

Научная статья  
УДК: 656.6.08, 519.71  
DOI 10.46845/1997-3071-2022-67-101-112

**Поведение судна в экстремальных ситуациях на волнении –  
интеграция в бортовой интеллектуальной системе нового поколения**

**Виталий Александрович Бондарев<sup>1</sup>, Изумруд Рамазановна Рагулина<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Калининградский государственный университет, г. Калининград, Россия

<sup>1</sup>va.bondarev@gmail.com

<sup>2</sup>izragulina@mail.ru

**Аннотация.** Проблемы моделирования поведения судна вообще и в критических ситуациях на волнении, в частности, являются предметом дискуссий на международных конференциях по безопасности мореплавания уже много лет. Именно при исследовании частных случаев, подтвержденных практикой, проявляются критические ситуации бифуркационного характера, о которых проектировщики судов, особенно большого водоизмещения, даже не подозревали. По информации, полученной при испытаниях самоходных радиоуправляемых моделей на естественном волнении, проведенных в бухте Сан-Франциско, выполнено моделирование остойчивости. Представлены три характерных случая опрокидывания: полная потеря остойчивости, резонансные режимы и брочинг. Практический интерес при интерпретации поведения судна представляют особенности крена и опрокидывания при полной потере остойчивости и заданном уровне нестационарных внешних возмущений. Анализ математической модели взаимодействия позволил установить некоторые общие закономерности изменения процесса динамического наклонения и опрокидывания судна при полной потере остойчивости, а также характеристик эволюционной динамики при построении модели взаимодействия. Дана характеристика особенностей представленных экстремальных ситуаций, и приведен критериальный базис при их нормировании. Установлено, что килевая качка в условиях параметрического резонанса происходит в режиме, близком к основному резонансу. В результате допустимые углы дифферента превышены, и поэтому амплитуда килевой качки достигает существенных величин. Это позволило определить требования к безопасности судна в режиме "брочинг". Они соответствуют известным физическим закономерностям крена и опрокидывания судна, что подтверждено экспериментальными исследованиями. Анализ динамики судна в режиме "брочинг" выявил катастрофическую ситуацию, возникающую в случае выхода судна из режима "захвата" и попадания его в "потенциальную яму", в состоянии полной потери остойчивости.

**Ключевые слова:** экстремальная ситуация, поведение судна, волнение, режимы качки, брочинг, бортовая интеллектуальная система.

**Для цитирования:** Бондарев В. А., Рагулина И. Р. Поведение судна в экстремальных ситуациях на волнении – интеграция в бортовой интеллектуальной системе нового поколения // Известия КГТУ. 2022. № 67. С. 101–112. DOI: 10.46845/1997-3071-2022-67-101-112.

Original article

## Vessel behavior in extreme situations in waves - integration in the new generation on-board intelligent system

Vitaliy A. Bondarev<sup>1</sup>, Izumrud R. Ragulina<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia

<sup>1</sup>va.bondarev@gmail.com,

<sup>2</sup>izragulina@mail.ru

**Abstract.** The issues of modeling vessel behavior in general and in particular, in critical situations in waves, have been the subject of discussions at international conferences on the safety of navigation for many years. It is in the study of particular cases, confirmed by practice, that critical situations of a bifurcation nature appear (which the designers of ships, especially of large displacement, do not even suspect). The paper considers modeling of stability in waves on the data of tests of self-propelled radio-controlled models in natural waves, carried out in the San Francisco Bay. Three typical rollover cases have been identified: complete loss of stability, resonance modes, and broaching. Of practical interest in interpreting the behavior of a vessel are the features of roll and overturning with a complete loss of stability and a given level of unsteady external disturbances. The analysis of the mathematical model of interaction has made it possible to establish some general patterns of change in the process of dynamic inclination and capsizing of the vessel with a complete loss of stability, as well as the characteristics of evolutionary dynamics when building a model of interaction. Characteristics of the features of the presented extreme situations are given together with the criterial basis for their normalization. It has been found that pitching under conditions of parametric resonance occurs in a mode close to the main resonance. Therefore, the pitching amplitude under intense external disturbances can also reach significant values exceeding the permissible trim angles. As a result of the analysis, the requirements for the safety of the vessel in the "broaching" mode have been formulated. These requirements are determined by the physical laws of the ship's roll and capsizing, established on the basis of experimental studies. The analysis of the dynamics of the vessel in the "broaching" mode revealed a catastrophic situation arising in the case of a ship leaving the "capture" mode and falling into a "potential hole", into a state of complete loss of stability.

**Keywords:** extreme situation, vessel behavior, waves, pitching modes, broaching, onboard intelligent system

**For citation:** Bondarev V. A., Ragulina I. R. Vessel behavior in extreme situations in waves – integration in the new generation on-board intelligent system. *Izvestiya KGTU = KSTU News*. 2022; (67):101–112. (In Russ). DOI: 10.46845/1997-3071-2022-67-101-112.

## ВВЕДЕНИЕ

На международных конференциях по безопасности мореплавания особым предметом обсуждения уже в течение ряда лет является авария американского контейнеровоза [1]. По результатам анализа произошедшего явление параметрического резонанса подверглось детальному изучению, особенно

параметрических колебаний (проектировщики контейнеровоза это явление не учитывали).

Физическое и математическое моделирование трех характерных случаев – полной потери остойчивости, резонансных режимов и брочинга – позволяет получить полную физическую картину явлений и установить характеристики эволюционной динамики взаимодействия судна с экстремальной средой.

Резкое ухудшение остойчивости на попутном волнении связано с уменьшением восстанавливающего момента и снижением сопротивляемости судна внешним кренящим нагрузкам. Анализ этого явления проведен в разделе "Полная потеря остойчивости". Аналитическая и геометрическая интерпретации параметрического резонанса при воздействии пакетов экстремальных волн позволяют выполнить полный анализ и дать теоретическое обоснование явлению.

Рассматриваемая чрезвычайная ситуация брочинга в нестационарной среде – одна из сложных моделей взаимодействия судна с внешней средой [2, 3]. В процессе неуправляемой эволюции судна в режиме "брочинг" происходят возникновение и непрерывный рост кренящего момента от разворота. В статье приводятся результаты физического моделирования, аналитическая и геометрическая интерпретации брочинга, а также когнитивное моделирование самоорганизующихся систем с применением иерархической когнитивной карты (ИКК). Замечательная особенность ИКК состоит в том, что с помощью такого представления можно моделировать разнообразные ситуации в интерпретируемых системах.

*Статья посвящена памяти учителя – доктора технических наук, профессора Юрия Ивановича Нечаева.*

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### Полная потеря остойчивости

Закономерности изменения восстанавливающего момента при прохождении волны вдоль судна в значительной степени обусловлены конфигурацией ватерлинии, изменением давлений в волнующейся жидкости и гидродинамическими явлениями, связанными с интерференцией и дифракцией волн [2, 3].

**Опрокидывающий момент.** Анализ математической модели взаимодействия позволил установить некоторые общие закономерности изменения процесса динамического наклонения и опрокидывания судна при полной потере остойчивости, а также характеристик эволюционной динамики при построении модели взаимодействия. Опрокидывающий момент в ситуации полной потери остойчивости определяется при равенстве работ кренящего, восстанавливающего и демпфирующего моментов:

$$\int_0^{\theta_d} M_x(t) dt = \int_0^{\theta_d} M(\theta, t) d\theta + W_R \int_0^{\theta_d} \dot{\theta}^2 \operatorname{sign} \dot{\theta} d\theta, \quad (1)$$

где  $W_R$  – квадратичный коэффициент демпфирования;  $\theta_d$  – максимальный динамический угол крена.

Этому условию соответствует равенство нулю угловой скорости и ускорения:

$$\theta = \theta_0 \text{ при } M_x(t) = M_c, \theta'' = \theta' = 0. \quad (2)$$

Изменение опрокидывающего момента в зависимости от фазы для судна, движущегося на попутном волнении с различными числами Фруда, представлено на рис. 1 в виде кривых:

$$M = M_c / (M_c)_{mid} = f(\varepsilon_0, Fr), \quad (3)$$

где  $(M_c)_{mid} = 0,5 [(M_c)_{min} + (M_c)_{max}]$  – среднее значение опрокидывающего момента на попутном волнении;  $(M_c)_{min}$  и  $(M_c)_{max}$  – значения опрокидывающего момента при положении судна на вершине и подошве волны.

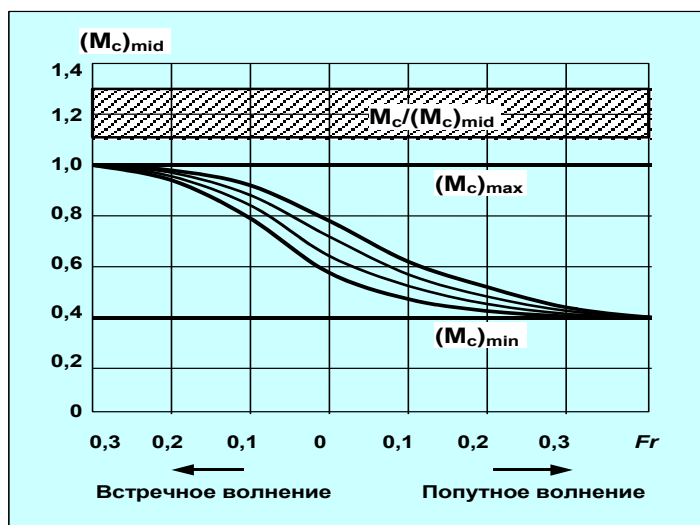


Рис. 1. Опрокидывающий момент при оценке полной потери устойчивости [3]  
 Fig. 1. Overturning moment when evaluating the total loss of stability [3]

Экспериментальные исследования показывают, что в зависимости от характера колебательного движения время опрокидывания  $\tau_0$  составляет приблизительно от 0,6 до нескольких периодов собственных колебаний судна. Приближенную оценку времени опрокидывания в первом размахе можно произвести, используя следующую схему [2, 3]. Задавая определенный закон изменения кренящего момента и интегрируя уравнение бортовых колебаний судна, получаем:

$$\tau_0 = \sqrt{\frac{1}{2}(J_x + \mu_{\theta\theta})} \int_{\theta_0}^{\theta_d} \frac{d\theta}{\sqrt{T_x(t) - T(\theta, t) - T_R(\theta')}} \quad (4)$$

где  $\theta_d$  – угол крена, удовлетворяющий равенству работ  $T_x(t) = T(\theta, t) + T_R(\theta')$ , которому соответствует условие  $\theta'' = \theta' = 0$ ;  $\theta_0$  – начальная амплитуда качки;  $T_x(t)$ ,  $T(\theta, t)$ ,  $T_R(\theta')$  – значения работ кренящего, восстанавливающего и демпфирующего моментов.

Выводы относительно характера динамического наклонения судна справедливы в том случае, когда результирующий кренящий момент близок к опрокидывающему. По мере роста внешней нагрузки кренящий момент  $M_x$  оказывается больше опрокидывающего  $M_c$ . В результате потеря устойчивости в первом размахе наступает при других начальных условиях. Численный эксперимент показыва-

ет, что снижение  $\tau_0$  в первом размахе происходит приблизительно пропорционально увеличению отношения  $M_x/M_c$  в соответствии с выражением:

$$\tau_0 / \tau_\theta = 0,6 - 0,5 [M_x / M_c - 1,1] \quad (5)$$

в диапазоне  $M_x/M_c = 1,1 - 1,6$ , где  $\tau_\theta$  – собственный период бортовых колебаний.

На рис. 2 отображены следующие структуры: бифуркационного множества со сборкой в точке  $P_1$  (касательная к фигуре  $GZ_1(\theta)$ , темная область – результат трансформации исходной области  $GZ(\theta)$ ), реализующие ситуацию полной потери устойчивости (динамическая модель современной теории катастроф (СТК) [4]).

Кривая  $C(\theta)$  характеризует изменение подводной части корпуса судна вследствие непрерывного изменения действующей ватерлинии при влиянии волновых возмущений.

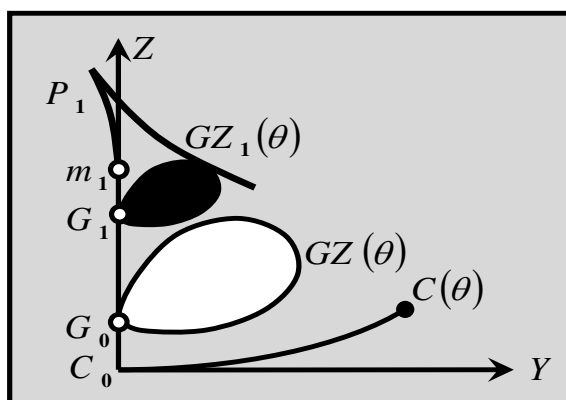


Рис. 2. Динамическая модель СТК при полной потере устойчивости [4]  
 Fig. 2. Dynamic model of the MDT with complete loss of stability [4]

**Критериальный базис** оценки полной потери устойчивости предусматривает использование требований к динамической устойчивости и метацентрической высоте при прохождении гребня волны через мидель судна [2]:

$$M_c \geq M_w; h_w \geq 0,$$

(6)

где  $M_c = [(M_c)_{\min} + \Delta M_c] k(\theta)_w$  – опрокидывающий момент;

$$\Delta M_c = (\Delta M_c)^* [(M_c)_{\text{mid}} - (M_c)_{\min}]; \quad (7)$$

$$(\Delta M_c)^* = k_1 \Delta(Fr)_w + k_2 \Delta(Fr)_w^2 - k_3 \Delta(Fr)_w^3; \quad (8)$$

$k_1 = 0,27$ ;  $k_2 = 8,13$ ;  $k_3 = 11,04$ ;  $\Delta(Fr)_w = 0,40 - Fr$ ;  
 $(M_c)_{\text{mid}} = 0,5 [(M_c)_{\max} + (M_c)_{\min}]$ ;  $(M_c)_{\min}$  и  $(M_c)_{\max}$  – опрокидывающий момент на вершине и подошве волны, определенные при длине волны  $\lambda$ , равной длине судна  $L$ , и крутизне  $h_w = 0,328\lambda^{0,63}$ ;  $k(\theta)_w = 0,75$  – коэффициент, учитывающий нормируемое значение амплитуды бортовой качки;  $M_w = 0,6 \times 10^{-3} p_w A_w z$  – кренящий момент;  $p_w$  – давление ветра, определенное по Правилам Морского регистра судоходства;  $A_w$  – площадь парусности,  $m^2$ ;  $z$  – отстояние центра тяжести площади парусности от действующей ватерлинии;  $h_w$  – начальная метацентрическая высота при положении судна на вершине волны, определенная по формуле:

$$\begin{aligned}
 h_w = & -BF_1(\lambda / L(-0,575 h_w / L = 0,0115 X_1 - \\
 & - 0,02001 X_2 + 0,0980 X_3 + 0,0229 X_4 + 0,1100 X_5 + \\
 & + a_6 X_6 + 0,0023 X_1^2 - 0,0064 X_2^2 + 0,0712 X_3^2 - \\
 & - 0,0297 X_5^2 - 0,1195 X_6^2 - 0,0265 X_1 X_6 + 0,0078 X_2^3 - \\
 & - 0,0528 X_3^3 - 1,700 X_5^3),
 \end{aligned} \tag{9}$$

где  $a_1 = 0,1610$  при  $Fr > 0,28$ ,  $a_1 = -0,2080$  при  $Fr < 0,28$ ,  $Fr = 0,514Vs/(gL)^{1/2}$ ;

$$\begin{aligned}
 F_1(\lambda / L) &= 1 + 0,87 \lambda^* - 1,2(\lambda^*)^2 - 0,21(\lambda^*)^3; \\
 \lambda^* &= (\lambda / L) - 1; \\
 X_1 &= (L / B) - 4,82; X_2 = (B / T) - 2,67; \\
 X_3 &= (H / T) - 1,30; \\
 X_4 &= (\delta / \beta) - 0,692; X_5 = (\delta / \alpha) - 0,700; \\
 X_6 &= Fr - 0,28.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Кривая  $M = f(\varepsilon_0, Fr)$  сверху отделяет зону опасных кренящих моментов, вызывающих опрокидывание судна. Минимум этой кривой характеризует минимальный опрокидывающий момент  $(M_c)_{min}^*$  при заданных параметрах волнения и числе Фруда. Приведенные на рис. 1 данные отражают воздействие кренящего момента  $M_x(t) = (M_c)_{mid}$ , приводящего к опрокидыванию судна при всех числах Фруда и следующих значениях фазы:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_0 &= \pi / 2 \dots 3 / 2\pi \text{ при } Fr = 0,40; \\
 \varepsilon_0 &= \pi / 4 \dots 3 / 2\pi \text{ при } Fr = 0,32; \\
 \varepsilon_0 &= 0 \dots 2\pi \text{ при } Fr = 0,16.
 \end{aligned} \tag{11}$$

Опрокидывание наступает и при значительно меньших кренящих моментов вплоть до

$$\begin{aligned}
 0,6(M_c)_{mid} \text{ при } Fr = 0,40 \text{ и } \varepsilon = \pi; \\
 0,68(M_c)_{mid} \text{ при } Fr = 0,32 \text{ и } \varepsilon = 4/5\pi; \\
 0,78(M_c)_{mid} \text{ при } Fr = 0,16 \text{ и } \varepsilon = \pi/4.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Систематический анализ зависимости относительного значения опрокидывающего момента для различных типов морских судов показывает, что при постоянном числе Фруда увеличение крутизны волны приводит к более резкому изменению опрокидывающего момента от фазы. Влияние же длины волны при постоянной крутизне значительно слабее. Характерно, что изменение параметров волнения не влияет качественно на картину зависимости опрокидывающего момента от фазы и числа Фруда. Однако с ростом крутизны волны увеличивается разность  $(M_c)_{mid} - (M_c)_{min}$ , и кривая  $(M_c)_{min} = f(Fr)$  становится более крутой. В таких условиях влияние числа Фруда усиливается, и указанные на рис. 1 экстремальные значения опрокидывающего момента будут различаться еще более резко.

### Резонансные режимы качки

Физическая модель взаимодействия судна с внешней средой интерпретируется как возникновение интенсивной бортовой качки вследствие близости частоты возмущения  $\sigma$  к частоте собственных колебаний системы  $\omega$ , т. е.  $\sigma \approx \omega$  (основной резонанс) или  $\sigma \approx 2\omega$  (параметрический резонанс, реальная область соотношения  $\sigma/\omega$  для которого составляет 1,95–2,10). Данные физического моделирования подтверждают, что резонансные режимы развиваются при воздействии пакетов, содержащих до 5–7 резонансных волн.

**Аналитическая интерпретация.** На рис. 3 приведены временные кривые и фазовый портрет движения контейнеровоза на встречном волнении в режиме параметрического резонанса при воздействии волн, структура которых близка к зыби [4]. Амплитуда бортовых колебаний в этой ситуации быстро растет и вследствие влияния нелинейных эффектов стабилизируется и достигает 30 град. Эффект возрастания амплитуды часто наблюдался в практике эксплуатации (при высоких числах Фруда). В случае попадания больших масс воды на палубу судна возможно опрокидывание вследствие возникновения кренящих нагрузок. Развитие опасных колебаний на нерегулярном волнении связано с воздействием пакетов резонансных волн. При этом глубина модуляции параметра при периодической составляющей модифицированного уравнения Матье [2, 4] обусловлена воздействием пакетов волн большой крутизны, а "порог возбуждения" параметрических колебаний легко преодолевается при движении судна на продольном волнении [2].

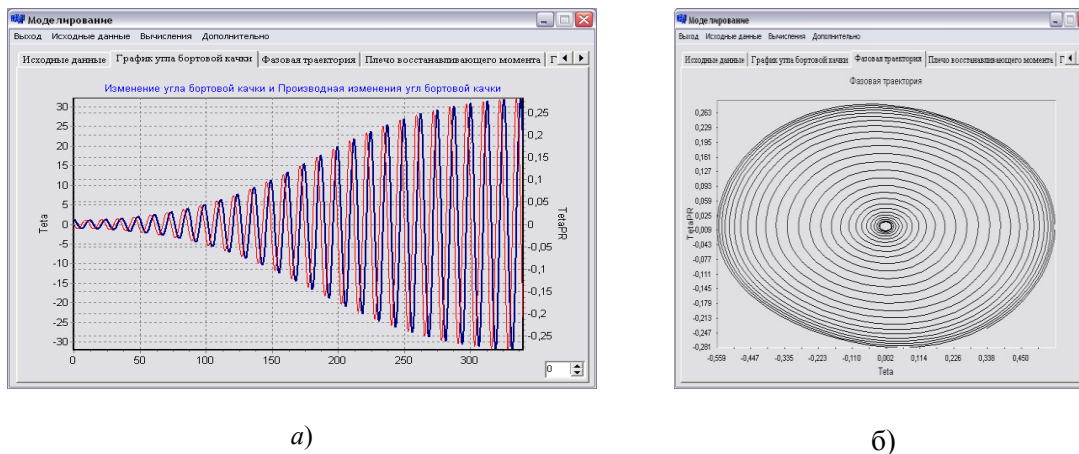
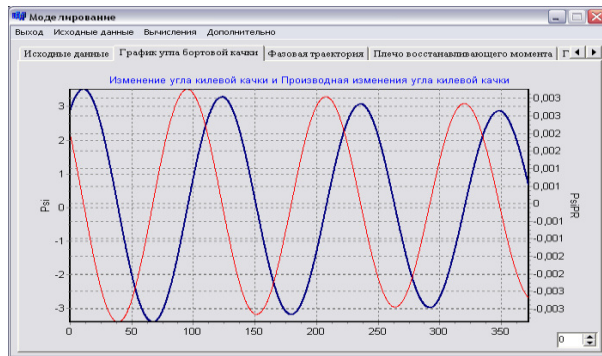


Рис. 3. Временные кривые (а) и фазовый портрет (б) колебаний судна в режиме параметрического резонанса [4]  
Fig. 3. Time curves (a) and phase portrait (b) of vessel oscillations in parametric resonance mode [4]

Колебательные движения судна в условиях резонанса (килевая качка) приведены на рис. 4.



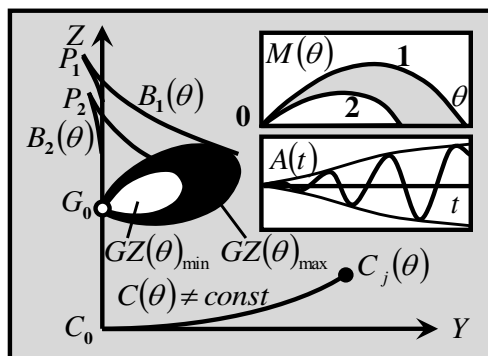
а)

б)

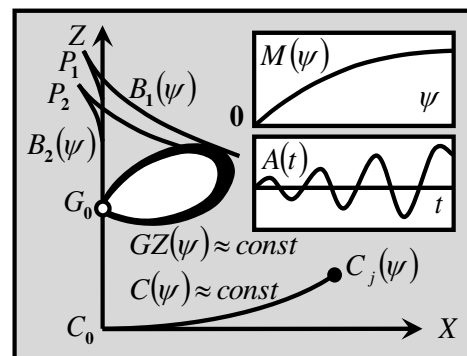
Рис. 4. Режим основного резонанса килевой качки (а) и картина сложных колебаний судна на волнении (б) [4]

Fig. 4. Mode of the main resonance of keel pitching (a) and the picture of complex vibrations of a vessel in waves (b) [4]

**Геометрическая интерпретация.** В процессе вычислительного эксперимента проводилась также имитация динамических картин колебательного движения для исследуемых ситуаций. Результаты моделирования представлены на рис. 5 в виде геометрической и аналитической интерпретации с помощью модифицированной модели катастрофы [4]. Бифуркационные множества  $B(\theta)$ ,  $B(\psi)$  и точка сборки  $P$  показывают пространство катастроф. Для отображения катастрофы исследуемого судна рассмотрены существенные черты: последовательность пространств ( $R^2 \supseteq R^1 \supseteq R^0$ ) и бифуркационное множество  $B$ .



а)



б)

Рис. 5. Геометрическая интерпретация режимов бортовой (а) и килевой (б) качки при основном резонансе [4]

Fig. 5. Geometric interpretation of the roll (a) and keel pitching (b) modes at the main resonance [4]

На рис. 5 а показаны граничные кривые  $B_1(\theta)$ ,  $B_2(\theta)$  и соответствующие точки складки  $P_1(\theta)$  и  $P_2(\theta)$ .

Графическая интерпретация катастроф сборки на рис. 5 а для аналитической интерпретации ситуации дополняется кривыми  $M(\theta)$  и  $A(\theta)$ , первая из которых характеризует области изменения восстанавливающего момента (показана темным

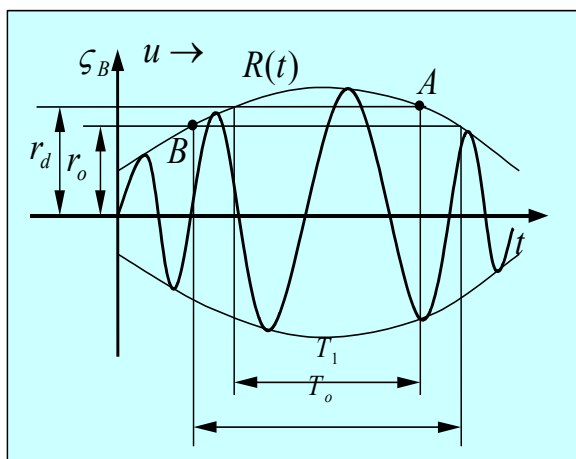


цветом), а вторая – кривую развития колебательного движения в момент прохождения пакета резонансных волн с соотношением частот  $\sigma_k = (0,8 - 1,2)\omega_0$ , где  $\sigma_k = 2\pi/\tau_k$  – "кажущаяся" частота;  $\tau_k = \lambda/(C - V \cdot \cos\varphi)$  – "кажущийся" период, вычисленный при обработке измерительной информации;  $C = 1,25(\lambda)^{1/2}$  – скорость бега волны;  $V$  – скорость судна. В случае возникновения параметрического резонанса (частотное соотношение  $\sigma_k = (1,95-2,10)\omega_0$ ) геометрическая интерпретация ситуации сохраняется с той лишь разницей, что кривая  $A(\theta)$  будет иметь различный вид в зависимости от особенностей структуры воздействующего пакета волн.

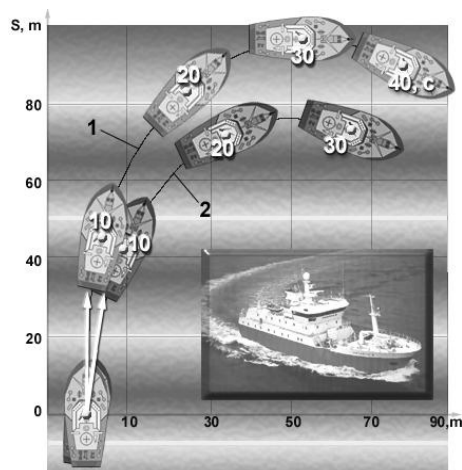
Бифуркационное множество отражает процесс стабильного положения множества  $C(\theta)$ , что объясняется малыми структурными изменениями в форме подводной части корпуса (указаны заштрихованной областью), которые практически не повлияли на построение кривой продольного метacentра – бифуркационного множества  $B(\psi)$  и положения точки  $P(\psi)$ . Графическая интерпретация катастроф сборки на рис. 5 б дополняется кривыми  $M(\psi)$  и  $A(\psi)$ , первая из которых характеризует изменения продольного восстанавливающего момента, а вторая – кривую развития колебательного движения при килевой качке в момент прохождения пакета резонансных волн с соотношением частот  $\sigma_k = (0,8-1,2)\omega_\psi$ , где  $\omega_\psi$  – собственная частота килевой качки.

### Ситуация "бродчинг" в нестационарной среде

Рассматриваемая чрезвычайная ситуация – одна из сложных моделей взаимодействия судна с внешней средой, которая получила название "бродчинг" [2, 3, 6, 7]. В процессе неуправляемой эволюции судна в режиме "бродчинг" происходит возникновение и непрерывный рост кренящего момента от разворота (рис. 6).



а)



б)

Рис. 6. "Захват" и неуправляемый разворот судна при воздействии группы нерегулярных волн: а и б – реализация "захвата" и выход из этого состояния [5]

Fig. 6. "Capture" and uncontrolled turn of the vessel when exposed to a group of irregular waves: a and b – implementation of "capture" and exit from this state [5]

**Физическая модель.** Ситуация "бродчинг" включает три стадии развития. Первая стадия – "захват" судна попутной волной (рис. 6 а). Вторая – выход судна из состояния "захвата" и внезапный разворот до положения, близкого к ориентации лагом к набегающему волнению. Третья стадия – сильная качка в результате разворота при положении лагом к волнению (рис. 6 б).

В заключительной стадии бродчинга угловая скорость и угол дрейфа подвержены значительным колебаниям, а скорость судна весьма отличается от скорости бега волн. Резкий разворот приводит к возникновению сильной бортовой качки, а в отдельных случаях — к опрокидыванию судна при положении лагом к набегающему волнению. Анализ и прогноз динамики судна в режиме "бродчинг" представляют одно из важных приложений методов СТК, поскольку в случае выхода судна из режима "захвата" оно оказывается в "потенциальной яме" в состоянии *полной потери остойчивости* [4, 5].

**Аналитическая интерпретация.** Исследование проведено на базе математической модели [4]. На рис. 7 представлены динамические картины изменения характеристики "захвата" и картина разворота судна в режиме "бродчинг".

Здесь на верхнем графике показан пакет волн, проходящих во время контроля экстремальной ситуации, а на нижнем – кривые динамического наклона судна на основе двух разных представлений восстанавливающего момента: в виде нелинейной функции  $M(\theta) = D(h_0\theta - a\theta^3)$  (пологая кривая) и в виде нелинейной пространственной функции  $M(\theta, \varphi, t)$  (кривая с явно выраженным колебательным движением). Из сопоставления этих кривых следует, что принятая при обычных расчетах аппроксимация нелинейной функции в виде кубической параболы приводит к существенной погрешности результатов расчета, причем эта погрешность будет в опасную сторону, что недопустимо при оценке остойчивости как важнейшего мореходного качества.

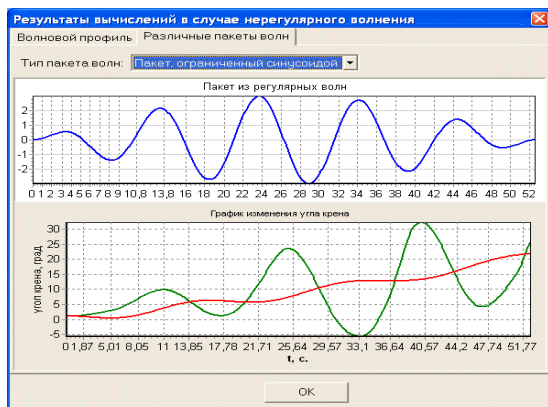


Рис. 7. Результаты моделирования динамики бортовых наклонов судна во время прохождения пакета волн  
 Fig. 7. Results of modeling the dynamics of the ships board inclinations during the passage of a wave packet [5]

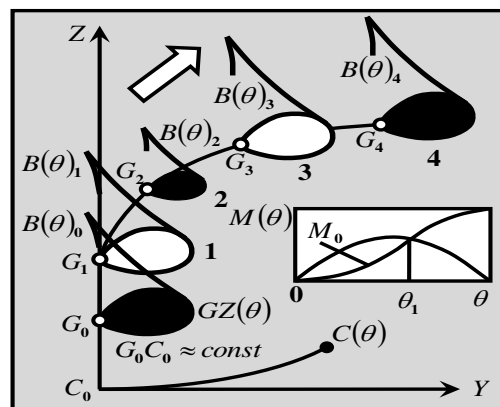


Рис. 8. Графическая интерпретация ситуации "бродчинг"  
 Fig. 8. Graphic interpretation of the "broaching" situation [6]

**Геометрическая интерпретация.** Геометрическая интерпретация рассматриваемой экстремальной ситуации представлена на рис. 8. На нем отображена эволюция движения судна на плоскости  $YZ$ , где расстояние по вертикали между точками  $G_i$  и  $C_{0i}$  сохраняется постоянным (перемещение системы координат  $Y0Z$  на рисунке не показано).

Неуправляемая эволюция судна приводит к росту динамического кренящего момента от разворота, его величина может достигать существенных значений. Для обеспечения безопасности судна необходимо, чтобы действующий кренящий момент не превосходил величины опрокидывающего на волнении. За счет снижения скорости возможно обеспечить выход судна из этой ситуации. В нормативных правовых актах отражена последовательность действий для обеспечения безопасности судна. Замечание: снижение скорости может привести к возникновению параметрического резонанса.

## ВЫВОДЫ

Систематический анализ зависимости относительного значения опрокидывающего момента для различных типов морских судов показывает, что при постоянном числе Фруда увеличение крутизны волны приводит к более резкому изменению опрокидывающего момента от фазы. Влияние же длины волны при постоянной крутизне значительно слабее.

Характерно, что изменение параметров волнения не влияет качественно на картину зависимости опрокидывающего момента от фазы и числа Фруда. Килевая качка при данных условиях наступает в режиме основного резонанса.

Эффект резкого возрастания амплитуды в режиме параметрического резонанса неоднократно наблюдался в практике эксплуатации контейнеровоза, особенно при достаточно высоких числах Фруда. В случае попадания больших масс воды на палубу судна возможно опрокидывание вследствие возникновения кренящих нагрузок. Развитие опасных колебаний на нерегулярном волнении связано с воздействием пакетов резонансных волн.

Для явления "брочинг" наиболее опасна его финальная стадия, при которой скорость судна весьма отличается от скорости волн. Резкий разворот в отдельных случаях может привести к его опрокидыванию при положении лагом к волне. Анализ и прогноз динамики судна в режиме "брочинг" являются одним из важнейших методов современной теории катастроф, поскольку в случае выхода судна из режима "захвата" оно оказывается в "потенциальной яме" в состоянии *полной потери остойчивости*.

## Список источников

1. France W., Levadou M., Treakle T. W., Paulling J. R., Michel R. K., Moore K. An investigation of head-sea parametric rolling and its Influence on Container Lashing Systems. SNAME Annual Meeting 2001 Presentation, pp. 1–24.
2. Нечаев Ю. И. Остойчивость судов на попутном волнении. Ленинград: Судостроение, 1978. 272 с.
3. Нечаев Ю. И. Моделирование остойчивости на волнении. Современные тенденции. Ленинград: Судостроение, 1989. 240 с.

4. Нечаев Ю. И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
5. Нечаев Ю. И. Компьютерная математика: теория и приложения. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2019. 368 с.

### References

1. France W., Levadou M., Treakle T. W., Paulling J. R., Michel R. K., Moore K. An investigation of head-sea parametric rolling and its Influence on Container Lashing Systems. SNAME Annual Meeting 2001 Presentation, pp. 1–24.
2. Nechaev Yu. I. *Ostoychivost' sudov na poputnom volnenii* [Stability of vessels on a passing sea waves]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978, 272 p.
3. Nechaev Yu. I. *Modelirovanie ostoychivosti na volnenii. Sovremennye tendentsii* [Modeling of stability in waves. Modern tendencies]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1989, 240 p.
4. Nechaev Yu. I. *Teoriya katastrof: sovremennyy podkhod pri prinyatii resheniy* [Disaster theory: a modern approach to decision making]. Saint-Petersburg, Art-Ekspress Publ., 2011, 392 p.
5. Nechaev Yu. I. *Komp'yuternaya matematika: teoriya i prilozheniya* [Computer mathematics: theory and applications]. Saint-Petersburg, Art-Ekspress Publ., 2019, 368 p.

### Информация об авторах

**В. А. Бондарев** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой судовождения и безопасности мореплавания

**И. Р. Рагулина** – кандидат географических наук, доцент кафедры судовождения и безопасности мореплавания

### Information about the authors

**V. A. Bondarev** – PhD in Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Navigation Safety.

**I. R. Ragulina** – PhD in Geographic Sciences, Associate Professor of the Department of Navigation Safety

Статья поступила в редакцию 19.11.2021; одобрена после рецензирования 19.08.2022; принята к публикации 21.09.2022.

The article was submitted 19.11.2021; approved after reviewing 19.08.2022; accepted for publication 21.09.2022.