

DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-417-429

STUDYING THE PROBLEM OF GEOMETRIC PARAMETERS SIMULATION OF HULL STRUCTURES DEFORMED UNITS

P. A. Bimberekov¹, E. G. Burmistrov²

¹ — Siberian State University of Water Transport, Novosibirsk, Russian Federation

² — Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russian Federation

The most common case of deformation of frame T-beams is taken as the object of research on the accuracy of modeling the geometric parameters of the cross-section of the deformed nodes of ship hull structures. The exact, determining the strength characteristics, geometric parameters of the cross-section of a deformed wall of a frame beam and a beam with an attached sheathing belt in a deformed wall with several models replacing the original section in succession, are compared in the paper. The scanned cross-sections of beams models with a deformed wall are taken as the evaluated objects. The models have several options for the ratio of the wall height to its thickness and different forms of buckling of the beam wall. Based on the simulation results, a comparative assessment of the values of these parameters is given and a conclusion about the accuracy of the simulation results sufficient for practice is made. In addition, it is shown that the modeling accuracy allows satisfactorily assessing the geometric parameters of the strength of the cross-section of the frame beams of the ship's set with a deformed wall without direct access to the beam and assessing the zone and type of wall deformation — by measuring the deformation of the outer side of the skin at the attachment point of the beam. A composite model, representing a set of an undeformed T-beam with a wall of the same thickness, height equal to the height of the deformed beam wall and a sheet element in the plane of the beam wall adjacent to the skin, is recommended as the main one. The height of this element is 2/3 of the height of an undeformed beam with a cross-sectional area equal to the difference between the wall areas of the undeformable modeled and imitated beams. In addition, the accuracy assessment of determining the geometric parameters of the strength of the cross-section of a T-beam with an attached sheathing belt in the case of a deformed wall and its reinforcement with sheet elements in the plane of the wall is given. It is concluded that the use of this modeling method allows one to obtain models convenient for the analytical description with their satisfactory accuracy.

Keywords: modeling, deformed node, frame beam, attached chord, geometric parameter, imitation beam.

For citation:

Bimberekov, Pavel A., and Evgeny G. Burmistrov. "Studying the problem of geometric parameters simulation of hull structures deformed units." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 14.3 (2022): 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-417-429.

УДК 629.12:530.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОБЛЕМЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЕФОРМИРОВАННЫХ УЗЛОВ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

П. А. Бимбереков¹, Е. Г. Бурмистров²

¹ — ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет водного транспорта», Новосибирск, Российская Федерация

² — ФГБОУ ВО «Волжский государственный университет водного транспорта», Нижний Новгород, Российская Федерация

В исследовании в качестве объекта оценки точности моделирования геометрических параметров поперечного сечения деформированных узлов судовых корпусных конструкций принят наиболее часто встречающийся случай деформации рамных тавровых балок. Выполнено сопоставление точных, определяющих прочностные характеристики, геометрических параметров поперечного сечения деформированной стенки рамной балки и балки с присоединенным пояском обшивки при деформированной стенке нескольких последовательно замещающих исходное сечение моделей. В качестве оцениваемых объектов приняты

сканированные поперечные сечения моделей балок с деформированной стенкой. Эти модели имеют несколько вариантов соотношения высоты стенки к ее толщине и разную форму потери устойчивости стенки балки. По результатам моделирования дана сопоставительная оценка значений указанных параметров и сделано заключение о достаточной для практики точности результатов моделирования. Кроме того, показано, что точность моделирования позволяет удовлетворительно оценить геометрические параметры прочности поперечного сечения рамных балок судового набора с деформированной стенкой без непосредственного доступа к балке и оценки зоны и вида деформации стенки — по замерам деформации наружной стороны обшивки в месте крепления балки. В качестве основной рекомендована составная модель, представляющая совокупность недеформированной тавровой балки со стенкой той же толщины и высотой, равной высоте стенки деформированной балки и листового элемента в плоскости стенки балки, примыкающего к обшивке. Высота этого элемента составляет $2/3$ высоты недеформированной балки с площадью поперечного сечения, равной разности площадей стенок недеформируемой моделируемой и имитационной балок. Дополнительно приведена оценка точности определения геометрических параметров прочности поперечного сечения тавровой балки с присоединенным пояском обшивки при деформированной стенке и ее подкреплении листовыми элементами в плоскости стенки. Сделан вывод о том, что использование указанного способа моделирования позволяет получить удобные для аналитического описания модели при их удовлетворительной точности.

Ключевые слова: моделирование, деформированный узел, рамная балка, присоединенный поясок, геометрический параметр, имитационная балка.

Для цитирования:

Бимбереков П. А. Исследование проблемы моделирования геометрических параметров деформированных узлов корпусных конструкций / П. А. Бимбереков, Е. Г. Бурмистров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 417–429. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-417-429.

Введение (Introduction)

В ходе эксплуатации судовые корпусные конструкции получают повреждения в виде износов и остаточных деформаций, которые оказывают влияние на прочностные характеристики корпусов и поэтому нормируются классификационными обществами [1]–[3]. Рамные балки судового набора достаточно часто получают повреждения деформационного типа в виде выпучины и кромочной деформации их стенок, причем под выпучинами понимают деформацию всей стенки балки по ее высоте в одном поперечном сечении, а под кромочной деформацией — лишь на протяжении части стенки, примыкающей к обшивке. При обоих этих видах деформации некоторым образом изменяются геометрические параметры изгибной прочности поперечного сечения тавровой балки — моменты инерции и сопротивления.

Экспериментальная оценка работоспособности поврежденных балок, как правило, является затруднительной и малоцелесообразной вследствие очевидной нежелательности ее извлечения из корпуса или сложности их нагружения для контроля фиксируемых параметров, но принципиальное решение этих вопросов выполнено в работах [4]–[6]. Для точной расчетной оценки указанных параметров деформированных балок необходимо знание точной формы профиля поперечного сечения, полученного в результате повреждения, определение которого также связано с некоторыми затруднениями. При этом можно получить приближенные значения интересующих параметров поперечного сечения поврежденной рамной тавровой балки посредством принятия в расчет моделей сечения.

Целью данной статьи является исследование проблемы моделирования геометрических параметров деформированных узлов корпусных конструкций для получения объективной информации при планировании судоремонта [7] и обеспечения возможности управления производственными рисками.

Выбор моделей поперечного сечения балки с деформированной стенкой и оценка точности такого моделирования являются основной целью исследования. Кроме того, основанием для оценки точности вариантов моделей поперечного сечения служит потребность быстрой оценки текущего состояния поврежденных балок в недоступных или труднодоступных для непосредственного контроля отсеках судна (например, в заполненных топливных цистернах и т. п.). В связи с оценкой

точности приведенных в работе вариантов моделей при определении видов подкрепления поврежденных балок в исследовании учитывается вариант подкрепления деформированной стенки рамной балки листовыми элементами в плоскости стенки балки, в частности предусмотренный способами, рассмотренными в работах [7]–[9]. При этом сохраняется возможность подкрепления обшивки листовыми элементами [10], композитными материалами [11], [12] и балками набора [13]–[15]. В качестве технического решения, обеспечивающего варианты моделирования поперечного сечения балки, использован способ [9], точность моделирования при использовании которого ранее не оценивалась.

На рис. 1 показан вид поперечного сечения исходной неповрежденной рамной тавровой балки с присоединенным поясом обшивки, состоящей из стенки 1 площадью f и высотой h_c при толщине t_c , полки 2 площадью f_1 и присоединенного пояса обшивки площадью f_2 . Высота взятого отдельно таврового профиля площадью $f_1 + f$ составляет значение $h_{\text{пп}}$. Общая высота изображенного профиля имеет значение $h_{\text{общ}}$.

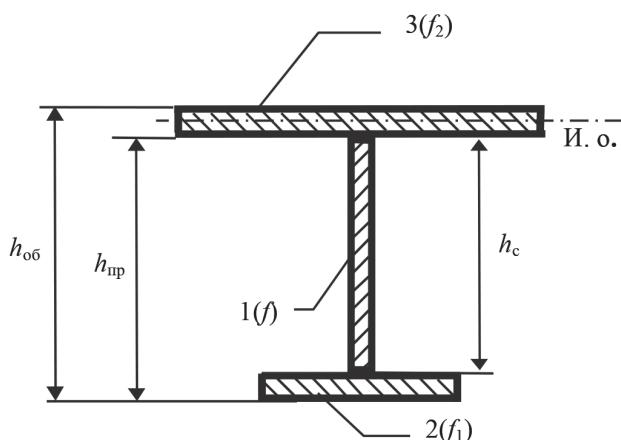


Рис. 1. Поперечное сечение недеформированной рамной тавровой балки с присоединенным поясом обшивки

Условное обозначение:

И. о. — исходная ось в начале расчета геометрических параметров поперечного сечения, выбранная традиционно посередине толщины присоединенного пояса обшивки

На рис. 2 показано поперечное сечение поврежденной рамной тавровой балки, имеющей кромочную деформацию стенки с присоединенным поясом обшивки, а также конструкция и варианты его моделирования [9].

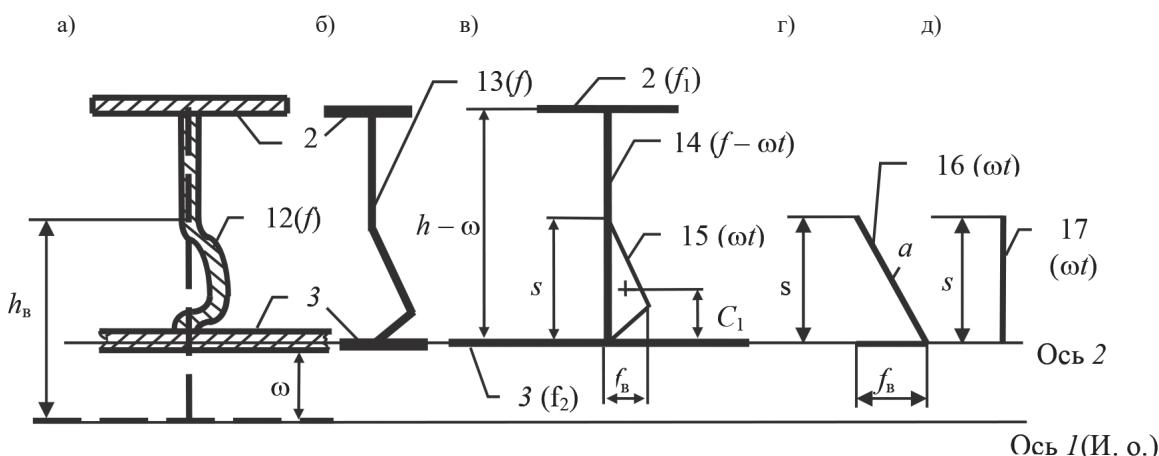


Рис. 2. Поперечное сечение деформированной рамной тавровой балки с присоединенным поясом обшивки при кромочной деформации ее стенки (a), ряд последовательных вариантов его моделирования (б, в) и моделирования его частей (г, д)

Положение стенки и присоединенного пояска обшивки исходной конструкции обозначено пунктирными линиями. Стенка деформированного поперечного сечения (на рис. 2, а элемент 12) деформирована на высоту h_b от исходного положения обшивки и высоту s от нового положения обшивки со стрелкой кромочной деформации (выпучивания) f_b (рис. 2, а, в) при стрелке вмятины ω в месте крепления стенки к обшивке. Модель деформированной стенки 12 представлена на рис. 2, б в виде стенки с упрощенной формой сечения (ломаная 13), или в форме стенки 14 (рис. 2, в) вместе с ломаной 15 и центром тяжести от оси 2 C_1 , толщиной t_1 , имитирующей зону деформации, моделирующей первичную форму модели 13 (см. рис. 2, б) или варианты 16 (см. рис. 2, г), 17 (см. рис. 2, д), моделирующие элемент 15. Вариант 16 ломаной состоит из элементов прямоугольного треугольника: катета в плоскости деформированной обшивки размером f_b и гипотенузы a (при значении второго катета s). На рис. 2 и 3 величина h представляет собой положение центра тяжести полки от исходного положения обшивки.

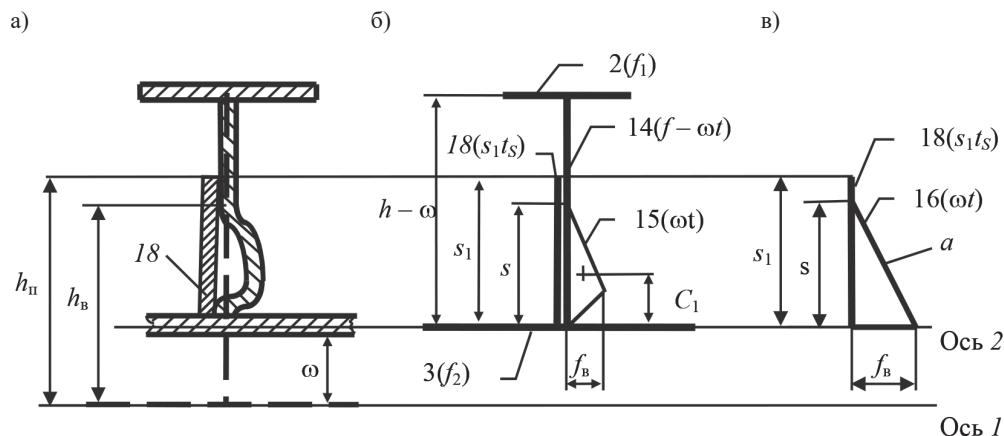


Рис. 3. Поперечное сечение деформированной рамной тавровой балки с присоединенным пояском обшивки при кромочной деформации ее стенки, подкрепленной листовым элементом (а), а также последовательные варианты его моделирования (б) и моделирования его частей (в)

На рис. 3, а представлено поперечное сечение поврежденной рамной тавровой балки, имеющей кромочную деформацию стенки с присоединенным пояском обшивки, подкрепленную листовым элементом 18 в плоскости стенки балки и варианты его моделирования. Листовой элемент 18 (см. рис. 3, а) толщиной t_s находится при отсчете от исходного положения обшивки на высоте $h_{\text{п}}$ и на высоте s_1 от положения деформированной обшивки. При дальнейшем моделировании листовой элемент может объединяться в комплекс элементов (например, 18 и 16) — рис. 3, в.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Исследования выполнялись авторами кафедр «Теории корабля, судостроения и технологии материалов» (СГУВТ) и «Проектирования и технологии постройки судов» ВГУВТ в 2021 г. Для выбора наиболее удачных моделей и оценки точности моделирования параметров поперечного сечения рамных тавровых балок с деформированными стенками необходимо было получить образцы характерной формы деформации стенок рамных балок. Для этих целей использовались данные сканирования профилей поперечного сечения деформированных жестяных моделей, изготовленных с применением патента РФ¹, а также материалы монографии (Бимбереков П. А. Исследование повреждаемости, методики освидетельствования и дефектации судовых корпусных конструкций судов внутреннего и смешанного плавания. — Новосибирск: НГАВТ, 2007. — 420 с.). Графическая информация по моделям приведена на рис. 4. Толщина стенок моделей имеет два значения: 0,52 мм (при высоте модели 20,8; 31,2; 41,6) и 0,33 мм (при высоте модели 13,2; 19,2; 26,4).

¹ Пат. 31650 РФ, МПК 7G21M 10/00. Образцы для модельных испытаний конструкций / Заяв. и патентообр. П. А. Бимбереков; заяв. 04.01.2003; опубл. 20.08.2003. Бюл. № 23.

Измерения в ходе сканирования профиля поперечного сечения деформированных моделей балок выполнялись с использованием индикаторов ИЧ10 с шагом 0,2 мм по высоте при точности считывания с индикатора 0,01 мм. Обмеры выполнялись с отсчетом от поясков балки и затем накладывались друг на друга на нужной высоте. Отдельные значения геометрических характеристик сечений деформированных моделей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значение геометрических характеристик поперечного сечения стенок деформированных моделей

Параметры	Балка с размерами неповрежденной стенки $t_c \times h_c$					
	$0,33 \times 13,2$	$0,33 \times 19,2$	$0,33 \times 26,4$	$0,52 \times 20,8$	$0,52 \times 31,2$	$0,52 \times 41,6$
1. Фактическая высота деформированной стенки по результатам обмера деформированного сечения стенки, мм	9,2	15,4	22,8	19,8	29,0	39,8
2. Фактическая максимальная стрелка деформации (выпучивания) относительно исходного (недеформированного) положения, мм	3,40	3,97	4,43	1,02	2,36	-1,71/1,29

Для деформированных профилей стенок моделей (рис. 4), скопированных и отмасштабированных в программе «Компас», посредством инструментария программы получены точные значения геометрических характеристик поперечного сечения, сведенные в табл. 2. Необходимо отметить, что несмотря на то, что было достигнуто достаточно близкое соответствие графических и реальных моделей, их полного соответствия не требовалось, так как дальнейший анализ предусматривал сравнение параметров именно графических моделей поперечного сечения и их моделирующих. В процессе моделирования было предусмотрено четыре указанных далее в работе варианта сценариев в зоне деформации стенки балки по высоте и форме.

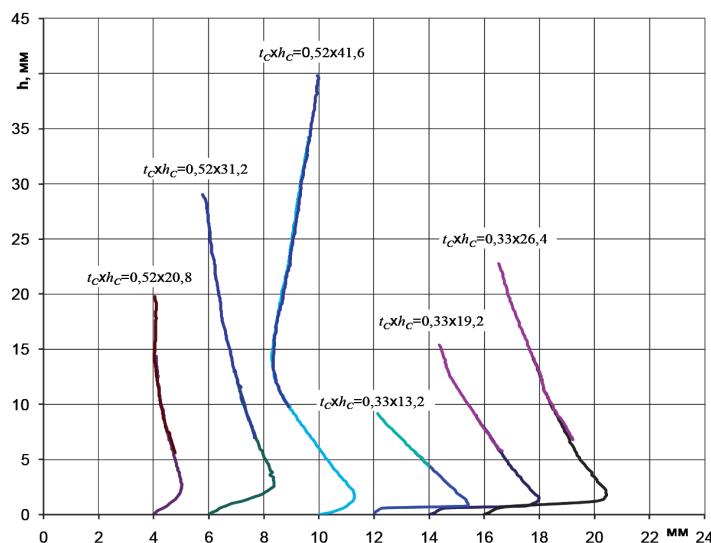


Рис. 4. Формы поперечного сечения деформированных жестяных моделей тавровых балок
(шкала абсцисс — условное расположение места крепления стенок
к обшивке с шагом 2,0 мм; шкала ординат — высота измерения от обшивки h)

Использование моделей, согласно рис. 2, б–д, предусмотрено посредством расчетов геометрических параметров изгибной прочности: моментов инерции и сопротивления поперечного сечения. Для расчета моментов инерции и сопротивления поперечного сечения деформированных модельных

балок принято обычное сочетание толщин элементов балки, а именно равенство значений толщин стенки и присоединенного пояска обшивки ($t_c = t_2$) при значении ширины присоединенного пояска $50t_c$ (данное значение ширины принято с ошибкой в безопасную сторону близким к минимально возможному), а значения толщин свободного пояска $t_1 = 1,2t_c$ при ширине $20t_1$. Дополнительно рассмотрим точность выбранного вида моделирования для случая подкрепления деформированной стенки листовым элементом согласно рис. 3.

Таблица 2

**Значения геометрических характеристик графических моделей
поперечного сечения стенок деформированных моделей в программе «Компас»
и расчетные значения тавровых балок с присоединенным пояском обшивки**

Параметры	Балка с размерами неповрежденной стенки $t_c \times h_c$					
	0,33 × 13,2	0,33 × 19,2	0,33 × 26,4	0,52 × 20,8	0,52 × 31,2	0,52 × 41,6
1. Высота графической модели поперечного сечения деформированной стенки, мм	9,21	15,40	22,70	19,85	29,06	39,88
2. Длина с одной стороны контура по высоте графической модели поперечного сечения деформированной стенки, мм	12,99	19,12	26,60	20,19	30,16	40,98
3. Значения максимальных стрелок деформации (выпучивания) относительно ее исходного (недеформированного) положения, мм	3,43	3,96	4,43	1,00	2,35	-1,69/1,31
4. Площадь сечения графической модели поперечного сечения деформированной стенки, мм^2	4,28	6,30	8,80	10,43	15,57	21,28
5. Положение центра тяжести, определяемое, согласно пп. 4, мм	3,965	6,736	10,24	9,85	14,17	19,81
6. Центральный момент инерции площади, определяемый, согласно пп. 4, относительно горизонтальной деформированной оси, мм^4	36,0	148,2	439,6	348,6	1146	2856
7. Центральный момент инерции поперечного сечения тавровой балки с присоединенным пояском обшивки с деформированной стенкой по графической модели поперечного сечения стенки относительно горизонтальной деформированной оси, мм^4	529,2	1493	3320	3965	8808	17316
8. Положение нейтральной оси поперечного сечения графической модели поперечного сечения тавровой балки с присоединенным пояском обшивки и деформированной стенкой относительно исходной оси рис. 1, мм	3,26	5,48	8,18	7,37	11,0	15,6
7. Момент сопротивления поперечного сечения, определяемый на основе пп. 7 и 8, мм^3	81,2	142,5	220,2	296,6	464,9	688,0

В качестве сценариев определения зоны деформации стенки балки были приняты следующие:

- форма деформации полностью известна;
- форма деформации стенки балки неизвестна, но допускается, что она кромочная с высотой $0,4h_{CD}$ ($h_{CD} = h_c - \omega$);
- форма деформации стенки балки неизвестна, но допускается, что протяженность ее составила $2/3h_{CD}$;
- форма деформации стенки балки неизвестна, но допускается, что она распространена по всей ее высоте.

При оценке величины стрелки отклонения от первоначального положения (выпучивания) стенки (без доступа со стороны набора) примем для выполненных в работе расчетов, что она определена верно по выражению

$$f/h_c = 13[1 - \exp(-5,5) \omega/h_c]/[40 + (m - 40)/2],$$

где f/h_c — относительное значение стрелки выпучивания стенки к ее высоте; ω/h — относительная величина вмятины в месте крепления стенки набора; $m = h_c/t_c$ — отношение высоты стенки балки к ее толщине.

Результаты (Results)

Расчет, согласно рассмотренным ранее в работе позициям, выполнен в табл. 3¹–6. Для некоторых случаев приведены формы поперечного сечения моделей (рис. 5 и 6).

Таблица 3

Значения геометрических характеристик поперечного сечения моделей деформированных стенок и тавровых балок с присоединенным к ним пояском обшивки

Параметры модели	Балка с размерами неповрежденной стенки $t_c \times h_c$											
	0,33 × 13,2		0,33 × 19,2		0,33 × 26,4		0,52 × 20,8		0,52 × 31,2		0,52 × 41,6	
модель	стенки	балки	стенки	балки	стенки	балки	стенки	балки	стенки	балки	стенки	балки
$f, \text{ см}^2$	4,12	—	6,23	—	861	—	10,5	—	15,6	—	21,2	—
$\Delta, \%$	-3,85	—	-2,03	—	-2,21	—	0,25	—	0,49	—	-0,27	—
$z_c, \text{ см}$	3,79	3,23	6,23	10,5	10,1	8,21	9,83	7,36	14,1	11,0	19,6	15,5
$\Delta, \%$	-4,52	—	-1,07	—	-1,17	—	-0,25	—	-0,33	—	-1,08	—
$i_c, \text{ см}^4$	34,4	527,4	6,55	1488	422	3318	348	3963	1146	8804	2879	17298
$\Delta, \%$	-4,36	-0,349	-2,82	-0,426	-4,02	-0,061	-0,18	-0,067	0,04	-0,041	0,81	-0,106
$W_c, \text{ см}^4$	—	80,6	—	141,4	—	220,5	—	296,4	—	464,5	—	685,1
$\Delta, \%$	—	-0,820	—	-0,824	—	0,153	—	-0,075	—	-0,086	—	-0,426

Условные обозначения: f — площадь стенки; z_c — положение центра тяжести сечения деформированной стенки относительно обшивки; i_c и W_c — соответственно центральный момент инерции поперечного сечения деформированной стенки либо балки и центральный момент сопротивления балки относительно горизонтальной оси; $\Delta, \%$ — погрешность по сравнению с точным значением (см. табл. 1) в %

Из анализа табл. 3 следует вывод об удовлетворительной работе аппроксимирующих ломаных (см. рис. 5, а), моделирующих оцениваемые параметры исходной графической модели стенки в основном с погрешностью $\pm 2\%$. Из табл. 4 следует, что построение исходной графической модели упрощенной ломаной с практически горизонтальным участком у обшивки приводит к существенному (до 15 %) изменению оцениваемых параметров. При этом при сопоставлении данных табл. 4 и 5 получим, что указанные погрешности параметров при моделировании ломанной нивелируются для оцениваемых параметров балки с присоединенным пояском обшивки практически до погрешности в пределах $\pm 1\%$, что можно считать удовлетворительным. Значения в табл. 4 приведены согласно рис. 2, б и 5, б, в табл. 5 — согласно табл. 4.

¹ Значения даны при допущении, что форма деформации стенки полностью известна и моделируется согласно рис. 2, б в виде рис. 5, а.

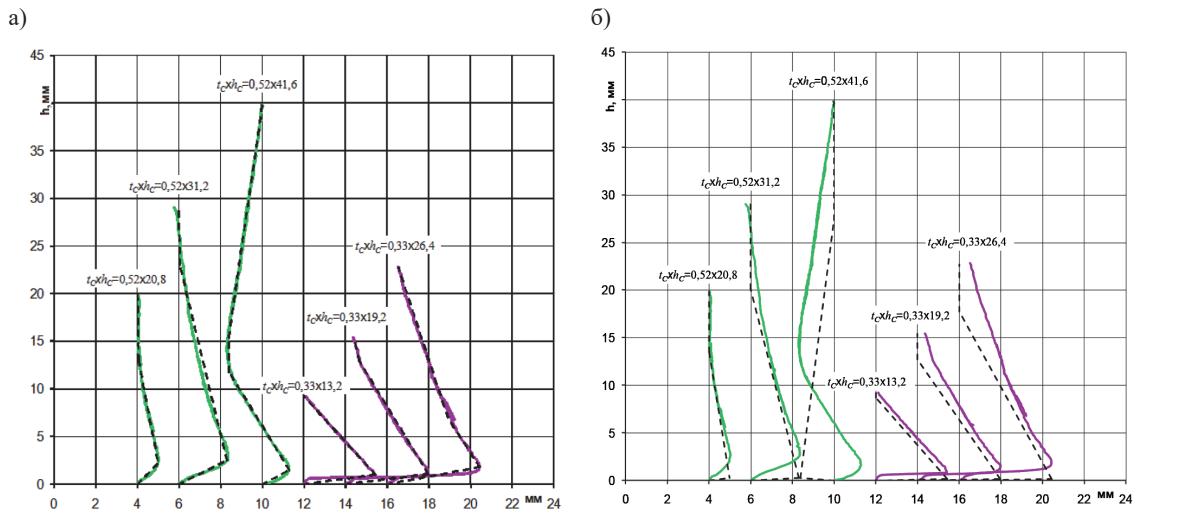


Рис. 5. Моделирование поперечных сечений стенок тавровых балок ломаными по вариантам:
 a — приближенным к форме деформации; b — при представлении зоны деформации
сторонами треугольника (гипотенузой и катетом) с высотой зоны деформации стенки $2/3h_{CD}$

Таблица 4

Значения геометрических характеристик поперечного сечения стенок деформированных моделей при моделировании зоны деформации в виде ломаной с разной величиной распространения по высоте деформированной стенки h_{CD}

Параметр	Балка с размерами неповрежденной стенки $t_c \times h_c$													
	0,33 × 13,2		0,33 × 19,2		0,33 × 26,4		0,52 × 20,8		0,52 × 31,2		0,52 × 41,6			
Зона деформации	0,4 h_{CD}	$2/3$	1,0 h_{CD}	0,4 h_{CD}	$2/3$	1,0 h_{CD}	0,4 h_{CD}	$2/3$	1,0 h_{CD}	$2/3$ h_{CD}	1,0 h_{CD}	$2/3$ h_{CD}	1,0 h_{CD}	$2/3$ h_{CD}
f , см ²	4,47	4,34	4,33	6,66	6,54	6,51	9,20	9,08	9,04	10,7	10,8	10,7	16,3	16,3
Δ , %	4,37	1,50	1,06	5,79	3,82	3,28	4,50	3,19	2,75	3,01	3,4	2,95	4,70	4,40
z_c , см	3,36	3,47	3,48	6,08	6,20	6,23	9,43	9,55	9,60	9,55	9,54	9,56	13,5	13,6
Δ , %	-15,2	-12,5	-12,2	-9,77	-8,00	-7,50	-7,89	-6,80	-6,29	-3,02	-3,14	-2,96	-4,57	-4,30
i_c , см ⁴	38,7	39,3	39,5	162	162	163	480	477	479	376	377	376	1278	1274
Δ , %	7,45	9,16	9,73	9,34	9,03	9,70	9,16	8,49	8,89	8,00	8,20	8,00	11,6	11,2

Условные обозначения: f — площадь стенки; z_c — положение центра тяжести сечения деформированной стенки относительно обшивки; i_c — собственный центральный момент инерции поперечного сечения деформированной стенки относительно горизонтальной оси; Δ , % — погрешность, %, по сравнению с точным значением, приведенным в табл. 1.

Примечание. В табл. 4 принято, что горизонтальная составляющая ломаной имеет несущественный наклон с возвышением наполовину толщины так, чтобы при формировании балки наклонный участок по высоте зоны деформации стенки начинался от обшивки.

Таблица 5

Значения геометрических характеристик поперечного сечения тавровых балок с присоединенным пояском обшивки при деформированных стенках

Параметр	Балка с размерами неповрежденной стенки $t_c \times h_c$													
	0,33 × 13,2		0,33 × 19,2		0,33 × 26,4		0,52 × 20,8		0,52 × 31,2		0,52 × 41,6			
Зона деформации	0,4 h_{CD}	$2/3$	1,0 h_{CD}	0,4 h_{CD}	$2/3$	1,0 h_{CD}	0,4 h_{CD}	$2/3$	1,0 h_{CD}	$2/3$ h_{CD}	1,0 h_{CD}	$2/3$ h_{CD}	1,0 h_{CD}	$2/3$ h_{CD}
I_c , см ⁴	529,7	530,7	531,0	1498	1499	1501	3355	3357	3359	3979	3979	3979	8882	8881
Δ , %	0,106	0,291	0,336	0,302	0,363	0,455	1,079	1,087	1,175	0,345	0,342	0,349	0,849	0,834
W_c , см ⁴	80,3	80,6	80,6	141,2	141,7	141,9	220,8	221,2	221,5	295,6	296,6	296,6	465,2	465,4
Δ , %	-1,222	-0,818	-0,752	-0,877	-0,613	-0,467	0,284	0,477	0,626	-0,022	-0,012	0,001	0,072	0,104

Примечания: 1. Основные обозначения являются аналогичными, принятыми в табл. 2.

2. h_{CD} — высота деформированной стенки балки.

На рис. 6 приведены варианты моделирования поперечного сечения стенок деформированных балок по варианту, приведенному на рис. 2, в с учетом замены элемента 15 элементом 16 (для оценки зоны деформации $1/3h_{CD}$), и варианту моделирования ремонта поврежденной балки с установлением подкрепляющего элемента 18 в плоскости стенки балки (см. рис. 3). При этом выполнено моделирование деформированной стенки балки, согласно рис. 2, в, и произведена замена элемента 16 элементом 17 высотой h_{CDI} .

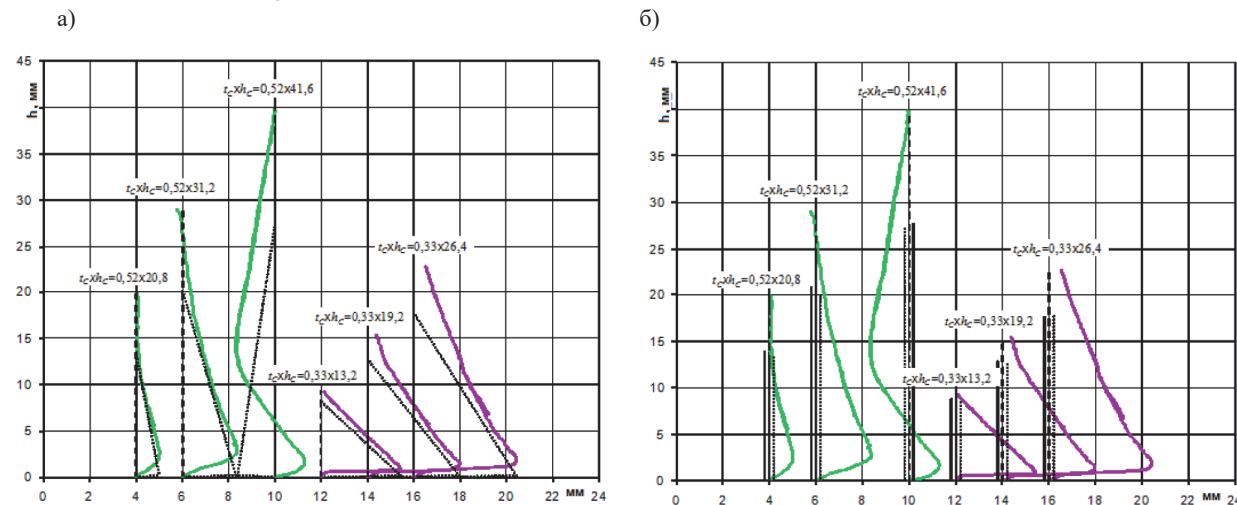


Рис. 6. Моделирование поперечных сечений стенок тавровых балок ломаными по варианту рис. 2, в (пунктирная линия является имитацией прямой стенки):

а — при представлении зоны деформации по варианту рис. 2, в

(пунктирной линией обозначена остаточная ломаная с высотой зоны деформации стенки $2/3h_{CD}$);

б — зона деформации, подкрепленная листовым элементом в плоскости стенки на высоту $2/3h_c$ от обшивки (сплошная вертикальная черная линия) при моделировании остаточной зоны деформации прямым элементом в плоскости стенки балки от обшивки (пунктирная линия)

Расчеты моделирования оцениваемых параметров балок с присоединенным пояском обшивки по варианту рис. 2, в с модификацией замены элемента 15 элементами 16 и 17 приведены в табл. 6, в которой указаны значения по варианту рис. 2, в с учетом замены элемента 15 элементами 16 (два столбца для каждой балки) и 17 (последний из трех столбцов для той же балки).

Таблица 6

Значения геометрических характеристик поперечного сечения тавровых балок с присоединенным пояском обшивки при моделировании

Параметр	Балка с размерами неповрежденной стенки $t_c \times h_c$																	
	0,33 × 13,2			0,33 × 19,2			0,33 × 26,4			0,52 × 20,8			0,52 × 31,2			0,52 × 41,6		
Зона деформации	1,0 h_{CD}	$2/3$ h_{CD}	h_{CDI}	1,0 h_{CD}	$2/3$ h_{CD}	h_{CDI}	1,0 h_{CD}	$2/3$ h_{CD}	h_{CDI}	1,0 h_{CD}	$2/3$ h_{CD}	h_{CDI}	1,0 h_{CD}	$2/3$ h_{CD}	h_{CDI}			
i_c , см ⁴ Δ , %	530,9 0,326	519,7 -1,797	526,0 -0,599	1493 -0,032	1484 -0,695	1480 -0,953	3332 0,341	3305 -0,453	3296 -0,748	3966 0,027	3962 -0,080	3962 -0,088	8808 0,003	8782 -0,286	8778 -0,333	17312 -0,327	17264 -0,302	17260 -0,328
W_c , см ⁴ Δ , %	82,1 1,054	80,2 -1,323	81,6 0,424	144,4 1,315	142,8 0,160	143,2 0,438	225,3 2,379	222,2 0,936	222,6 1,075	297,1 0,166	296,6 -0,027	296,6 -0,025	467,4 0,541	464,9 0,002	464,9 0,005	689,0 0,141	685,4 -0,372	685,4 -0,373

Примечание. Кроме основных условных обозначений, аналогичных приведенным в табл. 2, дополнительно приняты следующие: h_{CD} — высота деформированной стенки балки; $h_{CDI} = 2/3h_{CD}$ — высота имитационной пластины, компенсирующей и равной по площади сечения ломаной остаточной толщине, т. е. выполненной с заменой элемента 15 (см. рис. 2) или 16 элементом 17.

Из табл. 6 следует, что оцениваемые варианты модели практически равноточны с вариантами, рассмотренными в табл. 5. Сопоставление значений расчета геометрических характеристик

поперечного сечения тавровых балок с присоединенным пояском обшивки при моделировании по варианту рис. 2, в, с учетом замены элемента 15 элементом 17 (последний из трех столбцов данных, приведенных в табл. 5 по каждой балке) и подкрепление элементов 18, согласно рис. 3, выполнено в табл. 7. На основе приведенных табличных данных можно сделать вывод о том, что модель поперечного сечения, согласно рис. 6, б, дает удовлетворительную точность, сопровождаемую погрешностью результата в подавляющем числе случаев не более 1 % по абсолютному значению.

Таблица 7

Значение геометрических характеристик поперечного сечения подкрепленных листовым элементом в плоскости стенки тавровых балок с присоединенным пояском обшивки

Параметр	Балка с размерами неповрежденной стенки $t_c \times h_c$											
	0,33 × 13,2		0,33 × 19,2		0,33 × 26,4		0,52 × 20,8		0,52 × 31,2		0,52 × 41,6	
	Точное значение	Модель	Точное значение	Модель	Точное значение	Модель	Точное значение	Модель	Точное значение	Модель	Точное значение	Модель
$i_c, \text{ см}^4$	553,5	551,6	1556	1541	3494	3447	4081	4077	9199	9170	18266	18209
$\Delta, \%$	—	-0,339	—	-0,984	—	-1,344	—	-0,085	—	-0,315	—	-0,313
$W_c, \text{ см}^4$	86,6	87,3	150,3	150,7	234,5	233,9	304,8	304,7	484,1	483,9	717,6	715,1
$\Delta, \%$	—	0,253	—	0,253	—	-0,228	—	0,030	—	-0,033	—	-0,349

Примечание. Основные обозначения аналогичны приведенным в табл. 2.

Обсуждение (Discussion)

В результате моделирования деформированных стенок рамных тавровых балок можно сделать следующие выводы. На основе анализа табл. 4 можно принять допущение, что наиболее точным вариантом моделирования одновременно момента инерции и момента сопротивления следует считать вариант при деформации стенки балки, равной $2/3h_{CD}$.

Принимая во внимание возможное отсутствие доступа к деформированным балкам изнутри корпуса, сопоставим погрешность получения результата при возможных сценариях определения протяженности деформации стенки балки по ее высоте. Проанализировав данные табл. 5, следует отметить несущественность разницы между ними с точки зрения получения конечного расчетного результата, а именно значений искомых геометрических прочностных параметров поперечного сечения балок с присоединенным пояском обшивки: моментов инерции и сопротивления. Последовательное моделирование участка остаточной ломаной, согласно вариантам, приведенным на рис. 2, в, г до дополнительного листового элемента в плоскости стенки балки той же площади, не повлияло на ухудшение конечного результата. Напротив, судя по значению погрешности, видна положительная динамика результата.

Использование предложенной комбинированной модели, состоящей из имитационной балки с дополнительным листовым элементом остаточной площади и подкрепляющего листового элемента, привело к удовлетворительному по точности результату расчета искомых геометрических параметров, что вполне объяснимо, так как дополнение схемы расчета элементом с точными характеристиками должно было уменьшить ее общую погрешность.

Выводы (Conclusions)

На основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Рассмотренные варианты моделирования поперечного сечения деформированных стенок рамных тавровых балок позволили рекомендовать в качестве наиболее простого и в то же время точного приема представление деформированной стенки в виде составной модели. Такая модель включает совокупность имитационной недеформированной тавровой балки со стенкой той же толщины высотой, равной высоте стенки деформированной балки и дополнительного листового элемента в плоскости стенки балки, примыкающего к обшивке.

2. Площадь поперечного сечения дополнительного листового элемента может быть принята равной разности площадей стенок недеформируемой моделируемой и имитационной балок, а его высота принимается равной 2/3 высоты деформированной, а возможно, и недеформированной балки.

3. Принятие данной модели позволяет отказаться от оценки на этапе дефектации корпуса стрелки деформации (выпучивания) стенки. Можно допустить возможность использования предложенного варианта моделирования также для фланцеванных рамных балок.

4. Принятый подход, позволяющий найти достаточно простые промежуточные решения и конечную модель в результате последовательного моделирования применительно к описанию параметров геометрии измененных (деформированных) балок набора, дает удовлетворительный результат. Можно отметить также принципиальную возможность его рационального использования при формировании динамически изменяемых моделей в [16], [17].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chistov V. B. Calculation Methods for Assessing the Reliability of Ship Hulls / V. B. Chistov, S. O. Baryshnikov, N. I. Gerasimov, V. A. Zhukov // 2018 IEEE International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS). — IEEE, 2018. — Pp. 295–297. DOI: 10.1109/IT-MQIS.2018.8524937.

2. Барышников С. О. Способ расчета надежности корпусов судов и их элементов с учетом выполненных ремонтов и условий дальнейшей эксплуатации / С. О. Барышников, А. Б. Красюк, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 85–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-85-95.

3. Барышников С. О. Надежность корпусов судов с общими остаточными деформациями / С. О. Барышников, Т. О. Карклина, В. Б. Чистов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 3. — С. 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.

4. Пат. 2411478 Российская Федерация, МПК G01M 5/00. Способ диагностики технического состояния сталежелезобетонных пролетных строений / С. А. Бокарев [и др.]; заяв. и патентообр. Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». — № 2009104967/28; заявл. 13.02.2009; опубл. 20.02.2011, Бюл. № 4.

5. Пат. 2382347 Российская Федерация, МПК G01M 17/06, B66C 13/16. Способ диагностики геометрических параметров ходовой части мостовых кранов / Ю. И. Пимшин, И. Ю. Пимшин, В. А. Наугольнов; заяв. и патентообр. Ю. И. Пимшин, И. Ю. Пимшин, В. А. Наугольнов. — № 2008145829/11; заявл. 19.11.2008; опубл. 20.02.2010, Бюл. № 5.

6. Пат. 2689048 Российская Федерация, МПК B63B 43/00, B63B 9/00. Способ выявления повреждений в наружной обшивке корпуса судна / П. Е. Бураковский, Е. П. Бураковский, А. В. Мысник; заяв. и патентообр. Калининградский гос. техн. ун-т. — № 2018109313; заявл. 15.03.2018; опубл. 23.05.2019, Бюл. № 15.

7. Зяблов О. К. Концепция автоматизированной подготовки ремонтной документации / О. К. Зяблов, Ю. А. Кочнев, И. Б. Кочнева // Морские интеллектуальные технологии. — 2020. — № 4–1 (50). — С. 69–74. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.008.

8. Пат. 2094296 Российская Федерация, МПК B63B 9/00. Способ ремонта поврежденных связей / П. А. Бимбереков, В. Б. Чистов. — заяв. и патентообр. Новосибирская гос. акад. водн. трансп. — № 94042480/11; заявл. 28.11.1994; опубл. 27.10.1997.

9. Пат. 2376563 Российская Федерация, МПК G01M 5/00. Способ моделирования конструкций / П. А. Бимбереков; заяв. и патентообр. П. А. Бимбереков. — № 2007101405/28; заявл. 15.01.2007; опубл. 20.12.2009, Бюл. № 35.

10. Пат. 2674390 Российская Федерация, МПК B63B 9/00. Способ ремонта корпуса судна / М. В. Буйлова; заяв. и патентообр. Балтийский федеральный ун-т им. Иммануила Канта. — № 2018113575; заявл. 13.04.2018; опубл. 07.12.2018, Бюл. № 34.

11. Пат. 2228280 Российская Федерация, МПК B63B 9/04. Композитное подкрепление судового перекрытия / Л. К. Арабьян, А. Ю. Кононенко; заяв. и патентообр. Новосибирская гос. акад. водн. трансп. — № 2002119789/11; заявл. 22.07.2002; опубл. 10.05.2004, Бюл. № 13.

12. Пат. 2307043 Российская Федерация, МПК B63B 9/00, F16S 1/00. Способ укрепления существующей металлической конструкции / Стефан Дж. Кеннеди; заяв. и патентообр. Интеллиджент Инжениринг (Бахамаз) Лимитед. — № 2003109748/11; заявл. 21.08.2001; опубл. 27.09.2007, Бюл. № 27.

13. Пат. 2486096 Российская Федерация, МПК B63B 3/14, B63B 3/26. Бортовое перекрытие / П. Е. Бураковский, Е. П. Бураковский; заяв. и патентообр. Калининградский гос. техн. ун-т. — № 2012109943/11; заявл. 14.03.2012; опубл. 27.06.2013, Бюл. № 18.

14. Пат. 2507103 Российская Федерация, МПК B63B 3/14, B63B 3/26. Бортовое перекрытие / П. Е. Бураковский, Е. П. Бураковский; заяв. и патентообр. Калининградский гос. техн. ун-т. — № 2012151746/11; заявл. 03.12.2012; опубл. 20.02.2014, Бюл. № 5.

15. Пат. 2716890 Российская Федерация, МПК B63B 3/14, B63B 3/26. Бортовое перекрытие / Е. П. Бураковский, П. Е. Бураковский, А. В. Мысник; заяв. и патентообр. Калининградский гос. техн. ун-т. — № 2018133750; заявл. 24.09.2018; опубл. 17.03.2020, Бюл. № 8.

16. Пат. 2530710 Республика Беларусь, МПК G06N 7/06, G06F 17/50, G01M 5/00. Способ математического и компьютерного моделирования / С. Н. Юркевич, И. А. Миклашевич, А. Ф. Смалюк, П. А. Случак; заяв. и патентообр. ОАО «558 АРЗ». — № 2012154245/08; заявл. 14.12.2012; опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.

17. Пат. 2731666 США, МПК G06F 30/23. Моделирование и анализ развития трещины по методу конечных элементов в многочисленных плоскостях конструкции / Джеральд И. Мэбсон, Мадхавадас Рамнатх, Мэрианн И. Уилкинсон; заяв. и патентообр. Зе Боинг Компани. — № 2017115199; заявл. 28.04.2017; опубл. 07.09.2020, Бюл. № 25.

REFERENCES

1. Chistov, Valentin B., Sergey O. Baryshnikov, Nikolay I. Gerasimov, and Vladimir A. Zhukov. “Calculation Methods for Assessing the Reliability of Ship Hulls.” *2018 IEEE International Conference “Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies” (IT&QM&IS)*. IEEE, 2018. 295–297. DOI: 10.1109/ITMQIS.2018.8524937.
2. Baryshnikov, Sergei O., Alla B. Krasiuk, and Valentin B. Chistov. “A method for calculating the reliability of vessels hulls and their elements, taking into account the performed repairs and conditions for further operation.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 85–95. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-85-95.
3. Baryshnikov, Sergei O., Tatyana O. Karklina, and Valentin B. Chistov. “Reliability of ships hulls with over allresidual deformations.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.3 (2019): 519–533. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-3-519-533.
4. Bokarev, S.A., I. I. Snezhkov, L. Ju. Solov'ev, D. N. Tsvetkov, and A. N. Jashnov. RU 2 411 478 C2. IPC G01M 5/00 Method for diagnostics of technical condition of steel reinforced concrete spans. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2011.
5. Pimshin, Ju. I., I. Ju. Pimshin, and V. A. Naugol'nov. RU 2 382 347 C1, IPC G01M 17/06, B66C 13/16. Method of diagnosis of geometrical parameters of carrier of overhead travelling crane. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2010.
6. Burakovskij, P. E., E. P. Burakovskij, and A. V. Mysnik. RU 2 689 048 C1, IPC B63B 43/00, B63B 9/00. Method for detecting damages in outer hull plating. Russian Federation, assignee. Publ. 23 May 2019.
7. Zyablov, Oleg K., Yury A. Kochnev, and Irina B. Kochneva. “The concept of automated preparation of repair documentation.” *Marine Intelligent Technologies* 4–1(50) (2020): 69–74. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.008.
8. Bimberekov, P. A., and V. B. Chistov. RU 2 094 296 C1, IPC B63B 9/00. Method for repair of damaged strength members. Russian Federation, assignee. Publ. 27 Oct. 1997.
9. Bimberekov, P. A. RU 2 376 563 C2, IPC G01M 5/00. Structural modeling method. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Dec. 2009.
10. Bujlova, M. V. RU 2 674 390 C1, IPC B63B 9/00. Way of repairing ship hull. Russian Federation, assignee. Publ. 7 Dec. 2018.
11. Arab'jan, L. K., and A. Ju. Kononenko. RU 2 228 280 C2, IPC B63B 9/04. Composite stiffening member for ship's ceiling. Russian Federation, assignee. Publ. 10 May 2004.
12. Kennedi, S. Dzh. RU 2 307 043 C2, IPC B63B 9/00, F16S 1/00. Method of reinforcement of existing metal construction. Great Britain, assignee. Publ. 27 Sept. 2007.
13. Burakovskij, P. E., and E. P. Burakovskij. RU 2 486 096 C1, IPC B63B 3/14, B63B 3/26. Side bulkhead. Russian Federation, assignee. Publ. 27 June 2013.
14. Burakovskij, P. E., and E. P. Burakovskij. RU 2 507 103 C1, IPC B63B 3/14, B63B 3/26. Side bulkhead. Russian Federation, assignee. Publ. 20 Feb. 2014.

15. Burakovskij, P. E., E. P. Burakovskij, and A. V. Mysnik. RU 2 716 890 C1, IPC B63B 3/14, B63B 3/26. Board covering.Russian Federation, assignee. Publ. 17 March 2020.
16. Jurkevich, S. N., I. A. Miklashevich, A. F. Smaljuk, and P. A. Sluchak. RU 2 530 710 C2, IPC G06N 7/06, G06F 17/50, G01M 5/00. Method of mathematical and computer modeling. The Republic of Belarus, assignee. Publ. 10 Oct. 2014.
17. Mebson, Dz. I., M. Ramnatkh, and M. I. Uilkinson. Modeling and analysis of fracture development by finite elements method in multiple planes of structure. USA, assignee. Publ. 7 Sept. 2020.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Бимбереков Павел Александрович —

доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
университет водного транспорта»
630099, Российская Федерация, Новосибирск,
ул. Щетинкина, д. 33
e-mail: bimberekov@yandex.ru

Бурмистров Евгений Геннадьевич —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Волжский государственный
университет водного транспорта»
603950, Российская Федерация, Нижний Новгород,
ул. Нестерова, 5
e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Bimberekov, Pavel A. —

Doctor of Technical Sciences, associate professor
Siberian State University
of Water Transport
33 Shchetinkina Str., Novosibirsk, 630099,
Russian Federation
e-mail: bimberekov@yandex.ru

Burmistrov, Evgeny G. —

Doctor of Technical Sciences, professor
Volga State University
of Water Transport
5 Nesterova Str., Nizhny Novgorod, 603950,
Russian Federation
e-mail: burmistrov_e_g@mail.ru

Статья поступила в редакцию 10 декабря 2021 г.

Received: December 10, 2021.