

ТЕХНОЛОГИЯ СУДОСТРОЕНИЯ, СУДОРЕМОНТА И ОРГАНИЗАЦИЯ СУДОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1041-1053

RELIABILITY OF RIVER FLEET VESSELS HULL ELEMENTS

A. B. Krasiuk, V. B. Chistov, V. G. Nikifirov

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

Improving the process of fault detection of metal ship hull elements by using a probabilistic approach is considered in the paper. The most labor-intensive part of the defect detection report, namely, measurement and assessment of hull structures individual elements wear, accounting for more than 90 % of the total measurements, is reviewed. Defect detection of a ship hull means the examination, measurement and assessment of defects in each element of the ship hull in order to establish method and volumes of repairs that ensure its reliable operation until the next survey under specified operating conditions. The necessity of carrying out a preliminary calculation stage for defect detection is substantiated. It allows you to significantly reduce the number of measurements of hull structures elements, which will have a positive effect on reducing the cost of repair both due to a smaller number of measurements and the duration of repairs. It has been proved that using the probability approach to predict the residual thickness of individual elements also takes into account the effect on the total strength, which guarantees the reliability of the ship hull in operation. Tables to assess the technical condition of individual hull elements based on their level of wear have been developed, and a method for filling them has improved. The tables are made in two versions, namely, paper and electronic, the most convenient for a specific user — the designer of the defect detection report tables. A test example of using the electronic tables for assessing technical condition by wear level, which proves that the predicted residual thicknesses obtained by calculation will in all cases, be less, than similar ones obtained from measurements results, is carried out using a representative vessel. This proves the reliability and feasibility of using the preliminary defect detection stage, which is essentially an analogue of the concept of the zero stage in ship repair. Using the probability approach to determine the residual thicknesses will allow you not only to reduce the costs of defect detection of the hull itself, but also at early stages (before placing the ship on a slip or dock) to reduce the volume of hull structures repairs, and to choose the most appropriate and effective method of repair.

Keywords: reliability of the ship hull, ship hull fault detection, ship hull element, bond group, average wear rate, average residual thickness, technical condition assessment.

For citation:

Krasiuk, Alla B., Valentin B. Chistov, and Vladimir G. Nikiforov. "Reliability of river fleet vessels hull elements." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.6 (2023): 1041–1053. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1041-1053.

УДК 625.12:539.4

НАДЕЖНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСОВ СУДОВ РЕЧНОГО ФЛОТА

А. Б. Красюк, В. Б. Чистов, В. Г. Никифоров

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

Темой исследования является совершенствование процесса дефектации элементов корпусов металлических судов путем использования вероятностного подхода. Рассматривается наиболее трудоемкая часть акта дефектации: измерение и оценка износов отдельных элементов корпусных конструкций, составляющая более 90 % общего числа измерений. Под оптимальной дефектацией в работе понимается минимальное, но достаточное для надежной эксплуатации корпуса судна до момента проведения последующего

(очередного) обследования число измерений корпусных конструкций. Обоснована необходимость проведения предварительного перед дефектацией этапа расчетов, позволяющего существенно сократить количество измерений элементов корпусных конструкций, что положительно отразится на снижении стоимости ремонта как за счет меньшего числа измерений, так и за счет сокращения продолжительности ремонта. Доказано, что использование вероятностного подхода к прогнозированию остаточных толщин отдельных элементов учитывает также влияние на общую прочность, что гарантирует надежность корпуса судна в эксплуатации. Разработаны таблицы для оценки технического состояния отдельных элементов корпуса по уровню их износа и рассмотрена методика их заполнения. Таблицы выполнены в двух вариантах, наиболее удобных для конкретного пользователя — оформителя таблиц акта дефектации: бумажном и электронном. Показан пример применения электронных таблиц оценки технического состояния по уровню износа с использованием судна-представителя, который доказал, что прогнозируемые остаточные толщины, полученные расчетным путем, будут во всех случаях меньше аналогичных, полученных на основе результатов измерений. Это доказывает надежность и целесообразность применения предварительного этапа дефектации, являющегося, по сути, аналогом понятия «нулевой этап в судоремонте». Использование вероятностного подхода к определению остаточных толщин позволит не только сократить затраты непосредственно на процедуру дефектации корпуса, но и даст возможность на ранних (до постановки судна на слип или в док) стадиях прогнозировать объемы, а также выбрать наиболее целесообразный и эффективный способ ремонта корпусных конструкций.

Ключевые слова: надежность корпуса судна, дефектация корпуса, элемент корпуса судна, группа связей, средняя скорость изнашивания, средняя остаточная толщина, оценка технического состояния.

Для цитирования:

Красюк А. Б. Надежность элементов корпусов судов речного флота / А. Б. Красюк, В. Б. Чистов, В. Г. Никифоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 6. — С. 1041–1053. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-6-1041-1053.

Введение (Introduction)

Под надежностью корпуса судна понимается его способность выполнять требуемые функции в заданных условиях эксплуатации при соблюдении периодичности освидетельствований и ремонтов. Данная способность связана с необходимостью обеспечения общей и местной прочности корпуса судна, а также его непроницаемости в целях безопасности плавания и сохранности перевозимого груза. Понятие *надежная эксплуатация корпуса судна* связано с понятиями *дефект* и *отказ*. Все дефекты корпуса судна можно подразделить на три группы: износ, остаточные деформации и разрушения. Перечень дефектов приведен на схеме. Допустимые значения параметров дефектов для корпуса речного судна устанавливаются Правилами Российского Классификационного Общества (далее — РКО). Все виды отказов можно подразделить на внезапные и постепенные.

Внезапный отказ — отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние. К этому виду отказа относятся остаточные деформации с параметрами, превосходящими допускаемые значения, а также разрушения корпусных конструкций.

Постепенный отказ — это отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта. Данным видом отказа является износ, превосходящий допустимое значение. Поскольку износ представляет собой постепенное уменьшение толщины связей, вызванное различными причинами (коррозией, эрозией или истиранием), данный вид дефекта прогнозируется с достаточной достоверностью.

Надежность корпуса судна оценивается вероятностью появления отказа в заданный промежуток времени. Промежуток времени, в течение которого необходимо обеспечить надежную (безотказную) эксплуатацию, является *межремонтным периодом*. Для корпуса нового судна это период с момента постройки судна до первого крупного среднего ремонта, и далее периоды между крупным ремонтом, последовательно проводимыми средними¹ или между средним и капитальным; для судна, работающего за пределами нормативного срока полезного использования, это промежутки между последовательно проводимыми средними ремонтами или между реновацией (либо модернизацией

¹ Термины «средний ремонт» и «капитальный ремонт» приняты по аналогии с ранее используемой плано-предупредительной стратегией ремонта, поскольку для действующей в настоящее время предупредительной стратегии новая терминология не разработана.

корпуса) и средним ремонтом. По истечении межремонтного периода выполняется *дефектация*¹ и при необходимости ремонт корпуса, обеспечивающий надежную эксплуатацию для заданных условий эксплуатации (класса РКО) на следующий межремонтный период.



Классификация дефектов корпуса судна

Измерение и оценка параметров износов элементов корпуса являются трудоемким процессом, особенно для крупных судов, поднадзорных РКО. Поскольку износ относится к числу постепенных отказов, а скорости изнашивания отдельных групп связей корпусов судов хорошо изучены и формализованы (в табл. 2.2.87 ПКПС²), целесообразным является применение вероятностного подхода для определения прогнозных остаточных толщин в целях сокращения числа замеров при очередном освидетельствовании.

В соответствии с действующими требованиями РКО в ходе дефектации судовладелец должен представить результаты обнаружения и измерения всех дефектов корпуса, в том числе остаточных толщин каждого его элемента. Это приводит к огромному числу избыточных измерений, длительному простоя судна, большим затратам на выполнение работ по обеспечению доступа к обследуемому элементу, а также увеличению оплаты за время нахождения судна на слипе (в доке). Опыт работы с подобными *поэлементными дефектациями* показал, что исполнители дефектации по некоторым сечениям зачастую не выполняют замеры, а просто копируют их с других сечений корпуса либо редактируют материалы дефектаций прошлых лет, что не способствует надежности результатов измерений. Сокращения объемов дефектации можно достичь за счет отказа от измерения дефектов элементов, отказ которых не произойдет с высокой степенью вероятности (например, 0,95).

Методы и материалы (Methods and Materials)

В статье [1] предложен новый подход к проведению дефектации, базирующийся на вероятностном подходе определения уровня технического состояния корпуса судна, гарантирующий надежную и безопасную эксплуатацию корпуса судна в течение периода его работы до следующего

¹ Процесс обнаружения, измерения и оценки дефектов корпуса с целью определения его технического состояния, установления способов и объемов ремонта.

² Правила классификации и постройки судов: в 5 т. Т. 2. Ч. I: Корпус и его оборудование. — М.: РКО, 2019.

очередного освидетельствования (следующего межремонтного периода). Было доказано, что использование статистических данных о скорости изнашивания позволяет прогнозировать уровень общей и местной прочности с достаточной достоверностью и является основой разрабатываемой в ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова новой Инструкции по дефектации корпусов судов (далее — Инструкция по дефектации). При разработке этого документа были использованы материалы исследований сотрудников ГУМРФ, опубликованных в статьях [2]–[4].

На основе разработанного ранее подхода и проекта новой Инструкции по дефектации в данной работе исследован вопрос использования вероятностного подхода с практической точки зрения, а именно *оформление результатов дефектации путем составления электронных таблиц*. В целом все электронные таблицы и их аналоги на бумажном носителе, используемые при оформлении результатов дефектации, можно представить в виде следующих вариантов:

Таблица 1. Техническое состояние отдельных элементов корпуса по степени износа (пример заполнения).

Таблица 1.1. Результаты дополнительных замеров элементов корпуса в наиболее изношенных сечениях (заполняется по результатам предварительных выводов о техническом состоянии элементов корпуса).

Таблица 2. Техническое состояние отдельных элементов корпуса по степени износа (вариант совмещения расчетов с измерениями).

Таблица 3. Пример заполнения электронного варианта.

В статье рассмотрен порядок заполнения табл. 1 — наиболее трудоемкого этапа дефектации. В ней должны содержаться сведения об остаточных толщинах и уровне износа всех элементов корпуса — *фактическом* и *допустимом*. Табл. 1.1 в работе не приведена, так как является дополнением табл. 1 и заполняется по результатам предварительных выводов о техническом состоянии элементов корпуса. В случае, если при заполнении табл. 1 выявлены связи корпуса (или группы связей), износ которых превышает допустимое значение, то могут потребоваться дополнительные замеры. При отсутствии связей с недопустимым износом в использовании табл. 1.1 нет необходимости.

В настоящей статье внимание акцентировано на изучении прогнозируемого дефекта корпуса судна — *износа*. Рассмотрена общая форма табл. 1 в варианте исполнения на бумажном носителе (форма таблицы заполнена по группе связей «обшивка днища» для одного из сечений корпуса судна). В графе 16 табл. 1 приводится вывод о техническом состоянии элемента («годное» или «не годное» (при годном техническом состоянии элемента графу 16 можно не заполнять). Графа 17 необходима для указания либо способа ремонта (например, «смена» при полистовой или подетальной замене изношенных конструкций) либо в ней даются комментарии к оценке технического состояния, указанного в графе 16. При отсутствии необходимости в ремонте и однозначности оценок технического состояния элемента или группы связей ячейки данной графы не заполняются.

Допустимый износ в столбце 5 табл. 1 рассчитывается как разница между проектной толщиной $t_{пр.i}$ и допустимой остаточной для группы связей $[t_{ост}]$:

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

Для каждой группы связей средняя скорость изнашивания \bar{C} устанавливается согласно данным табл. 2.2.87 Правил классификации и постройки судов. Для допустимой скорости изнашивания должны быть рассчитаны следующие величины:

– стандарт скорости изнашивания:

$$\sigma_c = \bar{C}(0,51 - 1,06\bar{C}); \quad (2)$$

– коэффициент вариации:

$$v = \frac{\sigma_c}{\bar{C}}. \quad (3)$$

Таблица 1

Техническое состояние отдельных элементов корпуса по степени износа (пример заполнения)

Район	№ III	Средняя часть										Участок № III-2	Остаточная толщина элемента	Прогнозируемая остаточная толщина	Начало шп.	70		Конеч шп.	79
		Проектная толщина (толщина по Правилам РКО)		Ширина элемента	Количество лет службы элемента	τ_i , лет	$[\Delta V]$, мм	Количество элементов в группе связей	Количество элементов в группе связей с одинаковым допусковым износом	Значения замеров по точкам, мм						Остаточная толщина элемента	$t_{ост.i}$		
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
А		Б																	
В		Стандарт																	
Скорость изнашивания		\bar{C}	0,12	Коэффициент вариации				v	0,383	Стандарт				σ_c	0,046				
1. Обшивка днища	VI ск.	8	1,55	7	0,8	10	7,9	7,9	7,8	7,9	7,8	6,0	7,2	0,00103	-0,00006				
	V пояс	8	1,58	5	0,8	10	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	4,7	7,2	0,00111	0,00032				
	IV пояс	8	1,47	5	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	7,8	4,7	7,2	0,00088	0,00029				
	III пояс	8	1,55	10	0,8	10	7,6	7,9	7,8	7,8	7,8	4,7	7,2	0,00088	-0,00062				
	II пояс	8	1,16	15	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	7,8	4,7	7,2	0,00070	-0,00116				
	I пояс	8	1,58	3	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	7,8	4,7	7,2	0,00095	0,00070				
	I пояс	8	1,58	3	0,8	10	7,9	7,7	7,8	7,8	7,8	4,7	7,2	0,00095	0,00070				
	II пояс	8	1,58	5	0,8	10	7,9	7,9	7,8	7,9	7,9	4,7	7,2	0,00105	0,00032				
	III пояс	8	1,55	8	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	7,8	4,7	7,2	0,00093	-0,00025				
	IV пояс	8	1,47	11	0,8	10	7,8	7,9	7,7	7,7	7,8	4,7	7,2	0,00088	-0,00076				
	V пояс	8	1,58	12	0,8	10	7,9	7,8	7,9	7,9	7,9	4,7	7,2	0,00105	-0,00101				
	VI ск.	8	1,55	15	0,8	10	7,8	7,8	7,7	7,7	7,8	6,0	7,2	0,00088	-0,00155				
													Σ	0,01129	-0,00073				

*ПОС — Правила освидетельствования судов в эксплуатации

При известном количестве лет службы элемента в группе связей τ_i прогнозируемая остаточная толщина рассчитывается по формуле

$$t_{\text{ост.прог } i} = t_{\text{пр.}i} - \bar{C}(1 + m' \cdot \sigma_c) \tau_i, \quad (4)$$

где τ_i — количество лет службы элемента в составе группы связей;

m' — коэффициент, определяемый в зависимости от числа элементов в составе группы связей n' с одинаковым значением допустимого износа $[\Delta t]$.

Приведем значения коэффициента m' в составе группы связей n' :

n'	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 и более
m'	1,65	1,3	1,07	0,90	0,75	0,63	0,52	0,42	0,33	0,00

Характеристики $\Delta F_{\text{ост } i}$ и $\Delta F_{\text{ост.прог } i}$, рассчитываемые в столбцах 14 и 15 табл. 1, определяются по формулам (5) и (6) соответственно:

$$\Delta F_{\text{ост } i} = b_i (t_{\text{ост } i} - [t_{\text{ост}}]), \quad (5)$$

где $t_{\text{ост } i}$ — остаточная толщина элемента, определенная по результатам измерений в столбце 10 табл. 1;

b_i — размер элемента в плане корпуса судна (ширина пояса обшивки или настила, высота стенки балки набора, ширина стенки балки набора);

$[t_{\text{ост}}]$ — допустимая остаточная толщина группы связей, указанных в столбце 13 табл. 1;

$$\Delta F_{\text{ост.прог } i} = b_i (t_{\text{ост.прог } i} - [t_{\text{ост}}]), \quad (6)$$

где $t_{\text{ост.прог } i}$ — прогнозируемая остаточная толщина элемента, рассчитанная по формуле (4).

По итогам определения характеристик $\Delta F_{\text{ост } i}$, $\Delta F_{\text{ост.прог } i}$ рассчитываются суммы (Σ). При положительных значениях суммы характеристик прочность корпуса судна считается обеспеченной. Отрицательный результат свидетельствует о недостатке уровня прочности по общему износу в группе связей.

Известное число лет службы элемента в составе группы связей позволяет определить целесообразность выполнения замеров данного элемента при очередном освидетельствовании. Так, в табл. 1 итоговая сумма имеет отрицательное значение, поэтому необходимо выполнение измерений остаточных толщин. При этом следует в первую очередь выполнять измерения тех элементов группы связей, характеристика которых имеет отрицательное значение (выделены в табл. 1 фоном). В том случае, если и после данного этапа измерений итоговая сумма столбца 15 останется отрицательной, то следует выполнить измерения оставшихся элементов в группе связей.

Вариант табл. 1, где часть остаточных толщин определена по прогнозу, а часть измерена, приведен в табл. 2, откуда видно, что итоговая сумма после ограниченного числа измерений является положительной, следовательно, измерение остальных элементов не требуется. В табл. 2 фоном отмечены те элементы, для которых выполнены измерения. В этом случае при расчете характеристики столбца 15 последняя была определена не по прогнозной толщине, а по фактически остаточной, как в столбце 14.

Вероятностный подход определения остаточных толщин элементов в группе связей является априори надежным, поскольку фактические остаточные толщины связаны с понятием «средний износ» и средней скоростью изнашивания, а прогнозные остаточные толщины рассчитывались исходя из максимально-возможного износа, что обеспечивает 95%-ю вероятность того, что износ элемента не превысит допустимую величину. Об этом косвенно свидетельствует также и то, что итоговая сумма характеристик, рассчитанная в табл. 2 (0,00867), при совмещении расчетов и измерений меньше суммы, полученной на основе результатов измерений, приведенных в табл. 1 (0,01129). Данное заключение сделано на основе выполненных расчетов.

Предварительные расчеты прогнозных остаточных толщин (подготовительный этап дефектации) дают возможность существенно сократить количество замеров. Так, на примере табл. 1 и 2 продемонстрирован вероятностный подход, позволяющий вместо замеров в 36 точках выполнить измерения только в 21 точке. Использование нового подхода к дефектации, на первый взгляд, кажется сложным, при этом существенно упростить задачу исполнителя дефектации корпуса судна может использование электронных таблиц (табл. 3).

Таблица 2

Техническое состояние отдельных элементов корпуса по стелени износа
(вариант совмещения расчетов с измерениями)

Район	№ III	Средняя часть							Участок № III-2			Нач. шп.	70		Кон. шп.	79	
		Проектная толщина (толщина по Правилам РКО)		Ширина элемента	Количество лет службы элемента	τ_i , лет	$[\Delta t]$, мм	n'	$t_{ост.1}$	$t_{ост.2}$	$t_{ост.3}$		Остаточная толщина элемента	Прогнозируемая остаточная толщина			Допускаемая остаточная толщина элементов в группе связей по табл. 3.6.3 ПОСЭ
1. Обшивка днища	ЛБ	VI ск.	8	1,55	0,12	0,8	10	7,9	7,9	7,8	0,383	7,2	7,2	0,00103	0,046		
		V пояс	8	1,58	5	0,8	10	-	-	-	-	-	7,4	7,2	-	0,00032	
		IV пояс	8	1,47	5	0,8	10	-	-	-	-	-	7,4	7,2	-	0,00029	
		III пояс	8	1,55	10	0,8	10	7,6	7,9	7,8	7,8	7,8	6,8	7,2	0,00088	0,00088	
		II пояс	8	1,16	15	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	7,8	6,2	7,2	0,00070	0,00070	
		I пояс	8	1,58	3	0,8	10	-	-	-	-	-	7,6	7,2	-	0,00070	
	ПБ	I пояс	8	1,58	3	0,8	10	-	-	-	-	-	7,6	7,2	-	0,00070	
		II пояс	8	1,58	5	0,8	10	-	-	-	-	-	7,4	7,2	-	0,00032	
		III пояс	8	1,55	8	0,8	10	7,7	7,8	7,9	7,8	7,8	7,0	7,2	0,00093	0,00093	
		IV пояс	8	1,47	11	0,8	10	7,8	7,9	7,7	7,8	7,8	6,7	7,2	0,00088	0,00088	
		V пояс	8	1,58	12	0,8	10	7,9	7,8	7,9	7,9	7,9	6,6	7,2	0,00105	0,00105	
		VI ск.	8	1,55	15	0,8	10	7,8	7,8	7,7	7,8	7,8	6,2	7,2	0,00088	0,00088	
A		Б	В														
Скорость изнашивания		$\bar{C} =$	8	1,55	0,12	0,8	10	7,9	7,9	7,8	0,383	7,2	7,2	0,00103	0,046		
		σ_e															
		Стандарт															
		Σ															

В процессе исследования в качестве судна-представителя был выбран танкер «Волгонефть-266» класса РКО «ЖМ–СП 3,5» пр. 1577/5886. Данный выбор обусловлен следующими причинами:

- корпус судна обновлен в 2012 г. по пр. 1577/550А-ЛМПП с заменой базовой части корпусных конструкций в грузовой зоне на новые элементы, выполненные из стали повышенной прочности и, следовательно, имеется информация о количестве лет службы элементов корпусных конструкций;
- имеется информация о конструкции корпуса;
- имеется подробная информация о замерах остаточных толщин корпусных конструкций при дефектации в 2019 г. (выполнена поэлементная дефектация);
- ранее выполнен расчет общей прочности теплохода, определены допустимые остаточные толщины связей корпуса с учетом изменения конструкции в 2012 г. и замены базовых элементов конструкций на аналогичные, изготовленные из стали повышенной прочности;
- судно достаточной большое, что обеспечивает большую выборку для анализа;
- качественно выполненная дефектация;
- отсутствие конструкций с язвенным износом (поскольку анализ подобных элементов корпуса выходит за рамки поставленной задачи);
- массовость проекта, позволяющая использовать результаты контрольного примера для выполнения предварительного этапа дефектации на иных судах данной группы.

Общая структура электронного документа. В целях практической реализации вероятностного подхода к формированию дефектации был разработан ряд таблиц MS Excel, которые могут быть впоследствии использованы исполнителями дефектации. Данное программное средство было выбрано ввиду его общедоступности, простоты, а также ввиду того, что в большинстве случаев таблицы замеров оформлялись именно с использованием данных электронных таблиц. При необходимости в будущем разработанные таблицы могут быть легко адаптированы к иному программному продукту (например, «Мой Офис»).

Таблицы, аналогичные табл. 1, были разработаны в трех вариантах:

- для листовых элементов (обшивок и настилов) и набора продольного направления;
- для поперечных переборок и полупереборок;
- для набора поперечного направления.

Расчеты выполнялись только для базовых элементов корпуса, включая конструкции основного корпуса в грузовой зоне, а также конструкции основного корпуса в оконечностях, исключая кницы, бракеты и др. Выполнено сопоставление прогнозных остаточных толщин и характеристик с фактическими, полученными в 2019 г. по результатам дефектации.

Анализ расчетов, выполненных в электронном варианте таблиц. Поскольку в процессе модернизации большая часть корпусных конструкций была заменена на новые, можно точно установить срок службы элемента, а данные о фактических остаточных толщинах этих элементов позволяют оценить достоверность расчета прогнозируемых остаточных толщин путем сравнения последних с результатами измерений.

Незначительные отличия структуры электронной таблицы, пример заполнения которой дан в табл. 3, от табл. 1 состоят в следующем:

- в электронном варианте имеется дополнительный столбец 10' для автоматического определения коэффициента m' , который можно скрыть при выводе документа на печать;
- часть ячеек заполняется автоматически (ячейки, которые должны быть заполнены вручную исполнителем дефектации, выделены в табл. 3 фоном).

В электронную таблицу необходимо ввести следующие данные:

- скорость изнашивания (стандарт и коэффициент вариации рассчитываются автоматически);
- данные о проектных толщинах, ширине элемента, допускаемые остаточные толщины (минимальные и для связей в группе), что позволяет автоматически определить допустимый износ, число лет срока службы элемента и количество элементов с одинаковым допустимым износом — для последующего расчета прогнозируемой остаточной толщины;

– для тех связей, измерение которых выполняется, указываются замеры в трех точках, фактическая остаточная толщина рассчитывается с помощью таблицы, поскольку операнд для расчета имеется в соответствующей ее ячейке. Также в автоматическом режиме рассчитываются характеристики ΔF как по фактическим, так и по прогнозируемым остаточным толщинам. Суммируются характеристики, показывающие избыток или недостаток остаточной площади сечения группы связей.

Из табл. 3 видно, что сумма характеристик $\Delta F_{\text{ост},i}$, рассчитанных по фактическим остаточным толщинам, больше суммы характеристик $\Delta F_{\text{ост.прог},i}$, определенных по прогнозируемой толщине. Такая картина характерна для всех групп связей, проанализированных в рамках выполненного расчета. Это свидетельствует о том, что применение вероятностного подхода в целях сокращения числа измерений элементов корпуса при дефектации гарантирует обеспечение надежности данных элементов корпуса.

Расчеты, выполненные по судну-представителю, показали возможность существенного сокращения числа замеров элементов корпуса. В случае, если бы до выполнения дефектации в 2019 г. были рассчитаны прогнозируемые остаточные толщины и соответствующие им характеристики $\Delta F_{\text{ост.прог},i}$, то число измерений должно было составить:

- по листовым элементам и продольным связям набора — 2629 точек (фактически 9233 точки), что на 70 % меньше фактического количества;
- по поперечным переборкам и полупереборкам — 0 точек (фактически 273 точки) — практически 100%-е сокращение, ограничивающееся индивидуальными проверочными измерениями;
- по набору поперечного направления — 0 точек (фактически 4420 точек).

По корпусу в целом количество необходимых замеров корпусных конструкций судна-представителя составляет 2629 точек, что снижает количество замеров корпусных конструкций по сравнению с фактически выполненным на 81 %.

Результаты и их обсуждение (Results and Discussions)

Результатом выполненного исследования является пример практической реализации разработанного ранее [1]–[4] вероятностного подхода к определению уровня технического состояния корпуса судна, обеспечивающего надежную (с вероятностью 0,95 и более) эксплуатацию до следующего очередного ремонта.

Возможность использования вероятностного подхода, позволяющая прогнозировать уровень общей и местной прочности с достаточной степенью достоверности, доказана в работах специалистов ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова [1], [3], [4], а также в статьях П. А. Бимберекова [5], [6], О. К. Зяблова, Е. В. Фунтиковой [7], [8], а также В. В. Огнева [9], П. В. Зиновьева, В. А. Компанейца, О. Э. Сурова, С. Н. Гирина, И. А. Гуляева и Ю. А. Ефименкова [10], [11]. Вопросы составления электронных актов и таблиц дефектации рассмотрены в работах Е. П. Бураковского, В. П. Прохничка [12], [13], О. К. Зяблова, Ю. А. Кочнева, И. Б. Кочневой [14], О. К. Зяблова, Е. В. Фунтиковой [7]. Необходимость оптимизации числа замеров остаточных толщин корпусных конструкций базируется также на исследованиях, выполненных в работах П. А. Бимберекова [15], Е. Г. Бурмистрова [16], Е. П. Бураковского, Ю. И. Нечаева, П. Е. Бураковского и В. П. Прохничка [12].

В данной статье обоснована целесообразность снижения числа измерений остаточных толщин путем использования вероятностного подхода к прогнозированию технического состояния корпусных конструкций. Доказано, что вероятностный подход к прогнозированию остаточных толщин элементов корпуса обеспечивает надежную и безопасную эксплуатацию корпуса до следующего очередного освидетельствования. Обоснована необходимость выполнения предварительного расчетного этапа дефектации, позволяющего снизить трудоемкость и стоимость судовых ремонтных работ.

Отличие выполненного исследования от других работ на эту тему заключается в практической реализации вероятностного подхода, поскольку разработанные «бумажные» и электронные таблицы заложены в основу формирования новой «Инструкции по дефектации корпусов металлических судов», поднадзорных РКО.

Заключение (Conclusion)

Правилами РКО [1] предусмотрено определение технического состояния корпуса судна посредством измерения остаточных толщин каждого его элемента. Данный подход, обеспечивая безусловную надежность полученных результатов, сопряжен с большими затратами как непосредственно на дефектацию, так и на ремонт судна за счет большого числа суток нахождения судна на слипе (в доке).

В результате выполненного исследования доказано следующее:

- применение вероятностного подхода к определению остаточных толщин обеспечивает надежную и безопасную эксплуатацию корпуса судна;
- предварительный (проводимый до момента постановки судна в док или на слип) расчетный этап позволит существенно снизить необходимое число замеров остаточных толщин, что уменьшит затраты на дефектацию и ремонт путем сокращения слипо-сут. или доко-сут.;

Разработаны формы таблиц для прогнозирования и оформления фактических результатов замеров как в «бумажном» варианте, так и в электронном.

Выполненные исследования и разработки:

- выгодны судовладельцу за счет сокращения стоимости ремонтных работ;
- невыгодны компании, выполняющей дефектацию за счет сокращения числа замеров остаточных толщин;
- невыгодны судоремонтному заводу, выполняющему замеры корпусных конструкций собственными силами;
- выгодны судоремонтному заводу, осуществившему перевод процедуру дефектации корпусов судов на аутсорсинг (выполнение дефектации корпусов судов специализированными фирмами по договору) за счет сокращения суток нахождения судна в ремонте и возможности привлечения большего числа судов для ремонта на данном предприятии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышников С. О. Оптимальная дефектация корпусов судов речного флота / С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 6. — С. 915–930. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-915-930.
2. Красюк А. Б. Дефектация и ремонт листов ледового пояса ледоколов речного флота / А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2015. — № 5(33). — С. 86–92. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-86-92.
3. Красюк А. Б. Методологические основы дефектации стальных корпусов судов / А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 3. — С. 87–93.
4. Барышников С. О. Ремонт и надежность судов речного флота / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Судостроение. — 2021. — № 1 (854). — С. 10–13. DOI: 10.54068/00394580_2021_1_10.
5. Бимбереков П. А. Корректировка методики определения остаточных толщин обшивки и настилов согласно проекту Правил Российского Речного Регистра / П. А. Бимбереков // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2015. — № 1. — С. 7–13.
6. Бимбереков П. А. Определение потребного числа измерений остаточных толщин на участке элемента связи корпуса судна на основе оценочных зависимостей для запаса толщин и рекомендуемых скоростей изнашивания / П. А. Бимбереков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2015. — № 1. — С. 76–80.
7. Зяблов О. К. Графическое моделирование объектов ремонта в составе электронных актов дефектации по корпусу и ДРК судна / О. К. Зяблов, Е. В. Фунтикова // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2012. — № 31. — С. 57–59.
8. Зяблов О. К. Сравнительный анализ правил РРР и РМРС в области освидетельствований и дефектации судов / О. К. Зяблов, А. Н. Науменко // Труды 19-го Международного научно-промышленного форума «Великие реки-2018». — Н. Новгород: Волжский гос. ун-т водного транспорта, 2018.

9. 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.
10. Зиновьев П. В. Методика оценки достоверности результатов замеров остаточных толщин при деформации судовых конструкций / П. В. Зиновьев, В. А. Компанец, О. Э. Суров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2015. — № 40–41. — С. 41–48.
11. 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.
12. Бураковский Е. П. Эксплуатационная прочность судов / Е. П. Бураковский, Ю. И. Нечаев, П. Е. Бураковский, В. П. Прохнич. — Изд-во «Лань», 2021. — 371 с.
13. Бураковский Е. П. Нормирование параметров прогрессирующих дефектов корпусов судов / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский // Инновации в науке и образовании — 2011. Труды IX Международной научной конференции: В 2 ч. — Калининград: Калининградский гос. техн. ун-т, 2011. — Ч. 1. — С. 345–347.
14. Зяблов О. К. Автоматизированное формирование отчёта по деформации судна с использованием графо-математической модели корпуса / О. К. Зяблов, Ю. А. Кочнев, И. Б. Кочнева // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. — 2019. — № 59. — С. 62–69.
15. Бимбереков П. А. Некоторые аспекты мониторинга прочности судов в ходе эксплуатации / П. А. Бимбереков // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. — 2009. — № 2. — С. 155–160.
16. Бурмистров Е. Г. Анализ причин и районов локализации износов наружной обшивки корпусов судов внутреннего и смешанного (река-море) плавания / Е. Г. Бурмистров, Д. А. Кромов // Научные проблемы водного транспорта. — 2022. — № 70. — С. 15–29. DOI: 10.37890/jwt.vi70.244.

REFERENCES

1. Baryshnikov, Sergei O., Alla B. Krasiuk, and Valentin B. Chistov. “Optimal fault detection of river ship hulls.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.6 (2022): 915–930. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-915-930.
2. Krasnyuk, Alla Borisovna, and Valentin Borisovitch Tchistov. “Defect detection and repair of ice belt sheets for inland water icebreakers.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 5(33) (2015): 86–92. DOI: 10.21821/2309-5180-2015-7-5-86-92/
3. Krasnyuk, A. B., and V. B. Chistov. “Methodological outlines of the defect detection of the vessels steel hulls.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3 (2013): 87–93.
4. Baryshnikov, S. O., T. O. Karklina, and V. B. Chistov. “Repair and reliability of river service ships.” *Sudostroenie* 1(854) (2021): 10–13. DOI: 10.54068/00394580_2021_1_10/
5. Bimberekov, Pavel Alexandrovich. “Adjustment of the methods of determination of the residual thickness of the plating in accordance with the project of Russian river registry.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technologies* 1 (2015): 7–13.
6. Bimberekov, P. A. “Determination of needed number of measurements of residual thicknesses on part of ship hull connection element on base of relationships for reserve of thicknesses and recommended rates of wear.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 1 (2015): 76–80.
7. Zyablov, O. K., and E. V. Funtikova. “Graphics modeling of repair items included in hull and propulsion and steering assembly fault finding sheets presented in electronic form.” *Bulletin of VSAWT* 31 (2012): 57–59.
8. Zyablov, O. K., and A. N. Naumenko. “Comparative analysis of the rules of RMRS and RRR in the field of survey and inspection of ships.” *Trudy 19-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma “Velikie reki-2018”*. Nizhnii Novgorod: Volzhskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta, 2018.
9. Oгнева, V. V., and E. G. Burmistrov. “Features of forecasting regarding ship hull wear when estimating shiprepair scope.” *Sudostroenie* 5(816) (2014): 46–49.
10. Zinov'ev, P. V., V. A. Kompanets, and O. E. Surov. “Metodika otsenki dostovernosti rezul'tatov zamerov ostatochnykh tolshchin pri defektatsii sudovykh konstrukttsii.” *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 40–41 (2015): 41–48.
11. 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.” *Bulletin of VSAWT* 57 (2018): 18–26.

12. Burakovskii, E. P., Yu. I. Nechaev, P. E. Burakovskii, and V. P. Prokhlich. *Ekspluatatsionnaya prochnost' sudov*. Izd-vo «Lan'», 2021.

13. Burakovskiy, E. P., and P. E. Burakovskiy. “Rationing of parameters of progressing defects of the ships hulls.” *Innovatsii v nauke i obrazovanii — 2011. Trudy IX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii*. Vol. 1. Kaliningrad: Kaliningradskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011. 345–347.

14. Zyablov, Oleg K., Yury A. Kochnev, and Irina B. Kochneva. “Automated generation of the ship fault detection report by using the graphical-mathematical model of the hull.” *Bulletin of VSAWT* 59 (2019): 62–69.

15. Bimberekov, P. A. “Same aspects of monitoring of ship hull strength during its exploitation.” *Nauchnye problemy transporta Sibiri i Dal'nego Vostoka* 2 (2009): 155–160.

16. Burmistrov, E. G., and D. A. Kromov. “Analysis of the causes and the localization areas of the hull outer plating wear of inland and mixed (river-sea) navigation ships.” *Russian Journal of Water Transport* 70 (2022): 15–29. DOI: 10.37890/jwt.vi70.244.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Красюк Алла Борисовна —

кандидат технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: krasyuk_a_b@mail.ru, 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: kaf_osnpr@gumrf.ru

Никифоров Владимир Григорьевич —

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Krasiuk, Alla B. —

PhD, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: krasyuk_a_b@mail.ru, 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: kaf_osnpr@gumrf.ru

Nikiforov, Vladimir G. —

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: kaf_mnt@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 25 октября 2023 г.

Received: October 25, 2023.