

- Ю.И. Юдин, Г.Ю. Ищейкин // Эксплуатация морского транспорта. – 2018. – № 3. – С. 60-70.
8. Юдин, Ю.И. Моделирование изменений длины и натяжения троса в процессе выполнения буксирной операции / Ю.И. Юдин, Г.Ю. Ищейкин // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 4. Т.4. – С. 8-12.
 9. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., 2011a. Course stability of a ship towing system. *Ship Technol. Res. Schiffstechnik* 58 (1), 4–24.
 10. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., Maimun, A. Theoretical and experimental analysis of a slack towline motion on tug-towed ship during turning. *Ocean Engineering* 99 (2015). 95-106.
 11. Varyani, K.S., Barltrop, N., Clelland, D., Day, A.H., Pham, X., Van Essen, K., Doyle, R., Speller, L., 2007. Experimental investigation of the dynamics of a tug towing a disabled tanker in emergency salvage operation. In: *International Conference on Towing and Salvage Disabled Tankers*, pp. 117–125.
 12. Yasukawa, H., Hirata, N., Nakamura, N., Matsu-moto, Y., 2006. Simulations of slewing motion of a towed ship. *Jpn. Soc. Naval Archit. Ocean Eng.* 4, 137–146 (Japanese).
- References**
1. Patent. 2615846 Rossijskaya Federaciya, MPK V 63 N 25/04 (2006.01). Sposob upravleniya dvizheniem buksirnoj sistemy / YUdin YU.I., Vlasov A.V., Kajchenov A.V., Viskov A.YU.; zayavitel' i patentoobladatel' Murmanskij gos. tekhn. un-t. № 2015143563/15; zayavl. 12.10.2015; opubl. 11.04.2017.
 2. Spravochnik po teorii korablya: V 3 t. T. 3. Upravlyaemost' vodoizmeshchayushchih sudov. Gidrodinamika sudov s dinamicheskimi principami podderzhaniya / [A. SH. Afremov i dr.]; pod red. YA. I. Vojtkunskogo. – L.: Sudostroenie, 1985. – 542 s.
 3. YUdin E. B. Analiz samoproizvol'nogo ryskan'ya buksiruemyh sudov / E. B. YUdin A. G. Makovskij // *Sudostroenie*. – 1975. – № 4. – S. 15–17.
 4. YUdin E. B. K raschetu upravlyaemosti okeanskih buksirov / E. B. YUdin // *Sudostroenie*. – 1984. – № 7. S. 7–9.
 5. YUdin YU. I. Ocenka bezopasnosti buksirnoj operacii metodami matematicheskogo modelirovaniya: monografiya / YU. I. YUdin, S. V. Pashencev. – M.: Morkniga, 2015. – 144 s.
 6. YUdin YU.I. Identifikaciya matematicheskoy modeli sudna / YUdin YU.I., Pashencev S.V. – M.: Morkniga, 2015. – S.141.
 7. YUdin, YU. I. Uchet udlineniya buksirnogo trosa pri modelirovanii processa buksirovki / YU.I. YUdin, G.YU. Ishchejkin // *Ekspluatatsiya morskogo transporta*. – 2018. – № 3. – S. 60-70.
 8. YUdin, YU.I. Modelirovanie izmenenij dliny i natyazheniya trosa v processe vypolneniya buksirnoj operacii/ YU.I. YUdin, G.YU. Ishchejkin // *Morskie intellektual'nye tekhnologii*. – 2020. – № 4. Т.4. – S. 8-12.
 9. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., 2011a. Course stability of a ship towing system. *Ship Technol. Res. Schiffstechnik* 58 (1), 4–24.
 10. Fitriadhy, A., Yasukawa, H., Maimun, A. Theoretical and experimental analysis of a slack towline motion on tug-towed ship during turning. *Ocean Engineering* 99 (2015). 95-106.
 11. Varyani, K.S., Barltrop, N., Clelland, D., Day, A.H., Pham, X., Van Essen, K., Doyle, R., Speller, L., 2007. Experimental investigation of the dynamics of a tug towing a disabled tanker in emergency salvage operation. In: *International Conference on Towing and Salvage Disabled Tankers*, pp. 117–125.
 12. Yasukawa, H., Hirata, N., Nakamura, N., Matsu-moto, Y., 2006. Simulations of slewing motion of a towed ship. *Jpn. Soc. Naval Archit. Ocean Eng.* 4, 137–146 (Japanese).

УДК 517.958: 656.61.052.08

DOI: 10.34046/aumsuomt105/4

ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТАНКЕРА «NORDIC ARCTIC TANKER AT 19» С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ НАТУРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Ю.И. Юдин, доктор технических наук, профессор

Рассматриваемая в настоящей работе проблема идентификации математической модели судна легко погружается в общую проблему моделирования и идентификации моделей. С общих позиций основным содержанием науки можно признать формирование моделей того или иного типа на основе результатов наблюдений и исследования их поведения. Модели могут быть в разной степени формализованными, но все они обладают одним главным свойством – связывают наблюдения в некоторую общую картину. Решение задач построения математических моделей динамических систем по данным наблюдений за их поведением составляет предмет теории идентификации.

Ключевые слова: математическая модель, параметры модели, идентификация модели танкера.

IDENTIFICATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE TANKER "NORDIC ARCTIC TANKER AT 19" USING DATA FROM FIELD EXPERIMENTS

Yudin Yu.I.

The problem of identifying a mathematical model of a ship considered in this paper is easily immersed in the general problem of modeling and identifying models. From a general standpoint, the main content of science

can be recognized as the formation of models of one type or another based on the results of observations and the study of their behavior. Models can be formalized to varying degrees, but they all have one main property - they link observations into some general picture. Solving the problems of constructing mathematical models of dynamic systems based on observational data on their behavior is the subject of identification theory.

Keywords: mathematical model, model parameters, tanker model identification.

Введение.

Рассмотренные в многочисленных работах способы построения математических моделей движения судна на сегодняшний день являются общепризнанными и широко используемыми не только в практике научных исследований, но и при создании специализированных тренажеров по управлению судном в различных эксплуатационных ситуациях. Многолетнее использование различных математических моделей свидетельствует о том, что они с высокой степенью точности обеспечивают достаточно достоверное и качественное описание движения судна при любых заданных управлениях. Тем не менее, существует количественное расхождение между результатами выполненных симуляций движения судна и тщательно выполненных натуральных экспериментов, иногда это расхождение бывает довольно значительным. При этом известно, что симуляция движения судна при выполнении целого ряда маневров, в основном в процессе выполнения судовых ключевых операций требует высокой точности описания движения судна.

Многолетняя практика использования математических моделей судна в научных исследованиях сформировала определенный подход к технологии их разработки, т.е. математические модели получают на основе теоретических исследований и модельных экспериментов в опытовых бассейнах и т.п. Это порождает необходимость идентификации базовой модели с использованием данных натуральных экспериментов, например, выполняемых при проведении ходовых испытаний головных судов серии. Подстройка результатов симуляций движения судна с использованием базового варианта его математической модели под натуральный эксперимент сводится к решению задачи идентификации, которая понимается как способ восстановления или уточнения математической модели судна по результатам измерений его кинематических параметров движения, полученным в процессе натурального эксперимента [1], [2], [4].

В данном случае под идентификацией в широком смысле подразумевается способ нахождения или уточнения как структуры математической модели, так и ее параметров - структурная идентификация. Идентификация в узком смысле означает нахождение или уточнение параметров математической модели при заданной ее структуре, т.е. параметрическая идентификация.

Математическая модель движения танкера

Производя выбор математической модели, остановимся на модели, разработанной японскими учеными и исследованной в целом ряде их научных работ, например, [9], [11], [12], [13] из которых следует, что данная модель хорошо проявляет себя в различных задачах описания движения судов. Результаты симуляций с использованием данной модели дают достаточно близкие значения основных маневренных элементов, полученных в ходе натуральных испытаний [11], [12], [13]. Общий вид этой модели выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} m_x \left(\frac{dv}{dt} \cos \beta - v \frac{d\beta}{dt} \sin \beta \right) + m_y v \omega \sin \beta &= X; \\ -m_y \left(\frac{dv}{dt} \sin \beta + v \frac{d\beta}{dt} \cos \beta \right) + m_x v \omega \cos \beta &= Y; \\ I_z \frac{d\omega}{dt} - (m_y - m_x) v^2 \sin \beta \cos \beta &= M_z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

т.е. он представляет собой три дифференциальных уравнения первого порядка, описывающих изменение линейной скорости v , угла дрейфа β и угловой скорости ω судна во времени. В представленные уравнения входят: X , Y , M_z – суммы продольных, поперечных составляющих сил, действующих на судно и сумма моментов поперечных составляющих сил относительно вертикальной оси z подвижной системы координат xGy (рисунок 1), связанной с судном, соответственно; $m_x = m + \lambda_{11}$ (m – масса судна с учетом присоединенной масс λ_{11} при его продольном движении), $m_y = m + \lambda_{22}$ (λ_{22} – присоединенная масса судна при его поперечном движении), $I_z = I_z + \lambda_{66}$ (I_z – момент инерции массы судна с учетом присоединенного момента инерции λ_{66} при его вращении относительно вертикальной оси z).

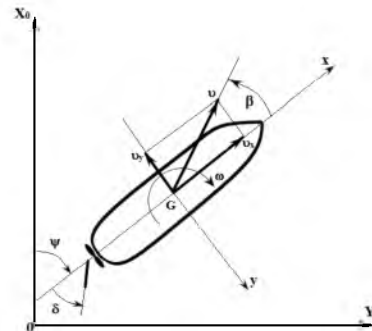


Рисунок 1 – Координатные системы

Расчетный вид модель обретает после вычисления гидродинамических составляющих усилий и момента, действующих на движущееся

судно. Разрешение системы уравнений (1) относительно производных по времени t приводит ее к каноническому виду, используемому для выполнения симуляций движения судна в выбранной с этой целью программной среде:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \frac{1}{m_x}(X - m_y v \omega \sin \beta) \\ \frac{d\beta}{dt} &= \frac{1}{m_y}(Y - m_x v \omega \cos \beta) \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{1}{I_{zz}}[M_z + (m_y - m_x)v^2 \sin \beta \cos \beta] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Входящие в уравнения (2) суммы составляющих сил X , Y и сумма моментов M_z представляют собой совокупность воздействий различной природы, в частности, гидродинамические, волновые и аэродинамические воздействия, усилия, порожденные действием элементов движительно-рулевого комплекса (ДРК).

$$\begin{aligned} X &= X_H + X_p + X_R + X_W \\ Y &= Y_H + Y_p + Y_R + Y_W \\ M_z &= M_H + M_p + M_R + M_W \end{aligned} \quad (3)$$

При этом усилия и моменты индексируются соответствующим их природе образом, а именно: «Н» - гидродинамические усилия на корпусе судна; «Р» - гидродинамические усилия, генерируемые движителем ДРК; «R» - усилия, образующиеся на руле; «W» - аэродинамические усилия.

При расчете гидродинамических усилий на корпусе судна можно пользоваться различными способами вычисления, что собственно и составляет базовую математическую модель судна. Модель предполагает разложение этих усилий по степеням двух кинематических параметров движения – угла дрейфа β и угловой скорости $\bar{\omega}$ в безразмерном виде ($\bar{\omega} = \omega \times L / v$). При этом оперируют не самими усилиями, а безразмерными коэффициентами, которые вводят как отношения самих усилий к скоростному напору, действующему на подводную часть корпуса судна, т.е.

Параметры $C_m^{\beta\bar{\omega}}$ и $C_m^{\bar{\omega}\bar{\omega}}$ находятся с помощью аппроксимационных зависимостей, полученных авторами работы [8]:

$$\begin{aligned} C_m^{\bar{\omega}\bar{\omega}} &= -\{0.093 - 0.3171[C_b(B/L)] - 5.6114[C_b(B/L)]^2 + 27.6824[C_b(B/L)]^3\} \\ &[C_b(B/L)] \leq 0.115 \\ C_m^{\beta\bar{\omega}} &= -\{8.134 - 213.491[C_b(B/L)] + 1829[C_b(B/L)]^2 - 5178[C_b(B/L)]^3\} \\ &[C_b(B/L)] > 0.115 \\ C_m^{\beta\bar{\omega}} &= -\{-0.0255 + 2.789[C_b(B/L)]\} \end{aligned} \quad (8)$$

Гидродинамические усилия

Как сказано выше, в качестве судна, выбранного для проведения симуляций, рассматривается танкер усиленного ледового класса проекта «Nordic Arctic Tanker AT 19». Его продольное по ДП сечение

$$\begin{aligned} C_{Hx} &= \frac{2X_H}{\rho v^2 L d} \\ C_{Hy} &= \frac{2Y_H}{\rho v^2 L d} \\ C_{Hm} &= \frac{2M_H}{\rho v^2 L^2 d} \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь: d – осадка судна; L – длина судна (обычно используется значение равное длине судна между перпендикулярами); ρ – массовая плотность воды [$=1.025 \text{ т/м}^3$].

В соответствие с моделью, усилия проецируются на продольную G_x лежащую в диаметральной плоскости (ДП) и поперечную G_y (перпендикулярную ДП) оси, а моменты – на вертикальную ось G_z , совпадающую с центром тяжести (ЦТ) судна G . Указанные оси составляют правостороннюю систему координат xGy (рисунок 1).

Представим безразмерные гидродинамические коэффициенты (4) в виде рядов, которые предложены для моделей морских транспортных судов японскими учеными [9].

$$\begin{aligned} C_{Hx} &= C_{x0} \\ C_{Hy} &= C_y^\beta \beta + C_y^{\bar{\omega}} \bar{\omega} + C_y^{\beta\bar{\omega}} \beta |\bar{\omega}| + C_y^{\bar{\omega}\bar{\omega}} \bar{\omega} |\bar{\omega}| + C_y^{\beta\bar{\omega}\bar{\omega}} \beta \bar{\omega} \\ C_{Hm} &= C_m^\beta \beta + C_m^{\bar{\omega}} \bar{\omega} + C_m^{\beta\bar{\omega}} \beta^2 \bar{\omega} + C_m^{\beta\bar{\omega}\bar{\omega}} \beta \bar{\omega}^2 + C_m^{\bar{\omega}\bar{\omega}\bar{\omega}} \bar{\omega} |\bar{\omega}| \\ C_{x0} &= \frac{2R_{x0}}{v_0^2 L d} \end{aligned} \quad (5)$$

-коэффициент сопротивления воды прямолинейному движению судна; R_{x0} – сопротивление движению судна при скорости v_0 .

Определение остальных параметров, входящих в эти разложения производится с помощью формул:

$$\begin{aligned} C_y^\beta &= \pi(d/L) + 1.4C_b(B/L); \\ C_y^{\bar{\omega}} &= (\pi/2)(d/L); \\ C_y^{\beta\bar{\omega}} &= -0.08 + 6.53(1 - C_b)(d/B); \\ C_y^{\bar{\omega}\bar{\omega}} &= -2.17(1 - C_b)(d/B); \\ C_y^{\beta\bar{\omega}\bar{\omega}} &= 0.44 - 1.73(1 - C_b)(d/B); \\ C_m^\beta &= 2(d/L); \\ C_m^{\bar{\omega}} &= -1.08(d/L)[1 - 2(d/L)]; \\ C_m^{\beta\bar{\omega}\bar{\omega}} &= 0.06 - 0.42C_b(d/B), \end{aligned} \quad (7)$$

где B – ширина судна, C_b – коэффициент полноты водоизмещения судна.

изображено на рисунках 2 (а, б), основные технические параметры, необходимые для расчетов представлены на рисунке 3. Отметим, что характерной особенностью танкера рассматриваемого проекта является оснащение его азиподом в качестве ДРК.

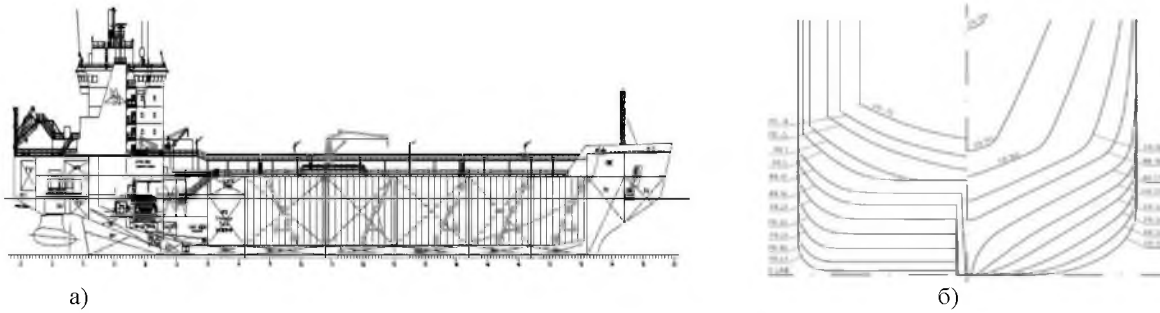


Рисунок 2 – Характеристики танкера «Nordic Arctic Tanker AT 19»:

а) продольный вид корпуса по ДП, б) проекция «корпус» теоретического чертежа

Main Dimensions	Class	Machinery
Length overall: 160.00 m	IMO: 8410000	4000 kW diesel engine (main)
Length between perpendiculars: 147.74 m	IMO: 8410000 (1 x 6.00 m)	3 diesel generators total output: 3 x 5,914 kW
Beam: 28.26 m	Flag of Registry: Russian Federation	1 diesel generator (total): 13,000 kW
Draught: 12.32 m	Equipment for Cargo	2 diesel generator, with fuel pump, generator 5.8 m
Overweight design: 18,800 t	Cargo capacity at 90% cargo tank filling: 0.81 year	Oil fuel tanks
Overweight design: 18,800 t	2 cargo pumps	Integrated automation system
Overweight design: 17,950 t	Howe handling crane (aircraft: 15.0 m)	Navigation system
Cargo capacity: 20,500 m³	Ship's Equipment	Emergency generator: 2 x 11,700 kW
Capacity: 20,500 m³	2 anti-aircraft searchlights, 4 searchlight	Emergency generator pump: 2 x 400 kW
Capacity: 20,500 m³	1 searchlight	Water/CO2/steam fire fighting system
Capacity: 20,500 m³	2 precision cranes	Accommodation
Capacity: 20,500 m³		Crew: 20 pers.
Capacity: 20,500 m³		Passenger: 2 pers.
Capacity: 20,500 m³		Pilot: 2 pers.

Рисунок 3 - Основные технические параметры танкера «Nordic Arctic Tanker AT 19»

Гидродинамические усилия на корпусе танкера

Формулы (7), (8) и данные рисунков 2 (а, б) и 3 в процессе расчета с помощью специально разработанной компьютерной программы дают значения указанных выше параметров модели (2), т.е. коэффициентов гидродинамических усилий, которые приводятся здесь в табличной форме (таблицы 1, 2). Расчеты параметров модели произведены для двух состояний загрузки судна – в грузу и в балласте. На рисунках 4 и 5 приведены результаты программных расчетов гидродинамических усилий на корпусе танкера в грузу (г) и балласте (б).

Таблица 1 – Параметры модели танкера в грузу

C_{x0}	0.025	C_m^β	0.134
C_y^β	0.361	C_m^{ω}	-0.057
C_y^{ω}	0.098	$C_m^{\beta\omega}$	-0.077
$C_y^{\beta\beta}$	0.446	$C_m^{\omega\omega}$	-0.023
$C_y^{\omega\omega}$	-0.041	$C_y^{\beta\beta\omega}$	-0.303
$C_y^{\beta\omega}$	0.339		

Таблица 2 – Параметры модели танкера в балласте

C_{x0}	0.024	C_m^β	0.094
C_y^β	0.329	C_m^{ω}	-0.046
C_y^{ω}	0.079	$C_m^{\beta\omega}$	0.044
$C_y^{\beta\beta}$	0.357	$C_m^{\omega\omega}$	-0.024
$C_y^{\omega\omega}$	-0.028	$C_y^{\beta\beta\omega}$	-0.323
$C_y^{\beta\omega}$	0.338		

Усилия, создаваемые рулевым органом

Усилия, создаваемые ДРК определяются

следующими зависимостями:

$$X_p = (1 - t_{pd}) n^2 D^4 K_T 0.5 \rho L d v_{pd}^2 \cos \delta \quad (9)$$

$$Y_p = (1 - t_{pd}) n^2 D^4 K_T 0.5 \rho L d v_{pd}^2 \sin \delta \quad (10)$$

$$M_p = x_{pd} (1 - t_{pd}) n^2 D^4 K_T 0.5 \rho L d v_{pd}^2 \sin \delta \quad (11)$$

в которые входят: t_{pd} – коэффициент засасывания [= -0.28C_b + 0.45]; n – обороты гребного винта; D – диаметр винта; K_T – коэффициент упора винта; v_{pd} – скорость в районе расположения ДРК; δ - угол перекладки ДРК; x_{pd} – абсцисса оси вращения привода ДРК.

Коэффициент упора определяется зависимостью

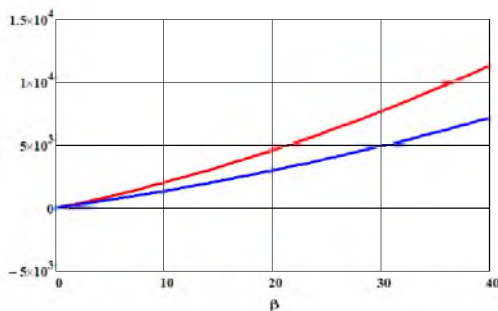


Рисунок 4 – Поперечные составляющие гидродинамической силы на корпусе танкера в грузу (г) и в балласте (б)

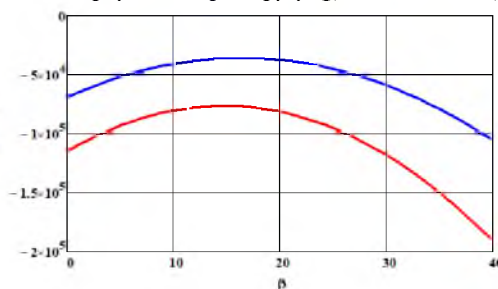


Рисунок 5 – Моменты поперечной составляющей гидродинамической силы на корпусе танкера в грузу (г) и в балласте (б).

$$K_T = C_0 + C_1 J + C_2 J^2 \quad (12)$$

Значения коэффициентов в выражении (12) получено с использованием полиномов, представленных в [3] для гребных винтов серии М4-65, так как азипод танкера оборудован гребным винтом данной серии. Зависимость K_T (J) показана на рисунке 6.

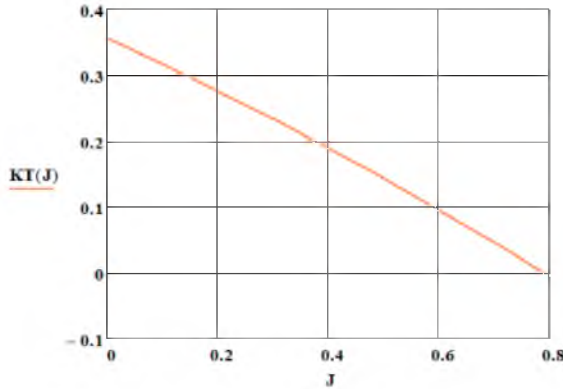


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента упора гребного винта азипода танкера от относительной поступи.

В аналитическом виде она выглядит таким образом:

$$K_T(J) = 0.3566 - 0.3828J - 0.0857J^2$$

Аэродинамические усилия на корпусе танкера

Аэродинамические усилия на корпусе танкера рассчитываются с использованием результатов модельных экспериментов, выполненных Ишервудом [10] с учётом постоянного изменения значений курсового угла кажущегося ветра q_R в процессе выполнения танкером определенного маневра. Составляющие аэродинамической нагрузки и аэродинамический момент определяются по формулам:

$$\begin{aligned} X_W &= C_{Wx} \cdot 0.5 \rho_a v_R^2 S_m \\ Y_W &= C_{Wy} \cdot 0.5 \rho_a v_R^2 S_{dp} \\ M_W &= C_{Wm} \cdot 0.5 \rho_a v_R^2 S_{dp} L \end{aligned} \quad (13)$$

где C_{Wx} , C_{Wy} , C_{Wm} – аэродинамические коэффициенты; ρ_a – массовая плотность воздуха [$=1.226 \text{ кг/м}^3$]; v_R – скорость кажущегося ветра; S_{dp} – площадь проекции надводной части корпуса на ДП; S_m – площадь проекции надводной части корпуса на плоскость мидель шпангоута.

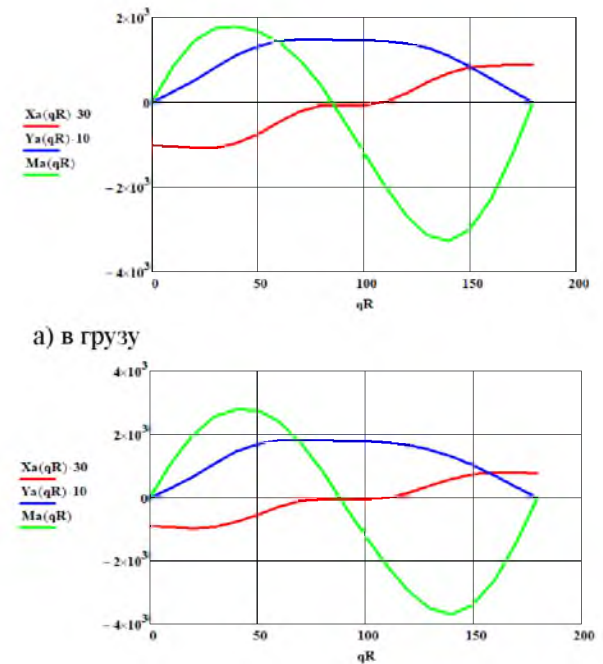
В формулах (13) значения аэродинамических коэффициентов C_{Wx} , C_{Wy} , C_{Wm} определяются в формате ряда Фурье [7]:

$$C_{Wx} = \sum_{k=0}^7 A(k) \times \cos(kq_R) \quad (14)$$

$$C_{Wy} = \sum_{k=0}^7 B(k) \times \sin(kq_R) \quad (15)$$

$$C_{Wm} = \sum_{k=0}^7 C(k) \times \sin(kq_R) \quad (16)$$

В графической форме результаты расчетов составляющих аэродинамической силы и ее момента представлены на рисунке 7 в зависимости от курсового угла кажущегося ветра.



а) в грузу

б) в балласте

Рисунок 7 – Составляющие аэродинамической силы на корпусе танкера и ее момент

Коррекция модели на основании опытных данных

С полученными значениями коэффициентов, представленных в таблицах 1, 2 проведены симуляции с целью определения адекватности модели (2). Для достижения поставленной цели осуществлены симуляции движения танкера в процессе выполнения стандартных маневров. При этом адекватность модели и реального судна (танкера) оценивалась по кинематическим характеристикам: координатам, линейным и угловым скоростям, ускорениям и т.д. Натурные эксперименты, не всегда достаточно качественные, проводятся в основном в виде стандартных маневренных испытаний, таких как «циркуляция» и «Зиг-Заг». В нашем случае маневренные испытания проводились на головном судне серии, по их результатам представлены полноценные отчетные материалы, которые можно использовать для коррекционных процедур идентифицируемой математической модели танкера.

Циркуляция

На рисунках 8 и 9 представлены результаты стандартного испытания «Циркуляция» для танкера в грузу с осадкой 9.4 м на ровном киле при повороте азипода на угол 35° на правый борт. На рисунке 8 показана траектория танкера, на рисунке 9 данные по координатам, скорости хода и угловой скорости поворота в процессе циркуляции.

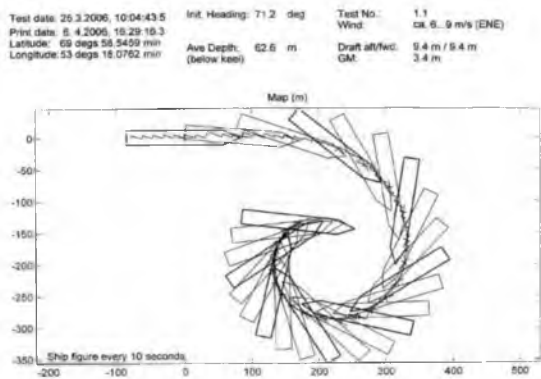


Рисунок 8 – Траектория танкера в грузу при циркуляции

Симуляция данного испытания была проведена с использованием разработанной модели танкера, ее результаты приведены в таблице 3 (в скобках представлены результаты, полученные в натуральных условиях). При этом было учтено, что в процессе натурных испытаний действовал ветер порядка 6...9 м/с направления ENE (рисунок 8), который учитывался в модели при выполнении симуляций. Предварительный анализ полученных в процессе симуляции данных свидетель-

ствует о том, что модель достаточно хорошо отражает поведение танкера в маневренном и эволюционном периодах циркуляции. Но это отражение не буквальное, чего мы и не можем требовать от модели.

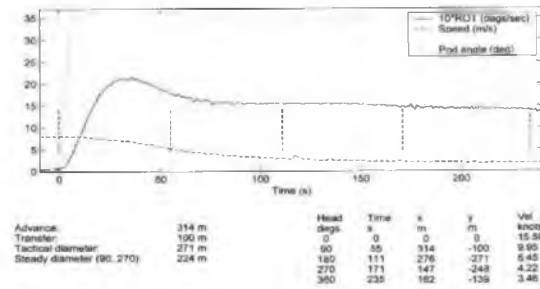


Рисунок 9 – Изменение во времени кинематических параметров движения танкера в процессе циркуляции

Можно добиться буквального совпадения, но сделав это для одного вида испытаний, мы не получим такого совпадения в другом виде испытаний. Поэтому обычно добиваются такого совпадения в среднем, а не в каждом виде испытаний. На примере циркуляции можно продемонстрировать возможности коррекции модели или ее адаптации с помощью натуральных данных.

Таблица 3 – Результаты симуляции движения танкера на циркуляции с использованием базовой модели, в скобках данные натурального эксперимента

$\Delta\psi$	0°	$+90^\circ$	$+180^\circ$	$+270^\circ$	$+360^\circ$
t, с	0	57 (55)	106 (111)	154 (171)	203 (235)
ψ°	71	161	251	341	71
X_0 , м	0	339	092	-181	065
Y_0 , м	0	-205	481	-238	040
v , м/с	8.0 (7.97)	6.33 (5.11)	6.25 (2.80)	6.24 (2.17)	6.20 (1.78)
β°	0	26.6 (29.3)	26.5 (31.4)	26.6 (31.4)	26.5 (34.9)
ω , %/с	0	1.86 (1.82)	1.85 (1.59)	1.85 (1.44)	1.85 (1.41)

Для этого следует выяснить, какие параметры модели и как изменять, чтобы добиться лучшего соответствия с опытными данными. Введем понятие коэффициентов влияния параметров модели на кинематические характеристики движения судна (танкера). Изменяя поочередно все параметры модели, например, на 10%, проследим, в какой мере (в %) изменяются интересующие нас кинематические параметры движения танкера [тактический диаметр (D_t); угловая скорость (ω_c), угол дрейфа (β_c), линейная скорость (v_c) в период установившейся циркуляции; момент времени t_{90} , когда исходное значение курса меняется на 90°]. Только потом, используя результаты указанных расчетов, мы сможем судить о тенденции изменения параметров модели, используя их для достижения максимально возможного совпадения результатов симуляций с реальной кинематикой судна в процессе движения. Используем для этого программу, которая специально создана нами и встроена в технологическую программную цепочку моделирования.

Проведем расчет коэффициентов влияния для случая с циркуляцией, результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Изменения кинематических параметров движения танкера вариацией гидродинамических коэффициентов

ΔC	=	D_t , м	ω_c , %/с	β_c°	v_c , м/с	t_{90} , с
C_y^{ω}	+10%	+2.1%	-1.7%	6.0%	+1.6%	-
C_y^β		+1.5	-1.2	-	-	-
$C_y^{\omega\omega}$		-	-	-	-	-
$C_y^{\beta\omega}$		-	-	-	-	-
$C_y^{\beta\beta}$		-3.3	-	-	-	-
C_m^ω		-4.0	+5.6	+2.0	+1.6	-4.5
C_m^β		+5.5	-6.5	-	-	+6.3
$C_m^{\omega\omega}$		-	-	-	-	-
$C_m^{\beta\omega\omega}$		-	-	-	-	-
$C_m^{\beta\beta\omega}$		-	-	-	-	-
C_{x0}		-1.8	-	-	-	-
Базовые значения		331	1.08	26.6	6.2	57

В левом столбце таблицы перечислены все параметры модели. Именно их поочередно изменяют по модулю на 10% и каждый раз вычисляют пять кинематических параметров движения танкера, которые расположены в столбцах 2 – 5 таблицы 4. Если приращения соответствующего значения менее 1%, то ячейки таблицы 4 не заполняются и снабжаются прочерком. В заполненных ячейках таблицы 4 указывается процент приращения рассматриваемых кинематических параметров движения танкера с соответствующим знаком. В последней строке таблицы 4 приведены базовые значения кинематических параметров движения, для которых определена степень влияния параметров модели.

Предварительная оценка данных, представленных в таблице 4 говорит о том, что влияние параметров модели достаточно ограничено. Ряд параметров на выбранные характеристики движения влияют очень слабо, но это не значит, что в иных маневрах их влияние не окажется существенным. Определить это можно только проведя соответствующую симуляцию конкретного маневра.

С другой стороны, есть параметры, которые влияют на целый ряд кинематических параметров движения танкера. Так, коэффициент C_m° ощутимо влияет почти на все рассматриваемые кинематические параметры движения танкера, при этом влияние разнонаправлено. Диаметр циркуляции убывает, угловая скорость поворота и угол дрейфа растут, время поворота на 90° уменьшается. Похожее влияние обнаруживает и коэффициент C_y° . В таблице 5 приведены кинематические характеристики при изменении параметра модели C_m° на 30% (последовательно трехкратное изменение на 10%).

Видно существенное изменение кинематических параметров. Это говорит о том, что подобным образом можно корректировать модель до удовлетворительного совпадения рассматриваемых параметров при выполнении симуляций с аналогичными параметрами, полученных опытным путем.

Таблица 5 – Изменения кинематических параметров движения танкера при изменении параметра модели ΔC_m° на 33%

ΔC_m°	=	290	1.29	27.9	6.51	50
33%		(-12%)	(19%)	(5%)	(5%)	(-12.5%)

Данные таблицы 4 говорят нам о том, что коэффициенты модели оказывают незначительное влияние на некоторые кинематические параметры. Это относится в первую очередь к диаметру циркуляции D_c . Однако именно эта харак-

теристика недостаточно адекватна натуре. Имеется еще один способ влиять на этот кинематический параметр. По существу, этот способ связан не с самим корпусом судна, а с его ДРК. Если это обычный руль, то расчет сил, возникающих на пере руля за корпусом судна, в достаточной мере разработаны. Но у танкера нет привычного руля, а в качестве ДРК используется азипод. Для этого типа движителя расчет соответствующих сил не проработан в такой же мере, как для руля. Эта проблема рассмотрена в статье автора [14]. В данном случае покажем, насколько изменение усилий на азипode влияет на кинематические параметры движения в процессе циркуляции. Работая с обычным рулем, мы вводим в дифференциальные уравнения движения два усилия: продольную тормозящую силу X_R , возникающую на руле при выходе его из ДП, и поперечную силу Y_R , вызывающую собственно поворот судна. Эта последняя сила после умножения на плечо, переходит в уравнение вращения судна. Расчет этих сил для азипода не столь прост. Самый простой подход состоит в следующем. Рассчитывается тяга гребного винта азипода T_e , исходя из прикладываемой мощности и скорости хода. Эта тяга проецируется на продольную и поперечную оси, связанные с судном и проекции умножаются на условные коэффициенты C_{pdx} и C_{pdy} :

$$\begin{aligned} X_{pd} &= T_e \cos(\delta) C_{pdx}; \\ Y_{pd} &= T_e \sin(\delta) C_{pdy} \end{aligned} \quad (17)$$

где δ – угол перекладки азипода относительно ДП. Коэффициент C_{pdx} имеет значение, не превышающее единицу, т.к. это означает появление движущей силы в направлении ДП. Подбором коэффициентов C_{pdx} и C_{pdy} мы можем воздействовать на поведение модели и добиваться большей ее адекватности натурным результатам.

В качестве примера в таблице 6 приведены результаты изменения кинематических характеристик, при заданных значениях коэффициентов $C_{pdx} = 0.8$ и $C_{pdy} = 1.3$.

Таблица 6 – Изменение кинематических параметров движения танкера при заданных значениях коэффициентов усилий на азипode

Базовые значения	331	1.08	26.6	6.2	57
$C_{pdx} = 0.8$ $C_{pdy} = 1.3$	271 (-18%)	1.29 (19%)	32.7 (23%)	6.3 (2%)	46 (-20%)
Данные натурального эксперимента	271	1.48	31.2	2.8	55

Видим существенное влияние, в среднем на 20%, практически на все характеристики, кроме скорости хода. В принципе нам не обязательно добиваться полного совпадения значений

кинематических параметров, так как приемлемой погрешностью в расчетах теории судна является погрешность не более 2%.

Зигзаг 10/10

Кинематические параметры движения танкера в процессе выполнения циркуляции могут служить характеристиками поворотливости танкера, но устойчивость движения танкера заданным курсом не может быть оценена характеристиками поворотливости. Поэтому уместно провести параметрическую идентификацию используя данные других натуральных экспериментов, например, данные выполнения маневра «Зиг-Заг». Ряд маневров «Зиг-Заг» были выполнены при проведении ходовых испытаний головного судна серии. Из них мы выберем «Зиг-Заг» - 10/10, что означает симметричную переключку азипода на 10° левого и 10° правого борта.

На рисунках 10-12 представлены результаты маневра «Зиг-Заг» - 10/10 для танкера в балласте с средней осадкой $d = 7.25$ м, полученные в процессе ходовых испытаний головного судна серии.

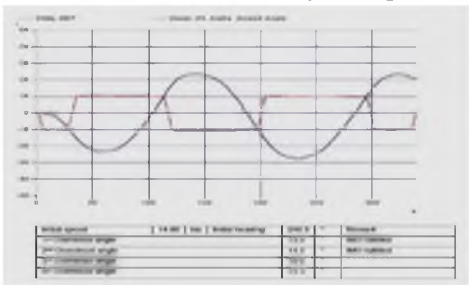


Рисунок 10 – Угол переключки азипода и курс танкера в процессе испытаний «Зиг-Заг» - 10/10

В этом испытании фиксируются моменты времени и величины трех первых зарыскиваний. Зарыскивания приведены в нижней таблице, по-

Таблица 7 – Влияние гидродинамических коэффициентов модели танкера на параметры маневра «Зиг-Заг» - 10/10

$\Delta C = +10\%$	t_1, c	$\Delta\psi_1^\circ$	t_2, c	$\Delta\psi_2^\circ$	t_3, c	$\Delta\psi_3^\circ$	ω_{max}/c	β_{max}°	v_{cp} м/с
C_{y^ω}	–	-9	-2	-7	-2	-7	-2	-5	–
C_{y^β}	-4	-9	-3	-14	-2.5	-7	-3	-8	–
$C_{y^{\omega\omega}}$	–	–	–	–	–	–	–	–	–
$C_{y^{\beta\omega}}$	–	–	–	–	–	–	–	–	–
$C_{y^{\beta\beta}}$	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C_{m^ω}	–	-9	–	–	–	-7	-7	-3	–
C_{m^β}	–	+18	–	-14	–	+14	+7	+5	–
$C_{m^{\omega\omega}}$	–	–	-2	–	-2	–	–	–	–
$C_{m^{\beta\omega\omega}}$	–	–	–	+7	–	–	–	–	–
$C_{m^{\beta\beta\omega}}$	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C_{x0}	–	–	-3	-7	-2	–	–	–	-3
Базовые значения	70 (60)	11 (13)	177 (142)	13 (13)	285 (234)	14 (18)	0.97 (1.08)	7.5 (9.1)	6.8 (7.1)

Как и в случае с циркуляцией данные таблицы 7, демонстрируют возможность коррекции параметров модели с целью большей адекватности опытным данным. Будем давать параметрам модели поочередно приращение в 10% по мо-

казанной на рисунке 8, их время снимаем с графика того же рисунка приблизительно в моменты времени – $t_1 = 66$ с, $t_2 = 138$ с, $t_3 = 236$ с. На рисунках 10 и 11 показаны линейная скорость хода танкера и угловая скорость в процессе испытаний ($\omega_{max} = 65^\circ/\text{мин}$). Отметим, что скорость хода танкера в процессе выполнения маневра снижается с 7.5 м/с до 6.68 м/с за 350 с (время проведения маневра).

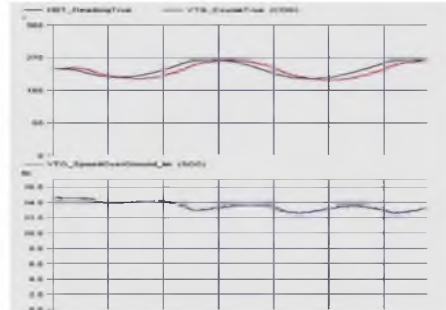


Рисунок 11 - Курс танкера и скорость его хода в процессе испытаний «Зиг-Заг» - 10/10

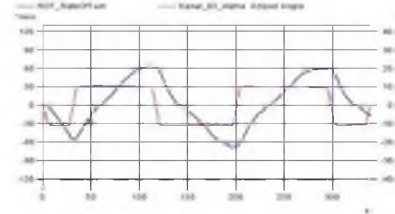


Рисунок 12 – Угол переключки азипода и угловая скорость (°/мин) танкера в процессе испытаний «Зиг-Заг» - 10/10

Результаты симуляция движения танкера при выполнении маневра «Зиг-Заг» - 10/10 приведены в таблице 7 в строке с именем «Базовые значения», там же в скобках приводятся данные натурального эксперимента. Как видно, данные симуляции отличаются от данных натуральных испытаний, причем в основном по значениям моментов времени зарыскиваний.

дулю, и проследим, как это повлияет на кинематические характеристики манёвра «Зиг-Заг» - 10/10. Если влияние мало (менее 2%), ставим прочерк в этой ячейке, в противном случае приводим процент изменения данной характеристики ма-

неврирования. В таблице 7 представлены результаты коррекции кинематических параметров маневра «Зиг-Заг» - 10/10 приращением гидродинамических коэффициентов модели на +10%.

Как и в случае с циркуляцией, из таблицы 7 следует, что ощутимо влияние только линейных членов дифференциальных уравнений, их коэффициенты расположены в 1-ой, 2-ой и в 6-ой, 7-ой содержательных строках таблицы. Особенно следует обратить внимание на то, что фактически нет влияния на моменты времени максимальных зарыскиваний. Но здесь, как и при циркуляции, возможно за счет коэффициентов эффективности

Таблица 8 – Изменение кинематических параметров движения танкера при заданных значениях коэффициентов усилий на азиподе

	t ₁ , с	Δψ ₁ °	t ₂ , с	Δψ ₂ °	t ₃ , с	Δψ ₃ °	ω _{max} °/с	β _{max} °	U _{ср} м/с
Базовые значения	70	11	177	13	285	14	0.97	7.5	6.8
C_{хг} = 0.8	60	12	149	15	231	15	1.16	9.5	6.4
C_{уг} = 1.3	-14%	9%	-16%	15%	-19%	7%	20%	27%	-6%
Данные натурального эксперимента	66	13	138	13	236	18	1.08	9.1	7.1

Данные таблицы 8 свидетельствуют о значимости корректного моделирования работы ДРК танкера для получения достоверных результатов симуляций движения танкера при выполнении им различных маневров, а также убедительно доказывают возможность получения адекватной математической модели с использованием данных натурального эксперимента.

Заключение.

Проведенные исследования доказывают возможность корректировки математической модели судна (в нашем случае танкера), чтобы она по основным кинематическим характеристикам маневрирования соответствовали натурному поведению судна. Таким образом, скорректированная математическая модель танкера может быть использована далее для всевозможных симуляций различных маневров, осуществляемых танкером в процессе выполнения ключевых судовых операций.

Литература.

1. Зильман Г. И. Идентификация гидродинамических коэффициентов уравнений управляемости по совокупности режимов движения / Г.И. Зильман // Гидродинамика техн. средств освоения океана. – Л., 1985. – С. 41–49. – (Тр. НТО им. акад. А. Н. Крылова).
2. Зильман, Г. И. Идентификация гидродинамических коэффициентов уравнений управляемости как задача многокритериальной оптимизации / Г.И. Зильман, А.А. Тер-Захарьян // Навигация и управление судном.– Л.: Транспорт, 1986. – Вып. 433. – С. 29–35.
3. Справочник по теории корабля. В 3 т. Т. 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители / под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 768 с.

азипода C_{рdx} и C_{рdy} (17) в большей мере повлиять на поведение модели. Например, если положить C_{рdx} = 0.8 и C_{рdy} = 1.3, и провести симуляцию маневра «Зиг-Заг» - 10/10, то получим результаты, приведенные в таблице 8. В ней же приведены процентные изменения кинематических характеристик маневрирования, которые гораздо больше тех, которые показаны в таблице 7, иногда их значение достигает величины в 27%. Этим мы добиемся адекватности модели по отношению к данным натурных испытаний.

4. Эйкхоф П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхоф. – М.: Мир, 1975. – 432 с.
5. Юдин Ю.И., Пашенцев С.В., Степахо Р. Г. Идентификация математической модели судна: монография / Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев, Р. Г. Степахо. – М.: МОРКНИГА, 2015. – 157 с.
6. Юдин Ю.И. Идентификация модели судна – важнейший элемент управления безопасностью мореплавания/Ю.И. Юдин, Р.Г. Степахо// Управление безопасностью мореплавания и подготовки морских специалистов: SSN, 2002: материалы 3-й междунар. конф. (Калининград, 27-29 ноября, 2002) БГАРФ, Калининград, с.274-283, 2003.
7. Юдин Ю.И. Расчёт аэродинамических усилий /Ю.И. Юдин, Г.Ю. Ищейкин//Морские интеллектуальные технологии/Marine intellectual technologies – 2019. - № 4 Т.3.– С. 24-32.
8. Юдин Ю. И. Теоретические основы безопасных способов маневрирования при выполнении точечной швартовки / Ю. И. Юдин, С. В. Пашенцев, Г. И. Марпок, А. Ю. Юдин. – Мурманск: Изво МГТУ, 2009. С. 152.
9. Inoue S., Hirano M., Kijima K. Hydrodynamic derivatives on ship manoeuvring. //Int. Shipbuilding Progress. 1981, V.28, N.321.
10. Isherwood, R.M., 1972. Wind resistance of merchant ships. RINA Trans. 115, 327-338.
11. K. Kijima, et. al., “On the Maneuvering Performance of a Ship with the Parameter of Loading Condition”, SNAJ, Nov. 1990.
12. K. Kijima, et. al., “Prediction Method of Ship Maneuverability in Deep and Shallow waters”, MARSIM & ICSM, June, 4-7, 1990.
13. L. Meijing and W. Xiuheng, “Simulation, Calculation and Comprehensive Assessment in Ship Ma-

neverabilities in Wind, Wave, Current and Shallow Water”, MARSIM & ICSM 90, of MARSIM & ICSM 90, Tokyo, 1990 Japan, pp.403-411.

14. Yudin Yu.I. Method of mathematical modeling of «Azipod» propulsive system (PS) performance/ Yu.I. Yudin, A.L. Boran-Keshishyan, S.N. Holichev, I.V. Glinskaia - Marine Intellectual Technologies № 3 (41) V. 1, GMTU, St. Peterburg – 2018, pp. 228-232.

References

1. Zil'man G. I. Identifikaciya gidrodinami-cheskih koeficientov uravnenij upravlyae-mosti po so-vokupnosti rezhimov dvizheniya / G.I. Zil'man // Gidrodinamika tekhn. sredstv osvoeniya okeana. – L., 1985. – S. 41–49. – (Tr. NTO im. akad. A. N. Krylova).
2. Zil'man, G. I. Identifikaciya gidrodinamiche-skih koeficientov uravnenij upravlyaemosti kak zadacha mnogokriterial'noj optimizacii / G.I. Zil'man, A.A. Ter-Zahar'yan // Navigaciya i upravlenie sudnom.– L.: Transport, 1986. – Vyp. 433. – S. 29–35.
3. Spravochnik po teorii korablya. V 3 t. T. 1. Gidromekhanika. Soprotivlenie dvizheniyu sudov. Sudovye dvizhiteli / pod red. YA. I. Vojtkun-skogo. – L.: Sudostroenie, 1985. – 768 s.
4. Ejkkhof P. Osnovy identifikacii sistem upravleniya / P. Ejkkhof. – M.: Mir, 1975. – 432 s.
5. YUdin YU.I., Pashencev S.V., Stepahno R. G. Identifikacii matematicheskoy modeli sudna: monografiya / YU. I. YUdin, S. V. Pashencev, R. G. Stepahno. – M.: MORKNIGA, 2015. – 157 s.
6. YUdin YU.I. Identifikaciya modeli sudna – vazhnejshij element upravleniya bezopasnost'yu

moreplavaniya/YU.I. YUdin, R.G. Stepahno// Upravlenie bezopasnost'yu moreplavaniya i podgotovki morskikh specialistov: SSN, 2002: materialy 3-j mezhdunar. konf. (Kaliningrad, 27-29 noyabrya, 2002) BGARF, Kaliningrad, s.274-283, 2003.

7. YUdin YU.I. Raschyot aerodinamicheskikh usilij /YU.I. YUdin, G.YU. Ishchejkin//Morskie intellektual'nye tekhnologii/Marine intellectual technologies – 2019. - № 4 T.3.– S. 24-32.
8. YUdin YU. I. Teoreticheskie osnovy bezopasnyh sposobov manevrirovaniya pri vypolnenii tochechnoj shvartovki / YU. I. YUdin, S. V. Pashencev, G. I. Martyuk, A. YU. YUdin. – Murmansk: Iz-vo MGTU, 2009. S. 152.
9. Inoue S., Hirano M., Kijima K. Hydrodynamic derivatives on ship manoeuvring. //Int. Shipbuilding Progress. 1981, V.28, N.321.
10. Isherwood, R.M., 1972. Wind resistance of merchant ships. RINA Trans. 115, 327-338.
11. K. Kijima, et. al., “On the Maneuvering Performance of a Ship with the Parameter of Loading Condition”, SNAJ, Nov. 1990.
12. K. Kijima, et. al., “Prediction Method of Ship Maneuverability in Deep and Shallow waters”, MARSIM & ICSM, June, 4-7, 1990.
13. L. Meijing and W. Xiuheng, “Simulation, Calculation and Comprehensive Assessment in Ship Maneuverabilities in Wind, Wave, Current and Shallow Water”, MARSIM & ICSM 90, of MARSIM & ICSM 90, Tokyo, 1990 Japan, pp.403-411.
14. Yudin Yu.I. Method of mathematical modeling of «Azipod» propulsive system (PS) performance/ Yu.I. Yudin, A.L. Boran-Keshishyan, S.N. Holichev, I.V. Glinskaia - Marine Intellectual Technologies № 3 (41) V. 1, GMTU, St. Peterburg – 2018, pp. 228-232.

УДК 656.61.052

DOI: 10.34046/aumsuomt105/5

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ТЕЧЕНИЯ НА ПРОЦЕСС ПОВОРОТА СУДНА

Н.В. Тришин, старший преподаватель

В статье рассмотрено влияние течения на процесс поворота судна. Получены аналитические зависимости параметров движения судна с учетом влияния течения.

Ключевые слова: управление судном, влияние течения, поворот судна, полюс поворота судна.

TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE CURRENT ON THE PROCESS OF TURNING THE VESSEL

N. V. Trishin

The article is dealt with current influence of ship's turning. The analytic relations for parameters of ship motion with current influence obtained.

Keywords: ship handling, current influence, ship's turning, pivot point of vessel.

Введение: При плавании судна на него действуют разнообразные внешние силы, которые могут иметь различное происхождение, например, гидродинамические, аэродинамические или механические. К ним относятся силы давления ветра, волнения моря, течения. Эти силы, обусловленные внешними источниками энергии, в большинстве случаев создают помехи

при маневрировании. Общность всех этих сил состоит в том, что, во-первых, внешние силы в каждый момент времени непредсказуемы, и, во-вторых, каждая из сил переменна во времени.

Среди внешних сил, всегда переменных во времени, можно выделить те, для которых зависимость от времени сравнительно невелика и ею можно пренебречь. Такие силы можно считать