

<http://dx.doi.org/10.15589/jnn20140305>

УДК 629.5.022

Б 81

## RISK ASSESSMENT OF CROSS STRUCTURE SLAMMING OF HIGH SPEED RO-PAX CATAMARAN AT INITIAL DESIGN STAGE

### ОЦЕНКА РИСКА СЛЕМИНГА СОЕДИНИТЕЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ СКОРОСТНЫХ АВТОПАССАЖИРСКИХ КАТАМАРАНОВ НА НАЧАЛЬНОМ ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

**Oleksandr V. Bondarenko**

[Oleksandr.Bondarenko@nuos.edu.ua](mailto:Oleksandr.Bondarenko@nuos.edu.ua)

ORCID: 0000-0002-6115-1422

**Bui Dui Tkhan**

[bui.duy.thanh@nuos.edu.ua](mailto:bui.duy.thanh@nuos.edu.ua)

ORCID: 0000-0001-7445-2294

**А. В. Бондаренко,**

канд. техн. наук, доц.;

**Буй Дуй Тхань,**

асп.

**National University of Shipbuilding, Mykolayiv**

*Национальный университет кораблестроения, г. Николаев*

**Abstract.** One of the urgent issues of the modern theory of the ship design, in other words the appliance of the risk theory at the initial design stage has been considered. It is shown that accidents occur due to the following main reasons: collision, contact, fire or explosion, grounding or stranding, loss of hull integrity, machinery or electrical failures. For the high speed catamarans, the slamming is the main reason which leads to the loss of vessel hull integrity. Based on the research, the author presents a general method to determine the risk value from the accidents. Also, the scientific publications on the given problem are analyzed. The article also describes the algorithm of the damage probability calculation of the cross structure of the high speed ro-pax catamarans, which is based on the probability of the cross structure slamming and on the probability that the slamming dynamic load is more than the bearing capacity of the cross structure shell plate.

**Keywords:** slamming, risk assessment, probability, catamaran, initial design stage.

**Аннотация.** Представлен способ определения значения риска от аварийных ситуаций, который состоит из двух параметров – стоимости ущерба от аварии и вероятности этого события. Изложен алгоритм расчета риска слеминга соединительной конструкции скоростных автопассажирских катамаранов.

**Ключевые слова:** слеминг, оценка риска, вероятность, катамаран, начальный этап проектирования.

**Анотація.** Представлено спосіб визначення ризику від аварійних ситуацій, який складається з двох параметрів – вартості збитку від аварії та ймовірності цієї події. Викладено алгоритм розрахунку ризику слемінга з'єднувальної конструкції швидкісних автопасажи́рських катамаранів.

**Ключові слова:** слемінг, оцінка ризику, ймовірність, катамаран, початковий етап проектування.

## REFERENCES

- [1] Bondarenko O.V., Niekrasov V.O. Kontsepsiia kompleksnoi otsinky efektyvnosti, nadiynosti ta bezpeky morskykh transportnykh suden [Concept of complex assessment of effectiveness, reliability and safety of marine carrier ships]. *Visnyk ONMU* [Bulletin of Odessa National Maritime University], 2012, issue 34, pp. 151–171.
- [2] Dubrovskiy V.A. *Mnogokorpusnye suda* [Multihulled vessels]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. 304 p.
- [3] Yegorov G.V. Proektirovanie sudov ogranichennykh rayonov plavaniya na osnovanii teorii riska [Design of ships with a specified operating area service on the basis of risk theory]. Saint Petersburg, Sudostroenie Publ., 2007. 384 p.
- [4] Lipis V.B., Remez Yu.V. *Bezopasnye rezhimy shtormovogo plavaniya sudov* [Safe modes of storm vessels navigation]. Moscow, Transport Publ., 1982. 117 p.
- [5] Solomentsev O.I. Opredelenie effektivnogo vertikalnogo klirensa dlya katamarana [Definition of effective vertical clearance for catamaran]. *Trudy NKI: Avtomatizirovannoe proektirovanie i konstruksii sudov – The NUS edited volume: computer-aided vessels design and structure*, 1986, pp. 37–48.
- [6] Solomentsev O. I. Raschet dinamicheskogo podema vody pri prodolnoy kachke odno- i dvukhkorpusnykh sudov [Calculation of dynamic water rise under the longitudinal motion of single- or double-hulled vessels]. *Zb. nauk. prats DMTU – The USMTEU Scientific works collection*, Mykolayiv, 1998, no. 12 (360), pp. 17–28.

- [7] Solomentsev O.I. Uchet trebovaniy k morekhodnosti pri proektirovani morskikh katamaranov [Consideration of the requirements to the sea-going performance under the design of marine catamarans]. *Sudostroenie – Shipbuilding*, 1988, no. 4, pp. 10–14.
- [8] Solomentsev O.I. Opredelenie statisticheskikh kharakteristik odnositelnykh peremeshcheniy dvukhkorpusnogo sudna na vstrechnom volnenii [Determination of the static characteristics of the relative displacements of the double-hulled vessel at the head sea]. *Trudy NKI: Avtomatizirovannoe proektirovanie i konstruksii sudov – The NUS edited volume: computer-aided vessels design and structure*, 1986, pp. 58–72.
- [9] Kholodilin A. N., Shmyrev A. N. *Morekhodnost i stabilizatsiya sudov na volnenii* [Sea-going performance and stabilization of vessels at the seas]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1976. 328 p.
- [10] Chuang S.L., Birmingham J.T., Furio A.J. *Experimental Investigation of Catamaran Cross-structure Seaming*. Defense Technical Information Center Publ., 1975. 48 p.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Как известно, при оптимизационном методе проектирования судна решается задача выбора оптимального варианта путем поиска экстремума целевой функции. При этом в качестве целевой функции обычно принимают один из показателей экономической эффективности судна: прибыль, эксплуатационные расходы, необходимую фрахтовую ставку и т. д.

Анализ публикаций по применению оптимизационного проектирования показывает, что, как правило, при оценке эффективности не учитываются расходы на устранение, а также на ремонт и обновление судов при ликвидации последствий аварий.

Авария судна может быть следствием ошибки проектировщиков, низкого качества работ или дефектов конструкций, допущенных при строительстве судна, монтаже систем и устройств, при установке механизмов и оборудования. Причиной может быть применение на судах изделий или материалов, непригодных для работы в тяжелых морских условиях. Суда терпят аварии и гибнут от пожаров и взрывов, столкновений и навалов, посадок на мели, рифы и другие подводные препятствия. Для скоростных катамаранов наиболее характерны вид аварии – слеминг.

Слеминг возникает в процессе продольной качки при оголении носовой оконечности и последующем соударении с волной. Большие динамические нагрузки могут привести к серьезным повреждениям конструкций корпуса и оборудования, поэтому слеминг является одной из важных причин, вызывающих риск для судов. Автопассажирские катамараны эксплуатируются с большими скоростями хода, вследствие чего появляется высокая вероятность опасных динамических ударов. Таким образом, возникает необходимость расчета риска слеминга автопассажирских катамаранов.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В научной литературе немного публикаций, посвященных данной тематике. В [1, 3] рассмотрен общий способ определения значения риска от аварийных ситуаций. Алгоритм риска слеминга соедини-

тельной конструкции скоростных автопассажирских катамаранов также представлен в работах [5–8]. Детальное изучение этих публикаций позволяет авторам сделать вывод, что расчет риска слеминга соединительной конструкции скоростных автопассажирских катамаранов является малоизученным и сложным. Однако слеминг – основная причина, вызывающая повреждение соединительной конструкции скоростных катамаранов, поэтому данная задача актуальна.

**ЦЕЛЬ СТАТЬИ** – разработка алгоритма расчета риска слеминга автопассажирских катамаранов.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Значение рисков, как правило, определяют по следующей формуле [1]:

$$R = \sum_{k=1}^n P(B_k) Y_k,$$

где  $P(B_k)$  – вероятность события  $B_k$ ;  $Y_k$  – величина убытка.

Для более подробного раскрытия наиболее значимых составляющих полного риска  $R$  эксплуатации судна определим событие  $B_k$  как нанесение  $k$ -го вида убытка материальным ценностям, персоналу (человеку) и окружающей среде:

$$B_k = A \cap C_k,$$

где событие  $A$  – авария на судне; событие  $C_k$  – реализация аварии с  $k$ -м сценарием.

Поскольку события  $A$  и  $C_k$  совместимы, то искомая вероятность события, связанного с нанесением  $k$ -го ущерба  $Y_k$  человеку, материальным ценностям и окружающей среде при аварии на судне рассчитывается по формуле

$$P(B_k) = P(A \cap C_k) = P(A)P(C_k|A),$$

где  $P(A)$  – вероятность возникновения аварии  $A$  на судне;  $P(C_k|A)$  – условная вероятность реализации аварии с  $k$ -м сценарием.

Таким образом, получим

$$R_a = \sum_{k=1}^n P(A)P(C_k|A)Y_k = [P(A)] \cdot \left[ \sum_{k=1}^n P(C_k|A)Y_k \right].$$

Авария всегда возникает вследствие последовательности событий, связанных с ошибками человека, отказами техники или плохими погодными условиями.

Вероятность возникновения аварии  $P(A)$  определяется в зависимости от отказа  $m$ -го вида  $F_m$ :

$$P(A) = P(F_m)P(A|F_m).$$

Итак, окончательная формула для определения значения риска имеет вид

$$R_a = \sum_{k=1}^n P(A)P(C_k|A)Y_k = [P(F_m)P(A|F_m)] \cdot \left[ \sum_{k=1}^n P(C_k|A)Y_k \right],$$

где первый член произведения описывает причинные составляющие риска аварий  $R_a$ , а второй – ожидаемые последствия аварии.

Значение ущерба часто рассчитывается на основании статистических данных. Анализ статистических данных по авариям скоростных судов показал, что аварийные ситуации имеют следующие основные причины: столкновение, контакт, пожар или взрыв, посадка на мель, потеря непроницаемости корпуса, отказы машины и механизмов. Для скоростных катамаранов основной причиной, которая приводит к потере непроницаемости корпуса судна, является слеминг.

Благодаря большому удлинению два корпуса скоростного катамарана не подвергаются опасности при слеминге, поэтому расчет вероятности повреждения корпуса из-за слеминга проводится только для соединительного моста. Метод оценки  $P_c$  предложен в работах О. И. Соломенцева [5–8]:

$$P_c = \sum_{i=1}^n P(x_i),$$

где  $P_c$  – вероятность повреждения моста катамарана из-за слеминга;  $P(x_i)$  – вероятность повреждения пластины, расположенной на  $i$ -м сечении;  $x_i$  – абсцисса расчетного сечения (начало координат на носовом перпендикуляре);  $n$  – количество расчетных пластин по продольному направлению.

Значение  $P(x_i)$  определяется по следующей формуле:

$$P(x_i) = \exp \left[ - \left( \frac{\tilde{h}_{\text{BK}}^2(x_i)}{2\sigma_\xi^2(x_i)(1 + \bar{\delta}_2(x_i))^2} + \frac{P_{\text{н.с.}}}{k_1 k_2 \sigma_\xi^2(x_i)} \right) \right],$$

где  $\tilde{h}_{\text{BK}}(x_i)$  – эффективный (с учетом сдвига с нулевой линии процесса относительных перемещений) вертикальный клиренс [5];  $\sigma_\xi(x_i)$ ,  $\sigma_\xi(x_i)$  – стандарты относительных перемещений и скоростей на встречном волнении [6];  $k_1$  – коэффициент пропорциональности между ударным давлением и скоростью относительных перемещений (имеет размерность плотности) [7];  $k_2$  – безразмерный коэффициент, учитывающий степень азрации потока между корпусами:

при отсутствии крыла  $k_2 = 1$ , при наличии –  $k_2 = 0,7$ ;  $P_{\text{н.с.}}$  – несущая способность расчетной пластины моста;  $\bar{\delta}_2(x_i)$  – относительный динамический подъем при продольной качке, расчет которого приведен в работе [8].

Коэффициент  $k_1$  определяется по рекомендациям работы [10], в которой для регулярного волнения он представлен как функция угла соударения. На регулярном волнении с учетом его трехмерности допустимо принять, что угол соударения  $\xi$  равномерно распределен в интервале от  $\xi_{\text{min}}$  до  $\xi_{\text{max}}$ , значения которых находятся по экспериментальным данным. Тогда

$$k_1 = x_c k_{1\text{max}};$$

$$x_c = - \frac{1}{\chi_c} \ln \frac{1}{\xi_{\text{max}} - \xi_{\text{min}}} \int_{\xi_{\text{min}}}^{\xi_{\text{max}}} \exp[-\chi_c x_1(\xi)] d\xi;$$

$$x_1 = \begin{cases} 0,73 + 0,1\xi & \text{при } \xi \leq 2,7^\circ; \\ 2,7/\xi & \text{при } \xi > 2,7^\circ, \end{cases}$$

где  $k_{1\text{max}} = 7 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup> – значения  $k_1$  при наименее благоприятном ( $2,7^\circ$  [10]) угле соударения;  $x_1(\xi)$  – функция, полученная путем обработки графика работы [10]. Зависимость  $x_c(\xi_{\text{max}})$  при  $\xi_{\text{min}} = 0$  приведена на рис. 1.

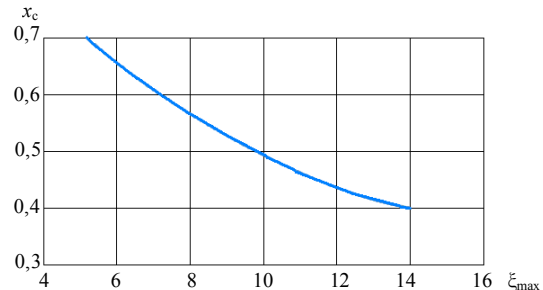


Рис. 1. Зависимость  $x_c$  от  $\xi_{\text{max}}$

Коэффициент безопасности при слеминге определяется по формуле

$$\chi_c = \sqrt{- \ln \frac{2\pi N_y}{\tau_0 \omega_\xi(x_f)}},$$

где  $\omega_\xi(x_f) = \frac{\sigma_\xi(x_f)}{\sigma_\xi(x_f)}$  – средняя частота процесса перемещения;  $N_y$  – количество ударов за время  $\tau_0$ , при котором ударное давление превзойдет несущую способность.

В соответствии с нормативами для днищевого слеминга однокорпусных судов [4], которые в первом приближении можно перенести на катамараны [2],  $N_y = 2$  при  $\tau_0 = 1000\tau_\psi$ , где  $\tau_\psi$  – период килевой качки.

Несущую способность пластины можно определить по формуле [9]

$$P_{н.с} = \frac{0,175}{k} \left( \frac{\sigma_T}{10^3} \right) \left( \frac{100\delta}{l_1} \right)^2,$$

Таблица 1. Значения коэффициента  $k$

$l_2/l_1$	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	3,0	4,0
$k$	0,517	0,612	0,714	0,784	0,821	0,829	0,832	0,833

Эффективный вертикальный клиренс определяется следующей зависимостью [5]:

$$\tilde{h}_{вк}(x_i) = h_{вк}(x_i) - z_x(x_i),$$

где  $h_{вк}(x_i)$  – отстояние невозмущенной поверхности жидкости на тихой воде от нижней обшивки моста в сечении  $x_i$ ;  $z_x(x_i)$  – сдвиг нулевой линии процесса отнесенных перемещений. При отсутствии хода  $z_x = 0$ .

Общая формула для  $z_x(\bar{x}_i)$  в точке, отстоящей на величину  $\bar{x}_i L$  от носового перпендикуляра:

$$z_x(\bar{x}_i) = \delta T_{cp} - \psi_x [L(0,5 - \bar{x}_i) - x_f] + \xi_b(\bar{x}_i) - \delta h_c(\bar{x}_i),$$

где  $\delta T_{cp}$ ,  $\psi_x$  – изменение средней осадки и ходовой дифферент (отрицательный на нос и положительный на корму);  $\xi_b(\bar{x}_i)$  – осредненная по ширине моста ордината ходовой волны;  $x_f$  – абсцисса центра тяжести площади ватерлинии;  $\delta h_c(\bar{x}_i)$  – изменение уровня воды между корпусами из-за движения жидкости навстречу судну.

Величина  $\xi_b(\bar{x}_i) = \xi_b(\bar{x}_i, \bar{y}_{дп})$ , где  $\bar{y}_{дп} = \bar{y}_{дп} / C_n$ ;  $C_n$  – отстояние ДП корпуса от ДП катамарана, в общем случае:

$$\xi_b(\bar{x}_i, \bar{y}_{дп}) = \varepsilon_1 [\xi_{вк}(\bar{x}_i, \bar{y}_{дп}) + \xi_{вд}(\bar{x}_i) + \xi_{в.кр}(\bar{x}_i)],$$

где  $\xi_{вк}$ ,  $\xi_{вд}$ ,  $\xi_{в.кр}$  – ординаты волновых систем на тихой воде, обусловленные влиянием корпуса, носового бульба и подводного крыла (если они есть; при этом две последние волновые системы предполагаются независимыми от положения расчетного сечения по ширине);  $\varepsilon_1$  – редуцирующий коэффициент, учитывающий влияние ветрового волнения.

Коэффициент  $\varepsilon_1$  рассчитывается по следующей зависимости:

$$\varepsilon_1 = \exp\left(-\frac{60\sigma_\xi}{v}\right),$$

где  $v$  – скорость хода судна.

Изменения средней осадки на ходу и ходового дифферента:

$$\delta T_{cp} = \varepsilon_2 (\delta T_{cp1} + \delta T_{cp2} + \delta T_{cp3});$$

$$\delta \psi_x = \varepsilon_3 (\delta \psi_{x1} + \delta \psi_{x2} + \delta \psi_{x3}),$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести материала обшивки днища, кгс/см<sup>2</sup>;  $k$  – коэффициент учета соотношения сторон опорного контура (табл. 1);  $\delta$ ,  $l_1$ ,  $l_2$  – толщина обшивки, длина меньшей и большей сторон опорного контура пластины обшивки.

где  $\delta T_{cp1}$ ,  $\delta \psi_{x1}$  определяются для случая движения судна в канале с использованием теоретических и эмпирических зависимостей;  $\delta T_{cp2}$  и  $\delta \psi_{x2}$  учитывают влияние подводного крыла, а  $\delta T_{cp3}$  и  $\delta \psi_{x3}$  – влияние бульба;  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$  – поправки на влияние волнения.

Для расчета величины понижения уровня между корпусами используем уравнение постоянства расхода жидкости с эмпирической поправкой на большую, по сравнению с осадкой, глубину:

$$\delta h_c(\bar{x}_i) = AL \frac{Fr^2}{2} \frac{\frac{1+\bar{c}}{b_x(\bar{x}_i)} - 0,5}{\left(\frac{1+\bar{c}}{b_x(\bar{x}_i)} - 0,5\right)^2},$$

где  $A$  – эмпирический коэффициент, который принимает значение 0,053<sup>2</sup>;  $L$  – длина между перпендикулярами судна;  $Fr$  – число Фруда по длине;  $\bar{c} = c / B_1$ ;  $c$  – горизонтальный клиренс на миделе;

$$b_x(\bar{x}_i) = \frac{B_1}{2} \left[ 1 - |1 - 2\bar{x}_i|^{\frac{\alpha}{1-\alpha}} \right],$$

где  $B_1$  – ширина одного корпуса;  $\alpha$  – коэффициент полноты конструкционной ватерлинии.

### ВЫВОДЫ

1. При рассмотрении риска необходимо изучать две стороны – стоимость ущерба от аварии и вероятность возникновения этого события. Стоимость ущерба часто рассчитывается на основании статистических данных, а значение вероятности возникновения события может быть определено на раннем этапе проектирования судов.

2. Разработанный алгоритм определения риска от слеминга в зависимости от проектных характеристик скоростных автопассажирских катамаранов при совместном использовании с другими расчетами можно активно применять в оптимизационном проектировании судов.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Бондаренко, О. В. Концепція комплексної оцінки ефективності, надійності та безпеки морських транспортних суден [Текст] / О. В. Бондаренко, В.О. Некрасов // Вісник ОНМУ. – О. : ОНМУ, 2012. – № 34. – С. 151–171.

- [2] **Дубровский, В. А.** Многокорпусные суда [Текст] / В. А. Дубровский. – Л. : Судостроение, 1978. – 304 с.
- [3] **Егоров, Г. В.** Проектирование судов ограниченных районов плавания на основании теории риска [Текст] / Г. В. Егоров. – СПб. : Судостроение, 2007. – 384 с.
- [4] **Липис, В. Б.** Безопасные режимы штормового плавания судов [Текст] / В. Б. Липис, Ю. В. Ремез. – М. : Транспорт, 1982. – 117 с.
- [5] **Соломенцев, О. И.** Определение эффективного вертикального клиренса для катамарана [Текст] / О. И. Соломенцев // Труды НКИ: Автоматизированное проектирование и конструкции судов. – 1986. – С. 37–48.
- [6] **Соломенцев, О. И.** Расчет динамического подъема воды при продольной качке одно- и двухкорпусных судов [Текст] / О. И. Соломенцев // Зб. наук. праць УДМТУ. – Миколаїв : УДМТУ, 1998. – № 12 (360). – С. 17–28.
- [7] **Соломенцев, О. И.** Учет требований к мореходности при проектировании морских катамаранов [Текст] / О. И. Соломенцев // Судостроение. – 1988. – № 4. – С. 10–14.
- [8] **Соломенцев, О. И.** Определение статистических характеристик относительных перемещений двухкорпусного судна на встречном волнении [Текст] / О. И. Соломенцев // Труды НКИ: Автоматизированное проектирование и конструкции судов. – 1986. – С. 58–72.
- [9] **Холодилин, А. Н.** Мореходность и стабилизация судов на волнении [Текст] : справочник / А. Н. Холодилин, А. Н. Шмырев. – Л. : Судостроение, 1976. – 328 с.
- [10] **Chuang, S. L.** Experimental Investigation of Catamaran Cross-structure Seaming [Text] / S. L. Chuang, J. T. Birmingham, A. J. Furio. – Defense Technical Information Center, 1975. – 48 p.

---

© О. В. Бондаренко, Буй Дуй Тхань

Надійшла до редколегії 18.04.2014

Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК

д-р техн. наук, проф. *В. О. Некрасов*