

Оригинальное исследование

УДК 623.812

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_181

EDN: VOKWZV

Обоснование нормативного износа элементов конструкций плавучего дока в требованиях к общей прочности и устойчивости Правил РМРС на основе вероятностного моделирования

Д.Т. Иванова, В.Н. Тряскин

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Согласно действующим Правилам РМРС, Часть II «Корпус», п. 3.12 Плавучие доки, допускаемые напряжения при общем продольном изгибе дока и расчетные сжимающие напряжения в требованиях к устойчивости продольных связей нормируются по состоянию на конец расчетного срока службы дока и определяются в предположении, что все элементы эквивалентного бруса (ЭБ) имеют 100% нормативный износ. Между тем, такая ситуация в реальных условиях маловероятна.

Цель. В рамках совершенствования требований Правил РМРС к общей продольной прочности и устойчивости при общем изгибе дока необходимо оценить допускаемый уровень нормативного износа элементов корпусных конструкций плавучих доков в расчетных зависимостях, регламентирующих общую прочность и устойчивость, с целью обоснованного смягчения этих требований.

Методы. Для достижения поставленной задачи предполагается применить специальную методику оценки среднего износа продольных связей корпуса дока по состоянию на конец срока службы, основанную на случайном моделировании уменьшения размеров каждого элемента ЭБ в связи с коррозионным износом с использованием датчиков случайных чисел. Указанная методика позволит построить гистограммы распределения значений добавок на износ для характеристик эквивалентного бруса (площади сечения, минимального момента сопротивления, центрального момента инерции), аппроксимировать их неким теоретическим законом, найти математическое ожидание и значения этих характеристик с заданной обеспеченностью.

Выводы. Представленные в настоящей работе оценки показывают, что добавки на коррозионный износ следует принимать на уровне: 65–70% от величин, регламентируемых Правилами на конец нормативного срока службы дока. Это приведет к существенному смягчению требований к общей продольной прочности и устойчивости при общем продольном изгибе корпуса дока.

Ключевые слова: плавучий док; нормативный износ дока; добавка на износ; требования Правил РМРС; общая продольная прочность; устойчивость при общем продольном изгибе.

Как цитировать

Иванова Д.Т., Тряскин В.Н. Обоснование нормативного износа элементов конструкций плавучего дока в требованиях к общей прочности и устойчивости Правил РМРС на основе вероятностного моделирования // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 181–188. DOI: [10.52899/24141437_2025_02_181](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_181) EDN: VOKWZV

Original study article

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_181

EDN: VOKWZV

Justification of the Specified Wear of Structural Elements of Floating Docks in the Overall Strength and Stability Requirements of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping by Probabilistic Modeling

Dianna T. Ivanova, Vladimir N. Tryaskin

Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: According to Part II (Hull), Para. 3.12 (Floating Docks) of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS Rules), permissible stresses for overall longitudinal bending of the dock and calculated compressive stresses in the requirements to the stability of longitudinal frame are standardized as of the end of the estimated service life of the dock and determined on the assumption that the specified wear of all girder elements is 100%. However, such case is unlikely in real-life conditions.

AIM: To improve the RMRS Rules in relation to overall longitudinal strength and stability under overall longitudinal bending state of the dock, it is required to assess the specified permissible wear of floating dock hull structures as the estimated ratios regulating the overall strength and stability to reasonably relax these requirements.

METHODS: To achieve the set task, it is proposed to use a special method to assess the average wear of the longitudinal hull frame of the dock at the end of its service life by random modeling of corrosion-related dimension reduction of each girder element using random number generators. The method will allow to build bar graphs of wear allowance distribution for the girder parameters (sectional area, lowest section modulus, central moment of inertia), approximate them with a certain theoretical law, determine the expected value and values of these parameters with a given probability.

CONCLUSIONS: The estimates presented in this paper show that corrosion allowances should be taken at about 65%–70% of the values provided by the Rules as of the end of the standard service life of the dock. This will result in a significant relaxation of the requirements to overall longitudinal strength and stability under overall longitudinal bending state of the dock hull.

Keywords: floating dock; specified dock wear; wear allowance; RMRS Rules requirements; overall longitudinal strength; stability under overall longitudinal bending state.

To cite this article

Ivanova DT, Tryaskin VN. Justification of the Specified Wear of Structural Elements of Floating Docks in the Overall Strength and Stability Requirements of the Rules of the Russian Maritime Register of Shipping by Probabilistic Modeling. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):181–188. DOI: 10.52899/24141437_2025_02_181 EDN: VOKWZV

Submitted: 13.02.2025

Accepted: 03.04.2025

Published online: 25.06.2025

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации плавучего дока (ПД) элементы корпусных конструкций (листы, балки набора) подвергаются коррозионному износу. Как известно из практического опыта эксплуатации плавучих доков и других морских сооружений, износ элементов конструкций, работающих в одинаковых условиях, довольно редко принимает одинаковые значения.

Возникает проблема определения фактических характеристик поперечного сечения эквивалентного бруса на конец срока службы с учетом неравномерного износа его элементов.

С целью решения такой задачи предлагается проанализировать моделирование износа элементов конструкций, участвующих в общем продольном изгибе дока, с применением датчика случайных чисел.

ТРЕБОВАНИЯ ПРАВИЛ РМРС К ОБЩЕЙ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПРОДОЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ

При разработке действующих требований Правил к общей продольной прочности плавучего дока нормативные допускаемые напряжения определялись в предположении, что все элементы эквивалентного бруса имеют 100% износ.

Добавка на коррозионный износ i -го элемента конструкции ПД при этом определяется по формуле

$$\Delta s_i = u_{zon_i} T, \quad (1)$$

где $u_{zon_i} = k_{zon} u_i$ — нормативная скорость среднегодового уменьшения толщины i -ой связи эквивалентного бруса, определяемая с учетом зонального коэффициента k_{zon} ; T — нормативный расчетный срок службы дока, принимаемый равным 50 лет, если нет других условий.

Требования к общей продольной прочности корпуса плавучих доков Правил РМРС [1] подробно были рассмотрены в [2, 3].

В общем виде, согласно [1], требуемый момент сопротивления поперечного сечения корпуса дока на начало срока службы, W , см³, определяется по формуле

$$W = W' \omega_k, \quad (2)$$

где $W' = \frac{M_{max}}{k_\sigma \sigma_n} 10^3$ — требуемый момент сопротивления

поперечного сечения к концу срока службы дока, см³; ω_k — коэффициент, определяющий добавку к моменту сопротивления на износ элементов конструкций, находится по формуле, учитывающей износ одновременно всех элементов эквивалентного бруса; $M_{max} = \{M^{sag}; M^{hog}\}$ — наибольший расчетный изгибающий момент, кН·м; M^{sag} — изгибающий момент, вызывающий прогиб дока, кН·м; M^{hog} — изгибающий момент, вызывающий перегиб дока, кН·м; k_σ — коэффициент допускаемых

напряжений от общего продольного изгиба, который принимается равным 1,0; σ_n — нормативный предел текучести по нормальным напряжениям, МПа.

Условие устойчивости согласно [1] имеет вид

$$k \sigma_{ci} \leq \sigma_{cri}, \quad (3)$$

где k — коэффициент запаса устойчивости;

$\sigma_{ci} = \frac{M}{J'} z_i \cdot 10^5$ — расчетные сжимающие напряжения i -го элемента, определяемые для поперечного сечения дока к концу расчетного срока службы, МПа; $\sigma_{cri} = f(\sigma_e)$ — критические напряжения для i -го элемента ЗБ определяемые с учетом 100% износа, МПа; M — расчетный изгибающий момент, вызывающий сжатие i -го элемента ЗБ, кН·м; J' — фактический момент инерции поперечного сечения ЗБ, определяемый к концу срока службы дока, см⁴; z_i — отстояние i -го элемента ЗБ от нейтральной оси, м.

Расчетные сжимающие и критические напряжения в условии устойчивости (3) также определяются с учетом 100%-го износа элементов эквивалентного бруса.

Из условий общей прочности (2) и устойчивости (3) следует, что они могут приводить к необоснованному увеличению размеров продольных связей корпуса дока. Это подтверждается опытом практического использования требований Правил РМРС.

МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СРЕДНЕСТАТИСТИЧЕСКОГО ИЗНОСА КОРПУСА ДОКА ПО СОСТОЯНИЮ НА КОНЕЦ СРОКА СЛУЖБЫ

Для корректировки требований к конструкциям плавучих доков Правил РМРС в плане смягчения требований по общей прочности и устойчивости при общем продольном изгибе предлагается методика учета неравномерности износа элементов конструкции дока в процессе эксплуатации. Такой же подход принят в Правилах МАКО, регламентирующих требования к конструкции корпуса нефтеналивных и навалочных судов. Характеристики поперечного сечения корпуса из условия общей прочности и расчетные сжимающие напряжения в условиях устойчивости листовых и балочных элементов конструкций таких судов регламентируются по состоянию на середину срока службы, т.е. при 50%-ном износе. Учитывая, что расчетный срок службы судна в Правилах МАКО принимается 25 лет, а также существенно большие значения скоростей среднегодового уменьшения элементов конструкции нефтеналивных и навалочных судов по сравнению с доковыми конструкциями, нормативное состояние конструкций дока по износу может быть иным.

Предлагается методика оценки износа конструкций дока к концу нормативного срока службы с заданной

обеспеченностью, основанная на вероятностном моделировании. Предполагается, что в процессе эксплуатации дока происходит коррозионный износ конструкций, обеспечивающих его общую прочность. Скорости износа для каждого конструктивного элемента могут изменяться от нуля до максимального значения, регламентируемого Правилами. Для каждого i -го элемента ЗБ среднее значение скорости износа в течение расчетного срока службы T и, соответственно, добавки на износ Δs_i , определяемые по формуле (1), генерируется с использованием датчика случайных чисел для равномерного распределения.

По результатам моделирования строятся статистические законы распределения добавок на износ или их относительных величин в долях или в % от максимального значения.

Подбирается теоретическое распределение наилучшим образом аппроксимирующее статистическое распределение (гистограмму). Для этого используются известные методы и критерии проверки статистических гипотез (критерии χ^2 — Пирсона, критерий Колмогорова).

Далее определяется нормативный износ конструкций по состоянию на конец срока службы с заданной обеспеченностью (например, с использованием правила 3-х стандартов).

Похожая методика рассмотрена в работе [4] при обосновании так называемого эквивалентного срока службы судна. В этой работе с использованием вероятностного подхода моделировались результаты замеров остаточных толщин конструкций судов в эксплуатации.

Ниже на основе предложенной методики рассмотрен алгоритм решения задачи обоснования нормативного износа конструкций корпуса дока по состоянию на конец срока службы, который предполагает решение следующих задач:

1. Построение расчетных зависимостей для определения добавок на коррозионный износ к требуемым

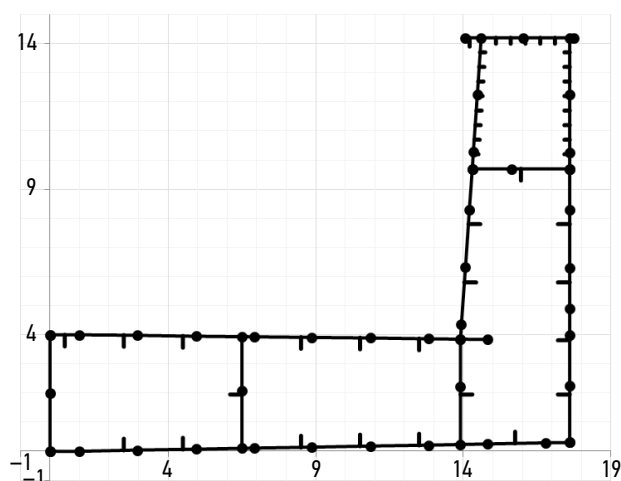


Рис. 1. Схема поперечного сечения эквивалентного бруса монолитного дока грузоподъемностью 12 000 т.

Fig. 1. Cross-sectional girder diagram of a cast-in-place dock with a carrying capacity of 12,000 tons.

характеристикам поперечного сечения корпуса дока.

2. Моделирование износа конструкций с использованием датчиков случайных чисел.
3. Построение статистических законов (гистограмм) распределения добавок на коррозионный износ.
4. Аппроксимация статистического распределения теоретическим законом. Проверка согласования теоретического и статистического распределений с использованием методов проверки правдоподобия статистических гипотез.
5. Обоснование нормативного износа конструкций плавучего дока в требованиях к общей прочности и устойчивости.

ПОДГОТОВКА РАСЧЕТНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОБАВОК НА КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС К ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ КОРПУСА ДОКА

В качестве примера рассмотрим поперечное сечение монолитного плавучего дока грузоподъемностью 12 000 т, схема эквивалентного бруса которого соответствует рис. 1.

Добавки, учитывающие износ элементов для каждого j -го эксперимента, можно определить по известным аналитическим зависимостям:

$$\text{— добавка к площади — } \Delta F_j = \sum_i \Delta f_i, \text{ см}^2;$$

$$\text{— добавка к моменту инерции —}$$

$$\Delta J_j = \sum_i \Delta i_{0i} + \sum_i \Delta f_i \cdot z_i^2 - \frac{\left(\sum_i \Delta f_i \cdot z_i \right)^2}{\Delta F_j}, \text{ м}^2 \text{ см}^2;$$

$$\text{— добавка к моменту сопротивления на уровне верхнего пояса (топ-палубы) ЗБ —}$$

$$\Delta W_j^d = \frac{\Delta J_j}{\left(D - \frac{\sum_i \Delta f_i \cdot z_i}{\Delta F_j} \right)} \cdot 100, \text{ см}^3;$$

$$\text{— добавка к моменту сопротивления на уровне нижнего пояса (днища понтона) ЗБ —}$$

$$\Delta W_j^b = \frac{\Delta J_j}{\left(\frac{\sum_i \Delta f_i \cdot z_i}{\Delta F_j} \right)} \cdot 100, \text{ см}^3.$$

При этом:

$j = 1 \dots n$ — количество рассматриваемых вариантов износа ЗБ (общее число экспериментов в выборке или объем выборки);

Δf_i — добавка к площади поперечного сечения i -го элемента ЗБ, учитывающая его износ, см^2 ;

Δi_{0i} — добавка к собственному моменту инерции i -го элемента ЗБ, учитывающая его износ, $\text{м}^2\text{см}^2$;

z_i — отстояние центра тяжести Δf_i от оси сравнения (ось сравнения принята на уровне основной плоскости ПД), м;

D — расчетная высота плавучего дока, м.

Согласно положениям, описанным в [5], при малом объеме выборки n распределение существенно отличается от функции распределения Колмогорова, но уже при $n \geq 15 \dots 20$ ошибка при вычислении вероятности «согласия» оказывается малой и при дальнейшем увеличении объема выборки практически не изменяется. По критерию согласия Пирсона, по рекомендациям [6] объем выборки должен быть не менее 100, согласно этому, в настоящей работе принято $n = 100$.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАТЧИКОВ СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ

В работе моделирование износа выполняется в процессе реализации в ячейке вычислительной процедуры следующего вида

$$u_i = \text{СЛУЧМЕЖДУ}(0; u_i^{\max} \cdot 10^3) / 10^3 \quad (4)$$

где $u_i^{\max}$ — максимально допустимая Правилами РМРС скорость коррозионного износа, которая соответствует табличным значениям, представленным в п. 3.12.1.4.2 [1], мм/год.

Функция СЛУЧМЕЖДУ(минимальный порог; максимальный порог), реализуемая в Microsoft Excel, генерирует случайное целое число между значениями минимального и максимального порога включительно.

Используя сгенерированную скорость коррозионного износа согласно (4), можно определить добавку на износ i -го элемента, Δs_i , мм, по (1).

Гистограммы распределения значений добавок на износ характеристик эквивалентного бруса построены

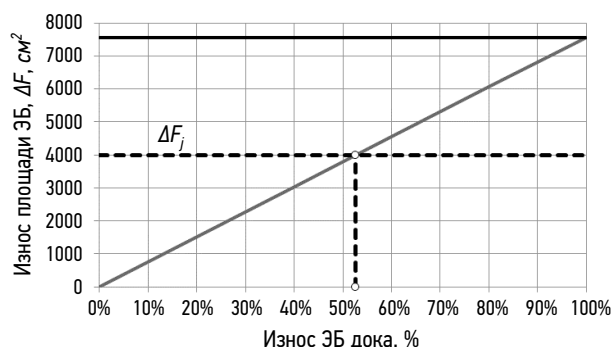


Рис. 2. Изменение добавки к площади сечения ЗБ в зависимости от степени износа дока.

Fig. 2. Change in the cross-sectional area allowance of the girder depending on the degree of wear of the dock.

в результате анализа n различных вариантов износа ЗБ. Для каждого j -го эксперимента определяются характеристики: ΔF_j ; ΔJ_j ; ΔW_j^d ; ΔW_j^b и износ в процентах, с учетом, что $\Delta F_{\max}$ — соответствует полному износу всех элементов ЗБ дока по состоянию на конец срока службы (т.е. при $u_i = u_i^{\max}$, мм/год), 100% износ; $\Delta F_{\min} = 0$ — соответствует началу срока службы дока (т.е. при $u_i = 0$, мм/год), износ составляет 0%, см. рисунок 2. Уровень износа для характеристик: ΔJ_j ; ΔW_j^d ; ΔW_j^b определяется аналогично ΔF_j .

ПОСТРОЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ (ГИСТОГРАММ) РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОБАВОК НА КОРРОЗИОННЫЙ ИЗНОС

Получена выборка, состоящая из n вариантов различных износов поперечного сечения ПД (объем выборки), для которых определены фактические геометрические характеристики ЗБ и соответствующий им уровень износа в процентах. Для полученной выборки выполняется анализ частот попадания в тот или иной разряд гистограммы (с шагом 5% от T или $\Delta T = 2,5$ года), с использованием функции ЧАСТОТА(массив_данных; массив_интервалов), реализуемая в Microsoft Excel. В результате принимается наибольшее полученное значение износа, по которому строится результирующая гистограмма.

Гистограмма распределения фактического износа поперечного сечения плавучего дока будет построена с принятым в настоящей работе шагом равным ΔT , результаты представлены на рис. 3.

Важно, что функция СЛУЧМЕЖДУ() обновляет сгенерированное случайное значение при каждом пересчете (клавиша F9), таким образом можно рассмотреть результаты анализа для нескольких выборок, что позволит более достоверно оценить полученный результат.

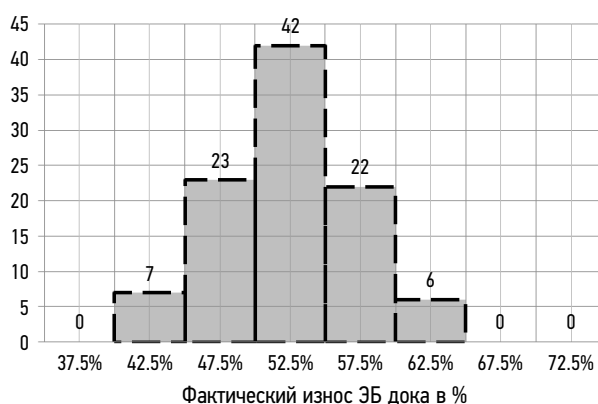


Рис. 3. Гистограмма распределения износа дока в %.

Fig. 3. Wear distribution bar graph (%).

АППРОКСИМАЦИЯ СТАТИСТИЧЕСКОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ЗАКОНОМ

Аппроксимация статистического закона распределения некоторым теоретическим законом позволяет получить оценки нормативного износа дока с заданной обеспеченностью (вероятностью превышения).

Построение теоретических законов распределения износа конструкций корпуса ПД заключается в том, чтобы подобрать теоретическую плавную кривую распределения, описывающую данное статистическое распределение. Вопрос о согласовании теоретического и статистического распределения решается методами проверки правдоподобия гипотез с использованием двух критериев согласия:

- критерия χ^2 (критерия Пирсона);
- критерия Колмогорова.

В настоящей работе анализируется соответствие статистического распределения нормальному закону (закон Гаусса), гамма-распределению, распределению Вейбулла. Показано, что эти теоретические распределения приводят практически к одинаковым результатам, поэтому принято решение использовать нормальный закон.

Ниже представлены основные математические зависимости, которые использовались для построения нормального закона распределения, и расчетные формулы для определения характеристик критериев согласия [7–9].

Нормальный закон распределения

Плотность вероятности

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (5)$$

Математическое ожидание

$$M(x) = \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx, \quad (6)$$

$$M(x) = \sum_{i=1}^n x_i p_i = m. \quad (7)$$

Дисперсия случайной величины

$$D(x) = \int_{-\infty}^{\infty} (x-m)^2 f(x)dx, \quad (8)$$

$$D(x) = M(x^2) - M(x)^2. \quad (9)$$

Среднее квадратическое отклонение

$$\sigma = \sqrt{D(x)}. \quad (10)$$

Функция распределения

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}\right)dx. \quad (11)$$

Критерий согласия χ^2 .

Находим значение критерия по формуле

$$\chi^2 = \sum_{z=1}^k \frac{(n_z - n_z^*)^2}{n_z^*} \quad (12)$$

где n_z — эмпирические частоты, определенные с помощью функции *ЧАСТОТА(массив_данных; массив_интервалов)* для полученной выборки;

n_z^* — теоретические частоты, которые определяются как произведение плотности вероятности на участке от x_k до x_{k+1} на общее число значений в рассматриваемой выборке n ($n = 100$), используя функции Excel можно записать для нормального распределения

$$n_z^* = (\text{НОРМРАСП}(x_{z+1}; m; \sigma; \text{ИСТИНА}) - \text{НОРМРАСП}(x_z; m; \sigma; \text{ИСТИНА})) * n;$$

k — число интервалов настоящей выборки.

Определяем критическое значение критерия $\chi_{\text{крит}}^2$ на уровне значимости α и с $(k-1)$ степенью свободы, в среде Excel для определения $\chi_{\text{крит}}^2$ может быть использована функция *ХИ2ОБР(вероятность; степени_свободы)*, которую можно записать в виде

$$= \text{ХИ2ОБР}(\alpha = 0,05; k-1).$$

Если $\chi^2 < \chi_{\text{крит}}^2$, гипотезу о распределении можно принять, иначе стоит отвергнуть.

Критерий А.Н. Колмогорова

Имея эмпирические частоты для каждого рассматриваемого интервала n_j ($\Delta T = 2,5$ года), можем определить накопленные эмпирические частоты $\sum n_j$, например, для второго разряда накопленная частота будет равна сумме частот для первого и второго интервалов и т.д.

Определяются теоретические частоты n_j^* (как для критерия Пирсона) и соответствующие им накопленные частоты $\sum n_j^*$.

Вычисляется разность накопленных частот для всех интервалов k , максимальное по модулю отклонение теоретических от эмпирических частот обозначено, как λ .

При $\lambda < \lambda_{\text{крит}}$ гипотеза о распределении может быть принята, иначе — отклоняется, при этом $\lambda_{\text{крит}}$ определяется по формуле

$$\lambda_{\text{крит}} = \frac{1,36}{\sqrt{n}}, \text{ при } \alpha = 0,05. \quad (13)$$

Математическое ожидание значений нормативного износа конструкций, m , может быть его осредненной оценкой. Более жесткой оценкой нормативного износа конструкций будет значение, смещенное относительно математического ожидания (m) на $(1 \div 3)\sigma$ в сторону больших значений.

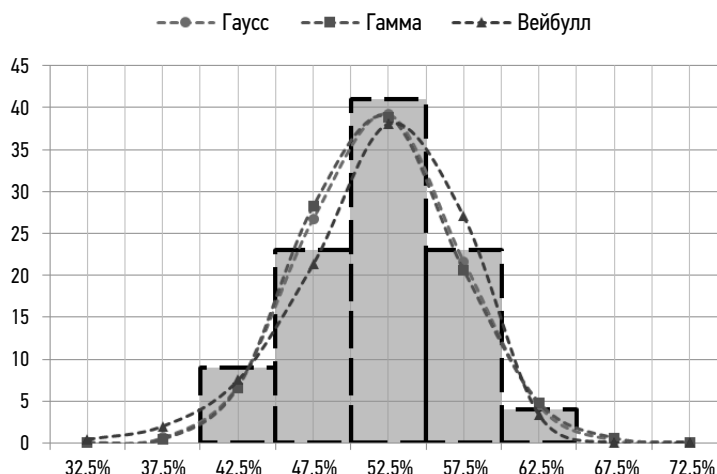


Рис. 4. Гистограмма распределения эмпирических и теоретических частот износа монолитного дока грузоподъемностью 12 000 т.

Fig. 4. Distribution bar graph of empirical and theoretical wear rates of a cast-in-place dock with a carrying capacity of 12,000 tons.

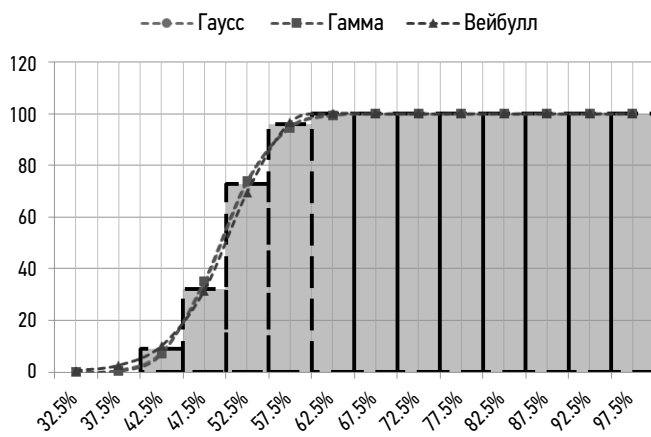


Рис. 5. Гистограмма распределения накопленных эмпирических и теоретических частот износа монолитного дока грузоподъемностью 12 000 т.

Fig. 5. Distribution bar graph of accumulated empirical and theoretical wear rates of a cast-in-place dock with a carrying capacity of 12,000 tons.

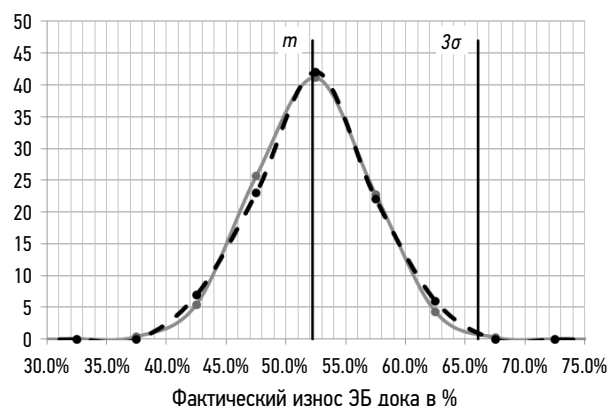


Рис. 6. Нормативный износ поперечного сечения монолитного дока грузоподъемностью 12 000 т для общей продольной прочности.

Fig. 6. Specified cross-sectional wear of a cast-in-place dock with a carrying capacity of 12,000 tons for overall longitudinal strength.

ОБОСНОВАНИЕ НОРМАТИВНОГО ИЗНОСА КОНСТРУКЦИЙ ПЛАВУЧЕГО ДОКА В ТРЕБОВАНИЯХ К ОБЩЕЙ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ

Таким образом, в (2) требуемый момент сопротивления поперечного сечения к концу срока службы дока (W') будет соответствовать не 100%-ному износу ЗБ, а экспериментально оцененному в настоящей работе, и с ошибкой в безопасную сторону можно принять равным 70%. Такой подход повлечет за собой пересмотр уровня допускаемых напряжений.

В условии устойчивости (3), предлагается, что расчетные сжимающие напряжения (σ_{ci}) должны быть определены с учетом износа поперечного сечения дока, соответствующего 70%, при этом (σ_e) эйлеровы напряжения i -го элемента ЗБ должны определяться при условии 100%-го износа рассматриваемого элемента.

Настоящие изменения позволят существенно смягчить действующие требования Правил РМРС к общей прочности и устойчивости при продольном изгибе дока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам анализа нормативного износа поперечного сечения корпуса плавучего дока с применением специальной методики, основанной на случайном моделировании скоростей износов с использованием датчиков случайных чисел, были получены результаты, которые показали:

- математическое ожидание принимает значения в диапазоне: от 50 до 54%;
- стандартное отклонение принимает значения в диапазоне: 4–5%.

Тогда с вероятностью 99,7% нормативный износ эквивалентного бруса дока, участвующего в общем продольном изгибе, на конец срока службы может быть принят 65–70%.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции и методологии организации расчетов, реализацию расчетной части и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: Д.Т. Иванова — разработка методологии, реализация расчетов, анализ результатов; В.Н. Тряскин — разработка концепции и методологии.

Источники финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFO

Author contributions. All authors made substantial contributions to the conceptualization, investigation, and manuscript preparation, and reviewed and approved the final version prior to publication. Personal contribution: D.T. Ivanova: methodology, investigation, formal analysis; V.N. Tryaskin: conceptualization, methodology.

Funding sources. The authors declare no external funding was received for conducting the study.

Disclosure of interests. The authors have no explicit or potential conflicts of interest associated with the publication of this article.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II. Корпус. Российский Морской Регистр Судоходства. М.: Минтранс, 2024.
2. Тряскин В.Н. Проектирование конструкций корпуса плавучего дока по требованиям к общей прочности. В кн.: Регистр СССР: науч.-техн. сб. М.: Транспорт, 1991. Вып. 18. С. 3–18.
3. Отчет по научно-исследовательской работе. Ч. I. Обоснование требований Правил Регистра СССР по корпусу металлических плавучих доков. Л.: ЛКИ, 1964.
4. Лам Ван Хунг. Методические основы, алгоритмы и программное обеспечение задач проектирования и контроля технического состояния конструкций корпуса судна. дисс. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2007.
5. Р 50.1.037-2002 Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика, Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Ч. II. Непараметрические распределения. М.: Госстандарт России, 2002.
6. Мицель А.А. Прикладная математическая статистика. Томск: ТУСУР, 2019. EDN: TSMVGT
7. Бородин А.В., Некрасова П.С. Статистические критерии в анализе данных. Петрозаводск: ПетрГУ, 2023.
8. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. ISBN: 5-06-004214-6 EDN: QJLKXP
9. Шилов В.В., Шилов О.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Киров: ВГГУ, 2015. ISBN: 978-5-906172-62-4 EDN: UGPGCP
10. Екимов В.В. Вероятностные методы в строительной механике корабля. Л.: Судостроение, 1966.

ретическим. Ч. II. Непараметрические распределения. М.: Госстандарт России, 2002.

6. Мицель А.А. Прикладная математическая статистика. Томск: ТУСУР, 2019. EDN: TSMVGT

7. Бородин А.В., Некрасова П.С. Статистические критерии в анализе данных. Петрозаводск: ПетрГУ, 2023.

8. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2003. ISBN: 5-06-004214-6 EDN: QJLKXP

9. Шилов В.В., Шилов О.И. Теория вероятностей и математическая статистика. Киров: ВГГУ, 2015. ISBN: 978-5-906172-62-4 EDN: UGPGCP

10. Екимов В.В. Вероятностные методы в строительной механике корабля. Л.: Судостроение, 1966.

REFERENCES

1. Rules for the classification and construction of sea-going vessels. Part II. Hull. Russian Maritime Register of Shipping. Moscow: MinTrans, 2024. (In Russ.)
2. Tryaskin V.N. Design of floating dock hull structures based on overall strength requirements. In: *USSR Register: scientific and technical collection*. Moscow: Transport; 1991;18:3-18. (In Russ.)
3. Report on research work. Part I. Justification of the requirements of the USSR Register Rules for the hull of metal floating docks. Leningrad: LKI; 1964.
4. Lam Van Hung. Methodological principles, algorithms and software for designing and monitoring the technical condition of ship hull structures. [dissertation]. Saint Petersburg; 2007. (In Russ.)
5. R 50.1.037-2002 Recommendations for standardization. Applied statistics, Rules for checking the agreement of the experimental distribution

with the theoretical one. Part II Nonparametric Distributions. Moscow: Gosstandart; 2002. (In Russ.)

6. Mitsel AA. *Applied Mathematical Statistics*. Tomsk: TUSUR; 2019. (In Russ.) EDN: TSMVGT

7. Borodina AV, Nekrasova RS. *Statistical Criteria in Data Analysis*. Petrozavodsk: PetrSU; 2023. (In Russ.)

8. Gmurman VE. *Probability Theory and Mathematical Statistics*. Moscow: Vysshaya shkola; 2003. (In Russ.) ISBN: 5-06-004214-6 EDN: QJLKXP

9. Shilova ZV, Shilov OI. *Probability Theory and Mathematical Statistics*. Kirov: VGGU; 2015. (In Russ.) ISBN: 978-5-906172-62-4 EDN: UGPGCP

10. Ekimov VV. *Probabilistic Methods in Ship Structural Mechanics*. Leningrad: Sudostroenie; 1966. (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

***Дианна Тимофеевна Иванова**, старший преподаватель кафедры конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; адрес: Россия, 190121, Санкт-Петербург, ул. Лотманская, 3; eLibrary SPIN: 1314-7682; e-mail: D.T.Ivanova@smtu.ru

Владимир Николаевич Тряскин, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции и технической эксплуатации судов, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; eLibrary SPIN: 7663-8210; e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

AUTHORS' INFO

***Dianna T. Ivanova**, Senior Lecturer at the Department of Ship Design and Technical Operation, Saint Petersburg State Marine Technical University; address: 3 Lotsmanskaya st, Saint Petersburg, 190121, Russia; eLibrary SPIN: 1314-7682; e-mail: D.T.Ivanova@smtu.ru

Vladimir N. Tryaskin, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Ship Design and Technical Operation, Saint Petersburg State Marine Technical University; eLibrary SPIN: 7663-8210; e-mail: vladimir.tryaskin@smtu.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author