References

1. **Filaretov V. F., Alekscev Yu. K., Lebedev A. V.** *Sistemy upravleniya podvodnymi robotami* (Control systems for underwater robots), Moscow, Kruglyi god, 2001, 288 p. (in Russian).
2. **Filaretov V. F., Lebedev A. V., Yukhimets D. A.** *Ustroistva i sistemy upravleniya podvodnykh robotov (*Devices and control systems of underwater robots), Moscow, Nauka, 2005, 270 p. (in Russian).
3. **Fossen T. I.** Guidance and control of ocean vehicles, John Wiley & Sons Ltd., 1994, 494 p.
4. **Filaretov V. F., Konoplin A. Yu.** System of automatic stabilization of underwater vehicle in stationkeeping regime with working multilink manipulator. Part 2, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie,* 2014, no. 7, pp. 29—34 (in Russian).
5. **Fu K. S., Gonzalez R. C., Lee C. S. G.** Robotics: Control, sensing, vision and intelligence, McGraw-Hill, 1987, 580 p.
6. **Fridlender G. O., Kozlov M. S.** *Aviatsionnye giroskopicheskie pribory* (Aeronautical gyroscopic instruments), Moscow, Oborongiz, 1961, 390 p. (in Russian).
7. **Korn G., Korn T.** *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* (Mathematical Handbook for Scientists and Engineers), Moscow, 1973, 832 p. (in Russian).
8. **Vinogradov K. A., Koshkarev V. N., Osyukhin B. A., Khrebtov A. A.** *Absolyutnye i otnositel'nye lagi: Spravochnik* (Absolute and relative logs: Handbook), Leningrad, Sudostroenie, 1990, 264 p. (in Russian).

Corresponding author:

Filaretov Vladimir F., Doctor of Technical Science, Head of Laboratory Institute of Automation and Control Processes Far Eastern Branch of RAS, Radio str., 5690041, Vladivostok, Russian Federation; Tel. (office): (4232) 313783, Fax: (4232) 310452, e-mail: filaret@pma.ru

УДК 004: 656.61.073

В. М. Дорожко, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., bendor@iacp.dvo.ru,
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, г. Владивосток

Динамическое воздействие "волны-убийцы" на контур морского судна

На основе метода вычислительной гидродинамики разработана технология моделирования динамического воздействия "волны-убийцы" на контур морского судна. Получены зависимости от времени скоростей и сил перемещения контура, угла, угловой скорости и ускорения, момента сил и момента импульса контура. Установлено, что контуры судов водоизмещением до 92 600 т опрокидываются "волнами-убийцами" высотой 30 м. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании морских судов, а также при разработке мероприятий по обеспечению безопасности судоходства.

Ключевые слова: *"волна-убийца", вычислительная гидродинамика, контур судна, момент силы, момент импульса, угол крена, опрокидывание судна, безопасность судоходства*

Введение

"Волны-убийцы" представляют особую опасность для морских судов. Высота таких волн может достигать 30 м, при этом они возникают внезапно как в штормовых условиях, так и при относительно тихой погоде [1]. Теоретическая оценка вероятности возникновения "волны-убийцы" [2] показывает, что она может возникнуть один раз в несколько десятков лет. Тем не менее, считается, что за период 1968—1994 гг. от действия "волн-убийц" погибли или получили повреждение 22 супертанкера [3]. В 2000...2003 гг. Европейским союзом был профинансирован проект "MaxWave" [4] по мониторингу поверхности мирового океана с помощью радарных спутников ERS-1 и ERS-2 Европейского космического агентства. Результаты исследований показали, что "волны-убийцы" возникают чаще [5], чем предсказывается теорией. Например, за период 2006...2010 гг. было зарегистрировано 78 случаев возникновения аномальных волн [6]. Воздействие "волны-убийцы" (далее — аномальная волна) на морское судно может проявиться как в опрокидывании, так и нарушении целостности его конструкции за счет возникновения больших давлений в местах удара указанной волны [7]. Если нарушения целостности можно предупредить путем проектирования более прочных судов, то избежать опрокидывания судов при встрече с аномальной волной не представляется возможным из-за внезапности возникновения волны и кратковременности подобной встречи. Все это предопределяет актуальность изучения воздействия аномальных волн на морские суда.

Опрокидывание морского судна в результате воздействия аномальной волны представляет собой особый случай движения судна на волнении. Нелинейность процесса движения столь существенна, что даже в рамках теории потенциального движения невязкой жидкости учет конечности амплитуд и скоростей качки приводит к сложным нелинейным граничным условиям [8]. Сложность достаточно строгого подхода к определению гидродинамических сил в задаче об опрокидывании судна заставляет обращаться к экспериментальным или вычислительным методам исследований. В качестве примера можно привести ряд исследований воздействия аномальных волн на морские суда, в которых выполнен анализ фактического материала морских происшествий [9, 10], представлен обзор экспериментальных и численных методов изучения опрокидывания судов в экстремальных условиях [11], выполнены экспериментальные исследования в

бассейне воздействия аномальной волны на модельное судно [12]. Следует отметить наличие большого числа работ по численному моделированию как самих аномальных волн, например [13, 14], так и их воздействия на препятствия [15, 16]. Недостатком большинства указанных работ является проведение исследований в модельных масштабах.

В задачах исследования гидродинамики судов широко применяется метод плоских сечений, при использовании которого результаты численного моделирования для удлиненных тел (морских судов) хорошо согласуются с результатами эксперимента [8]. В связи с этим в данной работе ставится задача численного исследования воздействия аномальной волны максимальной высоты 30 м на полноразмерное плоское поперечное сечение (контур), проходящее через центр морского судна, в целях получения количественных оценок параметров движения контура. Выбор контура в данной задаче соответствует наиболее опасному положению судна — параллельно гребню волны.

Метод решения задачи исследования

Решение поставленной задачи выполнено методом вычислительной гидродинамики (CFD — computational fluid dynamics), позволяющим реализовать виртуальный гидродинамический бассейн, в котором осуществляется формирование аномальной волны и ее воздействие на контур судна. В основу CFD-метода положены уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations, RANSE) [17], которые могут быть записаны в тензорном виде следующим образом:

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

$$\rho\frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho\frac{\partial}{\partial x_j}(u_i u_j) =$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\right] + \rho\frac{\partial}{\partial x_j}(-\overline{u_i' u_j'}), \qquad (2)$$

где $\{i, j\} = 1, 2, 3$; x_1, x_2, x_3 — декартовы координаты в абсолютной системе $ox_1x_2x_3$ и соответствующие им u_1, u_2, u_3 — осредненные значения абсолютной скорости потока жидкости, а также u_1', u_2', u_3' — флуктуации абсолютной скорости; μ и ρ — вязкость и плотность жидкости соответственно; t — время; p — давление; $\rho u_i' u_j'$ — напряжение Рейнольдса. Для вычисления напряжения Рейнольдса применена модель турбулентности $k_t - \varepsilon_t$ (renormalization group mathematical technique, RNG) [18], которая позволяет получать расчетные значения гидродинамических полей, близкие к их экспериментальным значениям [19]. В связи с этим уравнения (1), (2) дополнены уравнениями [18] переноса турбулентной кинетической энергии (k_t) и скорости ее диссипации (ε_t).

Применительно к настоящей задаче процесс зарождения и развития аномальной волны можно условно представить в виде трех этапов [20]. *Первый этап:* случайная пространственно-временная фокусировка [21] спектра компонентов морского волнения, в результате которой формируется группа волн. Для перехода ко второму этапу требуется выполнение условия достаточности крутизны волн в группе ($S = \pi H/\lambda > 0{,}443$, где H и λ — максимальная высота и средняя длина волн) [22]. *Второй этап:* внутреннее нелинейное преобразование группы волн до аномальных высот 30 м [2]. На втором этапе аномальная волна воздействует на контур, свободно плавающий на поверхности воды. *Третий этап:* обрушение аномальной волны. В соответствии с поставленной задачей в данной работе CFD-методом моделируются второй и третий этапы.

Численное решение системы уравнений (1), (2) выполнено в расчетной области, представляющей собой виртуальный бассейн, имеющий форму прямоугольника, сформированного в вертикальной плоскости в системе координат oxy, ось ox которой лежит на условной поверхности спокойной воды (при отсутствии волн), а ось oy направлена вверх и совпадает с левой границей расчетной области. Пространство расчетной области разбито квадратными сеточными элементами, за исключением прямоугольной области, охватывающей пространство движения контура, которое разбито треугольными сеточными элементами, перестраиваемыми в процессе движения контура под воздействием аномальной волны.

Натурные наблюдения [23] свидетельствуют, что аномальные волны имеют вид группы волн, под огибающей которых может находиться несколько периодов волн. Анализ формы наиболее часто встречающихся аномальных волн с тремя периодами указывает на их сходство с вейвлетом Морле [24]. В связи с этим на поверхности воды в расчетной области виртуального бассейна создавалась бегущая волна, начальная (при $t = 0$) форма которой соответствует вещественной компоненте комплексного вейвлета Морле. Отклонение поверхности такой аномальной волны от уровня спокойной воды описывается выражением

$$\zeta = A_b \exp\left[-2\left(\frac{k_b(x - x_c)}{2\pi}\right)^2\right]\cos[k_b(x - x_c) - \sigma_b t], \qquad (3)$$

где A_b — начальная амплитуда аномальной волны; $k_b = 2\pi/\lambda_b$, $\sigma_b = \sqrt{gk_b}$, λ_b и x_c — волновое число, угловая частота, длина центральной волны и координата начального положения максимума аномальной волны соответственно.

CFD-метод предполагает пространственную дискретизацию всех переменных, в том числе и пространственного профиля ζ с шагом d, равным размеру стороны сеточного элемента. Применение дискретного преобразования Фурье [25] к массиву дискретных значений указанного профиля позво-

лило получить пространственный спектр в виде массива комплексных спектральных амплитуд $Y_n = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{2}{N} \zeta(i+1)\exp(-j2\pi ni/N)$, $n = \overline{1, N}$, где N и i — число дискретных значений и номер элемента в массиве дискретных значений профиля ζ, $j = \sqrt{-1}$, n — порядковый номер комплексной спектральной амплитуды Y_n.

Для формирования в расчетной области поля скорости аномальной волны использовалось усечение боковых составляющих спектра комплексных амплитуд, модуль которых не превышал амплитудный порог, равный $0{,}1 \cdot \max(|Y_n|)$. В силу симметрии спектра центральная спектральная амплитуда имеет максимальную высоту и характеризуется центральной длиной волны спектра. Граничное условие на входе (левая граница) расчетной области для системы уравнений (1) и (2) принимает вид вектора скорости жидкости, горизонтальная (υ_x) и вертикальная (υ_y) компоненты которого определяются следующими выражениями:

$$\upsilon_x = \sum_{n=m}^{M} \frac{gk_n|Y_n|}{\sigma_n} \exp(k_n y)\cos(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (4)$$

$$\upsilon_y = \sum_{n=m}^{M} \frac{gk_n|Y_n|}{\sigma_n} \exp(k_n y)\sin(k_n x_0 - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (5)$$

где m и M — номера комплексных амплитуд левой и правой границ усеченного спектра; g — ускорение свободного падения; $k_n = 2\pi/\lambda_n$; $\sigma_n = \sqrt{gk_n}$; x_0 — координата входной границы; φ_n — начальная фаза n-й составляющей спектра. Граничное условие на выходе (правая граница) расчетной области выполнено с помощью введения дополнительного затухания, исключающего отражение бегущих волн спектра от границы. Граничное условие на дне виртуального бассейна соответствует твердому телу — нулевой нормальной производной скорости жидкости, а на верхней границе — атмосферному давлению. Граничные условия на поверхности свободно плавающего контура соответствуют условию твердого тела. Воздействие аномальной волны на контур и его движение представляют собой нестационарный процесс. В связи с этим кроме пространственной (сеточной) дискретизации численное решение предусматривает и временную дискретизацию процессов. В соответствии с моделью DOF (degrees of freedom) [26] на каждом временном шаге дискретизации вычисляются векторы силы и момента сил, приложенные к центру тяжести свободно плавающего контура. Указанные векторы являются основанием для вычисления векторов линейных и угловых перемещений и соответствующих им скоростей и ускорений контура. Граничное условие на свободной поверхности воды вычислялось в соответствии с моделью VOF (volume of fluid) [27]. В начальный момент времени свободно плавающий контур устанавливался на поверхности воды с таким расчетом, чтобы его положение в дальнейшем совпало с x-координатой второго максимума высоты аномальной волны (далее будут приведены пояснения о числе максимумов высоты в процессе нелинейного преобразования аномальной волны). Такое начальное расположение контура придает ему наибольшую динамичность.

Начальные условия уравнений (1), (2) сформированы путем инициализации расчетной области от вектора скорости (4), (5), в результате чего во всем расчетном пространстве виртуального бассейна создавалось распределение амплитуд и скоростей жидкости и воздуха, соответствующее начальному ($t = 0$) состоянию (3) бегущей аномальной волны.

Численное моделирование воздействия аномальных волн на контур морского судна, прикладная интерпретация и обсуждение результатов

Для численного моделирования сформировано расчетное пространство в виде прямоугольника длиной 1000 м и высотой 300 м. Расчетное пространство разбито квадратными сеточными элементами со стороной 0,5 м, за исключением прямоугольной области длиной 200 м и высотой 50 м, охватывающей пространство движения контура, которое разбито равносторонними треугольными сеточными элементами со стороной 0,5 м. Данное расчетное пространство представляет собой виртуальный 2D-бассейн, глубина воды в котором составляет 250 м, что обеспечивает условие глубокой воды (глубина превышает половину самой длинной волны [2] усеченного спектра Y_n). Плотность воды принята равной $\rho = 1027$ кг/м^3, ускорение свободного падения $g = 9{,}81$ м/с^2. Шаг дискретизации времени (Δt) нестационарного решателя выбран равным 0,0005 с, при котором максимальное число Куранта ($C = \Delta t \cdot \upsilon_{\max}/d$, где $\upsilon_{\max}$ — максимальное значение скорости жидкости, d — сторона сеточной ячейки) не превышало 0,25.

Вычисление начальных (в момент $t = 0$) значений амплитуд и длин волн, обеспечивающих в процессе внутреннего нелинейного преобразования аномальных волн возрастание их высот до значений 30 м, выполнено в два этапа. На первом этапе проведено численное исследование нелинейного преобразования волн (3) при базовой длине (λ_b) центральных волн спектра, равной 100 м, и нескольких начальных амплитудах (A_b): 8, 9, 10, 11 и 12 м. Выбор крайних значений амплитуд 8 и 12 м обусловлен тем, что второй максимум высоты базовой волны с начальной амплитудой менее 8 м имеет незначительную крутизну (менее 0,496). В процессе нелинейного преобразования базовой волны с амплитудой более 12 м (крутизна более 0,785) оба ее максимума высоты (первый и второй) смыкаются, что приводит к стремительному уменьшению их высоты. В связи с этим для изучения воздействия аномальных волн на контур морского судна выбраны волны, крутизна которых лежит в диапазоне 0,496...0,785,

так как аномальные волны вне указанного диапазона не представляют опасности для морских судов по указанным выше причинам. В процессе нелинейного преобразования для каждой начальной амплитуды базовых волн вычислены соответствующие значения высоты (H_b) второго максимума. На втором этапе из выражения $m = 30/H_b$ определены масштабирующие коэффициенты (m) для каждой из базовых волн. Применение указанных масштабирующих коэффициентов одновременно к начальным амплитудам A_b и длине λ_b центральных волн, позволило получить ряд аномальных волн с одинаковой высотой ($H_m = mH_b$) 30 м второго максимума высоты и длинами центральных волн ($\lambda_m = m\lambda_b$),

Водоизмещение судов и размеры их контуров

Водоизмещение судов, т	Параметры контуров			
	Ширина, м	Высота, м	Осадка, м	Ширина/высота
1120	9,3	5,0	4,15	1,86
3040	13,5	8,9	6,25	1,52
4947	15,9	10,0	5,66	1.59
7160	17,4	8,8	5,60	1,98
9260	19,0	12,2	6,60	1,56

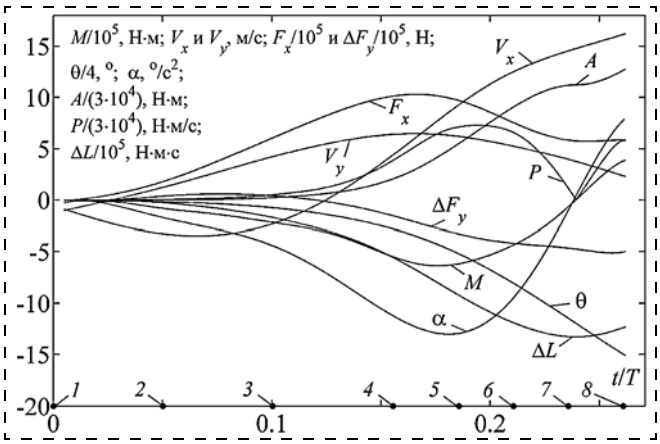

Рис. 1. Изменение параметров движения контура в процессе воздействия аномальной волны

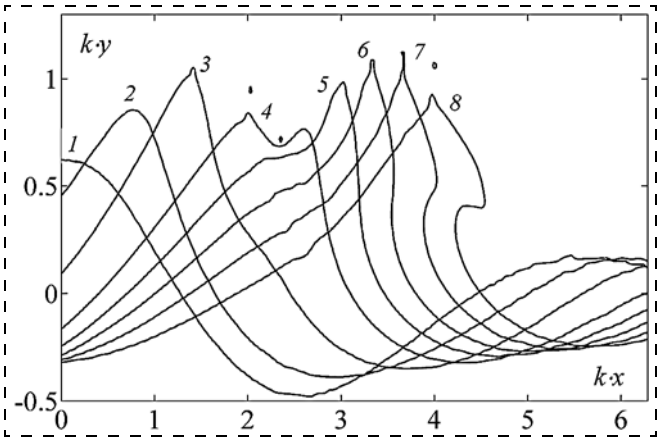

Рис. 2. Последовательность профилей аномальной волны, отражающая процесс ее внутреннего нелинейного преобразования, *x* и *y* — координаты волны в системе *oxy*

лежащими в диапазоне 120...190 м. Следует отметить, что масштабирование обусловило совпадение профилей базовых волн и соответствующих им масштабированных аномальных волн одинаковой крутизны, что обеспечило сохранение выбранного диапазона значений крутизны. В результате центральные длины (λ_m) масштабированных аномальных волн с высотой второго максимума, равной 30 м, составили массив (120, 130, 140, 155, 190) м, а их крутизна ($S = 30\pi/\lambda_m$) — массив (0,785; 0,725; 0,673; 0,608; 0,496) соответственно.

В качестве объектов воздействия аномальных волн выбраны контуры рыбопромысловых судов [28] (см. таблицу), для которых характерно длительное пребывание в море, что увеличивает вероятность их встречи с аномальной волной.

Численное моделирование показало, что движение контуров под воздействием аномальных волн имеет типичные признаки, которые рассмотрим на примере движения контура судна водоизмещением 4947 т (среднее значение водоизмещения выбранного ряда судов) под воздействием аномальной волны с центральной длиной 155 м (середина выбранного диапазона длин волн). Количественные оценки параметров движения контура от начала до опрокидывания представлены на рис. 1—3, на которых выполнена сквозная нумерация (1, ..., 8) диаграмм, относящаяся к соответствующим моментам нормированного времени t/T (см. рис. 1), где $T = 9{,}964$ с — период времени аномальной волны.

Процесс изменения положения и угла крена контура (рис. 3) рассматривается синхронно с диаграммами на рис. 1. Для наглядности процесса нелинейного преобразования приводится последовательность профилей аномальной волны без контура (см. рис. 2).

На рис. 1 представлены зависимости от нормированного времени (t/T) момента сил (M) относительно центра тяжести контура; горизонтальной (F_x) и вертикальной (ΔF_y — отклонение от сил плавучести контура) компонент вектора силы; горизонтальной (V_x) и вертикальной (V_y) компонент вектора скорости движения контура; угла крена (θ), скорости (ω) и ускорения (α) угла крена контура; работы ($A(t/T) = \int_0^{\theta(t/T)} M d\theta$) и мощности ($P(t/T) = \int_0^{\omega(t/T)} M d\omega$) момента сил; приращения момента импульса ($\Delta L = \int_0^{t/T} (Mdt)/T$) [29] в процессе воздействия аномальной волны на контур.

Начальное состояние численной модели соответствует номеру *1* нормированного времени (t/T) на рис. 1—3. Первые признаки нелинейного преобразования волны выражаются в искажении геометрии профиля ее гребня (*2* на рис. 2, 3). Процесс

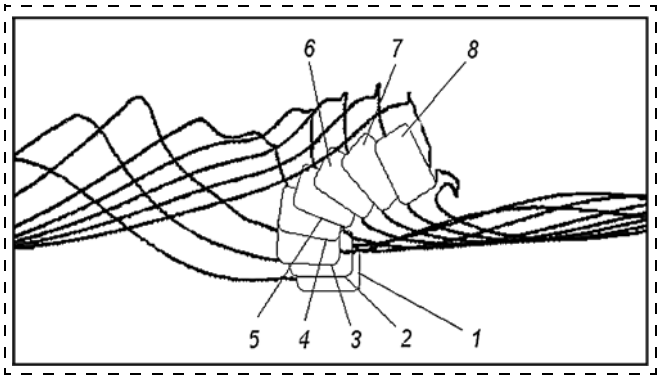

Рис. 3. Подъем, смещение и опрокидывание контура под воздействием аномальной волны

формирования первого максимума высоты аномальной волны завершается в момент *3* (рис. 2, 3). Этому моменту времени соответствует начало роста модуля всех параметров (см. рис. 1) движения контура и появление первых признаков крена (рис. 3), обусловленного встречей контура с фронтом аномальной волны. Диаграммы *4* характеризуют промежуточное состояние, для которого характерно резкое снижение высоты аномальной волны и формирование профиля гребня седловидной формы (*4* на рис. 2, 3). Тем не менее, за счет приобретенной энергии от первого максимума аномальной волны движение контура на интервале *3—4* нормированного времени характеризуется ростом значений горизонтальной и вертикальной компонент сил (F_x и ΔF_y на рис. 1), приложенных к центру тяжести контура и, соответственно, увеличением скоростей горизонтального смещения (V_x) и вертикального подъема (V_y) контура. Существенно увеличиваются момент сил (M), работа (A) и мощность момента сил (P), а также приращение момента импульса (ΔL).

Вследствие указанных процессов наблюдается рост крена и углового ускорения (θ и α) контура, вследствие чего он заметно накренился и поднялся на волне (*4* на рис. 3). В процессе последующих нелинейных преобразований рост высоты аномальной волны (см. рис. 2, 3) в момент времени *5* приобретает максимальное ускорение, что приводит к резкому увеличению крена (θ) и подъему контура (*5* на рис. 1, 3). Для этого момента времени характерно формирование максимумов (см. рис. 1) момента (M) сил, углового ускорения (α), мощности момента сил (P), вертикальной скорости (V_y) и горизонтальной силы (F_x). В момент времени *6* завершается формирование второго максимума высоты аномальной волны (см. рис. 2, 3). При этом аномальная волна, вектор скорости жидкости которой приобрел горизонтальную направленность, накрывает левую половину контура (*6* на рис. 3) и, увлекая, стремительно увеличивает его крен (см. рис. 1 и 3) и горизонтальную скорость (V_x).

В момент времени *6* в связи с прекращением роста высоты аномальной волны отмечается снижение значений момента сил M и углового ускорения α. Работа A момента сил и приращение момента импульса ΔL, в связи с их интегральным характером, сохраняют тенденцию к увеличению. С момента *7* (см. рис. 1—3) нормированного времени начинается процесс разрушения аномальной волны. Максимальное значение скорости воды (22 м/с) в зоне, располагающейся на середине высоты фронта волны (см. рис. 2), превосходит скорость движения самой волны (15 м/с), что обусловливает начало формирования выброса из указанной зоны (*7*, *8*) струи воды, именуемой ныряющим буруном. За счет совпадения зоны формирования ныряющего буруна и положения контура (*7*, *8* на рис. 3) увеличиваются скорость горизонтального смещения и крен контура, вплоть до его опрокидывания (порог опрокидывания — $\theta \geqslant 60^\circ$ [30]). Этим объясняется выбор начального положения контура, совпадающего с x-координатой второго максимума высоты аномальной волны, что позволило реализовать максимальное динамическое воздействие аномальной волны на контур.

Таким образом, в процессе последовательного формирования двух максимумов высоты аномальной волны с образованием ныряющего буруна происходит увеличение крутизны волны, значение которой перед ее обрушением достигает значения 2,5, вследствие этого движение контура характеризуется одновременным подъемом, смещением с нарастающей скоростью и увеличением крена вплоть до опрокидывания.

На рис. 4 представлены результаты вычисления угла крена контуров различных судов под действием аномальной волны. Из диаграмм следует, что все контуры достигли состояния опрокидывания ($\theta = 60^\circ$). По мере роста водоизмещения увеличивалось время опрокидывания. Исключением является задержка опрокидывания контура судна меньшего водоизмещения (7160 т) относительно судна большего водоизмещения (9260 т), обусловленная лучшей устойчивостью контура за счет увеличен-

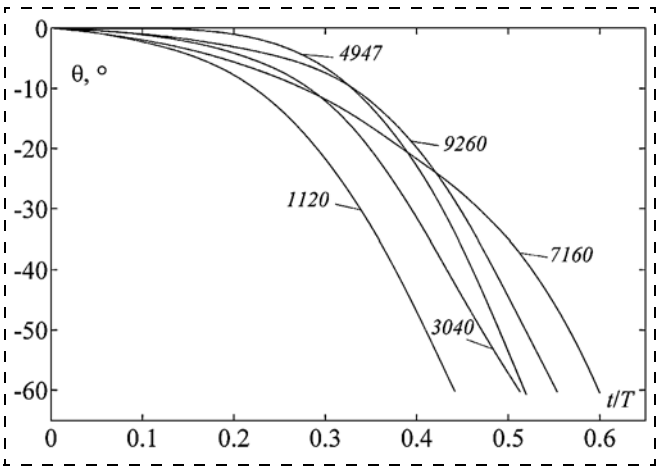

Рис. 4. Изменение угла крена контуров в процессе воздействия аномальной волны высотой 30 м и длиной центральной волны спектра 155 м. Параметр диаграмм — водоизмещение судов, к которым относятся контуры

ного значения отношения (1,98) его ширины к высоте (см. таблицу).

Интегральной величиной, характеризующей итоговое значение воздействия внешних сил, в данном случае — аномальной волны на контур, является момент импульса $L = \int_0^{\tau} M dt$, где τ — финальный момент времени, соответствующий опрокидыванию судна. На рис. 5 представлены результаты вычисления момента импульса контуров от опрокидывающего воздействия аномальных волн крутизной от 0,496 до 0,785, которым соответствуют волны с максимальной высотой 30 м и длинами центральных волн в диапазоне 120...190 м. Результаты вычислений показывают, что указанные аномальные волны опрокидывают суда всех контуров водоизмещением от 1120 до 9200 т. При этом с ростом крутизны волны или водоизмещения судна, которому принадлежит контур, увеличивается опрокидывающее значение момента импульса, развиваемое аномальной волной, что указывает на большую опасность крутых аномальных волн даже для больших судов.

Отмечающееся снижение моментов импульса (рис. 5) для волн крутизной 0,785 обусловлено отсутствием у них процесса формирования ныряющего буруна в связи с тем, что волны подобной крутизны имеют тенденцию к смыканию обоих максимумов высоты (первого и второго), что приводит к стремительному уменьшению их высоты. Тем не менее, уменьшенные значения моментов импульса достаточны для опрокидывания контуров. Из сравнения параметров контуров судов водоизмещением 3040 и 7160 т следует, что при равной высоте соотношение ширины их контуров составляет 1,3 (см. таблицу), а максимальных значений моментов импульса — 2,4 (рис. 5). Это свидетельствует о повышении сопротивляемости (устойчивости) к опрокидыванию контура с увеличением его ширины. Из этого также следует, что опрокидывающий момент импульса для контуров, полученных в результате поперечного сечения вне центральной части, будет меньше, так как контуры в носовой или кормовой частях судна сужаются. Следовательно, оценки для контуров, полученные в настоящей работе для поперечных сечений, проходящих через центр судов, и распространенные на всю длину судов, можно рассматривать как оптимистические в отношении устойчивости судов к опрокидывающему действию аномальной волной.

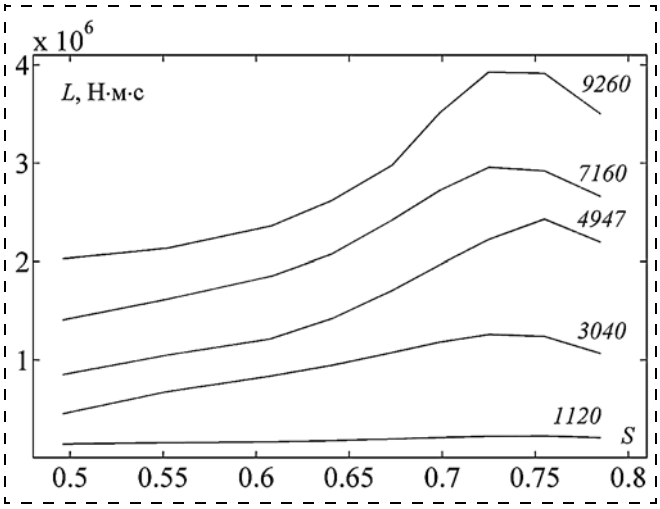

Рис. 5. Зависимость от крутизны аномальных волн значения момента импульса, приводящего к опрокидыванию контуров. Параметр диаграмм — водоизмещение судов, к которым относятся контуры

Данные о максимальном (*8* на рис. 1) значении работы *A* могут использоваться для оценки устойчивости аналогичных судов по диаграммам статической остойчивости [8] без проведения исследований на воздействие аномальных волн. Вычисленные значения момента импульса (рис. 5), осредненные ко времени опрокидывания ((0,45...0,60)T, где $T = \sqrt{2\pi\lambda_m/g}$ — период аномальной волны), могут использоваться для вычисления средних опрокидывающих моментов контуров судов, используемых при оценке устойчивости судов [8]. Увеличение ширины судна при неизменной высоте борта ведет к увеличению устойчивости судна (см. рис. 4, 5) к опрокидывающему воздействию аномальной волны, что может быть учтено при проектировании, например, рыбопромысловых судов, для которых характерно длительное пребывание в море, в том числе и в штормовых условиях.

Заключение

Задача, поставленная в данной работе, решена: выполнены численные исследования воздействия аномальной волны максимальной высоты 30 м на контуры полноразмерных морских судов и получены количественные оценки параметров их движения. Следует отметить эффективность разработанной технологии, которая позволила получить количественные оценки воздействия аномальных волн на контуры судов различных водоизмещений. Установлено, что аномальные волны высотой 30 м и крутизной от 0,725 до 0,760 развивают наибольшее значение опрокидывающего момента импульса ($3{,}8 \cdot 10^6$ Н · м · с) на контуре судна с максимальным водоизмещением 9 260 т, что соответствует среднему опрокидывающему моменту, равному $7{,}3 \cdot 10^5$ Н · м, или вертикальной силе в 9,4 т, приложенной в течение 0,55T к краю контура. В целом результаты исследований свидетельствуют о том, что контуры судов, соответственно и судна водоизмещением до 9260 т, расположенные бортом к волне, не могут противостоять опрокидывающему действию аномальных волн высотой 30 м. Время опрокидывания в среднем составляет половину периода аномальной волны, это исключает возможность уклонения судна от встречи с аномальной волной. В связи с этим судоводителю в зонах с повышенной частотой регистрации аномальных волн следует избегать плавания параллельно гребню волн даже в условиях

слабого волнения. Для разработки мероприятий по повышению безопасности мореплавания можно рекомендовать использование опубликованных данных о географическом распределении частоты регистрации аномальных волн.

Список литературы

1. **Didenkulova I. I., Slunyaev A. V., Pelinovsky E. N.** and et al. Freak waves in 2005 // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2006. V. 6. P. 1007—1015.
2. **Куркин А. А., Пелиновский Е. Н.** "Волны-убийцы": факты, теория и моделирование. Н. Новгород: ННГТУ, 2004. 158 с.
3. **Lawton G.** Monsters of the deep (The Perfect Wave) // New Scientist. 2001. V. 170, N. 2297. P. 28—32.
4. **Rogue** waves — forecast and impact on marine structures [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kuleuven.be/hydr/downloads/MaxWave.pdf
5. **Liu P. C., Pinho U. F.** Freak waves — more frequent than rare! // Annales Geophys. 2004. V. 22. P. 1839—1842.
6. **Nikolkina L., Didenkulova I.** Rogue waves in 2006—2010. // Natural hazards and Earth system sciences. 2011. V. 11. P. 2913—2924.
7. **Waseda T., Kinoshita T.** Freak waves and capsizing accidents // Proceedings of the 11-th International Ship Stability Workshop (ISSW2010). Netherland, 2010. P. 79—84.
8. **Справочник** по теории корабля / Под ред. Я. И. Войткунского. В 3 тт. Т. 2. Статика судов, качка судов. Л.: Судостроение, 1985. 440 р.
9. **Kjeldsen P. A.** Sudden Disaster — in Extreme waves. // Rogue Waves 2000: Proceedings of a Workshop in Brest, France, 29—30 November, 2000. P. 19—35.
10. **Smith C. B.** Extreme waves and ship design // 10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures Houston, Texas, 2007.
11. **De Kat J. O., Paulling J. R.** Prediction of extreme motions and capsizing of ships and offshore marine vehicles // Proceedings of OMAE 2001: The 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Rio de Janeiro, Brazil, 3—8 June, 2001. P. 817—828.
12. **Minami M., Sawada H., Tanizawa K.** Study of ship responses and wave loads in the freak wave // Proceedings Of The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco, California, USA. May 28 — June 2, 2006. P. 272—278.
13. **Sergeeva A., Slunyaev A., Pelinovsky E.** and et al. Numerical modeling of rogue waves in coastal waters // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2014. V. 14. P. 861—870.
14. **Clauss G. F., Schmittner C. E., Stuck R.** Numerical wave tank — simulation of extreme waves for the investigation of structural responses // Proceedings of OMAE 2005, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Halkidiki, Greece. June 12—17, 2005. P. 785—789.
15. **Clauss G. F., Schmittner C. E., Hennig J.** Simulation of rogue waves and their impact on marine structures // Proceedings of MAXWAVE, Final meeting. Geneva, Switzerland. October 8—10, 2003. P. 1—10.
16. **Дорожко В. М.** Динамическое воздействие аномально большой волны на неподвижную преграду // Мехатроника, автоматизация, управление. 2013, № 9. С 59—64.
17. **Blazek J.** Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Elsevier, 2001. — 440 p.
18. **Yakhot V., Orszag S. A.** Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory // Journal of scientific computing. 1986. V. 1, N. 1. P. 1—51.
19. **Hsu K. L., Chen Y. J., Chau S. W.** and et al. Ship flow computation of DTMB 5415 // CFD workshop Tokyo, Japan. March 9—11, 2005.
20. **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. Issue 185. P. 5—15.
21. **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.
22. **Longuet-Higgins M. S.** The asymptotic behavior of the coefficients in Stokes's series for surface gravity waves // Journal of applied mathematics. 1985. V. 34. P. 269—277.
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. **Дьяконов В. П.** Вейвлеты. От теории к практике. М.: СОЛОН-Р, 2002. 448 с.
25. **Сергиенко А. Б.** Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2002. 608 с.
26. **Колесник В. П.** Решения ANSYS-CFD в авиакосмических технологиях: динамические перестраиваемые сетки в расчетной аэродинамике // АКТО-2008: Авиакосмические технологии и оборудование. Казань-2008. IV Международная научно-практическая конференция. 12—15 августа 2008 года.
27. **Hirt C. W., Nichols B. D.** Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries // J. Comput. Phys. 1985. V. 39. P. 201—225.
28. **Флот** рыбной промышленности. Справочник типовых судов. М.: Транспорт. 381 с.
29. **Афонин А. М.** Физические основы механики. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 368 с.
30. **Правила** классификации и постройки морских судов. Т. 1. СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2012. 466 с.

Dynamic Impact of Rogue Wave on a Seagoing Vessel Contour

V. M. Dorozhko, bendor@iacp.dvo.ru, Institute of Automation and Control Processes,
Far East Branch, Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), 690041, Vladivostok, Russian Federation

Date received: 14.10.14

The article is devoted to the study of a numerical modeling of the impact of a rogue wave on a full-sized contour (middle-vessel cross section) in order to obtain the quantitative estimates of its motion parameters. The numerical simulation of rogue wave with the height of 30 meters and wavelength of 120—190 meters was fulfilled in a numerical wave tank with the length of 1000 meters and water depth of 250 meters, which was characterized by the following key features: a) Computational Fluid Dynamics theory; b) Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations using the Volume of Fluid method of the free surface and Three Degrees of Freedom method for describing the movement of the contour. Two maxima in the process of nonlinear transformation of a rogue wave were discovered. Free-floating contour was used to simulate a capsizing due to a rogue wave. Contour was mounted on the surface of the water in such a way that its position in the future would coincide with the x-coordinate of the second maximum of the rogue wave. The maximum of the water velocity in the area, located in the midst of the front, exceeded the velocity of the rogue wave. This caused the beginning of formation of a water jet from the specified zone named as plunging breaker. Simultaneous lifting, horizontal movement at high speed and capsizing of the contour were caused due to a huge steepness of the rogue wave front. The paper treats in detail the aspects associated with the numerical modeling of the contour capsize and estimation of the parameters of its motion. The time histories of the computed velocity of displacement, heeling angle, angle velocity and acceleration, forces, moment of impulse, power of heeling moment, heeling moment of the contour were calculated. The study indicates that the contours of the vessels of up to 9260 t cannot resist the heeling action of the rogue wave. Average capsizing time is half of the period of the rogue wave, which eliminates a chance for vessel's maneuver. Therefore, we can recommend the skippers to avoid swimming sideways to a wave even in calm sea conditions.

Keywords: *rogue wave, computational fluid dynamics, contour of the vessel, moment of force, moment of impulse, heeling angle, capsizing of the vessel, safety of seagoing vessel*

For citation:

Dorozhko V. M., Dynamic Impact of Rogue Wave on a Seagoing Vessel Contour, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2015, vol. 16, no. 3, pp. 209—216.*

DOI: 10.17587/mau.16.209-216

References

1. **Didenkulova I. I., Slunyaev A. V., Pelinovsky E. N.** and et al. Freak waves in 2005, *Nat Hazards Earth Syst. Sci.,* 2006, vol. 6, pp. 1007—1015.

2. **Kurkin A. A., Pelinovskiy E. N.** "*Volny-ubiitsy": fakty, teoriya i modelirovanie* (Freak-waves, theory and modeling), N.Novgorod, published by Nizhny Novgorod State Technical University n. a. R. E. Alekseev, 2004, 158 p. (in Russian).

3. **Lawton G.** Monsters of the deep (The Perfect Wave), *New Scientist,* 2001, vol. 170, no. 2297, pp. 28—32.

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

5. **Liu P. C., Pinho U. F.** Freak waves — more frequent than rare! *Annales Geophys*, 2004, vol. 22, pp. 1839—1842.

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

7. **Waseda T., Kinoshita T.** Freak waves and capsizing accidents, *Proceedings of the 11-th International Ship Stability Workshop (ISSW2010),* Netherland, 2010, pp. 79—84.

8. **Voitkounski Y. I.** *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).

9. **Kjeldsen P. A.** Sudden Disaster — in Extreme waves, *Proceedings of a Workshop "Rogue waves "*, Brest, France, 2000, pp. 19—35.

10. **Smith C. B.** Extreme waves and ship design, *10th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Houston, Texas, 2007.

11. **De Kat J. O., Paulling J. R.** Prediction of extreme motions and capsizing of ships and offshore marine vehicles. Proceedings of OMAE 2001: *The 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering,* Rio de Janeiro, Brazil, 3—8 June, 2001, pp. 817—828.

12. **Minami M., Sawada H., Tanizawa K.** Study of ship responses and wave loads in the freak wave, *Proceedings Of The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, San Francisco, California, USA. May 28 — June 2, 2006, pp. 272—278.

13. **Sergeeva A., Slunyaev A., Pelinovsky E.** and et al. Numerical modeling of rogue waves in coastal waters, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,* 2014, vol. 14, pp. 861—870.

14. **Clauss G. F., Schmittner C. E., Stuck R.** Numerical wave tank — simulation of extreme waves for the investigation of structural responses, *Proceedings of OMAE 2005, 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering,* Halkidiki, Greece, June 12—17, 2005, pp. 785—789.

15. **Clauss G. F., Schmittner C. E., Hennig J.** Simulation of rogue waves and their impact on marine structures, *Proceedings of MAXWAVE, Final meeting*, Geneva, Switzerland, October 8—10, 2003, pp. 1—10.

16. **Dorozhko V. M.** *Dinamicheskoe Vozdeistvie Anomal'no Bolshoi Volny na Nepodvizhnuyu Pregradu* (Dinamic Load of the Extreme Wave on the Motionless Structure), *Mehatronika, Avtomatizacia, Upravlenie,* 2013, no. 9, pp. 59—64. (in Russian).

17. **Blazek J.** Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Elsevier, 2001, 440p.

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

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

20. **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.

21. **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.

22. **Longuet-Higgins M. S.** The asymptotic behavior of the coefficients in Stokes's series for surface gravity waves, *Journal of Applied Mathematics,* 1985, vol. 34, pp. 269—277.

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. **D'jakonov V. P.** *Veivlety. Ot teorii к praktike* (Wavelets. From the theory to practice), Moscow, SOLON-R, 2002, 448 p. (in Russian).

25. **Sergienko A. B.** *Tsifrovaya obrabotka signalov* (Digital Signal Processing), Saint Petersburg, Piter, 2002, 608 p. (in Russian).

26. **Kolesnik V. P.** *AKTO-2008: Aviacosmic technology and equipment. Kazan-2008. IV International Scientific and Practical Conference*, Kazan, 12—15 august 2008. (in Russian).

27. **Hirt C. W., Nichols B. D.** Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, *J. Comput. Phys.*, 1985, vol. 39, pp. 201—225.

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

29. **Afonin A. M.** *Fizicheskie osnovy mekhaniki* (Physical fundamentals of mechanics), Moscow, Izdateljstvo MGTU im. N. E. Baumana, 2006, 368 p. (in Russian).

30. ***Pravila** klassifikatsii i postroiki morskikh sudov* (Rules for the Classification and Construction of Sea-Going Ships), vol. 1. Saint Petersburg, Russian Maritime Register of Shipping, 2012, 466 p. (in Russian).

Corresponding author:

Dorozhko Veniamin M., Senior Researcher, Institute of Automation and Control Processes, Far East Branch, Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), 690041, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: bendor@iacp.dvo.ru

Издательство «НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

107076, Москва, Стромынский пер., 4

Телефон редакции журнала: **(499) 269-5397**, тел./факс: **(499) 269-5510**

Технический редактор *Е. В. Конова*. Корректор *Т. В. Пчелкина*.

Сдано в набор 29.12.2014. Подписано в печать 19.02.2015. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 8,86. Заказ МН315. Цена договорная.

Журнал зарегистрирован в Комитете Российской Федерации по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-11648 от 21.01.02

Учредитель: Издательство "Новые технологии"

Оригинал-макет ООО "Адвансед солюшнз". Отпечатано в ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.