

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-99-102  
УДК 629.5.023+629.5.015.4

В.В. Попов, В.А. Манухин

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДОКОВЫХ СТОЕК ПОПЕРЕЧНЫХ ПЕРЕБОРОК КОРАБЛЯ

**Объект и цель научной работы.** Работа посвящена исследованию взаимодействия доковой стойки с обшивкой поперечной переборки при постановке корабля в док. В работе оценивается степень участия обшивки переборки и ближайших к доковой вертикальных стоек в восприятии доковой стойкой реакции килевой дорожки. Целью работы является уточнение классической методики проектирования доковых стоек, в которой такое взаимодействие не учитывается.

**Материалы и методы.** Рассмотрена плоская стальная поперечная переборка традиционного типа. Определены нагрузки при доковании корабля в сухом доке. Для исследования применен метод конечных элементов.

**Основные результаты.** Исследование проводилось с помощью двух конечно-элементных моделей: плоской модели переборки и пространственной модели фрагмента корпуса корабля с переборкой. Результаты расчетов по обеим моделям в целом хорошо соотносятся друг с другом. Показано, что в восприятии реакции килевой дорожки вместе с доковой стойкой частично участвует обшивка переборки и ближайшие к доковой вертикальные стойки.

**Заключение.** Уточнена классическая методика проектирования доковых стоек. Учтено взаимодействие доковой стойки с обшивкой переборки и ближайшими вертикальными стойками, что позволило существенно уменьшить габариты и вес доковой стойки. Исправлена формула для оценки устойчивости доковой стойки.

**Ключевые слова:** доковая стойка, реакция килевой дорожки, поперечная переборка, редуцированный коэффициент, конечно-элементная модель.

*Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

DOI: 10.24937/2542-2324-2022-2-400-99-102  
UDC 629.5.023+629.5.015.4

V.V. Popov, V.A. Manukhin

St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

## DESIGN OF DOCKING STANCHION OF TRANSVERSE BULKHEADS IN SHIPS

**Object and purpose of research.** The paper is concerned with interaction of the docking stanchion and the transverse bulkhead plating when a ship is docked. Involvement of the bulkhead plating and vertical pillars closest to the docking stanchion in sustaining the response of the keel track is assessed. The purpose of the study is updating the classical design procedure for docking stanchion where such interaction is ignored.

**Materials and methods.** A plane steel transverse bulkhead of traditional type is considered. Loads on a dry-docked ship are estimated. Finite element method is used.

**Main results.** Studies were conducted using two finite element models: a 2D bulkhead model and a 3D model of ship hull part incorporating bulkhead. Results of calculation by both models are generally in good agreement. It is shown that along with the docking stanchion the keel track response is sustained partly by the bulkhead plating and vertical struts closest to the docking stanchion.

**Conclusion.** The classical design method of docking stanchions was updated, which made it possible to reduce the weight and size of docking stanchions. The formula used to assess the buckling of docking stanchions was corrected.

**Keywords:** docking stanchion, keel track response, transverse bulkhead, reduction coefficient, finite element model.

*The authors declare no conflicts of interest.*

*Для цитирования:* Попов В.В., Манухин В.А. Проектирование доковых стоек поперечных переборок корабля. Труды Крыловского государственного научного центра. 2022; 2(400): 99–102.

*For citations:* Popov V.V., Manukhin V.A. Design of docking stanchion of transverse bulkheads in ships. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2022; 2(400): 99–102 (in Russian).

Размеры доковой стойки поперечной переборки определяют по нагрузке, действующей на нее при постановке корабля в док. Наиболее применяемым способом докования корабля является его постановка на одну килевую дорожку из кильблоков. Для этого случая центральная (доковая) стойка поперечной переборки рассчитывается на восприятие реактивного усилия, передающегося с кильблоков на переборку.

Размеры доковой стойки подбираются по площади ее поперечного сечения  $F$  и моменту инерции  $I$ , определяемым из условий прочности и устойчивости стойки

$$F \geq \gamma \cdot \eta \cdot \frac{D_k L_{\Pi}}{\sigma_T L_K} - \omega_0, \quad I \geq \frac{2,8 \sigma_T L^2 F}{k \pi^2 E}, \quad (1)$$

где  $\eta = 1,5-2,0$  – коэффициент запаса;  $\gamma = 1,25-1,30$  – коэффициент, учитывающий неравномерность распределения реакции кильблоков;  $D_k$  – доковый вес корабля;  $L_{\Pi}$  – средняя длина отсеков, разделяемых рассматриваемой переборкой;  $L_K$  – длина килевой дорожки;  $\sigma_T$  – предел текучести материала стойки;  $\omega_0$  – площадь поперечного сечения стенки вертикального килея;  $L$  – длина стойки;  $E$  – модуль Юнга;  $k$  – коэффициент, учитывающий неравномерность сжатия стойки и условия ее закрепления.

В классической литературе [1, 2] указывается, что требуемая площадь стойки  $F$  не должна включать площадь обшивки переборки. Учет обшивки и уточнение характера распределения сжимающего усилия по длине стойки могут значительно повли-

ять на результаты расчетов и, следовательно, на размеры стойки. Влияние этих факторов рассмотрено в данной работе.

На двух конечно-элементных моделях (КЭМ) фрагмента корпуса корабля было рассмотрено взаимодействие доковой стойки и обшивки переборки, определена степень участия вертикальных стоек и обшивки переборки в восприятии реактивного усилия со стороны килевой дорожки доковой стойкой, выяснен характер распределения осевых усилий по высоте доковой и ближайших к ней вертикальных стоек. Помимо этого, была уточнена и обобщена формула для критического напряжения заделанной у днища и опертой у палубы сжатой стойки при линейном убывании сжимающего усилия от максимального у днища до заданного у палубы.

Исследована плоская поперечная переборка корабля, спроектированная в [3]. В табл. 1 представлены основные характеристики корабля.

Набор, толщины обшивки и настилов указаны на рис. 1 (см. вклейку). Палуба твиндека имеет поперечный набор из холостых бимсов полосообразного профиля № 12А с поперечной шпацией 583 мм. Корпус и переборка изготовлены из стали с пределом текучести 260 МПа. Для доковой стойки выбран сварной тавр № 56Б.

Поскольку моделируется симметричный относительно диаметральной плоскости (ДП) фрагмент корпуса корабля, суммарный вес расчетной модели  $Q$  должен быть равен половине значения реакции килевой дорожки  $R$ , передающейся на поперечную переборку. Реакцию килевой дорожки определим по формуле из [2, 3] при  $\eta = 1$ :

$$Q = 0,5R \cong 0,5D_k \frac{L_{\Pi}}{L_K} = 2256 \text{ т.} \quad (2)$$

В табл. 2 показан вес компонентов моделируемого фрагмента корпуса корабля.

Вес оборудования, под которым здесь подразумевается все, кроме корпусных конструкций, в конечно-элементных моделях был распределен на днище, верхнюю и нижнюю палубы в соотношении 6:3:1. Обе модели нагружались собственным весом конструкций корпуса и оборудования.

Плоская и пространственная КЭМ представлены на рис. 2 (см. вклейку).

В плоской КЭМ обшивка переборки и подушка кильблока моделировались оболочечными конечными элементами (КЭ), а пояски палуб, борта, второго дна, днища, стрингеры, киль и стойки переборки, включая доковую, – стержневыми КЭ. В пространственной КЭМ для продольных ребер

**Таблица 1.** Параметры корабля

**Table 1.** Ship parameters

Длина корпуса корабля, м	105,0
Ширина корпуса, м	13,0
Высота борта, м	8,0
Расчетное водоизмещение, кН	36890
Доковый вес корабля, кН	31360
Длина отсека средняя, м	13,6
Длина опорной части килевой линии, м	94,5
Шпация поперечного рамного набора, м	1,75

**Таблица 2.** Вес компонентов расчетной модели

**Table 2.** Weights of calculation model

Суммарный вес конструкций, кН	603
Вес оборудования, кН	1653
Общий вес, кН	2256

жесткости, холостых бимсов нижней палубы, вертикальных стоек переборки и поясков рамных баблов использованы стержневые КЭ, для обшивки переборки, днища и борта, настилов верхней, нижней палуб и второго дна, флоров, днищевых стрингеров, килля, стенок рамных шпангоутов и бимсов, карлингсов и доковой стойки – оболочечные КЭ, а для кильблоков – объемные КЭ. Плоская и пространственная КЭМ включают соответственно 17 000 и 121 470 КЭ.

Условия опирания переборки в плоской КЭМ можно выполнить только приближенно. По линии горизонтального килля переборка принята опертой на упругую подушку в пределах ширины кильблока, а нижний край подушки и линия вертикального килля считаются неподвижными. В ДП переборки задается условие симметрии перемещений. Граничные условия для пространственной КЭМ соответствуют полному закреплению перемещений по нижней плоскости подушек кильблоков, а также симметрии перемещений относительно ДП и относительно крайних поперечных сечений в середине отсеков.

По результатам расчета обеих КЭМ на рис. 3–4 (см. вклейку) можно видеть, что распределение напряжений  $\sigma_Y$  в горизонтальных поперечных сечениях переборки в районе доковой стойки неравномерно. Напряжения  $\sigma_Y$  концентрируются в нижней части доковой стойки в пределах ширины горизонтального килля и убывают по мере удаления от этой зоны. В зону концентрации также попадают ближайшие к ДП вертикальные стойки.

Для оценки участия обшивки переборки в восприятии сжимающих напряжений  $\sigma_Y$  построим эпюры этих напряжений в нескольких горизонтальных сечениях в средней части переборки. Затем вычислим в каждом сечении эффективную ширину обшивки, которая по всей своей ширине воспринимает такое же сжимающее напряжение, как и доковая стойка в данном сечении. Эффективная полуширина обшивки в  $i$ -м сечении  $a(y_i)$  находится из условия

$$\int_0^{l_i} \sigma_Y(x, y_i) dx = a(y_i) \cdot \sigma_Y(0, y_i), \quad (3)$$

где  $l_i$  – длина участка  $i$ -го сечения, на котором построена эпюра сжимающего напряжения  $\sigma_Y$ ;  $\sigma_Y(x, y_i)$  – эпюра сжимающего напряжения в  $i$ -м сечении;  $\sigma_Y(0, y_i)$  – значение сжимающего напряжения в доковой стойке в  $i$ -м сечении.

Из рис. 4 видно, что эффективная ширина обшивки переборки увеличивается по мере удаления от нижнего сечения доковой стойки. Причем в пространственной КЭМ это увеличение менее выраже-

но, чем в плоской. Наименьшее значение эффективной ширины обшивки переборки несколько превышает ширину горизонтального килля (ширину кильблока), равную 1,32 м, и составляет 1,8 м в пространственной модели и 1,6 м в плоской.

На рис. 5 (см. вклейку) показано распределение осевого усилия в доковой стойке, полученное по обеим КЭМ. В цвете показана эпюра усилия в симметричной половине доковой стойки, полученная по пространственной КЭМ. Без заливки показаны эпюры полного усилия. Видно, что сжимающее усилие уменьшается от днища к палубам нелинейно и максимальное значение в нижнем сечении стойки по пространственной КЭМ составляет около 750 кН, а по плоской 1030 кН.

Результаты расчета показывают, что реакция килевой дорожки воспринимается не только доковой стойкой и обшивкой переборки, но и соседними вертикальными стойками, если они сохраняют устойчивость. Эффективная площадь сжатых вертикальных стоек может быть учтена с редуцированным коэффициентом

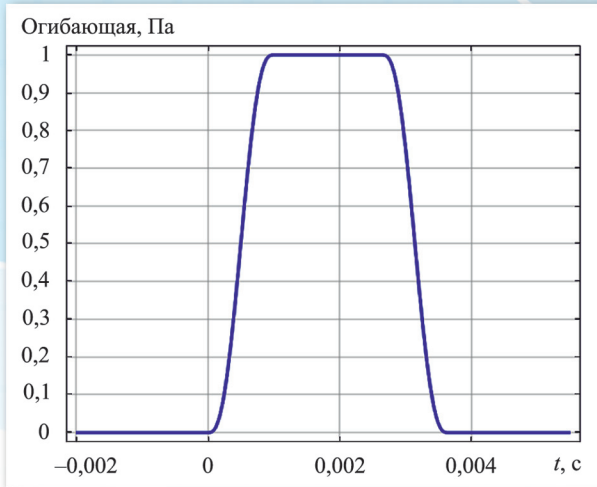
$$\varphi = \frac{\sigma_{YBC}}{\sigma_{YDC}} = \frac{T_{BC}}{T_{DC}} \cdot \frac{f_{DC}}{f_{BC}}, \quad (4)$$

где  $\sigma_{YBC}$ ,  $T_{BC}$  – напряжение и усилие в нижнем сечении вертикальной стойки;  $\sigma_{YDC}$ ,  $T_{DC}$  – напряжение и усилие в нижнем сечении доковой стойки;  $f_{DC}$  – площадь профиля доковой стойки;  $f_{BC}$  – площадь профиля вертикальной стойки.

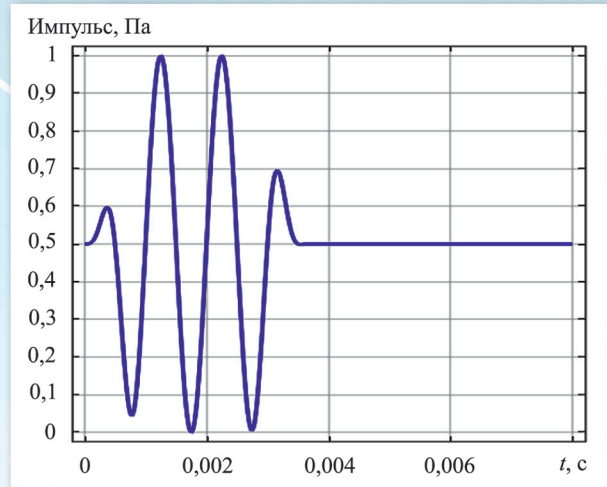
Для наиболее сжатых первой и второй от ДП вертикальных стоек в плоской КЭМ указанные сжимающие усилия составили соответственно 100 кН и 70 кН, а редуцированные коэффициенты – 0,7 и 0,45. В пространственной КЭМ усилия составили соответственно 60 кН и 70 кН, а редуцированные коэффициенты – 0,56 и 0,45. Таким образом, площадь вертикальных стоек, воспринимающих вместе с доковой стойкой и обшивкой переборки реакцию килевой дорожки, на оба борта будет равна  $2f_{BC}$ .

Пространственная КЭМ приводит к более низким значениям сжимающих напряжений в обшивке переборки и сжимающих усилий в доковой стойке и в ближайших к ней вертикальных стойках. Это связано с тем, что в ней, в отличие от плоской КЭМ, полностью моделируются палубы, борт и днищевое перекрытие, воспринимающее на себя через бортовые связи часть весовой нагрузки  $Q$ .

С некоторым запасом устойчивости, будем считать сжимающее усилие в доковой стойке распределенным линейно от максимального значения  $T$  на



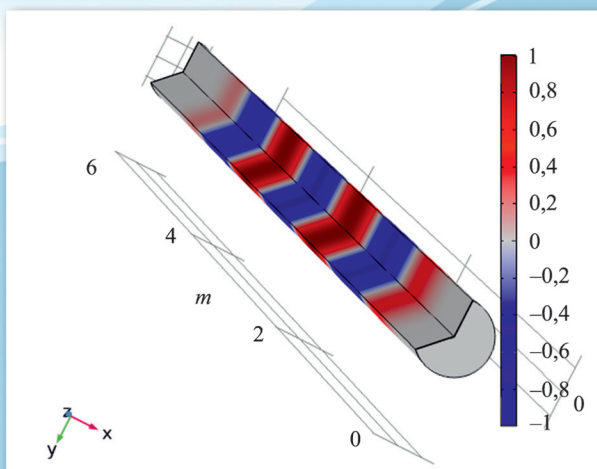
**Рис. 3.** Огибающая импульса, моделируемого в волноводе  
**Fig. 3.** Envelope of the pulse modeled in waveguide



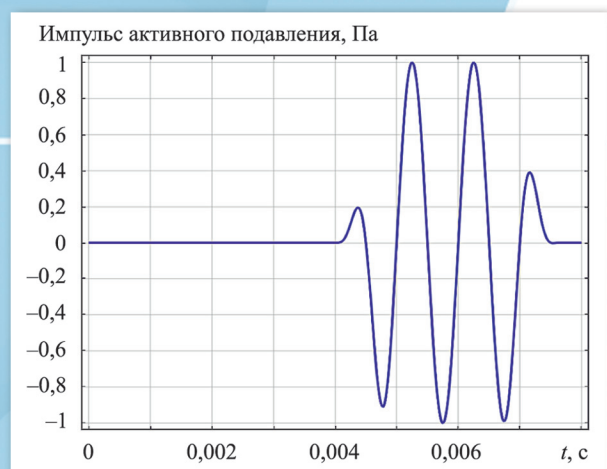
**Рис. 4.** Генерируемый импульс на частоте  $f_0 = 1000$  Гц  
**Fig. 4.** Pulse generated at frequency  $f_0 = 1000$  Hz



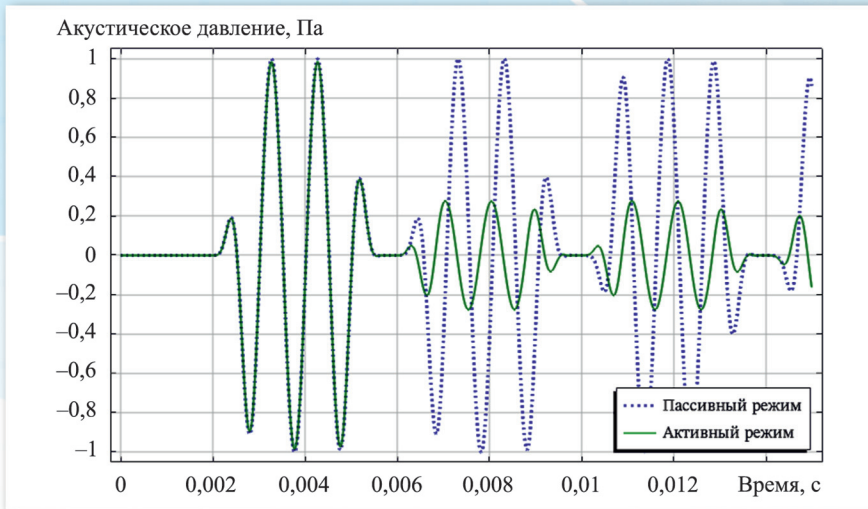
**Рис. 5.** Спектр исходного сигнала в волноводе  
**Fig. 5.** Spectrum of initial signal in waveguide



**Рис. 6.** Импульс в гидроакустической трубе в момент времени  $t = 0,0037$  с  
**Fig. 6.** Pulse in acoustic pipe at instant  $t = 0.0037$  s

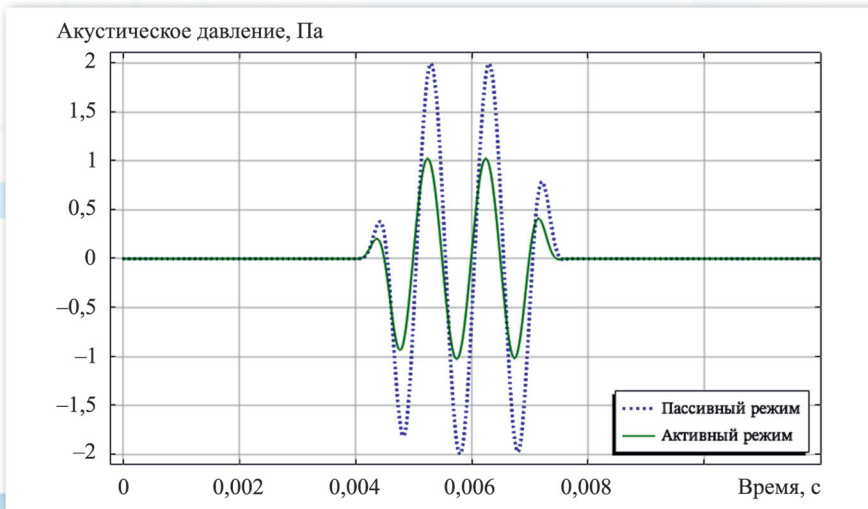


**Рис. 7.** Генерируемый сигнал  $p_{ANC}$  активного подавления  
**Fig. 7.** Active cancelling signal  $p_{ANC}$



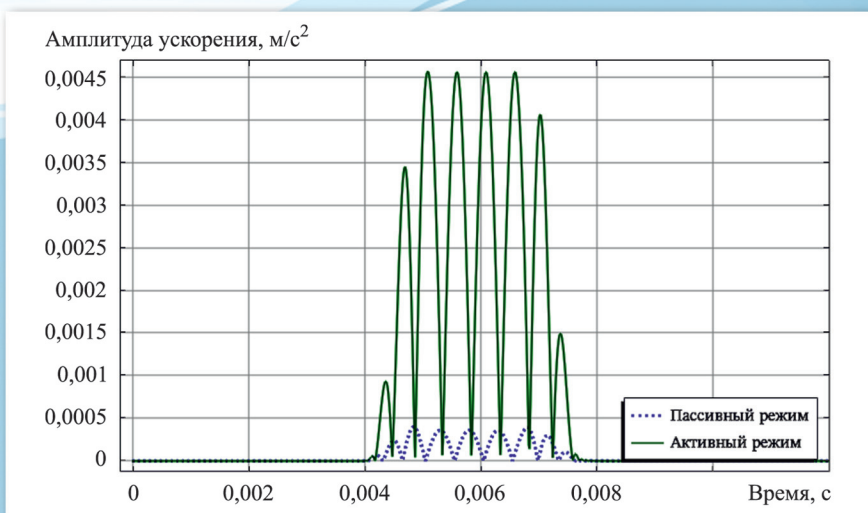
**Рис. 8.** Акустическое давление посередине (виртуальный гидрофон № 3) волновода при наличии/отсутствии режима активного поглощения сигнала

**Fig. 8.** Acoustic pressure in the middle of waveguide (virtual hydrophone No. 3) at active cancelling mode on/off



**Рис. 9.** Акустическое давление вблизи торца *B* – активного поглотителя в волноводе (виртуальный гидрофон № 5) при наличии/отсутствии режима активного поглощения сигнала

**Fig. 9.** Acoustic pressure near face *B* – active absorber in waveguide (virtual hydrophone No. 5) at active cancelling mode on/off



**Рис. 10.** Результаты расчета амплитуды ускорения вблизи поверхности торца *B* в пассивном и активном режимах

**Fig. 10.** Results of acceleration amplitude calculations near face *B* surface in passive and active modes

нижнем жестко заделанном конце до  $\alpha T$  на верхнем свободно опертом конце, причем  $0 \leq \alpha \leq 1$ . Для этого случая авторами данной работы получена формула для эйлерова усилия в виде

$$T_3 = 5,33 f_1(\alpha) \frac{\pi^2 EI}{L^2}, \quad (5)$$

$$f_1(\alpha) = \frac{1 + 3,0645\alpha + 2,8848\alpha^2}{1 + 4,4255\alpha + 7,6104\alpha^2 + 5,0336\alpha^3}.$$

В этом случае коэффициент  $k$  в формуле (1) для необходимого момента инерции стойки  $I$  будет равен  $k = 5,33 f_1(\alpha)$ .

С учетом возможной потери устойчивости нижних листов эффективная площадь пояса обшивки переборки при сжатии доковой стойки может быть определена по формуле

$$f_{\text{ПР}} = \frac{b_{\text{ГК}}}{2} (1 + \psi) t, \quad (6)$$

где  $b_{\text{ГК}}$  – ширина горизонтального кия;  $t$  – толщина нижнего пояса переборки;  $\psi$  – редуцированный коэффициент, равный

$$\psi = \min \left( \frac{\sigma_{\text{КР}}}{\sigma_{\text{Т}}}, 1 \right), \quad (7)$$

где  $\sigma_{\text{КР}}$  – критическое напряжение нижнего пояса обшивки переборки, сжатого вдоль вертикальных стоек, имеющего ширину, равную расстоянию между стойками.

Таким образом, необходимая площадь сечения доковой стойки  $f_{\text{ДС}}$  в нижней части ее пролета может быть вычислена по формуле

$$f_{\text{ДС}} \geq F - (f_{\text{ПР}} + 2f_{\text{ВС}}). \quad (8)$$

Для рассмотренной переборки из условия прочности (1) при  $\gamma \cdot \eta = 1,3 \cdot 1,5 = 1,95$  требуемая площадь доковой стойки равна  $F = 0,0238 \text{ м}^2$ , что без учета обшивки переборки и вертикальных стоек соответствует тавру № 71Б. Вертикальные стойки устойчивости не теряют. Добавочная площадь обшивки при  $\psi = 0,345$  с учетом вертикальных стоек имеет площадь  $f_{\text{ПР}} + 2f_{\text{ВС}} = 0,0094 \text{ м}^2$ . В итоге получаем чистую площадь сечения доковой стойки равную  $0,0144 \text{ м}^2$ , что соответствует тавру № 56Б. Анализ напряжений пространственной КЭМ показывает, что профиль доковой стойки может быть еще уменьшен – до тавра № 50Б.

Уточнение классической методики, приводящей в рассмотренном случае к доковой стойке из тавра № 71Б с весом 803 кг, позволяет уменьшить габаритную высоту стойки в 1,42 раза и ее вес на 417 кг, или на 52 %.

## Список использованной литературы

1. Курдюмов А.А. Прочность корабля. Ленинград : Судпромгиз, 1956. 384 с.
2. Короткин Я.И., Ростовцев Д.М., Сиверс Н.Л. Прочность корабля. Ленинград : Судостроение, 1974. 432 с.
3. Кориунов В.А., Манухин В.А., Родионов А.А. Расчетное проектирование основных связей корпуса корабля : учеб. пособие. Санкт-Петербург : СПбГМТУ, 2019. 108 с.

## References

1. Kurdyumov A.A. Ship strength. Leningrad : Sudpromgiz, 1956. 384 p. (in Russian).
2. Korotkin Ya.I., Rostovtsev D.M., Sivers N.L. Ship strength. Leningrad : Sudostroenie, 1974. 432 p. (in Russian).
3. Korshunov V.A., Manukhin V.A., Rodionov A.A. Design analysis of main ship hull framing. Handbook. St. Petersburg : SPbGMTU. 2019. 108 p. (in Russian).

## Сведения об авторах

Попов Владимир Владимирович, аспирант кафедры теоретической механики и сопротивления материалов ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 198262, Россия, Санкт-Петербург, Ленинский пр., д. 101. E-mail: v.popof@mail.ru.

Манухин Вадим Анатольевич, к.т.н., доцент кафедры строительной механики корабля ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. Тел.: +7 (812) 494-09-41. E-mail: nikal6@mail.ru.

## About the authors

Vladimir V. Popov, Postgraduate student of the Department of Theoretical Mechanics and Materials Strength, State Marine Technical University of Saint Petersburg. Address: 101, Leninskiy pr., St. Petersburg, Russia, post code 198262. E-mail: v.popof@mail.ru.

Vadim A. Manukhin, Cand. Sci. (Eng), Associate Professor of the Department of Ship Mechanics, State Marine Technical University of Saint Petersburg. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. Tel.: +7 (812) 494-09-41. E-mail: nikal6@mail.ru.