

Оригинальное исследование

УДК 623.812

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_169](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_169)

EDN: USSCBQ

# Оптимизационно-поисковое проектирование корпусных конструкций плавучего дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем продольном изгибе

В.Н. Тряскин<sup>1</sup>, Д.Т. Иванова<sup>1</sup>, В.А. Булкин<sup>2</sup><sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия;<sup>2</sup> Центральное морское конструкторское бюро «Алмаз», Санкт-Петербург, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Актуальность.** В настоящее время в судостроительной отрасли большой интерес представляет автоматизация процесса проектирования корпусных конструкций. Разработка и развитие отечественных систем автоматизированного проектирования конструкции корпуса транспортных судов, военных кораблей, плавучих сооружений и в том числе плавучих доков, являются одними из наиболее перспективных и приоритетных задач. Применение оптимизационно-поисковых процедур при проектировании корпусных конструкций позволяет формализовать проблему автоматизированного принятия решения и обеспечивает получение заданных характеристик конструкции — минимальную массу, трудоемкость изготовления или стоимость в зависимости от постановки задачи.

**Цель работы.** Постановка и решение задачи проектирования конструкций корпуса плавучего дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем продольном изгибе. В соответствии с методологией автоматизированного параметрического проектирования судовых конструкций, разработанной на кафедре Конструкции и технической эксплуатации судов СПбГМТУ, и принятой в качестве основы при разработке систем автоматизированного проектирования конструкций судов и других инженерных сооружений, рассматриваемая задача относится к задачам проектирования конструкций плавучего дока верхнего иерархического уровня.

**Материалы и методы.** Предполагается, что на предыдущих этапах более низкого уровня реализованы процедуры проектирования конструкций по требованиям к минимальным толщинам, местной прочности, прочности и устойчивости конструкций понтона при его общем изгибе. В качестве нормативного технического документа, регламентирующего требования к общей прочности и устойчивости, используются Правила Российского морского Регистра судоходства (РМРС). Структура требований Правил к конструкциям корпуса плавучего дока такова, что для решения рассматриваемой задачи необходимо применять итерационные поисковые процедуры. Для решения задачи предлагается использовать аппарат математического программирования.

**Результаты.** В настоящей задаче качестве целевой функции принимается математическая зависимость площади сечения эквивалентного бруса от варьируемых параметров. Вектор варьируемых переменных определяет требуемые добавки к начальным значениям толщин тех листовых конструкций, которые наиболее эффективно влияют на характеристики общей прочности корпуса дока. Предел текучести материала этих листовых конструкций также может быть включен в состав варьируемых параметров. Ограничения задачи формируются на основе конструктивных соображений и требований Правил РМРС. Ограничения-равенства позволяют получить решение задачи при некотором фиксированном значении выбранного варьируемого параметра. В виде ограничений-равенств могут быть представлены зависимости, позволяющие автоматически корректировать требуемые толщины листов конструкций, примыкающих к конструкциям, формирующим пояски эквивалентного бруса, или условие, фиксирующее значение предела текучести. Ограничения-неравенства формируются на основе соответствующих требований к общей прочности и устойчивости Правил РМРС.

**Заключение.** Апробация описанной задачи демонстрируется на примерах проектирования конструкций монолитного дока грузоподъемностью 12 000 т и понтонного дока грузоподъемностью 29 300 т. Показана эффективность предлагаемого метода решения задачи и возможность использования инструмента «Поиск решения» программного комплекса MS Excel.

**Ключевые слова:** плавучий док; монолитный док; понтонный док; общий продольный изгиб дока; прочность и устойчивость при общем продольном изгибе; оптимизационно-поисковое проектирование.

## Как цитировать

Тряскин В.Н., Иванова Д.Т., Булкин В.А. Оптимизационно-поисковое проектирование корпусных конструкций плавучего дока по требованиям к прочности и устойчивости при общем продольном изгибе // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 2. С. 169–180. DOI: [10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_169](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_169) EDN: USSCBQ

Рукопись получена: 15.02.2025

Рукопись одобрена: 05.05.2025

Опубликована online: 20.06.2025

Original study article

DOI: [https://doi.org/10.52899/24141437\\_2025\\_02\\_169](https://doi.org/10.52899/24141437_2025_02_169)

EDN: USSCBQ

# Optimization and Search Design of Floating Dock Hull Structures Based on Strength and Stability Requirements Under Overall Longitudinal Bending State

Vladimir N. Tryaskin<sup>1</sup>, Dianna T. Ivanova<sup>1</sup>, Vladimir A. Bulkin<sup>2</sup><sup>1</sup> Saint Petersburg State Marine Technical University, Saint Petersburg, Russia;<sup>2</sup> Almaz Central Marine Design Bureau, Saint Petersburg, Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Today, automation of hull structure design is of great interest in the shipbuilding industry. The development and advancement of Russian automated hull design systems for transport vessels, military ships, floating structures, including floating docks, are the most promising and priority tasks. Optimization and search design of hull structures allows formalizing the problem of automated decision-making and ensures the specified structural parameters, including low weight, labor intensity of manufacture or cost depending on the problem formulation.

**AIM:** This work aims to formulate and solve the problem of designing floating dock hull structures based on requirements to strength and stability under overall longitudinal bending state. Based on the automated parametric design method for ship structures developed by the Department of Ship Design and Maintenance of St. Petersburg State Marine Technical University and adopted as a basis for the development of automated design systems for ship and other engineering structures, the problem under consideration is designated as the high-level problem of designing the floating dock structures.

**METHODS:** It is assumed that the previous lower-level stages have implemented structure design processes based on requirements to the lowest thicknesses, local strength, strength, and stability of pontoon structures during its overall bending. The Rules of the Russian Maritime Register of Shipping (RMRS) are used as a technical standard providing the requirements to overall strength and stability. The structure of the Rules in relation to the floating dock hull design is such that it is required to apply iterative search methods to solve the problem under consideration. To solve the problem, it is proposed to use mathematic programming tools.

**RESULTS:** In this problem, the mathematical relationship of the cross-sectional area of the girder and the variable parameters is taken as the objective function. The trajectory of variables determines the required initial thicknesses allowance of the plate structures that have the most influence on the overall strength of the dock hull. Yield strength of such plate structures may also be included in the variable parameters. The constraints of this problem are determined based on design considerations and the RMRS Rules. Equality constraints allow to solve the problem for some fixed value of the selected variable. Equality constraints may include restrictions that allow automatic adjustment of the specified plate thickness of structures adjacent to structures of girder stays or the condition determining the yield strength. Inequality constraints are determined by the relevant overall strength and stability as specified in the RMRS Rules.

**CONCLUSION:** The described problem is tested by examples of structural designs of a cast-in-place dock with a carrying capacity of 12,000 tons and a pontoon dock with a carrying capacity of 29,300 tons. The study shows that the proposed method can adequately solve the problem and MS Excel's Solver tool may be used to solve it.

**Keywords:** floating dock; cast-in-place dock; pontoon dock; overall longitudinal dock bending; strength and stability under overall longitudinal bending state; optimization and search design.

## To cite this article

Tryaskin VN, Ivanova DT, Bulkin VA. Optimization and Search Design of Floating Dock Hull Structures Based on Strength and Stability Requirements Under Overall Longitudinal Bending State. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(2):169–180. DOI: 10.52899/24141437\_2025\_02\_169 EDN: USSCBQ

Submitted: 15.02.2025

Accepted: 05.05.2025

Published online: 20.06.2025

## ВВЕДЕНИЕ

В конструкторских бюро судостроительного профиля активно используются методы и программное обеспечение для автоматизированного проектирования конструкций корпуса, как судов, так и других инженерных сооружений, например, таких как плавучий док (ПД). В статье рассматривается постановка и решение задачи проектирования конструкций ПД по требованиям Правил РМРС [1] к общей прочности и устойчивости при общем продольном изгибе дока с использованием оптимизационно-поисковых процедур.

В соответствии с методологией параметрического проектирования конструкций корпуса плавучих доков, предложенной в [2], и соответствующими рекомендациями Правил РМРС процесс проектирования конструкций ПД [1] по требованиям к общей продольной прочности относится к завершающему этапу процесса параметрического проектирования конструкций корпуса дока. На этом этапе в качестве исходной информации используются результаты проектирования элементов конструкций, полученные по требованиям к минимальным толщинам, местной прочности, прочности и устойчивости конструкций понтона при его общем изгибе.

В Правилах РМРС требование к общей продольной прочности сводится к регламентации момента сопротивления поперечного сечения корпуса дока (эквивалентного бруса — ЭБ) по состоянию на конец срока службы дока. Учет коррозионного износа продольных связей осуществляется путем введения в расчетную зависимость множителя, значение которого зависит от фактических характеристик поперечного сечения корпуса дока, которые могут быть определены только по завершении

проектировочного расчета. Такая задача может быть решена только методом последовательных приближений или в результате постановки и решения оптимизационно-поисковой задачи. Второй путь решения рассматривается в настоящей работе.

Аналогичные проблемы возникают при реализации требований к устойчивости листовых и балочных элементов при общем продольном изгибе корпуса дока.

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

При доковых операциях — постановке судна в плавучий док происходит общий продольный изгиб системы док-судно. Корпус судна и корпус плавучего дока в общем случае рассматривают как балки переменного сечения (переменной жесткости), соединенные рядом независимых упругих опор, жесткость которых определяется жесткостью днищевых конструкций судна, жесткостью конструкций понтона и жесткостью кильблоков (рис. 1).

Продольный изгибающий момент, действующий на систему док-судно, распределяется между плавучим доком и судном. За весь жизненный цикл дока в нем могут доковаться суда разного размера, с различными характеристиками жесткости корпуса [3]. При этом возможны случаи постановки в док сильно изношенных или даже поврежденных / аварийных судов, с малой жесткостью корпуса. Возможно докование одновременно несколько судов. Характеристики жесткости кильблоков — тоже величины недостаточно определенные.

В связи с этим требования к общей продольной прочности корпуса дока в Правилах классификации и постройки морских судов РМРС основаны на упрощенной модели изгиба корпуса дока под действием неравномерно

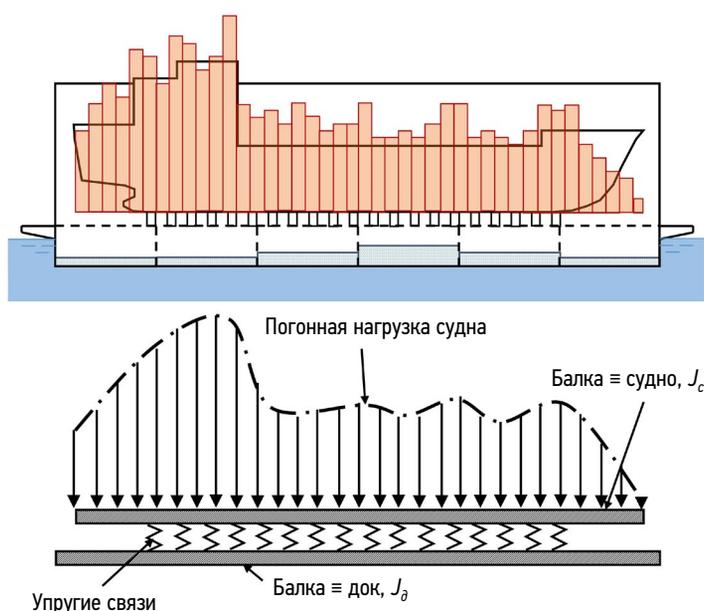


Рис. 1. Схема расчета прочности дока:  $J_c$  и  $J_d$  — моменты инерции судна и дока соответственно, переменные по длине.

Fig. 1. Calculation of the dock strength.  $J_s$  and  $J_d$  are the variable-length moments of inertia of the ship and the dock, respectively.

распределенной доковой нагрузкой и сил поддержания, соответствующих расчетной осадке при доковании судна (рис. 2). Совместный изгиб дока и судна не учитывается.

Согласно требованиям Правил РМРС к общей продольной прочности ПД рассматриваются два условных расчетных случая:

- постановка длинного судна — перегиб дока (рис. 2, а);
- постановка короткого судна — прогиб дока (рис. 2, б).

Эпюры распределения доковой массы судна в общем случае представляют в виде фигуры, состоящей из прямоугольника и сегмента квадратичной параболы. В связи с этим погонная доковая нагрузка  $q_x$ , кН/м, в сечении, отстоящем на величину  $x$  в нос и в корму от миделя, определяется по формуле

$$q_x = \frac{g \Delta}{L_c \varphi} \left[ 1 - 3(1 - \varphi) \left( 2x / L_c \right)^2 \right], \quad (1)$$

где  $2/3 \leq \varphi \leq 1,0$  — коэффициент полноты эпюры доковой массы судна.

Результаты расчета и их графическое представление показывают, что коэффициентам полноты распределения доковой массы судна  $\varphi = 2/3 \approx 0,67$  и  $\varphi = 1,00$  соответствуют две характерные эпюры. В первом случае — это полностью квадратичная парабола с нулевыми концевыми ординатами; во втором случае — горизонтальная прямая линия — равномерное распределение.

Расчетный изгибающий момент в любом сечении по длине дока  $M(x)$ , кН·м, соответствующий распределению массы судна согласно (1) рис. 2, определяется по формуле

$$M = k_M g \Delta L_{СП} \alpha(2x / L_{СП}), \quad (2)$$

где  $k_M = 0,125 \left( 1 - \frac{3\varphi - 1}{2\varphi} \cdot \frac{L_c}{L_{СП}} \right)$  — коэффициент рас-

четного изгибающего момента в миделевом сечении;  $\alpha(2x / L_{СП})$  — параметр формы эпюры моментов, зависящий от положения расчетного сечения относительно миделя (относительно середины длины дока по стапель-палубе).

Эпюры изменения параметров формы перегибающего и прогибающего моментов по длине дока представлены на рис. 3 и 4. Их значения можно определить по формулам (3) и (4) в зависимости от безразмерной абсциссы расчетного сечения дока относительно мидель-шпангоута  $\bar{x} = 2x / L_{СП}$ :

– для прогибающего момента

$$\alpha(\bar{x}) = -0,97\bar{x}^4 - 0,16\bar{x}^3 + 2,15\bar{x}^2 - 0,01\bar{x} - 1,00 \quad (3)$$

– для перегибающего момента

$$\alpha(\bar{x}) = -0,769\bar{x}^2 + 1,00. \quad (4)$$

Наличие таких зависимостей позволяет определить величину расчетного изгибающего момента в любом сечении по длине дока. Форма кривых  $\alpha(\bar{x})$  показывает, что требования к общей прочности существенно различаются в зависимости от положения расчетного сечения по длине дока. При этом в пределах средней части дока ( $\pm 0,2L_{СП}$  от миделя) расчетные изгибающие моменты изменяются не более чем на 15–25%.

Помимо общего изгиба дока, при доковании судна или нескольких судов в главных продольных связях

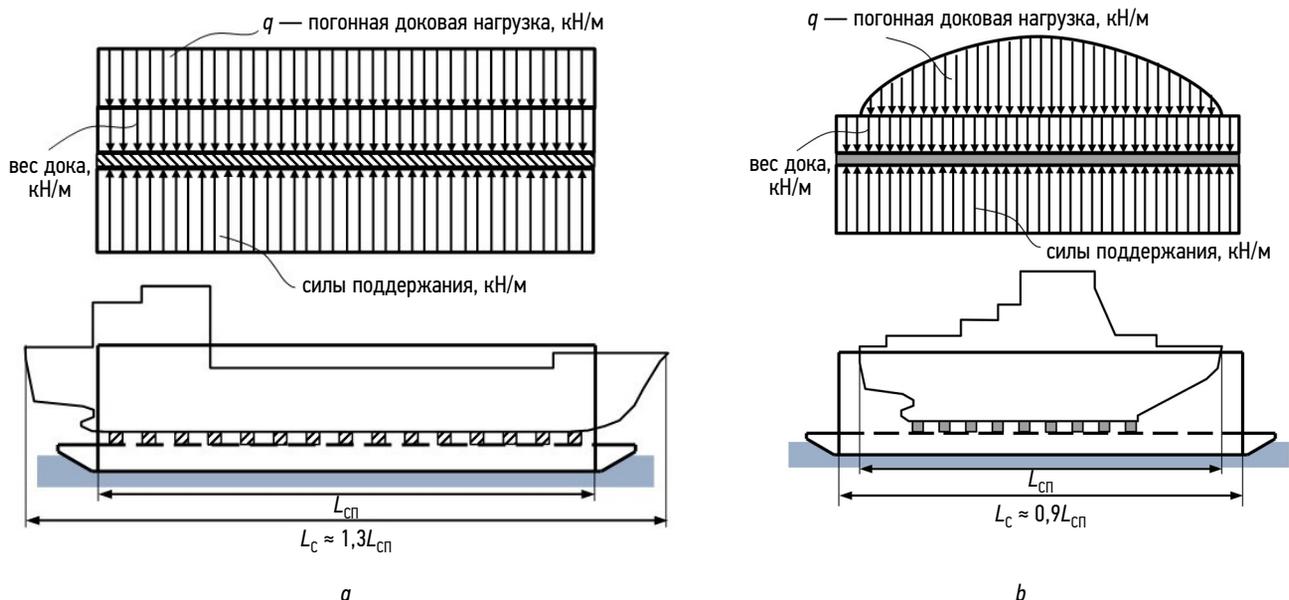


Рис. 2. Характер распределения доковой погонной нагрузки в соответствии с требованиями Правил РМРС для двух расчетных случаев: а — постановка длинного судна; б — постановка короткого судна.

Fig. 2. Distribution of load per unit length of the dock based on the RMRS Rules for two calculation cases: а, a long ship; б, a short ship.

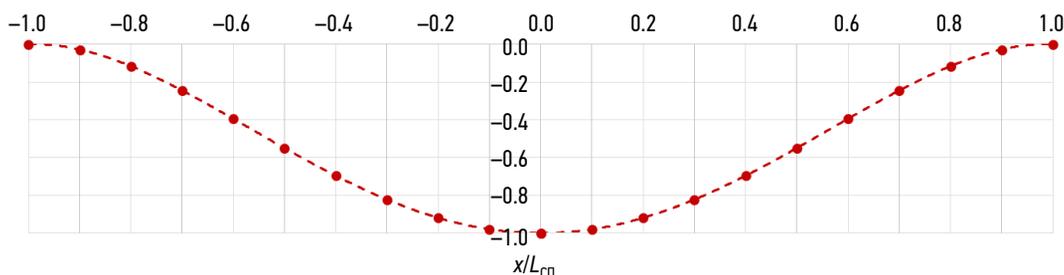


Рис. 3. Параметр формы эпюры прогибающего момента.  
Fig. 3. Parametric distribution diagram of the sagging moment.

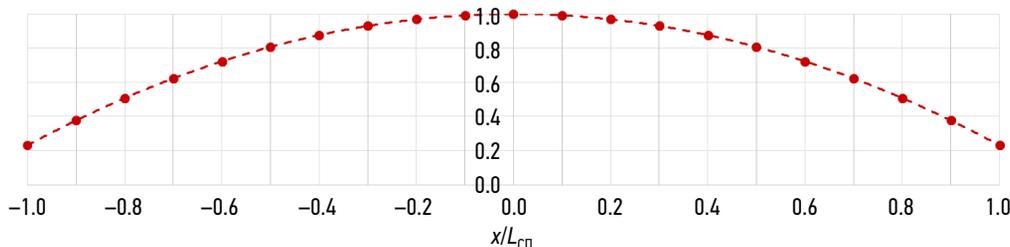


Рис. 4. Параметр формы эпюры перегибающего момента.  
Fig. 4. Parametric distribution diagram of the hogging moment.

неразрезного понтона монолитного дока возникает изгибающий момент  $M_y$ , кН·м, от общего изгиба понтона. Величина момента  $M_y$ , кН·м, определяется из решения задачи об изгибе конструктивно-ортотропной пластины на винклеровском<sup>1</sup> упругом основании (расчетные формулы и вспомогательные графические зависимости представлены в п. 3.12.4.5.6 [1]).

## ТРЕБОВАНИЯ ПРАВИЛ РМРС К ОБЩЕЙ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДОКА ПРИ ОБЩЕМ ПРОДОЛЬНОМ ИЗГИБЕ

Правилами РМРС регламентируются следующие требования к общей продольной прочности и устойчивости для основных эксплуатационных режимов дока — докования судов (см. п. 3.12.4.6 [1]):

$$W_{act}^{d/b} \geq W_{req}^{d/b}, \tag{5}$$

$$\sigma_{\Sigma} = \sigma_1 + \sigma_2 \leq k_{\sigma} \sigma_n, \tag{6}$$

$$\sigma_{cr\_pl} \geq k_{b\_pl} \sigma_{c\_pl}, \tag{7}$$

$$\sigma_{cr\_ls} \geq k_{b\_ls} \sigma_{c\_ls}, \tag{8}$$

<sup>1</sup> Простейшая применяемая на практике форма упругого основания пластины, представляет собой ряд тождественных близко расположенных линейных пружин без какой-либо сдвиговой связи между ними. Такое упрощение реального непрерывного упругого основания точно реализуется в случае пластин, плавающих на поверхности жидкости.

где  $W_{act}^{d/b}$  и  $W_{req}^{d/b}$  — фактические (*act*) и требуемые Правилами (*req*) моменты сопротивления поперечного сечения корпуса дока на уровне верхней и нижней фибры на начало срока службы, см<sup>3</sup>;  $\sigma_{\Sigma}$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  — напряжения в главных продольных связях понтона монолитного дока по состоянию к концу нормативного срока службы: суммарные —  $\sigma_{\Sigma}$ , от общего продольного изгиба дока —  $\sigma_1$ , от общего изгиба понтона —  $\sigma_2$ , МПа;  $k_{\sigma}$  — коэффициент допускаемых суммарных напряжений в главных продольных связях понтона монолитного дока;  $\sigma_{cr\_pl}$ ,  $\sigma_{cr\_ls}$  — критические нормальные напряжения листовых элементов (*\_pl*) и продольных балок набора (*\_ls*), МПа;  $k_{b\_pl}$  и  $k_{b\_ls}$  — коэффициенты запаса устойчивости для листовых элементов и продольных балок набора;  $\sigma_{c\_pl}$ ,  $\sigma_{c\_ls}$  — расчетные сжимающие напряжения в продольных связях эквивалентного бруса, МПа.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ КОРПУСА ПД ПО ТРЕБОВАНИЯМ К ОБЩЕЙ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ПРИ ОБЩЕМ ПРОДОЛЬНОМ ИЗГИБЕ

Задача проектирования конструкций корпуса судна или другого инженерного сооружения может быть представлена в общем виде задачи математического программирования [4–6]:

минимизировать целевую функцию

$$GF(\mathbf{X}) \rightarrow \min \quad (9)$$

при ограничениях:

$$h_j(\mathbf{X}) = 0, \quad j = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$g_j(\mathbf{X}) \geq 0, \quad j = 1, \dots, p \quad (11)$$

и граничных условиях

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad i = 1, \dots, k \quad (12)$$

где  $\mathbf{X} = [x_1, \dots, x_k]^T$  — вектор-столбец значений независимых переменных — варьируемых параметров конструкции;  $k$  — количество варьируемых параметров;  $m$  — число ограничений-равенств;  $p$  — число ограничений-неравенств.

## Исходные данные

Для решения задачи необходимо подготовить следующую исходную информацию.

Предполагается, что известен архитектурно-конструктивный тип дока (пontonный, монолитный), заданы главные размерения дока и расчетная грузоподъемность, выполнена конструктивная компоновка понтона и башен: определены системы набора конструкций, расставлены продольные и поперечные балки основного и рамного набора. Должны быть определены значения расчетных изгибающих моментов при общем продольном изгибе дока (для случая прогиба,  $M^-$  и перегиба,  $M^+$ ). Для монолитного дока дополнительно должно быть известно значение расчетного изгибающего момента в главных продольных связях понтона от общего изгиба понтона,  $M_y$ .

Размеры связей корпуса, определенные на предшествующих этапах проектирования по требованиям к местной прочности с учетом ограничений по минимальным толщинам, также являются входными параметрами для рассматриваемой задачи.

## Варьируемые параметры. Целевая функция

Из условий общей продольной прочности корпуса дока регламентируются размеры следующих элементов конструкций (см. рис. 5):

- *монолитные доки*: толщина листов топ-палубы и верхних участков стенок башен, а в некоторых случаях — толщины листов днища, боковых стенок и продольных переборок понтона;
- *пontonные доки*: толщины листов топ-палубы, днища башен, верхних и нижних участков стенок башен.

Может также оказаться целесообразным применение для этих конструкций сталей повышенной прочности. Предел текучести материала этих листовых конструкций, следовательно, также может быть включен в состав варьируемых параметров.

Требования к устойчивости при общем продольном изгибе дока могут быть определяющими при проектировании листовых элементов и продольных балок основного и рамного набора: топ-палубы и стенок башен пontonных и монолитных доков; наружной обшивки, полотноща, продольных переборок понтона и настила стапель-палубы монолитных доков; обшивки днища башен пontonных доков.

Особенно серьезные проблемы могут возникать при обеспечении устойчивости листовых элементов топ-палубы и стенок башен при поперечной системе набора (даже у доков небольшой грузоподъемности).

Таким образом, в качестве *варьируемых параметров* целесообразно принимать:

- требуемые добавки к начальным значениям, определяемым на предшествующих этапах проектирования (в соответствии с требованиями к минимальным толщинам, местной и (или) поперечной прочности) толщин тех листовых конструкций, которые наиболее эффективно влияют на характеристики общей прочности корпуса дока (см. рис. 5);

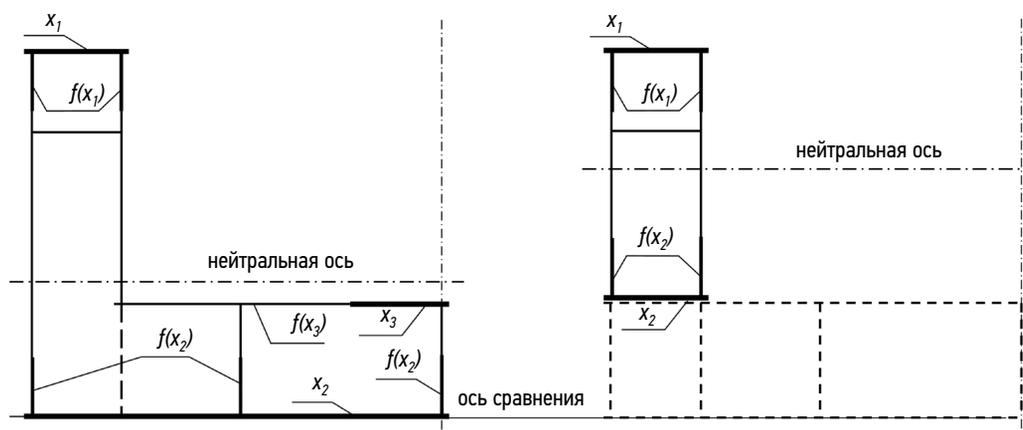


Рис. 5. Варьируемые параметры для монолитного и пontonного доков (обозначение  $f(x_i)$  указывает, что толщина рассматриваемого листа определяется в зависимости от значения  $i$ -го варьируемого параметра).

Fig. 5. Variable parameters of cast-in-place and pontoon docks ( $f(x_i)$  indicates that the thickness of the analyzed plate is determined by the  $i$ -th variable value).

- предел текучести материала связей, наиболее удаленных от нейтральной оси эквивалентного бруса (см. рис. 5).

В качестве *целевой функции* принимается математическая зависимость площади сечения эквивалентного бруса от варьируемых параметров.

В данной работе проблема поискового проектирования конструкций плавучего дока по требованиям к общей прочности и устойчивости при общем продольном изгибе рассматривается на примере проектирования конструкции корпуса монолитного плавучего дока грузоподъемностью 12 000 т и понтонного дока грузоподъемностью 29 300 т. Конструктивные схемы поперечных сечений доков представлены на рис. 6, а) и 6, б) соответственно.

Вектор варьируемых переменных представим в следующем виде

$$\mathbf{X} = \{x_i\}^T, i = 1, \dots, k \quad (13)$$

где  $k$  — количество варьируемых параметров.

В рассматриваемой задаче (см. рис. 6) принимается 3 варьируемых параметра ( $k = 3$ ), представляющие собой требуемые добавки:

- $x_1 = \delta x_1$  — к толщине настила топ-палубы;
- $x_2 = \delta x_2$  — к толщине обшивки днища понтона (монолитный док) или днища башни (понтонный док);
- $x_3 = \delta x_3$  — к толщине настила стапель-палубы (монолитный док).

Фактические толщины, полученные после решения задачи будут определяться как

$$s_i = s_{i_0} + x_i,$$

где  $s_{i_0}$  — толщина  $i$ -ой связи, определяемая на предшествующем этапе проектирования в соответствии с требованиями к минимальным толщинам, местной и (или) поперечной прочности.

Предполагается, что предел текучести материала корпусных конструкций задан.

Толщину участков стенок башен, боковых стенок и продольных переборок понтона,  $s_{id}$ , примыкающих к конструкциям, толщина которых варьируется, будем представлять в виде следующих функциональных связей

$$s_{id} = \max \{s_{i_0}; s_i - \delta_i\}, i = 1, \dots, m \quad (14)$$

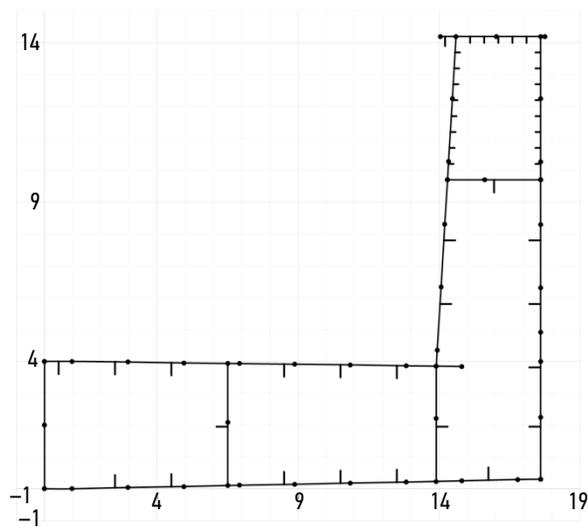
где  $\delta_i \leq \max \{0, 3s_{\max}; 5 \text{ мм}\}$  — уменьшение (перепад) толщины, устанавливаемый проектантом, мм;  $m$  — количество листовых структур, толщина которых варьируется (в рассматриваемом случае  $m = 3$ );  $id = id(i)$  — число элементов эквивалентного бруса, размеры которых зависят от  $i$ -го варьируемого параметра.

В рамках рассматриваемой задачи предполагается, что продольные балки топ-палубы и стенок башен будут выполнены из полосового профиля (рис. 7). Толщину стенки продольных балок основного набора целесообразно связать некоторой функциональной зависимостью с толщиной листовой конструкции, на которой рассматриваемая балка установлена. Такая зависимость ниже будет представлена в виде ограничения-неравенства (22), вытекающего из условия устойчивости продольных балок.

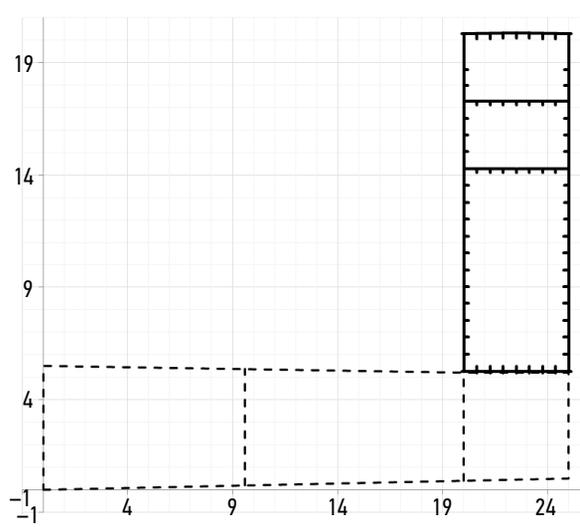
В качестве целевой функции принимается площадь сечения эквивалентного бруса  $A(\mathbf{X})$ , характеризующая массу продольных связей корпуса дока, которую необходимо минимизировать. В общем случае  $A(\mathbf{X})$  является функцией всех варьируемых параметров.

$$A(\mathbf{X}) = A_0 + \sum_{i=1}^{i=n} \delta f_i(\mathbf{X}) \rightarrow \min, \quad (15)$$

где  $A_0$  — площадь сечения эквивалентного бруса, соответствующая размерам продольных связей, полученным на предшествующем этапе проектирования



а) монолитный док грузоподъемностью 12 000 т



б) понтонный док грузоподъемностью 29 300 т

Рис. 6. Поперечные сечения доков, выбранных для тестирования.

Fig. 6. Cross-sections of the tested docks.

в соответствии с требованиями к минимальным толщинам и местной прочности (не изменяемая величина), см<sup>2</sup>;  $\delta f_i(\mathbf{X})$  — добавки к площади сечения  $i$ -ой связи, размеры которой корректируются в процессе решения поисковой задачи, см<sup>2</sup>;  $n$  — общее количество изменяемых продольных связей, размеры которых корректируются.

### Ограничения-равенства и ограничения-неравенства

**Ограничения-равенства** позволяют зафиксировать значение некоторой варьируемой переменной или какой-либо характеристики конструкции на заданном уровне и для настоящей задачи могут быть записаны в виде

$$h_j(x_j) = x_j - x_{j\text{-fix}} = 0; j = 1, \dots, m \quad (16)$$

где  $x_{j\text{-fix}}$  — фиксированное значение  $j$ -го варьируемого параметра;  $m$  — общее число ограничений-равенств.

**Ограничения-неравенства** построены на основе требований Правил РМРС, рассмотренных выше (см. (4)–(6)). При записи функциональных зависимостей (для компактности) характеристики, зависящие от нескольких варьируемых переменных, представляются в виде функции полного вектора варьируемых переменных  $\mathbf{X}$ , хотя на их значения могут влиять не все варьируемые переменные.

$$g_1(\mathbf{X}) = W_{act}^d(\mathbf{X}) - W_{req}^d(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (17)$$

$$g_2(\mathbf{X}) = W_{act}^b(\mathbf{X}) - W_{req}^b(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (18)$$

$$g_3(\mathbf{X}) = \sigma_{\Sigma}(\mathbf{X}) - k_{\sigma} \sigma_n \geq 0, \quad (19)$$

$$g_4(\mathbf{X}) = \sigma_{cr\_pl}(\mathbf{X}) - k_{b\_pl} \sigma_{c\_pl}(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (20)$$

$$g_5(\mathbf{X}) = \sigma_{cr\_ls}(\mathbf{X}) - k_{b\_ls} \sigma_{c\_ls}(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (21)$$

при этом ограничение (21) будет использоваться в виде (22) и (23).

Условия (17) – (21) регламентируют:

- момент сопротивления на уровне верхнего пояса эквивалентного бруса (на уровне топ-палубы) — неравенство  $g_1(\mathbf{X})$ ;
- момент сопротивления на уровне нижнего пояса эквивалентного бруса — неравенство  $g_2(\mathbf{X})$ ;
- допустимый уровень суммарных напряжений (от общего изгиба дока и общего изгиба понтона) в главных продольных связях понтона монолитного дока — неравенство  $g_3(\mathbf{X})$ ;
- устойчивость листовых элементов, участвующих в общем продольном изгибе дока — неравенство  $g_4(\mathbf{X})$ ;
- устойчивость продольных балок основного набора — неравенство  $g_5(\mathbf{X})$ .

Для формирования целевой функции и ограничений (15)–(21) используются следующие зависимости

$$W_{req}^{d/b}(\mathbf{X}) = \frac{\max\{|M^-|; |M^+|\} \cdot 10^3}{k_{\sigma} \sigma_{n\_d/b}(R_{eH})} \omega_{k\_d/b}(\mathbf{X}),$$

$$\sigma_{n\_d/b}(R_{eH}) = 235 / \eta_{d/b}(R_{eH}),$$

$$\eta(R_{eH}) = -3,6482 \cdot 10^{-8} \cdot R_{eH}^3 + 4,3433 \cdot 10^{-5} \cdot R_{eH}^2 - 1,8303 \cdot 10^{-2} \cdot R_{eH} + 3,3761,$$

$$\omega_{k\_d/b}(\mathbf{X}) = \left(1 - A(\mathbf{X})^{-1} \sum \Delta f_i(x_i) \Phi_{i\_d/b}(\mathbf{X})\right)^{-1},$$

$$A(\mathbf{X}) = A_0 + \sum_{i=1}^{i=n} \delta f_i(\mathbf{X}).$$

Для листовых элементов:

$$\Delta f_i = 10 \Delta s_i b_i,$$

где

$$\Delta s_i = k_z u_i T.$$

Для продольного набора из полосового проката

$$\Delta f_i(x_i) = 0,1 n_i h_{0i}(x_i) k_z u_{ni} T, i = 1, \dots, m,$$

$$\Phi_{i\_d/b}(\mathbf{X}) = c_i^2(\mathbf{X}) (A(\mathbf{X}) / I(\mathbf{X})) + c_i(\mathbf{X}) / z_{0\_d/b}(\mathbf{X})$$

где  $k_{\sigma} = 1, 0$  — коэффициент допускаемых напряжений от общего продольного изгиба;  $\omega_{k\_d/b}(\mathbf{X})$  — коэффициент, учитывающий поправку к моменту сопротивления на износ элементов конструкций;  $\eta_{d/b}(R_{eH})$  — коэффициент использования механических свойств стали<sup>2</sup>;  $R_{eH}$  — предел текучести рассматриваемой связи, может принимать различные значения для связей верхнего ( $R_{eH\_d}$ ) и нижнего ( $R_{eH\_b}$ ) поясков эквивалентного бруса, МПа;  $\Delta f_i(x_i)$  — добавка к площади сечения  $i$ -го элемента поперечного сечения дока, см<sup>2</sup>, учитывающая его запас на износ;

$\Phi_{i\_d/b}(\mathbf{X})$  — множитель, учитывающий влияние изменения площади сечения  $i$ -го элемента на момент сопротивления;  $\Delta s_i$  — уменьшение толщины  $i$ -ой листовой связи вследствие износа за срок службы  $T$ , годы, при скорости коррозионного изнашивания  $k_z u_i$ , мм/год, принимаемой согласно табл. 3.12.1.4.2 [1], мм;  $b_i$  — ширина  $i$ -ой листовой связи, м;  $n_i$  — число балок набора в  $i$ -ой группе;  $h_{0i}$  — высота стенки балки из полосового проката, см;  $u_{ni}$  — нормативная скорость коррозионного изнашивания балок набора  $i$ -ой группы, мм/год;  $I(\mathbf{X})$  — момент инерции поперечного сечения корпуса дока, см<sup>2</sup>м<sup>2</sup>, соответствующий требуемому моменту сопротивления (фактический момент инерции поперечного сечения дока на начало срока службы);  $c_i(\mathbf{X})$  — отстояние центра тяжести площади сечения  $i$ -ой связи ( $i$ -ой группы продольных

<sup>2</sup> Параметр  $\eta(R_{eH})$  представлен в виде полинома, аппроксимирующего табличную функцию п. 1.1.4.3 [1].

балок) от нейтральной оси, положение которой соответствует  $W(X)$  и  $I(X)$ ;  $z_{0_{(d/b)}}(X)$  — отстояние точки, на уровне которой определяется момент сопротивления, от нейтральной оси, положение которой соответствует  $W(X)$  и  $I(X)$ .

При определении  $z_{0_{(d/b)}}(X)$  и  $c_i(X)$  должен учитываться их знак: положительные вниз и отрицательные вверх от нейтральной оси.

Условие (19) преобразуется с учетом расчетных зависимостей общего вида

$$1,0 - \frac{\sigma_1(X) + \sigma_2(X)}{k_\sigma \sigma_{n_{(b)}}} \geq 0,$$

$$\sigma_1(X) = \frac{\max\{|M^-|; |M^+|\} \cdot z_{0_{(b)}}(X) \cdot 10^5}{I'(X)},$$

$$\sigma_2(X) = \frac{M_y \cdot z_y(X) \cdot 10^5}{I'_y(X)},$$

где  $I'(X)$  — момент инерции поперечного сечения корпуса дока на конец срока службы,  $см^4$ ;  $z_y(X)$  — отстояние днища понтона от нейтральной оси сечения главной продольной связи понтона, м;  $I'_y(X)$  — момент инерции поперечного сечения главной продольной связи, определённый с учетом износа элементов связей к концу срока службы дока,  $см^4$ .

Условие (20) преобразуется с учетом расчетных зависимостей, связывающих эйлеровы и критические напряжения к виду:

$$\begin{cases} \sigma_{cri}^{(plates)}(X) = \sigma_{ei}(X) \text{ при } \sigma_{ei}(X) \leq 0,5R_{eH}, \\ \sigma_{cri}^{(plates)}(X) = R_{eH} \left(1 - \frac{R_{eH}}{4\sigma_{ei}(X)}\right) \text{ при } \sigma_{ei}(X) > 0,5R_{eH} \end{cases}$$

$$\sigma_{ei}(X) = 0,1854 n_i(X) ((x_i - \Delta s_i) / b_i)^2, i = 1, \dots, m$$

при  $0 \leq \psi_i(X) \leq 1$ :

$$n_i(X) = \begin{cases} \frac{8,4}{\psi_i(X) + 1,1} \text{ при } \gamma_i = \frac{a_i}{b_i} > 1, \\ \varepsilon_i \left(\gamma_i + \frac{1}{\gamma_i}\right)^2 \frac{2,1}{\psi_i(X) + 1,1} \text{ при } \gamma_i < 1 \end{cases}$$

при  $-1 \leq \psi_i(X) \leq 0$ :

$$n_i(X) = \begin{cases} 10\psi_i^2(X) - 6,4\psi_i(X) + 7,6 \text{ при } \gamma_i > 1, \\ \varepsilon_i \left[10\psi_i^2(X) - 14\psi_i(X) + 1,9(1 + \psi_i(X))\left(\gamma_i + \frac{1}{\gamma_i}\right)^2\right] \text{ при } \gamma_i < 1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma_{ci}(X) = \frac{M^+}{I'(X)} z_i(X) \text{ при } z_i(X) > 0, \\ \sigma_{ci}(X) = \frac{M^-}{I'(X)} z_i(X) \text{ при } z_i(X) < 0, \end{cases}$$

$$\psi_i(X) = \frac{\sigma_{ci}^1(X)}{\sigma_{ci}^2(X)}$$

где  $n_i(X)$  — коэффициент, зависящий от вида нагружения пластин и отношения сторон их опорного контура;  $s'_i(X)$  — толщина  $i$ -ой листовой связи на конец срока службы, мм;  $b_i$  — сторона листового элемента, перпендикулярная направлению действия нормальных сжимающих напряжений, м;  $a_i$  — противоположная сторона листового элемента, м;  $\psi_i(X)$  — коэффициент, учитывающий степень неравномерности сжатия кромок пластины;  $z_i(X)$  — отстояние рассматриваемой связи от нейтральной оси, м.

Условие устойчивости продольных балок основного набора (21), установленных на листовых элементах конструкций плавучего дока, корректируемых в процессе решения задачи, предлагается преобразовать к виду

$$\frac{i'(x_i)}{f'(x_i)} - \frac{1,25R_{eH}l^2}{206} \geq 0, i = 1, \dots, m \quad (22)$$

где  $i'(x_i)$  и  $f'(x_i)$  — момент инерции и площадь поперечного сечения балки с присоединенным пояском,  $см^4$ , определяемые с учетом износа по состоянию на конец срока службы;  $l$  — пролет рассматриваемой балки, м.

При определении характеристик  $i'(x_i)$  и  $f'(x_i)$  ширину присоединенного пояска можно принять равным расстоянию между балками.

В случае использования полосового профиля необходимо контролировать соотношению высоты стенки к ее толщине. Толщина стенки балки должна находиться в определенном конструктивном соотношении с толщиной листа, на которой балка установлена. Эти ограничения можно представить в виде

$$\frac{h_w}{s_w} \leq 20\sqrt{\eta(R_{eH})}, \quad (23)$$

$$s_{w\_id}(s_i) = ks_i, k = 0.8 \div 1,25, \quad (24)$$

$$h_{w\_id}(s_i) = (15 \div 20)ks_i\sqrt{\eta(R_{eH})}, \quad (25)$$

где  $s_{w\_id}(s_i)$  — толщина стенки балки, мм;  $h_{w\_id}(s_i)$  — высота стенки балки, мм;  $s_i$  — толщина присоединенного пояска, мм.

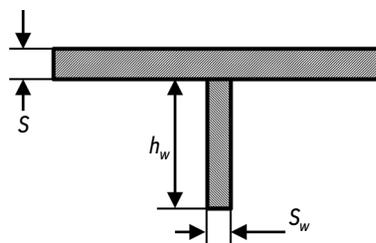


Рис. 7. Поперечное сечение продольной балки основного набора.  
Fig. 7. Cross-section of the girder in the main set.

Расчет геометрических характеристик поперечного сечения плавучего дока осуществляется на начало срока службы (с нулевым износом, новая конструкция) и на конец срока службы (с максимальным износом, рассчитанным на полный срок службы дока). Расчет геометрических характеристик представляется в табличном виде.

### Граничные условия

Граничные условия определяют диапазон допускаемых значений варьируемых параметров. Граничные значения добавок к толщине устанавливаются на усмотрение проектанта следующим образом

$$(x_i)_{\min} \leq x_i \leq (x_i)_{\max}, \quad i = 1, \dots, 3, \quad (26)$$

$$(x_i)_{\min} = 0, 0; \quad (x_i)_{\max} = 10, 0. \quad (27)$$

## РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Условия (17)–(21) хорошо демонстрируют циклический характер задачи: при изменении размеров какой-либо связи ЭБ, изменяются не только геометрические характеристики ЭБ, но и требования, предъявляемые РМРС к элементам конструкции при общем изгибе дока.

Результаты решения задачи с использованием инструмента *MS Excel* «Поиск решения» представлены ниже в табл. 1–3.

Начальные значения характеристик общей прочности (для монолитного дока):

$$\frac{W_{act}^d}{W_{req}^d} = \frac{3,62 \cdot 10^6}{5,44 \cdot 10^6} = 0,67 \leq 1,0,$$

$$\frac{W_{act}^b}{W_{req}^b} = \frac{7,53 \cdot 10^6}{5,51 \cdot 10^6} = 1,37 \geq 1,0,$$

$$\frac{\sum \sigma}{[\sigma]} = \frac{256,49}{301,28} = 0,851 \leq 1,0.$$

Момент сопротивления на уровне топ-палубы не удовлетворяет требованиям Правил РМРС.

Результаты решения оптимизационно-поисковой задачи (для **монолитного** дока):

$$\frac{W_{act}^d}{W_{req}^d} = \frac{4,82 \cdot 10^6}{4,82 \cdot 10^6} = 1,00 \geq 1,0,$$

$$\frac{W_{act}^b}{W_{req}^b} = \frac{8,55 \cdot 10^6}{5,27 \cdot 10^6} = 1,62 \geq 1,0,$$

$$\frac{\sum \sigma}{[\sigma]} = \frac{222,89}{301,28} = 0,740 \leq 1,0.$$

Требуемые добавки к толщине составляют:

- для настила топ-палубы 9 мм.

Соответственно были увеличены прилегающие к топ-палубе листы стенок башен для обеспечения перепада толщин не более 5 мм.

Начальные значения характеристик общей прочности (для **понтонного** дока):

$$\frac{W_{act}^d}{W_{req}^d} = \frac{4,60 \cdot 10^6}{9,87 \cdot 10^6} = 0,47 \leq 1,0,$$

$$\frac{W_{act}^b}{W_{req}^b} = \frac{5,39 \cdot 10^6}{1,03 \cdot 10^7} = 0,52 \leq 1,0.$$

Момент сопротивления на уровне топ-палубы и на уровне днища башен не удовлетворяют требованиям Правил РМРС.

Результаты решения оптимизационно-поисковой задачи (для **понтонного** дока):

$$\frac{W_{act}^d}{W_{req}^d} = \frac{8,62 \cdot 10^6}{8,62 \cdot 10^6} = 1,00 \geq 1,0,$$

$$\frac{W_{act}^b}{W_{req}^b} = \frac{9,04 \cdot 10^6}{9,04 \cdot 10^6} = 1,00 \geq 1,0.$$

Таблица 1. Характеристики поперечного сечения

Table 1. Cross section parameters

Характеристики поперечного сечения	Исходное значение	Результат решения	Исходное значение	Результат решения
	Монолитный док 12 000 т		Понтонный док 29 300 т	
$e$ , м	4,616	5,124	6,912	7,327
$F$ , см <sup>2</sup>	18906	19989	14156	20553
$J$ , м <sup>2</sup> см <sup>2</sup>	347395	437456	372415	662516
$W_{act}^{d/lb}$ , см <sup>3</sup>	3,62·10 <sup>6</sup>	4,82·10 <sup>6</sup>	4,60·10 <sup>6</sup>	8,62·10 <sup>6</sup>
	7,53·10 <sup>6</sup>	8,55·10 <sup>6</sup>	5,39·10 <sup>6</sup>	9,04·10 <sup>7</sup>

Примечание:  $e$  — аппликата нейтральной оси относительно ОП;  $F$  — площадь поперечного сечения эквивалентного бруса;  $J$  — момент инерции поперечного сечения эквивалентного бруса;  $W_{act}^{d/lb}$  — моменты сопротивления поперечного сечения на уровне топ-палубы и днища понтона (днища башни).

Note:  $e$ , neutral axis vertical center relative to the baseline;  $F$ , cross-sectional area of the girder;  $J$ , cross-sectional moment of inertia of the girder;  $W_{act}^{d/lb}$ , cross-sectional section moduli at the level of the top deck and the pontoon bottom (wingwall bottom).

Таблица 2. Результаты решения задачи (монолитный док)

Table 2. Problem solution (for a cast-in-place dock)

Наименование конструктивного элемента	Исходное значение	Результат решения
Толщина настила топ-палубы, мм	8	17
Прилегающие к топ-палубе листы стенок башен, мм	10	12
Продольные балки топ-палубы	160×10	240×14
Настил стапель-палубы, мм	без-корректировок	
Настил стапель-палубы, мм	без-корректировок	

Таблица 3. Результаты решения задачи (понтонный док)

Table 3. Problem solution (for a pontoon dock)

Наименование конструктивного элемента	Исходное значение	Результат решения
Толщина настила топ-палубы, мм	8	24
Прилегающие к топ-палубе листы стенок башен, мм	8	24
Днище башен, мм	11	28
Продольные балки топ-палубы	160×10	280×19
Продольные балки днища башен	180×11	330×22

Требуемые добавки к толщине составляют:

- для настила топ-палубы 16 мм;
- для днища башен 17 мм.

Соответственно увеличены прилегающие к топ-палубе и к днищу башен листы стенок башен для обеспечения перепада толщин не более 5 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемый метод решения задачи проектирования конструкций корпуса плавучего дока в соответствии с требованиями к прочности и устойчивости при общем продольном изгибе с использованием оптимизационно-поисковых процедур может эффективно применяться при проектировании конструкций плавучих доков.

Задача может решаться с использованием инструмента MS Excel «Поиск решения». На основе предлагаемого подхода планируется создание специализированного программного обеспечения, которое будет использоваться для решения аналогичных задач в составе системы автоматизированного параметрического проектирования конструкций САПР-К, разрабатываемой на кафедре Конструкции и технической эксплуатации судов СПбГМТУ.

## 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: В.Н. Тряскин — разработка методологии, анализ результатов; Д.Т. Иванова — организация оптимизационно-поисковой задачи, апробация задачи на реальных проектах плавучих доков, анализ результатов; В.А. Булкин — анализ результатов, верификация расчетов.

**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: V.N. Tryaskin: methodology, formal analysis; D.T. Ivanova: optimization and search methodology, problem testing on real-life floating dock projects, formal analysis; V.A. Bulkin: formal analysis, verification.

**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. Ловягин М.А., Корсаков В.М., Каганер Я.Б. и др. Металлические плавучие доки. Л.: Судостроение, 1964.
4. Тряскин В.Н. Методология автоматизированного проектирования конструкций корпуса судна. автореферат дисс. д-ра техн. наук. Санкт-Петербург, 2007. EDN: NIUJAJ
5. Тряскин В.Н. Автоматизированное параметрическое проектирование конструкций корпуса судна. СПб.: СПбГМТУ, 2010. ISBN: 978-5-88303-476-2 EDN: QNXHPP
6. Гарин Э.Н. Поискные методы в проектировании судовых корпусных конструкций, устройств и систем. СПб.: СПбГМТУ, 2003.

## 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 VN. 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. Lovyagin MA, Korsakov VM, Kaganer YaB, et al. *Metal floating docks*. Leningrad: Sudostroenie, 1964. (In Russ.)
4. Tryaskin VN. Methodology of automated design of ship hull structures. [Abstract of dissertation]. St. Petersburg, 2007. (In Russ.) EDN: NIUJAJ
5. Tryaskin VN. *Automated parametric design of ship hull structures*. Sankt-Peterburg: SPbGMTU; 2010. (In Russ.) ISBN: 978-5-88303-476-2 EDN: QNXHPP
6. Garin EN. *Search methods in the design of ship hull structures, devices and systems*. Sankt-Peterburg: SPbGMTU; 2003. (In Russ.)

## ОБ АВТОРАХ

**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

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

**Владимир Аронович Булкин**, инженер-конструктор 1 кат., АО «ЦМКБ «Алмаз»; e-mail:almaz.bulkin@yandex.ru

## AUTHORS' INFO

**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

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

**Vladimir A. Bulkin**, Design Engineer of the 1st Category, JSC "CMDB "Almaz"; e-mail:almaz.bulkin@yandex.ru

\* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author