

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

Энергия системы "контур морского судна — аномальная волна"

Рассмотрен CFD-метод исследования энергии изолированной системы "контур морского судна — аномальная волна". Предложена модель системы "контур морского судна — аномальная волна". Приведены результаты численного исследования максимальной плотности энергии и зависимости от времени энергии аномальных волн различной длины. Вычислены потери энергии аномальной волны, связанные с выполнением работы опрокидывания контура. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании судов и разработке мероприятий по обеспечению безопасного мореплавания.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, контур морского судна, аномальная волна, изолированная система, энергия аномальной волны, работа опрокидывания контура

Введение

Аномально высокие волны (далее — аномальные волны), известные также как "волны-убийцы" [1], представляют собой особый вид морских волн, характеризующихся высотой до 30 м, крутым фронтом и глубокой впадиной перед ним. Формально к аномальным относятся волны, которые превышают более чем в два раза высоту значительных волн (среднее значение 1/3 самых высоких волн моря). Первые фундаментальные работы [2, 3], раскрывающие механизмы возникновения аномальных волн, относятся к 60-м годам прошлого столетия. Согласно теоретическим оценкам аномальная волна может возникнуть один раз в 20 лет [4]. Тем не менее, считается, что только за 26 лет (1968...1994 гг.) от встречи с аномальными волнами погибло 22 супертанкера [4]. В целях получения данных о реальной частоте возникновения аномальных волн и разработки предложений по безопасности морских судов были выполнены международные проекты "MaxWave" (2000...2003 гг.) [5] и "Extreme Seas" (2009...2012 гг.) [6], которые показали, что аномальные волны возникают существенно чаще. Например, только за 2006...2010 гг. аномальные волны были зарегистрированы в 78 случаях [7]. Для координации отечественных исследований в 2012 г. был создан Научный центр по изучению "волн-убийц" [8]. За рубежом аналогичными исследованиями занимается "Rogue Waves Research Project (MULTIWAVE)" [9], в состав которого от России входит академик В. Е. Захаров. Несмотря на интенсивные исследования, теория аномальных волн далека от своего завершения [10], соответственно, продолжается разработка эффективных рекомендаций по безопасности морских судов. Все это поддерживает актуальность исследования аномальных волн по самым различным научным направлениям, одним из которых является теоретическое и численное изучение процесса формирования аномальной волны [11, 12], начинающегося с модуляционной неустойчивости волн узкого спектра, продолжающегося в виде пространственно-временной концентрации энергии волн различных частот и завершающегося возникновением аномальной волны. В рамках другого направления исследуются процессы нелинейного

преобразования в возникшей аномальной волне и динамические характеристики ее взаимодействия с препятствиями и судами [13—15]. Большое значение для безопасности судов имеют исследования энергетических характеристик аномальных волн. Например, в работе [16] показано, что на последней стадии формирования аномальной волны в ее гребне происходит резкая концентрация энергии, превышающая в десятки раз энергию гребней соседних волн. В работе [17] получен результат, свидетельствующий о том, что нелинейные процессы в аномальной волне приводят к дисбалансу соотношения между кинетической и потенциальной энергией. При этом вплоть до момента обрушения аномальной волны сумма потенциальной и кинетической энергии сохраняется с высокой точностью [18].

Соотношение энергии аномальной волны и работы опрокидывания в системе "контур морского судна — аномальная волна" может служить основой для оценки устойчивости судна при встрече с аномальной волной. В связи с этим в данной работе ставится задача выполнить численное исследование на глубоком море зависимости от длины аномальной волны высотой 30 м положения и значения максимальной плотности кинетической энергии в гребне аномальной волны; эволюции во времени ее кинетической, потенциальной и полной энергии; энергетических потерь аномальной волны, связанных с выполнением работы опрокидывания контура морского судна.

Основные модельные представления и метод решения задачи

Метод вычислительной гидродинамики (CFD — computational fluid dynamics) показал свою эффективность для численного моделирования аномальных волн [19]. В связи с этим вычисление энергии системы "контур морского судна — аномальная волна" выполнено с применением CFD-метода, который базируется на системе уравнений RANSE (Reynolds-averaged Navier-Stokes equations) [20], имеющих вид

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

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

$$+ \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right] + \rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\overline{u'_i u'_j}) + \rho g, \quad (2)$$

где $\{i, j\} = 1, 2, 3$ — индексы переменных в абсолютной системе координат $ox_1x_2x_3$; u'_1, u'_2, u'_3 — флуктуации абсолютной скорости жидкости; u_1, u_2, u_3 — осредненные в масштабе флуктуаций значения абсолютной скорости; ρ и μ — плотность и физическая вязкость жидкости; t — время; p — давление; δ_{ij} — символ Кронекера; g — ускорение свободного падения; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ — напряжение Рейнольдса, которое вычислено в соответствии с моделью турбулентности $k_t - \varepsilon_t$, RNG (renormalization group mathematical technique) [21], k_t — кинетическая энергия турбулентности, а ε_t — скорость ее диссипации.

Численное исследование поставленной задачи выполнено в 2D-расчетной области, имеющей форму прямоугольника, в котором на поверхности воды расположен свободно плавающий контур морского судна (далее — контур), плоскость которого совпадает с плоскостью прямоугольника. Пространство выше поверхности воды заполнено воздухом. Для описания процессов в расчетной области выбрана координатная система $oxuz$, совпадающая с системой $ox_1x_2x_3$ уравнений (1) и (2). Начало координат системы $oxuz$ расположено на поверхности воды на левой вертикальной границе. При этом ось oz направлена перпендикулярно плоскости расчетной области, а ось ou — вверх. Разбиение расчетной области выполнено в двух вариантах: первый — разбиение всей расчетной области, предназначенной для численных исследований энергии аномальной волны, выполнено квадратными сеточными элементами; второй — внутри расчетной области выделена область прямоугольной формы, охватывающая пространство движения контура, разбиение которой выполнено треугольными сеточными элементами, допускающими их перестройку во время движения контура. В остальном пространстве расчетной области разбиение проведено квадратными сеточными элементами. Этот вариант предназначен для численного исследования работы опрокидывания контура в системе "контур — аномальная волна".

Для вычисления движения контура выбрана связанная с центром тяжести контура система координат $o\xi\eta\zeta$, начало которой совпадает с центром тяжести контура. Оси $o\xi$ и $o\eta$ в начальный момент времени параллельны осям ox и ou соответственно. Угол поворота контура относительно оси $o\xi$ равен углу между осями ox и $o\xi$, а его перемещение в горизонтальном или вертикальном направлениях соответствует изменению расстояния между начала-

ми координат систем $oxuz$ и $o\xi\eta\zeta$ в соответствующем направлении.

Перечислим основные методы [20] решения уравнений (1) и (2). Для обеспечения решения уравнений расчетная область разбивалась сеточными элементами, что позволило сформировать с помощью метода конечного объема разностный аналог системы уравнений RANSE, которая решалась методом Гаусса—Зейделя. Применение алгоритма PISO (Pressure-Implicit with Splitting of Operators) обеспечило связь между полями скорости, давления и выполнение уравнения неразрывности. Схемы второго порядка точности применены для дискретизации полей давления и скорости. Дискретизация решения во временной области выполнена шагом, обеспечивающим устойчивость вычислений. Определение параметров движения контура под действием аномальной волны осуществлялось путем вычисления на каждом временном шаге Δt решателя векторов линейного $\mathbf{a}_G = \mathbf{F}_G/M_C$ и углового $\mathbf{\varepsilon}_G = \mathbf{M}_G/J_C$ ускорений контура, где $\mathbf{F}_G$ и $\mathbf{M}_G$ — векторы силы перемещения и момента сил вращения, вычисленные относительно центра тяжести контура; M_C и J_C — масса и момент инерции масс контура соответственно. Для соблюдения размерности вычисляемых сил и моментов условно принято, что толщина контура равна 1 м. На основе вычисленных ускорений в конце каждого временного шага контур перемещался на расстояние, равное модулю вектора $\Delta \mathbf{l} = 0,5 \mathbf{a}_G \Delta t^2$ и поворачивался на угол $\Delta \theta = 0,5 |\mathbf{\varepsilon}_G| \Delta t^2$. Положение границы раздела "воздух—вода" определялось методом "объема жидкости" (VOF — Volume of fluid method) [22], согласно которому в каждом сеточном элементе вычислялась доля воды. Полученные данные использовались для аппроксимации профиля аномальной волны.

Решение системы уравнений (1), (2) получено для следующих типов граничных условий: на нижней и верхней границах расчетной области и периметре контура граничные условия соответствуют абсолютно жесткой границе, на которой нормальная компонента скорости жидкости равна нулю. На выходе расчетной области (правая вертикальная граница) выполняется условие соответствия давления на границе давлению в воде. На входе расчетной области (левая вертикальная граница) граничное условие представлено вектором скорости воды, втекающей в расчетную область. Для определения компонент указанного вектора был выбран профиль аномальной волны с одним высоким максимумом и двумя смежными возвышениями [23], начальное состояние ($t = 0$) которого можно описать выражением

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

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 условием поставленной задачи следует обеспечить высоту аномальных волн, равной 30 м. Выбор таких волн был осуществлен с применением специальной процедуры. На первом этапе проведено численное моделирование CFD-методом базовых волн вида (3) длиной 100 м, высотой от 8 до 12 м и координатой начального положения 200 м, в результате которого вычислены максимальные высоты (H_b) указанных волн, которые они приобретают в процессе нелинейных преобразований. При этом установлено, что волны вне указанного диапазона амплитуд не могут представлять опасности для судов, так как волны с амплитудой (a_b) менее 8 м имеют незначительную крутизну ($S_b = \pi H_b / \lambda_b$) менее 0,4 и не создают опрокидывающих моментов, а волны с амплитудой более 12 м имеют крутизну более 0,7, поэтому быстро обрушаются, сокращая, тем самым, время воздействия на контур и не опрокидывают его. На втором этапе вычислены масштабирующие коэффициенты по формуле $m_b = H_r / H_b$, где H_r — принятая максимальная высота аномальной волны, равная 30 м. Умножение соответствующих значений масштабирующих коэффициентов на параметры базовых волн (a_b , λ_b и x_b) позволило получить массивы значений начальных амплитуд (a_r), длин волн (λ_r) и координат начального положения (x_r) максимума аномальных волн (табл. 1). Выражение (3) после замены параметров a_b , λ_b , x_b на a_r , λ_r , x_r представляет собой описание в начальный момент времени ($t = 0$) формы профиля аномальных волн высотой $H_r = 30$ м.

Таблица 1

Параметры базовых и аномальных волн

Базовые волны					m_b	Аномальные волны		
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	200	15,5	0,49	1,74	13,92	174	348
9	100	200	17,2	0,54	1,49	13,41	149	298
10	100	200	18,8	0,59	1,38	13,80	138	276
11	100	200	20,5	0,64	1,30	14,30	130	260
12	100	200	22,0	0,69	1,20	14,40	120	240

В расчетной области профиль (3) аномальной волны может быть представлен в виде массива дискретных значений w_i ($i = 0, \dots, N - 1$) от дискретного аргумента $x = x_0, \dots, x_i, \dots, x_{N-1}$, где N и i — число и порядковый номер сеточных элементов в расчетной области соответственно. Пространственный спектр комплексных амплитуд Y_n массива w_i дискретных значений начального профиля аномаль-

ной волны вычислен с помощью дискретного преобразования Фурье:

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

где j — комплексная единица.

Указанный спектр представляет массив комплексных спектральных составляющих, амплитуды которых уменьшаются к его краям. В связи с этим из состава спектра исключены крайние спектральные составляющие, что позволило избежать чрезмерного увеличения как геометрических размеров расчетной области, так и числа сеточных элементов. На основе пространственного спектра (4) граничное условие на входе расчетной области представлено вектором скорости воды, горизонтальная u_x и вертикальная u_y проекции которого на оси ox и oy , соответственно, имеют вид

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

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

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

Особенностью численных исследований энергетических характеристик является соблюдение условия изолированности расчетной области. С этой целью в начальный момент времени ($t = 0$) в расчетной области с помощью компонент скорости (5) и (6) создается аномальная волна, что имитирует состояние аномальной волны в момент ее возникновения. После этого компонентам скорости (5) и (6) на входе в расчетную область придаются нулевые значения, что исключает подпитку расчетной области энергией через входную границу. Граничные условия верхней, нижней и выходной границ остаются без изменения. Перенос энергии через выходную границу исключен, в связи с тем, что величина аномальной волны вдали от ее центрального максимума всегда равна нулю. После включения вычислений аномальная волна движется, развивается за счет нелинейных преобразований и взаимодействует с контуром за счет энергии, которую она приобрела в начальный момент формирования.

Выражения (1)–(6), включая методы численного решения, формулировку граничных и начальных условий, обоснование параметров аномальных

Тип, водоизмещение морских судов и параметры их контуров

Тип и водоизмещение судна, т	Параметры контуров					
	Ширина, м	Высота, м	Осадка, м	Масса, кг	Момент инерции, кг·м ²	Начальная метацентрическая высота, м
Танкер тип "Интернационал", 27000	22,4	12,3	9,4	206 697	12 427 869	1,0
РТМКС тип "Моонзунд", 9260	19,0	12,2	6,6	123 683	5 693 432	0,5; 1,0
СРТМ тип "Иван Шаньков", 1389	11,0	7,3	5,2	56 100	670 767	0,5; 1,0

волн, представляют в совокупности модель изолированной системы "контур — аномальная волна".

Численное исследование энергии системы "контур — аномальная волна" и обсуждение результатов

Численное исследование проведено в расчетной области, имеющей форму прямоугольника длиной $5\lambda_r$, высотой $2\lambda_r$ и глубиной воды $h_r = 1,5\lambda_r$, обеспечивающей условие глубокого моря ($h_r > 0,5\lambda_n$, $n = 1, \dots, L$) для всех спектральных компонент усеченного спектра. Длина стороны сеточных элементов выбрана равной $d = 0,5$ м, плотность воды — $\rho = 1027$ кг/м³, ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с². Для обеспечения устойчивости вычислений шаг (Δt) дискретизации времени процесса решения выбран равным 0,0005 с, при котором максимальное число Куранта ($C = \Delta t u_{\max}/d$, где $u_{\max}$ — максимальное значение скорости жидкости в расчетной области) не превышало 0,25. Усечение спектра (4) проведено в отношении его боковых спектральных составляющих, значение которых не превысило 10 % от наибольшей спектральной составляющей. Для численного исследования выбраны морские суда [24] (табл. 2), которые, ввиду длительного пребывания в море, могут встретиться с аномальными волнами. Значения начальных метацентрических высот соответствуют рекомендациям для указанных судов.

Численное исследование энергии системы "контур — аномальная волна" выполнено в два этапа. На первом этапе вычислено распределение плотности кинетической энергии на профилях каждой аномальной волны (см. табл. 1) в целях выбора наиболее энергонасыщенного профиля, абсцисса координат которого использована для установки контура на поверхности воды. Вычислена эволюция во времени кинетической, потенциальной и полной энергии каждой аномальной волны, что позволило оценить среднее значение ее полной энергии. На втором этапе для оценки потерь энергии в системе "контур — аномальная волна" вычислена работа опрокидывания каждого контура и соотнесена со средним значением полной энергии каждой аномальной волны. Так как в пределах одного метра фронта волны можно считать однородными поля скорости и давления, то указанные энергетические характеристики отнесены к фрон-

ту аномальной волны шириной 1 м. В связи с этим условный размер сеточных элементов в направлении оси oz расчетной области также принят равным 1 м.

На рис. 1 представлена временная последовательность состояний (профилей) аномальной волны длиной 138 м.

В начальный момент времени аномальная волна имеет профиль (A), который с течением времени принимает форму профиля с первым максимумом высоты (B), который преобразуется в двугорбый профиль (C). Стремительное преобразование профиля (C) приводит к формированию профиля со вторым максимумом высоты (D), скорость воды в котором превышает фазовую скорость волны, что приводит к образованию струи (F), обрушающейся на поверхность воды. Вид профилей и их последовательность является типичной для аномальных волн, представленных в табл. 1.

Для каждого профиля $A - F$ аномальной волны вычислены максимальные значения плотности кинетической энергии по формуле $e_k = \sum_{i=1}^R \frac{\rho u_i^2}{2}$, где

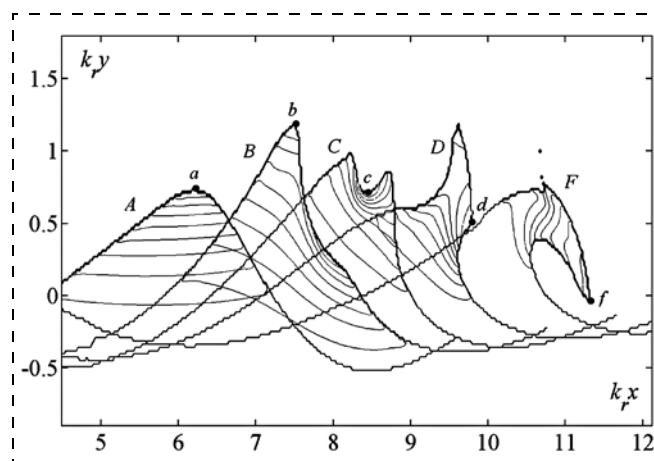


Рис. 1. Временная последовательность профилей аномальной волны:

A — начальный профиль, B — профиль с первым максимумом высоты, C — двугорбый профиль, D — профиль со вторым максимумом высоты, F — профиль со струей, обрушающейся на поверхность воды; $k_r = 2\pi/\lambda_r$ — волновое число, λ_r — длина аномальной волны; x и y — абсцисса и ордината в системе координат oxy расчетной области. Точки a, b, c, d, e, f — области с максимальными значениями плотности кинетической энергии

u_i — скорость движения воды в i -м сеточном элементе; R — число сеточных элементов, заполненных водой. Точками a, b, c, d, f обозначены положения областей с максимальным значением плотности кинетической энергии на профилях аномальной волны. Положения точек $a — f$ являются типичными для рассматриваемых аномальных волн. От каждой из указанных точек на профилях $A — F$ построены изолинии плотности кинетической энергии. Плотность кинетической энергии между смежными изолиниями по мере удаления от точек $a — f$ уменьшается на 10 %, что дает представление о пространственном распределении плотности кинетической энергии на поверхностях профилей, а также о направлении вектора скорости воды, который направлен в сторону точек $a — f$ и перпендикулярен изолиниям. Из анализа рис. 1 следует, что в процессе развития аномальной волны (профили A, B) точки максимального значения плотности кинетической энергии располагаются на вершинах гребней, на профиле C — между горбами. На профиле со вторым максимумом высоты (профиль D) максимум плотности кинетической энергии переме-

щается на фронт профиля, существенно ниже вершины гребня. Указанный профиль является самым опасным для сохранения устойчивости контуром, так как обладает максимальной плотностью кинетической энергии перед обрушением аномальной волны. В последующие моменты времени скорость жидкости превышает фазовую скорость фронта профиля (D), что приводит к образованию струи, обрушающейся на поверхность воды. На завершающем этапе максимум плотности энергии смещается на оконечность струи (профиль F). Вычисленные значения максимальной плотности кинетической энергии для аномальных волн длиной от 120 до 174 м сведены в табл. 3. Полученные данные свидетельствуют об увеличении максимальной плотности кинетической энергии по мере развития аномальной волны, которая приобретает наибольшее значение в процессе обрушения волны. При этом с увеличением длины аномальной волны уменьшается максимальное значение плотности кинетической энергии.

На рис. 2 представлены диаграммы зависимости от времени кинетической, потенциальной и полной (суммарной) энергии аномальных волн. Кинетическая энергия E_k вычислена по формуле

$$E_k = \sum_{i=1}^R \frac{m_i u_i^2}{2}, \text{ где } i — \text{номер сеточного элемента;}$$

$m_i = \rho b d^2$ и u_i — масса и скорость движения воды в сеточном элементе соответственно; d — размер стороны квадратного сеточного элемента; $b = 1$ — условный размер сеточного элемента в направлении оси oz ; R — число сеточных элементов в расчетной области, заполненных водой. Потенциальная энергия аномальной волны складывается из потенциальной энергии гребня и боковых возвышений,

$$\text{вычисляемой по формуле } E_c = \sum_{i=1}^R g m_i y_i \text{ (} y_i > 0 —$$

ординаты центров сеточных элементов в гребне центрального максимума и боковых возвышениях) и энергии, равной работе вытеснения воды из лож-

$$\text{бин аномальной волны, } E_t = \sum_{i=1}^R g m_i |y_i|, \text{ (} y_i < 0 —$$

ордината ячеек в ложбинах).

Из рис. 2 следует, что кинетическая и потенциальная энергия изменяются в противофазе. Максимальная потенциальная энергия (минимальная кинетическая) соответствуют двугорбому профилю (C), что объясняется увеличением его ширины и перемещением в ложбину между горбами области с максимальной плотностью кинетической энергии. Резкое понижение потенциальной энергии (кривые 13—15) коротких аномальных волн с длинами 138...120 м связано с уменьшением ширины их гребней и интенсивным обрушением в момент времени F соответственно. Превышение полной энергии длинноволновых (149...174 м) аномальных

Таблица 3
Максимальная плотность кинетической энергии аномальных волн, Дж/м³

Длина волн, м	Положение максимальных значений плотности кинетической энергии				
	a	b	c	d	f
120	301 200	196 600	350 100	405 700	546 400
130	242 900	161 800	316 400	366 400	520 800
138	189 200	131 000	289 100	310 400	475 400
149	148 400	108 000	249 700	258 500	422 100
174	127 500	94 800	212 300	220 500	377 900

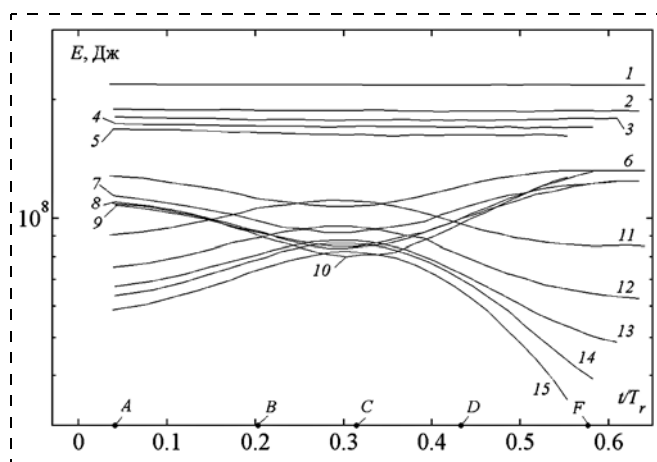


Рис. 2. Эволюция во времени кинетической, потенциальной и полной энергии аномальных волн: 1, 2, 3, 4, 5 — полная энергия, 6, 7, 8, 9, 10 — кинетическая энергия, 11, 12, 13, 14, 15 — потенциальная энергия аномальных волн длиной 174, 149, 138, 130, 120 м соответственно; A, B, C, D, F — моменты времени, соответствующие времени формирования одноименных профилей (см. рис. 1); T_r — период аномальной волны

волн (кривые 1, 2) относительно коротковолновых (кривые 3—5) обусловлено относительно большим числом сеточных элементов и размеров расчетной области длинноволновых аномальных волн. По мере увеличения t/T_r кинетическая энергия аномальной волны возрастает, что подтверждает ранее сделанный вывод об увеличении максимальной плотности кинетической энергии по мере развития аномальной волны. Несмотря на принятые меры по обеспечению изолированности расчетной области, полная энергия (кривые 1—5) аномальных волн длиной 174, 149, 138, 130, 120 м снижается со скоростью 1,6; 2,9; 4,2; 6,3; 11 МДж/с, соответственно. Диссипация энергии обусловлена учетом в уравнениях (1) и (2) физической (μ) и турбулентной вязкости ($\mu_t = 0,0845\rho k_t^2/\varepsilon_t$). Наибольшая диссипация энергии свойственна коротковолновым аномальным волнам (4 и 5) ввиду наличия в них высокой плотности кинетической энергии (табл. 3) и соответствующих ей интенсивных турбулентных процессов. Максимальная диссипация энергии на физической и турбулентной вязкости в течение периода рассмотренных аномальных волн составила 3,4 %.

Для создания условий, максимально способствующих опрокидыванию, контур устанавливался на поверхности воды с таким расчетом, чтобы в процессе вычислений его положение совпало с абсциссой второго максимума аномальной волны, характеризующегося наибольшей плотностью кинетической энергии гребня перед его обрушением. Работа (A) опрокидывания контура аномальной волной представляет собой сумму работы момента сил вращения (A_M) относительно оси oz и работы (A_F) сил перемещения контура в системе координат oxy . Указанные компоненты работы вычисля-

лись по формулам $A_M = \sum_{j=1}^P M_j \omega_j \Delta t$, M_j и ω_j — момент сил и угловая скорость вращения контура на j -м шаге вычислений соответственно; $P = T_c/\Delta t$ — число шагов суммирования в процессе вычислений; T_c — время, соответствующее моменту опрокидывания контура; Δt — шаг временной дискретизации вычислений;

$A_F = \sum_{j=1}^P F_j V_j \Delta t$, на каждом шаге j вы-

числяли $F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$ и $V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$; F_x , V_x и F_y , V_y — проекции силы F и скорости V перемещения контура на оси ox и oy соответственно.

На рис. 3 представлены диаграммы зависимости от длины аномальной волны среднего значения ее полной энергии $\bar{E}$; среднего значения полной энергии $\bar{E}_\lambda$, нормированной к длине волны; работы A_1 — A_5 опрокидывания контуров. Среднее значение полной энергии вычислено путем осреднения по времени полной энергии аномальных волн, представленных на рис. 2.

Среднее значение относительной разности работ A_2 и A_3 опрокидывания, связанной с различными метацентрическими высотами, не превышает 2,3 %, для A_4 и A_5 — 2,2 %. Это объясняется тем, что опрокидывание происходит после того, как волна накрывает контур, что исключает формирование сил остойчивости, зависящих от метацентрической высоты. Некоторый рост работ A_1 — A_5 с увеличением длины аномальных волн обусловлен соответственным увеличением времени (T_c) опрокидывания контуров. Для установления граничного значения водоизмещения, соответствующего малоподвижному препятствию, выбран танкер водоизмещением 27 000 т, максимальный крен которого на аномальных волнах не превысил 30°. Потеря энергии аномальной волной в рассматриваемой изолированной системе "контур — аномальная волна" равна выполняемой ею работе опрокидывания контура. В связи с этим отношение работ A_1 — A_5 к энергии $\bar{E}$ можно рассматривать как относительную величину потерь энергии аномальной волны на опрокидывание контуров (табл. 4). При этом работы A_2 и A_3 , A_4 и A_5 опрокидывания контуров для метацентрических высот 0,5 и 1,0 усреднены, как отмечалось выше, ввиду их незначительного различия.

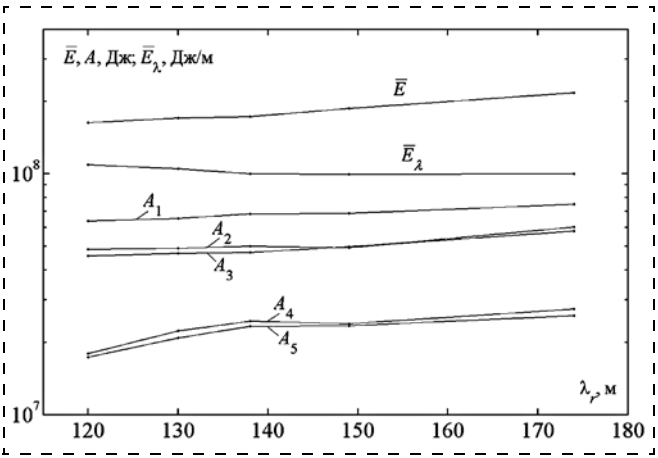


Рис. 3. Диаграммы энергии аномальных волн и работы опрокидывания контуров:

$\bar{E}$ — среднее значение полной энергии; $\bar{E}_\lambda$ — среднее значение полной энергии, нормированное к длине волны; A_1 — работа опрокидывания контура судна водоизмещением 27 000 т с метацентрической высотой 1,0; A_2 , A_3 и A_4 , A_5 — работа опрокидывания контуров судов водоизмещением 9260 и 1389 т с метацентрическими высотами 1,0, 0,5 соответственно

Таблица 4
Относительные потери энергии аномальной волны на опрокидывание контура, %

Водоизмещение судна, т	Длина аномальной волны, м				
	120	130	138	149	174
27 000	39,01	38,30	39,46	36,64	34,33
9260	28,80	28,11	28,16	26,43	27,15
1389	10,77	12,63	13,81	12,63	12,24

По мере увеличения длины аномальной волны относительные потери энергии на опрокидывание контуров судов водоизмещением 27 000 и 9260 т снижаются, что объясняется, с одной стороны, уменьшением полной энергии (рис. 3, $\bar{E}_\lambda$), нормированной к длине волны, а с другой — уменьшением максимальных значений плотности кинетической энергии (см. табл. 3) аномальных волн. Максимальные значения потерь энергии аномальной волной на опрокидывание контуров судов водоизмещением 92 600 и 27 000 т и диссипацию на физической и турбулентной вязкостях составили 32,2 и 42,9 % соответственно. Таким образом, работа A_1 может служить максимальным (предельным) значением потери среднего значения полной энергии аномальной волны при встрече с контуром малоподвижного судна или предельным значением работы опрокидывания контура на аномальной волне.

Заключение

Задача, поставленная в настоящей работе, решена. Выполнены на глубоком море численные исследования энергии системы "контур морского судна — аномальная волна". После возникновения аномальной волны ее высота продолжает увеличиваться за счет нелинейных процессов, достигая 30 м. При этом в течение одного периода форма профиля гребня изменяется, процесс завершается обрушением аномальной волны. Аномальные волны характеризуются высокой энергонасыщенностью, потери энергии аномальной волны на опрокидывание растут с увеличением водоизмещения судов и достигают предельной величины в 40 % от среднего значения полной энергии аномальной волны. Полученные результаты могут быть применены, во-первых, для развития численных исследований на основе CFD-метода, который демонстрирует высокую эффективность численных исследований аномальных волн; во-вторых, в качестве исходных данных при проектировании судов для повышения их устойчивости к опрокидыванию аномальной волной; в-третьих, для поиска причин известных случаев [4] гибели судов, которые из-за большого водоизмещения не могли быть опрокинуты аномальной волной.

Результаты вычислений получены с использованием оборудования ЦКП "Дальневосточный вычислительный ресурс" ИАПУ ДВО РАН.

Список литературы

1. Kharif C., Pelinovsky E. and Slunyaev A. Rogue waves in the ocean. Berlin: Springer, 2009. 215 p.
2. Benjamin T. B., Feir J. E. The disintegration of wave trains in deep water // J. Fluid. Mech. 1967. V. 27. P. 417—430.
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. Пелиновский Е. Н., Слюняев А. В. "Фрики" — морские волны-убийцы // Природа. 2007. № 3. С. 14—23.
5. Rosenthal W., Lehner. Rogue Waves: Results of the MaxWave Project // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2008. V. 130. P. 1—8.
6. Extreme Seas. Design for ship safety in extreme seas. URL: <https://www.hse.ru/data/2011/10/12/1270460467/ES%202011sep17.pdf> (Дата обращения: 12.04.2016).
7. Nikolkina I., Didenkulova I. Rogue waves in 2006—2010 // Natural hazards and Earth system sciences. 2011. V. 11. P. 2913—2924.
8. Научный центр по изучению "волн-убийц". URL: <http://roguewaves.ru> (Дата обращения: 12.04.2016).
9. Rogue waves research project. URL: <http://www.ercmulti-wave.eu> (Дата обращения: 12.04.2016).
10. Ruban V., Kodama Y., Ruderman M. et al. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates // The European physical journal special topics. 2010. Iss. 185. P. 5—15.
11. Шамин Р. В. Моделирование волн-убийц на основе эволюционных дифференциальных включений // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 1. С. 14—23.
12. 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.
13. Пелиновский Е. Н., Шургаллина Е. Г. Аномальное усиление волны вблизи вертикальной преграды // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2010. Т. 10, № 4. С. 29—38.
14. 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.
15. Ming Wu, Bo Yang, Zuochao Wang et al. Prediction of Ship Motions in Head Waves Using RANS Method // Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece. 2012. June 17—22. P. 1112—1117.
16. Zaharov V. E., Shamin R. V., Yudin A. V. Energetic portrait of the rogue waves // JETP Letters. 2014. V. 99, N. 9. P. 514—517.
17. Sergeeva A. and Slunyaev A. Rogue waves, rogue events and extreme wave kinematics in spatio-temporal fields of simulated sea states // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2013. N. 13. P. 1759—1771.
18. Чаликов Д. В. Портрет волны-убийцы // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2012. Т. 5, № 1. С. 5—13.
19. Дорошко В. М. Устойчивость контура морского судна к опрокидыванию волной-убийцей // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 17, № 12. С. 852—860.
20. Ferziger J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer, 2002. 431 p.
21. Yakhot V., Orszag S. Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory // Journal of scientific computing. 1986. V. 1, N. 1. P. 1—51.
22. 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.
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. Флот рыбной промышленности. Справочник типовых судов. М.: Транспорт, 1990. 381 с.

Energy of the Sea Craft Contour — Anomalous Wave System

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

Institute of Automation and Control Processes, Far East Branch,
Russian Academy of Sciences (IACP FEB RAS), Vladivostok, 690041, Russian Federation

Corresponding author: **Dorozhko Veniamin M.**, Ph.D., Senior Researcher,
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 May 20, 2016

Accepted on June 15, 2016

The article is devoted to a numerical study of the contour — anomalous wave system and the quantitative estimates of its energy parameters. The author discovered that the profile of an anomalous wave undergoes the following stages: the initial profile, the profile with the first maximum height, the two-humped profile, the profile with a second maximum height, and the breaking profile. The problem is solved by CFD method in three stages. At the beginning the density maximum of the kinetic energy and its position on the anomalous wave profiles was calculated. It was discovered that the anomalous wave profile with the second maximum has the highest energy density and presents the greatest danger to the contour stability. Then, the numerical studies demonstrated that the kinetic energy increased as we approached the time of the anomalous wave collapse. It was discovered that the sum of the kinetic and potential energies is reduced due to the dissipation associated with the physical and turbulent viscosity. Eventually, we calculated the contour capsizing work. It was revealed that the anomalous wave energy loss corresponded to the contour capsizing work and increased with the vessel displacement. The relative value limit of the anomalous wave energy losses on bad moving contour reached 40 %. The received results can be used, firstly, for development of CFD based numerical studies. Secondly, the results can be used as the database for improvement of the design of the vessels, and also as a motive to search for causes of shipwrecks of vessels over 27000 tons, which did not capsize due to anomalous wave.

Keywords: computational fluid dynamics, anomalous wave, isolated system, density of energy, kinetic and potential energies, contour of a sea craft, capsizing work, losses of energy

For citation:

Dorozhko V. M. Energy of the Sea Craft Contour—Anomalous Wave System, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 3, pp. 208—215.

DOI: 10.17587/mau.18.208-215

References

1. Kharif C., Pelinovsky E. and Slunyaev A. Rogue waves in the ocean. Berlin. Springer. 2009. 215 p.
2. Benjamin T. B., Feir J. E. The disintegration of wave trains in deep water, *Journ. Fluid. Mech.*, 1967, vol. 27, pp. 417—430.
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. Pelinovskij E. N., Slyunyaev A. V. "Freaks" — morskije volny-ubijcy (Freaks — sea rogue waves), *Priroda*, 2007, no. 3, pp. 14—23 (in Russian).
5. Rosenthal W., Lehner. Rogue Waves: Results of the MaxWave Project, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2008, vol. 130, pp. 1—8.
6. Extreme Seas. Design for ship safety in extreme seas. Available at: http://tra2014.traconference.eu/papers/pdfs/TRA2014_Fom_28494.pdf
7. Nikolkina I., Didenkulova I. Rogue waves in 2006—2010, *Natural hazards and Earth system sciences*, 2011, vol. 11, pp. 2913—2924.
8. Nauchnyj centr po izucheniyu "voln-ubijcy" (Scientific Center for the Research of the rogue waves). Available at: <http://roguewaves.ru>
9. Rogue waves research project. Available at: <http://www.erc-multiwave.eu>.
10. Ruban V., Kodama Y., Ruderman M. et al. Rogue waves — towards a unifying concept: Discussions and debates, *The European physical journal special topics*, 2010, Iss. 185, pp. 5—15.
11. Shamin R. V. Modelirovanie voln-ubijcy na osnove ehvolucionnykh differentsial'nykh vklucheniij (Simulation of the rogue waves on the basis of evolutionary differential inclusions), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 14—23 (in Russian).
12. Kuznecov S. Yu., Saprykina Ya. V. Eksperimental'nye issledovaniya vozniknoveniya voln-ubijcy pri ehvolucii uzkoj spektra krutyykh voln (Experimental studies of the rogue waves emergence in the evo-

lution of a narrow range of steep waves), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 52—63 (in Russian).

13. Pelinovskij E. N., Shurgalina E. G. Anomal'noe usilenie volny vblizi vertikal'noj pregrady (Abnormal amplification of the wave near the vertical barriers), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2010, vol. 10, no. 4, pp. 29—38 (in Russian).

14. 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.

15. Ming Wu, Bo Yang, Zuochao Wang et al. Prediction of Ship Motions in Head Waves Using RANS Method, *Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference*. Rhodes, Greece. 2012. June 17—22, pp. 1112—1117.

16. Zaharov V. E., Shamin R. V., Yudin A. V. Energetic portrait of the rogue waves, *JETP Letters*, 2014, vol. 99, no. 9, pp. 514—517.

17. Sergeeva A. and Slunyaev A. Rogue waves, rogue events and extreme wave kinematics in spatio-temporal fields of simulated sea states, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2013, no. 13, pp. 1759—1771.

18. Chalikov D. V. Portret volny-ubijcy (Portrait of the rogue wave), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 5—13 (in Russian).

19. Dorozhko V. M. Ustojchivost' kontura morskogo sudna k oprokidyvaniyu volnoj-ubijcej (The stability of seagoing vessel contour to capsizing by the rogue wave), *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*, 2015, vol. 17, no. 12, pp. 852—860 (in Russian).

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

21. Yakhot V., Orszag S. Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory, *Journal of scientific computing*, 1986, vol. 1. no. 1, pp. 1—51.

22. 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.

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