Танкер BRIGHTOIL GLORY (318000 DWT)			
$Y_H = 1,141 \cdot 10^4$ кН	$Y_H = 1,046 \cdot 10^4$ кН	$Y_H = 1,221 \cdot 10^4$ кН	$Y_H = 1,141 \cdot 10^4$ кН
$N_H = 6,695 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 7,202 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 7,015 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 6,698 \cdot 10^5$ кН·м
E, %	E%(Y_H) = 8,3 % E%(N_H) = 7,0 %	E%(Y_H) = 6,6 % E%(N_H) = 4,6 %	E%(Y_H) = 0 % E%(N_H) = 0 %
Танкер FRONT CLIPPER (158000 DWT)			
$Y_H = 6,346 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 5,315 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 6,794 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 6,348 \cdot 10^3$ кН
$N_H = 2,840 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 3,190 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 2,976 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 2,842 \cdot 10^5$ кН·м
E, %	E%(Y_H) = 16,2 % E%(N_H) = 11,0 %	E%(Y_H) = 6,6 % E%(N_H) = 4,6 %	E%(Y_H) = 0 % E%(N_H) = 0 %
Танкер ENERGY CENTAUER (75000 DWT)			
$Y_H = 3,735 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 3,391 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 4,004 \cdot 10^3$ кН	$Y_H = 3,736 \cdot 10^3$ кН
$N_H = 1,338 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 1,503 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 1,402 \cdot 10^5$ кН·м	$N_H = 1,339 \cdot 10^5$ кН·м
E, %	E%(Y_H) = 9,2 % E%(N_H) = 10,9 %	E%(Y_H) = 6,7 % E%(N_H) = 4,6 %	E%(Y_H) = 0 % E%(N_H) = 0 %

Пределы значений угла дрейфа выбраны неслучайно, так как при выполнении циркуляций подавляющего большинства судов различного типа они находятся в указанном диапазоне.

Обсуждение (Discussion)

Для проверки адекватности ММС, в которых использованы рассмотренные ранее в работе расчетные методы, произведен ряд симуляций движения танкеров при выполнении маневров, параметры которых нормированы в соответствии с Резолюцией ИМО (IMO, 2002a), — MSC.137(76).

Симуляции движения танкеров выполнялись с учетом условий, в которых проводились морские испытания (SEA TRIAL). Необходимо отметить в данном случае, что танкеры во время испытаний имели полную загрузку. Наличие внешних факторов в районах испытаний, оказывало влияние на параметры маневров. Так, например, при выполнении циркуляции танкера BRIGHTOIL GLORY скорость ветра составляла 10,3 м/с, а курсовой угол ветра в момент начала циркуляции был равен 15° с правого борта. Испытания двух других танкеров проводились при ветре, скорость которого не превышала 4 м/с, что практически не оказывало влияния на параметры маневрирования. В то же время в районе проведения морских испытаний танкера ENERGY CENTAUER наблюдалось течение со скоростью 1,9 уз, направлением на NNW, что привело к деформации кривой циркуляции. Все факторы внешней среды были учтены при проведении симуляций движения танкеров. Так как условия при выполнении маневров зигзаг были более благоприятными с точки зрения влияния на параметры маневрирования, в симуляциях этого маневра внешние факторы не учитывались.

Значения нормируемых параметров поворотливости танкеров: A_D — выдвиг; TD — тактический диаметр; T_R — прямое смещение; D_C — диаметр установившейся циркуляции; T_{360} — время цикла циркуляции; U_{360} — скорость танкера в конце цикла циркуляции; 1st — первый угол зарыскивания; 2nd — второй угол зарыскивания, а также сравнительная оценка в процентном выражении с аналогичными параметрами, полученными по результатам морских испытаний, приведены в табл. 4.

Таблица 4

Значение параметров поворотливости по результатам симуляции движения с использованием различных ММС

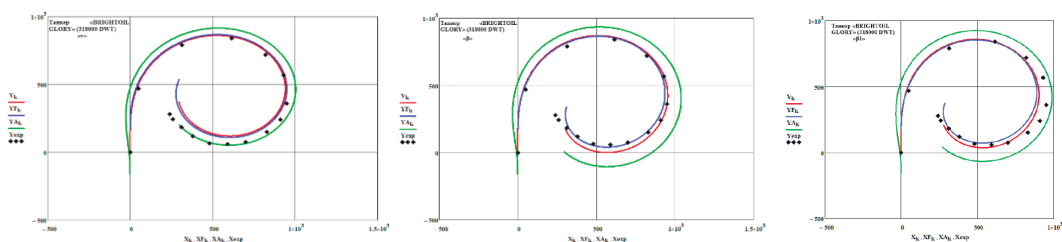
Тип судна	Параметры поворотливости	Результаты морских испытаний	Значения параметров поворотливости по результатам симуляций		
			Вид модели (переменные)		
			u, v, r («v»)	U, β, r («β»)	U, β, r («β1»)
Танкер BRIGHTOIL GLORY (318000 DWT)	A_D , м	795	857 (7,2 %)	862 (7,8 %)	851 (6,6 %)
	TD, м	943	933 (1,1 %)	932 (1,2 %)	891 (5,5 %)
	T_R , м	465	463 (0,4 %)	408 (12,3 %)	405 (12,9 %)
	D_C , м	751	705 (6,1 %)	738 (1,7 %)	700 (6,8 %)
	T_{360} , с	914	716 (21,7 %)	887 (3,0 %)	856 (6,7 %)
	U_{360} , уз	2,8	4,37 (36 %)	3,8 (26,3 %)	3,8 (26,3 %)
	1 st (10/10), °	12,9	12,6 (2,3 %)	12,3 (4,7 %)	13,1 (1,5 %)
	2 nd (10/10), °	38,9	38,8 (0,3 %)	38,9 (0 %)	38,1 (2,1 %)
	1 st (20/20), °	15,4	15,2 (1,9 %)	15,2 (1,3 %)	14,0 (9,1 %)
	2 nd (20/20), °	17,5	17,9 (2,2 %)	18,1 (3,3 %)	19,1 (8,4 %)
Танкер FRONT CLIPPER (158000 DWT)	A_D , м	861	779 (9,5 %)	781 (9,3 %)	847 (1,6 %)
	TD, м	776	852 (8,9 %)	827 (6,2 %)	812 (4,4 %)
	T_R , м	416	389 (6,5 %)	385 (7,5 %)	381 (8,4 %)
	D_C , м	687	724 (5,1 %)	714 (3,8 %)	704 (24 %)
	T_{360} , с	777	847 (8,2 %)	825 (5,8 %)	898 (13,4 %)

Таблица 4
(Окончание)

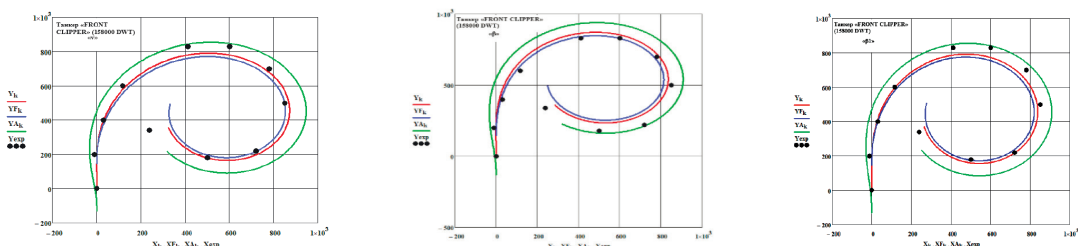
Танкер FRONT CLIPPER (158000 DWT)	U_{360} , уз	3,7	3,2 (13,5 %)	3,3 (10,8 %)	3,3 (10,8 %)
	1 st (10/10), °	12,2	11,4 (6,6 %)	12,0 (1,6 %)	11,8 (3,3 %)
	2 nd (10/10), °	23,5	23,4 (0,4 %)	23,2 (1,3 %)	24,2 (2,9 %)
	1 st (20/20), °	13,3	13,4 (0,7 %)	12,7 (4,5 %)	13,1 (1,5 %)
Танкер ENERGY CENTAUER (75000 DWT)	2 nd (20/20), °	15,8	15,6 (1,3 %)	16,0 (1,3 %)	15,3 (3,2 %)
	T_D , м	634	645 (1,7 %)	647 (2,0 %)	608 (4,1 %)
	T_R , м	194	248 (21,7 %)	248 (21,7 %)	240 (19,2 %)
	D_C , м	527	557 (5,4 %)	534 (1,3 %)	578 (8,8 %)
	T_{360} , с	557	613 (9,1 %)	558 (0,2 %)	559 (0,4 %)
	U_{360} , уз	6,1	5,8 (4,9 %)	6,1 (0 %)	6,2 (1,6 %)
	1 st (10/10), °	8,0	9,2 (13 %)	8,2 (2,4 %)	8,6 (7,0 %)
	2 nd (10/10), °	17,8	18,2 (2,2 %)	17,1 (3,9 %)	17,4 (2,2 %)
	1 st (20/20), °	12,7	13,7 (7,3 %)	13,2 (3,8 %)	12,0 (5,5 %)
	2 nd (20/20), °	15,6	14,6 (6,4 %)	14,7 (5,8 %)	17,5 (10,8 %)

В графической форме результаты симуляций представлены на рис. 3 и 4. Траектория циркуляции, полученной при проведении морских испытаний, отмечена знаками различной формы, координаты которых определены по результатам оцифровки экспериментальных кривых.

а)



б)



в)

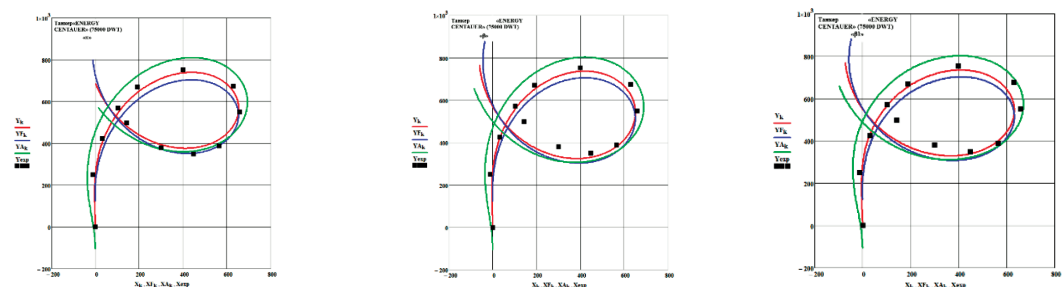


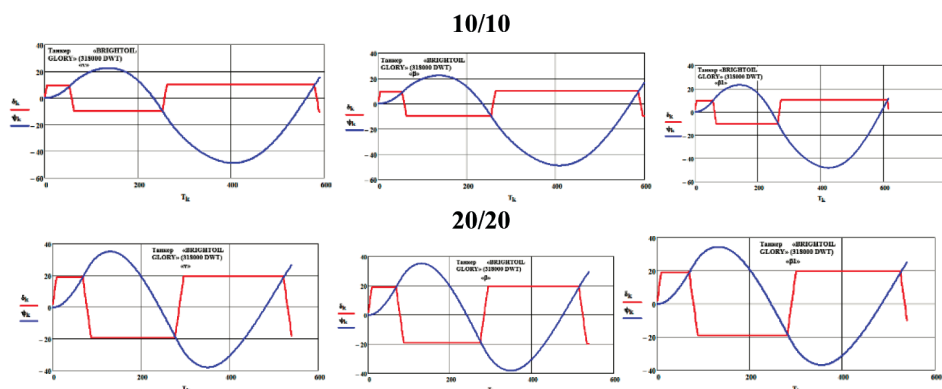
Рис. 3. Результаты симуляции циркуляций:

а — танкер BRIGHTOIL GLORY; б — танкер FRONT CLIPPER; в — танкер ENERGY CENTAUER

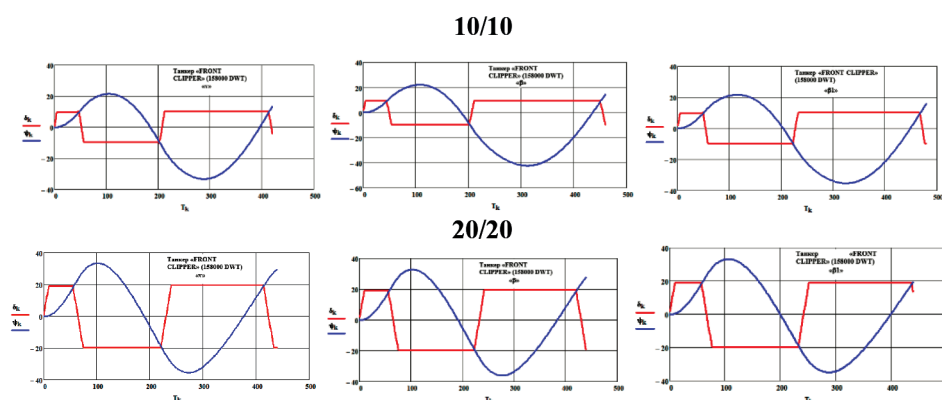
Условные обозначения:

красным цветом обозначена траектория движения центра тяжести танкеров;
синим — носовой оконечности танкеров; зеленым — кормовой оконечности

а)



б)



в)

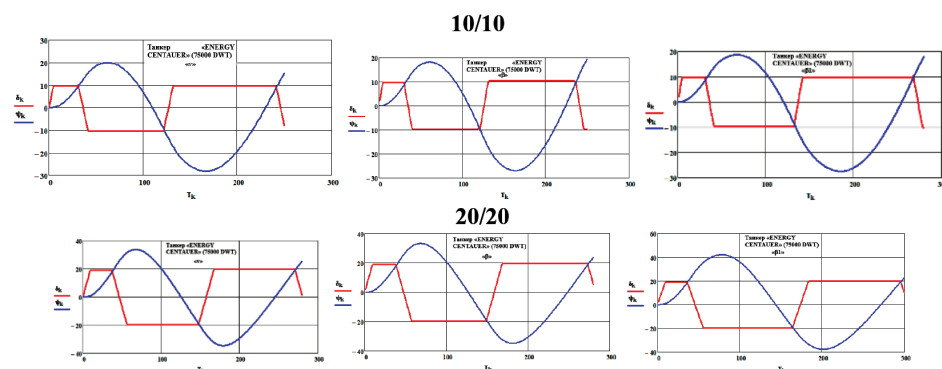


Рис. 4. Результаты симуляции маневра зигзаг: а — танкер BRIGHTOIL GLORY; б — танкер FRONT CLIPPER; в — танкер ENERGY CENTAUER

Условные обозначения:

красным цветом показана кривая изменения угла перекладки руля;
синим цветом — кривая изменения курса

Параметры, кроме углов зарыскивания, в результатах симуляции маневров зигзаг не рассматривались, так они не входят в число нормируемых.

Заключение (Conclusion)

Для проведения экспериментальных исследований с использованием ММС можно уверенно использовать модели, имеющие различные кинематические параметры, используемые в качестве переменных. При этом структура расчетных зависимостей, определяющих значения силовых составляющих нагрузки на корпус судна при его управляемом движении, не оказывает заметного

влияния на основные параметры поворотливости. Кроме того, при проведении системного анализа результатов модельных экспериментов можно использовать максимально допустимое количество экспериментальных данных, вне зависимости от того, какие кинематические параметры движения использовались в качестве заданных в процессе проведения этих экспериментов. Тем не менее мы не можем с уверенностью утверждать, что при симуляции «сильных» маневров рассмотренный подход имеет место, так как значения углов дрейфа, например, при лаговом движении судна значительно превышают предельное значение, принятое в данном исследовании. Этот фактор является важной проблемой, требующей дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дыда А. А. Построение модели динамики безэкипажного судна по курсу на основе экспериментальных данных / А. А. Дыда, К. Н. Пляшешник, И. И. Пушкарёв // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 4. — С. 716–725. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-716-725. — EDN KVHSLLE.
2. Смоленцев С. В. Простая аналитическая модель движения судна / С. В. Смоленцев, Д. В. Исаков // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 1. — С. 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21. — EDN NSMBPQ.
3. Юдин Ю. И. Метод расчета гидродинамических характеристик корпуса судна в условиях мелководья / Ю. И. Юдин // Эксплуатация морского транспорта. — 2024. — № 3(112). — С. 27–38. DOI: 10.34046/aumsuomtl12/5. — EDN URXYEJ.
4. Aoki I. On the Prediction Method for Maneuverability of a Full Scale Ship / I. Aoki, K. Kijima, Y. Furukawa, Y. Nakiri // Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers. — 2006. — Vol. 3. — Pp. 157–165. DOI: 10.2534/jjasnaoe.3.157.
5. Yoshimura Y. Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion (MMG Model). / Y. Yoshimura // Workshop on Mathematical Models for Operations Involving Ship-Ship Interaction. — Tokyo, 2005. — Pp. 1–6.
6. Kim D. J. Tune of hydrodynamic coefficients based on empirical formula by using manoeuvring performance indices of a ship / D. J. Kim, Y. G. Kim // Journal of the Society of Naval Architects of Korea. — 2020. — Vol. 57. — Is. 6. — Pp. 331–344. DOI: 10.3744/snak.2020.57.6.331.
7. Kijima K. On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition / K. Kijima, T. Katsuno, Y. Nakiri, Y. Furukawa // Journal of the society of naval architects of Japan. — 1990. — Vol. 1990. — Is. 168. — Pp. 141–148. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1990.168_141.
8. Li M. Simulation calculation and comprehensive assessment on ship maneuverabilities in wind, wave, current and shallow water / M. Li // Proceedings of MARSIM and ICSM'90, Tokyo. — 1990. — Vol. 403. — Pp. 459–465.
9. Muhammad A. H. Characteristics of Turning Circle and Zig-Zag Manoeuvres of An Indonesian Ferry Ship in Shallow Water / A. H. Muhammad, D. Paroka, S. Rahman, M. R. Firmansyah, T. P. Putra // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 1052. — Is. 1. — Pp. 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/1052/1/012036.
10. The Specialist Committee on Esso Osaka. Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC. / The Specialist Committee on Esso Osaka // 23rd International Towing Tank Conference. Proceedings of the 23rd ITTC. — Vol. II. — Zürich: ITTC, 2002. — Pp. 581–617.
11. Yasukawa H. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions / H. Yasukawa, Y. Yoshimura // Journal of Marine Science and Technology. — 2015. — Vol. 20. — Is. 1. — Pp. 37–52.

REFERENCES

1. Dyda, A. A., K. N. Plyasheshnik and I. I. Pushkarev. “Developing a model of the dynamics of unmanned vessel on course based on the experimental data.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 12.4 (2020): 716–725. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-4-716-725.
2. Smolentsev, S. V. and D. V. Isakov. “A simple analytical model of ship movement.” *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S. O. Makarova* 11.1 (2019): 7–21. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-1-7-21.
3. Yudin, Yu. I. “Method of calculating hydrodynamic characteristics of a ship’s hull in shallow water conditions.” *Ekspluatatsiya morskogo transporta* 3(112) (2024): 27–38. DOI: 10.34046/aumsuomtl12/5.

4. Aoki, I., K. Kijima, Y. Furukawa and Y. Nakiri. "On the Prediction Method for Maneuverability of a Full Scale Ship." *Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers* 3 (2006): 157–165. DOI: 10.2534/jjasnaoe.3.157.
5. Kim, D. J. and Y. G. Kim. "Tune of hydrodynamic coefficients based on empirical formula by using manoeuvring performance indices of a ship." *Journal of the Society of Naval Architects of Korea* 57.6 (2020): 331–344. DOI: 10.3744/snak.2020.57.6.331.
6. Kijima, K., T. Katsuno, Y. Nakiri and Y. Furukawa. "On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition." *Journal of the society of naval architects of Japan* 1990.168 (1990): 141–148. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1990.168_141.
7. Li, M. "Simulation calculation and comprehensive assessment on ship maneuverabilities in wind, wave, current and shallow water." *Proceedings of MARSIM and ICSM'90, Tokyo* 403 (1990): 459–465.
8. Muhammad, A. H., T. P. Putra, et al. "Characteristics of Turning Circle and Zig-Zag Manoeuvres of An Indonesian Ferry Ship In Shallow Water." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1052.1 (2021): 012036. DOI: 10.1088/1757-899X/1052/1/012036.
9. The Specialist Committee on Esso Osaka. "Final Report and Recommendations to the 23rd ITTC." *23rd International Towing Tank Conference. Proceedings of the 23rd ITTC—Vol. II. Zürich: ITTC, 2002: 581–617.*
10. Yasukawa, H. and Y. Yoshimura. "Introduction of {MMG} standard method for ship maneuvering predictions." *Journal of Marine Science and Technology* 20.1 (2015): 37–52.
11. Yoshimura Y. "Mathematical Model for Manoeuvring Ship Motion (MMG Model)." *Workshop on Mathematical Models for Operations involving Ship-Ship Interaction. Tokyo, 2005: 1–6.*

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Юдин Юрий Иванович —
доктор технических наук, профессор
Государственный морской университет
им. адм. Ф. Ф. Ушакова
353925, Новороссийск, пр. Ленина, 93.
e-mail: udinui@rambler.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Yudin, Yuri I. —
Grand PhD in Technical Sciences, Professor
Admiral Ushakov Maritime
State University
353925, Novorossiysk, av. Lenina, 93.
e-mail: udinui@rambler.ru

*Статья поступила в редакцию 18 июля 2025 г.
Received: July 18, 2025*