

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-17-24

A MODEL OF VESSEL MOTION FOR DEAD RECKONING

V. V. Deryabin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

A 4-DOF vessel motion model for dead reckoning purposes is developed. The model is based on a system of nonlinear equations of vessel motion in calm water derived for the SI75 container ship. The model additionally contains wind and wave influences. Wind is assumed to be constant for the velocity and direction. Waves are modelled as wind waves and irregular and assumed to be long-crested. Their direction equals wind direction. Only second-order wave disturbances (wave drift) are taken into account. They are determined on the basis of coefficients calculated by means of hydrodynamic software for ideal fluid. The model is programmed in the Scilab. Parameters of turning ability are determined and compared then with normative values governed by the IMO. A symmetric property test is proposed to validate the adequacy of the model. This algorithm supposes that sequences of rudder deflection, initial heading and true wind direction values are initially formed. The true wind direction and initial heading values may be of the same or reciprocal direction, or create an angle of 90 degrees. Inserted cycles for the elements of the above sequences are carried out, and matrices of end-of-time coordinates for each maneuver are calculated. Some of the matrices are transformed, and symmetric property conditions are formulated in a matrix form. The influence of time step value on a model output is studied. The maximum value of the distance between appropriate points of the trajectories during a maneuver is a criterion of their difference.

Keywords: vessel track dead reckoning, vessel motion model, differential equations, symmetric property test, Scilab.

For citation:

Deryabin, Victor V. "A model of vessel motion for dead reckoning." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.1 (2022): 17–24. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-17-24.

УДК 656.61.052:527.61

МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ СУДНА ДЛЯ СЧИСЛЕНИЯ ПУТИ

В. В. Дерябин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Разработана модель движения судна с четырьмя степенями свободы, позволяющая решить задачу определения координат судна в режиме счисления пути. Модель, основанная на нелинейных уравнениях движения судна в условиях тихой воды, составленных для контейнеровоза SI75, дополнительно учитывает воздействия со стороны ветра и волнения. Ветер моделируется постоянным по скорости и направлению, волнение — как ветровое и нерегулярное с длинными гребнями, направление которого совпадает с направлением ветра. Учитываются только составляющие волновых воздействий второго порядка (волновой дрейф), определяемые на основе данных в виде коэффициентов, полученных с использованием гидродинамических программ для идеальной жидкости. Модель реализована в среде разработки Scilab. Для проверки адекватности ее работы определялись характеристики поворотливости, которые затем сравнивались с нормативными значениями, установленными ИМО. Предложен тест симметричности модели движения, позволяющий судить о ее адекватности. Алгоритм тестирования симметричности предполагает формирование последовательностей значений угла перекладки руля, начального курса судна и направления истинного ветра. Направление ветра и начальный курс могут либо совпадать, либо быть противоположно направленными, либо образовывать угол 90°. По элементам указанных последовательностей организуются вложенные циклы, на каждой итерации которых формируются матрицы координат судна на момент окончания маневра. Над некоторыми матрицами выполняются преобразования и формулируются условия в матричной форме, соответствующие симметричности маневров. Исследована зависимость результата

работы модели от временного шага дискретизации. Критерием различия расчетных траекторий является наибольшее значение модуля невязки между ними в течение периода плавания.

Ключевые слова: счисление пути судна, модель движения судна, дифференциальные уравнения, тест симметричности, Scilab.

Для цитирования:

Дерябин В. В. Модель движения судна для счисления пути / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 17–24. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-1-17-24.

Введение (Introduction)

В процессе разработки новых алгоритмов счисления, основанных, например, на использовании теории нейронных сетей [1]–[3] или нечетких множеств, всегда возникает задача моделирования движения судна для получения необходимого набора учебных данных, а также для проверки работоспособности предлагаемых алгоритмов. Для задач обучения нейронных сетей и гибридных нейро-нечетких систем необходима модель, которая, с одной стороны, работает достаточно быстро для того, чтобы получить необходимое количество учебных образцов в пределах разумного периода времени, а с другой стороны, наряду с быстродействием модель также должна обладать удовлетворительным уровнем адекватности и учитывать основные закономерности движения судна.

Развитие вычислительной техники в последние десятилетия определило формирование методов вычислительной гидродинамики (CFD — Computational Fluid Dynamics) в области решения задач моделирования движения судна. Одной из популярных задач CFD является решение уравнений Навье — Стокса для различных условий плавания, включающих граничные условия и модели турбулентности. Решение задач CFD выполняется при помощи специальных программ (например, FLOW-3D, SHIPFLOW, NUMECA, OpenFOAM и др.). Основным недостатком CFD-технологий является чрезмерная требовательность к вычислительным ресурсам, что делает их малоприменимыми для получения больших наборов учебных данных, характеризующих длительное плавание судна в различных условиях. Более быстрые решения получаются с использованием численных методов, основанных на теории идеальной жидкости, использующей понятие *потенциала скорости*. Среди программных продуктов, реализующих данные алгоритмы, известны WAMIT, ShipX (Veres), SEAWAY и др. Тем не менее такие расчеты также требуют значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет их применение для решения задач формирования необходимого набора учебных данных.

Одним из вариантов решения проблемы ресурсоемких вычислений для каждого момента времени является использование амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик качки судна, которые определяются заранее на основе расчетов гидродинамических программ. Такой подход предлагается, например, в работах [4]–[6]. При этом построенные на основе таких характеристик модели, как правило, учитывают либо слишком много, либо слишком мало степеней свободы и факторов, поэтому модели счисления для формирования больших наборов данных, готовой к использованию, как таковой нет. Существует также отечественные исследования, посвященные разработке математической модели движения судна в условиях волнения (см., например, [7], [8]), но они также не в полной мере соответствуют заявленным требованиям.

В рамках настоящего исследования выполнен синтез математической модели движения маневрирующего судна в условиях ветра и волнения, которая соответствует задаче получения больших объемов учебных данных в приемлемый период времени вычислений при сохранении достаточного уровня адекватности.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Уравнения движения судна. В качестве основы была выбрана нелинейная модель контейнера S175, включающая систему уравнений [9]:

$$\begin{aligned}
 (m + m_x) \frac{dV_x}{dt} - (m + m_y) V_y r &= X; \\
 (m + m_y) \frac{dV_y}{dt} + (m + m_x) V_x r + m_y \alpha_y \dot{r} - m_y l_y \ddot{\theta} &= Y; \\
 (I_z + I_{zz}) \dot{r} + m_y \alpha_y \dot{V}_y &= N - Y x_G; \\
 (I_x + I_{xx}) \ddot{\theta} - m_y l_y \dot{V}_y - m_x l_x V_x r + mgh\theta &= K,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где X, Y, N, K — соответствующие силы и моменты; V_x, V_y — продольная и поперечная составляющие относительной скорости судна; r — угловая скорость поворота вокруг вертикальной оси; m — масса судна; m_x, m_y — присоединенные массы; I_x, I_z — моменты инерции вокруг продольной и вертикальной осей соответственно; I_{xx}, I_{zz} — присоединенные моменты инерции; x_G — абсцисса центра масс судна; α_y — абсцисса присоединенной массы m_x ; l_x — аппликата присоединенной массы m_x ; l_y — аппликата присоединенной массы m_y ; θ — угол крена; h — метацентрическая высота, g — ускорение свободного падения.

Силы и моменты в уравнениях (1) включают в общем случае все воздействия, за исключением гидродинамических сил инерционной природы, которые фигурируют в левых частях уравнений. Кинематические уравнения используются для движения судна в плоскости, касательной к поверхности эллипсоида или геоида при условии адекватной аппроксимации его поверхности (см., например, [10]).

Силовые воздействия со стороны ветра были включены в силы X, Y и момент N в соответствии с работой [11]. Силовые воздействия со стороны волнения учитывались только для сил второго порядка (сил волнового дрейфа) в соответствии формулой [5]:

$$\tau_2^{\text{dof}} = \sum_{k=1}^{N_\omega} \rho g |F_2^{\text{dof}}(\omega_k, \beta)| 2S(\omega_k) \Delta\omega, \tag{2}$$

где $S = S(\omega_k)$ — спектральная плотность нерегулярного волнения; ω — кажущаяся круговая частота волнения; β — курсовой угол волнения; ρ — плотность морской воды; N_ω — количество частот, в которых вычисляются дискретные значения спектральной плотности $S(\omega_k)$; dof = 1, 2, 6 — индексы степени свободы (продольные, поперечные силы и момент вокруг вертикальной оси); $|F_2^{\text{dof}}(\omega_k, \beta)|$ — амплитуда передаточной функции сил волнового дрейфа, определяемая на основе расчетов программ численной гидродинамики.

Используемая модель нерегулярного волнения с прямыми гребнями волн (Long-Crested Waves), возможно, в большей степени соответствует относительно постоянным значениям сил волнового дрейфа, чем модель с короткими гребнями волн (Short-Crested Waves), так как по формуле (2) определяются, как правило, усредненные воздействия. Более того, модель с короткими гребнями требует больше времени для расчетов, так как для каждого значения частоты ω_k добавляется еще внутренняя сумма по случайным курсовым углам, отличающимся от генерального курсового угла.

В качестве спектра волнения используется спектр Пирсона – Московича:

$$S(\omega) = 0,0081g^2 \omega^{-5} \exp\left[-0,74(\omega V_r / g)^{-4}\right], \tag{3}$$

где V_r — скорость истинного ветра на высоте 19,5 м.

Связь между значительной высотой волнения $h_{1/3}$ и V_r устанавливается по известной формуле

$$h_{1/3} = (2,06 / g^2) V_r^2, \tag{4}$$

основанной на экспериментальных данных.

Программная реализация модели движения судна. За основу была взята MSS-toolbox, разработанная для реализации в MATLAB (Т. I. Fossen and Т. Perez (2004). Marine Systems Simulator (MSS) URL: <https://github.com/cybergalactic/MSS>). Инструмент включает набор m -скриптов, файлов SIMULINK, а также документацию по их использованию. В рамках текущего исследования

использовались следующие файлы MSS-toolbox: container.m, blendermann94.m, S175.mat (включает амплитуды передаточной функции для определения сил волнового дрейфа). Файлы, содержащие *m*-код, были преобразованы в код, запускаемый в среде моделирования Scilab (v. 6.1.1), используемой в дальнейшем. Самостоятельно были разработаны функции, вычисляющие силы волнового дрейфа и значения спектра волнения по формуле (3).

Выход функции blendermann94.m дает значения сил в системе единиц СИ, а выражения для сил в функции container.m составлены в безразмерном виде. В связи с этим полученные силовые воздействия со стороны ветра были поделены на величину $0,5\rho U^2 L^2$, где $U^2 = V_x^2 + V_y^2$ — квадрат модуля относительной скорости судна в горизонтальной плоскости; L — длина судна. Момент ветровых воздействий вокруг вертикальной оси был поделен на величину $0,5\rho U^2 L^3$. Аналогичные процедуры были выполнены в отношении воздействий со стороны волнения.

Амплитуды волнового дрейфа $|F_2^{\text{dof}}(\omega_k, \beta)|$ представлены в виде поля структуры vessel.driftrc.amr, а соответствующие им частоты — в виде vessel.driftrc.w. При использовании амплитуд vessel.driftrc.amr следует учитывать, что они уже умножены на величину ρg , т. е. при реализации соотношений (2) операцию умножения на ρg выполнять не нужно. Иными словами, $\rho g \equiv 1$ в соотношениях (2).

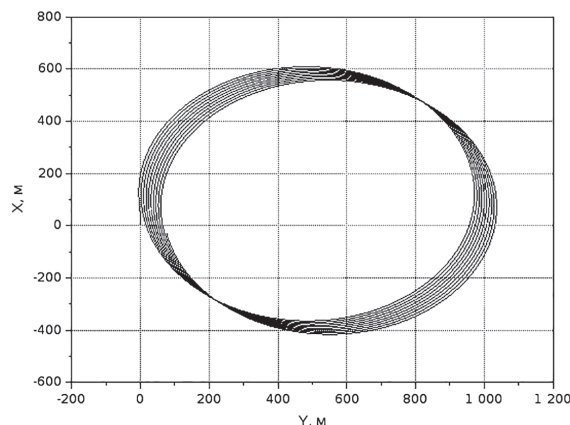
В качестве алгоритма численного интегрирования был использован метод Рунге – Кутты четвертого порядка точности. Временная дискретность модели составляет 0,1 с.

Проверка адекватности модели. Для проверки адекватности синтезированной модели были предприняты следующие действия.

Во-первых, рассматривался маневр набора скорости от нуля с частотой вращения винта 118,64 об/мин. Скорость истинного ветра равна нулю. Начальный курс 0. Наибольшее значение скорости составило 23,94 уз, а по данным [9], число Фруда при заданных оборотах должно составлять 0,3, т. е. 24,16 уз. При этом остальные две составляющие скорости равны нулю в течение всего времени плавания (один час). Незначительное различие вызвано, по-видимому, учетом влияния ветра в модели.

Во-вторых, рассматривался маневр циркуляции судна с метацентрической высотой 0,3; 0,5 и 3 м. Начальная скорость соответствует максимальной при оборотах 118,64 об/мин на тихой воде. Угол перекадки руля составляет 15° на правый борт. По результатам визуальной оценки траектории кривых циркуляции совпадают с приведенными в [9] с точностью ± 100 м.

В-третьих, были определены некоторые маневренные характеристики судов в соответствии с Резолюцией ИМО MSC.137(76). В качестве тестовой скорости была выбрана скорость, которую развивает судно при частоте вращения винта, равной 118,64 об/мин. При циркуляции с переложением на правый борт рулем (35°) были получены следующие значения: выдвиг — 2,6 длины корпуса; тактический диаметр — 3,4 длины корпуса, что соответствует требованиям данной резолюции. Также был проведен тест начальной поворотливости. При перекадке руля на 10° судно прошло 1,0 длину корпуса за время до отклонения от первоначального курса на 10° , что также соответствует требованиям ИМО. Таким образом, модель удовлетворяет международным требованиям в плане поворотливости.



Влияние волнения на траекторию движения судна

В-четвертых, была проведена качественная оценка работы блока волнения. На основе приведенного на рисунке (с. 20) сравнения траекторий движения судна в течение часа с отключенным и работающим блоком расчета волновых воздействий (ветровые воздействия не учитываются, направление бега волн с Севера на Юг) можно сделать вывод о том, что влияние сил второго порядка не противоречит реальному положению дел (судно сносит по направлению бега волн).

Результаты (Results)

Был проведен тест симметричности в условиях влияния ветра и волнения, алгоритм проведения которого заключается в следующем:

1. Задаются последовательности значений угла перекладки руля $\{\Delta\}_{i=3} = \{-35 \quad 0 \quad +35^\circ\}$, начальных курсов $\{K\}_{j=4} = \{0 \quad 90 \quad 180 \quad 270^\circ\}$, направлений истинного ветра $\{K_{tr}\}_{k=4} = \{0 \quad 90 \quad 180 \quad 270^\circ\}$, а также время плавания на циркуляции T_{\max} .

2. По элементам указанных в пп. 1 трех последовательностей организуются вложенные циклы, на каждой итерации которых заполняются следующие матрицы: $X_+(i, j)$ — матрица абсцисс центра тяжести судна на последний момент времени плавания T_{\max} при циркуляции на правый борт; $Y_+(i, j)$ — матрица ординат судна на последний момент времени при циркуляции на правый борт; $X_-(i, j), Y_-(i, j)$ — аналогичные матрицы для случая циркуляции в сторону левого борта; $X_0(i, j), Y_0(i, j)$ — матрицы для случая руля в диаметральной плоскости. Например, $Y_-(i, j) = 100$ м означает, что на момент времени T_{\max} в процессе циркуляции на левый борт судно находилось на расстоянии, равном 100 м справа от оси абсцисс.

3. Определяются вспомогательные матрицы \tilde{X}_+ и \tilde{X}_- . Элементы матрицы \tilde{X}_+ задаются следующим образом:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_+(2,1) &= X_+(1,4); \tilde{X}_+(1,4) = -X_+(2,1); \\ \tilde{X}_+(2,2) &= X_+(1,1); \tilde{X}_+(1,1) = -X_+(2,2); \\ &\dots \\ \tilde{X}_+(2,4) &= X_+(1,3); \tilde{X}_+(1,3) = -X_+(2,4); \\ \tilde{X}_+(4,1) &= X_+(3,4); \tilde{X}_+(3,4) = -X_+(4,1); \\ \tilde{X}_+(4,2) &= X_+(3,1); \tilde{X}_+(3,1) = -X_+(4,2); \\ &\dots \\ \tilde{X}_+(4,4) &= X_+(3,3); \tilde{X}_+(3,3) = -X_+(4,4). \end{aligned}$$

Аналогично задаются элементы матрицы \tilde{X}_- .

4. Определяются наибольшие значения модулей элементов матриц $\tilde{X}_+ - Y_+$, $\tilde{X}_0 - Y_0$ и $\tilde{X}_- - Y_-$, которые в идеальном случае равны нулю. Отклонение от нуля является характеристикой несимметричности, выраженной в единицах длины на момент времени окончания циркуляции T_{\max} .

Тест несимметричности был проведен для $T_{\max} = 1$ ч плавания. Скорость истинного ветра составляла 15 м/с, значительная высота волнения определялась в соответствии с выражением (4). Наибольшие модули элементов матриц, указанных в пп. 3, составили ноль (округление координат до 0,1 м), что свидетельствует о том, что симметричность модели обеспечена. Матрица X_+ в качестве примера представлена в форме табл. 1. При проведении теста набор случайных частот используется один и тот же, в противном случае заведомо не будет обеспечена симметричность.

Таблица 1

Матрица X_+ (абсциссы, м)

Начальный курс, °	Направление ветра, °			
	0	90	180	270
0	-518,7	154,3	693,1	21,6
90	-606,7	66,8	605,9	-67,4
180	-693,1	-21,6	518,7	-154,3
270	-605,9	67,4	606,7	-66,8

Таким образом, исходя из сохранения симметричности, существует определенная степень уверенности в адекватности разработанной модели. Модель зависит от множества параметров, важнейшим из которых является временной шаг модели. Очевидно, что указанный параметр оказывает влияние как на точность, так и на быстродействие программы, реализующей алгоритм модели.

Исследуем зависимость точности модели от Δt . В качестве тестовой ситуации рассмотрим циркуляцию с углом перекладки руля $+15^\circ$ в условиях северного ветра скоростью 15 м/с при начальной скорости судна 22,6 уз. Запустим модель несколько раз для $T_{\max} = 1$ ч с различными значениями Δt (табл. 2).

Таблица 2

Невязки между траекториями при различном шаге модели Δt

$\Delta t, c$	0,01	0,05	0,1	0,2	0,5	1
0,01	0	8,8	18,8	38,5	109,2	226,7

Обсуждение (Discussion)

Разработанная модель движения судна может использоваться для получения координат судна, осуществляющего плавание в режиме счисления. Причем счисление понимается в широком смысле: это не только учет дрейфа судна, но и прогнозирование продольной и угловой скорости судна, так называемое *аварийное счисление*, актуальное при выходе из строя лага и / или гирокомпаса. Модель учитывает силы, действующие на судно со стороны ветра и волнения. При этом учитываются только силы второго порядка, т. е. силы волнового дрейфа, а высокочастотные составляющие первого порядка (силы Крылова – Фруда и дифракционные силы) не учитываются, что логично, так как при таком подходе отсутствует необходимость использования фильтрации волнового рыскания судна.

Для проверки адекватности был выполнен ряд мероприятий, включающих расчет некоторых маневренных характеристик и сравнение их с нормативными значениями ИМО, а также тест симметричности. Полученные результаты которых свидетельствуют об адекватности модели. Тест симметричности использует матричную интерпретацию, что удобно при организации тестирования в таких средах моделирования, как MATLAB, Scilab и др. Также для проверки адекватности использовались результаты, полученные ранее другими авторами.

На основе результатов расчетов при работе модели с различным значением временного шага можно сделать вывод о том, что указанная величина является критичной для реализации модели движения судна. С одной стороны, большие значения шага позволяют ускорить моделирование, обеспечивая возможность получения больших объемов данных за сравнительно малый период времени вычислений, а с другой, значения шага дискретизации должны быть также достаточно малы, чтобы обеспечить необходимое качество моделирования в смысле адекватности. Результаты, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о том, что шаг 0,1 с является вполне пригодным для использования в модели с точки зрения компромисса между адекватностью и объемом вычислений.

Заключение (Conclusion)

Предложена модель движения судна с четырьмя степенями свободы. При ее разработке ставилось условие, в соответствии с которым она должна не быть требовательной к вычислительным ресурсам, но в то же время обеспечивать необходимый уровень адекватности. Модель учитывает влияние сил со стороны ветра и волнения. Силы волнения учитываются только в смысле составляющих второго порядка (волновой дрейф), высокочастотные компоненты первого порядка не учитываются, что допускается для задачи моделирования счисления пути судна. Последнее понимается в более широком смысле (не только расчет скорости дрейфа), когда возникает необходимость определения продольной составляющей относительной скорости и угловой скорости поворота (аварийные режимы). Модель реализована в среде разработки Scilab на основе некоторых функций и файлов из MSS-toolbox.

Для проверки адекватности модели проводились тесты соответствия требованиям ИМО в плане поворотливости. Был предложен тест проверки модели на симметричность, включающий

условия соответствия на основе теории матриц. Такая формализация удобна для использования в средах моделирования наподобие MATLAB, Scilab и др. Было проведено исследование зависимости результата работы алгоритма модели от временного шага дискретизации. На основе сравнения траекторий для рассмотренных значений шага можно сделать вывод, что дискретность 0,1 с является приемлемой для моделирования, так как отличия полученного результата от результатов, соответствующих меньшей дискретности, незначительны.

Перспективой дальнейших исследований является совершенствование модели в плане повышения адекватности и уменьшение реализующей ее вычислительной сложности алгоритма. Полезным может быть также совершенствование моделирования гидрометеорологической обстановки, учитывающей не только нерегулярность волнения, но и характер поведения ветра и наличие волн зыби. Возможно, также будет целесообразным использование кинематических уравнений движения судна на поверхности эллипсоида вместо уравнений на плоскости. Отдельного внимания заслуживают исследования сходимости алгоритмов численного интегрирования, входящие в состав модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дерябин В. В.* Обобщенная нейросетевая модель счисления пути судна / В. В. Дерябин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 3. — С. 423–435. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-423-435.
2. *Deryabin V. V.* Neural Networks Based Prediction Model for Vessel Track Control / V. V. Deryabin // Automatic Control and Computer Sciences. — 2019. — Vol. 53. — Is. 6. — Pp. 502–510. DOI: 10.3103/S0146411619060038.
3. *Skulstad R.* Dead Reckoning of Dynamically Positioned Ships: Using an Efficient Recurrent Neural Network / R. Skulstad, G. Li, T. I. Fossen, B. Vik, H. Zhang // IEEE Robotics & Automation Magazine. — 2019. — Vol. 26. — Is. 3. — Pp. 39–51. DOI: 10.1109/MRA.2019.2918125.
4. *Bielicki S.* Prediction of ship motions in irregular waves based on response amplitude operators evaluated experimentally in noise waves / S. Bielicki // Polish Maritime Research. — 2021. — Vol. 28. — Is. 1. — Pp. 16–27. DOI: 10.2478/pomr-2021-0002.
5. *Fossen T. I.* Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control / T. I. Fossen. — 2nd edition. — Hoboken, NJ: Wiley, 2021. — 736 p.
6. *Skandali D.* Calibration of response amplitude operators based on measurements of vessel motions and directional wave spectra / D. Skandali, E. Lourens, R. H. M. Ogink // Marine Structures. — 2020. — Vol. 72. — Pp. 102774. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102774.
7. *Таранов А. Е.* Численное моделирование динамики судна в задачах управляемости и качки / А. Е. Таранов, А. Э. Блищик // Труды Крыловского государственного научного центра. — 2018. — № 2 (384). — С. 29–38. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-29-38.
8. *Ваганов А. Б.* Динамика маневрирующего судна в условиях волнения моря / А. Б. Ваганов, И. Д. Краснокутский // Транспортные системы. — 2018. — № 1 (7). — С. 25–38. DOI: 10.46960/62045_2018_1_25.
9. *Son K.* On the coupled motion of steering and rolling of a high speed container ship / K. Son, K. Nomoto // Journal of the Society of Naval Architects of Japan. — 1981. — Vol. 1981. — Is. 150. — Pp. 232–244. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1981.150_232.
10. *Ююкин И. В.* Аппроксимация геоида методами сплайн-функций / И. В. Ююкин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 2. — С. 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.
11. *Blendermann W.* Parameter identification of wind loads on ships / W. Blendermann // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. — 1994. — Vol. 51. — Is. 3. — Pp. 339–351.

REFERENCES

1. Deryabin, Victor V. “A generalized model of a vessel dead reckoning based on neural networks.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.3 (2020): 423–435. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-3-423-435.

2. Deryabin, Victor Vladimirovich. “Neural Networks Based Prediction Model for Vessel Track Control.” *Automatic Control and Computer Sciences* 53.6 (2019): 502–510. DOI: 10.3103/S0146411619060038.
3. Skulstad, Robert, Guoyuan Li, Thor I. Fossen, Bjornar Vik, and Houxiang Zhang. “Dead reckoning of dynamically positioned ships: Using an efficient recurrent neural network.” *IEEE Robotics & Automation Magazine* 26.3 (2019): 39–51. DOI: 10.1109/MRA.2019.2918125.
4. Bielicki, Sebastian. “Prediction of ship motions in irregular waves based on response amplitude operators evaluated experimentally in noise waves.” *Polish Maritime Research* 28.1 (2021): 16–27. DOI: 10.2478/pomr-2021-0002.
5. Fossen, Thor I. *Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control*. 2nd edition. Hoboken, NJ: Wiley, 2021.
6. Skandali, D., E. Lourens, and R.H.M. Ogink. “Calibration of response amplitude operators based on measurements of vessel motions and directional wave spectra.” *Marine Structures* 72 (2020): 102774. DOI: 10.1016/j.marstruc.2020.102774.
7. Taranov, Andrey Ye., and Artem E. Blishchik. “Numerical simulation of ship dynamics in terms of maneuverability and motions.” *Transactions of the Krylov State Research Centre* 2(384) (2018): 29–38. DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-29-38.
8. Vaganov, A.B., and I. D. Krasnokutskii. “Dinamika manevriruyushchego sudna v usloviyakh volneniya moray.” *Transportnye sistemy* 1(7) (2018): 25–38. DOI: 10.46960/62045_2018_1_25.
9. Son, Kyoungho, and Kensaku Nomoto. “On the coupled motion of steering and rolling of a high speed container ship.” *Journal of the Society of Naval Architects of Japan* 1981.150 (1981): 232–244. DOI: 10.2534/jjasnaoe1968.1981.150_232.
10. Yuyukin, Igor V. “Geoid approximation by spline functions methods.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiralov S. O. Makarova* 12.2 (2020): 262–271. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-2-262-271.
11. Blendermann, Werner. “Parameter identification of wind loads on ships.” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 51.3 (1994): 339–351.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дерябин Виктор Владимирович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Deryabin, Victor V. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation
e-mail: gmavitder@mail.ru, deryabinvv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 6 декабря 2021 г.
Received: December 6, 2021.