

УДК656.61.052

**MATHEMATICAL MODELING OF AN ULTRA LARGE
CONTAINER VESSEL USING SEA TRIALS RESULTS****МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ
КОНТЕЙНЕРОВОЗА КЛАССА ULCS ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ИСПЫТАНИЙ**

O. Pipchenko¹, *PhD, associate professor*, **S. Kopanskiy²**, *SDPO*, **V. Shevchenko³**,
PhD, associate professor

А.Д. Пипченко¹, *к.т.н., доцент*, **С. В. Копанский²**, *SDPO*, **В. А. Шевченко³**,
к.т.н., доцент

¹*National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine*

²*MUTAVI, UAE*

³*National University "Odessa Maritime Academy", Ukraine*

¹*Національний університет «Одеська Морська Академія», Україна*

²*MUTAVI, ОАЭ*

³*Національний університет «Одеська Морська Академія», Україна*

ABSTRACT

As for today, modern container fleet keeps growing in size and capacity. For example, the container ship MSC Oscar with a length of 395 meters, a width of 59 meters and a draft of 16 meters, with a capacity of 19,224 TEU was launched in 2015. Despite the fact that the total number of navigational accidents (collisions, piles, groundings) has decreased in the last decade, emergency cases involving large-tonnage vessels are quite frequent. At the same time, according to the results of AGCS (Allianz Global Corporate & Specialty), the loss of a container ship with a cargo capacity of 19,000 TEU could cost as much as 1 billion US dollars. Obviously, with the increase in the size of ships, the problem of ensuring their navigation safety in narrow waters becomes even more critical. Mathematical modelling and simulation is a necessary process involved into design and operation of ships and port facilities. At the same time, physical modelling using scaled models is time consuming and expensive, which, if necessary, is performed at the final design stage. Proper mathematical modelling helps to find out limitations and possible problems or look for optimal solutions at early design stage as well as in the subsequent design process.

A manoeuvring model of an ultra large container vessel equipped with single screw fixed pitch propeller and semi-balanced spade rudder is represented in the paper. In order to check model's validity simulated data had to be compared with trial report data, which was obtained in ballast condition with significant trim. In such circumstances model coefficients cannot be calculated by known methods and have to be corrected as per trial data. The correction algorithm with a specifically developed objective function obtained as a result of this study are given in the paper.

Keywords: vessel maneuvering, mathematical model, ultra large container vessel, sea trials.

РЕФЕРАТ

На сьогоднішній день продовжує розвиватися тенденція укрупнення флоту. Так, наприклад, в 2015 році на воду був спущений контейнеровоз MSC Oscar, довжиною 395 метрів, шириною 59 м і осадкою 16 м, місткістю 19224 TEU. Незважаючи на те, що загальна кількість навігаційних аварій (зіткнень, навалів, посадок на міліну) продовжує зменшуватися в останні десятиліття, досить частими є аварійні випадки, в котрих задіяні великотоннажні судна. При цьому, за оцінками AGCS [1], втрата контейнеровоза вантажомісткістю 19000 TEU може обійтися в 1 мільярд доларів США. Природно, що зі збільшенням розмірів судів проблема забезпечення їх навігаційної безпеки в обмежених водах стає все більш гострою. На стадії проектування, як самих судів, так і судноплавних шляхів, акваторій портів і причальних споруд, до котрим вони підходять, необхідним етапом є моделювання виконуваних завдань. При цьому фізичне моделювання з використанням масштабованих моделей є трудомістким і дорогим процесом, котрий, при необхідності, виконується на завершальній стадії проектування. У той час як математичне моделювання є ефективним методом на попередній стадії.

Правильне математичне моделювання допомагає з'ясувати обмеження та можливі проблеми або шукати оптимальні рішення на ранньому етапі розробки, а також у наступному процесі проектування.

У статті представлена модель маневрування надвеликого контейнеровоза, обладнаного гвинтовим гвинтом фіксованого кроку і напів-балансирним кермом. Для перевірки достовірності розрахункові дані були зіставлені з результатами випробувань, які були отримані в баластному стані зі значним диферентом. В цьому випадку коефіцієнти моделі не можуть бути обчислені відомими методами і повинні бути від-коригувати відповідно до даних випробувань. Алгоритм корекції і спеціально розроблена цільова функція, отримані в результаті це-го дослідження, наведені в статті.

Ключові слова: аварійність суден, склад світового флоту, інциденти, втрати судів.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами

На сегодняшний день продолжает развиваться тенденция укрупнения флота. Так, например, в 2015 году на воду был спущен контейнеровоз MSCOscar, длиной 395 метров, шириной 59 м и осадкой 16 м, вместимостью 19224 TEU. Несмотря на то, что общее количество навигационных аварий (столкновений, навалов, посадок на мель) продолжает уменьшаться в последнее десятилетие, достаточно частыми являются аварийные случаи, в которых задействованы крупнотоннажные суда. При этом, по оценкам AGCS [1], потеря контейнеровоза грузоместимостью 19000 TEU может обойтись в 1 миллиард

долларов США Естественно, что с увеличением размеров судов проблема обеспечения их навигационной безопасности в стесненных водах становится все более острой. На стадии проектирования, как самих судов, так и судоходных путей, акваторий портов и причальных сооружений, к которым они подходят, необходимым этапом является моделирование выполняемых задач. При этом физическое моделирование с использованием масштабированных моделей является трудоемким и дорогостоящим процессом, который, при необходимости, выполняется на завершающей стадии проектирования. В то время как математическое моделирование является эффективным методом на предварительной стадии.

Анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы, и выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Моделированию маневрирования судна посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных авторов. Существуют как линейные модели, предусматривающие управление курсом при постоянной средней скорости, так и нелинейные модели, позволяющие просчитать динамику судна в широком диапазоне параметров движения.

В подавляющем большинстве случаев в литературе встречаются модели маневрирования в трех степенях свободы. В первом случае это система уравнений для продольной и поперечной составляющей скорости поступательного движения и скорости вращения относительно вертикальной оси [19,21,22,24,26,28, 29,30], во втором случае это система уравнений для скорости поступательного движения, угла дрейфа и скорости вращения относительно вертикальной оси[31, 32, 34].

С точки зрения моделирования маневрирования с учетом сил различной природы, таких как ветро-волновые нагрузки, течения, буксиры, подруливающие устройства, особенно в случае расчетов маневрирования на скоростях близких к нулю, целесообразно строить модель с разделением скоростей по привязанным к фиксированной точке судна осям.

Силы и моменты, действующие на судно, можно рассчитать на основе источников [19,21,22,24, 26-32, 34].

Однако в большинстве случаев использование обобщенных для ряда судов формул приводит к погрешностям в расчётах, все еще достаточно большим для оценки безопасности мореплавания по рассчитанной таким образом модели судна.

Поэтому рассчитав на предварительной стадии коэффициенты модели, далее следует их откорректировать по имеющимся экспериментальным данным.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Данное исследование направлено на разработку алгоритма уточнения модели динамики контейнеровоза класса ULSC на основе существующих методов по данным испытаний.

Изложение материала исследования с обоснованием полученных научных результатов

1. Модель маневрирования судна

Систему уравнений описывающих движение судна на плоскости представим, как:

$$\left. \begin{aligned} (m + m_x)\dot{u}_G - (m + m_y)v_G r_G &= X \\ (m + m_y)\dot{v}_G + (m + m_x)u_G r_G &= Y \\ (I_{zz} + J_{zz})\dot{r}_G &= N - x_G Y \end{aligned} \right\},$$

где m – водоизмещение судна; m_x, m_y – присоединенные массы, I_{kk}, I_{zz} – моменты инерции, J_{kk}, J_{zz} – присоединенные моменты инерции, u_G, v_G, p_G, r_G – продольная и поперечная составляющие поступательной скорости и угловые скорости относительно поперечной и вертикальной осей относительно центра тяжести судна соответственно; X, Y, K, N – гидродинамические силы и моменты, действующие на судно.

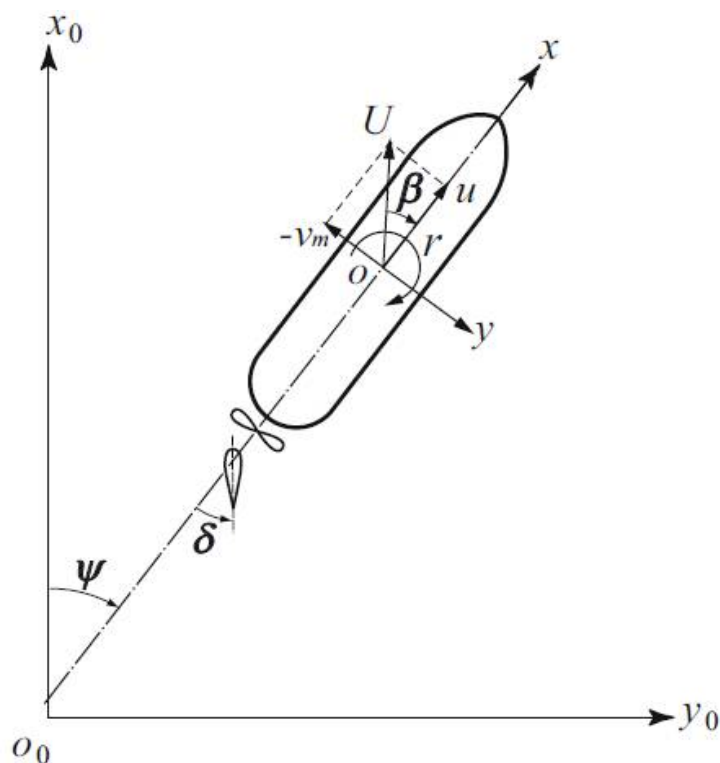


Рис. 1. Системы координат для моделирования движения судна

В развернутом виде гидродинамические силы и моменты представим, как:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_H + X_R + X_P \\ Y &= Y_H + Y_R + Y_P \\ N &= N_H + N_R + N_P \end{aligned} \right\},$$

где H – корпус; R – руль; P – винт; W – ветер; BT – носовое подруливающее устройство.

2. Силы и моменты, действующие на корпус

Силы и моменты, выражающие движение на плоскости, примем в форме, предложенной Йошимуро [28].

Силы и момент сопротивления воды (X_H , Y_H , N_H) совместно с силами инерции выражаются в виде системы:

$$\left. \begin{aligned} X_H + m_y v_g r_g &= \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \times \left\{ X'_0 + X'_{\beta\beta} \beta^2 + (X'_{\beta r} - m'_y) \beta r' + (X'_{rr} - x'_G m'_y) r'^2 + X'_{\beta\beta\beta\beta} \beta^4 \right\} \\ Y_H - m_x u_g r_g &= \left(\frac{\rho}{2} L d U^2 \right) \times \left\{ Y'_\beta \beta + (Y'_r - m'_x) r' + Y'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + Y'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + Y'_{\beta rr} \beta r'^2 + Y'_{rrr} r'^3 \right\} \\ N_H &= \left(\frac{\rho}{2} L^2 d U^2 \right) \times \left\{ N'_\beta \beta + N'_r r' + N'_{\beta\beta\beta} \beta^3 + N'_{\beta\beta r} \beta^2 r' + N'_{\beta rr} \beta r'^2 + N'_{rrr} r'^3 \right\} \end{aligned} \right\},$$

где ρ – плотность воды, β – угол дрейфа, положительный по направлению в левый борт; X_0 , $X_{\beta\beta}$, $X_{\beta\beta\beta\beta}$, X_{rr} , $X_{\beta r}$, Y_β , $Y_{\beta\beta\beta}$, Y_r , Y_{rrr} , $Y_{\beta\beta r}$, $Y_{\beta rr}$, N_β , $N_{\beta\beta\beta}$, N_r , N_{rrr} , $N_{\beta\beta r}$, $N_{\beta rr}$ – коэффициенты сил сопротивления.

Силу упора, создаваемую винтом, можно рассчитать по формуле:

$$\begin{aligned} X_P &= (1 - t_P) \cdot T; \\ T &= \rho \cdot n_P^2 \cdot D_P^4 \cdot K_T(J_P); \\ K_T(J_P) &= k_0 + k_1 \cdot J_P + k_2 \cdot J_P^2; \\ J_P &= \frac{u(1 - w_P)}{n_P D_P}, \end{aligned}$$

где T – упор винта, t_P – коэффициент уменьшения упора, n_P – обороты винта, D_P – диаметр винта, K_T – коэффициент упора, J_P – скольжение винта, w_P – коэффициент влияния корпуса.

Силы и момент, создаваемые рулем, определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} X_R &= -(1 - t_R) F_N \sin \delta \\ Y_R &= -(1 + a_H) F_N \cos \delta \\ N_R &= -(x_R + a_H x_H) F_N \cos \delta \end{aligned} \right\},$$

где F_N – нормальная сила, создаваемая на руле; t_R , a_H , x_H – коэффициенты отображающие гидродинамическое взаимодействие корпуса, винта и руля; x_R – расстояние от плоскости мидель-шпангоута до баллера:

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R U_R^2 f_a \sin a_R,$$

где A_R – площадь пера руля, U_R – скорость потока воды на пере руля, f_a – подъемный коэффициент, a_R – угол скоса потока воды на руле.

Коэффициенты уравнений, и могут быть определены согласно методикам приведенным в [19, 21, 24, 26-32, 34] либо могут взяты из базы данных для судна с пропорциональным размещением.

И в том и в другом случае необходима последующая адаптация модели под данные испытаний.

3. Моделирование маневрирования с исходными значениями коэффициентов

Типовыми маневрами при испытаниях судов являются циркуляция, зигзаг 10/10°, активное и пассивное торможение. Эти данные возьмём из отчета по испытаниям Maersk Sirac [25], 2015 года постройки, вместимостью 10 000 TEU. В таблице 1 приведены размерения данного судна.

Таблица 1. Maersk Sirac – сведения о судне

Параметр	Значение
Длина наибольшая, м	300
Длина между перпендикулярами, L , м	287
Ширина, B , м	48.2
Осадка (средняя / максимальная) в грузу, d , м	12.5/15.0
Осадка носом на испытаниях, м	4.02
Осадка кормой на испытаниях, м	10.16
Диаметр винта, D_P , м	9.7
Коэффициент полноты (в балласте), C_b	0.6044
Площадь смоченной поверхности, Ω , м ²	11656
Коэффициент плоскости мидель-шпангоута, C_M	0.9735
Площадь пера руля, A_R , м ²	78.95

Согласно данным отчета [25] обороты винта в процессе циркуляции изменяются с 83 об/мин до 54 об/мин. Таким образом, для корректного расчета параметров циркуляции целесообразно на первом этапе моделирования определить характеристики разгона и торможения судна, что отображено в работе [33].

Как видно из таблицы 1, испытания судна проводились для состояния в балласте с дифферентом равным 6.14 м и средней осадкой 7.09 м. Эксплуатационная осадка судна в среднем в два раза больше, а дифферент близок к нулю. В связи с этим расчет коэффициентов модели по эмпирическим формулам приводит к большим погрешностям.

На первом этапе уточнения модели важно определить по каким параметрам будет оцениваться точность полученных результатов и каким образом будет определяться целевая функция.

В данном случае, целевую функцию Z целесообразно разбить на динамическую Z_D и кинематическую Z_K составляющие. Для маневра «циркуляция», в данных испытаний, как правило, указывается скорость, курс и координаты судна, а также выдвиг и тактический диаметр циркуляции. Соответственно:

$$Z_D = w_1 \frac{\sum_{n=1}^N |U_{Tn} - U_{Sn}|}{N} + w_2 \frac{\sum_{n=1}^N |r_{Tn} - r_{Sn}|}{N};$$

$$Z_K = w_3 \left(\frac{\max(X_T) - \max(X_S)}{\max(X_T)} + \frac{\max(Y_T) - \max(Y_S)}{\max(Y_T)} \right) + w_4 \frac{\sum_{n=1}^N \Delta D}{N \cdot \max(X_T)};$$

$$\Delta D = \sqrt{(X_T - X_S)^2 + (Y_T - Y_S)^2},$$

где ΔD – погрешность позиции; w_i – весовой коэффициент; индекс T – данные испытаний; индекс S – данные расчетов; $\max(X_T)$ – позиция, характеризующая тактический диаметр циркуляции; $\max(Y_T)$ – позиция, характеризующая выдвиг.

В качестве отдельной составляющей целевой функции для маневра зигзаг, выделим погрешность определения 1-го и 2-го углов зарыскивания:

$$Z_Z = w_5 \left(\left| \frac{\Delta \psi_1^T - \Delta \psi_1^S}{\Delta \psi_1^T} \right| + \left| \frac{\Delta \psi_2^T - \Delta \psi_2^S}{\Delta \psi_2^T} \right| \right).$$

Так как погрешности дистанции, линейной и угловой скоростей имеют разные порядки, их необходимо приводить к одному порядку при помощи весовых коэффициентов. В данном случае $w = [1; 180 \cdot 60 / \pi; 2; 1; 0.2]$.

Отсюда, целевая функция будет определяться как

$$Z = Z_D + Z_K + Z_Z$$

Далее следует определить коэффициенты, подлежащие корректировке. В данном случае алгоритм будет варьировать 19 коэффициентов, входящих в уравнения сил сопротивления корпуса и сил, создаваемых пером руля:

$$X'_{\beta\beta}, X'_{\beta r}, X'_{rr}, X'_{\beta\beta\beta}, Y'_{\beta}, Y'_{r}, Y'_{\beta\beta\beta}, Y'_{\beta\beta r}, Y'_{\beta rr}, Y'_{rrr}, N'_{\beta}, N'_{r}, N'_{\beta\beta\beta}, N'_{\beta\beta r}, N'_{\beta rr}, N'_{rrr}, \varepsilon, \gamma_R, a_h$$

На рис.1 отображена блок-схема алгоритма корректировки коэффициентов модели движения судна. Как описано выше, первым этапом является корректировка модели ходкости. Начальные коэффициенты модели выбираются из советующей базы данных. Затем производится расчет по модели и сравнение с данными испытаний. Если точность модели не удовлетворяет заданным критериям, производится корректировка методом Нелдера-Мида. В результате, уточненные коэффициенты вносятся в базу данных.

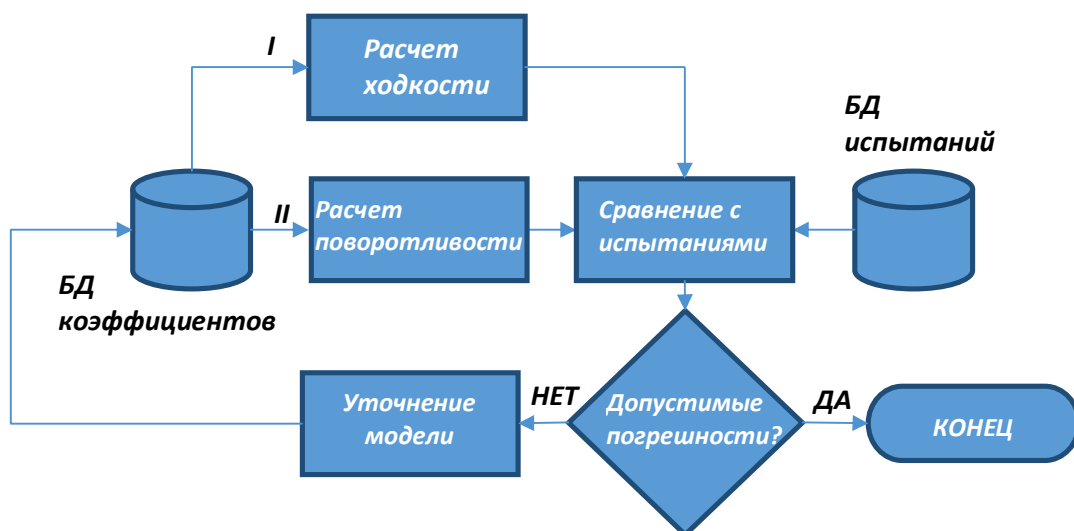


Рис. 2. Блок-схема алгоритма уточнения математической модели

На рис. 3-5 и в табл. 2 приведены результаты моделирования в первом приближении и после корректировки коэффициентов. Как видно, процедура корректировки позволяет существенно уменьшить погрешности моделирования.

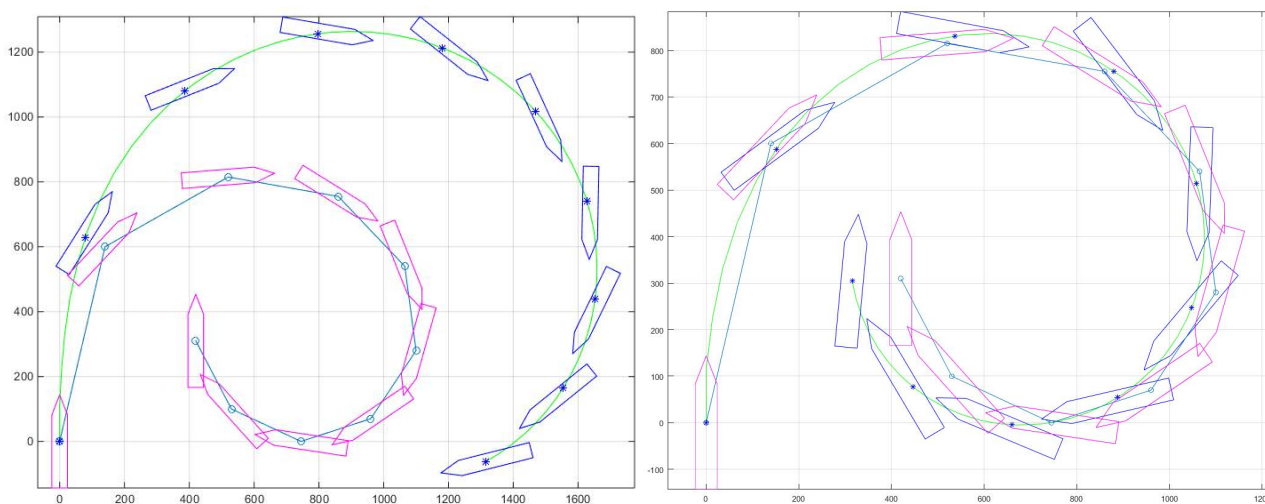


Рис. 3. Траектория циркуляции на правый борт.
Слева – до уточнения; справа – после уточнения; о – данные испытаний, *

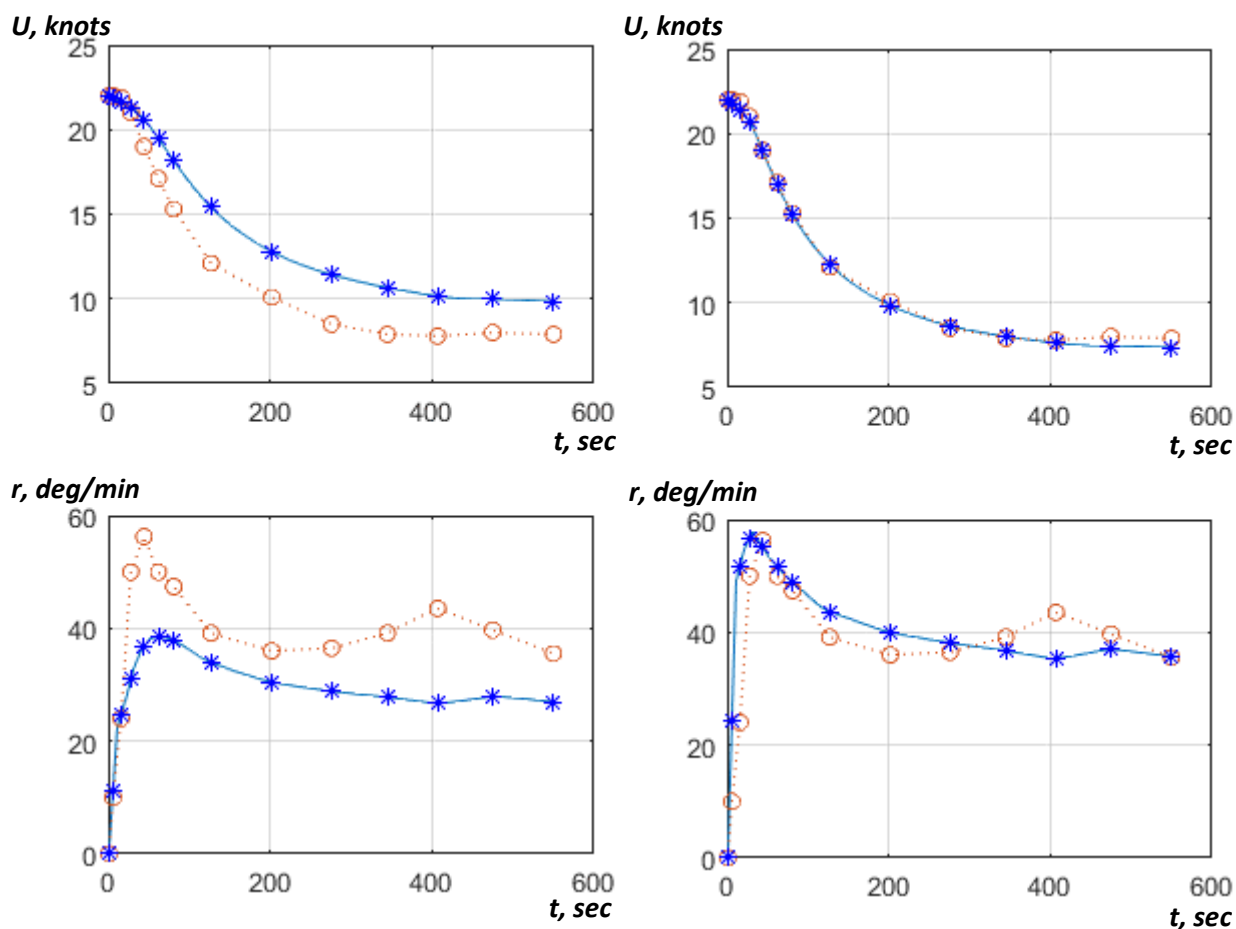


Рис. 4. Параметры движения при циркуляции на правый борт.

Слева – до уточнения; справа – после уточнения; о – данные испытаний, *

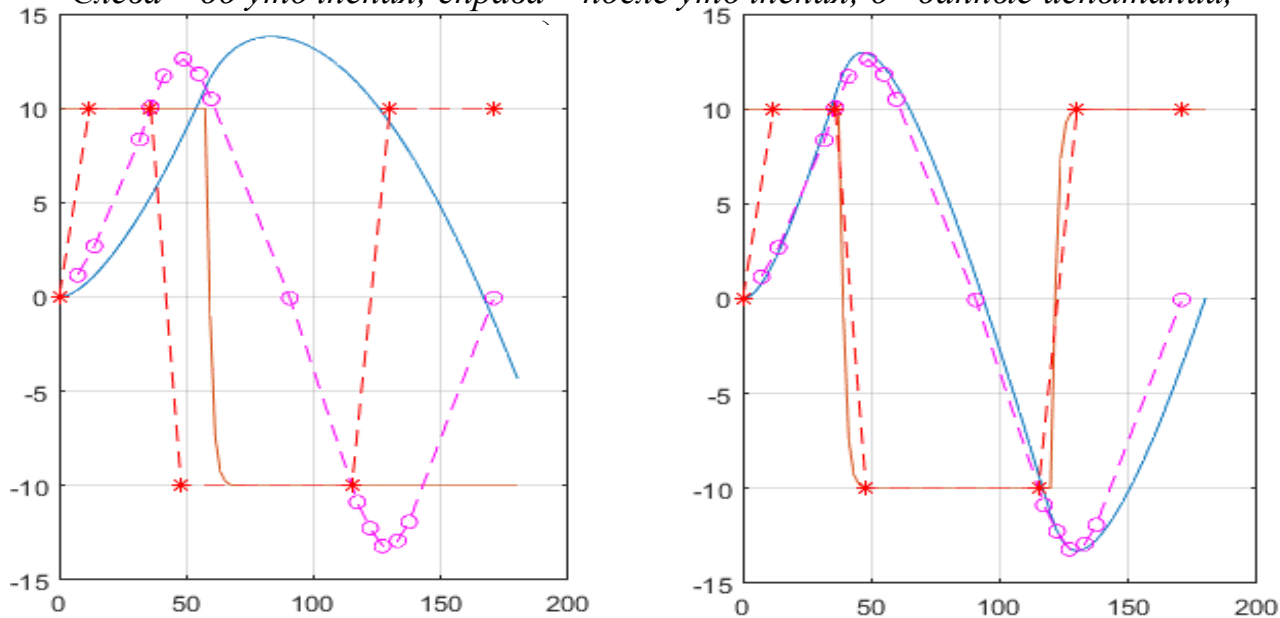


Рис. 5. Параметры одерживания: зигзаг 10/10.

Слева – до уточнения; справа – после уточнения;

о – данные испытаний; * – данные расчетов

Таблица 2. Результаты корректировки математической модели

Параметр	Испытания	До уточнения	После уточнения															
Выдвиг, м	830.9	1255	836															
Тактический диаметр циркуляции, м	1164.3	1630	1148.3															
1-й угол зарыскивания, °	2.5	3.8	3.0															
2-й угол зарыскивания, °	3.2	-	3.3															
СКО позиции	-	589.2	49.9															
СКО курса	-	28.5	10															
Коэффициенты до и после корректировки / разница %																		
$X'_{\beta\beta}$	$X'_{\beta r}$	X'_{rr}	$X'_{\beta\beta\beta\beta}$	Y'_{β}	Y'_r	$Y'_{\beta\beta\beta}$	$Y'_{\beta\beta r}$	$Y'_{\beta rr}$	Y'_{rrr}	N'_{β}	N'_r	$N'_{\beta\beta\beta}$	$N'_{\beta\beta r}$	$N'_{\beta rr}$	N'_{rrr}	ε	γ_R	a_h
-0.0626	-0.1149	-0.00068	0.4182	0.3099	0.1207	1.5816	0.6323	0.7173	0.0088	0.0179	-0.03025	0.2407	-0.6018	0.077	-0.03	0.902	0.350	0.3674
-0.2617	-0.1531	-0.00069	0.47811	0.1044	0.1795	2.7160	0.9423	1.3620	0.001	0.0087	-0.03	0.2259	-0.6445	0.109	-0.055	1.344	0.312	0.3422
318	33	2	14	66	49	72	49	90	89	52	4	6	7	41	79	49	11	7

Выводы и перспектива дальнейшей работы по данному направлению

В результате проведенного исследования были разработаны модель маневрирования контейнеровоза и алгоритм ее корректировки. Последний позволяет существенно уменьшить погрешности моделирования.

Полученная модель в свою очередь может быть использована в учебном процессе, технических расчетах, а также на навигационных симуляторах.

ЛИТЕРАТУРА

19. ABS Guide for Vessel Maneuverability, 2006
20. Allianz Global Corporate & Specialty. Safety and Shipping Review 2016. <http://www.agcs.allianz.com/>
21. Fossen T. I. Marine Control Systems. Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles / T. I. Fossen— Marine Cybernetics, Trondheim, Norway, 2002 – 570 p.
22. Ho-Young Lee. The Prediction of ship's manoeuvring performance In initial design stage / Ho-Young Lee, Sang-Sung Shin // Practical Design of Ships and Mobile Units. Elsevier Science, 1998. – 7 p.
23. IMO MSC 76/23, “Resolution MSC.137 (76), Standards for Ship Manoeuvrability,” Report of the Maritime Safety Committee on Its Seventy-Sixth Session-Annex 6, 2002.

24. Kijima, K. On a Prediction Method of Ship Manoeuvring Characteristics/Kijima, K., Tanaka, S. Furukawa, Y. and Hori, T. // Proc. of MARSIM-93, Vol.1, 1993. – pp.285-294.
25. MAERSK SIRAC – Sea Trial results. Hyundai Heavy Industries. 2015. – 15 p.
26. Perez T. Mathematical Ship Modeling for Control Applications. (Technical Report) / T. Perez, M. Blanke –DTU Technical University of Denmark, 2003. – 22 p.
27. The Manouvering Committee. Final Report and Recommendations to the 24th ITTC, 2005. – 62 p.
28. Yasukawa H. Introduction of MMG standard method for ship maneuvering predictions / Yasukawa H., Yoshimura Y. // Journal of Marine Science&Technology (2015)20, 2015 – pp. 37–52.
29. Yoshimura Y. Hydrodynamic database and manoeuvring prediction method with medium high-speed merchant ships and fishing vessels. / Yoshimura Y., Masumoto Y. // International MARSIM Conference. 2012 – pp.494–503.
30. Вагущенко Л.Л. Системы автоматического управления движением судна. 2-е изд., перераб. и доп. / Л.Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал– Одесса: Латстар, 2002. – 310 с.
31. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник / А. Д. Гофман– Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.
32. Першиц Р. Я. Управляемость и управление судном. – Л.: Судостроение, 1983, 272 с.
33. Пипченко А. Д. Уточнение математической модели ходкости контейнеровоза класса ULCS по результатам испытаний / Пипченко А. Д., Копанский С. В., Шевченко В. А. // Судовождение: Сб. научн. трудов./ ОНМА, Вып. 27. – Одесса: «ИздатИнформ», 2017 - С. 169-176.
34. Справочник по теории корабля. В трех томах / [под ред. Я.И. Войткунского] – Л.: Судостроение, 1985.