

Проектирование и конструкция судов

Научная статья

УДК 629.5.011

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/56-62>

Э.А. Кузнецов, В.А. Кулеш

КУЗНЕЦОВ ЭДУАРД АЛЕКСАНДРОВИЧ – аспирант, eduard-kuz.555@mail.ru

КУЛЕШ ВИКТОР АНАТОЛЬЕВИЧ – д.т.н., профессор, vkulesh@mail.ru

Политехнический институт

Дальневосточный федеральный университет

Владивосток, Россия

Усиления корпусов судов, швартуемых в море

Аннотация. Одним из наиболее опасных случаев в эксплуатации судна, наряду с работой во льдах, является проведение швартовных операций в море. В отличие от швартовных операций в портах к причалам, швартовка на волнении в открытом море осложняется тем, что суда перемещаются друг относительно друга. В результате нагрузка на бортовые конструкции судна значительно возрастает. Правила Российского морского регистра судоходства требуют установку дополнительных усилений бортов и надстроек на судах, швартуемых на волнении от 4 до 6 баллов. Данные требования появились в Правилах довольно давно и за годы существования претерпевали значительные изменения. Действующие на данный момент требования имеют ряд недостатков, обусловленных методом расчета интенсивности давления швартуемых судов. В работе показаны недостатки Правил и предложены методы решения указанных проблем.

Ключевые слова: швартовка в море, усиления, интенсивность давлений, толщина обшивки, Правила РС

Для цитирования: Кузнецов Э.А., Кулеш В.А. Усиления корпусов судов, швартуемых в море // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2023. № 4(57). С. 56–62.

Введение

Регламентация интенсивности давлений на борта судов, швартуемых в море, является наиболее важной для расчетов усилений корпусных конструкций в районах дополнительных подкреплений. С учетом интенсивности расчетного давления определяются требуемые параметры усилений наружной обшивки и бортового набора.

Формула для расчета интенсивности давлений от швартовок на волнении в Правилах РС [3] представлена в виде

$$p = \alpha_1 \alpha_2 \left(190 + 51 \sqrt{\Delta z \cdot 10^3 - 0,464} \right), \quad (1)$$

где α_1 – принимается в зависимости от водоизмещения судна и волнения, на котором предусматривается швартовка;

α_2 – принимается в зависимости от назначения судна и района усилений;

Δ – расчетное водоизмещение судна, принимаемое в диапазоне от 464 до 7500 т;

z – отстояние середины пролета рассматриваемой связи от грузовой ватерлинии, м.

Анализ этой формулы путем применения для более 1000 промысловых судов различного водоизмещения (рис. 1) выявил следующие недостатки:

1) формула эмпирического типа для ограниченного диапазона водоизмещений и не зависит от таких важных параметров, как высота борта, осадка, ширина и длина судна;

2) при водоизмещении 2000 т наблюдается резкий скачок интенсивности давлений, не оправданный и вызванный дискретностью коэффициентов α_1 и α_2 ;

3) формула применима для судов водоизмещением от 464 до 7500 т.

Из-за упомянутых недостатков в процессе проектирования судов и при оценках технического состояния в эксплуатации возникают дополнительные трудности. Например, для судов водоизмещением около 2000 т скачок интенсивности давления меняет требования к толщинам обшивки и моментам сопротивлений балок набора на 20–30%, что не имеет физического объяснения и ведет к неоправданному завышению требований. Ограничения диапазона применимости данной формулы по водоизмещению также вызывают сомнения и формально лишают суда, не попадающие в указанный диапазон, возможности для корректного учета проведения их швартовых операций на волнении.

Учитывая указанные недостатки, делаем вывод, что раздел, посвященный требованиям к усилениям судов, швартуемых в море, требует серьезных изменений, без которых суда, проектируемые по Правилам РС могут утратить конкурентоспособность.

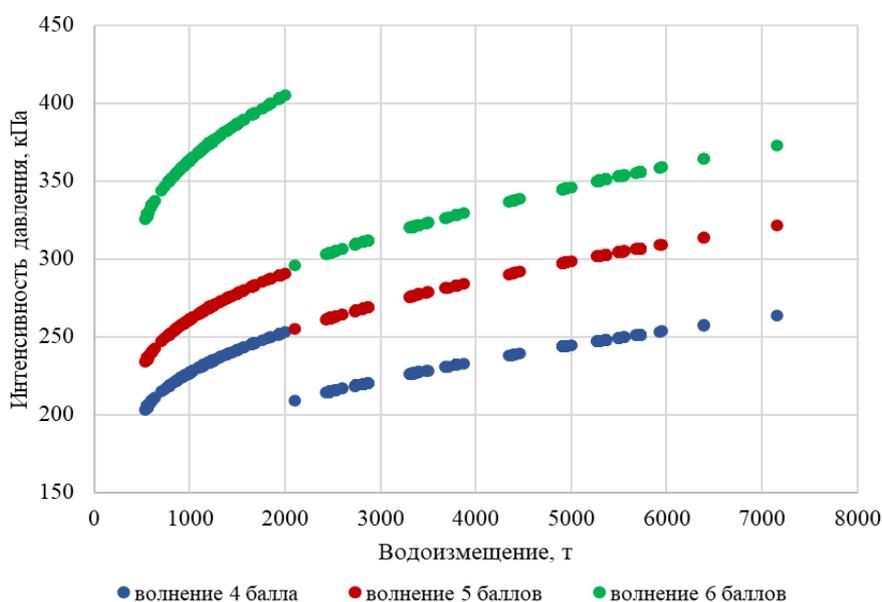


Рис. 1. Расчетные интенсивности давлений при швартовках от водоизмещения судов

Эволюция Правил РС

Формула для расчетных давлений (1) в таком виде принята в Правилах РС с 1981 г. и является результатом работы сотрудников Калининградского высшего инженерного морского училища (КВИМУ), предложивших концепцию пределов накопления остаточных прогибов, их пересчета в давления, обработки статистики и её аппроксимации.

Первые требования Правил РС к усилениям судов, швартуемых в море, были разработаны сотрудниками Калининградского технического института рыбной промышленности и хозяйства (КТИРПХ) и внесены в Правила 1977 г. [4]. Формула для расчетных погонных нагрузок на волнении 5 баллов включала ряд важнейших параметров судов, влияющих на качку:

$$p = 16 + 10c\Delta \left(1 + \frac{2d}{B} \right) \left(\frac{6}{4+B} + 0,32 \sqrt{1,5 \frac{D}{d} - 1} \right)^2, \quad (2)$$

где $c = 0,0064$ при $\Delta \leq 1000$ т, $c = 0,0032$ при $\Delta \geq 3000$ т, а в промежутке интерполяция;

Δ – водоизмещение судна по летнюю грузовую ватерлинию, т;

d – осадка по летнюю грузовую ватерлинию, м;

B – ширина судна, м;

D – высота борта, м.

Для перехода от погонной нагрузки (кН/м) к давлению (МПа) в Правилах применялась формула

$$p_0 = 0,67 + 0,006 p. \quad (3)$$

В результате анализа на основе тех же данных 1000 судов (рис. 2) и сравнений получено, что расчетные давления находились в области 900-800 кПа, а требуемая толщина обшивки с такими давлениями доходила до 25–30 мм, что явно избыточно. Именно поэтому Регистром в свое время было принято решение подключить к работе КВИМУ и полностью переработать данный раздел. Несмотря на то, что вновь разработанные КВИМУ требования решили проблему с завышенными требованиями, они получили ряд новых недостатков, упомянутых выше.

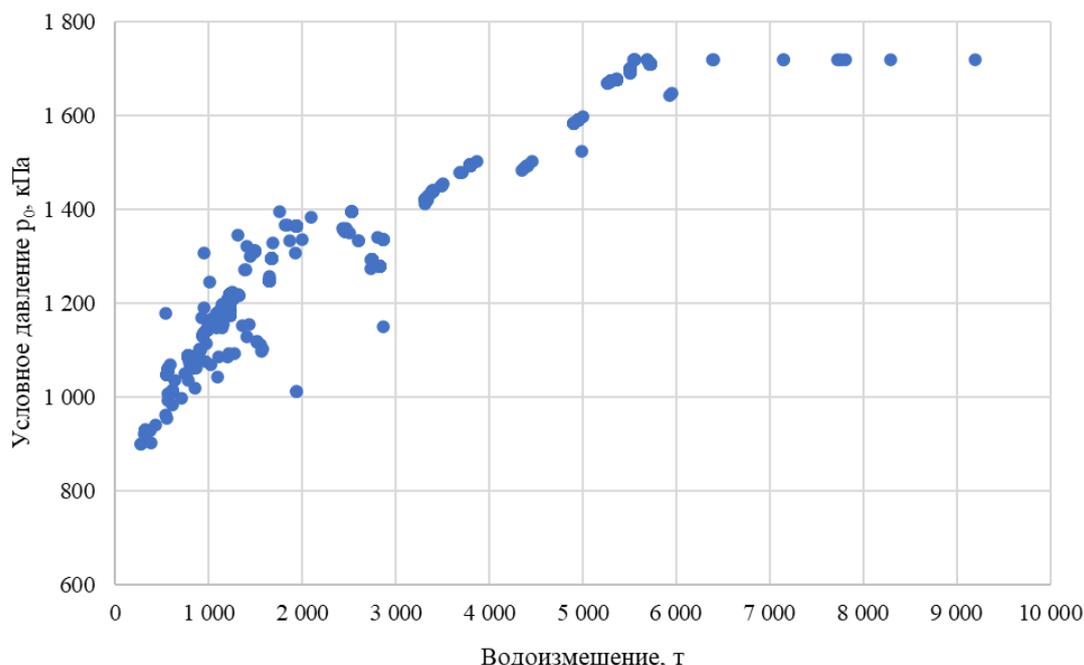


Рис. 2. Расчетная интенсивность давлений в зависимости от водоизмещения судов по Правилам РС 1977 г.

Анализ формул (2)-(3) показал, что, вероятно, была допущена редакционная ошибка с порядком величин. Например, при расчетных давлениях в области 900-1800 кПа текст Правил-1977 включает сопутствующие ограничения на уровне 85 и 110 кПа.

Предложения по корректировке Правил РС

По результатам анализа расчетных формул Правил РС 1977 г. и действующих для интенсивности давлений при швартовках в море предлагается следующая формула:

$$p_0 = k\alpha_1\alpha_2 p, \text{ кПа}, \quad (4)$$

где $p = 16 + 10c\Delta \left(1 + \frac{2d}{B}\right) \left(\frac{6}{4+B} + 0,32\sqrt{1,5\frac{D}{d} - 1}\right)^2$ – погонная нагрузка, кН/м;

$k = 5/3$ – для района А;

$k = 4/3$ – для районов В и С;

α_1 – принимается в зависимости от водоизмещения судна и волнения, на котором предусматривается швартовка;

α_2 – принимается в зависимости от назначения судна и района усиления.

При этом погонная нагрузка p , кН/м, не должна приниматься менее 30 кН/м.

Для устранения «скачка» требований при водоизмещении 2000 т (рис.1), предлагается корректировка значений коэффициента α_1 (табл. 1). Также удалены верхнее и нижнее ограничения по диапазону водоизмещений.

Вместо формул главы действующих Правил РС для расчета толщин бортовой обшивки и моментов сопротивления шпангоутов (п. 3.7.4.4.2 и п. 3.7.4.4.3) рекомендуется применять более «классические» общие формулы п.1.6.4.4 для расчета толщин обшивки и из пп. 1.6.4.1, 1.6.4.2 для определения моментов сопротивления балок (табл.1). Это позволяет устранить ряд недостатков настоящей главы Правил вплоть до ошибки – деления на ноль при определении коэффициента m по формуле п.3.7.4.4.3 в случае решения без промежуточных шпангоутов. Указанные рекомендации для корректировки требований главы Правил сведены в табл. 1.

Расчеты в предлагаемой редакции главы Правил и сравнения требуемых параметров наружной обшивки (рис. 3) и моментов сопротивления шпангоутов (рис. 4) в районах швартовных усилений представлены для тех же 1000 судов. Для наглядности результатов полученные значения даны на сводных диаграммах со значениями, предлагаемыми, по Правилам Регистра и Правилам трех иностранных обществ [3, 7, 8, 9].

Таблица 1

Предлагаемые изменения редакции главы Правил Регистра

Пункт Правил РС	Действующая редакция				Предлагаемая редакция		
п. 3.7.3.3 формула 3.7.3.3-1 и 3.7.3.3-2	Район А: $p = \alpha_1 \alpha_2 (190 + 51 \sqrt{\Delta z \cdot 10^{-3} - 0,464})$ Районы В и С: $p = \alpha_1 \alpha_2 (129 + 59 \sqrt{\Delta z \cdot 10^{-3} - 0,464})$				$p_0 = k \alpha_1 \alpha_2 p,$ $p = 16 + 10 c \Delta \left(1 + \frac{2d}{B} \right) \left(\frac{6}{4+B} + 0,32 \sqrt{1,5 \frac{D}{d} - 1} \right)^2$		
п. 3.7.3.3 таблица 3.7.3.3-1	Δ , т	4 балла	5 баллов	6 баллов	4 балла	5 баллов	6 баллов
	≤ 2000	1,00	1,15	1,60	0,82	1,00	1,16
	> 2000	0,82	1,00	1,16			
п. 3.7.3.3	В любом случае Δ не должно приниматься более 7500 т и менее 464 т				-		
п. 3.7.4.4.2	$s = 21,7 a \sqrt{\frac{p}{k_n R_{eH}} - 0,242} + \Delta s$				$s = \max \sqrt{\frac{p}{k_\sigma \sigma_n}} + \Delta s$		
п. 3.7.4.4.3	$W = \frac{p a b (21 - b) \omega_k}{m k_n R_{eH}} \cdot 10^3$				$W = \frac{Q l \omega_k}{m k_\sigma \sigma_n} \cdot 10^3$		

Как видно (рис.3), значения толщин обшивки, рассчитанные с учетом предлагаемых корректировок, хорошо коррелируют с требованиями Правил DNV с разницей до 2 мм. Отличие же от требований Правил CCS и Lloyd достигают 5 мм. Это объясняется тем, что в требованиях иностранных классификационных обществ нет учета швартовок судов в явном виде [7, 8, 9]. Для небольших судов, водоизмещением менее 2000 т, предлагаемые значения толщин существенно (до 4 мм) меньше, чем по нынешней редакции Правил РС.

Еще одно преимущество предложений в том, что они возвращают Правила РС к учету важных параметров судов, влияющих на качку. Иллюстрация дана в табл. 2 на примере судна водоизмещением $\Delta = 1500$ т, высотой борта $D = 5,0$ м и осадкой $d = 3,5$ м, при вариации ширины судна В.

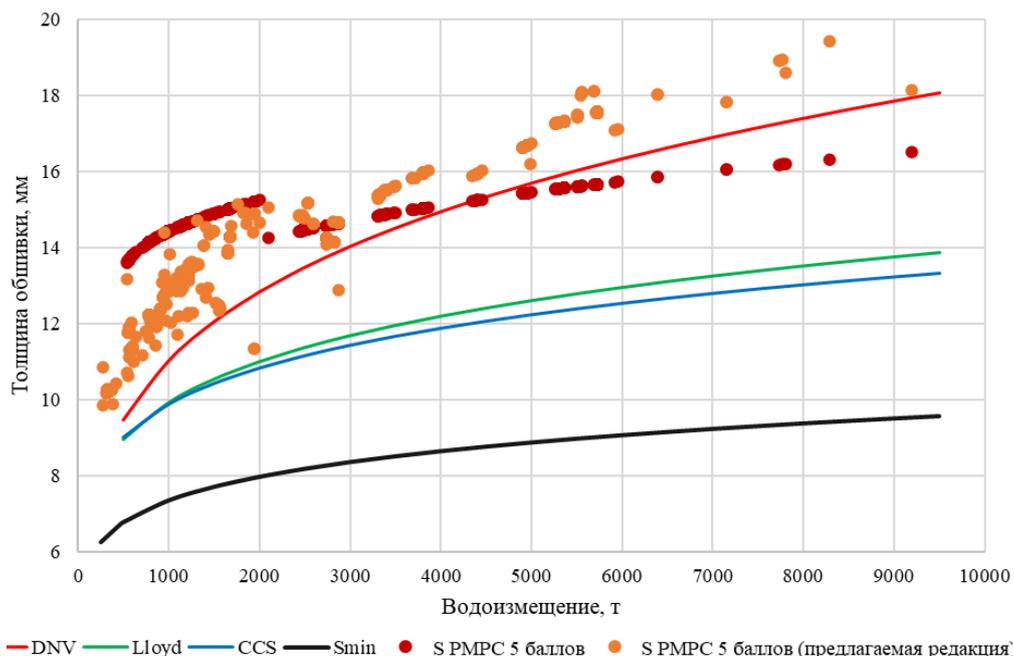


Рис. 3. Сводная диаграмма требований к толщинам бортовой обшивки (в расчетах приняты следующие величины: $a=0,6$ м; $\Delta s=3,0$ мм; $m=15,8$; $\sigma_n=235$ МПа; $k=1,0$; $k_\sigma=0,6$)

Сравнения толщин по табл. 2 подтверждает существенное влияние ширины судна и соответственно качки. С увеличением ширины увеличивается и период качки, она становится менее порывистой, и контактные усилия снижаются, что позволяет уменьшать и толщины обшивки.

Таблица 2

Толщины обшивки в зависимости от ширины судна

B, м	10,0	11,0	12,0
s, мм	12,6	12,0	11,5

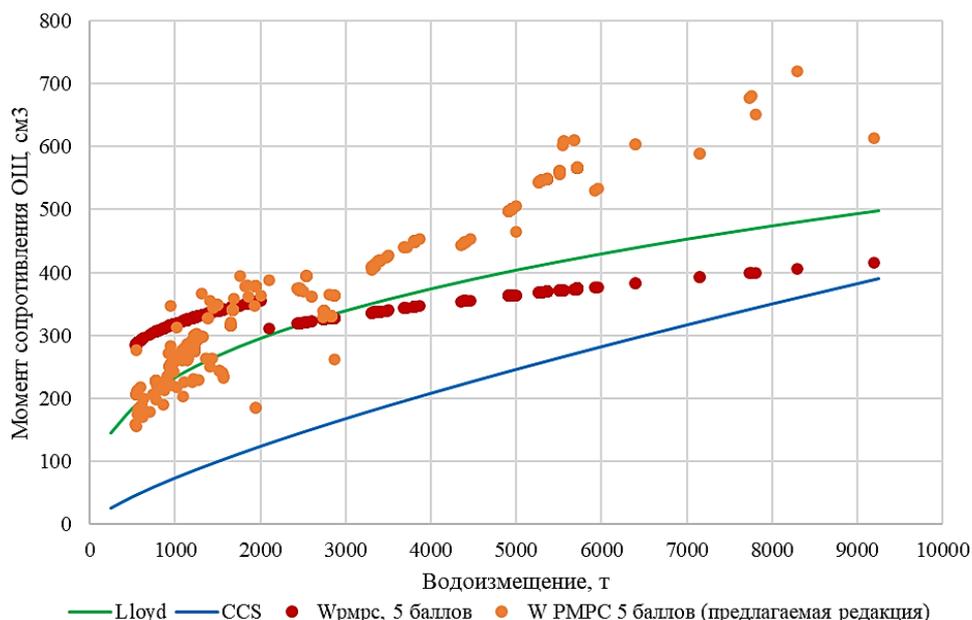


Рис. 4. Сводная диаграмма требуемых моментов сопротивления шпангоутов (в расчетах приняты следующие величины: $a=0,6$ м; $l=2,5$ м; $m=18$; $\sigma_n=235$ МПа; $\omega k=1,25$; $k_\sigma=0,65$)

Сравнения (рис. 4) значений требуемых моментов сопротивления основных шпангоутов (ОШ) для судов водоизмещением менее 2000 т выявляют возможность существенного снижения требований Регистра (до 2 раз). При этом они согласуются с Правилами Английского Ллойдса. Значения по Правилам Китайского Регистра существенно ниже и не реальны для швартовок судов в море. Для судов водоизмещением более 2000 т предложения относительно нынешних Правил РС плавно увеличиваются до 60%. Этот результат снятия верхнего ограничения водоизмещений представляется оправданным.

Заключение

Действующий раздел Правил РС, посвященный усилению судов, швартующихся в море, имеет ряд существенных недостатков, отраженных в данной работе. В качестве альтернативы предложена методика расчетов, полученная путем корректировки требований Правил 1977 г., разработанных при участии Калининградского технического института рыбной промышленности и хозяйства (КТИРПХ) и учитывавших влияние различных параметров судов на качку. Требуемые параметры толщин наружной обшивки и моментов сопротивлений шпангоутов, рассчитанные по предлагаемой методике, получаются сопоставимыми с нынешними требованиями, но при этом лишены упомянутых в работе недостатков, таких как: эмпирический тип формул, ограничения диапазона водоизмещений судов, «скачки» требований при водоизмещении 2000 т и чрезмерное их завышение для небольших судов.

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ковалев Д.П., Ковалев П.Д., Борисов А.С. Анализ особенностей колебаний пришвартованного судна при волнении // Морские интеллектуальные технологии. 2020. № 2-1(48). С. 108–117.
2. Кузнецов Э.А., Котов А.О. Анализ требований к бортовому набору рыболовных судов // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: материалы II Международной научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 14–18 ноября 2022 г. Комсомольск-на-Амуре, 2022. С. 280–283.
3. Правила классификации и постройки морских судов. Ч. II. Корпус / Российский морской регистр судоходства. 2023.
4. Правила классификации и постройки морских судов / Регистр СССР. 1977.
5. Чехранова Л.И., Домашевская Я.Р. Анализ опыта применения податливых соединений в стойках фальшбортов (обзор) // Вестник Инженерной школы ДВФУ. 2019. № 1(38). С. 75–85.
6. Kuznetsov E.A., Kulesh V.A., Isaev G.A., Kotov A.O. Comparative analysis of design requirements for fishing vessels and offers for their development. *The 35th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures TEAM 2022*. P. 66–71.
7. Rules and Regulations for the Classification of Ships. Lloyd's Register. London, Lloyd's Register, 2022. 1811 p.
8. Rules for construction of ocean-going steel fishing vessels. China Classification Society. Beijing, China Classification Society, 2022. 483 p.
9. Rules for the Classification of Ships. Part 5: Ship types. Chapter 12: Fishing vessels. Det Norske Veritas. Berum, Det Norske Veritas, 2022. 42 p.

Original article

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2023-4/53-62>

Kuznetsov E., Kulesh V.

EDUARD A. KUZNETSOV, Postgraduate Student, eduard-kuz.555@mail.ru

VICTOR A. KULESH, Doctor of Engineering Sciences, Professor, vkulesh@mail.ru

Far Eastern Federal University

Vladivostok, Russia

Hull reinforcements of ships moored at sea

Abstract. One of the most dangerous cases in the operation of a vessel, along with working in ice, is mooring operations at sea. Unlike mooring operations in ports to berths, mooring on the waves in the open sea is complicated by the movement of ships relative to each other. As a result, the load on the ship's side structures increases significantly. The rules of the Russian Maritime Register of Shipping require the installation of additional reinforcements of the sides and superstructures on ships moored in waves from 4 to 6 points. These requirements appeared in the Rules quite a long time ago and have undergone significant changes over the years. The currently existing requirements have a number of disadvantages due to the method of calculating the pressure intensity of moored vessels. The paper shows the existing shortcomings of the Rules and suggests methods for solving these problems.

Keywords: mooring at sea, reinforcements, pressure intensity, thickness of shell plating, RS Rules

For citation: Kuznetsov E.A., Kulesh V.A. Hull reinforcements of ships moored at sea. *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2023;(4):56–62. (In Russ.).

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflict of interests.

REFERENCES

1. Kovalev D.P., Kovalev P.D., Borisov A.S. Analysis of the vibration characteristics of a moored vessel during waves. *Marine intelligent technologies*. 2020;(2-1):108–117. (In Russ.).
2. Kuznetsov E.A., Kotov A.O. Analysis of requirements for an onboard set of fishing vessels. *Science, innovation and technology: from ideas to implementation: materials of the II International Scientific and Practical Conference of Young Scientists, Komsomolsk-on-Amur, November 14–18, 2022. Komsomolsk-on-Amur, 2022. P. 280–283. (In Russ.).*
3. Rules for the classification and construction of sea vessels. Part II. Corps / Russian Maritime Register of Shipping. 2023. (In Russ.).
4. Rules for the classification and construction of sea vessels / USSR Register. 1977. (In Russ.).
5. Chekhranova L.I., Domashevskaya Y.R. Analysis of experience in using flexible joints in bulwark posts (review). *FEFU: School of Engineering Bulletin*. 2019;(1):75–85. (In Russ.).
6. Kuznetsov E.A., Kulesh V.A., Isaev G.A., Kotov A.O. Comparative analysis of design requirements for fishing vessels and offers for their development. *The 35th Asian-Pacific Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structures. TEAM 2022. P. 66–71.*
7. Rules and Regulations for the Classification of Ships. Lloyd's Register. London: Lloyd's Register, 2022. 1811 p.
8. Rules for construction of ocean-going steel fishing vessels. China Classification Society. Beijing: China Classification Society, 2022. 483 p.
9. Rules for the Classification of Ships. Part 5: Ship types. Chapter 12: Fishing vessels. Det Norske Veritas. Berum: Det Norske Veritas, 2022. 42 p.