

## СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-85-95

### A METHOD FOR CALCULATING THE RELIABILITY OF VESSELS HULLS AND THEIR ELEMENTS, TAKING INTO ACCOUNT THE PERFORMED REPAIRS AND CONDITIONS FOR FURTHER OPERATION

**S. O. Baryshnikov, A. B. Krasiuk, V. B. Chistov**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,  
St. Petersburg, Russian Federation

*The ship hull reliability after a given number of years of operation is considered. The hull has defects that lead to sudden and gradual failures, which must be periodically restored during repair works. The Register Rules for both sea-going vessels and inland and mixed navigation vessels indicate the characteristics of wear rates for all ship hull groups and element thicknesses required during construction and allowed after repair. This allows you to calculate the probability of a failure of the housing element due to wear (sheet sheathing or beam set) after a given number of years of operation. The presence of other hull defects that do not change over the time can affect the allowable wear of the elements in the group of bonds, reducing its value, which leads to premature failure of the elements due to the wear. Imagining the failure probability as the proportion of elements in the hull group with the same allowable wear requiring repair, it is possible to set a number of these elements. Receiving the number of elements requiring repair in all subgroups, it is possible to calculate the number of elements requiring repair in the entire group of bonds of ship hull. This allows us to further resolve the issue of the best way to repair the hull. Hull repair is the restoration of its general and local strength to a predetermined level and for a specified period of time, ensuring the safety of navigation and the safety of the carried cargo. The repair scope and the housing reliability in subsequent years of operation depend on the repair method (replacement of defective elements or their reinforcement). Replacing the housing element with a new one restores its reliability, and reinforcing the housing element only slightly increases its reliability, since it allows to increase its allowable wear. A method for calculating the occurrence probability of housing elements failures at a given point in time taking into account the performed repairs is proposed in the paper. Comparing the projected costs of hull repairs, it is possible to choose the best repair method at a given point in time, taking into account the duration and conditions of further vessel operation (reinforcing elements, replacing individual elements, replacing sections of the hull with panels or sections). A nomogram to determine the hull reliability after a specified number of years of its operation, taking into account existing defects and repairs is proposed in the paper. Such a nomogram can be used to establish the optimal thickness of the hull elements during construction and renovation.*

*Keywords: hull element, hull defect, hull group, element failure, wear, wear rate, permanent deformations, fractures.*

**For citation:**

Baryshnikov, Sergei O., Alla B. Krasiuk, and Valentin B. Chistov. "A method for calculating the reliability of vessels hulls and their elements, taking into account the performed repairs and conditions for further operation." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 85–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-85-95.

**УДК 625.12:539.4**

### СПОСОБ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ КОРПУСОВ СУДОВ И ИХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ВЫПОЛНЕННЫХ РЕМОНТОВ И УСЛОВИЙ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

**С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов**

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

*Рассматривается надежность корпуса судна после заданного числа лет эксплуатации. Корпус судна имеет дефекты, приводящие к внезапным и постепенным отказам, которые необходимо периодически*

устранять во время ремонта. В Правилах Регистра, как для морских судов, так и для судов внутреннего и смешанного плавания, указаны характеристики скоростей изнашивания для всех групп связей корпуса и толщины элементов, требуемые при постройке и допускаемые после ремонта. Это позволяет рассчитывать вероятность появления отказа элемента корпуса из-за износа после заданного числа лет эксплуатации. Наличие других дефектов корпуса оказывает влияние на допустимый износ элементов в группе связей, уменьшая его значение, что приводит к преждевременному появлению отказа элементов из-за износа. Представив вероятность появления отказа как долю элементов в группе связей с одинаковым допустимым износом, можно установить количество данных элементов. Зная количество элементов, требующих ремонта во всех подгруппах, можно рассчитать количество элементов, требующих ремонта во всей группе связей. Это позволяет выбрать оптимальный способ ремонта корпуса, от чего зависит объем ремонта и надежность корпуса в последующие годы эксплуатации. Замена элемента корпуса на новый восстанавливает его надежность, а подкрепление лишь несколько повышает его надежность, так как позволяет увеличить допустимый износ. В работе предлагается способ расчета вероятностей появления отказов элементов корпуса в заданный момент времени с учетом выполненных ремонтов. Сравнив прогнозируемые затраты на ремонт корпуса, можно выбрать оптимальный способ ремонта, учитывая продолжительность и условия дальнейшей эксплуатации судна. Предлагается номограмма для определения надежности корпуса судна после заданного числа лет его эксплуатации, которая может быть использована для установления оптимальной толщины элементов корпуса при постройке и реновации.

*Ключевые слова:* элемент корпуса, дефект корпуса, группа связей, отказ элемента, износ, скорость изнашивания, остаточные деформации, разрушения.

#### **Для цитирования:**

Барышников С. О. Способ расчета надежности корпусов судов и их элементов с учетом выполненных ремонтов и условий дальнейшей эксплуатации / С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 85–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-85-95.

### **Введение (Introduction)**

В 2016 г. выпущен ГОСТ 27.002–2015 «Надежность в технике. Термины и определения»<sup>1</sup>, в соответствии с которым при рассмотрении надежности корпуса предлагается использовать следующие понятия и определения, приспособленные к сложному объекту — корпусу судна.

*Надежность корпуса* — свойство корпуса судна сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных условиях эксплуатации при соблюдении периодичности освидетельствований и ремонтов. Эта способность связана с обеспечением общей и местной прочности корпуса судна и непроницаемости, при которых сохраняется безопасность плавания и сохранность перевозимого груза.

*Корпус судна* — сложный объект (система), состоящая из ряда подсистем — групп связей.

Под группой связей понимается группа одноименных элементов, находящихся в одинаковых условиях изнашивания. Перечень групп связей, с указанием характеристик скоростей изнашивания, представлен в Правилах Российского речного регистра (РРР) [1] — для судов внутреннего и смешанного плавания или в Правилах Российского морского регистра судоходства (РМРС) [2] для морских судов.

*Элемент группы связей* — лист обшивки или настила, балка набора (может дополнительно разделяться на стенку и полку). Характеризуется проектной  $t_{np}$  и допускаемой остаточной толщиной  $[t_{ост}]$ , устанавливаемыми Правилами РРР или РМРС.

*Безотказность* — свойство корпуса судна непрерывно сохранять требуемые функции в течение периода времени между освидетельствованиями в заданных условиях эксплуатации с учетом ремонта, выполненного по результатам дефектации перед ним.

*Дефектация* — процесс обнаружения, измерения и оценки дефектов корпуса с целью определения его технического состояния, установления способов и объемов ремонта.

*Ремонт корпуса* — комплекс технических операций и организационных действий по восстановлению его работоспособного состояния для заданных условий эксплуатации и на заданный промежуток времени [3].

<sup>1</sup> ГОСТ 27002–2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 24 с.

На морском и речном флоте действует предупредительная система ремонта, когда устранению или компенсации подлежат дефекты, параметры которых превосходят допускаемые Правилами РРР или РМРС значения. Ранее действовавшая система планово-предупредительных ремонтов (ППР) предусматривала текущий, средний и капитальный ремонты, отличающиеся объемом, трудоемкостью и периодичностью их выполнения. Система ППР была удобна для судовладельца с большим количеством однотипных судов. Для судоходной компании с малым количеством судов разных типов разработка документации для системы ППР нецелесообразна, но предупредительная система осталась, так как сохраняется периодический надзор за судами и нормативы для параметров дефектов корпуса, установленные Правилами РМРС или РРР.

Для корпуса судна, с учетом ранее изложенного, принимаются следующие определения:

*Отказ*: дефект элемента, группы связей или всего корпуса, параметры которого (дефекта) превосходят допускаемые значения для заданных условий эксплуатации судна.

*Дефект*: каждое отдельное несоответствие объекта требованиям, установленным документацией (проектом судна) или Правилами РРР (РМРС).

Классификация дефектов приведена в источнике [4] или в Правилах РРР (РМРС), в соответствии с которой все дефекты могут быть разделены на три группы: износ, остаточные деформации или разрушения.

*Износ* — постепенное уменьшение толщины связей, вызванное коррозией, эрозией или истиранием.

*Остаточные деформации* — внезапное изменение формы отдельных элементов или всего корпуса, вызванные чрезмерной нагрузкой.

*Разрушения* — это нарушение целостности на отдельных участках конструкции корпуса, вызванные истощением пластических свойств или усталостью материала.

Надежность оценивается вероятностью появления отказа в заданный промежуток времени.

При предупредительной системе ремонта отказом будем считать дефект, параметры которого превосходят допускаемые значения.

Допускаемые значения дефектов устанавливаются Правилами РРР или РМРС в зависимости от принадлежности судов к том или иному классификационному обществу. С учетом ранее изложенного, отказы могут быть разделены на внезапные и постепенные.

*Внезапный отказ* — это отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние. В корпусе судна к этому виду отказа относятся остаточные деформации, параметры которых превосходят допускаемые значения и разрушения корпусных конструкций.

*Постепенный отказ* — это отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. В корпусе судна к этому виду отказа относится износ, превосходящий допускаемое значение для элемента корпуса.

Правила РРР и РМРС устанавливают зависимости для определения проектной толщины элемента корпуса ( $t_{пр}$ ) и минимальной остаточной толщины [ $t_{ост}$ ]. Тогда допустимый износ [ $\Delta t$ ]:

$$[\Delta t] = t_{пр} - [t_{ост}]. \quad (1)$$

Износ элемента корпуса зависит от продолжительности эксплуатации судна и скорости изнашивания указанного элемента (скорости утонения). Значение скоростей изнашивания позволяет спрогнозировать вероятность появления отказов и рассчитывать показатели надежности корпусов.

### Методы и материалы (Methods and Materials)

Скорость изнашивания элемента корпуса (листа обшивки или настила, полки или стенки балки подкрепляющего набора), с точки зрения вероятности его возникновения, подчиняется нормальному закону распределения. В Правилах РРР / РМРС для каждой группы связей судов различного назначения приводятся средние (рекомендуемые для осуществления расчетов) скорости

изнашивания. Кроме того, в Правилах РРР имеются зависимости для определения среднеквадратического отклонения данной величины  $\sigma_c$  (стандарта скоростей изнашивания) по эмпирической формуле, предложенной Ю. И. Ефименковым<sup>1</sup> в последней редакции Правил РРР, при значении коэффициента вариации скоростей изнашивания ( $v$ ), рассчитываемого по формуле

$$v = \frac{\sigma_c}{\bar{c}} = 0,51 - 1,06\bar{c}. \quad (2)$$

С учетом ранее изложенного, вероятность появления скорости изнашивания отдельного элемента в группе связей:

$$c_i = \bar{c}X\sigma_c, \quad (3)$$

где  $X$  — количество стандартов  $-3 \leq X \leq 3$ , определяемое законом нормального распределения (закон Гаусса) с параметрами

$$P(c) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(c-\bar{c})^2}{2\sigma_c^2}}. \quad (4)$$

График изменения плотности вероятностей скоростей изнашивания представлен на рис. 1.

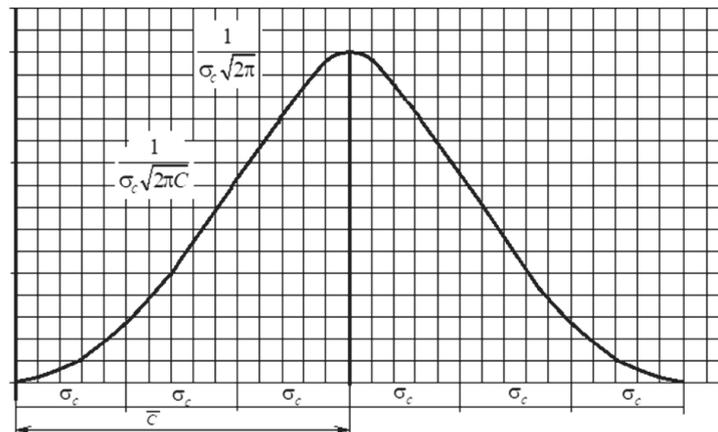


Рис. 1. Распределение скоростей изнашивания элементов корпуса в группе связей

Вероятность появления износа заданной величины у  $i$ -го элемента можно оценить интегралом вероятности по формуле

$$F(\Delta t) = \frac{1}{2} \left( 1 + \Phi \left( \frac{\Delta t - \bar{\Delta t}}{\sigma_M} \right) \right), \quad (5)$$

где  $\Delta t_i = c_i\tau_i$  — износ  $i$ -го элемента в группе связей;

$\tau_i$  — количество лет работы элемента в группе связей;

$\bar{\Delta t} = \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i c_i)}{n} = \tau_i \bar{c}_i$  — математическое ожидание износа элемента в данной группе связей;

$\sigma_{wi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tau_i c_i - \tau_i \bar{c}_i)^2}{n-1}} = \tau \sqrt{\frac{(c_i - \bar{c})^2}{n-1}} = \tau \sigma_c$  — среднеквадратическое отклонение износа элемента

в группе связей.

<sup>1</sup> Анализ нормативов скоростей изнашивания связей и остаточных деформаций. Корректировка правил РРР: отчет по договору № ЦРП-04-33-09 / Рук. Ю. И. Ефименков. СПб., 2005. 85 с.

После преобразований зависимость (5) примет вид:

$$F(\Delta t) = \frac{1}{2} \left( 1 + \Phi \left( \frac{\Delta t - \tau_i \bar{c}}{\tau \sigma_c} \right) \right) \quad (6)$$

или

$$F(\Delta t) = \frac{1}{2} \left( 1 + \Phi \left( \frac{\Delta t}{\tau \sigma_c} - \frac{1}{\nu} \right) \right),$$

где  $\Phi(\Delta t)$  — функция Лапласа или интеграл вероятности для аргумента  $0-4,0$ .

Значения функции Лапласа табулированы и содержатся в справочниках по математике. Краткая выписка из данной таблицы приводится в следующей таблице:

$$\text{Функция Лапласа } 2\Phi(t) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{\tau^2}{2}} dt$$

$t$	$2\Phi(t)$	$t$	$2\Phi(t)$	$t$	$2\Phi(t)$
0	0,00	1,0	0,6817	2,0	0,9545
0,5	0,3829	1,5	0,8664	2,5	0,9876
0,75	0,5468	1,65	0,9011	3,0	0,9973

С использованием значений функции Лапласа построены графики вероятности того, что износ элемента не превзойдет заданную величину после 10, 15, 20, 25 и 30 лет эксплуатации в группе связей со средней скоростью изнашивания  $\bar{C} = 0,018$  мм/год при значении коэффициента вариации  $\nu = 0,3$ .

Если по оси абсцисс откладывать допустимый износ и принять за отказ элемента превышение его износом допустимого значения  $\Delta t > [\Delta t]$ , то с помощью графика на рис. 2 можно оценить вероятность появления отказа элемента после заданного числа лет его эксплуатации.

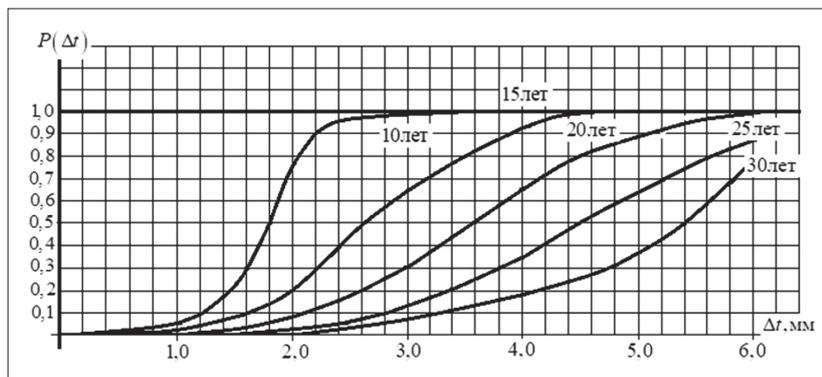


Рис. 2. Вероятность появления износа, не превышающего заданную величину  $\Delta t$

В Правилах РРР [1], а также в источнике [5] даются значения минимальных остаточных толщин листов для судов в зависимости от класса, района плавания и длины судна с учетом их расположения, используемого материала и шпации. В этом случае допустимый износ составит

$$[\Delta t] = t_{\text{пр}} - t_{\text{мин}}^{\text{ост}},$$

где  $t_{\text{пр}}$  — проектная толщина элемента (листа);

$t_{\text{мин}}^{\text{ост}}$  — минимальная допустимая остаточная толщина элемента (листа).

Аналогично, согласно Правилам РМРС [2], можно рассчитать допускаемую остаточную толщину листа в эксплуатации. Если на оси абсцисс отложить допустимое значение износа элемента в группе связей, то на оси ординат по графикам рис. 2 можно получить вероятность безотказной работы этого элемента после заданного числа лет его эксплуатации.

Группа связей, включающая  $n$  элементов, состоит из подгрупп, каждая из которых имеет  $n_i$  элемент с единым допускаемым износом и одинаковым сроком эксплуатации. Вероятность того, что в этой подгруппе не будет отказа элементов, определяется произведением вероятностей безотказной работы отдельных элементов:

$$P_j \Delta (\Delta t < [\Delta t]) = \prod_{i=1}^n P_i (\Delta t - [\Delta t]), \quad (7)$$

где  $i$  — номер элемента в подгруппе;

$j$  — номер подгруппы.

Так как вероятность безотказной работы каждого элемента в подгруппе из  $n_i$  элементов одинакова, зависимость (7) можно представить в виде

$$P_j (\Delta t < [\Delta t]) = (P_i (\Delta t - [\Delta t]))^{n_i}. \quad (8)$$

Вероятность безотказной работы  $P_j$  группы элементов с заданным допускаемым износом после заданного числа лет эксплуатации можно трактовать как долю элементов из этой группы, требующих ремонта. Тогда количество таких элементов  $n'_j$  определится в виде:

$$n'_j = n_j (1 - P_j (\Delta t \leq [\Delta t])). \quad (9)$$

Согласно зависимостям (7)–(9), с использованием графика на рис. 2 построена номограмма для определения количества элементов заданной группы связей, требующих ремонта после заданного числа лет эксплуатации (рис. 3). На номограмме показан пример определения количества листов, требующих ремонта  $n'_j$ , после десяти лет эксплуатации, если количество элементов (листов) в подгруппе равно десяти, а допускаемый износ  $[\Delta t] = 2$  мм. Так как подгруппа  $j$  в группе включает  $n_i$  элементов с одинаковым допускаемым износом после  $\tau$  лет эксплуатации, количество элементов в группе связей, требующих ремонта, после  $T$  лет эксплуатации корпуса судна будет

$$n^1 = \sum_{j=1}^{x=k} (n_j^1), \quad (10)$$

где  $k$  — количество подгрупп в группе.

Вероятность появления отказов в группе связей после  $T$  лет эксплуатации равна отношению количества элементов, требующих ремонта к количеству элементов в группе связей с учетом выполненных ремонтов (замен, подкрепления, иных дефектов<sup>1</sup>) [3].

Безотказность группы связей корпуса можно определить по формуле

$$P_k (\Delta t \leq [\Delta t]) = \left(1 - \frac{n^i}{n}\right). \quad (11)$$

Безотказность работы корпуса судна, включающего  $m$  групп связей, составит

$$P_m (\Delta t \leq [\Delta t]) = \prod_{k=1}^m P_k (\Delta t \leq [\Delta t]). \quad (12)$$

Проанализировав выражения (7)–(12), можно заметить, что показатели надежности корпуса после заданного числа лет эксплуатации зависят от допускаемого износа, количества подгрупп и элементов в подгруппе связей. И допускаемый износ, и количество подгрупп, и количество элементов в подгруппе зависят от дефектов корпуса, внезапно появившихся и сохраняющихся после ремонта и от способа ремонта.

<sup>1</sup> Руководство Р.002–2002. Обновление судов внутреннего и смешанного (река – море) плавания. М.: Российский речной регистр, 2002. 28 с.

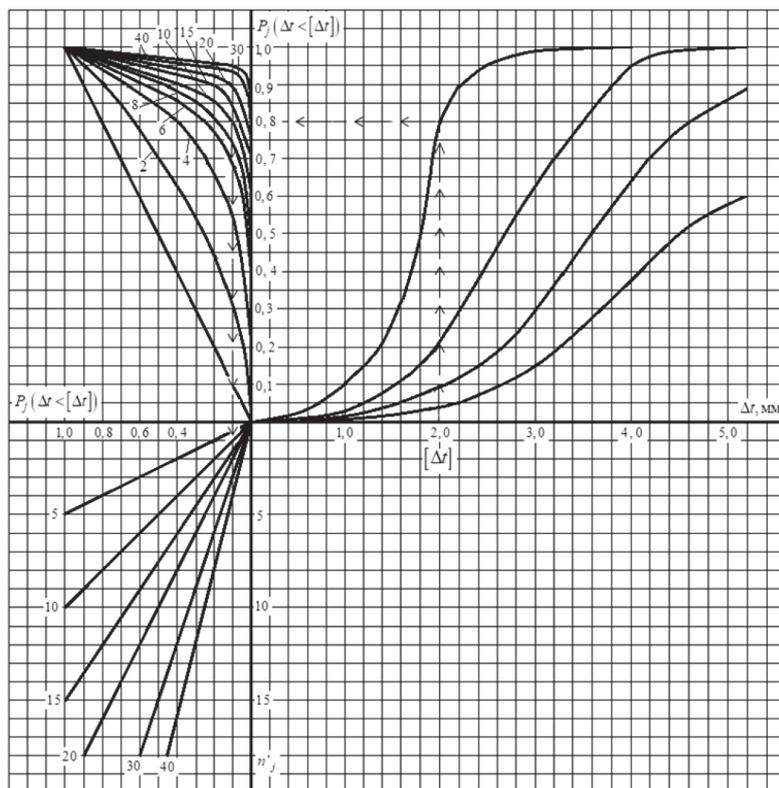


Рис. 3. Номограмма для определения количества элементов (листов) в группе связей

Если корпус судна имеет общие остаточные деформации<sup>1</sup>, рассмотренные в источниках [5]–[7], то допускаемый средний износ определяется по формуле

$$[\Delta t_{\text{сеч}}]' = [\Delta t_{\text{сеч}}^0] - A \cdot \frac{f_0}{f_{\text{он}}} \left( 0,9 + 0,1 \frac{f_0}{f_{\text{он}}} \right), \quad (13)$$

где  $[\Delta t_{\text{сеч}}^0] = (1 - K) \frac{\sum_1^n (t_{\text{пр},i} b_i)}{\sum_1^n (b_i)}$  — допустимый средний износ в сечении группы связей без общих

остаточных деформаций;  $K$  — доля допустимой средней остаточной толщины листа от проектной по Правилам РРР;  $t_{\text{пр},i}$  — проектная толщина  $i$ -го листа в сечении;  $b_i$  — ширина  $i$ -го листа в сечении

группы связей;  $A = \frac{\Delta M}{M_p \sum_1^n (b_i)}$  — коэффициент для поправки к допускаемому износу из-за общих

остаточных деформаций;  $\Delta M$  — дополнительный изгибающий момент при максимальном прогибе / перегибе, равном нормативному;  $M_p$  — расчетный изгибающий момент при проверке общей прочности корпуса;  $f_0$  — остаточный общий прогиб / перегиб корпуса, определенный в соответствии с данными Правил РРР [1];  $f_{\text{он}} = L(R_{eH}/E)(L/15H)$  — остаточный нормативный прогиб / перегиб, превышение которого требует учета общих остаточных деформаций в расчетах общей прочности корпуса [2];  $R_{eH}$  — предел текучести материала крайней связи корпуса, МПа;  $E$  — модуль нормальной упругости, МПа;  $L$  и  $H$  — соответственно длина и высота борта корпуса, м.

<sup>1</sup> Технологическая инструкция по устранению остаточного перегиба корпусов судов. ФГОУ ВПО СПб Государственный университет водных коммуникаций / Рук. С. О. Барышников; отв. исп.: Т. О. Карклина, В. Б. Чистов; согласовано ФГУ Российский речной регистр. Письмо 07-06-450 от 21.02.2012. СПб., 2011. 201 с.

Если корпус судна имеет местные остаточные деформации (вмятины) на днище, то допускаемый средний износ в сечении этих групп связей должен уменьшаться также согласно данным источников [2] и [8], а для судов района плавания «R2-RSN (4,5)» с учетом публикации [9], и определяться по формуле

$$[\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}] = [\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}^0] \frac{\Delta F}{\sum_1^n (b_i)}, \quad (14)$$

где  $[\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}]$  — допускаемый средний износ в сечении, определенный с учетом остаточных деформаций;  $[\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}^0]$  — допускаемый средний износ в сечении, определенный без учета остаточных деформаций;  $\Delta F = \sum_1^{n'} (f_i (1 - \varphi_i)) + \sum_1^{n'+1} \left( \frac{at_i}{2} (\varphi'_i - \varphi_i) \right)$  — потеря площади поперечного сечения днища из-за деформированных продольных ребер жесткости;  $n'$  — количество деформированных ребер в сечении;  $f_i$  — проектная толщина поперечного сечения ребра жесткости с присоединенным пояском;  $\varphi_i$  — редуцированный коэффициент деформированного ребра;  $a$  — расстояние между продольными ребрами в сечении группы связей (ширина пластин);  $t_i$  — проектная толщина листов в поперечном сечении группы связей;  $n' + 1$  — количество пластин, примыкающих к деформированным ребрам;  $\varphi'_i$  — редуцированный коэффициент пластины.

При определении потери площади поперечного сечения днища следует помнить, что второе слагаемое написано из условия, что редуцированный коэффициент пластины, примыкающей к деформированному ребру, не может быть больше редуцированного коэффициента этого ребра ( $\varphi'_i \leq \varphi_i$ ). По этой причине второе слагаемое не может быть отрицательным и при выполнении условия ( $\varphi'_i \leq \varphi_i$ ) не учитывается.

При ремонте корпуса судна исключаются элементы, получившие отказ. Это исключение может быть реализовано следующими способами:

- прямым расчетом прочности, обосновывающим повышенный допустимый износ;
- подкреплением дефектных элементов;
- заменой дефектных элементов;
- заменой участков корпуса, содержащих дефектные элементы.

Первый способ применим только для средней остаточной толщины поперечного сечения группы связей днища или палубы при невыполнении условия  $\Delta \bar{t}_{\text{сеч}} \leq [\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}]'$ . Для отдельных элементов корпуса (листов обшивки или настила) он неприменим, так как Правила РРР и РМРС дают возможность рассчитывать их допускаемые остаточные толщины с учетом их нагрузок, размеров пластин и механических характеристик материала. В этом случае надежность корпуса не изменяется.

При ремонте корпусов судов подкреплением отдельных элементов увеличивается допустимый износ подкрепленных элементов, который может быть определен по меньшему значению из выражений:

$$\left. \begin{aligned} [\Delta t]' &= t_{\text{пр}} - 3,0; \\ [\Delta t]' &= 0,5t_{\text{пр}}. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Надежность подкрепленных элементов увеличивается.

Подкреплением можно увеличить также допустимый износ в поперечном сечении днища или палубы, который может быть определен по формуле

$$[\Delta \bar{t}_{\text{сеч}}]' = (1 - K) \cdot \sum_1^n (t_{\text{пр}i} b_i) / \sum_1^n (b_i) + F_n / \sum_1^n (b_i), \quad (16)$$

где  $F_n$  — площадь поперечного сечения подкреплений.

В этом случае увеличивается надежность только этого сечения, что, в свою очередь, повышает надежность всего корпуса.

При замене отказавших элементов на новые увеличивается надежность каждого из этих элементов и уменьшается количество элементов, надежность которых не меняется. В результате повышается общая прочность группы связей и всего корпуса судна.

При ремонте заменой конструкций, содержащих отказавшие элементы, надежность корпуса повышается в большей степени, чем при замене отдельных элементов. При таком ремонте заменяется большое количество элементов, которые без отказа могли бы работать еще в течение длительного периода времени. Такой способ ремонта эффективен, если в группе связей к моменту ремонта произошел отказ достаточно большого количества элементов. Оптимальный способ ремонта зависит от количества отказавших элементов корпуса, времени и условий дальнейшей эксплуатации.

### Обсуждение (Discussion)

Задача прогнозирования потока отказов элементов корпуса решается с середины 70-х гг. XX в. [3]. Согласно требованиям Правил РРР, толщины связей корпуса при проектировании должны закладываться такими, чтобы до конца планируемого срока службы отсутствовали отказы из-за износа связей, и, следовательно, их ремонт не требовался [10]. С этой целью задаются скорости изнашивания каждой группы связей. Аналогичные требования установлены при обновлении судов.

Согласно требованиям Правил РМРС, предъявляемым к толщинам связей, обеспечивающих общую и местную прочность, необходимо добавлять к допускаемой толщине фиксированный запас на износ, указанный в источниках [2] и [9]. Ни в том ни в другом случае не прогнозируется объем ремонта для восстановления технического состояния корпуса. Прогнозирование потока отказов позволяет не только выбрать эффективный способ ремонта корпуса в заданный момент времени, как это предлагалось в источнике [11], но и обосновать оптимальный способ ремонта, учитывающий оставшийся период эксплуатации [12]. Обоснование способа ремонта приведено в источниках [11], [12]. В последнем случае дается только расчет заменяемых листов в течение всего срока службы при обосновании оптимального срока службы. Выполненное исследование позволило получить зависимость для прогнозирования отказов при различных способах ремонтов.

### Заключение (Conclusion)

Полученные зависимости для прогнозирования надежности корпуса после заданного числа лет эксплуатации с учетом объема и способов выполненных ремонтов позволят в дальнейшем определять оптимальные строительные толщины элементов в группе связей, прогнозировать объем и обосновывать оптимальный способ ремонта с учетом материальных и трудовых затрат.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила Российского речного регистра : в 5 т. — М., 2019.
2. Правила классификации и постройки морских судов. — Ч. II : Корпус. — СПб.: Российский морской регистр судоходства, 2019. — 280 с.
3. Чистов В. Б. Технология ремонта корпусов судов: конспект лекций / В. Б. Чистов. — Л.: ЛИВТ, 1978. — 78 с.
4. Барышников С. О. Надежность механизмов корпусов судов: монография / С. О. Барышников, Л. И. Погодаев, В. Б. Чистов. — СПб.: Изд-во ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — 251 с.
5. Гирин С. Н. Общие принципы учета эксплуатационных ограничений при нормировании мореходных характеристик судов прибрежного плавания / С. Н. Гирин, И. А. Гуляев, Ю. И. Ефименков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2018. — № 57. — С. 18–26.
6. Барышников С. О. Надежность корпусов судов с общими остаточными деформациями / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.
7. Карклина Т. О. Замена сливных каналов теплохода «Невский» на плаву / Т. О. Карклина, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2016. — № 2. — С. 23–31.

8. Ефименков Ю. И. Устранение остаточного перегиба корпуса теплохода «Волго-Дон 225» / Ю. И. Ефименков, А. В. Павлов, В. Б. Чистов // Сборник научных трудов ЦНИИМФ. — 2015. — № 1. — С. 117–125.
9. Ефименков Ю. И. Основные результаты разработки требований к судам ограниченного района плавания R2-RSN (4, 5) / Ю. И. Ефименков [и др.] // Научно-технический сборник Российского Морского регистра судоходства. — 2013. — № 36. — С. 41–43.
10. Chistov V. B. Calculation Methods for Assessing the Reliability of Ship Hulls / V. B. Chistov, S. O. Baryshnicov, N. I. Gerasimov, V. A. Zhukov // 2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies»(IT&QM&IS). — IEEE, 2018. — Pp. 295–297. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524937.
11. Огнева В. В. Особенности прогнозирования износов корпусов судов при планировании объемов судоремонта / В. В. Огнева, Е. Г. Бурмистров // Судостроение. — 2014. — № 5 (816). — С. 46–49.
12. Барышников С. О. Об оптимальных сроках службы корпуса судна / С. О. Барышников, А. Б. Березина, В. Б. Чистов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. — 2011. — № 1 (117). — С. 234–245.

## REFERENCES

1. Rossiiskii Rechnoi Registr: Pravila (v 5-ti tomakh). M., 2019.
2. Pravila klassifikatsii i postroiiki morskikh sudov. Chast' II «Korpus». SPb.: Rossiiskii Morskoi Registr Sudokhodstva, 2019.
3. Chistov, V. B. Tekhnologiya remonta korpusov sudov. Konspekt lektsii. L.: LIVT, 1978.
4. Baryshnikov, S. O., L. I. Pogadaev, and V. B. Chistov. Nadezhnost' mekhanizmov korpusov sudov. Monografiya. SPb.: Izdatel'stvo GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2018.
5. Girin, S. N., I. A. Gulyaev, and Yu. I. Efimenkov. "General principles of accounting operational limitations for justification of a navigation characteristics of coastal ships." *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta* 57 (2018): 18–26.
6. Baryshnikov, Sergei O., Tatyana O. Karklina, and Valentin B. Chistov. "Reliability of ships hulls with over allresidual deformations." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.
7. Karklina, Tatyana Osipovna, Anatoliy Vladimirovich Pavlov, and Valentin Borisovich Chistov. "Replacement of drain passages of motorship «Nevskiy» afloat." *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies* 2 (2016): 23–31.
8. Efimenkov, Yu. I., A. V. Pavlov, and V. B. Chistov. "Ustranenie ostatochnogo peregiba korpusa teplokhoda «Volgo-Don 225»." *Sbornik nauchnykh trudov TsNIIMF* 1 (2015): 117–125.
9. Efimenkov, Yu. I., M. A. Kuteinikov, G. V. Markozov, and S.A. Sotekov. "Osnovnye rezul'taty razrabotki trebovaniy k sudam ogranichenno go raiona plavaniya R2-RSN(4, 5)." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo Morskogo registra sudokhodstva* 36 (2013): 41–43.
10. Chistov, Valentin B., Sergey O. Baryshnicov, Nikolay I. Gerasimov, and Vladimir A. Zhukov. "Calculation Methods for Assessing the Reliability of Ship Hulls." *2018 IEEE International Conference «Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies»(IT&QM&IS)*. IEEE, 2018. 295–297. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524937.
11. Oгнева, V. V., and E. G. Burmistrov. "Features of forecasting regarding ship hull wear when estimating shiprepair scope." *Sudostroenie* 5(816) (2014): 46–49.
12. Baryshnikov, S. O., A. B. Berezina, and V. B. Chistov. "Ob optimal'nykh srokakh sluzhby korpusa sudna." *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* 1(117) (2011): 234–245.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Барышников Сергей Олегович** —  
доктор технических наук, профессор, ректор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [rector@gumrf.ru](mailto:rector@gumrf.ru)

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Baryshnikov, Sergei O.** —  
Dr. of Technical Sciences, professor, rector  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [rector@gumrf.ru](mailto:rector@gumrf.ru)

**Красюк Алла Борисовна —**

кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [krazyuk\\_a\\_b@mail.ru](mailto:krazyuk_a_b@mail.ru),  
[kaf\\_mnt@gumrf.ru](mailto:kaf_mnt@gumrf.ru)

**Чистов Валентин Борисович —**

доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала  
С. О. Макарова»  
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,  
ул. Двинская, 5/7  
e-mail: [chistovvb@gumrf.ru](mailto:chistovvb@gumrf.ru)

**Krasiuk, Alla B. —**

PhD, associate professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [krazyuk\\_a\\_b@mail.ru](mailto:krazyuk_a_b@mail.ru),  
[kaf\\_mnt@gumrf.ru](mailto:kaf_mnt@gumrf.ru)

**Chistov, Valentin B. —**

Dr. of Technical Sciences, professor  
Admiral Makarov State University of Maritime  
and Inland Shipping  
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,  
Russian Federation  
e-mail: [chistovvb@gumrf.ru](mailto:chistovvb@gumrf.ru)

*Статья поступила в редакцию 24 декабря 2019 г.  
Received: December 24, 2019.*