

СУДОСТРОЕНИЕ И СУДОРЕМОНТ

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-6-915-930

OPTIMAL FAULT DETECTION OF RIVER SHIP HULLS

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

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

The issue of determining the reliability of the hulls of inland and river-sea-going vessels after a known number of years of operation under given condition is considered. It is accepted that fault detection of a ship's hull is a survey, measurement and evaluation of defects in each element of the ship's hull in order to establish the methods and scope of repairs that ensure its reliable operation until the next regular survey under specified operating conditions. It is shown that the volume of residual thicknesses can be significantly reduced using the statistical data on wear rates presented in the Rules of the Russian River Register. At the same time, the reduction in the scope of measuring the parameters of defects retains the probability of detecting all defects of the hull elements to the level of 0.95, and the probability of failure-free operation of the hull until the next survey, after the elimination of the identified defects will be at least 0.95. A form of table for processing the values of the residual thicknesses of all elements in the inspection report and instructions for filling it out are given. Explanations for using the results of measurements and calculations at determining the technical condition of certain elements in the group and the ship's hull as a whole are given. The last column of the table indicates the method of eliminating the defect of an element and groups of elements, and in the conclusion of the inspection report, the method of repair and its scope for the entire hull of the ship providing a suitable assessment of the condition after repair are indicated. The main advantage of this paper, in difference from the previous studies of the authors in this area, is that user-friendly (the designer of the defect report tables) nomograms, which allow you to reduce the number of measurements of the residual thicknesses of hull structure elements in the online mode, have been created. The performed study, allowing you to reduce the number of measurements while guaranteeing the reliable operation of the ship's hull, will let the shipowner to reduce the cost of repair work by reducing the number of days of ship standing on the slipway (in the dock). In addition, the ship repair company will be able to free up its production facilities for the purpose of their subsequent loading with other ship repair or shipbuilding orders, which will increase the efficiency of their activities.

Keywords: Ship hull fault detection, ship hull element, bond group, allowable wear, average wear rate, remaining thickness of the hull element, element repair method, technical condition assessment.

For citation:

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.

УДК 620.165.29:629.5

ОПТИМАЛЬНАЯ ДЕФЕКТАЦИЯ КОРПУСОВ СУДОВ РЕЧНОГО ФЛОТА

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

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

Рассмотрен вопрос определения надежности корпусов судов внутреннего и смешанного плавания после известного числа лет эксплуатации в заданных условиях. Принято, что дефектация корпуса судна — это обследование, измерение и оценка дефектов каждого элемента корпуса судна с целью установления способов и объемов ремонта, обеспечивающих надежную эксплуатацию его до следующего очередного освидетельствования в заданных условиях эксплуатации. Отмечается, что число замеров остаточных толщин может быть существенно сокращено при использовании статистических данных по скоростям изнашивания, представленным в Правилах РРР. При этом сокращение объема измерений параметров дефектов сохраняет вероятность определения всех дефектов элементов корпуса до уровня 0,95, а вероятность безотказной работы корпуса до очередного освидетельствования после устранения выявленных дефектов

составит не менее 0,95. Разработана форма таблицы для оформления значений остаточных толщин всех элементов в акте дефектации и даны указания по ее заполнению (в частности, пояснения для использования результатов измерения и расчетов при диагностировании технического состояния определенных элементов в группе и корпуса судна в целом). Отмечается, что в последнем столбце таблицы указывается способ устранения дефекта элемента или группы элементов, а в заключение акта дефектации — способ ремонта и его объем для всего корпуса судна, обеспечивающий годную оценку технического состояния после ремонта. Главным достоинством данной работы является то, что созданы удобные для пользователя (оформителя таблиц акта дефектации) номограммы, позволяющие в оперативном режиме снизить число измерений остаточных толщин отдельных элементов корпусных конструкций. Выполненное исследование, позволяя сократить количество измерений при гарантии обеспечения надежной эксплуатации корпуса судна, дает возможность судовладельцу уменьшить стоимость ремонтных работ путем уменьшения продолжительности нахождения судна на слепе (в доке). При этом судоремонтное предприятие сможет высвободить свои производственные мощности с целью их последующей загрузки иными судоремонтными или судостроительными заказами, что способствует повышению эффективности их деятельности.

Ключевые слова: дефектация, корпус судна, элемент корпуса, группа связей, допустимый износ, средняя скорость изнашивания, остаточная толщина, способ ремонта элемента, оценка технического состояния.

Для цитирования:

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.

Введение (Introduction)

Поддержание технического состояния корпуса судна на заданном уровне в течение всего срока эксплуатации с наименьшими затратами — важная хозяйственная задача транспортной отрасли, одним из эффективных путей решения которой является *оптимальная дефектация¹ корпуса судна*. В решении этой задачи принимают непосредственное участие судовладелец, контролирующая организация и ремонтная организация, восстанавливающая техническое состояние корпуса судна. При этом в снижении затрат на поддержание технического состояния корпусов заинтересован только судовладелец, поскольку он оплачивает все расходы, связанные с ремонтом. Судоремонтное предприятие, если оно не принадлежит судовладельцу, в любом случае заинтересовано в увеличении объемов корпусных ремонтных работ за счет количества обнаруженных дефектных элементов, времени, затраченного на ремонт, израсходованных материалов и т. п.

Контролирующая организация — Российское классификационное общество (РКО), ранее — Российский речной регистр [1], не заинтересована в снижении затрат на поддержание технического состояния судов, так как любые его затраты подобного рода будут оплачены судовладельцем. Задачей контролирующей организации является обеспечение безопасности плавания и сохранности перевозимого груза за счет своевременного и точного обнаружения дефектов корпуса и согласования способов их устранения.

РКО принят следующий способ решения поставленной задачи: при дефектации судовладелец должен представить результаты обнаружения и измерения всех дефектов корпуса, в том числе остаточных толщин каждого его элемента. В некоторых случаях на корпусах судов, возраст которых не превышает 15 лет, допускается сокращение объема измерений остаточных толщин, однако это не имеет серьезных обоснований. В данном случае поставленная задача (обнаружение каждого из дефектов корпуса судна) решается и вероятность определения всех дефектов корпуса равна 1,0. При таком подходе имеет место длительный простой судна, большие затраты на сопутствующие работы для обеспечения доступа к обследуемому элементу и оплату судоподъемного сооружения. Судовладелец заинтересован в сокращении этих затрат при снижении надежности результатов дефектации. Сокращения объемов дефектации можно достичь, если отказаться от измерения дефектов тех элементов, выход из строя которых не произойдет с высокой степенью (например, 0,95) вероятности.

¹ Под *дефектацией* понимается обследование, обнаружение, измерение дефектов, сравнение обнаруженных и измеренных дефектов с допускаемыми значениями, установление способов и объемов ремонта.

В Правилах [1] приведены значения характеристик скоростей изнашивания для групп связей судов внутреннего и смешанного плавания, позволяющие прогнозировать вероятность появления отказа после известного числа лет эксплуатации элемента группы связей. Если вероятность безотказной работы элемента группы связей превышает 0,95 по прогнозу, то нет необходимости измерять толщину этого элемента, а для расчетов, связанных с проверкой прочности корпуса, следует использовать остаточную толщину элемента с вероятностью 0,95. В расчетах прочности допускается погрешность в определении напряжений, равная 5 %. Поэтому оптимальной дефектацией будем считать такую, при которой вероятность сохранения элементов с дефектами, превышающими допустимое значение, не будет более 5 % от их общего количества.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Оценить вероятность появления отказа элемента корпуса судна можно на основании имеющихся сведений о скорости нарастания дефекта, времени эксплуатации элемента и допустимого значения дефекта. Возможность совершенствования процесса дефектации на вероятностной основе доказана в работах [2]–[4]. Кроме того, была выполнена оценка влияния погрешностей при определении остаточных толщин как при непосредственном их измерении, так и при помощи выполненных расчетным способом с использованием теории вероятности, на несущие характеристики листовых конструкций, профилей и корпуса судна в целом [5]–[7]. Авторами данной работы также было выполнено исследование влияния объема дефектации и качества выполненного ремонта на надежность корпуса судна с учетом условий дальнейшей эксплуатации [8]. Изучением вопросов учета погрешностей при определении технического состояния корпусов судов занималась также группа ученых под руководством Е. П. Бураковского [9]–[11].

Постепенные отказы элементов корпуса вызваны их износом. Элементы корпуса судна объединяются в группы одноименных элементов с одинаковыми характеристиками скоростей изнашивания. В Правилах [1] приведены значения средних скоростей изнашивания групп связей «С» и формула для определения коэффициента вариации v , с помощью которого можно определить стандарт скоростей изнашивания для рассматриваемой группы σ_c :

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

Зная оптимальные характеристики скорости изнашивания, можно рассчитать вероятность появления износа после заданного числа лет эксплуатации [9]. Вероятность появления износа после 5, 10, 15, 20, 25 лет и 30 лет эксплуатации элемента показана в правой части номограммы на рис. 1. Если на оси абсцисс отложить допустимый износ, то на оси ординат будет указана вероятность безотказной работы элемента в данной группе связей.

Группа связей, состоящая из нескольких подгрупп элементов с одинаковым допустимым износом, включает n -элементов, и вероятность безотказной работы всех элементов этой подгруппы определяется по формуле

$$P_j(\Delta t_i < [\Delta t]) = \prod_{i=1}^n P_i(\Delta t_i < [\Delta t]), \quad (2)$$

где $P_i(\Delta t_i < [\Delta t_i])$ — вероятность отказа листа из подгруппы с заданным значением допустимого износа;

n — количество листов в подгруппе.

Поскольку характеристики скоростей изнашивания всех листов в подгруппе одинаковы, вероятность безотказной работы подгруппы может быть представлена в виде

$$P_j(\Delta t_i < [\Delta t]) = [P_i(\Delta t_i \leq \Delta t_i)]^n. \quad (3)$$

Правая часть номограммы на рис. 1 позволяет определить вероятность безотказной работы одного элемента в подгруппе и связей с заданным допустимым износом, левая часть — вероятность безотказной работы всех элементов подгруппы. На номограмме путь I показывает определение

вероятности безотказной работы подгруппы из n элементов после заданного числа лет эксплуатации при заданном допустимом износе, а путь II — каким должен быть износ, чтобы не было отказа в этой подгруппе с заданной вероятностью.

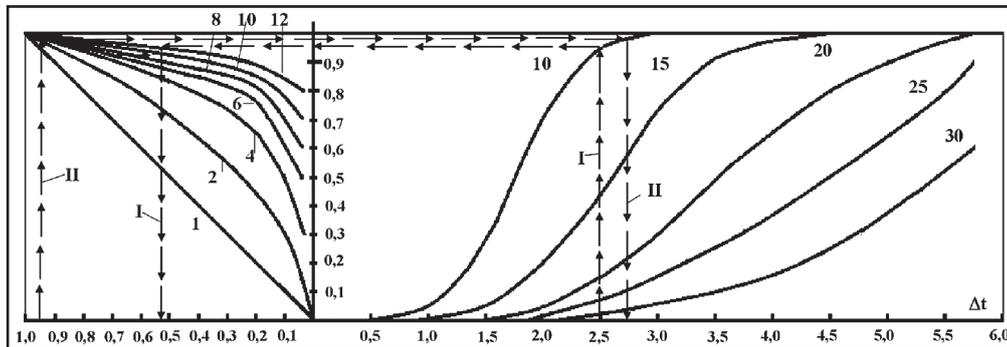


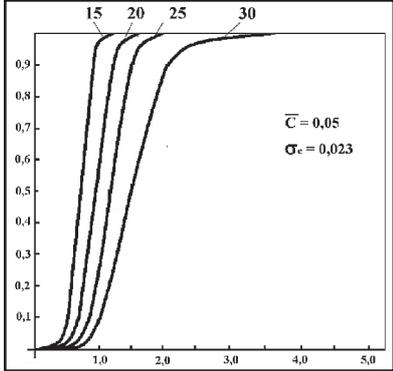
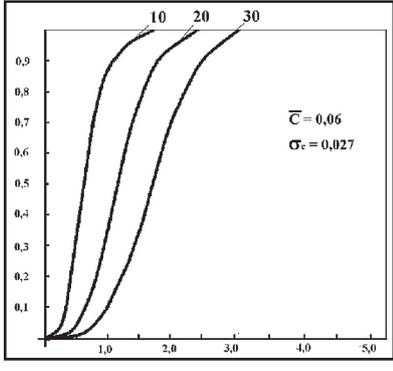
Рис. 1. Номограмма для определения вероятности безотказной работы элементов группы связей ($C = 0,18$ мм/год; $\sigma_c = 0,32$ мм/год)

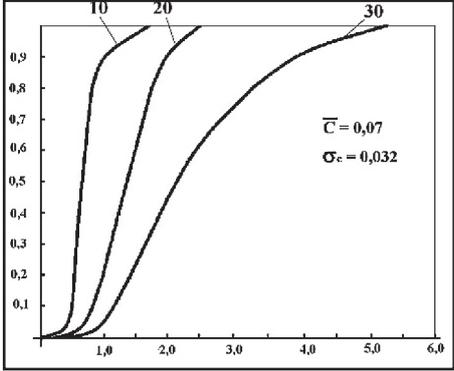
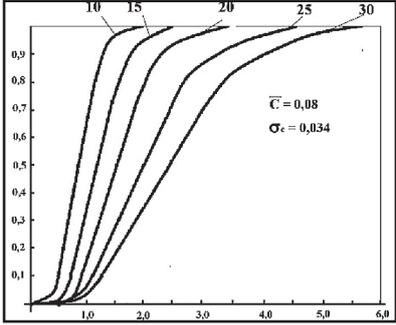
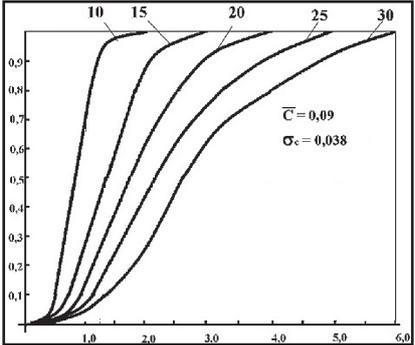
Использование номограммы позволяет определять количество элементов в группе связей, требующих ремонта, устанавливать количество элементов, износ которых с вероятностью 0,95 не превысит допускаемое значение и, следовательно, возможность не измерять остаточные толщины этих элементов, а также проверять безотказность работы сечений корпуса [6]. В табл. 1 показана вероятность безотказной работы элементов в группе связей после заданного числа лет эксплуатации, построенная на основе опубликованных в Правилах [1] данных о скорости изнашивания элементов в группе связей.

Таблица 1

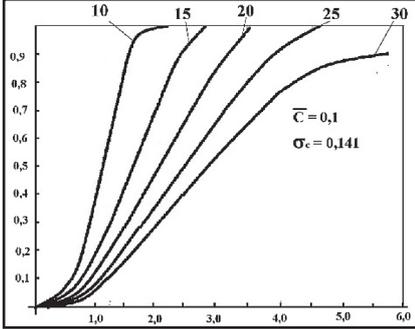
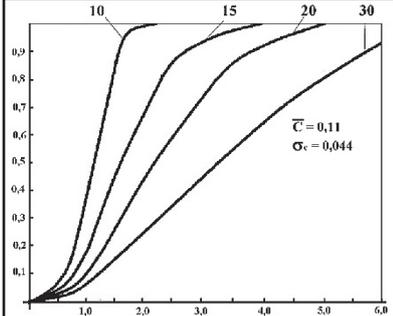
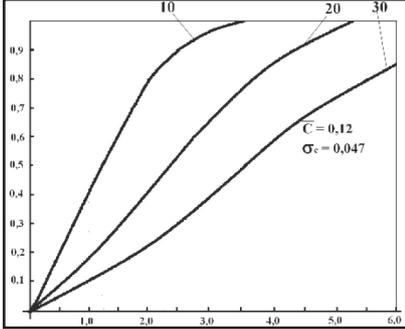
Надежность элементов в группах связей

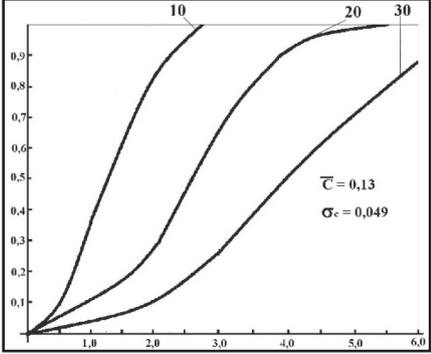
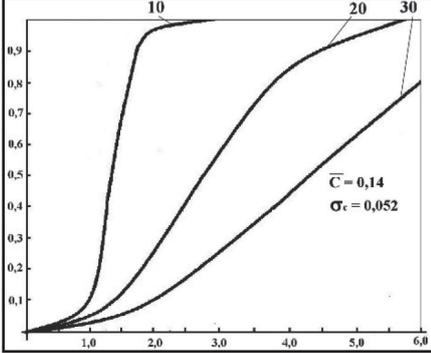
№ п/п.	Вероятность появления износа элемента после заданного числа лет эксплуатации	Группы связей
1	2	3
1		<ol style="list-style-type: none"> 1. Обшивка второго борта грузовых судов, верхний и средний пояса. 2. Обшивка продольных и поперечных переборок, верхний и средний пояса. 3. Набор в грузовых трюмах сухогрузных судов и районе судовых помещений. 4. Комингсы грузовых люков.
2		<ol style="list-style-type: none"> 1. Набор бортов и переборок сухогрузных судов в грузовых трюмах и районах судовых помещений (классы Л, Р, О и М). 2. Настил палубы в районе расположения балластных цистерн (классы Л, Р, О и М). 3. Надводный борт судов (классы Л, Р, О и М) при отсутствии второго борта. 4. Набор бортов и переборок в грузовых трюмах сухогрузных судов и районах судовых помещений. 5. Настил палубы судов классов М-ПР и О-ПР 6. Обшивка второго борта судов, не перевозящих грузы навалом. 7. Обшивка продольных и поперечных водонепроницаемых переборок судов класса О-ПР.

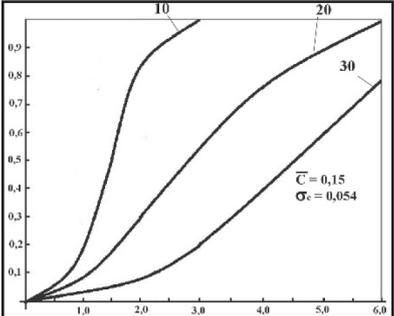
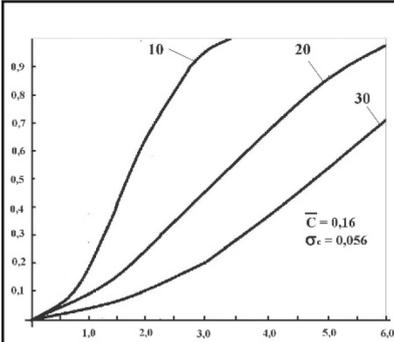
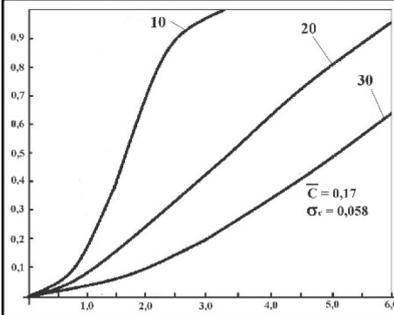
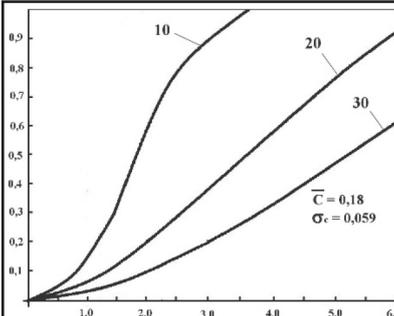
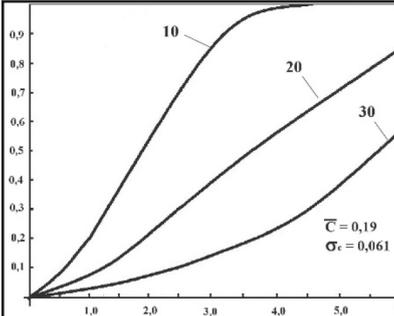
1	2	3
3		<ol style="list-style-type: none"> 1. Листы днищевой обшивки судов классов Л, Р, О, М. 2. Обшивка борта ниже ватерлинии в полном грузу судов классов Л, Р, О, М. 3. Настил второго дна в районе балластных отсеков судов классов Л, Р, О, М. 4. Обшивка второго борта грузовых судов, нижний пояс в районе балластных отсеков судов классов Л, Р, О, М. 5. Обшивка водонепроницаемых переборок, нижний пояс судов классов Л, Р, О, М. 6. Вертикальный киль, днищевые стрингеры, флоры и продольные балки днища при отсутствии второго дна судов классов Л, Р, О, М. 7. Вертикальный киль, днищевые стрингеры, флоры и продольные балки днища в отсеках двойного дна, не предназначенных для заполнения. 8. Палубный настил в районе расположения балластных цистерн судов классов М-ПР и О-ПР. 9. Борт при отсутствии второго борта судов классов М-ПР и О-ПР. 10. Обшивка второго борта судов, не перевозящих грузы навалом класса М-ПР. 11. Водонепроницаемые переборки, верхний и средний пояса судов класса М-ПР.
4		<ol style="list-style-type: none"> 1. Надводный борт при наличии второго борта, цистерны заполнены балластом у судов классов Л, Р, О, М. 2. Днищевая обшивка в районе балластных отсеков. 3. Набор палуб в балластных отсеках. 4. Набор днища и второго дна в балластных отсеках. 5. Бортовая обшивка ниже ватерлинии в полном грузу класс О-ПР. 6. Настил второго дна в районе балластных отсеков в классе О-ПР. 7. Надводный борт, при наличии второго борта, цистерны заполнены балластом, класс О-ПР. 8. Пояса днищевой обшивки судов класса О-ПР. 9. Верхний и средний пояса обшивки второго борта судов класса М-СП, не перевозящих грузы навалом. 10. Обшивка продольных и поперечных водонепроницаемых переборок (верхний и средний пояса) судов класса М-СП. 11. Набор днища в районе грузовых трюмов без настила второго дна и в отсеках второго дна, не предназначенных для заполнения, суда класса О-ПР.

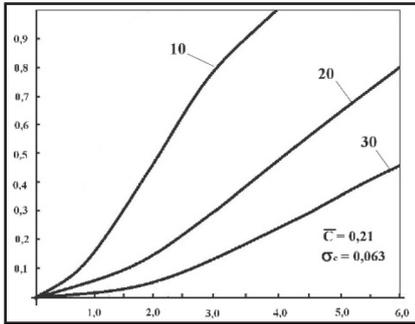
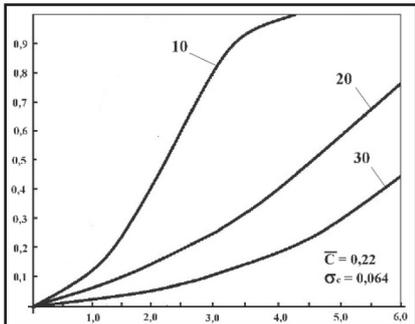
1	2	3
5		<ol style="list-style-type: none"> 1. Обшивка второго борта, верхний и средний пояса судов классов Л, Р, О и М. 2. Переборки между трюмами для навалочных грузов. 3. Палубный настил в районе балластных цистерн судов класса М-СП. 4. Обшивка борта ниже ватерлинии в полном грузу, судов класса М-ПР. 5. Пояса днищевой обшивки судов класса М-СП. 6. Настил второго дна в районе балластных отсеков судов класса М-ПР. 7. Обшивка второго борта, нижний пояс, класс О-ПР. 8. Обшивка водонепроницаемых переборок, нижний пояс судов классов Л, Р, О и М. 9. Набор палуб в балластных отсеках судов класса О-ПР. 10. Набор днища в районе грузовых трюмов судов без второго дна класса М-ПР. 11. Набор днища и второго дна в отсеках, не предназначенных для заполнения судов класса М-ПР.
6		<ol style="list-style-type: none"> 1. Скуловой пояс и примыкающий к нему пояс днищевой обшивки судов класса Л, Р, О и М. 2. Средний пояс переборок между грузовыми танками судов классов Л, Р, О и М. 3. Надводный борт при отсутствии второго борта судов класса М-СП. 4. Обшивка борта на судах класса М-ПР со вторым дном, цистерны заполнены балластом. 5. Днищевая обшивка в районе балластных отсеков судов класса М-ПР. 6. Обшивка второго борта в районе балластных отсеков судов, не перевозящих навалочные грузы. 7. Обшивка продольных и поперечных переборок, нижний пояс. 8. Обшивка переборок между трюмами для навалочных грузов, верхний и средний пояса судов классов О-ПР и М-ПР. 9. Набор днища и второго дна судов класса М-ПР.
7		<ol style="list-style-type: none"> 1. Надводный борт при наличии второго борта, цистерны заполнены топливом. 3. Скуловой пояс и примыкающий к нему пояс днищевой обшивки судов класса О-ПР. 3. Обшивка второго борта судов, перевозящих навалочные грузы класса М-ПР. 4. Переборки между грузовыми танками, средний пояс судов классов М-ПР и О-ПР.

Продолжение табл. 1

1	2	3
8		<ol style="list-style-type: none"> 1. Надводный борт при наличии второго борта ниже ватерлинии в грузу, цистерны заполнены топливом. 2. Днищевая обшивка в районе топливных цистерн и и грузовых танков судов классов Л, Р, О и М. 3. Настил второго дна в районе топливных цистерн. 4. Обшивка топливных цистерн судов классов Л, Р, О и М. 5. Обшивка второго борта в районе топливных цистерн судов классов Л, Р, О и М. 6. Обшивка борта в районе ниже ватерлинии в полном грузу, класса М-СП. 7. Обшивка продольных и поперечных переборок, нижний пояс, класс М-СП. 8. Набор днища и второго дна в районе грузовых трюмов судов класса М-СП. 9. Набор днища и второго дна в отсеках второго дна, в отсеках предназначенных для заполнения, класс М-СП.
9		<ol style="list-style-type: none"> 1. Набор бортов и переборок в балластных отсеках судов класса М-ПР. 2. Днищевая обшивка в районе топливных цистерн и грузовых танков судов классов М-ПР и О-ПР.
10		<ol style="list-style-type: none"> 1. Палубный настил судов-площадок, перевозящих навалочные грузы судов классов Л, Р, О и М. 2. Палубный настил в районе грузовых танков наливных судов классов Л, Р, О и М. 3. Обшивка второго борта, нижний пояс и обшивка переборок между грузовыми танками судов, перевозящих сырую нефть, средний пояс, набор палуб и бортов в грузовых танках и топливных цистернах, набор днища и второго дна в топливных цистернах судов классов Л, Р, О и М. 4. Обшивка второго борта (нижний пояс), продольных и поперечных переборок (нижний пояс), переборки между грузовыми танками судов, перевозящих сырую нефть (средний пояс) судов классов Л, Р, О и М. 5. Набор палуб грузовых танков в районе топливных цистерн кроме судов классов Л, Р, О и М. 6. Набор бортов и переборок в районе грузовых танков и топливных цистерн кроме судов классов Л, Р, О и М. 7. Набор днища и второго дна в районе топливных цистерн судов классов Л, Р, О и М.

1	2	3
		<p>8. Обшивка надводного борта в районе цистерн, заполненных балластом судов класса М-СП.</p> <p>9. Обшивка борта ниже ватерлинии в полном грузу в районе цистерн, заполненных балластом судом класса М-ПР.</p> <p>10. Обшивка днища в районе балластных танков судов класса М-СП.</p> <p>11. Обшивка второго борта судов класса М-СП, перевозящих навалочные грузы.</p> <p>12. Обшивка переборок между грузовыми танками, средний пояс.</p> <p>13. Набор палуб в районе балластных отсеков судов класса М-СП.</p> <p>14. Набор днища и второго дна в балластных отсеках судов класса М-СП.</p>
11		<p>1. Палубный настил судов-площадок, перевозящих навалочные грузы и настил грузовых танков наливных судов классов М-ПР и О-ПР.</p> <p>2. Надводный борт при наличии второго борта, цистерны заполнены топливом, класс М-СП.</p> <p>3. Обшивка второго борта, нижний пояс, класс М-СП.</p> <p>4. Обшивка продольных и поперечных переборок между грузовыми танками, верхний пояс, классы М-ПР и О-ПР.</p> <p>5. Обшивка продольных и поперечных переборок между грузовыми танками, нижний пояс судов класса М-ПР.</p> <p>6. Обшивка переборок между грузовыми танками судов, перевозящих сырую нефть, средний пояс, классы М-ПР и О-ПР.</p> <p>7. Набор палуб в грузовых танках судов классов М-ПР и О-ПР.</p> <p>8. Набор бортов и переборок в грузовых танках и топливных цистернах судов классов М-ПР и О-ПР.</p> <p>9. Набор днища и второго дна в топливных цистернах судов классов М-ПР и О-ПР.</p>
12		<p>1. Днищевая обшивка в районе топливных цистерн и грузовых танков судов класса М-СП.</p> <p>2. Настил второго дна в районе топливных цистерн судов класса М-СП.</p> <p>3. Настил второго дна в трюмах, если предусматривается выполнение грузовых операций грейферами на судах класса М-ПР.</p> <p>4. Обшивка второго борта судов, не перевозящих грузы навалом в районе топливных цистерн.</p> <p>5. Обшивка второго борта судов, перевозящих навалочные грузы, нижний пояс, класс М-ПР.</p> <p>6. Обшивка продольных и поперечных переборок между трюмами для навалочных грузов, нижний пояс, класс М-ПР.</p>

1	2	3
13		<p>Бортовая обшивка ниже ватерлинии в полном грузу, цистерны заполнены топливом, класса М–СП.</p>
14		<ol style="list-style-type: none"> 1. Верхний пояс обшивки продольных и поперечных переборок судов класса М–СП между грузовыми танками. 2. Средний пояс обшивки продольных и поперечных переборок судов класса М-СП, перевозящих сырую нефть. 3. Набор палуб в грузовых танках и топливных цистернах судов класса М-СП. 4. Набор бортов и переборок в грузовых танках и топливных цистернах судов класса М-СП.51. Набор днища и второго дна в топливных цистернах.
15		<ol style="list-style-type: none"> 1. Настил второго дна в трюмах, если предусматривается выполнение грузовых работ грейферами, класс М-СП. 2. Обшивка второго борта судов, перевозящих навалочные грузы, нижний пояс, класс М-СП. 3. Обшивка между трюмами для навалочных грузов, нижний пояс, класс М-СП. 4. Набор бортов и переборок в балластных отсеках.
16		<ol style="list-style-type: none"> 1. Настил палуб в районе грузовых танков наливных судов, перевозящих сырую нефть, классы Р, Л, О и М. 2. Переборки между грузовыми танками судов, перевозящих сырую нефть, классы Р, Л, О и М. 3. Набор палуб, бортов и переборок, ограничивающих грузовые танки судов, перевозящих сырую нефть, классы Р, Л, О и М.
17		<ol style="list-style-type: none"> 1. Набор палуб, набор бортов и переборок грузовых танков судов, перевозящих сырую нефть, классы М-ПР и О-ПР. 2. Палубный настил в районе грузовых танков наливных судов, перевозящих сырую нефть, классы М-ПР и О-ПР. 3. Водонепроницаемые переборки между грузовыми танками судов, перевозящих сырую нефть, классы М-ПР и О-ПР.

1	2	3
18		<ol style="list-style-type: none"> 1. Палубный настил в районе грузовых танков судов, перевозящих сырую нефть. 2. Переборки между грузовыми танками судов, перевозящих сырую нефть, нижний пояс, класс М-СП.
19		<ol style="list-style-type: none"> 1. Переборки между грузовыми танками судов, перевозящих сырую нефть, верхний пояс, класс М-СП. 2. Набор палуб судов, перевозящих сырую нефть, класс М-СП. 3. Набор бортов и переборок и бортов, верхний пояс, судов перевозящих сырую нефть, класс М-СП.

На рис. 2 показано, как изменится вероятность безотказной работы элементов корпуса в зависимости от количества элементов в подгруппе связей (количества элементов в группе связей с одинаковым допустимым износом).

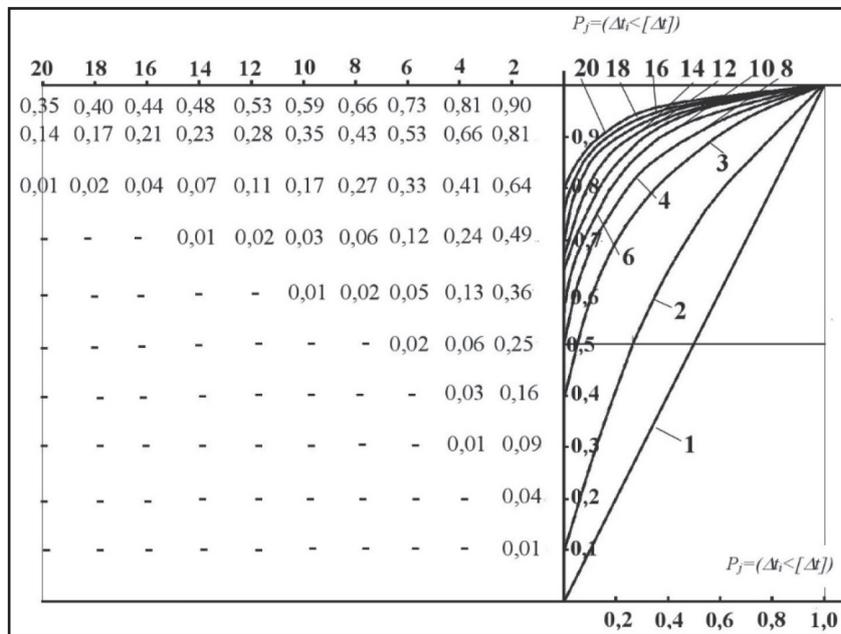


Рис. 2. Вероятность безотказной работы элементов корпуса

В правой части рис. 2 показано получение результата с помощью графиков, в левой части — с помощью таблицы. Расчет вероятности безотказной работы по прогнозу и расчетному износу позволяет отказаться от необходимости измерять каждый элемент, сохраняя при этом требуемый уровень надежности результатов дефектации и устанавливая значение остаточной толщины любого элемента корпуса.

При дефектации делается заключение на основании заполненной табл. 2, включающей определенные участки от носа до кормы. Длина каждого из них равна расстоянию от стыка до стыка обшивки.

Таблица 2

Определение результатов дефектации

Участок № ... (оконечность, переходный район, средняя часть)											
Наименование и номер элемента	Проектная толщина (толщина по Правилам РРР)	Ширина элемента, b , мм	Значения замеров по точкам, мм			Остаточная толщина элемента $t_{ост}$, мм	Допускаемая толщина отдельного элемента (табл. 3.6.5 ПОСЭ)* $t_{ост}^{min}$, мм	Допускаемая средняя остаточная толщина элементов в группе связей (табл. 3.6.3 ПОСЭ) $t_{ост}$, мм	Характеристика b_i ($t_{ост} - t_{ост}$)	Техническое состояние	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Листы обшивки днища $\bar{C} = 0,09$ мм/год; $\sigma_c = 0,037$ мм/год; $v = 0,51 - 1,05\bar{C}$; $\sigma_c = v\bar{C}$											
...
...
...

* ПОСЭ — Правила освидетельствования судов в эксплуатации.

В заголовке указывается номер участка, начальный и конечный шпангоуты, район корпуса (носовая оконечность, переходный район, средняя часть). В столбце 1 табл. 2 указываются наименование и номер каждого элемента на этом участке. В столбце 2 указывается проектная толщина элемента или толщина по Правилам РРР, в мм. В столбце 3 указывается ширина элемента в м. В столбцах 4–6 указываются результаты измерения в трех точках на элементе корпуса в мм или отработанный срок элемента на момент дефектации (T_i лет), количество элементов в подгруппе связей n' , имеющих одинаковый допустимый износ, коэффициент m' , определяемый в зависимости от n' :

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

Строки для элементов в столбцах 4–6 табл. 2 заполняются по итогам второго этапа измерений, выполнение которого может потребоваться в случае выполнения условия:

$$t_{при} - [t_{ост.i}] > \bar{C}\tau_i, \quad (4)$$

где $t_{при}$ — проектная толщина из столбца 2, мм;

$[t_{ост.i}]$ — допускаемая остаточная толщина элемента из столбца 8;

\bar{C} — средняя скорость изнашивания в группе связей;

τ_i — отработанный срок элемента на момент дефектации.

В столбце 7 табл. 2 указывается остаточная толщина $t_{ост.i}$, мм, полученная как средняя из результатов измерений, представленных в столбцах 4, 5 и 6, или остаточная толщина $t'_{ост.i}$, рассчитанная по формуле

$$t'_{ост.i} = t_{при} - \bar{C}(1 + m'\sigma_c)\tau_i, \quad (5)$$

где \bar{C} и σ_c — характеристики скоростей изнашивания связей в группе.

В столбце 8 указывается допускаемая остаточная толщина элемента корпуса по п. 3.6.5 ПОСЭ $[t_{ост}^{min}]$, мм. В столбце 9 указывается допускаемая средняя остаточная толщина элемента $[t_{ост}]$, мм,

в группе связей (п. 3.6.3 ПОСЭ). В столбце 10 табл. 2 дается характеристика, показывающая, насколько площадь сечения элемента превосходит или меньше допускаемого среднего значения. Сумма этих характеристик показывает, в какой степени обеспечена площадь сечения группы связей. Если сумма характеристик отрицательная, то полученная площадь поперечного сечения группы связей должна быть добавлена (с изменением знака на «+» к расчетному значению площади поперечного сечения), чтобы площадь сечения группы связей удовлетворяла требованиям ПОСЭ. Этот недостаток площади сечения при ремонте корпуса может быть компенсирован заменой наиболее изношенных листов, в том числе тех, которые удовлетворяют требованиям ПОСЭ, или подкреплением корпуса в рассматриваемом сечении с последующей проверкой прочности прямым расчетом.

Прямой расчет прочности может показать, что последняя обеспечена даже без подкрепления. Если среди листов в рассматриваемом сечении имеются листы, толщина которых получена расчетом по прогнозу, то она может оказаться существенно меньше полученной после ее измерения. Измерение толщины этих листов в сечении, где сумма характеристик была отрицательной, может изменить знак суммы на положительный, и, следовательно, необходимость ремонта в этом сечении отпадает.

В столбце 11 табл. 2 указывается заключение о техническом состоянии элемента и необходимости его ремонта. Заключение дается для каждого элемента на основании сравнения значений остаточной толщины $t_{\text{ост}}$ (мм) в столбце 7 с допускаемым значением в столбце 8. Если остаточная толщина больше допускаемой, то элемент «годен», если меньше — «не годен» и требует ремонта. Если в столбце 10 сумма характеристик отрицательная, то в столбце 11 оценка технического состояния — «не годен». В столбце 12 в строках, где ранее была указана оценка технического состояния «не годен», приводится номер примечания, под которым после таблицы для рассматриваемого участка записывается способ устранения каждого дефекта до восстановления оценки «годен».

Результаты и обсуждение (Results and Discussions)

Результатом выполненного исследования является вероятностный подход определения уровня технического состояния корпуса судна, гарантирующий надежную и безопасную эксплуатацию (с вероятностью 0,95–0,99 безотказной работы корпуса судна в течение периода его работы до следующего очередного освидетельствования). Доказано, что использование статистических данных о скоростях изнашивания и стандартах данных скоростей позволяет прогнозировать уровень общей и местной прочности с достаточной достоверностью. Использование нового подхода к дефектации корпусов речных судов позволит существенно сократить затраты судовладельца как на обследование корпусных конструкций, так и на ремонт за счет уменьшения времени нахождения судна в доке (на слипе). Разработаны аналитические зависимости для расчета вероятности безотказной работы отдельных связей корпуса, созданы номограммы и графики для удобства пользователя (специалиста, оформляющего результаты замеров дефектов), представлена таблица для оформления результатов дефектации.

Несмотря на то, что оптимальная дефектация корпусов судов снижает ее трудоемкость и обеспечивает существенную экономию средств судовладельца, данному вопросу в 2010–2022 гг. не уделялось достаточно внимания (имеется в виду комплексный подход, результатом реализации которого является новая инструкция по дефектации корпусов речных судов). В настоящее время речные суда и суда смешанного плавания, поднадзорные Речному классификационному обществу, подвергаются подетальной дефектации по аналогии с судами, находящимися в ведении Российского морского регистра судоходства [1], [12], [13].

В работах авторов данной статьи [2], [3], [8], а также П. А. Бимберекова, О. К. Зяблова [12], [13], Т. О. Огневой, Г. В. Бойцова и П. В. Зиновьева [14]–[16] было доказано, что использование вероятностного подхода и, соответственно, сокращение числа измерений корпусных конструкций при освидетельствовании не приведет к снижению прочности и эксплуатационной надежности

судна. Всеми указанными специалистами было также изучено влияние качественной дефектации на несущую способность пластин, ребер жесткости, корпуса в целом как на дату выполнения расчетов, так и через несколько лет эксплуатации судна [4], [8], [14].

Исследование вопросов совершенствования процесса дефектации с целью выполнения качественного ремонта судов и их последующей безотказной эксплуатации нашло отражение в работах Т. Ю. Пашеевой, О. К. Зяблова, Г. В. Бойцова и С. Н. Гирина [17]–[20]. Однако не было удобного практического пособия для сотрудников отделов дефектации как в части выполнения расчетов, так и в вопросе уменьшения числа измерений дефектов корпусных конструкций.

Заключение (Conclusion)

Правилами [1] предусматривается способ определения технического состояния корпуса судна, предполагающий измерение остаточной толщины каждого элемента корпуса, а также обнаружение и измерение параметров всех дефектов корпуса судна. При таком подходе, безусловно, обеспечивается надежность получаемых результатов. Вместе с тем высокий уровень надежности сопровождается большими затратами ввиду следующих причин: длительный простой и необходимость оплаты судоподъемного сооружения; необходимость обеспечения доступа к элементам корпуса в труднодоступных местах и восстановление конструкций в местах измерений этих элементов; необходимость измерения остаточных толщин элементов корпуса, износ которых явно меньше допустимого значения. РРС лояльно относится к наличию указанных недостатков, так как они оплачиваются судовладельцем, который заинтересован в сокращении стоимости и продолжительности ремонта судна.

Очевидным фактом является то, что в первые годы службы вероятность появления отказов элементов корпуса судна меньше, что учитывается Правилами РРР (без серьезных обоснований) путем сокращения объема измерений остаточных толщин элементов корпуса. Предлагаемый способ выполнения дефектации позволяет с использованием теории вероятности и статистических данных о скоростях изнашивания групп связей обосновать количество обследуемых элементов во время дефектации при сохранении необходимого уровня надежности получаемого результата.

На основании представленных в статье материалов, в ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова готовится новая инструкция по дефектации корпусов судов речного флота. Предварительные проверки, выполненные на самоходных шаландах пр. Р 32 и танкерах типа «Волгонефть» пр. 1577, позволяют сократить объем измерений остаточных толщин элементов корпуса на 15–20 % в основном за счет измерений в труднодоступных местах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила Российского речного регистра : в 5 т. — М., 2019.
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. Чистов В. Б. Анализ влияния погрешностей при определении остаточных толщин на прочностные характеристики пластин обшивок и настилов корпусов судов / В. Б. Чистов, А. Б. Красюк, М. Г. Пеликова // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2. — С. 58–66.
6. Красюк А. Б. Оценка влияния погрешностей в определении остаточных толщин на несущие характеристики балок набора корпусов судов / А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. — 2013. — № 1 (10). — С. 115–130.

7. Красюк А. Б. Влияние погрешностей в определении остаточных толщин элементов корпусных конструкций на общую прочность корпуса судна / А. Б. Красюк // Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 2 (21). — С. 70–77.

8. 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.

9. Бураковский Е. П. Эксплуатационная прочность судов / Е. П. Бураковский, Ю. И. Нечаев, П. Е. Бураковский, В. П. Прохнич. — Изд-во «Лань», 2021. — 371с.

10. Бураковский Е. П. Совершенствование нормирования параметров эксплуатационных дефектов корпусов судов / Е. П. Бураковский. — Калининград: КГТУ, 2011. — 339 с.

11. Бураковский Е. П. Управление и принятие решений при контроле эксплуатационной прочности судна на основе современной теории катастроф / Е. П. Бураковский, Ю. И. Нечаев, П. Е. Бураковский, В. П. Прохнич // Морские интеллектуальные технологии. — 2013. — № 1 (19). — С. 7–14.

12. 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.

13. Зяблов О. К. Сравнительный анализ правил РРР и РМРС в области освидетельствований и дефектации судов / О. К. Зяблов, А. Н. Науменко // Тр. 19-го международного научно-промышленного форума «Великие реки-2018»: материалы науч.-метод. конф. проф.-преп. сост., аспирантов, специалистов и студентов. — Н. Новгород: Волжский гос. ун-т водного транспорта, 2018.

14. 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.

15. Бойцов Г. В. Вероятностные методы в расчетах прочности и надежности судовых конструкций / Г. В. Бойцов, Г. Б. Крыжевич. — СПб.: ЦНИИ им. акад. А. Н. Крылова, 2007. — 263с.

16. Зиновьев П. В. Методика оценки достоверности результатов замеров остаточных толщин при дефектации судовых конструкций / П. В. Зиновьев, В. А. Компанец, О. Э. Суров // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2015. — № 40–41. — С. 41–48.

17. Пашеева Т. Ю. Организация судоремонта как важный фактор повышения качества ремонтов судов / Т. Ю. Пашеева, Л. С. Баева // Наука — производству. Материалы международной научно-практической конференции. — Мурманск: Мурманский государственный технический университет, 2016. — С. 279–284.

18. Зяблов О. К. Автоматизированное формирование отчёта по дефектации 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.

19. Бойцов Г. В. О критериях нормирования местной прочности / Г. В. Бойцов // Судостроение. — 1979. — № 1. — С. 5–10.

20. 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.

REFERENCES

1. Rossiiskii Rechnoi Registr: Pravila. M.: Moskva, 2019.
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. Chistov, V. B., A. B. Krasnyuk, and M. G. Pelikova. “Analysis of errors impact on the strength characteristics of the ship’s hull plates and decks in determination of residual thickness.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2 (2013): 58–66.

6. Krazyuk, A. B., and V. B. Chistov. "Otsenka vliyaniya pogreshnoy v opredelenii ostatochnykh tolshchin na nesushchie kharakteristiki balok nabora korpusov sudov." *Informatsionnye tekhnologii i sistemy: upravlenie, ekonomika, transport, pravo* 1(10) (2013): 115–130.

7. Krazyuk, A. B. "Influence of errors in the determination of the residual thickness of elements of hull structures on the total strength of the ship's hull." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(21) (2013): 70–77.

8. 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

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

10. Burakovskii, E. P. *Sovershenstvovanie normirovaniya parametrov ekspluatatsionnykh defektov korpusov sudov*. Kaliningrad: KGTU, 2011.

11. Burakovskii, E.P., Yu. I. Nechaev, P. E. Burakovskii, and V. P. Prokhlich. "Upravlenie i prinyatie reshenii pri kontrole ekspluatatsionnoi prochnosti sudna na osnove sovremennoi teorii katastrof." *Marine Intelligent Technologies* 1(19) (2013): 7–14.

12. 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.

13. 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 "Velikiye reki-2018"*. Nizhnii Novgorod: Volzhskii gosudarstvennyi universitet vodnogo transporta, 2018.

14. Ogneva, V.V., and E. G. Burmistrov. "Features of forecasting regarding ship hull wear when estimating shiprepair scope." *Sudostroenie* 5(816) (2014): 46–49.

15. Boitsov, G. V., and G. B. Kryzhevich. *Veroyatnostnye metody v raschetakh prochnosti i nadezhnosti sudovykh konstruksii*. SPb.: TsNII im akad. A. N. Krylova, 2007.

16. Zinov'ev, P. V., V. A. Kompanets, and O. E. Surov. "Metodika otsenki dostovernosti rezul'tatov zamerov ostatochnykh tolshchin pri defektatsii sudovykh konstruksii." *Nauchno-tekhnicheskii sbornik Rossiiskogo morskogo registra sudokhodstva* 40–41 (2015): 41–48.

17. Pasheeva, T. Yu., and L. S. Baeva. "Organizatsiya sudoremonta kak vazhnyi faktor povysheniya kachestva remontov sudov." *Nauka-proizvodstvu. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Murmansk: Murmanskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2016. 279–284.

18. 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.

19. Boitsov, G. V. "O kriteriyakh normirovaniya mestnoi prochnosti." *Sudostroenie* 1 (1979): 5–10.

20. 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.

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

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,
kaf_mnt@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

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,
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

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

*Статья поступила в редакцию 27 сентября 2022 г.
Received: September 27, 2022.*