

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2020.1\(479\).1](https://doi.org/10.15589/znp2020.1(479).1)
УДК 629.021

DETERMINATION OF LONG-TERM DESIGNS OF SMALL AND SPEED VESSELS USING THE WEIBULL DISTRIBUTION

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ КОНСТРУКЦИЙ МАЛЫХ И СКОРОСТНЫХ СУДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЙБУЛЛА

ВИЗНАЧЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ МАЛИХ І ШВИДКІСНИХ СУДІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РОЗПОДІЛУ ВЕЙБУЛЛА

Alla A. Hrabenko
111016@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2841-1659

Yuriy N. Korobanov
yuriy.korobanov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-1017-3939

Anatoliy I. Kuznetsov
anatolii.kuznetsov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-5149-3181

А. А. Грабенко,
аспирант

Ю. Н. Коробанов,
докт. техн. наук

А. И. Кузнецов,
канд. техн. наук

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова, г. Николаев

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв

Abstract. Purpose. The purpose of this article is overview of reliability, durability and viability of ship construction purposes, as well as their individual nodes, arises in connection with a wide variety of types of vessels. For small vessels, taking into account their characteristics of interaction with the environment, if there is an excess durability resource compared to the planned life cycle, it becomes possible to simplify structures in the areas of possible stress concentrators. It is necessary to create the right tool for assessing the durability of structures. The rapprochement of the boundaries of the resource of durability of structures and the planned life cycle will lead to optimization of hull structures, simplification of structures and minimization of their mass.

Method. The analysis is based on the results of experimental and theoretical studies obtained by different authors at different times. Particular attention is paid to the applicability of the analyzed studies to the features of operation of small and high-speed vessels.

Results. It is established that the fatigue curves of typical joints and discontinuous bonds, effective coefficients of stress and strain concentration, distribution of permissible and dangerous stresses, and also their availability can serve as a basis for determining the expected resource of hull structures of small and high-speed vessels. Based on this research, it is possible to create an algorithm for assessing the durability of structures of small vessels.

Scientific novelty. The question arises as to the ways of assessing the reliability and durability of ship structures of small and high-speed vessels. It is possible to create the correct algorithm for assessing the durability of the hull structures of the ships in question.

Practical importance. The distribution of the Weibull law is widely used in problems of durability and reliability of hull structures, as well as in assessing their viability. It is assumed that the reliability, durability of small and high-speed vessels depends on the life-time of interrupted connections, some typical nodes of connection of individual structural elements, and also on the quality of technological processes. A correct assessment of the durability of the hull structures under consideration in comparison with the life cycle of the vessel can allow the simplification of the hull structures in the areas of intermittent communications, improving the performance of the designed vessel.

Key words: durability of intermittent connections; connections of individual structural elements; Weibull distribution.

Анотація. Мета. Робота має оглядовий характер, оскільки питання надійності, довговічності та життєздатності конструкцій суднового призначення, а також їх окремих вузлів виникає стосовно найрізноманітніших типів суден. Для малих суден з урахуванням їх особливостей взаємодії із зовнішнім середовищем, за наявності надлишкового ресурсу довговічності порівняно із запланованим життєвим циклом з'являється можли-

вість спрощення конструкцій в районах можливих концентраторів напружень. Необхідне створення коректного інструменту оцінювання довговічності конструкцій. Зближення меж ресурсу довговічності конструкцій і запланованого життєвого циклу приведе до оптимізації корпусних конструкцій, спрощення конструкцій і мінімізації їх маси.

Методика. За основу аналізу беруться результати експериментальних і теоретичних досліджень, отримані різними авторами в різний час. Особливу увагу приділено можливості застосування аналізованих досліджень щодо особливостей експлуатації малих та швидкісних суден.

Результати. Встановлено, що втомні криві типових з'єднань і переривчастих зв'язків, ефективні коефіцієнти концентрації напружень та деформацій, розподіл допустимих і небезпечних напруг, а також їх забезпеченість можуть служити основою для визначення передбачуваного ресурсу корпусних конструкцій малих і швидкісних суден. На базі дослідження можна створити алгоритм оцінки довговічності конструкцій малих суден.

Наукова новизна. Виникає питання про шляхи оцінювання надійності та довговічності суднових конструкцій малих і швидкісних суден. Можливим є створення коректного алгоритму оцінки довговічності корпусних конструкцій розглянутих суден.

Практична значимість. Розподіл закону Вейбулла досить широко використовується в задачах довговічності та надійності корпусних конструкцій, а також під час оцінювання їх життєздатності. Передбачається, що надійність, довговічність малих і швидкісних суден залежать від життєвого ресурсу переривчастих зв'язків, деяких типових вузлів з'єднання окремих конструктивних елементів, а також від якості технологічних процесів. Правильне оцінювання довговічності розглянутих корпусних конструкцій порівняно з життєвим циклом судна може дати змогу спростити корпусні конструкції в районах переривчастих зв'язків, підвищити експлуатаційні якості проектуваного судна.

Ключові слова: довговічність переривчастих зв'язків; з'єднання окремих елементів конструкцій; розподіл Вейбулла.

Аннотация. Цель. Работа имеет обзорный характер, поскольку вопрос надежности, долговечности и жизнеспособности конструкций судового назначения, а также их отдельных узлов возникает применительно к самым разнообразным типам судов.

Методика. За основу анализа принимаются результаты экспериментальных и теоретических исследований, полученные разными авторами в разное время.

Результаты. Установлено, что усталостные кривые типовых соединений и прерывистых связей, эффективные коэффициенты концентрации напряжений и деформаций, распределение допускаемых и опасных напряжений, а также их обеспеченность могут служить основой для определения предполагаемого ресурса корпусных конструкций малых и скоростных судов.

Научная новизна. Возникает вопрос о путях оценивания надежности и долговечности судовых конструкций малых и скоростных судов.

Практическая значимость. Распределение закона Вейбулла достаточно широко используется в задачах долговечности и надежности корпусных конструкций, а также при оценивании их жизнеспособности. Предполагается, что надежность, долговечность малых и скоростных судов зависят от жизненного ресурса прерывистых связей, некоторых типовых узлов соединения отдельных конструктивных элементов, а также от качества технологических процессов.

Ключевые слова: долговечность прерывистых связей; соединения отдельных элементов конструкций; распределение Вейбулла.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В практике принятия проектных решений применительно к конструкциям малых и скоростных судов часто возникает потребность оценивания ресурса их жизнедеятельности в составе этого типа судов. Для определения ресурса конструкций, способного обеспечить безопасную жизнедеятельность малых и скоростных судов, используются понятия надежности, долговечности и жизнеспособности. Оценка этих характеристик эксплуатации судов нуждается в знании частоты возникновения эксплуатационных напряжений в разнообразных узловых конструкциях на протяжении всего периода ожидаемого жизненно-

го цикла. Для достижения этой цели анализу должны быть подвержены конструктивные узлы, типовые схемы соединения корпусных деталей. Таким образом, оценка жизнеспособности таких типов судов вызывает особый интерес и может быть оценена вероятностными методами, основываясь на законе распределения Вейбулла [1].

АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В составе корпусных конструкций малых и скоростных судов много связей, ограниченных своей протяженностью или резко изменяющих свое поперечное сечение. В силу массогабаритных харак-

теристик соединений отдельных корпусных деталей оцениванию подлежат также особенности их соединения. Проявление эксплуатационных напряжений основывается на долговременном распределении напряжений, определяемых по результатам мореходных испытаний моделей или натурных судов. Основы теории надежности судовых конструкций изложены в источниках [2; 3]. Долговременное распределение напряжений в конструкциях судового назначения принято описывать законом Вейбулла. Использование этого закона отобрано в работах [2–10].

ВЫДЕЛЕНИЕ РАННЕ НЕ РЕШЕННЫХ ЧАСТЕЙ ОБЩЕЙ ПРОБЛЕМЫ

Необходим алгоритм оценивания долговечности корпусных конструкций малых судов. Создание такого алгоритма возможно на базе исследования.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель статьи заключается в обобщении, систематизации и некоторых уточнениях понятий о надежности и долговечности судовых корпусных конструкций крупнотоннажных судов применительно к малым и скоростным судам при использовании двухпараметрического закона распределения Вейбулла. Особенности его использования посвящена работа.

МЕТОДЫ, ОБЪЕКТ И ПРЕДМЕТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Корпусные конструкции малых и скоростных судов могут существенно отличаться от типовых конструкций, применяемых на большинстве современных транспортных судов. В первую очередь это связано с конфликтом габаритов корпусных конструкций и требуемых размеров внутренних помещений в корпусе судна. Этот конфликт приводит к появлению значительного количества прерывистых связей и достаточно полно раскрыт в работе [13]. Прерывистые

связи приводят к образованию концентраторов напряжений и появлению усталостных разрушений. В связи с этим необходим инструмент оценивания долговечности указанных конструкций. Сближение ресурса долговечности с жизненным циклом судна может привести к упрощению конструкций и смягчению указанного конфликта. Работа посвящена созданию инструмента оценивания ресурса прерывистых связей и других конструкций и узлов малых судов на ранних стадиях проектирования.

ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Малые и скоростные суда имеют множество прерывистых связей и других узловых конструкций, которые перенесены из области крупнотоннажного судостроения. Некоторые из них не имеют актуальности, поскольку для малых и скоростных судов общие изгибные деформации корпуса малозначительны и не накладывают своего влияния на их конструирование. Вместе с тем прерывистые связи и некоторые узловые конструкции, связанные с поперечной прочностью судов, оказывают влияние на долговечность эксплуатации всего судна в целом.

Долговечность характеризуется сроком (временем) надежной службы до полного физического или морального износа с учетом различного вида ремонтных работ. Долговечность может измеряться в различных единицах, а именно в часах, годах, милях, моточасах, но при этом проходит проверку на усталостную прочность, допускаемые напряжения и многоцикловость несимметричного нагружения.

Долговечность может носить номинальный, фактический и оптимальный характер. Номинальная долговечность устанавливается технической документацией и оговаривает срок службы. По истечению этого срока выведение конструкции из эксплуатации практически оправдано. Фактическая



Рис. 1. Общая картина жизненного цикла корпусных конструкций

долговечность определяется сроком службы, который соответствует отказу конструкции, после чего восстановление или невозможно, или нецелесообразно. Оптимальная долговечность соответствует такому сроку эксплуатации, при котором достигается наибольший экономический эффект в конкретных условиях.

Долговечность, безотказность, ремонтпригодность, как и надежность, могут быть описаны распределением Вейбулла при аналитической форме описания закономерностей отказов. Закону Вейбулла хорошо следуют распределения предела упругости ряда металлов, характеристики прочности материалов, усталостная долговечность, наработка до отказа вследствие усталостного разрушения.

Долговечность корпусных конструкций судового назначения определяется долговечностью слабейшего звена из числа конструктивных узлов и соединений отдельных элементов корпуса. Распределение Вейбулла представляет собой специальный вид распределения случайных величин X_w , характеризующихся такой функцией:

$$P_w(\sigma, \mu, b, k) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma - \mu}{b}\right)^k\right] & \text{при } \sigma > \mu; \\ 0 & \text{при } \sigma \leq \mu, \end{cases} \quad (1)$$

где k – параметр формы кривой распределения; b – параметр масштаба; μ – параметр сдвига.

Семейство распределений (1) названо именем В. Вейбулла, впервые использовавшего его для аппроксимации экспериментальных данных о прочности стали на разрыв при усталостных испытаниях и предложившего методы оценивания параметров распределения. Частными случаями распределения Вейбулла являются экспоненциальное распределение при $k = 1$ и рэлеевское при $k = 2$ (рис. 2).

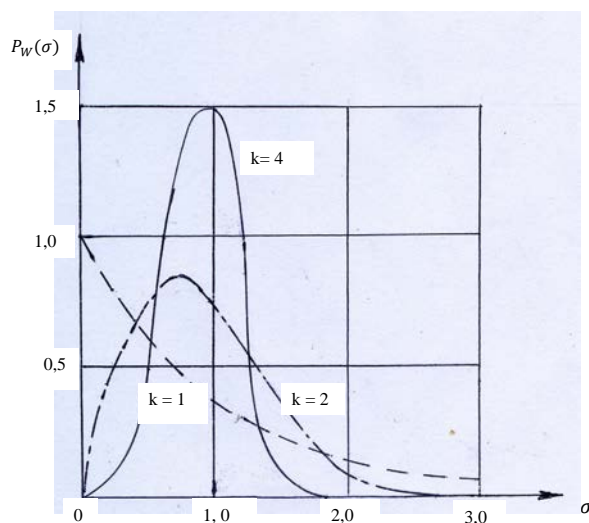


Рис. 2. Распределение Вейбулла при различных параметрах k

Одной из числовых характеристик распределения вероятностей является квантиль. Для действительной случайной величины X с функцией распределения $F(x)$ квантилем порядка q (уровня) принято называть число Kw , при котором $F(Kw) \leq q, F(Kw + 0) \geq q$, где $0 < q < 1$. Знание квантилей для характерного уровня q позволяет судить о виде функции распределения. При $\mu = 0$ квантиль уровня q равен:

$$Kw = \sigma[-\ln(1 - q)]^{1/k},$$

а выражение (1) приобретает двухпараметрический вид:

$$P_w(\sigma, b, k) = \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{b}\right)^k\right]. \quad (2)$$

Для непрерывной, монотонной функции $F(x)$ квантиль Kw является единственным решением уравнения $F(Kw) = q$. Другие числовые характеристики распределения Вейбулла, такие как математическое ожидание и дисперсия, имеют такие выражения:

$$EX_w = \mu + b\Gamma\left(\frac{1}{k} + 1\right); \quad (3)$$

$$DX_w = b^2 \left[\Gamma\left(\frac{2}{k} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{k} + 1\right) \right], \quad (4)$$

где $\Gamma(x)$ гамма – функция.

Коэффициент вариации асимметрии и эксцесс не зависят от b , что облегчает их табулирование и создание дополнительных таблиц для получения оценок параметров распределения (1). В источнике [1] приведены вспомогательные таблицы для вычисления функции распределения Вейбулла.

Еще одной числовой характеристикой распределения вероятностей случайной величины является мода. При $k \geq 1$ распределение Вейбулла унимодальное, то есть одновершинное. Точка x_m называется модой, принадлежащей максимуму распределения $p(x)$, для которой выполняется такое условие: $p_m \geq p_{m-1}$ и $p_m \geq p_{m+1}$. Мода для распределения Вейбулла определяется таким выражением:

$$M_w = b(k - 1)^{1/k}, \quad (5)$$

а функция опасности отказов определяется таким выражением:

$$\gamma(\sigma) = \frac{k \sigma^{k-1}}{b^k}. \quad (6)$$

Определение параметров b и k производится методом максимального правдоподобия. Метод основывается на предположении, что распределение корпусных элементов, выведенных из эксплуатации по результатам ремонта, и распределение отказавших

элементов не зависимы между собой, а соответствуют одному закону. В данном случае речь идет о законе Вейбулла, параметры которого пока неизвестны. Для определения оценки параметров используется функция максимального правдоподобия:

$$G = \sum_{i=1}^m \ln P_W(\sigma_T, b, k) + \sum_{j=1}^n \ln[1 - P_W(\sigma_B, b, k)],$$

где σ_T и σ_B – напряжения предела текучести и прочности материала; m и n – число конструктивных элементов, подвергнутых ремонту (восстановлению) и число усталостных отказов. Параметры закона Вейбулла определяются с учетом решения дифференциальных уравнений в частных производных вида:

$$\frac{\partial G}{\partial b} = 0; \frac{\partial G}{\partial k} = 0.$$

Оценивание параметров по методу квантилей приводит к более простому по сравнению с методом максимального правдоподобия. Поскольку для оценивания долговечности судовых корпусных конструкций принято использовать двухпараметрический закон Вейбулла (2) при $\mu = 0$, совместная асимптотическая эффективность параметров b и k по методу квантилей максимальна и равна 0,64 при использовании квантилей уровня 0,24 и 0,93.

Как основу оценки долговечности конструкций, а также их надежности принято использовать сравнительный анализ проектируемых конструкций, уже хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатации. В основу такого анализа положена гипотеза линейного суммирования усталостных повреждений, а также критерий разрушения материала корпусных конструкций при циклическом нагружении. Согласно теории линейного суммирования усталостных повреждений наступившее повреждение, вызванное данным циклом, зависит и от предыдущих циклов нагружения, поэтому повреждения текущего цикла суммируются с повреждениями, вызванными предыдущими циклами нагружения. Критерий разрушения материала корпуса судна при циклическом нагружении имеет такой вид:

$$N(\sigma) = N_0 \left(\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_H} \right)^m, \quad (7)$$

где $N(\sigma)$ – фактическое количество нагружений конструкции; N_0 – число циклов соответствующего пределу усталости при симметричном циклическом испытании; σ_{-1} – предел выносливости материала, соответствующий симметричному циклическому нагружению; σ_H – номинальные (средние) напряжения. Параметр m лежит в пределах от 6 до 12. При $m = 6$ $\sigma_T = 400$ МПа и при $\sigma_T = 240$ МПа $m = 8$, а его величина определяется экспериментально.

Обычно при испытании образцов на усталость используется симметричное циклическое нагруже-

ние. В судовых конструкциях на тихой воде следует учитывать возникающие при этом напряжения σ_0 . Тогда циклы нагружения судовых конструкций могут быть асимметричными. Чтобы учесть асимметричность нагружения конструкций судового корпуса, используется зависимость Гудмана. Для усталостных напряжений σ_e при несимметричном усталостном нагружении имеем:

$$\sigma_e = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\gamma \sigma_0}{\sigma_B} \right), \quad (8)$$

где γ – коэффициент доверительности, который лежит в пределах $0,3 \leq \gamma \leq 0,5$.

С использованием (7), (8) долговечность T конструкций судового назначения можно определить посредством такой зависимости:

$$T = \frac{T_e N_U \sigma_U^m}{a^m \int_{\sigma_U}^{\sigma_B} \sigma_a^m f(\sigma_a) d\sigma_a}, \quad (9)$$

$$\text{где } a = \frac{1}{1 - \frac{|\sigma_0|}{\sigma_B}};$$

σ_0 – напряжения в корпусе судна на тихой воде; σ_B – предел прочности материала корпуса; T_e – эффективный период нагружения корпусных конструкций; σ_a – амплитуда циклических напряжений; σ_U – амплитуда напряжений и число циклов, соответствующее усталостному повреждению, $f(\sigma_a) d\sigma_a$ – вероятность того, что σ_a находится в интервале $\sigma_a + d\sigma_a$, m – параметр, отражающий падение напряжений по мере возрастания числа циклов нагружения N . Этот параметр принимается постоянным для каждого конкретного материала.

Во многих литературных источниках высказываются соображения о том, что оценивание состояния конструкций при их проектировании возможно на основе усталостной долговечности. В частности, в источнике [2] описана методика, предложенная В.В. Козляковым. Она посвящена расчетному определению допускаемых коэффициентов концентрации напряжений, близких по конструктивным признакам узлов и соединений отдельных элементов. Выводы формируются на основе сопоставления с хорошо себя зарекомендовавшими эталонными конструктивными решениями.

Общая структура методики построена на таких допущениях:

- статистика внешнего нагружения судового корпуса представляется в виде двухпараметрического закона Вейбулла (2);
- накопление усталостных повреждений соответствует гипотезе линейного суммирования;
- допустимое повышение напряжений в конструкциях проектируемого судна сравнивается с подобными напряжениями эталонного судна.

Параметры закона Вейбулла для проектирования корпусных конструкций судна предлагается определять по предполагаемым рейсам и вероятности действия на судно волновых условий в различных акваториях мирового океана. Расчетным состоянием конструкций судового назначения считается разрушение материала в зоне концентрации напряжений.

За основу жизнедеятельности судовой конструкции принимается $N(\sigma)$, то есть фактическое количество нагружений конструкции согласно выражению (7). При этом учитывается повреждающее влияние средних (номинальных) напряжений в форме (8) и теоретического коэффициента концентрации напряжений K_t . Тогда вместо (7) с учетом (8) можно записать так:

$$N(\sigma) = N_0 \left(\frac{\sigma_e}{K_t \sigma_H} \right)^m. \quad (10)$$

Если гипотезу линейного суммирования повреждений, определяющую долговечность конструкции T можно записать в таком виде:

$$T = \frac{T_e}{\int_{\sigma_{-1}}^{\sigma_B} \frac{P(\sigma)}{N(\sigma)} d\sigma}, \quad (11)$$

то $P(\sigma)$ – плотность распределения номинальных (средних) напряжений, получаемая дифференцированием выражения (2), будет составлять:

$$P(\sigma) = -k \sigma_H^{k-1} \exp \left[-\frac{\sigma_H}{b^2} \right]^k. \quad (12)$$

Подставляя (10) и (12) в (11) с учетом (9), методика В.В. Козлякова предполагает получить решение по определению долговечности судовых конструкций:

$$T = \frac{T_e N_0 \left(\frac{\sigma_e}{b} \right)^m}{\Gamma \left(1 + \frac{m}{k} \right) \left[\rho(\chi_e^2, n) - \rho(\chi_{max}^2, n) \right]} \quad (13)$$

с использованием табулированных функций:

$\Gamma \left(1 + \frac{m}{k} \right)$ – полная гамма – функция;

$\rho(\chi_e^2, n), \rho(\chi_{max}^2, n)$ – функции распределения Пирсона;

$$\chi_e = 2 \left(\frac{\sigma_e}{b} \right)^k; \chi_{max} = 2 \left(\frac{\sigma_{max}}{b} \right)^k; n = 2 \left(1 + \frac{m}{k} \right);$$

$\sigma_{max} = \sigma_B$ – предел прочности материала.

Выражение (13) дополняется расчетными оценками долговременных распределений внешних сил для судов, плавающих в различных районах мирового океана. На этом основании сравниваются относительные моменты сопротивления палуб эталонного и проектируемого суден. Результатом методики является зависимость, позволяющая определять допусти-

мый коэффициент концентрации напряжений в таком виде:

$$K_t = K_{t0} \left(\frac{z_{en}}{z_i} \right) \bar{W} \bar{r}_{eq} f \left(\frac{2x}{L} \right) \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{B0}} \right)^{0,34}, \quad (14)$$

где изменение номинальных напряжений по длине судна определено отношением $\frac{\sigma_{HM}}{\sigma_{H0}} = f \left(\frac{2x}{L} \right)$; z_{en}, z_i – аппликаты верхней палубы эталонного и проектируемого узла относительно нейтральной оси; \bar{W} – относительный момент сопротивления палубы; r_{eq} – амплитуда волновой поверхности, способная привести к усталостным повреждениям; $\left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{B0}} \right)^{0,34}$ – поправка на усталостное сопротивление проектируемых конструкций по отношению к эталонам. Если, например, эталонные конструкции имеют предел прочности $\sigma_{B0} = 400$ МПа, а для проектируемых конструкций σ_B используется иная величина, то отношение пределов усталости при симметричном циклическом нагружении проектируемой конструкции σ_{-1} и эталонной σ_{-10} выдерживается такое соотношение:

$$\frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-10}} = \left(\frac{\sigma_B}{\sigma_{B0}} \right)^{0,34}.$$

Для оценивания допускаемых напряжений отдельных узлов корпусных конструкций при их проектировании предложена методика Энга и Мюнзе. Средняя долговечность таких конструкций определяется выражением (10). Для оценки потенциального усталостного повреждения при нерегулярном нагружении используется гипотеза линейного суммирования в соответствии с выражением (11). Мера усталостного повреждения D определяется математическим ожиданием по такому выражению:

$$M[D] = N \int \frac{p(\sigma_H)}{N(\sigma_H)} d\sigma_H. \quad (15)$$

При расчетной долговечности она приравнивается единице. Тогда из выражения (15) с учетом формулы (7) можно получить:

$$M[D] = \left(\frac{N}{N_0 \sigma_{-1}^m} \right) \int \sigma_H^m p(\sigma_H) d\sigma_H = 1, \quad (16)$$

откуда:

$$N = \frac{N_0 \sigma_{-1}^m}{\int \sigma_H^m p(\sigma_H) d\sigma_H} = \frac{C}{M[\sigma_H^m]}, \quad (17)$$

где $M[\sigma_H^m]$ – математическое ожидание номинальных напряжений σ_H^m , которое можно выразить через амплитуду эквивалентного циклического нагружения σ_{Σ} :

$$\sigma_{\Sigma} = (M[\sigma_H^m])^{1/m}. \quad (18)$$

Наибольшее допускаемое напряжение проектируемой судовой конструкции выражается через напря-

жения σ_N , которые соответствуют расчетной усталостной долговечности узла $N = 10^8$:

$$\sigma_{расч}^{max} = \sigma_N \xi R_F, \quad (19)$$

где ξ – показатель возможной перегрузки конструкции по сравнению с максимальными напряжениями (19) в соответствии двухпараметрическому закону распределения Вейбулла (2); R_F – показатель надежности оценки возможной перегрузки. Показатель перегрузки определяется таким выражением:

$$\xi = \frac{\sigma_{max}}{(M[\sigma_H^m])^{1/m}}, \quad (20)$$

где ξ – характеристика перегрузки, которая может быть определена через гамма-функцию $\Gamma(1 + \frac{m}{k})$; k – параметр распределения (2). Если μ_F – параметр, определяющий рассеяние долговечности при усталостных испытаниях относительно некоторого среднего числа циклов \bar{N} , тогда:

$$\mu_F = \frac{\bar{N} - N_0}{N_a - N_0} = \frac{\Gamma(1 + \frac{1}{b})}{[P(N)]^{1/b}}, \quad (21)$$

где b – параметр масштаба распределения (2), $P(N)$ – плотность вероятности усталостного разрушения на испытаниях.

Выражение (21) позволяет определить показатель надежности оценки возможной перегрузки R_F :

$$R_F = \left(\frac{1}{\mu_F}\right)^{1/m}.$$

Алгоритм использования описанной методики зависит от типа судна, условий его эксплуатации, по которым принимаются значения параметра k распределения Вейбулла. Подготовленные узловые конструкции рассматриваются с позиций надежности сварных элементов, формирующих тот или иной узел. По результатам усталостных испытаний каждого конкретного узла судовой конструкции определяют параметр m и амплитуду напряжений σ_N , соответствующие расчетной долговечности $N = 10^8$. Далее по формуле (20) определяется ξ , характеристика надежности R_F определяется согласно выражению (21), наконец, по формуле (19) определению подлежат максимальные допускаемые напряжения с обеспеченностью $Q = 10^{-8}$.

Методика расчетной оценки местного повышения напряжений до уровня допускаемой долговечности предложена Г.В. Бойцовым. Особенностью этой методики является расчет эффективного коэффициента концентрации напряжений при предельном прочностном состоянии корпусных конструкций, сопровождающихся переменным нагружением. Предпола-

гается, что прочностные размеры корпусных связей соответствуют требованиям предельной прочности, а эффективные коэффициенты концентрации напряжений определяются из условия, что сопротивление усталостному нагружению судовых конструкций исчерпывается к концу эксплуатации судна.

Критерием усталостного повреждения принимается также зависимость (7). Правда, параметр m несколько преобразуется и принимает иное обозначение. На нем отображаются особенности концентрации напряжений. Тогда вместо m необходимо использовать выражение для m_t :

$$m_t = m \frac{1 - m \lg K_t}{m \lg K_t + \lg N_0}. \quad (22)$$

Таким образом, предполагается, что усталостные показатели материала конструкций и детали (узлы) определяются одним и тем же показателем N_U . Предел выносливости конструктивного узла определяется учетом эффективных коэффициентов K_e . Тогда напряжения, вызванные несимметричным циклическим нагружением, можно представить в таком виде:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_{-1} \left(1 - \frac{\mu K_e \sigma_m}{\sigma_B}\right)}{K_e}. \quad (23)$$

Если эффективный коэффициент концентрации напряжений K_e не определен началом или концом разрушения, то коэффициент чувствительности материала судовой конструкции к средним напряжениям принимается равным $\mu = 0,5$. Выражение (23) автор предлагает распространить на корпусные конструкции судового назначения из различных марок материала посредством коэффициентов, таких как β . Коэффициент, например, можно принять $\beta = \sqrt{\frac{\sigma_B}{450}}$, то есть отношение предела прочности используемого материала к усталостным показателям малоуглеродистой стали. С использованием коэффициента β можно получить:

$$\sigma_e = \frac{\sigma_{-10} \beta F(\sigma_m, K_e)}{K_e}. \quad (24)$$

Здесь $F(\sigma_m, K_e) = 1 - \frac{K_e \sigma_m}{2 \sigma_B}$; σ_{-10} – предел усталостного нагружения, который характеризует сталь с некоторыми технологическими дефектами. С учетом (22–24) усталостная долговечность определяется выражением:

$$T = \frac{T_0 N_0 \left(\frac{\sigma_e}{b}\right)^{m_t}}{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right) \rho(\chi^2, n)}, \quad (25)$$

где $\chi^2 = 2\left(\frac{\sigma_c}{b}\right)^k$; $n = 2\left(1 + \frac{m_1}{k}\right)$; b , k – параметры распределения (2).

В соответствие с методикой Г.В. Бойцов предположил, что если ожидаемое число нагружений за время эксплуатации судна $N_0 = 2 \cdot 10^6$, то ожидаемое число нагружений корпусных конструкций за время его эксплуатации составляет $N_0^* = 0,5 \cdot 10^8$. Тогда допускаемый эффективный коэффициент концентрации напряжений может быть определен такой зависимостью:

$$K_e = \frac{K_3 k_\sigma \beta k^2 (17,7)^s \frac{310}{\sigma_T}}{1 - \left[1 \mp \frac{84\beta}{k c \sigma_B}\right]} \quad (26)$$

Здесь K_3 , $u k_\sigma$ – коэффициенты запаса по предельным нагрузкам и опасным напряжениям, которые превышают предел текучести материала; $s = \frac{1-k}{k}$; k_c – коэффициент, учитывающий возможные изменения изгибающего момента на тихой воде.

Характеристиками выносливости конструкций судового назначения являются эффективные коэффициенты концентрации напряжений и деформаций. Обширные данные по ним имеются во многих литературных источниках [2–4]. В работе [5] предложено характеризовать выносливость прерывистых связей и других узловых конструкций коэффициентом снижения их долговечности K_{cd} . Такой коэффициент представляет собой отношение логарифмов долговечности типового соединения N к логарифму долговечности узла N_Y или прерывистой связи при одинаковом для них уровне напряжений σ_d :

$$K_{cd} = \frac{\lg N_Y}{\lg N}, \quad (27)$$

где N – долговечность типового соединения при некотором значении напряжений; N_Y – долговечность узла при том же уровне напряжения.

При известных значениях эффективных коэффициентов концентрации напряжений K_e при любом значении N_Y можно определить K_{cd} с помощью формулы (27).

Снижение долговечности какого-либо узла может быть определено при различном напряженном состоянии конструкции по такому выражению:

$$N_Y = (N)^{K_{cd}}. \quad (28)$$

Выражение (28) позволяет, по мнению автора, выполнить оценивание жизненного ресурса судовых конструкций в соответствии с гипотезой линейного суммирования повреждений.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Рассматриваемая схема оценивания жизненного ресурса применительно к малым судам со стальными корпусными конструкциями и конструкциями из легкого сплава является инструментом, позволяющим приступить к решению таких задач, актуальных при проектировании конструкций рассматриваемых судов:

- 1) оценивание ресурса прерывистых связей и других конструкций и узлов на ранних стадиях проектирования;
- 2) отказ от некоторых традиционных конструктивных узлов, рекомендованных Правилами классификационных обществ в тех случаях, когда они мешают оптимальным решениям вопросов общего проектирования;
- 3) упрощение ряда конструктивных узлов, изменяемых в конструкциях малых и скоростных судов.

ВЫВОДЫ

Статья имеет обзорный характер. Основное ее направление заключается в том, чтобы выяснить обстоятельства, которые могут быть использованы при оценивании долговечности малых и скоростных судов. Приведенный анализ использования распределения закона Вейбулла показал, что применительно к малым и скоростным судам волновые нагрузки, например Северной Атлантики, мало применимы. Для малых и скоростных судов не характерна постановка на вершину или подошву волны с целью определения начального напряженного состояния корпуса судна. Более действенным может стать ударное состояние малого судна о встречную волну. Применительно к рассматриваемым малым и скоростным судам при многокорпусном их исполнении на долговечность конструкции может влиять напряженно-деформированное состояние при кручении или поперечном изгибе.

По результатам анализа были установлены факторы, по которым определяются надежность, долговечность и жизнеспособность транспортных судов. Как было указано, не все критерии, свойственные крупнотоннажному судостроению, могут быть использованы для оценивания жизненного ресурса малых и скоростных судов. Оценивание методов определения надежности, долговечности и жизнеспособности транспортных судов применительно к малым и скоростным судам показала, что для достижения этой цели могут быть использованы эффективные коэффициенты концентрации напряжения при симметричном и несимметричном многоциклическом нагружении; определение циклической усталости по результатам ударного взаимодействия с волной; использование гипотезы линейного накопления усталостных повреждений.

Расширение сферы применения узловых конструкций и конструкций прерывистых связей, свой-

ственных малым и скоростным судам, базируется на применении различных судокорпусных материалов, а именно алюминиевых сплавов, композитных материалов, древесины. Следует определить величины номинальных нагрузок, действующих при моделировании нерегулярного ударного нагружения вдоль судна, кручения и изгиба на морском реальном волнении.

В соответствии с изложенной схемой расчетных процедур представляется возможным оценивание ресурса прерывистых связей и других конструкций и узлов на ранних стадиях проектирования. Основываясь при этом на пределе текучести материала, мы допускаем напряжения типов сварных швов и архитектурного вида конструктивных узлов.

REFERENCES

- [1] Myuller, P., Noiman, P., Shtorm, R. (1982). *Tablitsi po matematicheskoi statistike [Math Statistics Tables]*. Moscow: Finansi i statistika [in Russian].
- [2] Petinov, S. V. (1990). *Osnovi inzhenernikh raschetov ustalosti sudovikh konstruksii [Fundamentals of engineering solutions of ship structure fatigue]*. Leningrad: Sudostroenie [in Russian].
- [3] Gnedenko, B. V., Beliaev, Yu. K., Solovev, A. D. (1956). *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti [Mathematical methods in the theory of reliability]*. Moscow: Nauka [in Russian].
- [4] Chuvikovskii, V. S., Palii, O. M. (1965). *Osnovi teorii nadezhnosti sudovikh konstruksii [Fundamentals of the theory of reliability of ship structures]*. Leningrad: Sudostroenie [in Russian].
- [5] Knoring, C. D. (1989). Ingenernaia schema onsenry dolgovechnosny consnrksii na snadiyy proektirovaniia [Onsenry engineering design for long-lasting design]. *VNTO Perspektivnye tekhnicheskie resheniia novukh tipov sudov – VNTO Advanced technical solutions for new types of ships*, no. 485, pp. 35–44.
- [6] Boitsov, G. V., Knoring, C. D. (1972). *Prochnost i rabotosposobnost korpusnikh konstruksiyi [Strength and performance of hull structures]*. Leningrad: Sudostroenie [in Russian].
- [7] Kozliakov, V. V. (1966). O ratsyonalnoi strukture formul dlia statisticheskikh kharakterystyk volnovikh nagruzok [On the rational structure of formulas for statistical characteristics of wave loads]. *Sudostroenie – Shipbuilding*, no. 8, pp. 10–16.
- [8] Kozliakov, V. V. (1967). O otsenke ustalostnoi dolgovechnosti konstruksii, dolgoremennyi spektr napryazhenii v kotorykh opredeliaetsya zakonom Veidull [On the assessment of fatigue life of a structure, the long-term stress spectrum in which is determined by the Weidull law]. *Trudy VNTO Sudproma – Proceedings of the NTO Sudprom*, no. 99, pp. 99–110.
- [9] Boitsov, G. V., Palyi, O. M. *Kompleksnii podkhod k probleme prochnosti sudov. V knige “Problemi prochnosti sudov” [An integrated approach to the problem strengthens the courts. In the book “Problems of Ship Strength”]*. Leningrad: Sudostroenie [in Russian].
- [10] Boitsov, G. V., Palii, O. M. (1979). *Prochnost i konstruksia korpusov sudov novukh tipov [Strength and construction of hulls of new types of ships]*. Leningrad: Sudostroenie [in Russian].
- [11] Garbuz, V. S. (1967). *Kontsentratsiia napryazhenii v preryvistikh svyazi svoogo korpusa [Stress concentration in intermittent connections of the soybean casing]*. Leningrad: Sudostroenie [in Russian].
- [12] Bronskiy, A. N., Glozman, M. K., Kozliakov, V. V. (1974). *Osnovi vibora konstruksiyi korpusa sudna [Basics of choosing the hull structure]*. Leningrad: Sudostroenie [in Russian].
- [13] Kuznetsov, A. I., Korobanova, A. A., Hrabenko, A. V., Atroshchenko, M. A. (2016). Pole ograniichenij i ego vliyanie na kachestvo konstruktivnykh reshenij pri proektirovanii konstrukcij malykh sudov [The field of limitations and its influence on the quality of constructive decisions in the design of structures of small vessels]. *East European Scientific Journal*, no. 12 (16), pp. 89–104.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Мюллер, П., Нойман, П., Шторм, Р. (1982). Таблицы по математической статистике. Москва : Финансы и кредит. 272 с.
- [2] Петин, С.В. (1990). Основы инженерных расчетов усталости судовых конструкций. Ленинград : Судостроение. 219 с.
- [3] Гнеденко, Б.В., Беляев, Б.В., Соловьев, А.Д. (1965). Математические методы в теории надежности. Москва : Наука. 524 с.
- [4] Чувиковский, В.С., Палий, О.М. (1965). Основы теории надежности судовых конструкций. Ленинград : Судостроение. 324 с.
- [5] Кноринг, С.Д. (1989). Инженерная схема оценки долговечности конструкций на стадии проектирования. *VNTO Перспективные технические решения новых типов судов*. № 485. С. 35–44.
- [6] Бойцов, Г.В., Кноринг, С.Д. (1974). Прочность и работоспособность корпусных конструкций. Ленинград : Судостроение. 432 с.
- [7] Козляков, В.В. (1966). О рациональной структуре формул для статистических характеристик волновых нагрузок. Ленинград : Судостроение. № 8. С. 10–16.
- [8] Козляков, В.В. (1967). Об оценке усталостной долговечности конструкций, долговременный спектр напряжений в которых определяется законом Вейбулла. *Труды ВНТО Судпрома*. № 99. С. 99–110.
- [9] Бойцов, Г.В. (1975). Комплексный подход к проблемам прочности судов. *Проблемы прочности судов*. Ленинград : Судостроение. С. 71–150.

- [10] Бойцов, Г.В., Палий, О.М. (1979). Прочность и конструкция корпуса судов новых типов. Ленинград : Судостроение. 360 с.
- [11] Гарбуз, В.С. (1967). Концентрация напряжений в прерывистых связях судового корпуса. Ленинград : Судостроение. 187 с.
- [12] Бронский, А.Н., Глозман, М.К., Козляков В.В. (1974). Основы выбора конструкций корпуса судна. Ленинград : Судостроение. 192 с.
- [13] Кузнецов, А.И., Коробанова, А.А., Грабенко, А.В., Атрощенко, М.А. (2016). Поле ограничений и его влияние на качество конструктивных решений при проектировании конструкций малых судов. *East European Scientific Journal*. № 12 (16). С. 89–104.

© А. А. Грабенко, Ю. Н. Коробанов, А. И. Кузнецов
Дата надходження статті до редакції: 24.03.2020
Дата затвердження статті до друку: 17.04.2020