

Список литературы

1. *Лукомский Ю. А.* Навигация и управление движением судов: учебник / Ю. А. Лукомский, В. Г. Пешехонов, Д. А. Скороходов. — СПб.: Элмор, 2002. — 360 с.
2. *Manuel Haro Casado.* Recursive identification procedure of the nonlinear model ship based on the turning test manoeuvring / Manuel Haro Casado, A. Fernandez Ameal // CAMS 2004, IFAC Conference on Control Applications in Marine Systems. — Ancona, Italy, 2004. — P. 197–202.
3. *Вагущенко Л. Л.* Системы автоматического управления движением судна / Л. Л. Вагущенко, Н. Н. Цымбал. — Одесса: Латстар, 2002. — 310 с.
4. *Юдин Ю. И.* Использование идентифицированных математических моделей судна для обеспечения безопасности судовождения / Ю. И. Юдин, А. Г. Степахно, А. Н. Гололобов // Вестник МГТУ. — 2009. — Т. 12. — № 1. — С. 10–12.
5. *Романов А. В.* Структурная и параметрическая идентификация математической модели водоизмещающих судов / А. В. Романов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2012. — № 1. — С. 115а–118.
6. *Жабко Н. А.* Параметрическая идентификация динамических моделей морских судов / Н. А. Жабко // Вестник Воронежского государственного технического университета, 2012. — Т. 8. — № 1. — С. 80–84.
7. *Юдин Ю. И.* Математические модели плоскопараллельного движения судна / Ю. И. Юдин, И. И. Сотников // Вестник МГТУ. — 2009. — Т. 12. — № 1. — С. 10–12.
8. *Мирошник И. В.* Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И. В. Мирошник, В. О. Никифоров, А. Л. Фрадков. — СПб.: Наука, 2000. — 549 с.
9. *Фрадков А. Л.* О применении кибернетических методов в физике / А. Л. Фрадков // Успехи физических наук. — 2005. — Т. 175. — № 2. — С. 113–138.
10. *Amerongen J. Van Adaptive Steering of Ship:* PhD thesis of Job van Amerongen // Delft University of Technology. — 2005. — 156 p.

УДК 004: 656.61.073

В.М. Дорожко,
канд. физ.-мат. наук

ОПРОКИДЫВАНИЕ КОНТУРА МОРСКОГО СУДНА «ВОЛНОЙ-УБИЙЦЕЙ»

CAPSIZING OF SEAGOING VESSEL CONTOUR DUE TO «ROGUE WAVE»

Разработана технология моделирования динамического воздействия «волны-убийцы» высотой 30 м на контур (мидель-сечение) морского судна на основе CFD-метода. Численное моделирование воздействия «волны-убийцы» на полноразмерный контур было выполнено с целью получения численных оценок работы момента сил. Детально рассматривается численное моделирование опрокидывания контура и оценка параметров его движения. В зависимости от времени и угла крена вычислены момент сил и работа момента сил, действующих на контур. Установлено, что характер эволюции работы момента сил может применяться для оценки динамической устойчивости контура на «волне-убийце». Оценена динамическая устойчивость контуров судов водоизмещением 3040–9260 т на «волнах-убийцах» длиной 120–190 м. Полученные результаты и технология моделирования могут быть использованы при проектировании морских судов.

CFD-based simulation technology for evaluation of the dynamic impact of 30 meters high of «rogue wave» on free-floating contour (middle-vessel cross section) has been developed. Numeric modeling of the impact of «rogue wave» on a full-sized contour which provides estimates of moment force work was fulfilled. The paper treats in detail the aspects associated with the numerical modeling of contour capsize and estimation of the parameters of its motion. Time and angle histories of moment of force and work moment force acting on the contour were calculated. It was found out that the pattern of the evolution of the moment force work can be used as a measure of dynamic stability of the contour in «rogue wave». Dynamic stability of the contours of the vessels with the displacement from 3040 to 9260 tons in «rogue-waves» with the length from 120 to 190 meters was estimated. The obtained results and simulation technology can be used for the design of seagoing vessels.

Ключевые слова: «волна-убийца», вычислительная гидродинамика, контур судна, кренящий момент, восстанавливающий момент, момент силы, работа момента силы, угол крена, опрокидывание судна, динамическая остойчивость.

Key words: «rogue wave», computational fluid dynamics, contour of the vessel, heeling moment, righting moment, moment of force, work force moment, heeling angle, capsizing of a vessel, dynamic stability.

ОПРОКИДЫВАНИЕ морского судна в результате воздействия «волны-убийцы» представляет собой особый случай движения судна на волнении, опасность которого связана с аномальной высотой (до 30 м) таких волн и внезапностью их возникновения. «Волны-убийцы», называемые также *аномально высокими* или *аномальными волнами* [1], могут возникать совершенно неожиданно как в периоды штормовой погоды, так и при достаточно спокойном море. Одной из общепризнанных теорий возникновения аномальных волн является модуляционная неустойчивость, согласно которой вероятность появления таких волн увеличивается с ростом отношения средней крутизны волнения к средней относительной ширине его спектра. В результате модуляционной неустойчивости волн формируется групповой солитон, под огибающей которого может находиться несколько периодов морских волн. Волны центральной части группового солитона претерпевают нелинейное преобразование, в результате которого их высота может увеличиться до 30 м, после чего они разрушаются путем обрушения гребня на подошву волны [1].

Известны многочисленные случаи гибели судов при встрече с аномальными волнами. Так, за период 1969 – 1994 гг. были потеряны или существенно повреждены 22 супертанкера [1]. Для наблюдения за аномальными волнами Европейским союзом был профинансирован проект «MaxWave» [2] по мониторингу поверхности Мирового океана с помощью радарных спутников ERS-1 и ERS-2 Европейского космического агентства. Наблюдения показали, что аномальные волны возникают существенно чаще, чем это прогнозируется теоретически. Например, за период 2006 – 2010 гг. зарегистрировано 78 случаев возникновения аномальных волн [3]. Воздействие аномальной волны на морское судно может проявиться как в опрокидывании, так и нарушении целостности его конструкции за счет возникновения больших давлений в местах удара указанной волны. Если нарушение целостности можно предупредить путем проектирования более прочных судов, то избежать их опрокидывания при встрече с аномальной волной не представляется возможным из-за внезапности возникновения волны и кратковременности подобной встречи. Всё это предопределяет актуальность изучения воздействия аномальных волн на морские суда.

Существующие работы в области изучения воздействия волн на суда можно условно разделить, соответственно используемым методам исследований, на три группы: *аналитические, экспериментальные и численные*. Из большого числа аналитических работ можно в качестве примера привести статью [4] о нелинейной качке и опрокидывании судна, в которой рассматривается модель поперечной качки судна, нелинейный характер которой реализован путем разложения в ряды момента сил демпфирования, а также восстанавливающего и кренящего моментов. Это позволяет выполнить аналитическое моделирование на регулярном волнении качки модели судна (масштаб 1:15) максимальной амплитудой крена, равной 45°. Данная аналитическая модель не может быть использована для изучения опрокидывания судна под воздействием аномальной волны. Необходимый в этом случае учет амплитуд конечной величины и скорости качки приводит к столь сложным нелинейным граничным условиям, что действующие на судно гидромеханические силы неизбежно оказываются сложными нелинейными функциями перемещений и скорости судна. При этом практически невозможно выполнить разделение сил различной природы. Отдельные категории сил — гидростатические, инерционно-демпфирующие и возмущающие — оказываются взаимосвязанными, зависящими друг от друга. Эта взаимосвязь существенно усиливается, если учитывать вихревые и вязкостные составляющие силового воздействия жидкости, играющие большую роль при поперечной качке судов [5].

В качестве типичного примера исследований, проводимых в опытовом бассейне, можно выделить статью [6] о воздействии аномальной волны на модель судна в масштабе 1:142, в которой рассмотрена технология генерации волн механическим устройством и приведены результаты измерения реакции судна на воздействие волны. Недостатком работы является модельный масштаб её проведения, что затрудняет практическое использование результатов в связи с отсутствием теории подобия для сильно нелинейных процессов опрокидывания судна аномальной волной с учетом вязкости и турбулентности.

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 использования CFD-метода может служить работа [7], в которой представлены результаты численного моделирования движения модели судна длиной 3 м на волнении. Недостатком этой и других подобных работ является модельный характер исследований, так как результаты вычислений с учетом вязкости и турбулентности зависят от размера модели. В связи с этим в настоящей работе ставятся следующие задачи:

- разработать технологию полномасштабного моделирования CFD-методом с учетом вязкости и турбулентности опрокидывания контура (мидель-сечения) судна аномальными волнами высотой 30 м на глубокой воде при отсутствии ветра и морского волнения;
- вычислить работу моментов сил, создаваемых на контуре аномальной волной;
- установить возможность использования работы моментов сил для оценки динамической устойчивости контура на аномальной волне.

Решение поставленной задачи выполнено на основе CFD-метода вычислительной гидродинамики. Метод базируется на уравнениях неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (*Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*) [8], которые могут быть записаны в следующем виде:

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

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

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 поля скорости жидкости; u'_1, u'_2, u'_3 — флуктуации абсолютной скорости; μ и ρ — вязкость и плотность жидкости соответственно; t — время; p — давление; последний член в выражении (2) — напряжение Рейнольдса. Для вычисления напряжения Рейнольдса используется модель турбулентности *RNG*, $k_t - \varepsilon_t$ [7, с. 1113], которая позволяет получать расчетные величины гидродинамических полей, близкие к их экспериментальным значениям.

Для формального описания численной модели выбрана неподвижная правая прямоугольная система координат $oxyz$, совпадающая с системой $ox_1x_2x_3$. В соответствии с поставленной задачей решение системы уравнений (1) и (2) выполнено численным способом в расчетной *2D*-области, имеющей форму прямоугольника, сформированного в вертикальной плоскости oxy . Ось ox лежит на условной поверхности спокойной воды (при отсутствии волн), а ось oy совпадает с левой границей расчетной области и направлена вверх. В направлении оси ox от левой границы расчетной области по поверхности воды распространяется аномальная волна. Дополнительно используется еще одна прямоугольная система координат $o\xi\eta$, связанная с контуром, оси которой в начальный момент времени параллельны осям oxy соответственно. Плоскости контура и расчетной области совпадают. Начало системы координат $o\xi\eta$ всегда находится в центре тяжести контура. Угол крена вычислялся как угол между осями oy и $o\eta$. Перемещение центра тяжести контура вычислялось в системе координат oxy .

Для обеспечения численного решения выполнена пространственная дискретизация расчетной области 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. Кроме того, в процессе вычислений предусмотрена временная дискретизация переменных с заданным интервалом времени. Указанные виды дискретизации позволяют выполнить сведение системы уравнений в частных производных (1) и (2) к системе алгебраических уравнений.

Численное решение системы уравнений (1) и (2) предполагает определение на всех границах расчетной области (включая границу контура) граничных и начальных условий. Прежде всего, следует предварительно сформулировать аналитическое описание начального состояния аномальной волны. Как свидетельствуют результаты натурных наблюдений [9, с. 248], чаще встречаются аномальные волны с одним высоким центральным максимумом амплитудой A_b и двумя небольшими боковыми возвышениями. Профиль такой волны в начальный момент времени ($t = 0$) может быть записан в виде

$$w = A_b \exp \left[-2 \left(\frac{k_b (x - x_0)}{2\pi} \right)^2 \right] \cos [k_b (x - x_0)], \quad (3)$$

где A_b , $k_b = 2\pi/\lambda_b$ и λ_b — начальная амплитуда, волновое число и длина волны соответственно; x_0 — координата начального положения центрального максимума волны.

Профиль и амплитуда волны называются *начальными*, поскольку с течением времени за счет нелинейных преобразований изменяются её профиль и амплитуда до аномальных значений. Применение технологии сеточного разбиения к начальному профилю волны (3) позволило получить упорядоченный массив её дискретных значений w_i ($i = 0, \dots, N-1$). Применение к указанному массиву w_i дискретного преобразования Фурье позволило вычислить пространственный спектр Y_n комплексных амплитуд:

$$Y_n = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{2}{N} w_{i+1} \exp(-j2\pi ni/N), \quad n = 0, \dots, N-1, \quad (4)$$

где N и i — число дискретных значений и номер элемента в массиве w_i ($i = 0, \dots, N-1$); j — комплексная единица; n — порядковый номер комплексной амплитуды в спектре Y_n .

Начальный участок спектра Y_n содержит комплексные спектральные амплитуды, длина волн которых составляет сотни метров, что требует для выполнения условий глубокого моря ($h \geq \lambda/2$, h — глубина воды) и создания расчетной области очень больших геометрических размеров. В свою очередь, конечный участок спектра содержит короткие волны, для отображения которых в расчетной области следует выполнять сеточное разбиение с коротким шагом, что, соответственно, приводит к необходимости привлечения значительных вычислительных ресурсов. Исключение боковых спектральных составляющих, не превышающих 5 % от максимальной амплитуды спектра, позволило избежать указанных затруднений и воспроизвести с высокой точностью волну (3), представив её суммой монохроматических поверхностных волн:

$$w = \sum_{n=l}^L A_n \cos(k_n x - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (5)$$

где l и L — номер комплексных амплитуд соответственно левой и правой границы усеченного спектра; $A_n = |Y_n|$ — спектральная амплитуда; $k_n = 2\pi/\lambda_n$ — волновое число; $\sigma_n = \sqrt{gk_n}$ — угловая частота; g — ускорение свободного падения; φ_n — значение фазового угла n -й компоненты спектра. Длина волны спектральной амплитуды, располагающейся в центре спектра (4), называется *длиной центральной волны*, которая соответствует длине λ_b волны (3).

На основе спектра монохроматических волн (5) сформировано на левой границе расчетной области граничное условие в виде геометрического вектора суммы скоростей втекающей жидко-

сти, горизонтальная v_x и вертикальная v_y компоненты которого для глубокой воды определяются выражениями:

$$v_x = \sum_{n=1}^L \frac{gk_n A_n}{\sigma_n} \exp(k_n y) \cos(k_n x_e - \sigma_n t + \varphi_n); \quad (6)$$

$$v_y = \sum_{n=1}^L \frac{gk_n A_n}{\sigma_n} \exp(k_n y) \sin(k_n x_e - \sigma_n t + \varphi_n), \quad (7)$$

где x_e — координата левой границы расчетной области.

Граничное условие на выходе расчетной области (правая граница) обеспечивается введением дополнительного затухания, исключающего отражение волн от границы. Граничные условия дна расчетной области соответствует условию непротекания — нулевому значению нормальной производной скорости жидкости, а для верхней границы — атмосферному давлению открытого пространства. Граничное условие на поверхности контура соответствует условию свободно плавающего твердого тела с заданными геометрическими и массинерционными свойствами. В соответствии с моделью *DOF (Degrees of Freedom)* [7, с. 1113] на каждом временном шаге вычисляются давление на поверхности периметра контура (контур имеет толщину 1 м), а также сила и момент силы относительно центра тяжести свободно плавающего контура. Полученные значения 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)* [7, с. 1112 – 1113]. Начальные условия уравнений (1) и (2) сформированы путем инициализации расчетной области от вектора скорости (6) и (7), в результате чего в расчетной области создавалось распределение скоростей, соответствующее начальному состоянию аномальной волны (3).

Для определения длин и начальных амплитуд волн вида (3), высота которых в процессе нелинейного преобразования достигает 30 м, выполнено численное моделирование на базовых волнах с одинаковой длиной центральной волны $\lambda_b = 100$ м и высотой $A_b = 8, 9, 10, 11$ и 12 м и крутизной относительно второго максимума 0,496; 0,608; 0,673; 0,725; 0,785 соответственно. Выбор указанных начальных амплитуд обусловлен тем, что для волн высотой менее 8 м (крутизна второго максимума менее 0,4) характерно отсутствие возрастания их высоты за счет слабых нелинейных преобразований, что исключает их из категории аномальных волн. Кроме того, для волн с амплитудой более 12 м (крутизна более 0,8) характерно сильное нелинейное преобразование, вследствие которого происходит стремительное возникновение и смыкание первого и второго максимумов (далее приведены пояснения о числе максимумов аномальной волны) волны с последующим их обрушением, что предопределяет короткий интервал времени жизни аномальной волны.

В процессе моделирования процессов развития и обрушения каждой из указанных базовых волн вычислены значения их высот H_b , соответствующие второму максимуму волн. Из выражения $m = 30/H_b$ определен массив масштабирующих коэффициентов m . Применение указанных масштабирующих коэффициентов одновременно к начальной амплитуде A_b и длине λ_b каждой базовой волны позволило получить ряд начальных значений амплитуд $A_m = mA_b$ и длин $\lambda_m = m\lambda_b$ центральных волн, при этом крутизна масштабированных волн осталась равной крутизне базовых волн. Для каждой масштабированной волны по формулам (4) – (7) был вычислен спектр, ряд монохроматических волн и соответствующие ему скорости втекающей воды. В результате длины центральных волн λ_m для аномальных волн с высотой второго максимума, равной 30 м, составили ряд значений: 120, 130, 140, 155 и 190 м.

В спектре масштабированных волн оставлены монохроматические волны в диапазоне длин от 500 м до 50 м. Для обеспечения условий глубокого моря расчетная область выполнена в виде прямоугольника длиной 1000 м, высотой воздушного пространства 100 м и глубиной воды 250 м. Расчетное пространство разбито квадратными сеточными элементами со стороной 0,5 м, за исключением внутренней области длиной 300 м и высотой 50 м, охватывающей пространство движения контура, которое разбито равносторонними треугольными сеточными элементами со

стороной 0,5 м. Треугольные сеточные элементы обеспечивают возможность периодической перестройки сетки в процессе движения контура. Шаг дискретизации времени Δt выбран равным 0,0005 с, при котором на каждом временном шаге максимальное число Куранта ($C = \Delta t v_{\max} / d$, где v_{\max} — максимальное значение скорости жидкости в канале, d — сторона сеточной ячейки) не превышало 0,25, что обеспечило высокую точность вычислений. Плотность воды принята $\rho = 1027 \text{ кг/м}^3$, ускорение свободного падения — $g = -9,81 \text{ м/с}^2$.

Для детального рассмотрения процесса опрокидывания из середины ряда длин базовых волн выбрана волна амплитудой $A_b = 10 \text{ м}$ и длиной $\lambda_b = 100 \text{ м}$, обладающая типичным характером нелинейного развития. При использовании в соответствии с разработанной технологией вместе с базовой волной вычисленного значения масштабирующего коэффициента $m = 1,4$, получили начальную амплитуду аномальной волны $A_m = 14,0 \text{ м}$ и длину центральной волны спектра — $\lambda_m = 140 \text{ м}$. В процессе нелинейного преобразования высота второго максимума указанной волны достигает 30 м. В качестве объектов воздействия аномальной волны выбраны из таблицы контуры толщиной 1 м рыбопромысловых судов [10, с. 1], 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, рассмотренные на примере контура 3, параметры которого приведены в таблице для супертраулера типа «Моонзунд» водоизмещением 9260 т.

Параметры контуров рыболовных судов

Номер контура	Тип и водоизмещение судов, т	Параметры контуров толщиной 1 м					начальная метацентрическая высота, м
		ширина, м	высота, м	осадка, м	масса, кг	момент инерции, кг·м ²	
1	БСТ тип «Каури», 3040	13,5	8,9	6,25	82658	1719196	0,75
2	БМРТ тип «Иван Бочков», 4947	15,9	10,0	5,66	88277	2718078	1,0
3	РТМС тип «Моонзунд», 9260	19,0	12,2	6,60	123683	5693432	1,0

В процессе нелинейного преобразования высота указанной аномальной волны достигает высоты 30 м (рис. 1 — профили 2 и 4). Численное моделирование опрокидывания контура 3 аномальной волной было выполнено в двух вариантах. Первый вариант, когда начальное положение контура соответствовало x -координате первого максимума, второй — x -координате второго максимума.

В первом варианте контур подвергается непосредственному воздействию первого максимума волны. При этом уходящая волна увлекает контур, воздействуя косвенно на него также вторым максимумом. Во втором варианте приближающийся первый максимум формирует предварительное воздействие на контур, а второй оказывает на него основное воздействие.

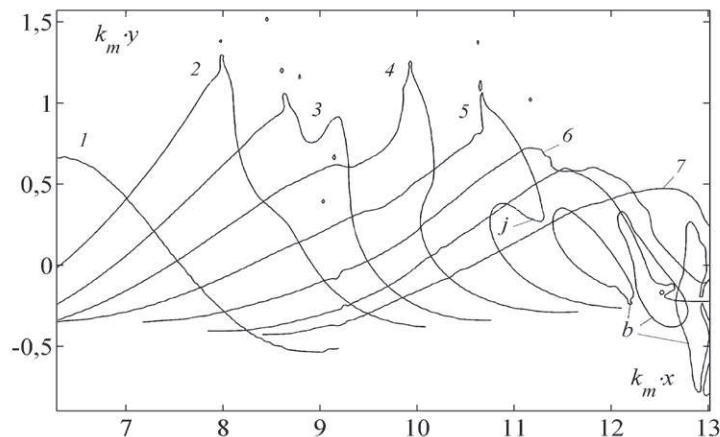


Рис. 1. Временная последовательность профилей аномальной волны ($k_m = 2\pi/\lambda_m$, $\lambda_m = 140 \text{ м}$)

На рис. 1 – 5 выполнена сквозная нумерация моментов времени 1 – 7. Каждый номер соответствует одному и тому же моменту времени на всех рисунках. Изначально эти моменты времени соответствуют моментам последовательного формирования профилей (см. рис. 1), что обеспечивает наглядность анализа результатов и синхронность рассмотрения нелинейного развития волны без контура и с контуром.

Первый вариант. На рис. 2 приведена эволюция момента сил M относительно центра тяжести контура и работы $T = \int_0^{\theta} M d\theta$ указанного момента и угла крена θ . Последний является функцией от относительного времени (t/τ , где τ — период центральной волны), что позволяет представить кривые момента M и работы T на рис. 2 в двух вариантах: рис. 2 а — в зависимости от относительного времени; рис. 2 б — от угла крена контура, что обеспечивает наглядность анализа процесса воздействия аномальной волны на контур.

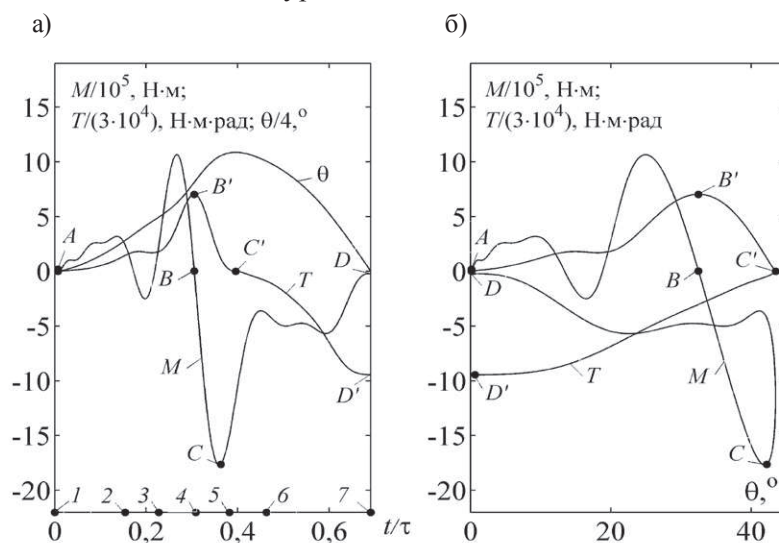


Рис. 2. Эволюция параметров движения контура в процессе воздействия аномальной волны

На рис. 3 представлена последовательность профилей волны и контура. Начальный момент обозначен на рисунках номером 1. Момент времени 2 (см. рис. 1) соответствует формированию первого максимума – моменту, когда x -координата первого максимума аномальной волны сравнялась с x -координатой контура. В результате воздействия аномальной волны контур получил крен, равный 10° . В момент времени 2 на кривой момента M и работы T регистрируются слабо выраженные первые максимумы (см. рис. 2), в след за которыми происходит снижение величины момента вплоть до отрицательных значений, что обусловлено резким снижением высоты аномальной волны (см. рис. 1 — интервал времени 2 – 3). Тем не менее, за счет приобретенной инерции продолжается увеличение крена θ контура — интервал времени 2 – 3 на рис. 2 и 3.

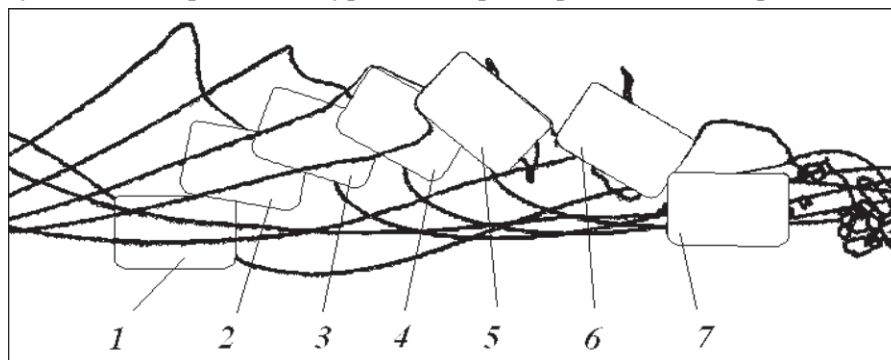


Рис. 3. Временная последовательность профилей контура и аномальной волны

На интервале времени 3 – 4 имеет место резкое увеличение воздействия аномальной волны за счет роста её высоты, что нашло выражение в росте момента и работы (см. рис. 2 а). К концу интервала 3 – 4 за счет прекращения роста высоты волны обозначилось быстрое снижение значений момента M (точка B на рис. 2). К концу указанного интервала сформировался второй ярко выраженный максимум работы T (точка B' на рис. 2). Начальное положение контура для первого варианта привело к нарушению поля скорости в аномальной волне к моменту формирования второго максимума. В связи с этим на интервале времени 4 – 5 (см. рис. 1 и 3) произошло уменьшение высоты аномальной волны и потеря её энергии, вследствие чего момент сил M на интервале 4 – 5 (участок кривой BC на рис. 2) достиг своего минимального отрицательного значения в точке C .

Вычисляемый момент сил является граничным условием на контуре, которое записывается [11, с. 129] в виде $I\alpha = M$, где I — момент инерции массы контура; α — ускорение угла крена. Качественно структуру момента сил M и его работы T можно представить выражениями:

$$M = M_h - M_r - M_{id} \text{ и } T = T_h - T_r - T_{id}, \quad (8)$$

где M_h и T_h — кренящий момент и его работа; M_r и T_r — восстанавливающий момент и его работа; M_{id} и T_{id} — инерционно-демпфирующий момент и его работа соответственно.

Согласно выражениям (8) момент сил M (работу T) можно представить как результат конкуренции кренящих и восстанавливающих моментов (работ). Тогда снижение величины работы T до нуля на участке $B'C'$ (см. рис. 2) можно рассматривать как результат увеличения T_r , вплоть до равенства $T_r = T_h - T_{id}$ в точке C' . Объяснение причины формирования на участке BC отрицательных значений момента M состоит в том, что величина восстанавливающего момента M_r , включая и M_{id} , превысила значения кренящего момента M_h за счет уменьшения последнего на интервале 4 – 5 по ранее указанным причинам. Точка C' , в которой работа от конкурирующих моментов обращается в нуль, соответствует максимуму угла θ крена и минимуму момента сил M . На интервале 5 – 7 происходит разрушение аномальной волны — струя воды ударяет в подошву волны, захватывая воздушные пузыри (области b на рис. 1).

Следует отметить, что за счет потери кинетической энергии наблюдается снижение воздействия аномальной волны на контур, вследствие чего на интервале 5 – 7 (см. рис. 2) сохраняется отрицательное значение момента сил M на участке CD , т.е. сохраняется преобладание восстанавливающего момента над кренящим. На участке $C'D'$ формальное изменение знака работы в выражении (8) на противоположный ($T < 0$) является результатом преобладания работы восстанавливающего момента над работой кренящего момента, в результате которого прекращается накренение и происходит восстановление начального крена контура.

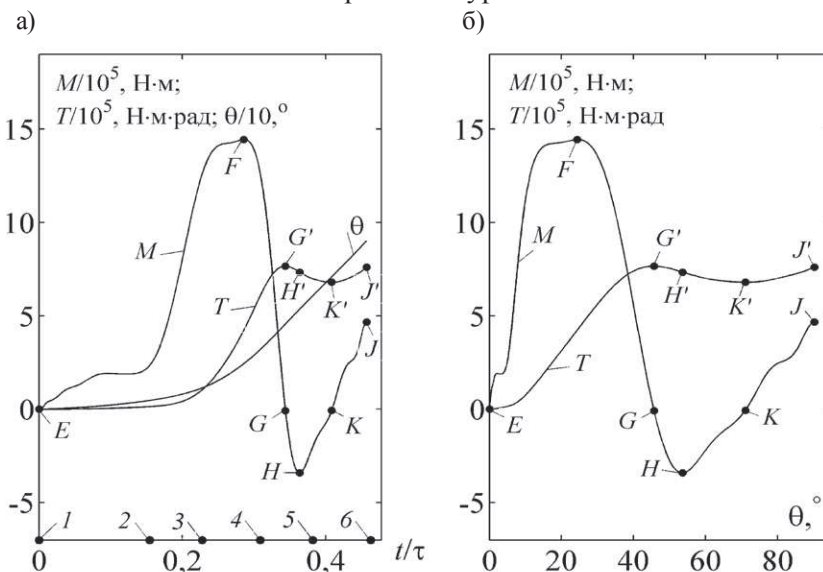


Рис. 4. Эволюция параметров движения контура в процессе воздействия аномальной волны: а — в зависимости от относительного времени t/τ ; б — в зависимости от угла крена контура

Второй вариант отличается от первого тем, что контур не подвергался непосредственному воздействию первого максимума и последующему за ним снижению высоты аномальной волны (моменты времени 2 и 3 на рис. 1 и 5), что позволяет аномальной волне свободно развиваться вплоть до формирования второго максимума. В эти моменты времени контур находился на фронте волны, что обусловило развитие небольшого крена контура и подъём кривой момента M (моменты времени 2 и 3 на рис. 4 и 5). На интервале 3 – 4 имеет место резкое увеличение высоты аномальной волны (интервал 3 – 4 на рис. 1), при этом к моменту времени 4 положение контура сравнялось с положением второго максимума, вследствие чего контур получил основное воздействие аномальной волны, а момент сил M достиг своего максимума (точка F на рис. 2). Вследствие указанных причин контур сместился вверх и получил дополнительный крен (интервал 3 – 4 на рис. 5).

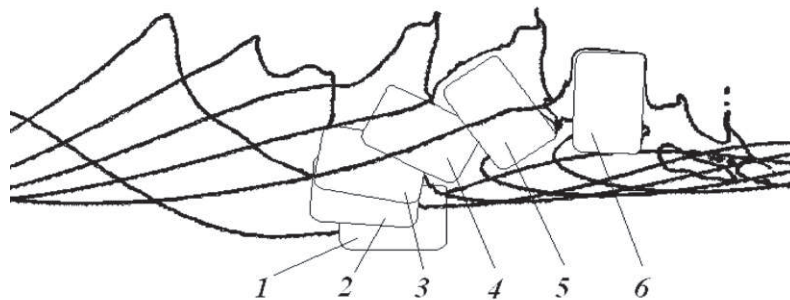


Рис. 5. Временная последовательность профилей контура и аномальной волны

На участке кривой FG (интервал 4 – 5 на рис. 4) отмечается резкое снижение величины момента M , обусловленное прекращением роста высоты волны к концу интервала 3 – 4 (см. рис. 1), который в точке G (см. рис. 4) достиг нулевого значения. На участке GHK момент сил M приобрел отрицательные значения за счет преобладания восстанавливающего момента M_r , включая M_{id} , над кренящим M_h моментом. В эти моменты времени начинается обрушение аномальной волны, её кинетическая энергия расходуется на образование струи ныряющего буруна. Соответственно на участке $G'H'K'$ отмечается некоторое снижение работы T . Обрушение волны сопровождалось увеличением горизонтальной компоненты вектора скорости воды, что привело к росту момента сил, работы на участках кривых KJ и KJ' и, соответственно, к опрокидыванию контура (интервал 5 – 6 на рис. 5). Таким образом, сохранение знака работы T свидетельствует в данном случае о неудовлетворительной остойчивости контура на аномальной волне.

Движение контура под действием аномальной волны можно условно разделить на три этапа (см. рис. 3 и 5). Первый этап — интервал времени 1 – 3, на протяжении которого контур поднимается на волну и наклоняется на угол до 20° . На втором этапе — интервал времени 3 – 5 — контур, увлекаемый волной, интенсивно смещается, получая крен до 50° . На этом этапе абсолютное значение момента сил достигает своих максимальных значений. На третьем этапе (интервал времени 5 – 7) контур опрокидывается, если работа момента сил сохраняет знак.

Динамические свойства первого и второго максимумов отличаются тем, что скорости жидкости в волне второго максимума превышают в 1,5 раза скорости жидкости первого максимума. Кроме того, на фронте волны, достигающей второго максимума, на интервале времени 4 – 5 (см. рис. 1 и 5) формируется зона повышенной скорости жидкости, превышающей фазовую скорость фронта аномальной волны, вследствие чего образуется струя j (см. рис. 1). За счет воздействия во втором варианте на контур более высоких скоростей жидкости, а также зоны повышенной скорости на интервале 4 – 7 (см. рис. 1 и 5) происходит дальнейшее увеличение крена контура вплоть до опрокидывания. В связи с этим для оценки максимального воздействия аномальной волны на контуры, приведенные в таблице (с. 36), было выполнено численное моделирование опрокидывания контуров аномально высокими волнами длиной 120, 130, 140, 155 и 190 м по второму варианту.

На рис. 6 приведены полученные зависимости конечного значения (для $\theta = 90^\circ$) работы T от крутизны аномальных волн, явившихся причиной опрокидывания контуров. Параметром диаграмм является порядковый номер контура, приведенный в таблице.

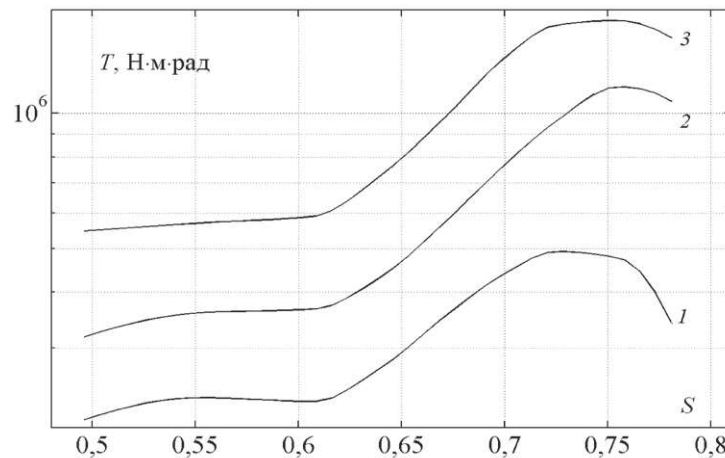


Рис. 6. Зависимость от крутизны аномальных волн работы T моментов сил

Установлено, что энергии аномальных волн рассматриваемого диапазона крутизны достаточно для опрокидывания контуров судов водоизмещением от 3040 до 9260 т. Следует отметить, что в процессе воздействия аномальных волн работа T моментов сил не меняла знак, что соответствует развитию процесса опрокидывания контура. Начиная с крутизны 0,6 аномальных волн, наблюдается резкое увеличение работы T , обусловленное формированием ныряющего буруна большой интенсивности, оказывающего существенное опрокидывающее воздействие на контуры. Снижение работы T для аномальных волн крутизной 0,750 – 0,780 связано с особенностями нелинейных преобразований таких волн, для которых характерно сильное нелинейное преобразование, вследствие которого происходит ускоренное возникновение первого и второго максимумов волны, что предопределяет короткий интервал времени воздействия аномальной волны на контур.

Таким образом, классический метод оценки динамической устойчивости состоит в сопоставлении работ кренящего и восстанавливающего моментов. Для оценки устойчивости контура на аномальной волне воспользоваться им не представляется возможным в связи с тем, что при больших углах крена контура аналитическая модель качки приобретает большую нелинейность, что не позволяет вычислить отдельно точные значения работ кренящего и восстанавливающего моментов. На основе анализа полученных результатов численного моделирования можно сделать вывод о том, что характер эволюции работы момента сил, действующих на контур, можно применять для оценки динамической устойчивости контура на аномальной волне. Сохранение знака работы момента сил, приложенных к контуру, соответствует процессу опрокидывания, а его изменение — восстановлению начального крена контура.

Результаты численного моделирования свидетельствуют о существенной зависимости устойчивости контура на аномальной волне от его начального положения относительно волны. Изменение начального положения контура всего на треть длины аномальной волны (смещение начального положения со второго на первый максимум) исключает его опрокидывание. Время жизни аномальной волны высотой 30 м на глубокой воде не превышает одного периода, а длина пробега составляет не более длины центральной волны. Всё это в целом уменьшает вероятность опрокидывания судов при встрече с аномальной волной. Принимая во внимание метод плоских поперечных сечений, можно предположить, что полученные результаты для контуров относятся также и к оценке динамической устойчивости судов на аномальных волнах. Поэтому разработанная технология и полученные результаты могут быть использованы для оценки динамической устойчивости проектируемых судов.

Список литературы

1. Пелиновский Е. Н. «Фрики» — морские волны-убийцы / Е. Н. Пелиновский, А. В. Слюняев // Природа. — 2007. — № 3. — С. 14–23.
2. Rosenthal W. Rogue Waves: Results of the MaxWave Project / W. Rosenthal, S. Lehner // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2008. — Vol. 130.
3. Nikolkina I. Rogue waves in 2006 – 2010 / I. Nikolkina, I. Didenkulova // Natural hazards and Earth system sciences. — 2011. — Vol. 11.
4. Buca M. P. Nonlinear Ship Rolling and Capsizing / M. P. Buca, I. Senjanovic // Brodogradnja. — 2006. — № 4 (57). — P. 321–331.
5. Справочник по теории корабля: в 3 т. — Т. 2. Статика судов. Качка судов / Под ред. Я. И. Войткунского. — Л.: Судостроение, 1985. — 440 с.
6. Minami M. Study of ship responses and wave loads in the freak wave / M. Minami, H. Sawada, K. Tanizawa // Proceedings of the Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. San Francisco, California, USA. — 2006. — P. 272–278.
7. Ming Wu. Prediction of Ship Motions in Head Waves Using RANS Method / Ming Wu, Bo Yang, Zuochao Wang, Aiguo Shi, Xiao Wang // Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference Rhodes, Greece. — 2012. — P. 1112–1117.
8. Blazek J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications / J. Blazek. — Elsevier, 2001. — 440 p.
9. Fonseca N. Structural loads induced in a containership by abnormal wave conditions / N. Fonseca, C. G. Soares, R. Pascoal // Journ. Mar. Sci. Technol. — 2006. — № 11. — P. 245–259.
10. Справочник судов [Электронный ресурс]. — Электрон. дан. — Режим доступа: <http://www.fishportal.ru/ships>.
11. Луговский В. В. Гидродинамика нелинейной качки судов / В. В. Луговский. — Л.: Судостроение, 1980. — 256 с.

УДК 656.61.052

С. В. Ермаков,
ст. преп.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МАНЕВРА ПОСЛЕДНЕГО МОМЕНТА С ПАССИВНЫМ ФАКТОРОМ

MATHEMATICAL MODEL OF LAST MOMENT MANEUVER WITH PASSIVE FACTOR

Рассмотрена сущность и даны два определения понятия «маневр последнего момента»: как идеального (теоретического) и как реального (практического) маневра. Обоснованы его основные характеристики. Предложена классификация маневра последнего момента в зависимости от обстоятельств возникновения необходимости в его осуществлении, основанная на его формализации в Международных правилах по предупреждению столкновения судов в море, 1972 г. (МППСС-72) и на содержащейся в них регламентации действий судоводителя при выполнении маневра последнего момента. Обоснована математическая модель маневра последнего момента, которая позволяет по элементам движения сходящихся на пересекающихся курсах судов и характеристикам нашего судна, а также с учётом глубины акватории маневрирования определить дистанцию для начала этого манёвра. Выполнена оценка возможности учета в предложенной математической модели человеческого фактора и потенциальной области применения этой модели.

The essence of last moment maneuver was considered, the two definitions of this concept (as the ideal (theoretical) and real (practical) maneuver) was given. Justified its main characteristics. The classification of maneuver last moment depending on the circumstances of occurrence of the need for its implementation was proposed. This classification is based on the formalization of maneuver in the International Rules of Preventing Collision at Sea and contained in these rules regulating the actions of navigator when maneuvering the last moment.