

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-61-73

EVALUATION OF STABILITY OF SEA VESSEL CONTOUR TO CAPSIZING DUE TO SOLITARY WAVE

M. V. Kitaev¹, V. M. Dorozhko²

1 — Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

2 — Institute of Automation and Control Processes, Far Eastern Branch
of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

The article is devoted to numerical simulating of stability in the shallow water of sea vessel contours with displacement from 300 to 3000t to capsizing due to breaking solitary wave. Based on the approximation of 2nd order solutions of the Korteweg-de Vries equation a solitary wave generation was made in the computational domain. It was shown that in a model with a horizontal bottom a solitary wave does not break. When meeting with such solitary wave contour is not capsized. The numerical model has a bottom slope of 3.8°. The simulation used solitary waves with heights of 12m, 18m, 24m and the sea depth of 20m, 30m, 40m in the beginning of the computational domain, respectively. It was found that the solitary wave height from 12m to 24m may capsize the contour of vessels up to 1000t and 3000t, respectively. Capsizing of contour can occur in the left or right board, if the contour would be at the beginning or in the end of breaking zone of the solitary wave, respectively. We calculated the diagram of the dependence of the ship's roll angle from time. The diagram parameters are the displacement of the vessel, depth of water, the height of the solitary wave, the relative position of the contour and a solitary wave at the time of its breaking. The coincidence of the contour position with the middle of breaking zone of the solitary wave leads to suppression of the further development of the breaking process and exclude the capsizing of contour with displacement of 3000t. To prevent capsizing vehicle due to solitary wave skipper should avoid swimming or anchorage in the water of the shelf with depth less than 40m.

Keywords: solitary wave, computational fluid dynamics, vessel contour, vessel capsizing, roll angle, slope of the bottom, wave breaking.

For citation:

Kitaev, Maksim V., and Veniamin M. Dorozhko. "Evaluation of stability of sea vessel contour to capsizing due to solitary wave." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.1 (2017): 61–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-61-73.

УДК 004.942

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ КОНТУРА МОРСКОГО СУДНА К ОПРОКИДЫВАНИЮ УЕДИНЕННОЙ ВОЛНОЙ

М. В. Китаев¹, В. М. Дорожко²

1 — Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

2 — Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН,
Владивосток, Российская Федерация

В статье выполнено численное моделирование устойчивости на мелком море контуров морских судов водоизмещением от 300 до 3000 т к опрокидыванию обрушивающейся уединенной волной. На основе аппроксимации 2-го порядка решения уравнения Кортевега–де Фриза выполнена генерация уединенной волны в расчетной области. Показано, что в модели с горизонтальным дном обрушения уединенной волны не происходит. При встрече с такой уединенной волной контур не опрокидывается. В численной модели предусмотрен уклон дна в 3,8°. В процессе моделирования использовались уединенные волны с высотой 12 м, 18 м и 24 м, при этом глубины моря в начале уклона дна составили 20 м, 30 м и 40 м соответственно. Установлено, что уединенные волны высотой 12 м и 24 м могут опрокинуть контуры судов водоизмещением до 1000 т и 3000 т соответственно. При этом опрокидывание контура может произойти на левый или правый борт, если контур окажется в начале или в конце зоны обрушения уединенной волны. Получены диаграммы зависимостей угла крена контуров от времени. Параметрами диаграмм являются водоизмещение судна, глубина моря, высота уединенной волны, взаимное положение контура и уединенной волны

в момент её обрушения. Совпадение положения контура с серединой зоны обрушения уединенной волны приводит к подавлению дальнейшего развития процесса обрушения и исключает опрокидывание контура водоизмещением 3000 т. Для предупреждения опрокидывания судов уединенными волнами судоводителям следует избегать плавания или стоянки судов на открытых акваториях шельфа с глубиной менее 40 м.

Ключевые слова: уединенная волна, вычислительная гидродинамика, контур судна, опрокидывание контура судна, угол крена, уклон дна, обрушение волны.

Для цитирования:

Китаев М. В. Оценка устойчивости контура морского судна к опрокидыванию уединенной волной / М. В. Китаев, В. М. Дорожко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 1. — С. 61–73. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-1-61-73.

Введение

В последнее время большое внимание уделяется исследованию «волн-убийц», представляющих серьезную опасность для морских судов. Только в течение 26 лет (1968 – 1994 гг.) от встречи с «волнами-убийцами» погибло 22 супертанкера [1]. С целью получения данных о частоте возникновения «волн-убийц» и разработки предложений по безопасности морских судов были выполнены международные проекты «MaxWave» (2000 – 2003 гг.) [2] и «Extreme Seas» (2009 – 2012 гг.), см. сайт <https://www.hse.ru/data/2011/10/12/1270460467/ES%202011sep17.pdf>, которые выявили высокую частоту возникновения «волн-убийц». Для координации отечественных исследований в 2012 г. был создан Научный центр по изучению «волн-убийц». За рубежом аналогичными исследованиями занимается «Rogue Waves Research Project (MULTIWAVE)» (сайт в Интернете <http://www.ergcmultiwave.eu>), в состав которого от России входит академик В. Е. Захаров. Несмотря на интенсивное изучение этого вопроса, теория «волн-убийц» далека от своего завершения [3]. Последнее время уединенные волны стали рассматриваться как одиночные «волны-убийцы» [4], [5], возникающие вследствие ветрового волнения в условиях мелкого моря. Всё это актуализирует изучение уединенных волн по различным направлениям, среди которых важное значение для безопасности морского судоходства имеет оценка устойчивости судов к опрокидыванию уединенной волной.

Уединенные волны представляют собой особый вид движения жидкости. Впервые волну подобного рода описал Дж. Рассел, охарактеризовав ее как *одиночное возвышение, движущееся вдоль канала без изменения формы и скорости* [6]. Представители научной общественности с недоверием отнеслись к открытию ученого. Так, например, Эйри, разработавший для поверхностных волн теорию мелкой воды, отрицал возможность движения волны без изменения её формы. Согласно разработанной им теории, волны конечной амплитуды, распространяясь на мелкой воде, изменяют свою форму. Причина разногласий состояла в том, что Эйри в своей теории не учитывал дисперсионные эффекты, имеющие для распространения уединенной волны принципиальное значение. Буссинеск и Рэлей обосновали математически возможность существования уединенных волн в мелководных каналах путем учета как дисперсионных эффектов, так и конечности амплитуды. Учет конечности амплитуды создает условия для возникновения нелинейных процессов, выражающихся в искажении формы волны в виде увеличения крутизны её фронта. Дисперсионные эффекты выражаются в преобладании скорости длинноволновой части спектра уединенной волны, что, наоборот, снижает крутизну фронта. При достижении баланса между этими двумя процессами уединенная волна распространяется без изменения формы.

Кортевег и де Фриз вывели уравнение, решение которого описывает уединенную волну при допущении малости параметров нелинейности и дисперсии и тем самым завершили дискуссию по поводу реальности уединенной волны. Существует большое количество современных работ прикладной направленности, среди которых, например, разработка способов генерации уединенных волн [7], [8], исследование их взаимодействия с неподвижными объектами [9], [10] и наката на береговой уклон [11], изучение взаимодействия уединенных волн на мелководье [12]. Следует отметить отсутствие работ, связанных с изучением воздействия уединенных волн на плавающие морские объекты.

Постановка и описание задачи

В настоящее время опасность «волн-убийц» подтверждается как статистикой гибели судов [1], так и численными исследованиями [13]. Несмотря на то, что уединенные волны рассматриваются как «волны-убийцы», в настоящее время отсутствуют материалы наблюдений или вычислений, подтверждающие опасность уединенных волн для морских судов. Особенность уединенной волны состоит в том, что на акватории с горизонтальным дном она не обрушается, так как представляет собой движущееся возвышение малой крутизны, длина которого во много раз превышает его высоту. Крутизна ($S = \pi A/L$) уединенной волны, например, высотой $A = 24$ м и соответствующей ей длиной $L = 599,4$ м на море с глубиной 40 м не превышает 0,16, в то время как опасность для морских судов представляют обрушающиеся «волны-убийцы» крутизной не менее 0,413 [13]. Следовательно, не обрушающаяся уединенная волна не должна представлять опасность для морских судов. Тем не менее даже небольшие по высоте поверхностные волны, например, от подводных землетрясений по мере движения к берегу порождают на мелководье огромную по высоте и разрушительной силе волну цунами. Аналогично при входе в шельфовую зону может возрастая как высота, так и крутизна уединенной волны, достигая значений, соответствующих обрушению её гребня [14]. Таким образом, имеются основания рассматривать уединенную волну как источник опасности для судов, выполняющих работы или находящихся на якорных стоянках акваторий мелкого моря. В связи с этим ставится задача выполнить численную оценку на мелком море устойчивости полноразмерных контуров шпангоутных сечений (в расчетах рассматривалось миделевое сечение судна) морских судов водоизмещением от 400 до 3000 т к опрокидыванию обрушающейся уединенной волной при вариации следующих параметров:

- массы контура;
- начальной высоты уединенной волны;
- начальной глубины моря;
- взаимного положения контура и уединенной волны в момент её обрушения.

Выбор сравнительно небольших по водоизмещению судов обусловлен фактом их эксплуатации в береговой зоне шельфа. Выбор глубины моря, высоты и длины уединенной волны выполнен с учетом ограничений, которые накладывает на указанные величины уравнение Кортевега–де Фриза [4], а именно: параметр нелинейности $\alpha = A/H$ должен быть меньше единицы, а дисперсии $\beta = H^2/L^2$ — много меньше единицы, где A и L — соответственно высота и длина уединенной волны; H — глубина моря.

Для реализации поставленной задачи численная модель должна позволить формирование полноразмерного виртуального опытового бассейна, на поверхности которого в заданном месте, соответствующем зоне обрушения уединенной волны, устанавливается свободно плавающий контур. С целью обеспечения возрастания крутизны уединенной волны предусматривается уменьшение глубины воды по мере движения волны за счет уклона дна бассейна. В процессе вычислений должны регистрироваться следующие параметры контура: время; положение центра тяжести; угол крена; силы, приложенные к центру тяжести контура, обеспечивающие его перемещение; момент сил, приложенных к контуру, обуславливающий его крен. В качестве границы устойчивости контура принято значение крена в 60° [15], превышение которого свидетельствует об опрокидывании контура. Кроме того, в процессе вычислений предусматривается периодическая визуализация расчетной области для иллюстрации процессов движения контура и уединенной волны.

Как отмечалось ранее, в открытом море уединенная волна может иметь незначительную высоту. Однако по мере приближения к берегу, её высота увеличивается и достигает значений, соответствующих «волнам-убийцам». В связи с этим в настоящей работе рассматривается последний этап развития уединенной волны: движение и обрушение на акватории шельфа с уклоном дна.

Модельные представления и методы решения задачи

С развитием вычислительных средств наибольшую эффективность в сравнении с экспериментальными исследованиями в опытовых бассейнах приобретает *метод вычислительной гидро-*

динамики (CFD — *Computational Fluid Dynamics*). CFD-метод использует уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (RANS-уравнения — *Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations*) [10], имеющих вид:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{u'_i u'_j}) + \rho g,$$

где $\{i, j\} = 1, 2, 3$ — индексы переменных в абсолютной системе координат $ox_1x_2x_3$; u'_1, u'_2, u'_3 — флуктуации абсолютной скорости жидкости; u_1, u_2, u_3 — осредненные в масштабе флуктуаций значения абсолютной скорости; ρ и μ — соответственно плотность и физическая вязкость жидкости; t — время; p — давление; δ_{ij} — символ Кронекера; g — ускорение свободного падения; последний член в уравнении (2) — напряжение Рейнольдса, вычисленное в соответствии с моделью турбулентности $k - \omega$, SST (*Shear Stress Transport*); k — кинетическая энергия турбулентности; ω — удельная скорость диссипации.

Вычисления выполнены в расчетной области (рис. 1), представляющей собой виртуальный опытовый бассейн, в котором на поверхности жидкости расположен свободно плавающий контур 5 морского судна. Начало координат правой системы $oxyz$ совпадает с системой $ox_1x_2x_3$ уравнений (1) и расположено на дне бассейна в начале расчетной области. Ось oy направлена вверх, ось ox — горизонтально, ось oz перпендикулярна плоскости расчетной области и на рис. 1 не показана. С контуром связана правая система координат $o\xi\eta\zeta$, начало которой совпадает с центром тяжести контура. Оси $o\xi$, $o\eta$ и $o\zeta$ в начальный момент времени параллельны осям ox , oy и oz соответственно. Угол поворота контура относительно оси $o\zeta$ (на рис. 1 эта ось не показана) равен углу между осями oy и $o\eta$, а перемещение контура в горизонтальном или вертикальном направлении соответствует изменению расстояния между началами координат систем $oxyz$ и $o\xi\eta\zeta$ в указанных направлениях. Разбиение расчетной области сеточными элементами на рис. 1 не показано.

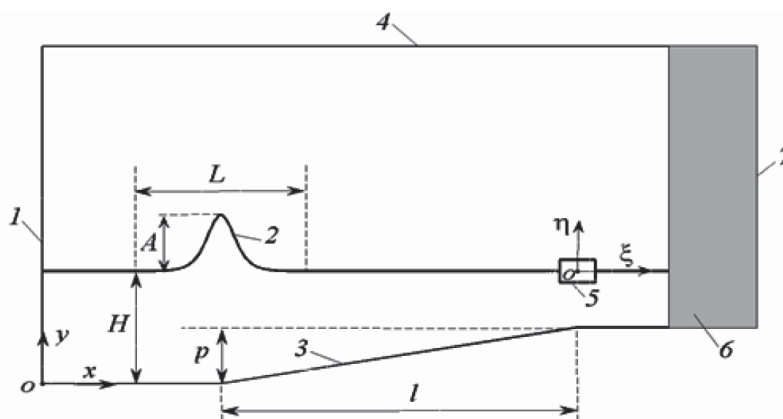


Рис. 1. Схема расчетной области:

- 1 — входная граница; 2 — начальный профиль уединенной волны; 3 — нижняя граница;
4 — верхняя граница; 5 — контур; 6 — область повышенного затухания волн; 7 — выходная граница;
 ox, y, z — система координат расчетной области; $o\xi, \eta, \zeta$ — система координат контура;
 A и L — соответственно высота и длина уединенной волны;
 H — глубина воды; p, l — параметры уклона дна

Численное решение системы уравнений (1) выполнено с применением следующих основных методов и алгоритмов [10]. Расчетная область разбивалась сеточными элементами, что позволило сформировать с помощью метода конечного объема разностный аналог системы уравнений RANSE, которая решалась методом Гаусса–Зейделя. Для вычисления давления жидкости применялся алгоритм PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*), который обеспечивал связь

между полями скорости, давления и выполнение уравнения неразрывности. Схемы второго порядка точности применены для дискретизации полей давления и скорости жидкости.

Часть расчетной области, в которой предполагалось движение контура, реализуемое с помощью метода 6DOF (*degrees of freedom* — в данной задаче реализовано движение контура с тремя степенями свободы — перемещение по осям ox , oy и поворот относительно оси oz), разбивалась треугольными сеточными элементами, допускающими их деформацию и перестройку по мере движения контура под действием уединенной волны. Остальная часть расчетной области разбивалась квадратными сеточными элементами. Дискретизация времени t выполнена с шагом Δt , выбор величины которого обеспечивал устойчивость вычислений. На каждом временном шаге Δt выполнялось вычисление векторов линейного $\mathbf{a}_G = \mathbf{F}_G/M_C$ и углового $\mathbf{\varepsilon}_G = \mathbf{M}_G/J_C$ ускорений контура, где $\mathbf{F}_G$ и $\mathbf{M}_G$ — векторы силы перемещения и момента сил вращения, вычисленные относительно центра тяжести контура, M_C и J_C — масса и момент инерции масс контура соответственно. Для соблюдения размерности вычисляемых сил и моментов условно принято, что толщина контура равна 1 м. На основе вычисленных ускорений в конце каждого временного шага Δt контур перемещался на величину вектора $\Delta \mathbf{l} = 0,5\mathbf{a}_G\Delta t^2$ и поворачивался на величину угла $\Delta \theta = 0,5\mathbf{\varepsilon}_G\Delta t^2$. Положение границы раздела «воздух – вода» определялось методом объема жидкости (VOF — *Volume of Fluid method*), согласно которому в каждом сеточном элементе, граничащем со свободной поверхностью, вычислялась доля жидкости, на основании которой геометрически строилась свободная поверхность на каждом шаге вычислений.

Для решения системы уравнений (1) требуется задание граничных и начальных условий. Граничные условия на нижней границе (см. рис. 1 — граница 3) расчетной области соответствуют условию непротекания, реализуемому нулевым значением нормальной компоненты скорости жидкости. На верхней открытой границе 4 обеспечено постоянство давления, равного атмосферному давлению воздуха. На левой вертикальной границе 1 расчетной области задавался вектор скорости ($\mathbf{V}$) втекающей жидкости, полученный из решения уравнения Кортевега – де Фриза в виде разложения в степенной ряд второго порядка относительно малого параметра нелинейности $\alpha = A/H$ (A — высота волны, H — глубина моря) [16] при условии малости параметра дисперсии $\beta = H^2/L^2$, $345L = H[\sqrt{0,75\alpha}(1 - 0,625\alpha)]^{-1}$ — длина уединенной волны. В соответствии с указанным решением выражения для профиля ζ и компонент скорости v_x и v_y вектора скорости ($\mathbf{V}$) уединенной волны имеют вид:

$$\frac{\zeta(x,t)}{H} = 1 + \alpha \operatorname{sech}^2 \vartheta - 0,75\alpha^2 (1 - \operatorname{sech}^2 \vartheta) \operatorname{sech}^2 \vartheta; \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_x(x,y,t)}{\sqrt{gH}} = & \zeta/H - 0,5\alpha^2 [1 + 6(y/H - 1) + 3(y/H - 1)^2] \operatorname{sech}^2 \vartheta + \\ & + 0,5\alpha^2 [1 + 9(y/H - 1) + 4,5(y/H - 1)^2] \operatorname{sech}^4 \vartheta; \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{v_y(x,y,t)}{\sqrt{gH}} = & \sqrt{3} \frac{y}{H} \alpha^{3/2} \operatorname{sech}^2 \vartheta \tanh \vartheta \left\{ 1 + \alpha [0,125 - y/H - 0,5(y/H - 1)^2] - \right. \\ & \left. - 0,5\alpha [1 - 6(y/H - 1) - 3(y/H - 1)^2] \operatorname{sech}^2 \vartheta \right\}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\vartheta = \frac{x - ct}{H} \sqrt{0,75\alpha}(1 - 0,625\alpha)$; $c = \sqrt{gH}(1 + 0,5\alpha - 0,15\alpha^2)$.

Граничные условия на поверхности жидкости 2 (см. рис. 1) представляют собой совокупность вычисленных скоростей и давления в каждой сеточной ячейке на границе раздела фаз вода/воздух. На правой вертикальной границе 7 расчетной области поддерживается постоянное давление, равное давлению воды. Для исключения отражения волн от выходной границы 7 в зоне 6 создана область с повышенным затуханием волн.

Начальные условия рассматриваемой системы уравнений (1) в момент $t = 0$ созданы путем инициализации расчетного пространства от входных скоростей (3) и (4) с учетом профиля ζ уединенной волны (2). В конце первого временного шага длительностью Δt вычислены положение и форма профиля поверхности воды, значения полей скорости, давления на границах и в расчетной области, которые становятся граничными и начальными условиями для решения на втором временном шаге, аналогично результаты вычисления в конце второго временного шага — граничными и начальными условиями для третьего шага и т. д. на протяжении всего процесса решения задачи.

В работе [17] систематизированы данные о характеристиках движения уединенной волны в расчетной области с уклонами дна 1:100, 1:35, 1:15 и 1:8. В моделях с уклоном 1:100 и 1:35 гребень уединенной волны обрушается в виде небольшого скатывающегося буруна на фронт волны. Для модели с уклоном 1:8 характерно быстрое убывание глубины воды, что исключает плавание судов в зоне обрушения уединенной волны. Согласно поставленной задаче, требуется выполнить оценку возможности опрокидывания контура уединенной волной, следовательно, необходимо выбрать такие параметры модели, которые формируют наибольшие динамические условия опрокидывания контура. В наибольшей степени этим условиям отвечает модель с уклоном дна 1:15, которая обеспечивает сочетание минимального угла уклона ($3,8^\circ$), т. е. максимально возможную глубину воды в зоне обрушения, с наиболее развитым процессом обрушения, при котором гребень уединенной волны падает в виде струи на подошву волны.

В этих условиях максимальная крутизна фронта уединенной волны на начальной стадии обрушения доходит до 45° , что создает предпосылки для опрокидывания судов. Последним параметром, который следует выбрать, является параметр нелинейности $\alpha = A/H$ — отношение высоты уединенной волны к глубине воды на начальной стадии движения. Известно, что верхнее значение параметра нелинейности ограничено величиной 0,78 [17], при которой уединенная волна начинает обрушаться даже в модели с горизонтальным дном. Так как обрушение уединенной волны должно происходить за счет накопления нелинейных процессов по мере её движения над дном с уклоном, начальное (в зоне, предшествующей началу дна с уклоном) значение параметра нелинейности выбрано равным 0,6, при котором уединенная волна в модели с горизонтальным дном движется без обрушения. В связи с этим выбраны три пары начальных значений высоты уединенной волны и глубины моря: $A_1 = 12$ м, $H_1 = 20$ м; $A_2 = 18$ м, $H_2 = 30$ м и $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м, для которых характерно сохранение выбранного параметра нелинейности равного 0,6. В этом случае на развитие нелинейных процессов указанных волн будет оказывать только изменение глубины, обусловленное уклоном дна. Значения параметров $A_1 = 12$ м и $H_1 = 20$ м являются минимально допустимыми, так как дальнейшее уменьшение высоты и глубины может повлечь посадку контура на мель в зоне обрушения уединенной волны. Значение высоты ($A_3 = 24$ м) в третьей паре параметров соответствует диапазону значений «волн-убийц».

Для обоснования процедуры выбора начального положения контура следует обратиться к рис. 2, на котором представлен результат вычислений процесса развития нелинейности и обрушения уединенной волны в модели с уклоном дна 1:15. Начало процесса движения уединенной волны характеризуется симметричностью профиля 1. Однако по мере продвижения уединенной волны глубина воды уменьшается, что приводит к увеличению параметра нелинейности A/H' , где H' — глубина воды над дном с уклоном в месте нахождения уединенной волны в конкретный момент времени. Чем дальше продвигается волна, тем меньше становится глубина H' и тем больше возрастает параметр нелинейности. Так, например, для $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м уединенной волне достаточно пройти всего 150 м по акватории с уклоном дна 1:15, чтобы параметр нелинейности превысил 0,78. В этом случае процессы нелинейного преобразования, которые способствуют увеличению крутизны фронта волны, в неполной мере компенсируются дисперсионными процессами, приводящими к уменьшению крутизны фронта волны и, соответственно, к нарушению симметрии профиля 2.

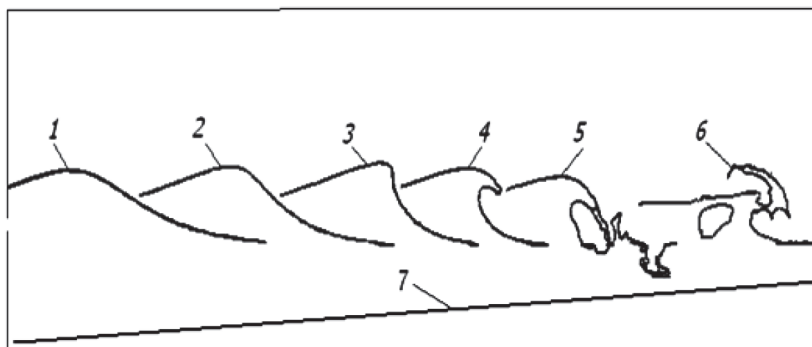


Рис. 2. Последовательность профилей уединенной волны в процессе движения по поверхности воды над уклоном крутизной 1:15:

- 1 — начальный профиль; 2 — профиль с признаками асимметрии;
3 — профиль с отвесным фронтом в районе гребня; 4 — профиль с зарождающейся струей;
5 — профиль с обрушивающейся струей на подошву волны;
6 — хаотичная поверхность воды с захватом воздуха
7 — дно

По мере накопления нелинейных эффектов начинается формирование процесса обрушения. На начальной стадии это выражается в виде формирования отвесного фронта уединенной волны непосредственно в районе её гребня (профиль 3). По мере продвижения волны на месте указанного отвесного фронта начинает формироваться струя воды (профиль 4) и, наконец, процесс обрушения завершается стремительным увеличением размеров струи и её падением на подошву уединенной волны (профиль 5). В конечном итоге обрушение гребня приводит к образованию хаотичного состояния поверхности воды (профиль 6). Вариация взаимного положения контура и уединенной волны выполнена путем его установки на поверхности воды в начальные положения, которые соответствуют абсциссам гребней профилей 3 – 5 (см. рис. 2), что обеспечило при встрече с уединенной волной попадание контуров в начало, середину и окончание процесса её обрушения соответственно.

Для численного моделирования выбраны контуры морских судов, которые на акватории шельфа могут выполнять производственные задания или находиться на якорных стоянках, приведенные в следующей таблице:

Тип, водоизмещение рыболовных судов и параметры их контуров

Тип и водоизмещение судов, т	Параметры контуров					
	ширина, м	высота, м	осадка, м	масса, кг	момент инерции, кг·м ²	значение начальной метацентрической высоты, м
МКРТМ тип «Леда», 383	8,0	3,9	3,2	24981	184982	0,5
СРТМ «Василий Попов», 1192	9,8	5,0	4,2	39704	446699	1,0
БСТ тип «Каури», 3040	13,5	8,9	6,3	82658	1719196	1,0

Примечания: МКРТМ — малый креветко-рыболовный траулер морозильный, выполняющий производственные задания на акватории шельфа; СРТМ — средний рыболовный траулер морозильный и большой сейнер тунцеловный (БСТ), которые находятся на якорных стоянках.

Выражения (1) – (4), методы решения, параметры уединенной волны и контуров, граничные и начальные условия составляют численную модель системы «контур морского судна — уединенная волна».

Численное моделирование и обсуждение результатов

Численное моделирование проводилось в расчетной области (см. рис. 1) длиной $80H$, высотой $4H$ и глубиной воды H в области, примыкающей к границе l , с уклоном дна величиной $p:l = 1:15$ и длиной $13H$. Вариация высоты уединенной волны и глубины моря осуществлялась путем выбора параметров из следующих пар значений $A_1 = 12$ м и $H_1 = 20$ м; $A_2 = 18$ м и $H_2 = 30$ м; $A_3 = 24$ м и $H_3 = 40$ м.

Прежде чем приступить к обсуждению результатов опрокидывания контуров в численных моделях с уклоном дна, убедимся, что действительно в модели с горизонтальным дном контур судна не опрокидывается даже для случая с максимальной высотой волны. На рис. 3 представлены результаты вычислений встречи уединенной волны с контуром судна СРТМ. в численной модели с параметрами $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м и нулевой величиной уклона дна.

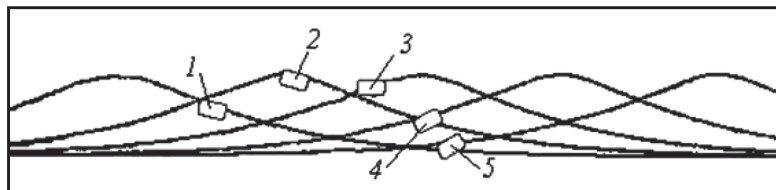


Рис. 3. Последовательность профилей уединенной волны с расположенным на ней контуром:
1 — контур находится на фронте волны; 2 — контур поднят на вершину гребня;
3 — контур переместился на спад волны; 4 — контур переместился на середину спада волны;
5 — контур находится в конце спада волны

Результаты вычислений соответствуют выполненной ранее предварительной оценке: необрушающаяся уединенная волна не представляет опасности для морских судов ввиду малой крутизны. Крен контура не превысил 40° . Следует отметить, что Крускал и Забуски [6] назвали уединенную волну *солитон*ом, принимая во внимание, что распространяясь, солитон не изменяет формы и при «столкновении» с другим солитоном проходит через него, не изменяя своей прежней формы. Из рис. 3 следует, что уединенная волна, «сталкиваясь» с контуром (твердым телом), также не изменяет своей формы, т. е. и в данном случае ведет себя как солитон.

В соответствии с поставленной задачей вычислены углы крена контуров трех выбранных судов в численной модели с уклоном дна $1:15$ и параметрами $A_1 = 12$ м, $H_1 = 20$ м; $A_2 = 18$ м, $H_2 = 30$ м; $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м, при условии, что начальное положение контуров находится в пределах зоны обрушения волны.

На рис. 4 представлены результаты вычислений крена контура МКРТМ, значение начального положения которого соответствует абсциссе гребня профиля 4 (см. рис. 2) с зарождающейся струей. Из этого рисунка следует, что для всех трех пар параметров A и H крен судна на левый борт относительно оси $o\zeta$ (см. рис. 1) достиг 60° , что соответствует выбранному ранее критерию опрокидывания. Следует отметить, что в процессе взаимодействия с уединенной волной контур совершает один период угловых колебаний, в конце которого происходит опрокидывание.

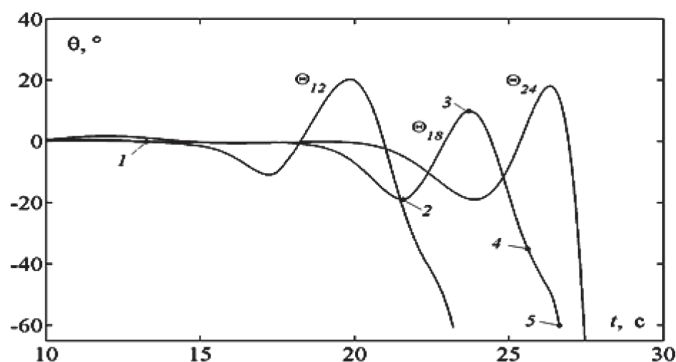


Рис. 4. Диаграммы углов крена θ контура МКРТМ:
 Θ_{12} — соответствует численной модели с параметрами
 $A_1 = 12$ м, $H_1 = 20$ м; Θ_{18} — $A_2 = 18$ м, $H_2 = 30$ м; Θ_{24} — $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м

Для иллюстрации диаграмм опрокидывания вычислена временная последовательность профилей уединенной волны с расположенным на них контуром МКРТМ для всех трех пар параметров A и H . В связи с тем, что характер вариации углов одинаков (см. рис. 4), а параметр нелинейности для всех пар выбранных значений A и H равен 0,6, на рис. 5 представлена типичная для контура маломерного судна МКРТМ последовательность профилей, иллюстрирующая опрокидывание контура на левый борт относительно оси oz (см. рис. 1) для случая $A_2 = 18$ м и $H_2 = 30$ м. Значения углов, отмеченных точками 1–5, на диаграмме Θ_{18} (см. рис. 4) соответствуют положению контура 1–5 на профилях (см. рис. 5).

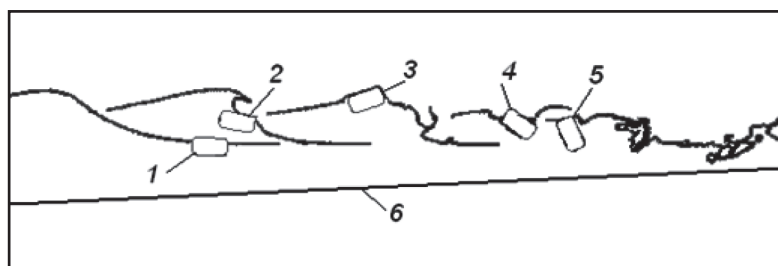


Рис. 5. Временная последовательность профилей уединенной волны с находящимся на них контуром МКРТМ: 1 — контур находится в начале фронта волны; 2 — контур с небольшим креном на левый борт находится под гребнем с зарождающейся струей воды; 3 — контур с креном на правый борт находится на вершине разрушающегося гребня; 4 — контур с креном на левый борт находится на хаотичной поверхности; 5 — контур с креном на левый борт достиг угла опрокидывания; 6 — профиль дна

Рассмотрим одновременно процесс опрокидывания контура, отображенный на рис. 4 и 5. В момент встречи с уединенной волной контур 1 находился на поверхности спокойной воды. По мере движения уединенной волны контур 2 с небольшим креном на левый борт поднялся на фронт волны под зарождающейся струей, нарушив поле скорости, формирующее развитие струи, что привело к преждевременному разрушению гребня уединенной волны. В последующий момент времени движущаяся волна подняла контур 3 (с небольшим креном на правый борт) на поверхность разрушающегося гребня, резкое уменьшение высоты которого привело к формированию на контуре 4 кренящего момента, создающего крен на левый борт. Вследствие дальнейшего разрушения гребня крен контура 5 на левый борт увеличился и достиг порогового значения 60° , соответствующего критерию опрокидывания.

На рис. 6 представлены результаты вычислений крена контура СРТМ, начальное положение которого соответствует абсциссе профиля 5 (см. рис. 2) с обрушающейся струей на подошву уединенной волны.

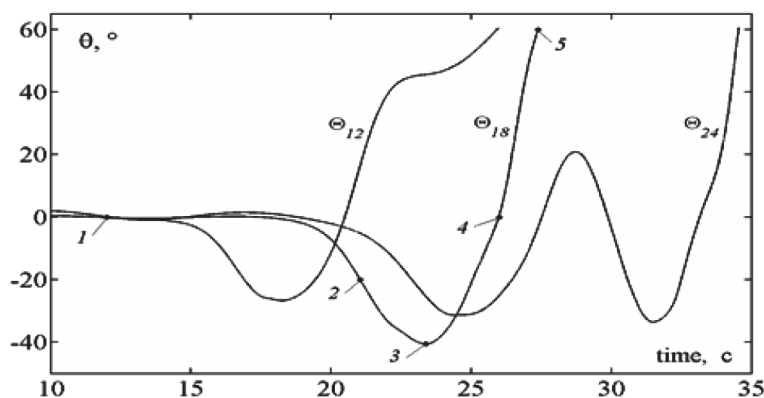


Рис. 6. Диаграммы углов крена θ контура СРТМ:
 Θ_{12} — соответствует численной модели с параметрами $A_1 = 12$ м, $H_1 = 20$ м; Θ_{18} — $A_2 = 18$ м, $H_2 = 30$ м; Θ_{24} — $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м

Из рис. 6 следует, что для всех трех пар параметров A и H крен судна на правый борт достиг 60° , что соответствует выбранному ранее критерию опрокидывания. Различие в числе колебаний угла крена диаграмм Θ_{12} , Θ_{18} и Θ_{24} обусловлено высокой динамичностью обрушения волны высотой 24 м.

Для иллюстрации диаграмм опрокидывания (см. рис. 6), вычислена временная последовательность профилей уединенной волны с расположенным на них контуром СРТМ (рис. 7). Так как характер вариации углов и параметр нелинейности на диаграммах Θ_{12} , Θ_{18} одинаков, вычисленные последовательности профилей геометрически подобны. В связи с этим на рис. 7 представлена типичная для контура СРТМ последовательность профилей уединенной волны, иллюстрирующая опрокидывание контура на правый борт относительно оси о ζ (см. рис. 1) для случая $A_2 = 18$ м и $H_2 = 30$ м. Значения углов, отмеченные точками 1 – 5 на диаграмме Θ_{18} (см. рис. 6), соответствуют положению контура на профилях 1 – 5 (см. рис. 7).

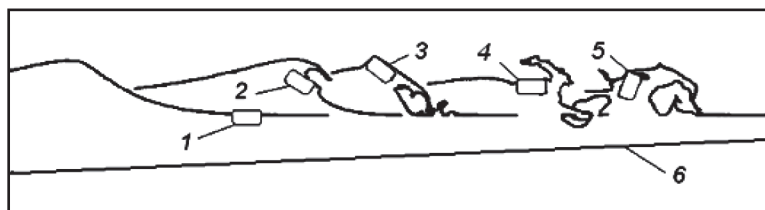


Рис. 7. Временная последовательность профилей уединенной волны с находящимся на них контуром СРТМ: 1 — контур находится в начале фронта волны; 2 — контур с небольшим креном на левый борт продвинулся дальше зарождающейся струи воды; 3 — контур с креном на левый борт находится на вершине гребня с развитой струей воды в момент её падения на подошву волны; 4 — контур в момент выравнивания крена в процессе его поворота на правый борт; 5 — опрокидывание контура на правый борт; 6 — профиль дна

Контур 1 (см. рис. 6 и 7) при встрече с уединенной волной имеет нулевой крен. За счет установки контура в начальное положение, соответствующее абсциссе профиля 5 (см. рис. 2), контур 2 (см. рис. 6 и 7) с креном на левый борт прошел дальше (по сравнению с контуром 2 на рис. 5) под профилем с зарождающейся струей. Это исключило разрушение гребня и обусловило поднятие контура 3 (см. рис. 6 и 7) на гребень с развитой струей, падающей на подошву волны. В процессе резкого уменьшения высоты гребня контур 4 получил кренящий момент на правый борт, что привело к выравниванию крена. Вследствие дальнейшего разрушения гребня крен контура 5 на правый борт увеличился и достиг порогового значения 60° , соответствующего критерию опрокидывания.

На рис. 8 представлены результаты вычислений взаимодействия уединенной волны с контуром БСТ в численной модели с параметрами $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м. Диаграммы 1 – 3 вычислены для начальных положений контура, равных абсциссам профилей 3 – 5 (см. рис. 2), что соответствует началу, середине и окончанию зоны обрушения уединенной волны. Из диаграмм 1 и 3 (см. рис. 8) следует, что для начального положения 3 или 5 (см. рис. 2) происходит опрокидывание контура на левый или правый борт, как это имело место в ситуациях, рассмотренных в ходе анализа рис. 5 и 7.

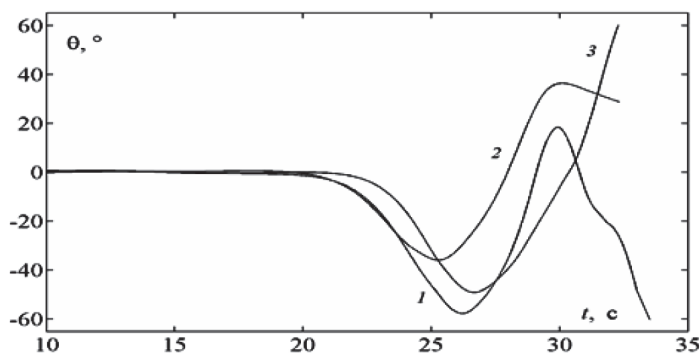


Рис. 8. Диаграммы углов крена θ контура с параметрами $A_3 = 24$ м, $H_3 = 40$ м

При установке контура в начальное положение 2, соответствующее середине зоны обрушения уединенной волны (см. рис. 2), происходит разрушение гребня, аналогично тому, как это имело место ранее (см. рис. 5), и, соответственно, снижается кренящий момент, величина которого оказалась недостаточной для опрокидывания контура БСТ (см. рис. 8, диаграмма 2).

Вычисление крена контура БСТ в численной модели с параметрами $A_1 = 12$ м, $H_1 = 20$ м; $A_2 = 18$ м, $H_2 = 30$ м не производилось ввиду посадки контура на мель в зоне обрушения уединенной волны.

Выводы

1. Разработана численная модель системы «уединенная волна – контур морского судна».
2. Контур миделевого сечения судна, по сравнению с контурами других сечений судна, обладает наибольшими массой и моментом инерции, а, соответственно, и устойчивостью к опрокидыванию уединенной волной. Следовательно, полученные в работе результаты могут быть рассмотрены как оптимистические в отношении устойчивости выбранных судов к опрокидыванию уединенной волной.
3. Вне шельфовой зоны на акватории с горизонтальным дном уединенная волна не опрокидывает судно и ведет себя как солитон, так как судно не изменяет её формы и не вносит изменений в её дальнейшее движение.
4. В шельфовой зоне с глубинами 40 м и менее суда водоизмещением от ~400 до ~3000 т опрокидываются уединенными волнами высотой более 12 м. При этом опрокидывание судна может произойти на левый (правый) борт, если оно окажется в начале / в конце зоны обрушения уединенной волны.
5. Для предупреждения опрокидывания судов уединенными волнами судоводителям следует избегать плавания или стоянки судов на акваториях шельфа глубиной 40 м и менее.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пелиновский Е. Н. «Фрики» — морские волны-убийцы / Е. Н. Пелиновский, А. В. Слюняев // Природа. — 2007. — № 3. — С. 14–23.
2. Rosenthal W. Rogue Waves: Results of the Max Wave Project / W. Rosenthal, S. Lehner // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2008. — Vol. 130. — Is. 2. — Pp. 021006. DOI:10.1115/1.2918126.
3. Ruban V. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates / V. Ruban, Y. Kodama, M. Ruderman, etc. // The European physical journal special topics. — 2010. — Vol. 185. — Is. 1. — Pp. 5–15. DOI:10.1140/epjst/e2010-01234-y.
4. Шелковников Н. К. Солитонная версия формирования волн-убийц в океане / Н. К. Шелковников // Морской гидрофизический журнал. — 2012. — № 5. — С. 34–41.
5. Didenkulova I. Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea / I. Didenkulova, C. Anderson // Natural Hazards and Earth System Sciences. — 2010. — Vol. 10. — Is. 9. — Pp. 2021–2029. DOI: 10.5194/nhess-10-2021-2010.
6. Зейтунян Р. Х. Нелинейные длинные волны на поверхности воды и солитоны / Р. Х. Зейтунян // Успехи физических наук. — 1995. — Т. 165. — № 12. — С. 1403–1456. DOI: 10.3367/UFNr.0165.199512f.1403.
7. Malek-Mohammadi S. New Methodology for Laboratory Generation of Solitary Waves / S. Malek-Mohammadi, F. Y. Testik // Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering. — 2010. — Vol. 136. — Is. 5. — Pp. 286–294. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000046.
8. Monaghan J. J. Scott Russell's wave generator / J. J. Monaghan, A. Kos // Physics of Fluids. — 2000. — Vol. 12. — Is. 3. — Pp. 622–630. DOI: 10.1063/1.870269.
9. Афанасьев К. Е. Численное моделирование движения уединенной волны над подводным препятствием / К. Е. Афанасьев, Е. Н. Березин // Вычислительные технологии. — 2005. — Т. 10. — № 2. — С. 15–26.
10. Cao H. RANS-VOF solver for solitary wave run-up on a circular cylinder / H. Cao, D. Wan // China Ocean Engineering. — 2015. — Vol. 29. — Is. 2. — Pp. 183–196. DOI: 10.1007/s13344-015-0014-2.

11. Диденкулова И. И. Накат длинных уединенных волн различной полярности на плоский откос / И. И. Диденкулова, Е. Н. Пелиновский, О. И. Диденкулов // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. — 2014. — № 5. — С. 604. DOI: 10.7868/S0002351514050034.
12. Родин А. А. Взаимодействие уединенных волн большой амплитуды в мелководном бассейне / А. А. Родин, И. И. Диденкулова, Е. Н. Пелиновский // Фундаментальные исследования. — 2012. — № 11-3. — С. 710–714.
13. Дорожко В. М. Опрокидывание контура морского судна «волной-убийцей» / В. М. Дорожко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 2 (30). — С. 31–41.
14. Huang C. J. Overturning of a solitary wave on a continental shelf / C. J. Huang, C. Y. Lin // The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. — International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008. — 6 p.
15. Правила классификации и постройки морских судов. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2015. — Т. 1. — 466 с.
16. Staroszczyk R. Simulation of Solitary Wave Mechanics by a Corrected Smoothed Particle Hydrodynamics Method / R. Staroszczyk // Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. — 2011. — Vol. 58. — No. 1–4. — Pp. 23–45.
17. Grilli S. T. Breaking criterion and characteristics for solitary waves on slopes / S. T. Grilli, I. A. Svendsen, R. Subramanya // Journal of waterway, port, coastal and ocean engineering. — 1997. — Vol. 123. — Is. 3. — Pp. 102–112. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1997)123:3(102).

REFERENCES

1. Pelinovsky, E. N., and A. V. Slunyaev. “«Freak Waves», or Sea Killer Waves.” *Nature* 3 (2007): 14–23.
2. Rosenthal, Wolfgang, and Susanne Lehner. “Rogue waves: Results of the MaxWave project.” *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 130.2 (2008): 021006. DOI:10.1115/1.2918126.
3. Ruban, V., Y. Kodama, M. Ruderman, et al. “Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates.” *The European physical journal special topics* 185.1 (2010): 5–15. DOI:10.1140/epjst/e2010-01234-y.
4. Shelkovnikov, N. K. “Solitonnyaya versiya formirovaniya voln-ubiits v okeane.” *Marine Hydrophysical Journal* 5 (2012): 34–41.
5. Didenkulova, I., and C. Anderson. “Freak waves of different types in the coastal zone of the Baltic Sea.” *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10.9 (2010): 2021–2029. DOI: 10.5194/nhess-10-2021-2010.
6. Zeytounian, R. Kh. “Nonlinear long waves on water and solitons.” *Physics-Uspekhi* 165.12 (1995): 1403–1456. DOI: 10.3367/UFNr.0165.199512f.1403.
7. Malek-Mohammadi, Siamak, and Firat Y. Testik. “New methodology for laboratory generation of solitary waves.” *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 136.5 (2010): 286–294. DOI: 10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000046.
8. Monaghan, J. J., and A. Kos. “Scott Russell’s wave generator.” *Physics of Fluids* 12.3 (2000): 622–630. DOI: 10.1063/1.870269.
9. Afanasiev, K. E., and E. N. Berezin. “Numerical modeling of solitary wave motion over underwater obstacle.” *Computational Technologies* 10.2 (2005): 15–26.
10. Cao, Hong-jian, and De-cheng Wan. “RANS-VOF solver for solitary wave run-up on a circular cylinder.” *China Ocean Engineering* 29.2 (2015): 183–196.
11. Didenkulova, I. I., E. N. Pelinovsky, and O. I. Didenkulov. “Run-up of long solitary waves of different polarities on a plane beach.” *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics* 50.5 (2014): 532–538. DOI: 10.1134/S000143381405003X.
12. Rodin, A. A., I. I. Didenkulova, and E. N. Pelinovsky. “Interaction of large-amplitude solitary waves in shallow-water basin.” *Fundamental research* 11-3 (2012): 710–714.
13. Dorozhko, V. M. “Oprokidyvanie kontura morskogo sudna «volnoi-ubiitsej».” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(30) (2015): 31–41.
14. Huang, Ching-Jer, and Chun-Yuan Lin. “Overturning of a solitary wave on a continental shelf.” *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2008.

15. *Pravila klassifikatsii i postroiki morskikh sudov*. SPb.: Rossiiskii morskoi registr sudokhodstva, 2015. Vol. 1.
16. Staroszczyk, R. "Simulation of Solitary Wave Mechanics by a Corrected Smoothed Particle Hydrodynamics Method." *Archives of Hydro-Engineering and Environmental Mechanics* 58.1–4 (2011): 23–45.
17. Grilli, S. T., I. A. Svendsen, and R. Subramanya. "Breaking criterion and characteristics for solitary waves on slopes." *Journal of waterway, port, coastal, and ocean engineering* 123.3 (1997): 102–112. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-950X(1997)123:3(102).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Китаев Максим Владимирович —
кандидат технических наук, доцент
Дальневосточный федеральный университет
690950, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Суханова 8
e-mail: maxkit@mail.ru

Дорожко Вениамин Мефодьевич —
кандидат физико-математических наук
Институт автоматизации и процессов
управления ДВО РАН
690041, Российская Федерация, Владивосток,
ул. Радио 5
e-mail: veniamin_dorozhko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Kitaev, Maksim V. —
PhD, associate professor
Far Eastern Federal University
8 Suhanova Str., Vladivostok 690950,
Russian Federation
e-mail: maxkit@mail.ru

Dorozhko, Veniamin M. — PhD
Institute of Automation and Control Processes,
Far Eastern Branch of the Russian Academy
of Sciences
5 Radio Str., Vladivostok, 690041,
Russian Federation
e-mail: veniamin_dorozhko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 13 января 2017 г.
Received: January 13, 2017.