

**Заключение.**

Представленный и описанный в настоящей статье инновационный способ управления движением судна в процессе выполнения швартовочной операции к борту подвижного объекта на примере швартовки к судну, стоящему на якоре может быть использован при выполнении швартовочных операций к судну, лежащему в дрейфе, а также находящемуся на ходу. Кроме того, он может быть использован и для управления движением судна при осуществлении им сложных маневров в процессе выполнения ряда ключевых судовых операций.

Однако, чтобы проверить работоспособность и эффективность предлагаемого инновационного способа управления судном, требуется решить ряд конкретных задач, над решением которых работают авторы настоящей статьи.

**Литература**

1. Пат. 2475410 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/00 (2006.01). Способ управления судном при выполнении им швартовочной операции к борту судна партнера / Ю.И. Юдин, С.Н. Холичев, С.О. Петров; заявитель и патентообладатель Мурманский гос. техн. ун-т.- № 2011137696/11; заявл. 13.09.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5. - 7 с. : ил.
2. Пат. 2509031 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/52 (2006.01). Способ управления судном при выполнении им швартовочной операции к борту судна партнера, стоящего на якоре / Юдин Ю.И., Иванов В.В., Холичев С.Н., Петров С.О.; заявитель и патентообладатель Мурман. госуд. техн. ун-т.- № 2012143196/11; заявл. 09.10.2012; опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7. - 9 с. : ил.
3. Пашенцев, С.В. Параметрическая идентификация маневренных характеристик по результатам испытаний типа "Зигзаг" / Пашенцев С.В. // Мурманск. Вестник МГТУ. - 2010. - том 13. - №4. - С.11.

4. Юдин, Ю.И. Использование принципа максимума для параметрической идентификации математической модели судна/ Ю.И. Юдин, С.В. Пашенцев. -М.: Наука и техника транспорта, №2, 2006, С.100-107.
5. Юдин Ю.И., Кондратьев С.И., Боран-Кешишьян А.Л., Холичев С.Н., Глинская И.В. Mathematical modeling of tanker broadside motion controlled on the basis of deviations from the aimed// LINE Морские интеллектуальные технологии.- 2018.- № 1-3 (41).- С. 228-232

**REFERENCES**

1. Pat. 2475410 Rossijskaya Federaciya, MPK V 63 N 25/00 (2006.01). Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoj operacii k bortu sudna partnera / YUdin YU.I., Holichev S.N., Petrov S.O. ; zayavitel' i patentoobladatel' Murmanskij gos. tekhn. un-t.- № 2011137696/11 ; zayavl. 13.09.2011 ; opubl. 20.02.2013, Byul. № 5. - 7 s. : il.
2. Pat. 2509031 Rossijskaya Federaciya, MPK V 63 N 25/52 (2006.01). Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoj operacii k bortu sudna partnera, stoyashchego na yakore / YUdin YU.I., Ivanov V.V., Holichev S.N., Petrov S.O.; zayavitel' i patentoobladatel' Murman. gosud. tekhn. un-t.- № 2012143196/11 ; zayavl. 09.10.2012 ; opubl. 10.03.2014, Byul. № 7. - 9 s. : il.
3. Pashencev, S.V. Parametricheskaya identifikaciya manevrennyh harakteristik po rezul'tatam ispytaniy tipa "Zigzag" / Pashencev S.V. - Murmansk. Vestnik MGTU, 2010, tom 13, №4, s.11.
4. Yudin, YU.I. Ispol'zovanie principa maksimuma dlya parametricheskoj identifikacii matematicheskoy modeli sudna/ YU.I. YUdin, Pashencev S.V. -M.: Nauka i tekhnika transporta, №2, 2006, S.100-107.
5. YUdin YU.I., Kondrat'ev S.I., Boran-Keshish'yan A.L., Holichev S.N., Glinskaya I.V. Mathematical modeling of tanker broadside motion controlled on the basis of deviations from the aimed// line Morskije intellektual'nye tekhnologii. 2018. № 1-3 (41). S. 228-232..

УДК656.052.4:656.052.7

DOI: 10.34046/aumsuomt92/15

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КОНТЕЙНЕРОВОЗА ПРОЕКТА ARCTIC CONTAINER SHIP ACS 650 ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЭТАПОВ ШВАРТОВКИ

*Ю.И. Юдин, доктор технических наук, профессор,  
С.В. Пашенцев, кандидат физико-математических наук, профессор,  
Б.В. Дабижса, аспирант,  
Г.М. Соловьёв, аспирант  
С.О. Петров, старший преподаватель*

Статья посвящена параметрической идентификации моделей движения судна на различных этапах швартовки. Авторами предлагается новый способ управления судном при выполнении сложного маневрирования. Производится выборка нескольких из известных моделей движения на различных углах

дрейфа для определения работоспособности метода управления при проведении швартовочной операции. Для этого используются гидродинамические и размерные характеристики рассматриваемого типа судна с целью параметрической идентификации выбранных моделей. Полученные параметры внедряются в предлагаемую модель управления с целью проверки и последующей её корректировки. Применение данного метода управления позволяет существенно снизить влияние человеческого фактора на безопасность судовождения.

**Ключевые слова:** модель движения судна, способ управления судном, математическое моделирование швартовки, движение с большими углами дрейфа, параметрическая идентификация модели.

The article is about the parametric identification of vessel motion models at various stages of mooring. The authors propose a new way to control the vessel when performing complex maneuvering. A selection is made of several of the known motion models at various drift angles to determine the operability of the control method during a mooring operation. Hydrodynamic and dimensional characteristics of this type of vessel used for the parametric identification of the selected models. The obtained parameters are implemented in the vessel control model with the aim of verification and its subsequent adjustment. The use of this control method can significantly reduce the influence of the human factor on the safety of navigation.

**Keywords:** vessel motion model, method of movement controlling, mathematical modeling of mooring, navigation with significant drift angles, parametric model identification.

## Введение

Нами установлено, что весь процесс швартовки может быть разбит на три этапа. Первый этап – подход к месту швартовки с дальнейшей позицией, когда управление объектом происходит по направлению на заданную точку и судно выходит в среднюю позицию. Второй этап – подход со средней позиции, когда управление осуществляется по отклонениям от перемещающейся параллельно судну партнёру заданной (ЗЛ) с выходом в ближнюю позицию. Третий этап – параллельной сближение швартуемых судов до момента их полного контакта. На двух первых этапах в рамках соответствующих патентов [4], [5] были предложены и рассмотрены способы управления движением швартуемого судна по отклонениям от задаваемых определенным способом ЗЛ. Для полноты описания процесса швартовки рассмотрим коротко управление швартуемым судном на первых двух этапах, в то время как, главной нашей задачей является рассмотрение третьего этапа. На нем также используется принцип управления по отклонениям с применением подруливающих устройств или иных элементов движительно-рулевого комплекса, обеспечивающих движение судна лагом. При этом преследуется цель показать принципиальную возможность реализации предлагаемых в изобретениях [4], [5] и др., способа управления швартуемым судном методами математического моделирования процесса швартовки. Такое моделирование невозможно без построения математической модели швартуемого судна. Выбор моделей для этапов швартовки представлен в настоящей статье, с их помощью планируется провести дальнейшие исследования. Это предполагает, что на каждом

этапе существование процесса швартовки наилучшим образом, наиболее адекватно, описывает отдельная модель, которую следует сформировать структурно, а затем определить ее параметры применительно к рассматриваемому типу судна, используемому для моделирования. Именно это мы и называем параметрической идентификацией математической модели.

Так, на первом и втором этапах швартовки, когда движение происходит с достаточно малыми углами дрейфа ( $\beta < 15^\circ$ ), адекватной можно признать одну из ряда моделей [2], [3], [6], [7] которые мы условно назовём следующим образом: модель Першица Р.Я., модель Гофмана А.Д., модель Соболева Г.В., модель Павленко Г.Е., модель японских инженеров и др. Специфика этих моделей состоит в том, что они описывают движение судна с учетом характера изменения его линейной скорости  $v$ , угла дрейфа  $\beta$  и угловой скорости поворота  $\omega$ .

На третьем этапе движение швартуемого судна выполняется с большими углами дрейфа, близкими к  $90^\circ$ , потому более адекватной оказывается другая модель – модель в перемещениях, разработке которой большое внимание уделил А.П. Тумашик [9], [10]. В ней движение швартуемого судна представляется характером изменения продольной  $v_x$  и поперечной  $v_y$  составляющих линейной скорости, а также и угловой скорости  $\omega$ . Таким образом, в начальной стадии исследования нам предстоит выбрать соответствующую модель (модели), которая (которые) могут адекватно описать процесс движения, выбранного нами для исследования типа судна в ходе швартовочной операции.

**Этапы 1 и 2 – модель японских инженеров**

Производя выбор гидродинамических моделей, мы остановились на модели японских инженеров (модель 1), которая хорошо проявляет себя в различных задачах описания движения судов. Так эта модель дает близкие значения маневренных характеристик, полученных на ходовых испытаниях контейнеровоза. Общий вид этой модели таков

$$\left. \begin{aligned} (m + \lambda_{11}) \left( \frac{dv}{dt} \cos \beta - v \frac{d\beta}{dt} \sin \beta \right) + (m + \lambda_{22}) v \omega \sin \beta - \lambda_{26} \omega^2 &= X ; \\ - (m + \lambda_{22}) \left( \frac{dv}{dt} \sin \beta + v \frac{d\beta}{dt} \cos \beta \right) + \lambda_{26} \frac{d\omega}{dt} + (m + \lambda_{11}) v \omega \cos \beta &= Y ; \\ (I_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega}{dt} - \lambda_{26} \left( \frac{dv}{dt} \sin \beta + v \frac{d\beta}{dt} \cos \beta \right) - (\lambda_{22} - \lambda_{11}) \frac{v^2}{2} \sin 2\beta + \lambda_{26} v \omega \cos \beta &= M_z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

т.е. представляет собой три дифференциальных уравнения первого порядка, описывающих изменение линейной скорости  $v$ , угла дрейфа  $\beta$  и угловой скорости  $\omega$  судна во времени. Здесь  $m$  – масса судна,  $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{22}$ ,  $\lambda_{26}$ ,  $\lambda_{66}$  – присоединенные массы и моменты,  $I_z$  – момент инерции массы судна,  $X$ ,  $Y$ ,  $M_z$  – суммы продольных, поперечных составляющих сил, действующих на судно и сумма их моментов соответственно. Конкретные черты модель обретает при вычислении гидродинамических составляющих усилий и момента, действующих на движущееся судно. Далее будем считать корпус судна примерно симметричным относительно миделя и полагать, что присоединенный момент  $\lambda_{26} = 0$ . Ввиду малости значения угла дрейфа  $\beta$  при движении судна на первом и втором этапе швартовки примем:  $\sin \beta \cong \beta$ ,  $\cos \beta \cong 1$ .

Входящие в уравнения суммы составляющих сил  $X$ ,  $Y$  и их моменты  $M_z$  представляют собой совокупность воздействий различной природы, в частности, гидродинамические, волновые и аэродинамические воздействия, усилия, генерируемые движительно-рулевым комплексом.

$$\begin{aligned} X &= X_n + X_a + X_w + X_r + X_{pr} + T_e \\ Y &= Y_n + Y_a + Y_w + Y_r + Y_{pr}; \\ M_z &= M_n + M_a + M_w + M_r + M_{pr}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $M_n$  – составляющие гидродинамической силы на корпусе судна и её момент;  $X_a$ ,  $Y_a$ ,  $M_a$  – составляющие аэродинамической силы и её момент;  $X_w$ ,  $Y_w$ ,  $M_w$  – составляющие силы от воздействия волнения и её момент;  $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $M_r$  – составляющие гидродинамической силы на руле и её момент;  $X_{pr}$ ,  $Y_{pr}$ ,  $M_{pr}$  – усилия и момент, создаваемые средствами активного управления (САУ) судна;  $T_e$  – тяга главного движителя.

При расчете составляющих гидродинамической силы на корпусе судна и её момента  $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $M_n$  можно пользоваться различными способами вычисления, что собственно и определяет параметры математической модели. Все модели, включая рассматриваемую нами модель, предполагают разложение гидродинамических коэффициентов  $C_{nx}$ ,  $C_{ny}$ ,  $C_{nm}$  составляющих гидродинамической силы на корпусе судна и её момента по степеням двух кинематических параметров движения – угла дрейфа  $\beta$  и угловой скорости  $\omega$ . Представим безразмерные гидродинамические коэффициенты в виде рядов, которые выбраны для моделей морских транспортных судов японскими инженерами [2]. Таким образом, выражения для определения корпусных усилий и момента в нашем случае выглядят следующим образом:

$$X_n = C_{x0} 0.5 \rho v^2 F_{dp} \quad (3)$$

$$Y_n = \left( C_y^\beta \beta + C_y^{\bar{\omega}} \bar{\omega} + C_y^{\beta\beta} \beta |\beta| + C_y^{\bar{\omega}\bar{\omega}} \bar{\omega} |\bar{\omega}| + C_y^{\beta\bar{\omega}} \beta \bar{\omega} \right) 0.5 \rho F_{dp} v^2 \quad (4)$$

$$M_n = \left( C_m^{\beta\beta} \beta + C_m^{\bar{\omega}} \bar{\omega} + C_m^{\beta\beta\bar{\omega}} \beta^2 \bar{\omega} + C_m^{\beta\bar{\omega}\bar{\omega}} \beta \bar{\omega}^2 + C_m^{\bar{\omega}\bar{\omega}} \bar{\omega} |\bar{\omega}| \right) 0.5 \rho v^2 F_{dp} L \quad (5)$$

Здесь:  $\rho$  – массовая плотность воды ( $\rho = 1.025 \text{ т/м}^3$ )  $F_{dp}$  – приведенная площадь погруженной части диаметрального батокса,  $L$  – длина судна,  $\bar{\omega} = \omega L / v_0$  ( $v_0$  – исходное значение линейной скорости судна при установившемся движении),  $C_{x0}$  – коэффициент сопротивления воды движению судна с нулевым углом дрейфа ( $\beta = 0$ ), т.е. при движении передним ходом,  $C_{x0} = R / [(\rho/2) v_0^2 F_{dp}]$ , где  $R$  – сопротивление воды движению судна при исходном значении линейной скорости ( $v_0$ ) на переднем ходу. Этот коэффициент находится по результатам испытаний судна при разгоне в грузу и в балласте. Для этого считается известной процентная доля  $\delta\%$  номинальной мощности силовой установки  $N_{ном}$ , которая используется для движения с номинальной скоростью  $v_{ном}$

$$C_{x0} = N_{енно} \delta / (0.5 \rho v_{ном}^3 F_{dp}) \quad (6)$$

Приведенная площадь погруженной части диаметрального батокса определяется известным способом  $F_{dp} = \sigma_d L d$ , где  $d$  – средняя осадка судна,  $\sigma_d$  – приведенный коэффициент полноты погруженной части диаметрального батокса, способ определения которого подробно описан в работах [6], [8]. Приведенная площадь погруженной части диаметрального батокса рассчитывается с помощью специальной компьютерной программы, для её расчёта использует технологию интегрирования по корпусу с помощью теоретического чертежа в цифровой форме. Это дает более точные результаты и происходит в автоматическом режиме.

Определение гидродинамических коэффициентов, входящих в разложения, представленных в выражениях (4) – (5) производится с помощью формул [Гофман]:

$$\begin{aligned} C_y^\beta &= \pi(d/L) + 1.4C_b(B/L) \\ C_y^{\bar{\omega}} &= \pi/2(d/L) \\ C_y^{\beta\beta} &= -0.08 + 6.53(1-C_b)(d/B) \\ C_y^{\bar{\omega}\bar{\omega}} &= -0.48(1-C_b)(d/B) \\ C_y^{\beta\bar{\omega}} &= 0.44 - 1.73(1-C_b)(d/B) \\ C_m^\beta &= 2(d/L) \\ C_m^{\bar{\omega}} &= -1.08(d/L)[1-2(d/L)] \\ C_m^{\beta\bar{\omega}\bar{\omega}} &= 0.06 - 0.42C_b(d/L) \end{aligned} \quad (7)$$

где  $B$  – ширина судна,  $C_b$  – коэффициент общей полноты судна.

Остальные параметры, входящие в уравнения (4) – (5) находятся обычно с помощью графиков функции произведения  $C_b \times (B/L)$ , которые были аппроксимированы нами в виде следующих аналитических зависимостей [Юдин ТОБ...]:

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

Приведённые выше расчётные зависимости позволяют сформировать модель 1, которая будет использована для моделирования движения швартуемого судна на первом и втором этапах швартовки.

### Этап 3 - модель в перемещениях

Эту модель можно условно назовем моделью А. П. Тумашика [9] (модель 2), который одним из первых использовал ее для решения задач движения судна с большими углами дрейфа. В нашем случае на третьем этапе швартовки швартуемое судно всегда перемещается с большими углами дрейфа. Особенно важно, что эта модель оптимально подходит для решения задачи моделирования движения судна, управляемого способом, предложенным в упомянутом выше изобретении [4]. То есть указанная модель наиболее адекватна при моделировании управления движением швартующимся судном в зависимости от поперечных отклонений его оконечностей от ЗЛ.

Математическая модель в перемещениях представляет собой три дифференциальных уравнения первого порядка: два первых уравнения для скоростей продольного  $v_x$  и поперечного  $v_y$  перемещений швартуемого судна и одно - для угловой скорости  $\omega$ . Составляющие гидродинамической силы на корпусе, выражаются через соответствующие гидродинамические коэффициенты и имеют следующий вид:

продольная составляющая

$$X_n = \{F_0 + (0.075 - |F_0|)\sin^3[\pi(1 - \cos \gamma)]\} 0.5 \rho F_{dp} v^2 \quad (9)$$

поперечная составляющая

$$Y_n = -\left(2C_{y\beta}^\beta \frac{v_x^2 v_y}{v} + c_2 |v_y| v_y - 16c_3 \frac{v_x^4 v_y^3 |v_y|}{v^6}\right) 0.5 \rho F_{dp} \quad (10)$$

вращающий момент

$$M_n = -\left[2m_1 v_x v_y + m_2 v v_y + m_3 \frac{v_x^3 v_y^3}{v^4} - 16m_4 \frac{v_x^4 v_y^3 |v_y|}{v^6} + C_{m\omega} L^2 |\omega| \omega + \frac{C_{m\omega}}{\pi} (v^2 + L^2 \omega^2) \sin \pi \Omega\right] 0.5 \rho F_{dp} L \quad (11)$$

Соответственно система дифференциальных уравнений в развёрнутом виде выглядит следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} (m + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt} &= (m + \lambda_{22}) v_y \omega + \left\{ F_0 + (0.075 - |F_0|) \sin^3 [\pi(1 - \cos \gamma)] \right\} \frac{\rho v^2 F dp}{2} + X; \\ (m + \lambda_{22}) \frac{dv_y}{dt} &= -(m + \lambda_{11}) v_x \omega - \left[ 2C_{Y\beta}^{\beta} \frac{v_x^2 v_y}{v} + c_2 |v_y| v_y - 16c_3 \frac{|v_y| v_y^3 v_x^4}{v^6} \right] \frac{\rho F dp}{2} + Y'; \\ (I_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega}{dt} &= - \left[ 2m_1 v_x v_y + m_2 v v_y + m_3 \frac{v_x^3 v_y^3}{v^4} - 16m_4 \frac{v_x^4 |v_y^3| v_y}{v^6} + C_{m0} L^2 \omega |\omega| + \right] \frac{\rho F dp}{2} + M'_z, \end{aligned} \right\} (12)$$

$$\begin{aligned} X' &= X_a + X_w + X_r + X_{pr} + T_e \\ Y' &= Y_a + Y_w + Y_r + Y_{pr}; \\ M'_z &= M_a + M_w + M_r + M_{pr}, \end{aligned} (13)$$

Зная составляющие скорости судна (компоненты) по осям  $v_x$  и  $v_y$ , полную скорость судна находим с помощью обычной формулы

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. (14)$$

Обобщенная относительная угловая скорость  $\Omega$ , необходимая для описания любых произвольных движений швартуемого судна при маневрировании в процессе швартовочной операции определяется следующей зависимостью

$$\Omega = \frac{L\omega}{\sqrt{v_0^2 + (L\omega)^2}} (15)$$

При движении судна лагом  $\Omega = 0$ , а при вращении на месте  $\Omega = \pm 1$ .

В выражениях (9) – (11) фигурирует большое количество гидродинамических коэффициентов, которые вычисляются по формулам, представленным ниже. В частности, коэффициент продольной составляющей гидродинамической силы на корпусе судна

$$C_{xc} = F_0 + (0.075 - |F_0|) \sin^3 [\pi(1 - \cos \gamma)] (16)$$

$$F_0 = (C_1 + C_2 \sin 2\gamma) \cos \gamma (17)$$

$$\gamma = \pm \arccos \left( \frac{v_x}{v} \right) \left\{ 1 - C_0 \left[ \pm \sqrt{1 - \left( \frac{v_x}{v} \right)^2} \right] \right\} (18)$$

$$C_0 = (1 - 90 / \beta_x) (1 / \sin \beta_x) (19)$$

$$C_1 = -C_{x0} - \left[ \arccos \left( \frac{v_x}{v} \right) / 180 \right] (C_{x3} - C_{x0}) (20)$$

$$C_2 = (1 / 2\pi) (C_{x3} - C_{x0}) (21)$$

В выражениях (20), (21)  $C_{x3}$  – коэффициент сопротивления воды движению судна задним ходом, определяемый по формуле Н.И. Анисимовой [1]

$$C_{x3} = 0.075 \sin \left\{ \pi - \arcsin (C_{x0} / 0.075) \right\} (180 / \beta_x - 1) \} (22)$$

Здесь, как и в формуле (19)  $\beta_x$  – угол дрейфа, при котором  $C_{xn} = 0$ , определяемый в зависимости от значения  $\sigma_d$ . Графическая зависимость  $\beta_x(\sigma_d)$ , представленная в работе [6], аппроксимирована формулой

$$\beta_x = 8 \times 10^3 \sigma_d^2 - 1.586 \times 10^4 \sigma_d + 7951 (23)$$

Коэффициенты поперечной составляющей гидродинамической силы на корпусе судна и её момента  $C_{ny}$ ,  $C_{nm}$  определяются выражениями

$$C_{ny} = 2C_{Y\beta}^{\beta} \frac{v_x^2 v_y}{v} + c_2 |v_y| v_y - 16c_3 \frac{v_x^4 v_y^3 |v_y|}{v^6} (24)$$

$$C_{nm} = 2m_1 v_x v_y + m_2 v v_y + m_3 \frac{v_x^3 v_y^3}{v^4} - 16m_4 \frac{v_x^4 |v_y^3| v_y}{v^6} + \frac{C_{m0}}{\pi} L^2 \omega |\omega| + C_{m\omega} (v^2 + L^2 \omega^2) \sin(\pi\Omega) (25)$$

Формулы для определения коэффициентов, входящих в выражения (24), (25) представим в табличной форме

Таблица 1 –Расчётные формулы для определения коэффициентов формулы (24)

$C_{Y\beta}^{\beta} = a_3M + b_3$					
$a_3 = 0,2392C_p^2 - 0,4009C_p + 0,1815;$			$b_3 = 0,4033C_p^2 - 0,6965C_p + 0,3263;$		
$M = a_2N + b_2;$					
$a_2 = 16,67(d/L)^2 - 11,92(d/L) + 0,06;$			$b_2 = -261,1(d/L)^2 + 213,6(d/L) - 2,468;$		
$N = a_1(L/B) + b_1;$					
$6 < L/B \leq 8$			$8 < L/B \leq 10$		
$0,93 \leq \sigma_d \leq 0,95$	$0,95 < \sigma_d \leq 0,97$	$0,97 < \sigma_d \leq 1,0$	$0,93 \leq \sigma_d \leq 0,95$	$0,95 < \sigma_d \leq 0,97$	$0,97 < \sigma_d \leq 1,0$
$a_1 = 1000\sigma_d^2 - 1898\sigma_d + 900$	$a_1 = 175\sigma_d^2 - 339,8\sigma_d + 163,9;$	$a_1 = -0,5\sigma_d - 0,485;$	$a_1 = 350\sigma_d^2 - 664,5\sigma_d + 314,96;$	$a_1 = -1,5\sigma_d + 0,985;$	$a_1 = 1,5\sigma_d + 0,985$
$b_1 = 1800\sigma_d^2 - 3494\sigma_d + 1705$	$b_1 = -30\sigma_d + 38,42$	$b_1 = 516,7\sigma_d^2 - 1032\sigma_d + 523,7$	$b_1 = 3600\sigma_d^2 - 6928\sigma_d + 3339;$	$b_1 = 2000\sigma_d^2 - 3894\sigma_d + 1901;$	$b_1 = 316,67\sigma_d^2 - 629,5\sigma_d + 318,0$
$c_2 = a_3M + b_3$					
$d/L \leq 0,04$		$0,04 < d/L \leq 0,06$		$0,06 < d/L \leq 0,08$	
$a_3 = (d/L)^2 + 0,85(d/L) + 0,0311;$		$a_3 = (d/L)^2 + 0,615(d/L) + 0,0405;$		$a_3 = -5(d/L)^2 + 1,05(d/L) + 0,036;$	
$b_3 = -55(d/L)^2 + 7,85(d/L) + 0,124;$		$b_3 = 40(d/L)^2 - 0,1(d/L) + 0,29$		$b_3 = -10(d/L)^2 + 2,5(d/L) + 0,314;$	
$N = a_1\sigma_d + b_1,$					
$a_1 = 54,46C_p - 59,43;$			$b_1 = -31,44C_p + 46,8$		
$M = a_2(L/B) + b_2,$					
$N \leq 2$		$2 < N \leq 5$		$N > 5$	
$a_2 = -0,0105N^2 - 0,0585N + 0,985;$		$a_2 = 0,001N^2 - 0,079N + 0,98;$		$a_2 = -0,005N^2 - 0,015N + 0,81;$	
$b_2 = 0,06N^2 - 0,65N + 2,91;$		$b_2 = -0,0267N^2 - 0,41N + 2,78$		$b_2 = 0,03N^2 - 0,89N + 3,76;$	
$c_3 = a_2N + b_2$					
$a_2 = 2,569(d/L)^2 - 0,5805(d/L) + 0,00183;$			$b_2 = -27,7(d/L)^2 + 6,428(d/L) - 0,01749;$		
$N = a_1(L/B) + b_1$					
$0,55 \leq C_p \leq 0,72$			$0,72 < C_p \leq 0,85$		
$a_1 = 24,65C_p^2 - 29,67C_p + 7,547;$			$a_1 = 5,917C_p - 5,3;$		
$0,55 \leq C_p \leq 0,68$			$0,68 < C_p \leq 0,85$		
$b_1 = -60,44C_p^2 + 74,61C_p - 9,255;$			$b_1 = -10,08C_p + 20,34;$		

Таблица 2 –Расчётные формулы для определения коэффициентов формулы (25)

$m_1 = a_1G + b_1$		
$a_1 = -0,1317(d/L)^2 + 0,05358(d/L) + 0,000181;$	$b_1 = -2,361(d/L)^2 + 0,8653(d/L) - 0,000161;$	
$G = G_v + G_u,$		
$0,55 \leq C_p \leq 0,70$	$0,70 < C_p \leq 0,85$	
$N_o = -235\sigma_d^2 + 474,2\sigma_d - 235,8;$	$N_o = -210\sigma_d^2 + 422,9\sigma_d - 207,2;$	
$G_\phi = -74,67C_p^2 + 110,9C_p - 39,64;$	$G_\phi = 12C_p^2 - 8,8C_p - 0,64;$	
$N = N_o + G_\phi;$		
$N > 4$	$N \leq 4$	
$G_u = -1,3N + 7,8;$	$G_u = -1,3N + 2,6;$	
$G_v = 0,02333(L/B)^2 - 0,045(L/B) + 1,187;$	$G_v = 0,01792(L/B)^2 + 0,1275(L/B) + 6,113;$	
$m_2 = -[\ln(1,023\sigma_d)] / (11,6\sigma_d - 9,29)$		
$m_3 = a_2N + b_2,$		
$a_2 = [\exp(8,20939C_p) \times 0,7728 \times 10^{-3} - 1,873] \times 10^{-3};$	$b_2 = [-\exp(7,47893C_p) \times 0,4404 \times 10^{-2} + 5,709] \times 10^{-2};$	
$N = (a_1\sigma_d + b_1) / (\sigma_d - 1,029)$		
$a_1 = 31,26 - 9,0146 \exp[0,066947(L/B)];$	$b_1 = 8,6245 \exp[0,071419(L/B)] - 31,26,$	
$m_4 = G_m + G_u$		
$d/L \leq 0,028$	$0,028 < d/L \leq 0,040$	$d/L > 0,040$
$G_m = -71,88(d/L)^2 + 4,238(d/L) - 0,066$	$G_m = -9,375(d/L)^2 + 0,8875(d/L) - 0,0212;$	$G_m = -3,833(d/L)^2 + 0,415(d/L) - 0,01117$
$G_u = 0,00827N - 0,017$		
$N = N_o + G_s,$		
$0,55 \leq C_p \leq 0,64$	$0,64 < C_p \leq 0,74$	$0,74 < C_p \leq 0,85$
$N_o = -140,62C_p^2 + 180,62C_p - 53,35$	$N_o = -56,67C_p^2 + 75,10C_p - 20,2$	$N_o = -216,7C_p^2 + 312,8C_p - 108,51$
$0,93 \leq \sigma_d \leq 0,96$	$0,96 < \sigma_d \leq 1,00$	
$G_s = 1900\sigma_d^2 - 3696\sigma + 1796;$	$G_s = 391,7\sigma_d^2 - 810,4\sigma_d + 416,4;$	

$$C_{m0} = 0.059c_2 \tag{26}$$

Коэффициент  $C_{m\omega}$  находим по формуле

$$C_{m\omega} = C_{m\omega}^{\omega} + a_1 \left[ \sqrt{1 - \left( \frac{v_x}{v} \right)^2} \right] + a_2 \left\{ 1 - \cos \left[ \left( 2\pi - 4 \left| \arccos \frac{v_x}{v} \right| \right) \frac{v_x}{v} + 0.2 \sqrt{1 - \left( \frac{v_x}{v} \right)^2} \right] \right\} \tag{27}$$

в которой

$$C_{m\omega}^{\omega} = [0.739 + 8.7(d/L)] \times (1.611\sigma_d^2 - 2.873\sigma_d + 1.33) \tag{28}$$

$$a_1 = 0.09 - C_{m\omega}^{\omega} - 0.0033[(L/B) - 7] - 20[(d/L) - 0.005]^2 + 0.4(\sigma_d - 0.9) + 0.05(C_m - 0.9) \tag{29}$$

$$a_2 = 0.008(L/B) + 0.9[(d/L) - 0.05] + 0.45(\sigma_d - 0.955) \tag{30}$$

Приведенные формулы в замкнутом виде представляют все параметры выбранной модели 2 для моделирования движения швартуемого судна на третьем этапе швартовки.

### Расчёт составляющих гидродинамической силы на корпусе судна и её момента

Для производства конкретных расчетов нами выбрано контейнерное судно проекта Arctic Container Ship ACS 650. Его продольное по диаметральной плоскости (ДП) сечение и проекция «Корпус» теоретического чертежа показаны на рисунках 1 (а, б), а основные технические данные, необходимые для расчетов представлены на рисунке 2. В данном случае следует обратить внимание на то, что технической особенностью контейнеровоза указанного проекта является оснащение его аzipодом в качестве главного движителя.

Ряд приведенных выше формул и данные рисунков 1 (а, б) и 2 в процессе расчета с помощью специально созданной компьютерной программы позволили получить значения основных параметров моделей 1 и 2, т.е. коэффициентов составляющих гидродинамической силы на корпусе и её момента, которые мы приводим ниже в виде таблиц. Расчеты параметров моделей произведены для двух состояний загрузки контейнеровоза – в грузу и в балласте, результаты расчётов представлены в таблицах 3-6.

Таблица 3 – модель 1, контейнеровоз в грузу

$C_y^{\beta}$	0,361626	$C_m^{\beta}$	0,123441
$C_y^{\omega}$	0,096950	$C_m^{\omega}$	-0,058430
$C_y^{\beta\beta}$	0,454713	$C_m^{\beta\omega}$	0,039217
$C_y^{\omega\omega}$	-0,039305	$C_m^{\omega\omega}$	-0,022071
$C_y^{\beta\omega}$	0,298338	$C_m^{\beta\beta\omega}$	-0,308634

Таблица 4 – модель 1, контейнеровоз в балласте

$C_y^{\beta}$	0,329881	$C_m^{\beta}$	0,100237
$C_y^{\omega}$	0,078726	$C_m^{\omega}$	-0,048702
$C_y^{\beta\beta}$	0,359817	$C_m^{\beta\omega}$	0,043357
$C_y^{\omega\omega}$	-0,032330	$C_m^{\omega\omega}$	-0,020543
$C_y^{\beta\omega}$	0,323479	$C_m^{\beta\beta\omega}$	-0,318004

Таблица 5 – модель 2, контейнеровоз в грузу

$\beta_x$	94,236303	$m_1$	0,051548
$C_{X_0}$	0,045077	$m_2$	0,004312
$C_1$	-0,0296398	$m_3$	0,022049
$C_{X_3}$	0,042152	$m_4$	-0,006789
$C_2$	0,002667	$C_{m0}$	0,037113
$C_{Y\beta}^{\beta}$	0,139399	$C_{m\omega}^{\omega}$	0,075037
$c_2$	0,629031	$a_1$	-0,016639
$c_3$	0,055328	$a_2$	0,070529

Таблица 6 – модель 2, контейнеровоз в балласте

$\beta_x$	97,295326	$m_1$	0,044116
$C_{X_0}$	0,075593	$m_2$	0,008643
$C_1$	-0,038638	$m_3$	0,021833
$C_{X_3}$	0,050922	$m_4$	0,000375
$C_2$	0,004307	$C_{m0}$	0,033313
$C_{Y\beta}^{\beta}$	0,111244	$C_{m\omega}^{\omega}$	0,067016
$c_2$	0,564634	$a_1$	0,012931
$c_3$	0,051343	$a_2$	0,054552

### Составляющие гидродинамической силы на корпусе контейнеровоза и её момент - модель 1

Коэффициенты составляющих гидродинамической силы на корпусе контейнеровоза и её момента не являются окончательной целью при формировании его математических моделей, они предназначены в конечном итоге для расчета составляющих гидродинамической силы на корпусе контейнеровоза и её момента. С учетом структуры выражений, используемых для расчета составляющих гидродинамической силы на корпусе контейнеровоза и её момента, очевидно, что результаты такого расчета представляют в зависимости от угла дрейфа, линейной и угловой скоростей. Поэтому, рассчитаем их при заданных линейной  $v$  и угловой  $\omega$  скоростях и варьируемом угле дрейфа  $\beta$ . Так как на первых двух этапах швартовки движение контейнеровоза осуществляется по заданной прямой траектории, ограничены пределы варьирования значений угла дрейфа, т.е. расчеты проведены в диапазоне  $0 \leq \beta \leq 30^\circ$ .

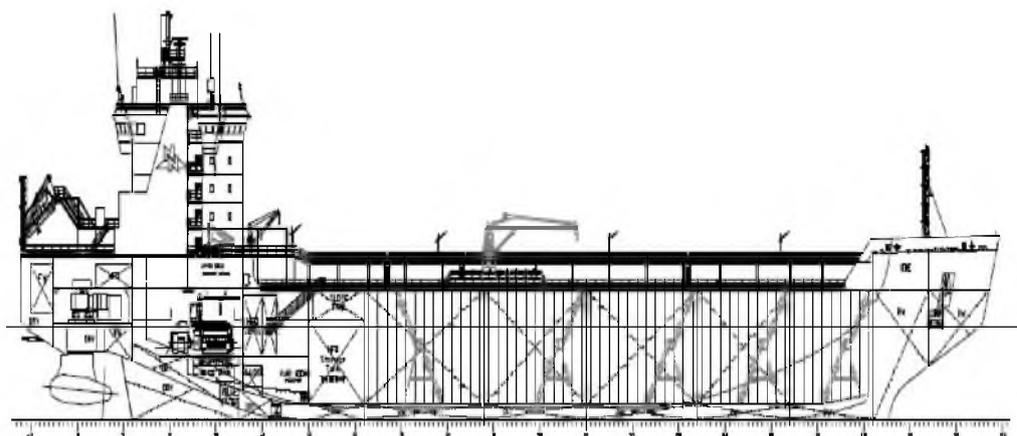


Рисунок 1а – Сечение контейнеровоза проекта Arctic Container Ship ACS 650 по ДП

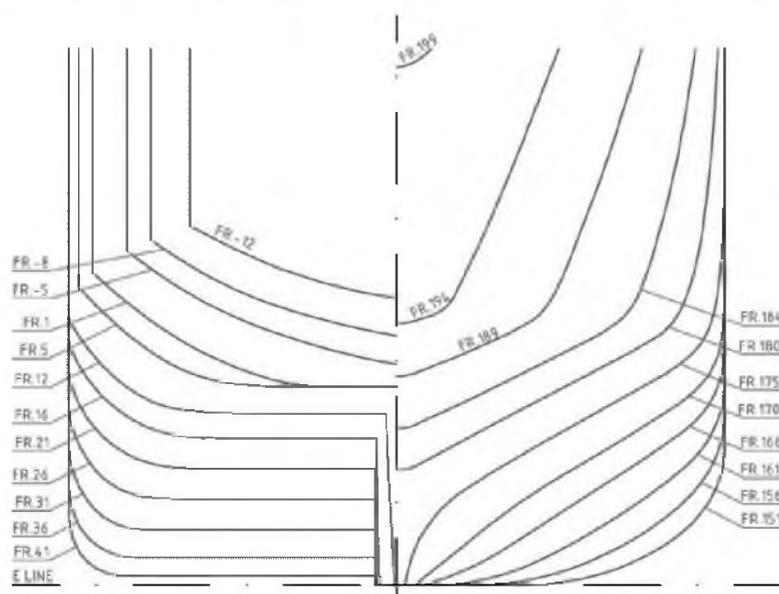


Рисунок 1б – Проекция «Корпус» теоретического чертежа контейнеровоза проекта Arctic Container Ship ACS 650

**Main Dimensions**

Length overall	approx. 189,00 m
Length between perpendiculars	157,74 m
Breadth, moulded	23,10 m
Depth	14,20 m
Design draught	9,00 m
Scantling draught	10,00 m
Deadweight, design	14,800 t
Deadweight, scantling	16,400 t
Gross tonnage	approx. 17,000
Cargo capacity	approx. 20,100 m <sup>3</sup>
Cargo tanks 100% incl. slop tanks	approx. 560 m <sup>3</sup>
Tank capacity: HFO	2,220 m <sup>3</sup>
MDQ	75 m <sup>3</sup>
Ballast water	12,000 m <sup>3</sup>
Service shaft power (2 diesel gen.sets, 85% MCR)	9,000 kW
Speed (T=8m, 9000kW shaft power, calm water)	15,5 kn
Ice breaking capability with full shaft power	1,5 m thick, equivalent ice
Radius of action (T=8m, 9000kW shaft power)	13,800 nm

**Class**

RMRS KM ARC7 [ ], AUT2, 'oil tanker'  
ice class ARC7 (1 ≤ 8,00 m)

Flag of Registry: Russian Federation

**Equipment for Cargo**

Cargo density at 98% cargo tank filling	0,81 t/m <sup>3</sup>
3 segregations	
Submerged cargo pumps	10 x 380 m <sup>3</sup> /h

Hose handling crane (outreach 15,5 m) SWL 10 t

**Ship's Equipment**

2 anchor/mooring winches, 4 mooring winches	
Freefall lifeboat	1 x 24 pers.
1 rescue boat	
2 provision cranes	1,5 t

**Machinery**

AC diesel electric machinery	
3 diesel generators total output	3 x 9,314 kVA
1 azimuth propeller unit	13,000 kW
4 bladed propeller, with fixed pitch, diameter 5,6 m	
Oil fired boilers	
Exhaust gas fired economizer	
Integrated automation system	
Voltages for electrical equipment	0,600/400/230/24V 50 Hz
Frequency converter	2 x 11,700 kVA
Submerged ballast pumps	2 x 400 m <sup>3</sup> /h

Water/CO<sub>2</sub>/foam fire fighting system

**Accommodation**

Crew	20 pers.
Passenger	2 pers.
Pilot	2 pers.

Рисунок 2 – Основные технические характеристики контейнеровоза проекта Arctic Container Ship ACS 650

Результаты расчетов для контейнеровоза в грузу представлены в графической форме на рисунке 3. Здесь необходимо отметить Естественно, что в процессе моделирования движения контей-

неровоза угол дрейфаβ и угловая скоростьω изменяются в соответствии с характером движения и, как следствие, изменяются составляющие гидродинамической силы и её момент, что следует из

уравнений (4), (5). Кроме того, поперечная составляющая гидродинамической силы и её момент, в соответствие со структурой модели 1, меняют знак при смене знака угла дрейфа или угловой скорости. Однако в пределах заданного диапазона

изменения угла дрейфа поперечная составляющая гидродинамической силы и её момент находятся в линейной зависимости от угла дрейфа, т.е. нелинейные члены уравнений (4), (5) на порядок меньше по отношению к линейным.

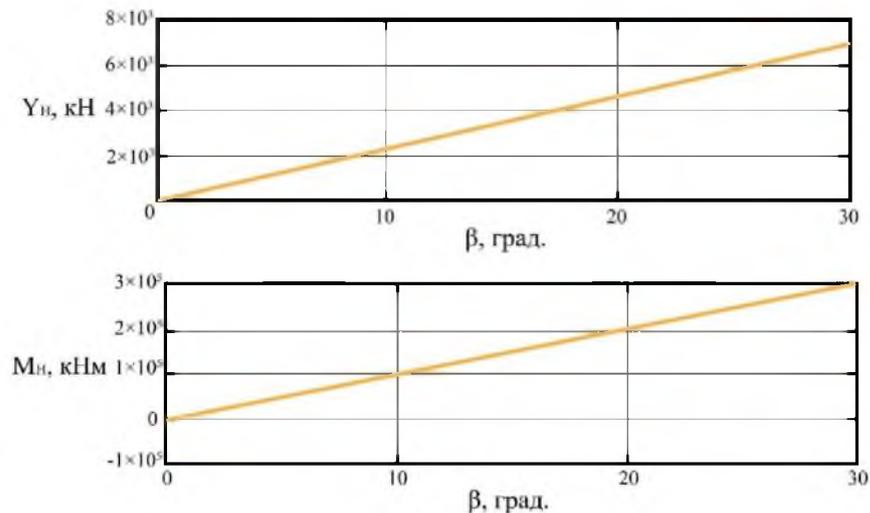


Рисунок 3 – Поперечная составляющая гидродинамической силы на корпусе (кН) и её момент (кНм) в зависимости от угла дрейфа при  $\omega = 1 \text{ град/с}$ ,  $v = 6 \text{ м/с}$

**Составляющих гидродинамической силы на корпусе контейнеровоза и её момента - модель 2**

В соответствии с выражениями, формирующими структуру модели 2 и их программной реализацией, а также с использованием полученных ранее значений гидродинамических коэффициентов (см. Таблицы 5, 6) были рассчитаны составляющие гидродинамической силы на корпусе и её момента, входящих в модель 2 контейнеровоза.

Знаки коэффициентов составляющих гидродинамической силы на корпусе и её момента выбраны так, чтобы составляющие гидродинамической силы на корпусе и её момента меняли знаки в соответствии с их направлением относительно координатной системы судна, связанной с судном. Соответствующие знаки составляющих гидродинамической силы на корпусе и её момента показаны в таблице 7.

Таблица 7

Диапазон значений β	X <sub>n</sub>	Y <sub>n</sub>	M <sub>n</sub>
0° ÷ 90°	-	-	-
90° ÷ 180°	+	-	+
0° ÷ -90°	-	+	+
90° ÷ -180°	+	+	-

Составляющие гидродинамической силы на корпусе X<sub>n</sub>, Y<sub>n</sub> и её момент M<sub>n</sub> рассчитаны в диапазоне углов дрейфа 65° ≤ β ≤ 115° для скорости хода v = 0.5 м/с и угловой скорости ω = 0.2 град/с. При этом диапазон значений углов дрейфа и ма-

лые значения линейной и угловой скоростей выбраны не случайно, так как соответствуют значениям аналогичных кинематических параметров движения контейнеровоза на последнем этапе швартовки. Значения, составляющие гидродинамической силы на корпусе и её момента для контейнеровоза в грузу получены в программной среде Mathcad и приведены в графической форме на рисунке 4.

По знакам значению знака поперечной составляющей гидродинамической силы на корпусе можно определить, что контейнеровоз движется в сторону левого борта.

**Идентификация моделей с использованием данных ходовых испытаний контейнеровоза**

Используя полученные значения гидродинамических коэффициентов (см. Таблицы 3-6) мы можем сформировать параметрически математические модели 1, 2. Однако это будут только базовые варианты моделей, применение которых в моделировании сложных манёвров судна приведёт к неадекватности их результатов, что не позволит должным образом оценить возможность применения инновационных способов управления судном. Под этим мы понимаем в первую очередь качественное движение судна-модели по заданным траекториям и управляемость модели при движении по этим траекториям. Во вторую очередь – адекватность движения модели и реального судна, оцениваемого по характеру изменения кинематических параметров движения: координат

центра тяжести (ЦТ), линейной и угловой скоростям, ускорениям и т.д.

В связи с вышесказанным, следует идентифицировать параметрически полученные модели с использованием результатов ходовых испытаний (натурных экспериментов). Как известно, натурные эксперименты, не всегда проводятся достаточно корректно и качественно, а самое главное, в недостаточном объеме. В основном это стандартизированные маневренные испытания, дающие возможность судоводителю с известной степенью приближенности оценить маневренные характеристики судна с целью их дальнейшего использования в безопасном судовождении. В нашем случае мы не имеем другой, удовлетворя-

ющей нас по качеству и объёму, информации, поэтому будем следовать общепринятым методикам оценки и коррекции базовых вариантов математических моделей. Для идентификации математических моделей выбранного нами для проведения модельных экспериментов контейнеровоза используем результаты двух видов стандартных маневренных испытаний, а именно, циркуляции и манёвра зигзаг. Испытания проводились на головном судне серии проекта Arctic Container Ship ACS 650, по их результатам имеются полноценные отчетные материалы, которые можно использовать для коррекционных процедур идентифицируемой модели контейнеровоза.

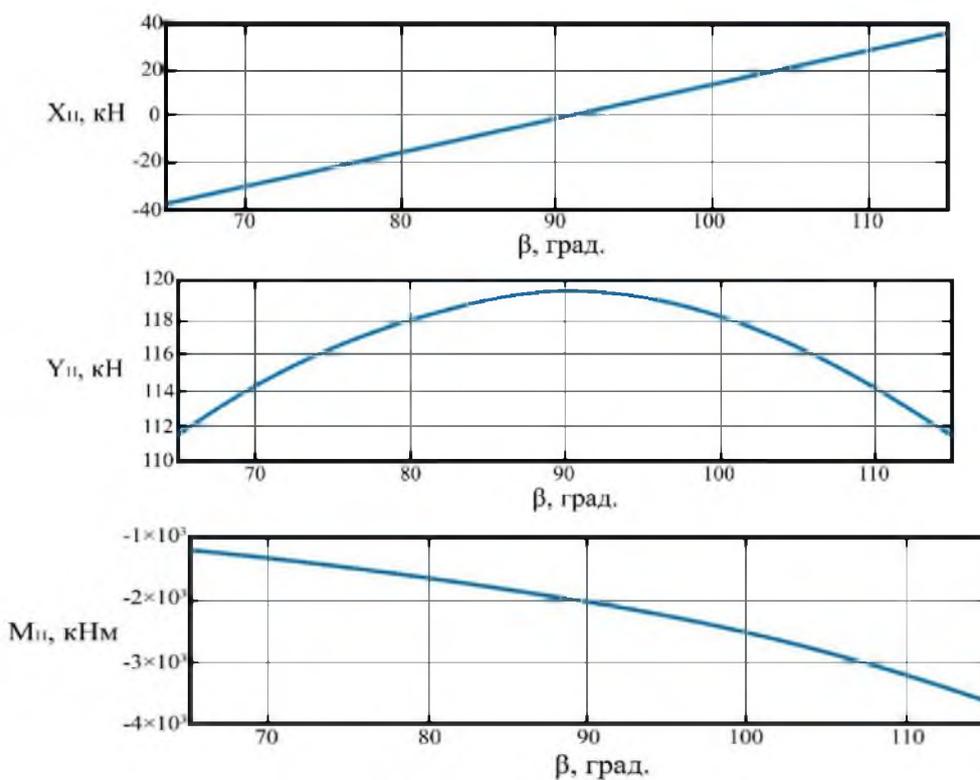


Рисунок 4 – Составляющие гидродинамической силы и её момент в функции от угла дрейфа  $\beta$ , в диапазоне 65°-115°

**Циркуляция**

На рисунках 5 и 6 представлены результаты стандартного испытания «Циркуляция» для контейнеровоза в грузу с осадкой 9.4 м на ровном киле. Циркуляция выполнена при повороте азипода на угол 35° правого борта (скорость поворота 5 град/с). Циркуляция контейнеровоза представлена на рисунке 5, здесь же показаны положения его корпуса с 10-ти секундным временным интервалом на разных стадиях циркуляции. На рисунке 6 представлены во временном измерении основные кинематические параметры, характеризующие особенности движения контейнеровоза в процессе выполнения циркуляции: координаты ЦТ, линейная скорость, угловая скорость, а также

угол перекладки азипода. В нижней части рисунка 6 представлены основные параметры циркуляции: выдвиг – 314 м; прямое смещение – 100 м; тактический диаметр – 271 м. Здесь же представлены значения: координат ЦТ (X, Y) (м), времени t (с) и линейной скорости  $v$  (уз) в моменты поворота контейнеровоза на 90°, 180°, 270° и 360°.

Используя полученные нами модели, мы провели аналогичное испытание, результаты которого приведены в таблице 8. При этом было учтено, что в процессе натурных испытаний действовал ветер порядка 9 м/с (см. Рисунок 5) направления ENE, который был также введен в модельные испытания. В таблице 8 в скобках показаны данные натурных испытаний.

Test date: 25.3.2006, 10:04:43.5    Init. Heading: 71.2 deg    Test No.: 1.1  
 Print date: 6. 4.2006, 16:29:16.3    Wind: ca. 6...9 m/s (ENE)  
 Latitude: 69 degs 58.5459 min    Ave Depth: 62.6 m    Draft aft/fwd: 9.4 m / 9.4 m  
 Longitude: 53 degs 18.0762 min    (below keel)    GM: 3.4 m

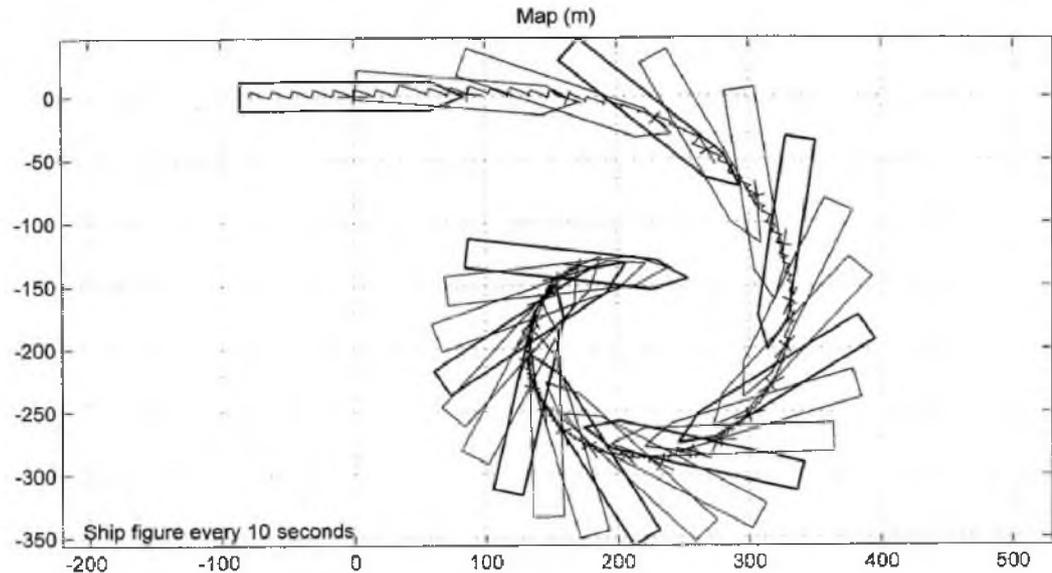
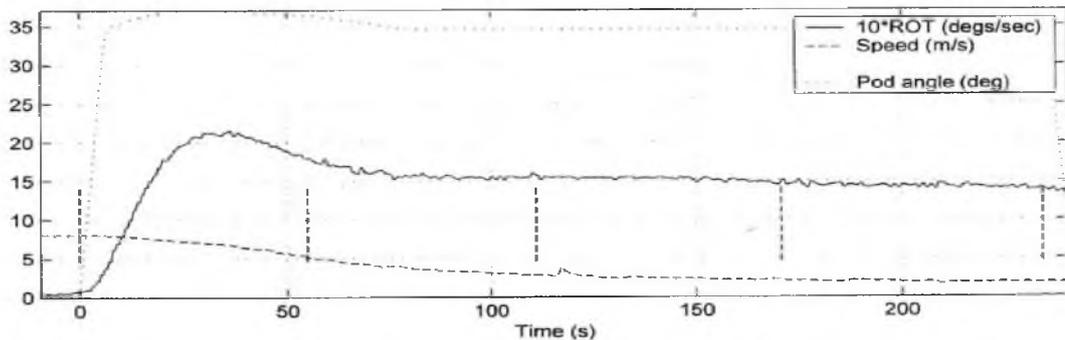


Рисунок 5 –Циркуляция контейнеровоза (в грузу) при перекладке азипода на угол 35° п/б



	Advance:	314 m	Head degs	Time s	x m	y m	Vel knots
	Transfer:	100 m	0	0	0	0	15.50
	Tactical diameter:	271 m	90	55	314	-100	9.95
	Steady diameter (90..270):	224 m	180	111	276	-271	5.45
			270	171	147	-248	4.22
			360	235	162	-139	3.46

Рисунок 6 – Скорость хода и угловая скорость контейнеровоза при циркуляции, азипод на 35° п/б

Таблица 8

ΔК	0°	+90°	+180°	+270°	+360°
t, с	0	57(55)	106(111)	154(171)	203(235)
К, град	71	161	251	341	71
X, м	0	339 (314)	240(276)	175(147)	150(162)
Y, м	0	-122(-100)	-275(-271)	-230(-248)	-100(-139)
v, м/с	8.0(7.97)	6.33(5.14)	6.25(2.83)	6.24(2.47)	6.20(1.64)
β, град	0	15.2(28.1)	14.8(29.7)	14.6(27.3)	14.5(32.7)
ω, град/с	0	1.59(1.83)	1.55(1.58)	1.53(1.42)	1.52(1.37)

Анализ результатов, полученных при моделировании говорит, что наша модель достаточно хорошо отражает поведение контейнеровоза в первых

двух периодах циркуляции (маневренный и эволюционный). Но это отражение не буквальное, чего мы и не можем требовать от модели.

Забегая вперед, необходимо отметить, что, корректируя математические модели с использованием параметров циркуляции, полученных при проведении натурального эксперимента можно добиться полного совпадения этих параметров с параметрами циркуляции, полученными по результатам модельного эксперимента, однако это не значит, что сопоставление параметров других стандартных маневров приведет к аналогичному результату. В этом случае, на наш взгляд, допустимо будет добиться совпадения параметров в среднем, а не в каждом виде испытаний отдельно. Далее, на примере циркуляции продемонстрируем возможность коррекции параметров модели с помощью натуральных данных.

Для этого следует выяснить, какие параметры модели и каким образом изменять, чтобы добиться лучшего соответствия результатов модельного эксперимента результатам натурального экс-

перимента. Для этого вводится понятие коэффициентов влияния параметров модели на кинематические характеристики движения судна (контейнерова) и производятся следующие действия - изменяются поочередно на 10% все параметры модели и определяется величина изменения (в %) интересующие нас кинематических характеристик движения контейнерова в процессе циркуляции. В конечном итоге, основываясь на результатах выполненных расчетов, мы можем определить, в какой мере необходимо изменять параметры модели, чтобы добиться максимального совпадения результатов моделирования с результатами натурального эксперимента. Для выполнения указанной процедуры разработана специальная компьютерная программа, которая встроена в технологическую программную цепочку моделирования.

Проведем расчет коэффициентов влияния для случая с циркуляцией. Результаты таких расчетов приведены в таблице 9.

Таблица 9

Параметры модели	$D_c$ , м	$\omega_c$ , град/мин	$\beta_c$ , град	$v_c$ , м/с	$t_{90}$ , с
$C_y^{\omega}$	+2.1%	-1.7%	-6.0%	+1.6%	—
$C_y^{\beta}$	+1.5	-1.2	—	—	—
$C_y^{\omega\omega}$	—	—	—	—	—
$C_y^{\beta\omega}$	—	—	—	—	—
$C_y^{\beta\beta}$	-3.3	—	—	—	—
<hr/>					
$C_m^{\omega}$	-4.0	+5.6	+2.0	+1.6	-4.5
$C_m^{\beta}$	+5.5	-6.5	—	—	+6.3
$C_m^{\omega\omega}$	—	—	—	—	—
$C_m^{\beta\omega\omega}$	—	—	—	—	—
$C_m^{\beta\beta\omega}$	—	—	—	—	—
<hr/>					
$C_{x0}$	-1.8	—	—	—	—
<hr/>					
Базовые значения	463	93.6	14.9	6.3	57

В первом столбце таблицы 9 перечислены все параметры модели 1, в столбцах (2 – 6) - параметры, характеризующих движение контейнерова в процессе циркуляции. Изменяя пошагово параметры модели о модулю на 10% на каждом шаге рассчитываем пять известных параметров, характеризующих движение контейнерова в процессе циркуляции ( $D_c$  – диаметр циркуляции,  $\omega_c$  - угловая скорость,  $\beta_c$  – угол дрейфа,  $v_c$  – линейная скорость,  $t_{90}$  – время поворота контейнерова на 90°), сопоставляя вычисленные значения с базовыми, которые представлены в последней строке таблицы 9. При этом ограничимся величиной приращения параметров модели в пределах 1%, в этом случае данные в таблицу не вносятся

(прочерк в соответствующей ячейке таблицы 9). Необходимо отметить, что процент приращения вносится в таблицу 9 с соответствующим знаком.

Данные таблицы 9 свидетельствуют о том, что влияние параметров модели на параметры, характеризующих движение контейнерова в процессе циркуляции достаточно ограничено. Ряд параметров модели слабо влияют на рассматриваемые параметры движения контейнерова в процессе циркуляции. Однако в данном случае не следует делать окончательные выводы о невозможности коррекции модели, а использовать данные других видов манёвров для достижения поставленной цели, так как влияние значений параметров модели на параметры движения может

оказаться более существенным. Определить это можно только произведя соответствующее моделирование конкретного маневра.

С другой стороны, есть параметры, которые влияют на большинство кинематических параметров движения контейнеровоза в процессе циркуляции. Так, значение коэффициента  $C_m^{\omega}$  влияет на все рассматриваемые кинематические параметры, при этом следует обратить внимание на разнонаправленность этого влияния. То есть диаметр циркуляции  $D_c$  убывает, угловая скорость поворота на циркуляции  $\omega_c$ , угол дрейфа  $\beta_c$ , а также линейная скорость  $v_c$  растут, время поворота  $t_{90}$  на  $90^\circ$  уменьшается. Похожее влияние на

Таблица 10

Параметр модели	Кинематические характеристики циркуляции				
	$D_c$ , м (%)	$\omega_c$ , град/мин (%)	$\beta_c$ , град (%)	$v_c$ , м/с (%)	$t_{90}$ , с (%)
$C_m^{\omega}$	407 (-12%)	111.3(19%)	15.6(5%)	6.6(5%)	50.0(-12.5%)

Из данных таблицы 10 заметно пропорциональное изменение кинематических характеристик смоделированной циркуляции контейнеровоза, что свидетельствует о возможности корректировки параметров математической модели контейнеровоза до приемлемого совпадения результатов модельных и натуральных экспериментов.

Данные таблицы 9 говорят нам о том, что параметры модели оказывают незначительное влияние на некоторые кинематические параметры. Этот факт наиболее важен по отношению к диаметру циркуляции. В то время как эта характеристика циркуляции недостаточно адекватна аналогичной характеристике циркуляции, выполненной в натуральных условиях. Тем не менее, известно, что кинематические характеристики циркуляции зависят не только от геометрических параметров корпуса судна, определяющих значения представленных в таблице 9 параметров модели, входящих в уравнения движения судна. В качестве не менее важных параметров уравнений движения контейнеровоза следует дополнительно рассмотреть параметры, которые зависят от характеристик движительно-рулевого комплекса, которым оборудован контейнеровоз. Меняя эти параметры, мы имеем возможность влиять на исследуемые кинематические характеристики циркуляции, тем более в нашем случае это необходимо, так как контейнеровоз оборудован азимутальным движителем типа азипод.

Если судно оборудовано обычным рулём, то методика расчета сил, образующихся на перу руля не вызывает вопросов, так как она достаточно хорошо разработана и апробирована многими исследователями. Однако выбранный нами

характеристики циркуляции оказывает и значение коэффициента  $C_y^{\omega}$ .

Для того чтобы более детально понять смысл влияния параметра модели  $C_m^{\omega}$  на параметры моделируемой циркуляции контейнеровоза были произведены его изменения трехкратно последовательно на 10% на каждом шаге. В таблице 10 приведены кинематические характеристики смоделированной циркуляции контейнеровоза при изменении параметра модели  $C_m^{\omega}$  на 30% (в скобках указаны в % отклонения, полученных кинематических характеристик циркуляции от аналогичных значений, рассчитанных с использованием базовой модели контейнеровоза).

для выполнения исследований контейнеровоз в качестве движителя и в тоже время рулевого устройства использует, как упоминалось выше, азипод. Для азимутального движительно-рулевого комплекса типа азипод расчет генерируемых им гидродинамических сил не проработан в достаточной мере, как для руля. Планируется в дальнейшем этот вопрос рассмотреть более подробно. А пока рассмотрим в приближенном варианте, степень влияния гидродинамических сил, образуемых азиподом на кинематические характеристики циркуляции. Если судно оборудовано обычным рулевым устройством, в дифференциальные уравнения его движения вводятся две составляющих гидродинамической силы на руле, образующиеся при его перекладке: продольная составляющая, создающая дополнительное сопротивление движению судна  $X_r$ ; поперечная составляющая, являющаяся по сути рулевой силой  $Y_r$ . Поперечная составляющая (рулевая сила) образует вращающий момент, определяющий динамику вращательного движения судна. Составляющих гидродинамической силы, образуемые азиподом аналогичны, но методика их детального расчёта не существует, исследователи находятся только в начале процесса её разработки.

Самый простой подход к решению этой задачи состоит в следующем. Рассчитывается тяга азипода, исходя из мощности движительно-рулевого комплекса, оборотов гребного винта, его диаметра и скорости хода судна. Классический способ расчёта тяги гребного винта  $T_e [= T(1 - t)]$  ( $T$  – упор винта,  $t$  – коэффициент

засасывания) без учёта конструктивных особенностей комплекса. Вектор тяги раскладывается на две составляющих: продольную  $T_{ex}$  и поперечную  $T_{ey}$ :

$$\left. \begin{aligned} T_{ex} &= C_x T_e \cos \psi \\ T_{ey} &= C_y T_e \sin \psi \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

где  $\psi$  – угол поворота азипода по отношению к ДП контейнеровоза. В данном случае продольная составляющая тяги азипода будет выполнять функцию движущей силы, таким образом значение коэффициента  $C_x$  будет находиться в пределах 1.0. Поперечная составляющая вектора тяги азипода будет выполнять функцию рулевой силы, а с учётом предела значений коэффициента продольной составляющей вектора тяги азипода, её значение должно быть больше 1.0. На данный момент нам неизвестны истинные значения указанных коэффициентов, учитывая ряд условностей, которыми мы пользуемся при решении вопроса управления контейнеровозом с использова-

нием азипода. Тем не менее, используя результаты натурального эксперимента мы можем соответствующим образом подобрать значения коэффициентов, составляющих тяги азипода. Подбирая значения коэффициентов  $C_x$  и  $C_y$  мы меняем значения параметров математической модели контейнеровоза, добиваясь адекватных результатов моделирования его циркуляции.

Оценим степень реакции модели на в определённой мере произвольно заданные значения коэффициентов  $C_x$  и  $C_y$ . Установим следующие значения для рассматриваемых коэффициентов  $C_x = 0.8$  и  $C_y = 1.3$ . В таблице 11 приведены результаты моделирования циркуляции контейнеровоза с использованием в модели выбранных нами значений коэффициентов, составляющих вектора тяги азипода, здесь же приводятся в процентном выражении отклонения кинематических характеристик циркуляции от аналогичных значений, полученных по результатам моделирования с использованием базовой модели контейнеровоза.

Таблица 11

Значения коэффициентов тяги	Отклонения от базовых значений кинематических характеристик циркуляции, при заданных значениях коэффициентов тяги азипода				
	$D_e$ , м (%)	$\omega_e$ , град/мин (%)	$\beta_e$ , град (%)	$v_e$ , м/с (%)	$t_{90}$ , с (%)
$C_x = 0.8$ $C_y = 1.3$	380(-18%)	95.2(19%)	18.3(23%)	6.4(2%)	45.6(-20%)

Из данных таблицы 11 следует, что почти все кинематические характеристики циркуляции системно (отклонения составляют около  $\pm 20\%$ ) реагируют на введение в математическую модель контейнеровоза зависимостей, определяющих составляющие вектора тяги азипода с использованием установленных нами значений коэффициентов  $C_x$  и  $C_y$ . В данном случае не будем проводить подробный анализ влияния значений указанных коэффициентов на кинематические характеристики циркуляции, уделим этому внимание в дальнейшем, в частности, рассмотрим причину относительно малого влияния описанных выше изменений в модели на значение линейной скорости судна на циркуляции.

***Зигзаг 10/10 (Zig zag 10°SB/10°PS)***

Безусловно циркуляция является тем стандартным манёвром, который даёт достаточно много важной информации о динамических свойствах судна, используя которую можно идентифицировать его математическую модель, однако не следует пренебрегать той информацией, которую несут в себе и другие стандартные манёвры, например, манёвр зигзаг. Известно, что манёвр зигзаг входит в список тех стандартных манёвров, которые должно выполнять судно при проведении ходовых испытаний согласно Резолюции ИМО MSC.

137(76). В данном случае следует учитывать то, что при управлении судном по отклонениям от ЗЛ возникает режим движения, который подобен рысканию судна при удержании судна на курсе. Такое движение ближе всего к маневру типа «Зигзаг». Необходимые натурные испытания проведены с выбранным нами для исследований контейнеровозом, достаточно подробные результаты таких испытаний представлены в судовых документах. Из них мы выберем «Зигзаг 10/10» (10/10 означает перекладку рулевого органа на 10° левого и 10° правого борта), хотя в документации также представлены зигзаги 20/20, 10/15, 20/15 и другие.

На рисунках 7-9 представлены результаты стандартного испытания «Зигзаг 10/10» для контейнеровоза в балласте с средней осадкой 7.4 м.

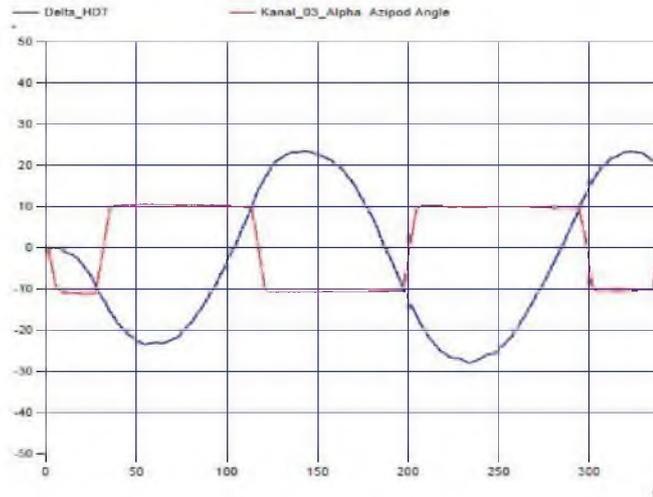
В этом испытании фиксировались моменты времени и значения четырёх углов зарыскивания. Значения углов зарыскивания приведены в таблице, в нижней части рисунка 7, время, соответствующее максимальным отклонениям контейнеровоза от исходного курса при трёх зарыскиваниях определяем по графику рисунка 7, это моменты времени - 66 с, 138 с, 233 с. На рисунках 8 и 9 показаны линейная скорость контейнеровоза и его угловая скорость в процессе испытаний, максимальное значение которой

$\omega_{\max} = 65$  град/мин. Линейная скорость контейнеровоза в процессе маневра снижается с 7.3 м/с до 6.5 м/с за 350 с. Результаты моделирования маневра зигзаг приведены в таблице 12 в строке с именем

«База». Они отличаются от данных натуральных испытаний, которые приведены в скобках в той же строке таблицы 12, причем в основном по моментам максимального отклонения контейнеровоза от его исходного курса по всем трём зарыскиваниям.

5.6 Zig zag 10°PS/10°SB

Zig zag manoeuvre with full speed, azipod angle first 10° to PS, then 10° to SB.



Initial speed	14.60	Initial heading	240.3	Remark	
1 <sup>st</sup> Overshoot angle			13.5	*	IMO fulfilled
2 <sup>nd</sup> Overshoot angle			13.2	*	IMO fulfilled
3 <sup>rd</sup> Overshoot angle			18.0	*	
4 <sup>th</sup> Overshoot angle			13.3	*	

IMO limit 1st Overshoot angle =  $5 \cdot 0.5 \times (L/V) = 5 \cdot 0.5 \times (169.34\text{m}/7.51\text{m/s}) = 16.27^\circ$

IMO limit 2nd Overshoot angle =  $17.5 \cdot 0.75 \times (L/V) = 17.5 \cdot 0.75 \times (169.34\text{m}/7.51\text{m/s}) = 34.41^\circ$

Рисунок 7 – Изменение угла перекладки азипода и курса контейнеровоза во времени в процессе испытаний «Зигзаг 10/10»

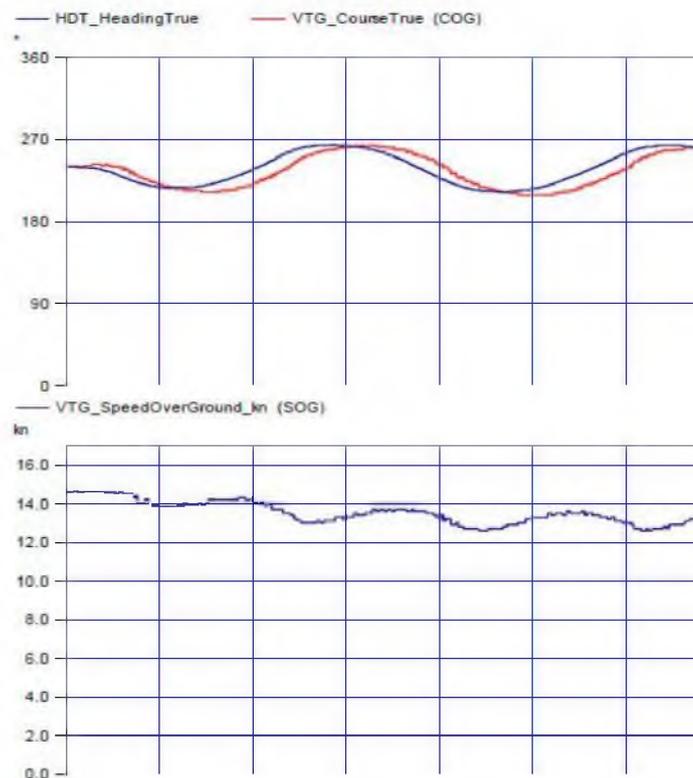


Рисунок 8 – Изменение курса и скорость хода контейнеровоза во времени в процессе испытаний «Зигзаг 10/10»

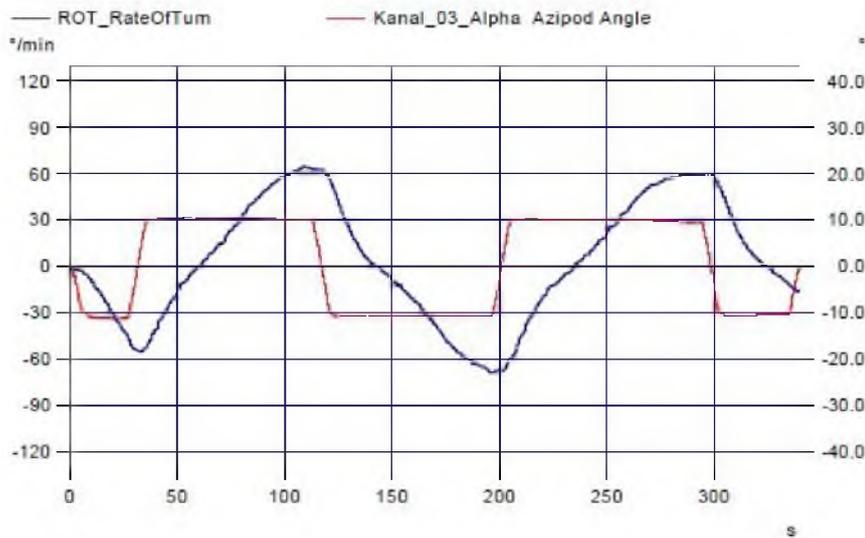


Рисунок 9 – Положение азипода и угловая скорость (град/мин) поворота танкера в процессе испытаний «Зигзаг 10/10»

Таблица 12

+10%	t <sub>1</sub> , с	ΔK <sub>1</sub> , град	t <sub>2</sub> , с	ΔK <sub>2</sub> , град	t <sub>3</sub> , с	ΔK <sub>3</sub> , град	ω <sub>max</sub> , град/мин	β <sub>max</sub> , град	U <sub>ср</sub> м/с
C <sub>y</sub> <sup>ω</sup>	–	-9	-2	-7	-2	-7	-2	-5	–
C <sub>y</sub> <sup>β</sup>	-4	-9	-3	-14	-2.5	-7	-3	-8	–
C <sub>y</sub> <sup>ωω</sup>	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C <sub>y</sub> <sup>βω</sup>	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C <sub>y</sub> <sup>ββ</sup>	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C <sub>m</sub> <sup>ω</sup>	–	-9	–	–	–	-7	-7	-3	–
C <sub>m</sub> <sup>β</sup>	–	+18	–	-14	–	+14	+7	+5	–
C <sub>m</sub> <sup>ωω</sup>	–	–	-2	–	-2	–	–	–	–
C <sub>m</sub> <sup>βω</sup>	–	–	–	+7	–	–	–	–	–
C <sub>m</sub> <sup>ββ</sup>	–	–	–	–	–	–	–	–	–
C <sub>x0</sub>	–	–	-3	-7	-2	–	–	–	-3
База	70 (66)	11 (13.5)	177 (138)	13 (13.2)	285 (233)	14 (18)	58.2 (65)	7.5 -	6.8 (6.9)

В данном случае мы решаем ту же задачу, что и в случае с циркуляцией, т.е. демонстрируем возможности коррекции параметров модели с целью большей адекватности натурным данным. Будем давать параметрам модели поочередно приращение в 10% по модулю, и проследим, как это повлияет на кинематические характеристики зигзага. Если влияние мало (менее 2%), ставим прочерк в этой ячейке, в противном случае приводим процент изменения данной характеристики маневрирования.

Как и в случае с циркуляцией, из таблицы 12 следует, что ощутимо влияние только линейных членов дифференциальных уравнений, их коэффициенты расположены в 1, 2 и в 7, 8 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 азипода C<sub>x</sub> и C<sub>y</sub> (31) в большей мере повлиять на поведение модели. Например, если положить C<sub>x</sub>= 0.8 и C<sub>y</sub>= 1.3, и провести моделирование зигзага, то получим результаты, приведенные в таблице 13. В ней же приведены процентные изменения кинематических характеристик движения контейнеровоза, которые существенно отличаются от тех, которые представлены в таблице 12 (за исключением линейной скорости). Этим мы добиваемся адекватности модели по отношению к данным натурных испытаний.

Таблица 13

	t <sub>1</sub> , с	ΔK <sub>1</sub> , град	t <sub>2</sub> , с	ΔK <sub>2</sub> , град	t <sub>3</sub> , с	ΔK <sub>3</sub> , град	ω <sub>max</sub> , град/мин	β <sub>max</sub> , град	υ <sub>ср</sub> м/с
База	70	11	177	13	285	14	58.2	7.5	6.8
C <sub>x</sub> =0.8	60	12	149	15	238	15	69.6	9.5	6.4
C <sub>y</sub> =1.3	-14%	+9%	-16%	+15%	-19%	+7%	-20%	+27%	-6%

Вопрос коррекции параметров модели 2 можно рассмотреть аналогично тому, как это было сделано для модели 1. Выполним это для маневра «Зигзаг 10/10», как это уже делалось для модели 1. Влияние параметров модели 2 на кинематические характеристики маневрирования представим в таблице 14. Часть параметров модели, которые совсем не влияли на характеристики движения, мы в таблицу не вводили.

Анализ результатов таблицы 14 приводит практически к тем же выводам относительно модели 2, что и данные таблицы 9 по отношению к модели 1. Только три коэффициента C<sub>y</sub><sup>β</sup>, m<sub>1</sub>, C<sub>km</sub><sup>ω</sup>

влияют на важные для нас параметры движения контейнеровоза в процессе выполнения маневра зигзаг. Следовательно, и для этой модели необходимо изменить коэффициенты C<sub>x</sub> и C<sub>y</sub>, которые отвечают за эффективность работы движительно-рулевого комплекса, т.е. в данном случае азипода. Например, примем следующие значения указанных коэффициентов C<sub>x</sub> = 0.8 и C<sub>y</sub> = 1.3, при этом результаты моделирования представим в таблице 15. Видим существенное влияние именно на те характеристики движения, которые очень слабо изменялись ранее в соответствии с данными таблицы 14.

Таблица 14

+10%	t <sub>1</sub> , с	ΔK <sub>1</sub> , град	t <sub>2</sub> , с	ΔK <sub>2</sub> , град	t <sub>3</sub> , с	ΔK <sub>3</sub> , град	ω <sub>max</sub> , град/мин	β <sub>max</sub> , град	υ <sub>ср</sub> м/с
C <sub>y</sub> <sup>β</sup>	+2	-8	-	-7	-	-	-	-7	-
c <sub>2</sub>	-	-8	-	-7	-	-	-	-3	-
c <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m <sub>1</sub>	+2	+8	-	+7	-	-	+8	+4	+2
m <sub>2</sub>	-	-8	-	-	-	-	-	-	-
m <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m <sub>4</sub>	-	-	-	+7	-	-	-	-	-
C <sub>km</sub> <sup>ω</sup>	+4	-8	+4	-7	+3	-7	-7	-4	+2
a <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
a <sub>2</sub>	-	-8	-	-	-	-7	-	-	-
C <sub>x0</sub>	-	-	-	-	-	-	+2	+3	-
База	88 (66)	13 (13.5)	221 (138)	14 (13.2)	353 (233)	14 (18)	42.1 (65)	10.3 -	5.9 (6.9)

Таблица 15

База	88	13	221	14	353	14	42.1	10.3	5.9
C <sub>x</sub> =0.8	76	14	186	15	293	15	45.6	13.3	5.6
C <sub>y</sub> = 1.3	-14%		-16%		-17%		+8%	+29%	-5%

В целом, проведенные исследования доказывают возможность коррекции как модели 1, так и модели 2, с целью соответствия результатов модельных экспериментов и аналогичных результатов натурных экспериментов.

Таким образом, скорректированная математическая модель контейнеровоза может быть использована далее для моделирования процесса швартовки. Еще раз подчеркнем, что именно эта задача при использовании предлагаемого инновационного способа управления движением судна [5], рассматривается нами как основная цель наших исследований.

Тем не менее, для модели 2 в перемещениях необходимо провести модельные испытания, которые в натуре не проводятся, точнее, нам не известны результаты подобных натурных испытаний. Испытания необходимы для того чтобы исследовать управление контейнеровозом на третьем этапе швартовки, с его преимущественным движением лагом. Поэтому мы провели два модельных эксперимента моделируя движение контейнеровоза лагом с углом дрейфа 90° при отсутствии вращения ω = 0 и чистое вращение танкера под действием момента с нулевой линейной скоростью ЦТ.

Результаты этих модельных испытаний приведены в двух таблицах. В таблице 16 для четырех значений суммарного поперечного усилия  $T_{p\Sigma}$ , приложенных к контейнеровозу, представлены значения времени наступления установившегося движения лагом  $t_c$  и его линейной скоростью  $v_c$ . Данные приведены для контейнеровоза в грузу и в балласте.

Таблица 16

Танкер в грузу			Танкер в балласте		
$T_{p\Sigma}$ ,кН	$t_c$ сек	$v_c$ м/с	$T_{p\Sigma}$ ,кН	$t_c$ сек	$v_c$ м/с
400	286	0.91	400	271	1.1
200	523	0.65	200	329	0.78
100	665	0.46	100	521	0.50
50	671	0.32	50	613	0.38

Таблица 17

Контейнеровоз в грузу			Контейнеровоз в балласте		
$M_{p\Sigma}$ ,кНм	$t_c$ с	$\omega_c$ ,град/мин	$M_{p\Sigma}$ ,кНм	$t_c$ , с	$\omega_c$ ,град/мин
1800	584	14.37	1800	501	18.35
900	775	10.16	900	607	12.97
450	977	7.18	450	824	9.17

Эти результаты дают возможность определять темп наращивания скорости движения лагом в зависимости от приложенной поперечной силы или темп наращивания скорости поворота в зависимости от приложенного момента. Это очень важные кинематические характеристики, необходимые на третьем этапе швартовки, поскольку мы должны подходить к объекту швартовки с ограничениями для линейной и угловой скорости.

**Заключение.**

Проведенный анализ возможности идентификации математической модели контейнеровоза коррекцией параметров базовой модели с использованием результатов натурального эксперимента, позволяет рассчитывать на адекватность результатов планируемых модельных экспериментов. Данные эксперименты необходимы для определения возможности использования разработанных авторами инновационных способов управления движением судна при выполнении сложного маневрирования в процессе осуществления ключевых судовых операций. По мнению авторов, предлагаемые способы управления существенно снизят влияние человеческого фактора на безопасность судовождения.

**Литература**

1. Анисимова, Н.И. Позиционные гидродинамические характеристики судов при произвольных углах дрейфа/ Н.И. Анисимова // Судостроение. – 1968. – №5.
2. Гофман А. Д. Движительно-рулевой комплекс и маневрирование судна. Справочник / А. Д. Гофман. – Л.: Судостроение, 1988. – 360 с.

В таблице 17 для трех значений вращающего момента  $M_{p\Sigma}$ , приложенных к контейнеровозу, представлены значения времени наступления его установившегося вращения  $t_c$  и угловой скорости этого вращения  $\omega_c$ .

3. Маступкин Ю. М. Управляемость промышленных судов.– М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – С. 232
4. Патент 2475410 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/00 (2006.01). Способ управления судном при выполнении им швартовочной операции к борту судна партнера / Ю.И. Юдин, С.Н. Холичев, С.О. Петров; заявитель и патентообладатель Мурманский гос. техн. ун-т.- № 2011137696/11; заявл. 13.09.2011; опубл. 20.02.2013, Бюл. № 5. - 7 с. : ил.
5. Патент 2509031 Российская Федерация, МПК В 63 Н 25/52 (2006.01). Способ управления судном при выполнении им швартовочной операции к борту судна партнера, стоящего на якоре / Ю.И. Юдин, В.В. Иванов, С.Н. Холичев, С.О. Петров; заявитель и патентообладатель Мурман. госуд. техн. ун-т.- № 2012143196/11; заявл. 09.10.2012 ;опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7. – 9 с. :
6. Першиц Р.Я. Управляемость и управление судном. – Л.: Судостроение, 1983 – С. 272.
7. Соболев Г.В. Управляемость корабля и автоматизация судовождения.– Л.: Судостроение, 1976.– С. 478.
8. Справочник по теории корабля. В 3 т. Т. 3 / под ред. Я. И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 544 с.
9. Тумашик, А. П. Математическая модель бурового судна, удерживаемого в заданной точке моря / А. П. Тумашик, ЦНИИ "Румб" // Вопросы судостроения: науч.-техн. сб. – 1980. – Вып. 24. – С. 44-56. – (Сер. "Проектирование судов").
10. Тумашик, А. П. Расчет гидродинамических характеристик судна при маневрировании / А.П. Тумашик // Судостроение. – 1978. – № 5. – С. 13–16.

11. Юдин Ю.И., Кондратьев С.И., Боран-Кешпьян А.Л., Холичев С.Н., Глинская И.В. Mathematical modeling of tanker broadside motion controlled on the basis of deviations from the aimed// line Морские интеллектуальные технологии.– 2018.– № 1-3 (41).– С. 228-232.

#### REFERENCES

1. Anisimova, N.I. Pozicionnye gidrodinamicheskie harakteristiki sudov pri proizvol'nyh uglah drejfa/ N.I. Anisimova. // Sudostroenie.– 1968.– №5.
2. Gofman A. D. Dvizhitel'no-rulevoj kompleks i manevrirovaniye sudna. Spravochnik / A. D. Gofman. – L.: Sudostroenie, 1988. – 360 s.
3. Mastushkin YU. M. Upravlyaemost' promyslovyh sudov.– M., Legkaya i pishchevaya promyshlennost', 1981 – s.232
4. Pat. 2475410 Rossijskaya Federaciya, MPK V 63 N 25/00 (2006.01). Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoj operacii k bortu sudna partnera / YUdin YU.I., Holichev S.N., Petrov S.O.; zayavitel' i patentoobladatel' Murmanskij gos. tekhn. un-t.- № 2011137696/11; zayavl. 13.09.2011 ;opubl. 20.02.2013, Byul. № 5. - 7 s. :
5. Pat. 2509031 Rossijskaya Federaciya, MPK V 63 N 25/52 (2006.01). Sposob upravleniya sudnom pri vypolnenii im shvartovnoj operacii k bortu sudna partnera, stoyashchego na yakore / YUdin YU.I., Ivanov V.V., Holichev S.N., Petrov S.O.; zayavitel' i patentoobladatel' Murman. gosud. tekhn. un-t.- № 2012143196/11 ; zayavl. 09.10.2012 ;opubl. 10.03.2014, Byul. № 7. – 9 s. : il.
6. Pershic R.YA. Upravlyaemost' i upravlenie sudnom. – L.: Sudostroenie, 1983 – S. 272.
7. Sobolev G.V. Upravlyaemost' korablya i avtomatizaciya sudovozhdeniya.– L.: Sudostroenie, 1976.– S. 478.
8. Spravochnik po teorii korablya. V 3 t. T. 3 / pod red. YA. I. Vojtkunskogo. – L.: Sudostroenie, 1985. – 544 s.
9. Tumashik, A. P. Matematicheskaya model' burovogo sudna, uderzhivaemogo v zadannoj toчке morya / A. P. Tumashik; CNII "Rumb" // Voprosy sudostroeniya : nauch.-tekhn. sb. – 1980. – Vyp. 24. – S. 44–56. – (Ser. "Proektirovaniye sudov").
10. Tumashik, A. P. Raschet gidrodinamicheskikh harakteristik sudna pri manevrirovanii / A. P. Tumashik // Sudostroenie. – 1978. – № 5. – S. 13–16.
11. Yudin YU.I., Kondrat'ev S.I., Boran-Keshish'yan A.L., Holichev S.N., Glinskaya I.V. Mathematical modeling of tanker broadside motion controlled on the basis of deviations from the aimed// line Morskije intellektual'nye tekhnologii.– 2018.– № 1-3 (41).– S. 228-232.