4. **Gongfa L.** A hybrid particle swarm algorithm to JSP problem // *IEIT Journal of Adaptive & Dynamic Computing*, 2011, pp. 12—22.
5. **Rzevski G., Skobelev P.** Managing Complexity, Southampton, UK, WIT Press, 2014, 202 p.
6. **Vittikh V. A., Skobelev P.** *Metod sopryazhennyh vzaimodejstvij dlya upravleniya raspredeleniem resursov v real'nom masshtabe vremeni* (Open multi-agent systems for decision-making support), *Avtometriya, Journal of Siberian Branch of Russian Academy of Science*, 2002, no. 6, pp. 45—61 (in Russian).
7. **Vittikh V., Skobelev P.** *Mul'tiagentnye modeli vzaimodejstviya dlya postroeniya setej potrebnostej i vozmozhnostej v otkrytyh sistemah* (Models of Self-organization for Designing Demand-Resource Networks), *Automation and Control, Journal of Russian Academy of Science*, 2003, no. 1, pp. 177—185 (in Russian).
8. **Vittikh V. A., Larukhin V. B., Tsarev A. V.** Actors, Holonic Enterprises, Ontologies and Multi-Agent Technology, *Proc. of 6th International Conference on Industrial Applications of Holonic and Multi-Agent Systems (HoloMAS'2013)*, August 26—28, 2013, Prague, Czech Republic. Springer, 2013, pp. 13—24.
9. **Skobelev P.** Multi-Agent Systems for Real Time Adaptive Resource Management. In Industrial Agents: Emerging Applications of Software Agents in Industry. Paulo Leitao, Stamatis Karnouskos (Ed.). Elsevier, 2015, pp. 207—230.

УДК 004: 656.61.073 DOI: 10.17587/mau.16.852-860

В. М. Дорожко, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., veniamin_dorozhko@mail.ru,
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Устойчивость контура морского судна к опрокидыванию "волной-убийцей"

Рассмотрен CFD-метод исследования устойчивости контуров морских судов при воздействии "волн-убийц". Предложена модель системы "контур—волна-убийца". Выполнено обоснование выбранного диапазона длин "волн-убийц". Приведены результаты численного исследования устойчивости контуров рыбопромысловых судов водоизмещением 1389—9260 т в зависимости от их начального удаления от "волн-убийц" различной длины. Отмечается связь опрокидывания контуров с крутизной переднего склона "волны-убийцы". Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и разработке мероприятий по обеспечению безопасной эксплуатации судов.

Ключевые слова: *устойчивость судна, вычислительная гидродинамика, "волна-убийца", крутизна волны, угол крена, контур судна, опрокидывание судна*

Введение

"Волны-убийцы" представляют собой уникальное природное явление, они способны опрокинуть или причинить серьезные повреждения морским судам и сооружениям. Для идентификации "волн-убийц" используют критерий [1], который связан с определением высоты волны: $H > 2H_s$, где H_s — значительная высота волн (средняя высота трети наиболее высоких волн спектра морского волнения).

Известны различные гипотезы возникновения "волн-убийц" [2]. Одной из общепризнанных причин их возникновения является пространственно-частотная фокусировка, вследствие которой происходит формирование волны, в которой развиваются процессы модуляционной неустойчивости [3, 4]. В результате модуляционной неустойчивости формируется солитон, под огибающей которого могут находиться от 3 до 20 периодов волн. "Волна-убийца" представляет собой конечную стадию развития модуляционной неустойчивости, когда за время порядка одного периода происходит концентрация энергии в гребне волны, в результате ее максимальная высота может достигать 30 м [5], после чего "волна-убийца" начинает обрушаться [6]. Существует большое число работ, в которых аналитически, численно и экспериментально исследуются способы формирования "волн-убийц", например, статьи [7—9].

Актуальность исследования "волн-убийц" поддерживается не только тем, что они представляют собой загадочное явление природы, но и реальной опасностью, которую они создают для морских судов. Только за период 1968—1994 гг. от встречи с "волнами-убийцами" погибло или было повреждено 22 супертанкера [10]. Наблюдения в 2000—2003 гг. за морской поверхностью в рамках проекта MaxWave [11] показали, что частота возникновения "волн-убийц" существенно выше, чем прогнозируется теоретическими исследованиями [1]. Так, только за период 2006—2010 гг. было отмечено 78 случаев регистрации "волн-убийц", при встрече с которыми погибли или получили повреждения суда и люди [12]. В связи с высокой частотой регистрации "волн-убийц" Европейским союзом был профинансирован проект Extreme Seas [13], в рамках которого планировалось объединение усилий шести европейских стран, в том числе российских ученых [9], с целью разработать численные и физические имитационные модели возникновения "волн-убийц", а также оценить их угрозу в отношении морских судов. В свете указанных задач можно отметить работы, в которых численно [14] и экспериментально [15] исследуется воздействие "волн-убийц" на морские суда. В качестве недостатка этих работ можно отметить отсутствие исследований опрокидывания морских судов.

Опрокидывание морского судна может произойти при совпадении двух событий: возникновение "волны-убийцы" и присутствие на ее пути судна. Так как развитие "волны-убийцы" происходит за время порядка одного периода [6], т. е. она пробегает расстояние не более одной длины волны, следовательно, дистанция между морским судном и начальным положением "волны-убийцы" может определяющим образом повлиять на исход встречи. Согласно гипотезе плоских поперечных сечений (контуров) для тонкого тела (судна) гидродинамические свойства судна и его контуров соответствуют друг другу [16]. В связи с этим в настоящей работе ставится задача выполнить численное исследование устойчивости миделевого сечения (контура) морских судов к опрокидыванию на глубоком море в зависимости от их удаления от начального положения и различных длин "волн-убийц." Выбор контуров в данной задаче соответствует наиболее опасному положению судов — параллельно гребню волны.

Метод решения задачи исследования

Методы изучения динамики судна на волнении можно условно разделить на три группы: аналитические, экспериментальные и численные. В качестве примера, иллюстрирующего возможности аналитического метода, приведем работу [17] о качке судна, нелинейный характер модели которой реализован путем разложения в ряды момента сил демпфирования, восстанавливающего и кренящего моментов. Данный аналитический метод невозможно применить для исследования воздействия "волны-убийцы" на судно, так как при больших углах качки, соответствующих опрокидыванию судна, и сильной нелинейной гидродинамике "волн-убийц" гидростатические, инерционно-демпфирующие и возмущающие силы оказываются взаимосвязанными, что исключает их раздельное аналитическое представление [16]. Дополнительную взаимосвязь указанным силам придает учет вихревых и вязкостных компонент силового воздействия жидкости при опрокидывании судов. В качестве примера применения метода экспериментальных исследований, проводимых в опытовом бассейне, можно отметить работу [15] о воздействии "волны-убийцы" на модель судна, в которой рассмотрена технология генерации волн механическим устройством и приведены результаты реакции судна на воздействие такой волны. Для проведения экспериментальных исследований требуется наличие дорогостоящих опытовых бассейнов со сложной системой механической генерации волн и точной измерительной аппаратурой, что является главным недостатком указанного метода. В последние десятилетия в практике численных исследований нашел широкое применение метод вычислительной гидродинамики (CFD, computational fluid dynamics), который с развитием информационных технологий составляет альтернативу технически сложным и затратным экспериментальным методам. Примером применения CFD-метода может служить работа [18], в которой представлены результаты численного моделирования продольной качки судна на регулярном и нерегулярном волнениях. Данная работа, хотя и не связана непосредственно с исследованием опрокидывания судна "волной-убийцей", тем не менее, иллюстрирует возможность применения метода вычислительной гидродинамики для изучения динамики судна на волнении. В связи с этим решение поставленной задачи выполнено CFD-методом, позволяющим реализовать расчетную область в виде виртуального опытового бассейна, в котором осуществляется формирование "волны-убийцы" и ее воздействие на контур судна. В основу CFD-метода положены уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (RANSE, Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) [19], которые могут быть записаны в тензорном виде:

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

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right] + \rho \frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{u_i' u_j'}) + \rho g, \qquad (2)$$

где $\{i, j\} = 1, 2, 3$; x_1, x_2, x_3 — декартовы координаты в абсолютной системе $ox_1x_2x_3$ и соответствующие им осредненные значения абсолютной скорости потока жидкости u_1, u_2, u_3, а также флуктуации абсолютной скорости u_1', u_2', u_3'; μ и ρ — вязкость и плотность жидкости соответственно; t — время; p — давление; $\rho\overline{u_i' u_j'}$ — напряжение Рейнольдса (черта сверху означает операцию осреднения); g — ускорение свободного падения. Для вычисления напряжения Рейнольдса применена модель турбулентности k_t—ε_t (RNG, renormal-ization group mathematical technique) [20], которая позволяет получать расчетные величины гидродинамических полей, близкие к их экспериментальным значениям [21]. В связи с этим уравнения (1), (2) дополнены уравнениями [20] переноса турбулентной кинетической энергии (k_t) и скорости ее диссипации (ε_t).

Отметим основные моменты методики [19] численного решения уравнений (1), (2). Расчетная область разбивалась сеточными элементами, что позволило сформировать с помощью метода конечного объема разностный аналог RANS-уравнений. Полученная система алгебраических уравнений решалась методом Гаусса—Зейделя. Связь между полями скорости и давления, обеспечивающая выполнение уравнения неразрывности, реализована с помощью алгоритма PISO (Pressure-Implicit with

Splitting of Operators). Для аппроксимации градиентов применен Green-Gauss-Cell-метод. Пространственная дискретизация поля давления и скорости выполнена с помощью схем второго порядка точности. Дискретизация решения во временной области выполнена с переменным шагом, обеспечивающим устойчивость решения при изменении максимальных значений поля скорости.

Процесс зарождения и развития "волны-убийцы" [2] условно разделим на четыре этапа. *Первый:* в результате пространственно-дисперсионной фокусировки формируется узкий спектр почти когерентных волн. *На втором этапе* за счет модуляционной неустойчивости таких волн формируется солитон, под огибающей которого находится от 3 до 20 периодов волны. Если крутизна волн ($S = \pi H/\lambda$, H и λ — высота и длина волны) превышает 0,443 [22], то *на третьем этапе* за счет нелинейных процессов высота "волны-убийцы" может увеличиться до 30 м с одновременным нарастанием крутизны ее переднего склона. *Четвертый этап:* обрушение "волны-убийцы" [6]. В соответствии с поставленной задачей в данной работе рассматриваются третий и четвертый этапы.

Согласно результатам натурных наблюдений [23, 24] "волна-убийца" имеет вид одиночной высокой волны. Начальный ($t = 0$) профиль такой волны может быть представлен выражением, описывающим волну с высоким центральным максимумом и двумя боковыми возвышениями

$$w = a_b \exp\left[-2\left(\frac{k_b(x - x_b)}{2\pi}\right)^2\right][k_b(x - x_b)], \qquad (3)$$

где a_b, $k_b = 2\pi/\lambda_b$ и λ_b — начальная амплитуда, волновое число и длина волны соответственно; x_b — координата начального положения центрального максимума волны.

В соответствии с сеточной разбивкой расчетной области начальный профиль (3) "волны-убийцы" может быть записан в виде массива дискретных значений w_i, $i = 0, ..., N - 1$, от дискретного аргумента $x = x_1, ..., x_i, ..., x_N$, где N и i — число и порядковый номер элементов сеточной разбивки, соответственно. Расстояние $(x_{i+1} - x_i)$ между двумя смежными значениями аргумента x равно проекции сеточного шага на ось ox. Пространственный спектр комплексных амплитуд Y_n массива дискретных значений профиля "волны-убийцы" вычислен с помощью дискретного преобразования Фурье [25] по формуле

$$Y_n = \frac{1}{N}\sum_{i=0}^{N-1} w_{i+1}\exp(-j2\pi ni/N),\ n = \overline{1, N}, \qquad (4)$$

где j — комплексная единица.

Длина волны спектральной компоненты максимальной высоты, располагающейся в центре пространственного спектра (4), называется длиной центральной волны, которая соответствует длине λ_b "волны-убийцы" (3). Для сокращения числа комплексных амплитуд выполнено усечение боковых составляющих пространственного спектра (4), модуль которых не превышает 5 % от модуля спектральной амплитуды максимальной высоты.

На основе пространственного спектра (4), представляющего собой массив комплексных амплитуд синусоидальных волн, сформирован вектор скорости, горизонтальная u_x и вертикальная u_y компоненты которого определяются следующими выражениями:

$$u_x = \sum_{n=l}^{L} u_n \exp(k_n y)\cos(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n); \qquad (5)$$

$$u_y = \sum_{n=l}^{L} u_n \exp(k_n y)\sin(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n), \qquad (6)$$

где $u_n = gk_n|Y_n|/\sigma_n$ — модуль вектора скорости; $|Y_n|$ — модуль комплексной амплитуды n-й синусоидальной волны; g — ускорение свободного падения; $k_n = 2\pi/\lambda_n$ — волновое число; $\sigma_n = \sqrt{gk_n}$ — угловая частота; x_0 — координата входной границы расчетной области; φ_n — значение фазового угла n-й компоненты пространственного спектра; l и L — номера комплексных амплитуд левой и правой границ усеченного спектра соответственно.

Численное исследование устойчивости контура к опрокидыванию "волной-убийцей" выполнено в расчетной области (рис. 1) прямоугольной формы в координатной системе oxy, совпадающей с системой ox_1x_2 уравнений (1), (2). Внутри расчетной области выделена область *4* прямоугольной формы, разбиение которой выполнено треугольными сеточными элементами, допускающими их перестройку во время движения контура *5*. В остальном пространстве расчетной области разбиение проведено квадратными сеточными элементами. Граничное условие на входной границе *1* представляет собой вектор скорости втекающей жидкости (5), (6). Граничные условия на дне *3* и периметре подвижного контура *5* соответствуют абсолютно жесткой границе, на которой нормальная компонента ско-

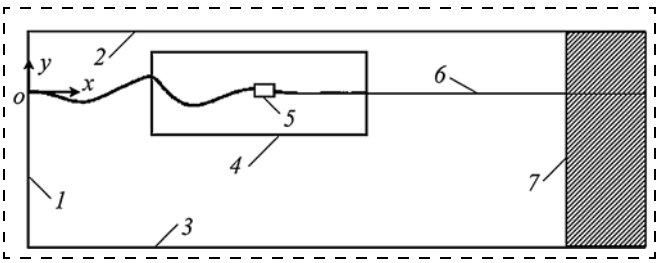

Рис. 1. Схема расчетной области:
1 — входная граница; *2* — открытая граница; *3* — дно; *4* — область движения контура; *5* — контур; *6* — начальный профиль "волны-убийцы"; *7* — область повышенного затухания волн, *oxy* — система координат. Разбиение расчетной области сеточными элементами на рисунке не показано

рости жидкости равна нулю. Граничное условие на верхней открытой границе *2* расчетной области равно атмосферному давлению. В области *7*, примыкающей к правой границе расчетной области, создано повышенное затухание, исключающее отражение "волны-убийцы" от выходной границы. Начальные условия уравнений (1) и (2) сформированы путем инициализации расчетной области от компонентов вектора скорости (5) и (6), в результате чего в расчетной области создавалось поле скоростей, соответствующее начальному ($t = 0$) состоянию профиля *6* "волны-убийцы" (3).

Свободно плавающий на поверхности жидкости контур с тремя степенями свободы под воздействием "волны-убийцы" осуществляет перемещение в плоскости *oxy* и поворот относительно условной оси, проходящей через его центр тяжести. На каждом временном шаге Δt дискретизации решения вычисляли векторы линейного $a_G = F_G/M_C$ и углового $\varepsilon_G = M_G/J_z$ ускорений центра тяжести контура, где M_C и J_z — масса и момент инерции масс контура; F_G и M_G — векторы силы и момента сил, вычисляемые относительно центра тяжести контура, соответственно. В конце каждого шага решения контур перемещался на длину вектора $\Delta l = 0{,}5a_G\Delta t^2$ и поворачивался на угол $\Delta\theta = 0{,}5\varepsilon_G\Delta t^2$, при этом векторы его линейной и угловой скоростей составляли $u = a_G\Delta t$ и $\omega = \varepsilon_G\Delta t$ соответственно.

Вычисление положения границы раздела воды и воздуха на каждом временном шаге Δt дискретизации решения проводили методом "объема жидкости" (VOF — Volume of fluid method) [26], согласно которому в пределах каждой сеточной ячейки выполнялась линейная аппроксимация профиля "волны-убийцы" на основе результатов вычисления явным методом доли воды/воздуха в каждой ячейке. Устойчивость указанного метода обеспечивалась поддержанием на заданном уровне числа Куранта ($C = \Delta t u_{\max}/d^*$, где $u_{\max}$ — максимальное значение модуля вектора скорости жидкости в ячейках на границе раздела сред, d^* — длина пробега жидкости внутри сеточного элемента) с помощью переменного временного шага Δt дискретизации решения.

Выражения (1)—(6), включая методы численного решения, формулировку граничных и начальных условий, представляют в совокупности модель системы "контур—волна-убийца".

Численное исследование устойчивости морских судов к опрокидыванию "волной-убийцей" и обсуждение результатов

Как отмечалось ранее, превышение крутизны волны под огибающей солитона значения 0,443 является условием формирования "волны-убийцы". С учетом этого условия выбран массив волн вида (3) с несколькими начальными амплитудами $a_b = \{8, 9, 10, 11, 12\}$, одинаковыми базовыми длинами центральной волны (λ_b) и абсциссами (x_b) начального положения центрального максимума, равными 100 м. Каждая из указанных базовых волн вследствие нелинейных процессов дважды вырастает до максимальных значений, при этом второй максимум (в сравнении с первым) приобретает наибольшие динамические свойства [27]. Начальные параметры "волн-убийц" получены путем масштабирования базовых волн с таким расчетом, чтобы высота второго максимума "волн-убийц" достигала 30 м. С этой целью масштабирующий коэффициент m_b вычислен как отношение высоты "волны-убийцы", равной 30 м, к высоте второго максимума каждой из базовых волн. Умножение соответствующих значений масштабирующих коэффициентов на параметры базовых волн (a_b, λ_b и x_b) позволило получить массивы начальных амплитуд (a_r), длин центральных волн (λ_r) и координат начального положения (x_r) центрального максимума "волн-убийц" (табл. 1). При этом благодаря одновременному масштабированию как высот, так и длин центральных волн начальная крутизна базовых волн (S_b) и начальная крутизна "волн-убийц" (S_r) совпадают.

Для "волн-убийц" с начальной крутизной менее 0,49 характерно образование максимумов высоты с пологими склонами, которые не создают достаточных моментов для опрокидывания контуров. "Волны-убийцы" с начальной крутизной более 0,69 стремительно обрушаются по причине смыкания первого и второго максимумов, уменьшая, тем самым, время существования волны, а следовательно, воздействия ее на судно. В связи с этим для численного моделирования выбраны "волны-убийцы" (табл. 1), начальная крутизна которых лежит в диапазоне 0,49...0,69, так как "волны-убийцы" вне указанного диапазона начальной крутизны не представляют опасности для контуров морских судов по указанным выше причинам.

Применение параметров a_r, λ_r, x_r в выражении (3) вместо a_b, λ_b, x_b позволило вычислить соответствующие значения скорости жидкости (5), (6) и создать, тем самым, в расчетной области "волны-убийцы" различной длины.

В качестве объектов для численного исследования устойчивости морских судов к опрокидыванию "волнами-убийцами" выбраны контуры рыбопромы-

Таблица 1

Параметры базовых волн и "волн-убийц"

Базовые волны					m_b	"Волны-убийцы"		
a_b, м	λ_b, м	x_b, м	H_b, м	S_b*		a_r, м	λ_r, м	x_r, м
8	100	100	15,5	0,49	1,74	13,92	174	174
9	100	100	17,2	0,54	1,49	13,41	149	149
10	100	100	18,8	0,59	1,38	13,80	138	138
11	100	100	20,5	0,64	1,30	14,30	130	130
12	100	100	22,0	0,69	1,20	14,40	120	120

* $S_b = \pi H_b/\lambda_b$ и H_b — начальные крутизна и высота базовой волны соответственно.

Таблица 2

Водоизмещение судов и параметры их контуров

Номер контура	Водоизмещение судна, т	Параметры контуров					
		Ширина, м	Высота, м	Осадка, м	Масса, кг	Момент инерции, кг · м^2	Начальная метацентрическая высота, м
1	1389	11,0	7,3	5,2	56 100	670 767	0,75
2	3040	13,5	8,9	6,25	82 658	1 719 196	0,75
3	4947	15,9	10,0	5,66	88 277	2 718 078	1,0
4	7972	17,3	11,0	6,52	111 079	3 082 999	1,0
5	9260	19,0	12,2	6,60	123 683	5 693 432	1,0

словых судов [28] (табл. 2), для которых характерно длительное пребывание в море, что увеличивает вероятность их встречи с "волнами-убийцами".

В процессе накренения геометрический центр подводной части контура перемещается по кривой, центр кривизны которой называется метацентром. Расстояние от положения метацентра до центра тяжести контура в исходном положении (без крена) носит название начальной метацентрической высоты, которая является критерием устойчивости контура к опрокидыванию [16]. В данном случае значения начальных метацентрических высот контуров соответствуют рекомендациям [29] для выбранных рыбопромысловых судов. Моменты инерции масс контуров вычислены относительно их центров тяжести (табл. 2).

Для численного исследования устойчивости контуров к опрокидыванию выбраны следующие параметры расчетной области: длина — $5\lambda_r$, высота — $0{,}75\lambda_r$, глубина воды — половина самой длинной волны усеченного спектра, сторона сеточных элементов — 0,5 м, плотность воды — 1027 кг/м^3, ускорение свободного падения — 9,81 м/с^2. Выбранная глубина воды обеспечивает выполнение условия глубокого моря [16]. Шаг дискретизации времени нестационарного решателя выбран переменным (Δt = 0,00001...0,002 с) для поддержания верхнего порога значения числа Куранта равным 0,25, что обеспечило высокую устойчивость вычислений.

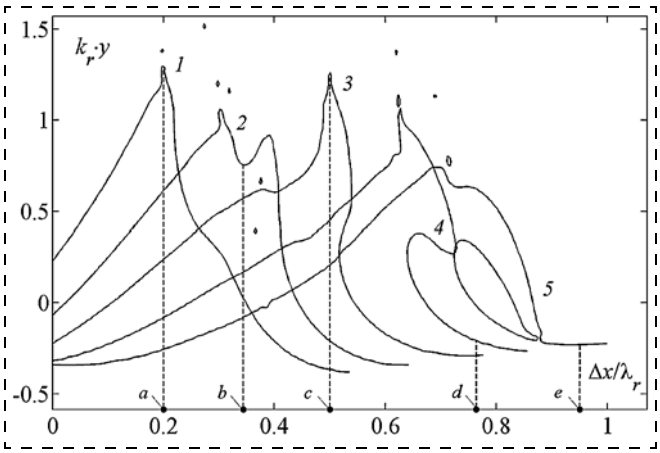

Рис. 2. Временная последовательность профилей (состояний) "волны-убийцы" с длиной центральной волны 138 м. Абсциссы положений:
a — первого максимума (*1*) высоты; *b* — двугорбого профиля (*2*); *c* — второго максимума (*3*); *d* — поверхности жидкости под зарождающим ныряющим буруном (*4*) и *e* — перед обрушивающимся ныряющим буруном (*5*); $k_r = 2\pi/\lambda_r$ — волновое число; λ_r — длина центральной волны; Δx — расстояние, отсчитываемое от абсциссы начального положения (x_r) "волны-убийцы"; *y* — ордината в системе координат *oxy*

На рис. 2 представлен пример типичной временной последовательности состояний (слева направо) "волны-убийцы": первый максимум высоты (*1*), со временем преобразующийся в двугорбый профиль (*2*), из которого вырастает второй максимум (*3*), превышение в нем скорости жидкости фазовой скорости приводит к зарождению струи, именуемой ныряющим буруном (*4*), обрушающимся на поверхность воды (*5*).

Представим структуру вычисляемого момента сил на контуре выражением $M = M_w - M_c - M_{id}$, где M_w — кренящий момент, создаваемый "волной-убийцей"; M_c — восстанавливающий момент, противодействующий крену контура; M_{id} — инерционно-демпфирующий момент [16]. Тогда момент сил M можно интерпретировать как результат конкуренции кренящего и суммы восстанавливающего и инерционно-демпфирующего моментов. На рис. 3 представлен пример типичных диаграмм момента сил (M) и угла крена (θ) контура для двух исходов: $\theta < 60°$ — частичный крен и $\theta > 60°$ — опрокидывание контура "волной-убийцей". Диаграммы *1*, *2* или *3*, *4*, представленные на рис. 3, соответствуют состояниям *a* или *c* (см. рис. 2) "волны-убийцы", встреча контура с которыми привела к частичному или полному опрокидыванию, соответственно.

Воздействие первого максимума (7) "волны-убийцы" привело к частичному накренению контура до угла $\theta < 60°$ (рис. 3, точка *D*) за счет преобладания на отрезке *AB* кривой *1* кренящего момента (положительные значения), который сменился на интервале *BC* преобладанием суммы восстанавливающего и инерционно-демпфирующих моментов (отрицательные значения), приведшей к восстановлению исходного крена контура после прохождения "волны-убийцы". Воздействие второго максимума (*2*, см. рис. 2) волны вызвало накренение контура (кривая *4*, рис. 3) за счет преобладания на интервале *AE* кривой *3* кренящего момента (положительные значения), который сменился на непродолжительное

время (интервал *EF*) преобладанием суммы восстанавливающего и инерционно-демпфирующего моментов (отрицательные значения), что привело, в итоге, к опрокидыванию контура: необратимое накренение контура на угол $\theta > 60°$, после которого угол крена достиг 90°.

На рис. 4 представлены результаты вычислений крутизны передних склонов "волн-убийц" (крутизна определена как угол между горизонтальной прямой и лучом, проведенным из низшей точки профиля волны к вершине гребня) для начального состояния (α_0), первого (α_1) и второго (α_2) максимумов.

По мере уменьшения длины центральной волны увеличивается крутизна переднего склона "волны-убийцы". Особенно наглядно это прослеживается для склонов первого и второго максимумов "волны-убийцы". Максимальное увеличение крутизны склонов первого и второго максимумов по отношению к склону начального состояния "волны-убийцы" составило 1,9 и 2,2 раза соответственно. При этом крутизна склона второго максимума превышает в 1,2 раза крутизну склона первого максимума.

Для численного исследования устойчивости выбрано пять значений относительных начальных расстояний $\Delta x/\lambda_r$ между абсциссами положений "волны-убийцы" и контура, которые соответственно равны пяти абсциссам профилей (*a*—*e*) "волны-убийцы" (см. рис. 2). Например, при выборе начального расстояния $\Delta x/\lambda_r$, равного абсциссе второго максимума (*c*), обеспечивается воздействие на контур именно второго максимума "волны-убийцы". Численное моделирование выполнено для всех сочетаний трех параметров: относительного расстояния $\Delta x/\lambda_r$ (*a*—*e*), длины "волны-убийцы" (см. табл. 1) и водоизмещения контура (табл. 2). Результаты численного исследования устойчивости контуров к опрокидыванию "волнами-убийцами" собраны в матрицу, геометрическая интерпретация которой представлена на рис. 5. Строки матрицы (штриховые горизонтальные линии) соответствуют начальной крутизне "волн-убийц" или длинам их центральных волн (120...174 м). Столбцы (штриховые наклонные ломаные линии *a*—*e*) матрицы относятся к значениям относительного расстояния ($\Delta x/\lambda_r$) между начальными абсциссами положений "волны-убийцы" и контура. Для каждого контура (*1*—*5* — номера контуров, табл. 2) область опрокидывания очерчена прямыми линиями. Так, прямая *1* (рис. 5) и часть периметра геометрического изображения матрицы, примыкающего к концам указанной прямой, образуют замкнутый геометрический контур, ограничивающий область параметров опрокидывания контура судна водоизмещением 1389 т, внутри которой содержатся узлы (пересечение штриховых линий строк и столбцов), координаты которых (S_r, $\Delta x/\lambda_r$) представляют собой параметры опрокидывания контура *1* (табл. 2) в системе "контур—волна-убийца". Три смежные прямые *2* (рис. 5) и замыкающая их часть периметра геометрической интерпретации матрицы образуют замкнутый гео-

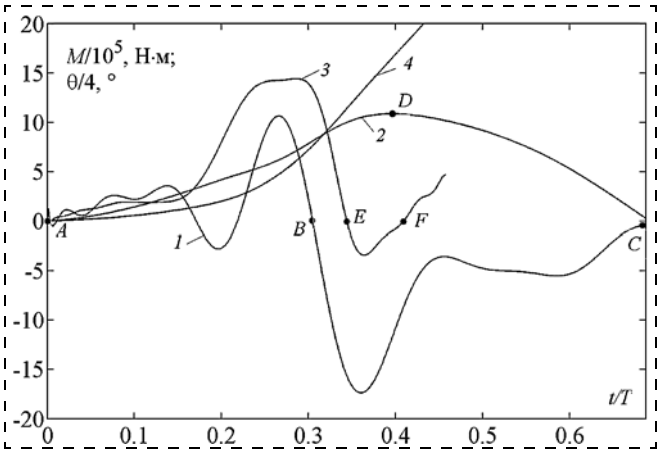

Рис. 3. Эволюция момента сил (*M*) и угла крена (θ) контура судна водоизмещением 9260 т в процессе частичного накренения (*1* — *M*, *2* — θ) и опрокидывания (*3* — *M*, *4* — θ) "волной-убийцей" с длиной центральной волны 149 м (*t* — текущее время, *T* — период "волны-убийцы")

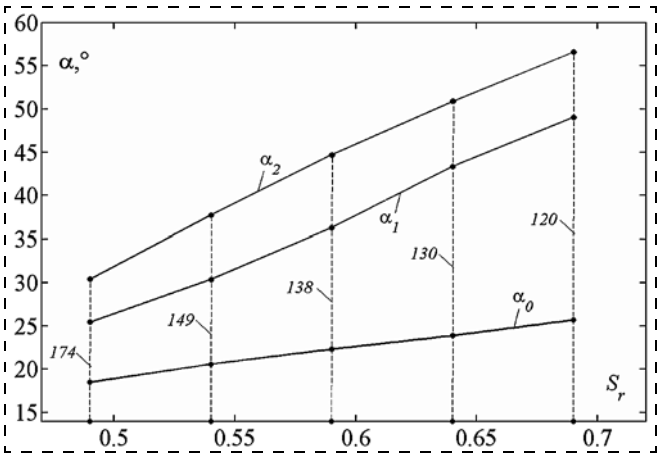

Рис. 4. Крутизна передних склонов "волны-убийцы":
α_0 — начальное состояние, α_1 — первый максимум, α_2 — второй максимум; вертикальные штриховые линии соответствуют длинам центральных волн 120—174 м; S_r — начальная крутизна "волн-убийц"

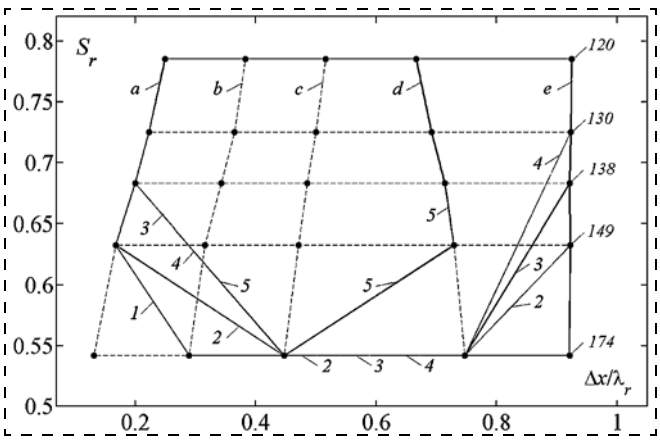

Рис. 5. Области опрокидывания контуров:
1—*5* — номера контуров; *a*, *b*, *c*, *d* и *e* — положения контуров, соответствующие положениям первого, двугорбого, второго максимумов, зарождающегося ныряющего буруна и его обрушению, соответственно; S_r — начальная крутизна "волны-убийцы"; $\Delta x/\lambda_r$ — относительное расстояние между начальными абсциссами положений "волны-убийцы" и контура

метрический контур, очерчивающий область параметров опрокидывания контура судна водоизмещением 3040 т. Аналогично прямые *3*, *4*, *5* и замыкающие их соответствующие части периметра геометрической интерпретации матрицы очерчивают области параметров опрокидывания контуров судов водоизмещением 4947, 7072 и 9260 т соответственно.

Из рис. 5 следует, что "волна-убийца" с длиной центральной волны 174 м не может опрокинуть ни один из контуров своим первым (*a*) максимумом. Динамических свойств первого максимума также недостаточно, чтобы опрокинуть контуры *3*, *4*, *5* "волной-убийцей" с длиной центральной волны 149 м. В тоже время все контуры опрокидываются вторым максимумом: узлы линии *c* находятся внутри областей опрокидывания всех контуров. Причины указанных событий можно пояснить, обратившись к рис. 4, из которого следует, что крутизна переднего склона второго максимума составляет 30 и 37,5° для длин центральных волн 174 и 149 м соответственно. В то же время крутизна переднего склона первого максимума для указанных длин центральных волн не достигает таких значений, что является причиной устойчивости к опрокидыванию контуров *3*, *4*, *5* "волной-убийцей" с длиной центральной волны 149 м. При попадании контура *5* под струю ныряющего буруна (рис. 5, штриховая часть линии *d*) из-за недостаточной крутизны переднего склона "волны-убийцы" с длиной центральной волны 174 м момент сил эволюционирует аналогично с кривой *1* (см. рис. 3). Подобным образом изменяются во времени моменты сил при установке контуров *2*, *3*, *4* перед ныряющим буруном (рис. 5, линия *e*) "волн-убийц "с длиной центральной волны 174, 149, 138 м соответственно. Таким образом, все контуры рыболовных судов водоизмещением от 1389 до 9260 т опрокидываются первым максимумом (*1*, см. рис. 2), двугорбым профилем (*2*), вторым максимумом (*3*), при попадании под бурун (*4*) и обрушающимся буруном (*5*) "волн-убийц" с длинами центральных волн 120...138 м, 120...149 м, 120...174 м, 120...149 м и 120...130 м (кроме контура *5*) соответственно. Контур судна водоизмещением 1389 т опрокидываются при встрече с любым состоянием (*a*—*e*) "волны-убийцы", исключая первый максимум "волны-убийцы" с длиной центральной волны 174 м.

Временной и пространственный радиус жизни "волны-убийцы" высотой 30 м составляет один период и одну длину центральной волны соответственно, что существенно снижает ожидаемую вероятность встречи рыбопромыслового судна с "волной-убийцей". Хотя маневрирование рыбопромысловых судов предопределено технологией вылова рыбы, тем не менее, традиционная рекомендация судоводителю сокращать время плавания бортом к волне остается основной для предупреждения опрокидывания "волной-убийцей". Продолжение исследований, аналогичных проектам MaxWave [11] и Extreme Seas [13], в целях накопления статистики по "волнам-убийцам" способствовало бы ограничению плавания судов в потенциально опасных морских районах.

Заключение

На основе CFD-метода выполнено численное исследование устойчивости контуров морских судов к опрокидыванию на глубоком море в зависимости от их удаления от начального положения и длины "волны-убийцы". Установлено, что опрокинуть судно может только крутая обрушающаяся "волна-убийца". Высокая крутизна переднего склона волны является идентификационным признаком опрокидывающих свойств "волны-убийцы". Крутые "волны-убийцы" с момента возникновения до обрушения существуют в течение одного периода и пробегают не более одной длины центральной волны. В течение времени существования "волна-убийца" проходит пять состояний, определяемых формой ее профиля. Все суда водоизмещением до 9260 т опрокидываются вторым максимумом "волн-убийц". Суда водоизмещением менее 1389 т могут быть опрокинутыми при встрече с любым состоянием "волны-убийцы". Характер эволюции момента сил, действующих на контур, может быть применен для идентификации динамической устойчивости контура на "волне-убийце". Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и оценке устойчивости судов к опрокидыванию "волной-убийцей", а также при разработке мер по обеспечению безопасности рыбопромысловых судов.

Список литературы

1. **Куркин А. А., Пелиновский Е. Н.** "Волны-убийцы": факты, теория и моделирование. Н. Новгород: ННГТУ, 2004. 158 с.
2. **Ruban V., Kodama Y., Ruderman M.** and et al. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates // The European physical journal special topics. 2010. Iss. 185. P. 5—15.
3. **Zakharov V. E.** Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 1968. V. 9. N. 2. P. 190—194.
4. **Zakharov V. E., Shabat A. B.** Exact theory of two-dimensional self-focusing and onedimensional self-modulation of waves in nonlinear media // Soviet physics. Journal of Experimental and Theoretical Physics. 1972. N. 1. P. 62—69.
5. **Пелиновский Е. Н., Слюняев А. В.** "Фрики" — морские волны-убийцы // Природа. 2007. № 3. С. 14—23.
6. **Чаликов Д. В.** Портрет волны-убийцы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 5. № 1. С. 5—13.
7. **Шамин Р. В.** Моделирование волн-убийц на основе эволюционных дифференциальных включений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 1. С. 14—23.
8. **Слюняев А. В., Сергеева А. В.** Численное моделирование и анализ пространственно-временных полей аномальных морских волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 1. С. 24—36.
9. **Кузнецов С. Ю., Сапрыкина Я. В.** Экспериментальные исследования возникновения волн-убийц при эволюции узкого спектра крутых волн // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5. № 1. С. 52—63.
10. **Lawton G.** Monsters of the deep (The perfect wave) // New scientist. 2001. V. 170. N. 2297. P. 28—32.
11. **Rogue** waves — forecast and impact on marine structures. URL: http://www.kuleuven.be/hydr/downloads/MaxWave.pdf (дата обращения: 10.06.2015).

12. **Nikolkina I., Didenkulova I.** Rogue waves in 2006—2010 // Natural hazards and Earth system sciences. 2011. V. 11. P. 2913—2924.

13. **Extreme** Seas. Design for ship safety in extreme seas. URL: http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Fom_28494.pdf (дата обращения: 10.06.2015).

14. **Minami M., Sawada H.** and et al. Study of Ship Responses and Wave Loads in the Freak Wave // Proc. of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. California, USA. May 28—June 2. 2006. P. 272—278.

15. **Onorato M., Proment D.** and et al. Rogue Waves: From Nonlinear Schrodinger Breather Solutions to Sea-Keeping Test. URL: http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0054629 (дата обращения: 10.06.2015).

16. **Справочник** по теории корабля / Под ред. Я. И. Войткунского. Т. 2. Статика судов, качка судов. Л.: Судостроение, 1985. 440 с.

17. **Buca M. P.** Nonlinear Ship Rolling and Capsizing // Brodogradnja. 2006. N. 4. P 321—331.

18. **Wu M., Yang B.** and et al. Prediction of Ship Motions in Head Waves Using RANS Method // Proc. of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. Greece. 2012. P. 1112—1117.

19. **Ferziger J. H.** Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer, 2002. 431 p.

20. **Yakhot V., Orszag S.** Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory // Journal of scientific computing. 1986. V. 1, N. 1. P. 1—51.

21. **Hsu K. L., Chen Y. J.** and et al. Ship flow computation of DTMB 5415. CFD workshop. Tokyo, Japan. March 9—11. 2005.

22. **Longuet-Higgins M. S.** The instability of gravity waves of finite amplitude in deep water// Subharmonics. Proc. R. Soc. 1978. V. 360. P. 489—505.

23. **Fonseca N., Soares C., Pascoal R.** Structural loads induced in a containership by abnormal wave conditions // Journ. Mar. Sci. Technol. 2006. N. 11. P. 245—259.

24. **Liu P. C., Wu A. J.** and et al. What do we know about freaque waves in the ocean and lakes and how do we know it? // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2010. N. 10. P. 1—6.

25. **Сергиенко А. Б.** Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.

26. **Hirt C. W., Nichols B. D.** Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries // Comp. Phys. 1981. V. 39, N. 1. P 201—225.

27. **Дорожко В. М.** Динамическое воздействие "волны-убийцы" на контур морского судна // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. № 3. С. 209—216.

28. **Флот** рыбной промышленности. Справочник типовых судов. М.: Транспорт, 1990. 381 с.

29. **Кулагин В. Д.** Теория и устройство морских промысловых судов. Л., Судостроение, 1974. 440 с.

Stability of a Seagoing Vessel Contour to Capsizing by a Rogue Wave

V. M. Dorozhko, veniamin_dorozhko@mail.ru✉,

Corresponding author: **Dorozhko Veniamin M.,** Senior Staff Scientist, Institute of Automation and Control Processes, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, 690041, Russian Federation, e-mail: veniamin_dorozhko@mail.ru

Received on June 26, 2015
Accepted on July 15, 2015

The topic of the article is the computational fluid dynamics method for investigation of the contour stability in the rogue waves. Sampling of the Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) equations was done by the method of the control volumes. In order to solve the linear system of the scalar equations, an implicit Gauss-Seidel method was used. Pressure-velocity coupling was achieved by using the Pressure-Implicit with Splitting of Operators (PISO) algorithm. The volume of the fluid (VOF) model was used to solve a single set of the momentum equations and tracking of the volume fraction of each of the fluids throughout the domain. A geometric reconstruction scheme was implemented to represent the interface between the fluids using a piecewise-linear approach. In order to compute the translational and angular motion of the center of gravity of the vessel contour, the three degrees of freedom (3DOF) solver was used. Variable sampling in the time domain was used to ensure stability of the solution. A rogue wave with a single high central peak and two small side elevations was used in a numerical wave tank, which met most of the marine observations. The wavelength of the 30-meter high rogue waves, which can capsize marine vessels of a big displacement, was calculated. On the basis of the spatial spectrum of the rogue wave, equations of the velocity of the fluid flowing into the numerical wave tank were obtained. Due to the non-linear processes the rogue wave height reached its maximum and then collapsed to form a plunging breaker. The contour was positioned at a predetermined distance from the initial position of the rogue wave and when the contour met with the rogue wave, the heeling angle of the contour was calculated. On the basis of a series of numerical experiments, the distances and the wavelengths of the rogue waves capsizing the contours of the fishing vessels were calculated. It was discovered that the rogue waves with the length of 120—140 meters and high steepness capsize the contours of the fishing vessels with displacement up to 9260 tons.

Keywords: *stability of a vessel, computational fluid dynamics, rogue wave, wave steepness, heeling angle, contour of a vessel, capsizing of a vessel*

For citation:

Dorozhko V. M. Stability of a Seagoing Vessel Contour to Capsizing by a Rogue Wave, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no 12, pp. 852—860.

DOI: 10.17587/mau/16.852-860

References

1. **Kurkin A. A., Pelinovskiy E. N.** *"Volny-ubiitsy": fakty, teoriya i modelirovanie* (Freak-waves, theory and modeling), N. Novgorod, Publishing house of NNSU, 2004, 158 p. (in Russian).

2. **Ruban V., Kodama Y., Ruderman M.** and et al. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates, *The European physical journal special topics*, 2010, iss. 185, pp. 5—15.

3. **Zakharov V. E.** Stability of periodic waves of finite amplitude on the surface of a deep fluid, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, 1968, vol. 9, no. 2, pp. 190—194.

4. **Zakharov V. E., Shabat A. B.** Exact theory of two-dimensional self-focusing and onedimensional self-modulation of waves in nonlinear media, Soviet physics. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1972, no. 1, pp. 62—69.

5. **Pelinovskij E. N., Slyunyaev A. V.** "*Friki" — morskie volny-ubijcy* ("Freaks" — sea waves killer), Priroda, 2007. no. 3, pp. 14—23 (in Russian).

6. **Chalikov D. V.** *Portret volny-ubijcy* (Portrait of a killer waves), *Fundamental'naya i Prikladnaya Gidrofizika*. 2015, vol. 5, no. 1, pp. 5—13 (in Russian).

7. **Shamin R. V.** *Modelirovanie voln-ubijc na osnove ehvolyucionnyh differencial'nyh vklyuchenij* (Simulation of the killer waves on the basis of evolutionary differential inclusions), *Fundamental'naya i Prikladnaya Gidrofizika,* 2012, vol. 5, no. 1, pp. 14—23 (in Russian).

8. **Slyunyaev A. V., Sergeeva A. V.** *Chislennoe modelirovanie i analiz pros transtven-no-vremennyh polej anomal'nyh morskih voln* (Numerical simulation and analysis of spatio-temporal fields of anomalous sea waves), *Fundamental'naya i Prikladnaya Gidrofizika*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 24—36 (in Russian).

9. **Kuznetsov S. Yu., Saprykina Ya. V.** *Eksperimental'nye issledovaniya vozniknoveniya voln-ubijc pri ehvolyucii uzkogo spektra krutyh voln* (Experimental studies of the emergence of the killer waves in the evolution of a narrow range of steep waves), *Fundamental'naya i Prikladnaya Gidrofizika*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 52—63 (in Russian).

10. **Lawton G.** Monsters of the deep (The perfect wave), New Scientist, 2001, vol. 170, no. 2297, pp. 28—32.

11. **Rogue** waves — forecast and impact on marine structures, available at: http://www.kuleuven.be/hydr/downloads/MaxWave.pdf

12. **Nikolkina I., Didenkulova I.** Rogue waves in 2006—2010, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2011, vol. 11, pp. 2913—2924.

13. **Extreme** Seas. Design for ship safety in extreme seas, available at: http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Fom_28494.pdf

14. **Minami M., Sawada H.** and et al. Study of Ship Responses and Wave Loads in the Freak Wave, *Proc. of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, California, USA, May 28—June 2, 2006, pp. 272—278.

15. **Onorato M., Proment D.** and et al. Rogue Waves: From Nonlinear Schrodinger Breather Solutions to Sea-Keeping Test, available at: http://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0054629

16. **Voitkounski Y. I. Ed.** *Spravochnik po teorii korablya T. 2. Statika sudov, kachka sudov* (Ship Theory Handbook. Vol. 2. Statics of Ship, Ship Motions), Leningrad, Sudostroenie, 1985, 440 p. (in Russian).

17. **Buca M. P.** Nonlinear Ship Rolling and Capsizing, *Brodogradnja*, 2006, no. 4, pp 321—331.

18. **Wu M., Yang B.** and et al. Prediction of Ship Motions in Head Waves Using RANS Method, *Proc. of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*, Greece, 2012, pp. 1112—1117.

19. **Ferziger J. H.** Computational Methods for Fluid Dynamics, Berlin, Springer, 2002, 431 p.

20. **Yakhot V., Orszag S.** Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory, *Journal of Scientific Computing*, 1986, vol. 1, no. 1, pp. 1—51.

21. **Hsu K. L., Chen Y. J.** and et al. Ship flow computation of DTMB 5415. CFD workshop, Tokyo, Japan, March 9—11, 2005.

22. **Longuet-Higgins M. S.** The instability of gravity waves of finite amplitude in deep water, *Subharmonics. Proc. R. Soc,* 1978, vol. 360, pp. 489—505.

23. **Fonseca N., Soares C., Pascoal R.** Structural loads induced in a containership by abnormal wave conditions, *Journ. Mar. Sci. Technol.,* 2006, no. 11, pp. 245—259.

24. **Liu P. C., Wu A. J.** and et al. What do we know about freaque waves in the ocean and lakes and how do we know it? *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 2010, no. 10, pp. 1—6.

25. **Sergienko A. B.** *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Digital Signal Processing), SPb., Piter, 2002, 608 p.

26. **Hirt C. W., Nichols B. D.** Volume of fluid method for the dynamics of free boundaries, *Comp. Phys.,* 1981, vol. 39, no. 1, pp. 201—225.

27. **Dorozhko V. M.** *Dinamicheskoe vozdeistvie "volny-ubiitsy" na kontur morskogo sudna* (Dynamic impact of rogue wave on a seagoing vessel contour), *Mekhatronika, Avtomatizatscia, Upravlenie*, 2015, no. 3, pp. 209—216 (in Russian).

28. ***Flot** rybnoi promyshlennosti. Spravochnik tipovykh sudov* (Fleet fishing industry. Handbook of model ships), Moscow, Transport, 2012. 381 p. (in Russian).

29. **Kulagin V. D.** *Teoriya i ustrojstvo morskih promyslovyh sudov* (Theory and device marine fishing vessels), Leningrad, Sudostroenie, 1974. 440 p. (in Russian).

ИНФОРМАЦИЯ

8—9 октября в ЦНИИ РТК в рамках XIX Международного форума "Российский промышленник" и VIII Петербургского международного инновационного форума состоялась очередная 26-я научно-техническая конференция "Экстремальная робототехника (ЭР-2015)".

В этом году конференция прошла в формате международного мероприятия при финансовой поддержке Минобрнауки и при поддержке Минобороны и МЧС России, Роскосмоса, ОЭММПУ РАН, Ассоциации ГНЦ "Наука", Правительства Санкт-Петербурга.

Бессменным организатором конференции "ЭР-2015" выступил ГНЦ РФ "Центральный научно-исследовательский и опытно-конструкторский институт робототехники и технической кибернетики" (ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург).

На открытии конференции с приветствием к гостям и участникам обратились: директор-главный конструктор ЦНИИ РТК А. В. Лопота; заместитель директора Департамента науки и технологий Минобрнауки России А. П. Антропов; ректор Университета ИТМО, вице-президент Российского союза ректоров, председатель Совета ректоров вузов Санкт-Петербурга, чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. В. Н. Васильев; ректор Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, д.т.н., проф. С. П. Бачевский; генеральный директор НПО Специальных материалов, чл.-корр. РАН, академик РАРАН, д.т.н., проф. М. В. Сильников; почетный главный конструктор ЦНИИ РТК, д.т.н., проф. Е. И. Юревич.

В работе конференции приняли участие более 200 специалистов из ведущих российских и зарубежных технических университетов, научно-исследовательских и промышленных организаций, заинтересованных министерств и ведомств. Среди зарубежных гостей и участников конференции — представители Австрии, Беларуси, Вьетнама, Ирана, Китая, Кипра, Украины.

Работа конференции проходила в формате пленарных и секционных заседаний, посвященных актуальным проблемам и задачам в сфере робототехнических систем и средств безопасности. Всего было представлено около 100 докладов. Особым вниманием у гостей и участников пользовались заседания круглых столов по вопросам специальной и военной робототехники, образовательной робототехники, семинара "Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта (БТС-ИИ-2015)", которые с успехом прошли в рамках конференции.

На заключительном заседании выступили председатели секций и члены программного комитета конференции. Они отметили высокую активность и большую заинтересованность молодых специалистов и рекомендовали лучшие доклады к публикации в российских научно-технических журналах. Были поведены итоги и принято Решение конференции.