

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Смоленцев Сергей Викторович —
доктор технических наук, профессор.
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени
адмирала С.О. Макарова»
sswasily@mail.ru, kaf_avt@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Smolentsev Sergey Victorovich —
Dr. of Technical Sciences, professor.
Admiral Makarov State University
of Maritime and Inland Shipping
sswasily@mail.ru, kaf_avt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 20 января 2016 г.

УДК 004: 656.61.073

В. М. Дорожко

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОБЛАСТИ ОПРОКИДЫВАНИЯ КОНТУРА
МОРСКОГО СУДНА НА «ВОЛНЕ-УБИЙЦЕ»**

На основе метода вычислительной гидродинамики создан виртуальный опытовый бассейн, в котором выполнялись вычисления опрокидывания контура морского судна. Обоснован выбор типа и параметров «волны-убийцы» с одним центральным максимумом высотой 30 м и двумя боковыми возвышениями. Сформулированы начальные и граничные условия, обеспечивающие генерацию «волны-убийцы» в расчетной области и движение контура под воздействием волн. Обеспечена регистрация на каждом шаге вычислений величин, определяющих движение контура. Выбран перечень основных параметров, оказывающих влияние на устойчивость контура к опрокидыванию «волной-убийцей», к которым относятся масса контура, начальная метацентрическая высота контура, длина «волны-убийцы», начальное удаление контура от «волны-убийцы». Для всех сочетаний указанных параметров получены значения максимального угла крена контура. На основании указанных параметров сформированы параметрические области, соответствующие «опрокидыванию» контура. Установлено, что уменьшение массы контура судна, его начальной метацентрической высоты, начального расстояния контура до «волны-убийцы» и её длины способствует «опрокидыванию» контура. Полученные результаты могут использоваться при разработке мероприятий по обеспечению безопасности и проектированию морских судов.

Ключевые слова: «волна-убийца», вычислительная гидродинамика, контур судна, опрокидывание судна, метацентрическая высота контура, угол крена.

Введение

Среди многообразия морских волн особое место занимают «волны-убийцы», достигающие высоты 30 м [1]. Исследования механизма их возникновения выполнены Т. В. Benjamin, J. E. Feir и В. Е. Захаровым в периодическом издании [2]. В России изучением «волн-убийц» занимаются ученые Е. Ф. Пелиновский, С. И. Бадулин, А. И. Дьяченко, И. И. Диденкулова, В. Е. Захаров, А. А. Куркин, А. В. Слюняев, Д. В. Чаликов, Р. В. Шамин и др. Исследование этих волн является актуальным научным направлением. Такие проекты, как «MaxWave» (2000 – 2003 гг.) [3] и «Extreme Seas» (2009 – 2012 гг.), см. сайт в Интернете <https://www.hse.ru/data/2011/10/12/1270460467/ES%202011sep17.pdf>, были профинансированы Евросоюзом с целью установки частоты возникновения «волн-убийц» и разработки предложений по безопасности морских судов. Для координации отечественных исследований в 2012 г. был создан Научный центр по изучению «волн-убийц». За рубежом аналогичными исследованиями занимается «Rogue Waves Research Project»), сокр. назв. «MULTIWAVE» (сайт в Интернете <http://www.ercmultiwave.eu>), в состав которого от России входит академик В. Е. Захаров.

В ряде публикаций: [1], [4], приводится анализ потерь среди морских судов от встречи с «волнами-убийцами». Считается, что именно эти волны явились причиной гибели 22 супертанкеров [1] в период 1968 – 1994 гг. Только за четыре года (2006 – 2010 гг.) было зарегистрирова-

но 78 случаев возникновения «волн-убийц», в которых погибли или получили повреждение морские суда или люди [4]. Всё это служит основанием для проведения прикладных исследований, связанных с «волнами-убийцами». Однако работ, непосредственно связанных с опрокидыванием морских судов на этих волнах, крайне мало. В качестве примера можно привести исследование в опытовом бассейне в масштабе 1 : 142 воздействия «волны-убийцы» на модель судна [5], так как создать в бассейне «волну-убийцу» высотой 30 м практически нереально. Другим примером является аналитическая работа, [6] в которой исследование устойчивости судна к опрокидывающему действию волн ограничивается креном (до 45°), при котором всё еще оправдано разложение в ряды моментов сил демпфирования, накренения и восстановления.

Следует отметить, что в процессе встречи морского судна с «волной-убийцей» имеет место формирование взаимосвязанных сильных нелинейных процессов — нарастание крена судна до угла опрокидывания ($> 80^\circ$) и рост крутизны «волны-убийцы» до значений, превышающих пороговое значение 0,443, отделяющее линейные процессы преобразования волн от нелинейных. При этом опрокидывающееся судно оказывает влияние на поля скорости и давления в «волне-убийце», которые, в свою очередь, оказывают влияние на изменение угла крена судна. Следовательно, для корректного исследования опрокидывания морского судна необходимо рассматривать морское судно и «волну-убийцу» как единую взаимосвязанную систему «морское судно — «волна-убийца»», на поведение которой оказывают влияние такие основные параметры, как крутизна «волны-убийцы», длина её центральной волны, начальное удаление морского судна от «волны-убийцы» в момент её возникновения, водоизмещение морского судна и его начальная поперечная метацентрическая высота. В связи с этим ставится задача выполнения оценки параметрической области опрокидывания контуров (миделевое сечение судна) морских судов водоизмещением 1000 – 10000 т на «волнах-убийцах» различной длины высотой 30 м в зависимости от основных параметров системы «контур морского судна — «волна-убийца»»:

- масса контура;
- начальная метацентрическая высота контура;
- длина центральной волны «волны-убийцы»;
- начальное удаление контура от «волны-убийцы».

Общие модельные представления системы «контур морского судна — «волна-убийца»»

Процесс формирования «волны-убийцы» с момента зарождения и до обрушения можно условно разбить на четыре этапа. На первом этапе в результате пространственно-временной фокусировки формируется узкий спектр почти монохроматической волны. На втором этапе в результате модуляционной неустойчивости возникает солитон, под огибающей которого находятся 3 – 20 периодов волны. Если крутизна волны ($S = \pi H/\lambda$, где H и λ — высота и длина волны соответственно) превышает пороговое значение 0,443, то на третьем этапе за счет нелинейных процессов происходит увеличение крутизны и рост высоты волны до высот 30 м, характерных для «волны-убийцы». На четвертом этапе крутизна «волны-убийцы» увеличивается до максимальных значений, когда фронт «волны-убийцы» становится вертикальным, после чего происходит её обрушение. В соответствии с поставленной задачей достаточно выполнить численное моделирование опрокидывания контура морского судна (далее — контура) под воздействием «волны-убийцы» на третьем и четвертом этапах.

В последние десятилетия в связи с развитием информационных технологий всё чаще находит применение метод вычислительной гидродинамики (CFD — *computational fluid dynamics*) [7], который позволяет численными методами имитировать опытовый бассейн, в связи с этим представляя собой достойную альтернативу дорогостоящим экспериментальным исследованиям. CFD-метод использует уравнения неразрывности несжимаемой жидкости и сохранения импульса (RANS-уравнения — *Reynolds-averaged Navier-Stokes equations*), которые записываются в виде:

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

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

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 поля скорости жидкости; u'_1, u'_2, u'_3 — флуктуации скорости; t — время; ρ, μ и g — плотность, вязкость жидкости и ускорение свободного падения, соответственно; p — давление, δ_{ij} — символ Кронекера.

Последний член в уравнении (2) — напряжение Рейнольдса, которое вычислено в соответствии с моделью турбулентности $k_t - \epsilon, RNG$ [8], обеспечивающей получение расчетных величин, близких к экспериментальным значениям.

Отметим основные положения методики численного решения [7] уравнений (1), (2). Геометрическое пространство (расчетная область), в котором выполнялись вычисления, разбивалась сеточными элементами, что позволило сформировать с помощью *метода конечного объема* разностный аналог RANS-уравнений. Полученная система алгебраических уравнений решалась *методом Гаусса – Зейделя*. Связь между полями скорости и давления, обеспечивающая выполнение уравнения неразрывности, реализована при помощи алгоритма PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operators*). Для аппроксимации градиентов применен *Green-Gauss-Cell-метод*. Пространственная дискретизация поля давления и скорости выполнена с помощью схем второго порядка точности. Дискретизация решения во временной области выполнена переменным шагом, обеспечивающим устойчивость решения при изменении максимальных значений поля скорости.

Вычисление опрокидывания контура на «волне-убийце» выполнено в расчетной области рис. 1, имеющей форму прямоугольника, и в декартовой системе oxy , совпадающей с системой координат ox_1x_2 уравнений (1) и (2).

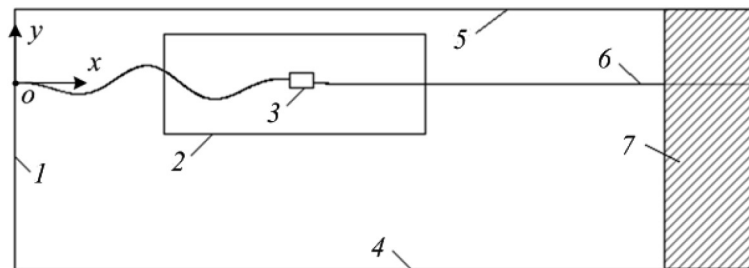


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 — входная граница; 2 — область движения контура; 3 — контур; 4 — нижняя граница расчетной области; 5 — верхняя граница расчетной области; 6 — начальный профиль «волны-убийцы»; 7 — область повышенного затухания волн; oxy — система координат

Согласно натурным наблюдениям, «волна-убийца» в момент возникновения имеет форму высокого центрального максимума с двумя боковыми возвышениями [9], начальный профиль (для $t = 0$) которой можно представить в виде выражения

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

где $a_b, k_b = 2\pi/\lambda_b$ (λ_b — длина волны); a_b, k_b — соответственно начальная амплитуда и волновое число; x_b — абсцисса начального положения центрального максимума волны на оси ox (рис. 1).

В расчетном пространстве, в соответствии с сеточной разбивкой, начальный профиль (см. выражение (3)) «волны-убийцы» можно представить 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 элементов сеточной разбивки соответственно. Расстояние ($x_{i+1} - x_i$) между двумя смежными значениями аргумента x соответствует проекции шага сеточной разбивки на ось ox . С помощью дискретного преобразования Фурье получен пространственный спектр комплексных амплитуд Y_n от массива w_i дискретных значений начального профиля «волны-убийцы»:

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

где j — комплексная единица.

В центре пространственного спектра (4) располагается спектральная составляющая максимальной высоты с длиной волны, равной λ_b (см. выражение (3)), которую далее будем называть *длиной центральной волны*. Левая часть от центра пространственного спектра (4) содержит длинноволновые спектральные составляющие, правая — коротковолновые составляющие. В случае учета наиболее длинноволновых составляющих (для выполнения условия глубокой воды $h \geq 0,5\lambda_b$, где h — глубина воды) потребуется увеличить глубину воды в расчетной области до нескольких километров. Учет коротковолновых составляющих спектра потребует сеточной разбивки элементами размером менее 0,25 м. Таким образом, численное моделирование пространственного спектра (4) потребует, с одной стороны, увеличения геометрических размеров расчетной области, а с другой — применения мелкой сеточной разбивки, что, в конечном итоге, приведет к необходимости использования значительного вычислительного ресурса. В связи с этим было принято решение выполнить усечение боковых составляющих пространственного спектра (4), величина модуля которых не превышает 5 % от модуля центральной спектральной амплитуды, что позволило сократить требования, предъявляемые к вычислительному ресурсу. При этом профиль «волны-убийцы», полученный с помощью обратного преобразования Фурье усеченного спектра, совпал с профилем выражения (3), что указывает на допустимость подобного усечения.

На основе усеченного пространственного спектра, являющегося массивом комплексных амплитуд (спектральных составляющих) синусоидальных волн, сформирован вектор скорости воды, втекающей в расчетную область, горизонтальная u_x и вертикальная u_y , проекции которого на оси ox и oy (рис. 1), соответственно, вычисляются в соответствии с выражениями:

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

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

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

Внутри расчетной области выделена область (см. рис. 1, область 2) прямоугольной формы, пространство которой разбито треугольными сеточными элементами, допускающими их перестройку во время движения контура (см. рис. 1, контур 3). Остальное пространство расчетной области разбито квадратными сеточными элементами. Для решения уравнений (1) и (2) требуется задание граничных (на границах расчетной области, контура и поверхности жидкости) и начальных условий — значения полей давления и скорости во всем пространстве расчетной области в начальный ($t = 0$) момент времени.

Граничное условие на входе в расчетную область (см. рис. 1, граница 1) представляет вектор скорости втекающей жидкости, проекции которого на оси системы координат вычисляются в соответствии с выражениями (5) и (6). Граничные условия на дне расчетной области (см. рис. 1, граница 4) соответствуют нулевому значению проекции скорости жидкости на нормаль к границе.

Граничное условие на периметре контура (см. рис. 1, контур 3) представляет собой давление, вычисляемое на каждом временном шаге Δt решения. На основе указанного давления вычисляются векторы силы F_G и момента M_G , приложенные к центру тяжести контура, которые, в свою очередь, используются для вычисления векторов линейного $a_G = F_G / M_C$ и углового $\varepsilon_G = M_G / J_z$ ускорений центра тяжести контура, где M_C и J_z — соответственно масса и момент инерции масс контура. В конце каждого временного шага Δt контур смещается и поворачивается на величину вектора $\Delta l = 0,5a_G \Delta t^2$ и угла $\Delta \theta = 0,5\varepsilon_G \Delta t^2$ соответственно.

Граничное условие наверху расчетной области (см. рис. 1, граница 5) соответствует атмосферному давлению воздуха. В конце расчетной области создано повышенное затухание (см. рис. 1, область 7), исключающее отражение «волны-убийцы» от правой границы.

Для обеспечения формирования граничных условий на поверхности жидкости (см. рис. 1, граница 6) на каждом шаге Δt вычислялось положение границы раздела воды и воздуха *методом объема жидкости* (VOF – *Volume of fluid method*) [7], согласно которому в пределах каждой сеточной ячейки выполнялась линейная аппроксимация профиля «волны-убийцы» на основе результатов вычисления доли воды / воздуха в каждой сеточной ячейке. Граничные условия на поверхности жидкости представляют собой совокупность вычисленных значений скорости и давления жидкости и воздуха в каждой сеточной ячейке на границе раздела фаз (вода / воздух).

Начальные условия уравнений (1) и (2) в момент $t = 0$ созданы путем инициализации расчетного пространства от входных скоростей (5) и (6), что позволило создать поле скоростей, соответствующее начальному состоянию профиля (см. рис. 1, граница 6) «волны-убийцы» в формуле (3). Вычисленные в конце первого шага значения поля скорости и давления на границах и в расчетной области определяют граничные и начальные условия для второго шага решения, результаты вычисления в конце второго шага — граничные и начальные условия для третьего шага и т. д. — на протяжении всего процесса решения задачи.

Как отмечалось ранее, высота «волны-убийцы» может увеличиться до 30 м за счет нелинейных процессов при условии, что её начальная крутизна превышает 0,443. В связи с этим формирование массива «волн-убийц» было выполнено в два этапа. На первом этапе выбран ряд базовых волн, соответствующих выражению (3), крутизной, превышающей 0,443, длиной центральной волны λ_b , равной 100 м, начальными амплитудами a_b , составляющими 8 – 12 м и начальным положением x_b центрального максимума, равным 100 м. Базовые волны с начальной амплитудой менее 8 м и более 12 м не представляют опасности для судов: первая — в силу своей незначительной крутизны, вторая — по причине непродолжительного существования из-за быстрого смыкания первого и второго максимумов и следующего за этим обрушения. Для каждой базовой волны в расчетной области выполнено CFD-моделирование её развития от начала ($t = 0$) до обрушения. При этом установлено, что высота базовой волны за время её развития дважды достигает максимальных значений.

На втором этапе для каждой базовой волны был вычислен масштабирующий коэффициент в соответствии с выражением $m = H_w / H_{b2}$, где H_w — высота «волны-убийцы», принятая равной 30 м; H_{b2} — высота второго максимума базовой волны. Затем параметры каждой базовой волны (a_b, λ_b, x_b) умножались на соответствующий масштабирующий коэффициент, в результате были получены значения начальной амплитуды a_r , длины λ_r центральной волны и начального положения x_r центрального максимума «волн-убийц», которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры базовых волн и «волн-убийц»

Базовые волны						m	«Волны-убийцы»			
a_b , м	λ_b , м	x_b , м	H_b , м	S_b	H_{b2} , м		a_r , м	λ_r , м	x_r , м	S_m
8	100	100	15,5	0,49	17,2	1,74	13,92	174	174	0,54
9	100	100	17,2	0,54	20,1	1,49	13,41	149	149	0,63

Таблица 1
(Окончание)

10	100	100	18,8	0,59	21,7	1,38	13,80	138	138	0,68
11	100	100	20,5	0,64	23,1	1,30	14,30	130	130	0,73
12	100	100	22,0	0,69	24,9	1,20	14,40	120	120	0,78

Примечания:

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

$S_m = 30\pi / \lambda_r$ — максимальная крутизна «волны-убийцы» в момент достижения высоты 30 м.

При этом установлено, что масштабирование обеспечивает геометрическое подобие профилей базовых волн и соответствующих им «волн-убийц». Отсюда следует совпадение начальной крутизны базовых волн с начальной крутизной соответствующих «волн-убийц». Полученные параметры a_r , λ_r , x_r были использованы в выражении (3) вместо a_b , λ_b , x_b , что обеспечило получение соответствующего пространственного спектра комплексных амплитуд (4) и скорости втекающей жидкости в выражениях (5), (6) и, в конечном итоге, формирование в расчетной области «волн-убийц» высотой $30 \pm 0,1$ м.

Выражения (1) и (2), дополненные описаниями методов решения, граничных условий, технологии выбора и формирования массива «волн-убийц», представляют собой модель системы «контур морского судна — «волна-убийца»».

При проведении данного исследования из всего многообразия морских судов выбраны рыбопромысловые суда [10] (табл. 2), которые по роду своей деятельности в течение длительного периода времени пребывают в штормовых условиях, что повышает вероятность их встречи с «волнами-убийцами». Значения начальных метацентрических высот выбраны в соответствии с рекомендациями для рыбопромысловых судов [11].

Таблица 2

Тип, водоизмещение рыбопромысловых судов и параметры их контуров

Тип и водоизмещение судов, т	Параметры контуров					
	Ширина, м	Высота, м	Осадка, м	Масса, кг	Момент инерции, кг·м ²	Значения начальных метацентрических высот, м
СРТМ тип «Иван Шаньков», 1389	11,0	7,3	5,2	56100	670767	0,5; 0,75; 1,0
БМРТ тип «Иван Бочков», 4947	15,9	10,0	5,66	88277	2718078	0,75; 1,0; 1,25
РТМКС тип «Моонзунд», 9260	19,0	12,2	6,60	123683	5693432	0,75; 1,0; 1,25

Численное исследование параметрической области опрокидывания контура и анализ результатов

Численное моделирование выполнено в расчетной области со следующими геометрическими размерами: длина — $5\lambda_r$; высота — $0,75\lambda_r$; глубина воды — $0,5\lambda_r$, что соответствует условию глубокой воды. Сеточное разбиение выполнено элементами со стороной 0,5 м. Плотность воды выбрана равной 1027 кг/м^3 ; ускорение свободного падения — $9,81 \text{ м/с}^2$.

На рис. 2 показана временная последовательность фрагментов вычисленных профилей «волны-убийцы» с длиной центральной волны 138 м. «Волны-убийцы» (см. табл. 1) имеют аналогичную последовательность и форму профилей, но различные значения относительных абсцисс

$\xi_2 - \xi_5$, вычисляемых в соответствии с выражением $\xi_i = \Delta x_i / \lambda_r$, где Δx_i — расстояние до абсциссы соответствующего профиля «волны-убийцы», $i = 2 \dots 5$ — номера профилей (см. рис. 2), λ_r — длина центральной волны.

Ранее отмечалось, что вычисление коэффициента масштабирования выполнено по отношению ко второму максимуму каждой базовой волны, что вполне оправдано, так как максимальная скорость воды в профиле второго максимума в 1,5 раза превышает аналогичную скорость воды в профиле первого максимума.

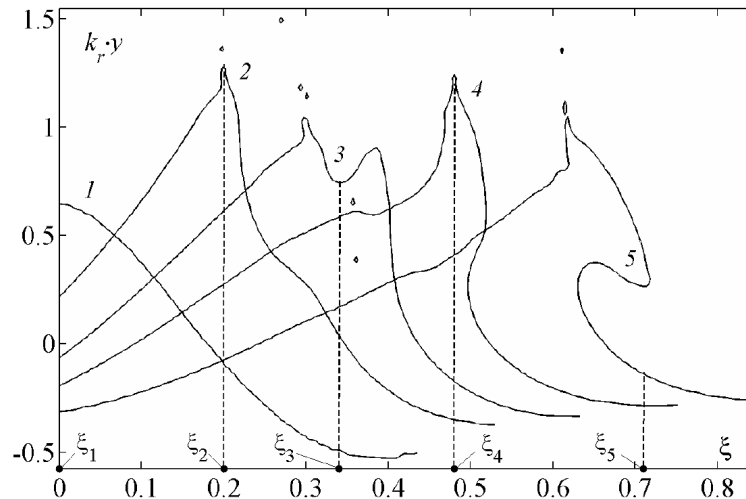


Рис. 2. Временная последовательность фрагментов профилей «волны-убийцы». Относительные значения абсцисс положений профилей: ξ_1 — начального профиля 1; ξ_2 — профиля с первым максимумом 2 высоты; ξ_3 — «двугорбого» профиля 3; ξ_4 — профиля со вторым максимумом 4 высоты;

ξ_5 — поверхности воды под зарождающимся ныряющим буруном 5; $k_r = 2\pi/\lambda_r$ — волновое число, λ_r — длина центральной волны; y — ордината в системе координат oxy

Вариация параметров обеспечена при использовании «волн-убийц» с различной длиной центральных волн (см. табл. 1); контуров с различной массой и начальной метацентрической высотой (см. табл. 2), а также выбором одной из относительных абсцисс профилей (см. рис. 1 — относительные абсциссы $\xi_2 - \xi_5$ профилей) в качестве начального удаления контура от «волны-убийцы», что обеспечило вариацию времени опрокидывающего воздействия «волны-убийцы» при изменении начального удаления контура.

Результаты вычислений для каждого из контуров собраны в матрицу, строки которой соответствуют крутизне S_m (см. табл. 2) «волны-убийцы», столбцы — значениям относительных абсцисс $\xi_2 - \xi_5$. Для наглядности результаты по каждому контуру представлены в виде геометрической интерпретации матрицы (рис. 3 – 5), элементы которой обозначены точками на сетке, образованной пересечением строк и столбцов. На указанную сетку наложены три многоугольника, на границе и внутри каждого из которых находятся элементы матрицы, соответствующие опрокидыванию контура (угол крена контура превышает 80°) с определенным значением начальной метацентрической высоты (см. табл. 2). Таким образом, каждую таблицу характеризуют четыре параметра: масса контура, начальная метацентрическая высота (определяется многоугольником), длина центральной волны и начальное удаление контура от «волны-убийцы» (определяются значениями λ_r и ξ).

Параметрическая область опрокидывания контура (см. рис. 3) с начальной метацентрической высотой 0,5 м ограничена многоугольником $ABCDEFGHIJKL$. Многоугольник $BCDEFGHJKL$ ограничивает параметрическую область опрокидывания контура с начальной метацентрической высотой 0,75 м; многоугольник $BCDEFGHJK$ ограничивает параметрическую область опрокидывания контура с начальной метацентрической высотой 1,0 м. Увеличение метацентрической высоты до 0,75 – 1,0 м исключает опрокидывание контура судна водоизмещением 1389 т первым макси-

мумом ξ_2 «волной-убийцей» (на рис. 3 из параметрической области опрокидывания исключаются точки A и L) с длиной её центральной волны 174 м и 149 м соответственно.

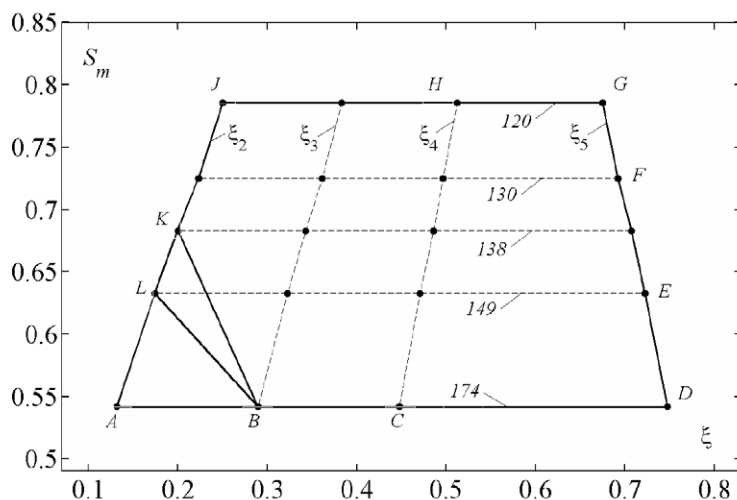


Рис. 3. Параметрическая область опрокидывания контура морского судна водоизмещением 1389 т и начальными метацентрическими высотами 0,5 м и 0,75 м, 1,0 м:
 ξ_2, \dots, ξ_5 — относительные абсциссы начального положения контура;
обозначение строк — 120, ..., 174 м — длины λ_p центральных волн;
 S_m — максимальная крутизна «волны-убийцы» в момент достижения высоты 30 м

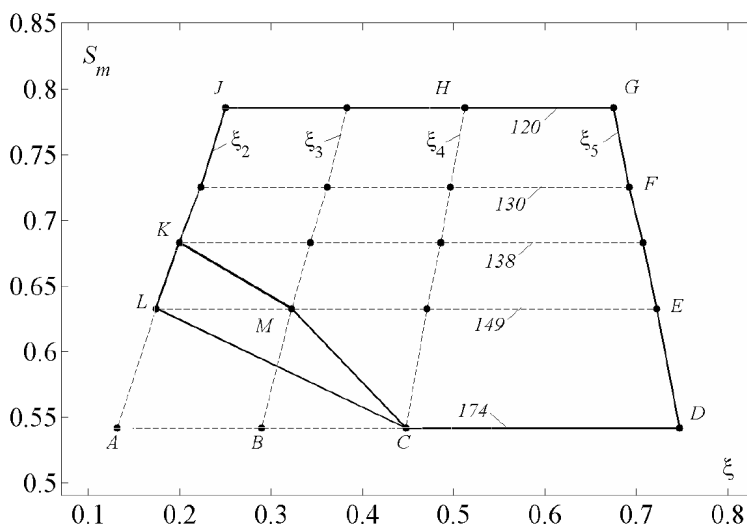


Рис. 4. Параметрическая область опрокидывания контура морского судна водоизмещением 4947 т с начальными метацентрическими высотами 0,75 м, 1,0 м, 1,25 м:
 ξ_2, \dots, ξ_5 — относительные абсциссы начального положения контура;
обозначение строк — 120, ..., 174 м — длины λ_p центральных волн;
 S_m — максимальная крутизна «волны-убийцы» в момент достижения высоты 30 м

Параметрическая область опрокидывания контура (см. рис. 4) с начальной метацентрической высотой 0,75 м ограничена многоугольником $CDEFGHJKL$. Многоугольник $CDEFGHJKM$ ограничивает параметрическую область опрокидывания контура с начальными метацентрическими высотами 1,0 м и 1,25 м. Из анализа параметрических областей следует, что контур судна водоизмещением 4947 т с метацентрической высотой 0,75 м устойчив к опрокидыванию первым ξ_2 максимумом и двугорбым ξ_3 профилем (на рис. 4 из параметрической области опрокидывания исключаются точки A и B) «волной-убийцей» с длиной центральной волны 174 м. Дальнейшее

увеличение метацентрической высоты до 1,0 м и 1,25 м дополнительно исключает опрокидывание контура первым ξ_2 максимумом «волны-убийцы» (на рис. 4 исключается точка L) с длиной центральной волны, равной 149 м.

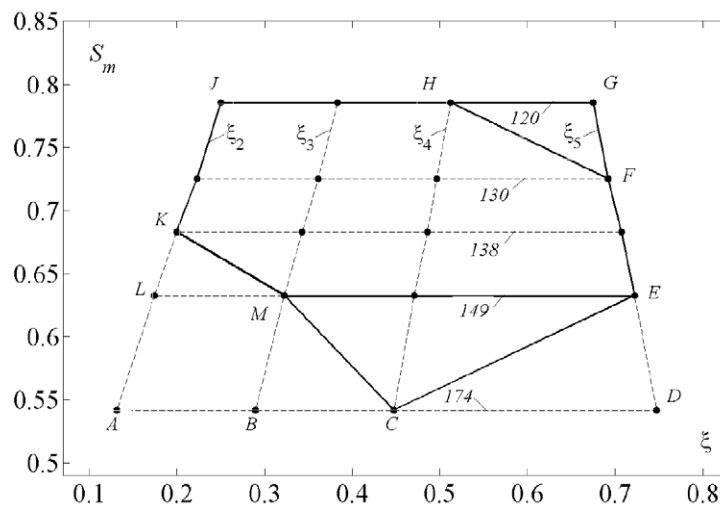


Рис. 5. Параметрическая область опрокидывания контура морского судна водоизмещением 9260 т и начальными метацентрическими высотами 0,75 м, 1,0 м, 1,25 м:

ξ_2, \dots, ξ_5 — относительные абсциссы начального положения контура;
обозначение строк: 120 – 174 м — длины λ_r центральных волн;

S_m — максимальная крутизна «волны-убийцы» в момент достижения высоты 30 м

Параметрическая область опрокидывания контура (см. рис. 5) с начальной метацентрической высотой 0,75 м и 1,0 м ограничена многоугольником $CEFGHJKM$. Многоугольник $KMEFHJ$ ограничивает параметрическую область опрокидывания контура с начальной метацентрической высотой 1,25 м. Из рис. 5 следует, контур судна водоизмещением 9260 т с метацентрическими высотами 0,75 м и 1,0 м устойчив к опрокидыванию первым ξ_2 максимумом (на рис. 5 из параметрической области опрокидывания исключаются точки A, L) «волн-убийц» с длиной центральных волн 174 м и 149 м, двугорбым ξ_3 профилем и ныряющим буруном ξ_5 (на рис. 5 исключаются точки B и D) «волны-убийцы» с длиной центральной волны 174 м. Дальнейшее увеличение метацентрической высоты до 1,25 м дополнительно исключает опрокидывание контура вторым ξ_4 максимумом (на рис. 5 исключается точка C) «волны-убийцы» с длиной центральной волны 174 м, а также ныряющим буруном ξ_5 (на рис. 5 исключается точка G) «волны-убийцы» с длиной центральной волны 120 м, что объясняется кратковременностью воздействия на контур обрушающегося ныряющего буруна.

Причины расширения параметрической области опрокидывания контура:

- уменьшение момента инерции при снижении массы контура;
- снижение сопротивляемости опрокидыванию при уменьшении начальной метацентрической высоты контура;
- увеличение времени опрокидывающего воздействия «волны-убийцы» при уменьшении начального удаления контура;
- увеличение крутизны «волны-убийцы» при уменьшении длины её центральной волны.

Таким образом, технология параметрического моделирования в совокупности с моделью системы «контур морского судна — «волна-убийца»», представляет собой параметрическую модель опрокидывания контура морского судна «волнами-убийцами».

Выводы

1. Результаты работы показали, что «волна-убийца» с момента возникновения развивается в течение одного периода и пробегает расстояние, равное длине её центральной волны. Силь-

ные нелинейные преобразования формируют последовательно пять типичных профилей «волн-убийц»: начальный профиль, первый максимум, двугорбый профиль, второй максимум и ныряющий бурун. Процессы внутри параметрической модели опрокидывания контура морского судна «волнами-убийцами» зависят от сочетания четырех параметров: массы контура, начальной метацентрической высоты контура, длины центральной волны, начального удаления контура от «волн-убийцы».

2. Методом вычислительной гидродинамики выполнена оценка параметрических областей опрокидывания контуров морских судов водоизмещением от 1000 до 10000 т с начальными метацентрическими высотами 0,5 – 1,25 м на «волнах-убийцах» длиной 120 – 174 м, при этом выбор начального удаления контуров обеспечивал воздействие на них «волн-убийц» в моменты формирования соответствующих профилей.

3. Каждый из рассмотренных параметров оказывает существенное влияние на опрокидывание контура. Так, устойчивость контуров к опрокидыванию возрастает с увеличением их массы и увеличением начального удаления контура за счет увеличения инерционности и сокращения времени опрокидывающего воздействия «волн-убийцы». Увеличение длины центральной волны снижает опрокидывающие свойства «волн-убийцы» за счет уменьшения её крутизны. Увеличение начальной метацентрической высоты также существенным образом увеличивает сопротивляемость контура судна опрокидыванию «волной-убийцей». Соблюдение этого правила особенно важно для рыбопромысловых судов, которые регулярно принимают на борт тралы и перемещают в трюмах улов, что зачастую вызывает уменьшение метацентрической высоты судна, создающее предпосылки к опрокидыванию судна на морском волнении.

4. Полученные результаты могут быть использованы для разработки мер безопасности при организации рыбного промысла и морских перевозок, а также при проектировании морских судов.

*Результаты получены с использованием оборудования
ЦКП «Дальневосточный вычислительный ресурс» ИАПУ ДВО РАН*

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куркин А. А. «Волны-убийцы»: факты, теория и моделирование / А. А. Куркин, Е. Н. Пелиновский. — Н. Новгород: ННГТУ, 2004. — 158 с.
2. Захаров В. Е. Устойчивость периодических волн конечной амплитуды на поверхности глубокой жидкости / В. Е. Захаров // Журнал прикладной механики и технической физики. — 1968. — Т. 9. — № 2. — С. 86–94.
3. Rosenthal W. Rogue Waves: Results of the MaxWave Project / W. Rosenthal, S. Lehner // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. — 2008. — Vol. 130. — Pp. 1–8.
4. Nikolkina I. Rogue waves in 2006–2010 / I. Nikolkina, I. Didenkulova // Natural hazards and Earth system sciences. — 2011. — Vol. 11. — Pp. 2913–2924.
5. Minami M. Study of ship responses and wave loads in the freak wave / M. Minami, H. Sawada, K. Tanizawa // The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference. — San Francisco: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2006. — Pp. 272–278.
6. Buca M. P. Nonlinear Ship Rolling and Capsizing / M. P. Buca, I. Senjanovic // Brodogradnja. — 2006. — № 4 (57). — Pp. 321–331.
7. Ferziger J. H. Computational Methods for Fluid Dynamics / J. H. Ferziger. — Berlin: Springer, 2002. — 431 p.
8. Yakhot V. Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic theory / V. Yakhot, S.A. Orszag // Journal of scientific computing. — 1986. — Vol. 1. — N. 1. — Pp. 3–51.
9. Fonseca N. Structural loads induced in a containership by abnormal wave conditions / N. Fonseca, C. Soares, R. Pascoal // Journal of marine science and technology. — 2006. — Vol. 11. — N. 4. — P. 245–259.
10. Флот рыбной промышленности: справочник типовых судов. — М.: Транспорт, 1990. — 381 с.
11. Кулагин В. Д. Теория и устройство морских промысловых судов / В. Д. Кулагин. — Л.: Судостроение, 1974. — 440 с.

ESTIMATION OF PARAMETRIC RANGE OF CAPSIZING OF SEAGOING VESSEL CONTOUR IN “ROGUE WAVE”

On the basis of computational fluid dynamics has been created a virtual model of basin and calculation of capsizing marine vessel contour was performed. The type and parameters of the “rogue wave” with one central maximum height of 30 meters and two side elevations was substantiated. Initial and boundary conditions to ensure the generation of “rogue waves” in the computational domain and capsizing of contour have been formulated. Registration of the calculated parameters of the contour motion was executed at each step of solver. The main parameters that affect the stability of the contour in “rogue wave” were listed. There are: mass of the contour, its initial metacentric height, length of the “rogue wave” and the initial distance from the contour to the “rogue wave”. For all combinations of these parameters heeling angles of contours were calculated and parametric regions corresponding to the contour capsizing was formed. Reduction of the contour mass, its initial metacentric height, initial distance from contour to the “rogue wave” and its wavelength makes contribution to the capsizing of contour. These results can be used in the design of ships and to develop measures to ensure the marine safety.

Keywords: “rogue wave”, computational fluid dynamics, contour of the vessel, capsizing of the contour, metacentric height of the contour, heeling angle.

REFERENCES

1. Kurkin, A. A., and E. N. Pelinovskij. “Volny-ubijcy”: fakty, teorija i modelirovanie. N. Novgorod: NNGTU, 2004.
2. Zaharov, V. E. “Ustojchivost periodicheskikh voln konechnoj amplitudy na poverhnosti glubokoj zhidkosti.” *Zhurnal prikladnoj mekhaniki i tekhnicheskoy fiziki* 9.2 (1968): 86–94.
3. Rosenthal, W., and S. Lehner. “Rogue Waves: Results of the MaxWave Project.” *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 130 (2008): 1–8.
4. Nikolchina, I., and I. Didenkulova. “Rogue waves in 2006–2010.” *Natural hazards and Earth system sciences* 11 (2011): 2913–2924.
5. Minami, M., H. Sawada, and K. Tanizawa. “Study of ship responses and wave loads in the freak wave.” *The Sixteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*. San Francisco: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2006: 272–278.
6. Buca, M. P., and I. Senjanovic. “Nonlinear Ship Rolling and Capsizing.” *Brodogradnja* 4(57) (2006): 321–331.
7. Ferziger, J. H. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer, 2002.
8. Yakhot, V., and S.A. Orszag. “Renormalization Group Analysis of Turbulence. I. Basic theory.” *Journal of scientific computing* 1.1 (1986): 3–51.
9. Fonseca, N., C. Soares, and R. Pascoal. “Structural loads induced in a containership by abnormal wave conditions.” *Journal of marine science and technology* 11.4 (2006): 245–259.
10. *Flot rybnoj promyshlennosti. Spravochnik tipovyh sudov*. M.: Transport, 1990.
11. Kulagin, V. D. *Teoriya i ustrojstvo morskikh promyslovyh sudov*. L.: Sudostroenie, 1974.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Дорожко Вениамин Мефодьевич —
кандидат физико-математических наук.
ИАПУ ДВО РАН
veniamin_dorozhko@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Dorozhko Veniamin Mefod'evich — PhD.
Institute of automation and control processes
of Far Eastern Branch of RAS
veniamin_dorozhko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 декабря 2015 г.