

ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

DOI 10.35264/1996-2274-2021-1-119-128

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПОТЕНЦИАЛА ПРИ КОНТАКТНОЙ КОРРОЗИИ МЕТАЛЛОВ В МОРСКОЙ СРЕДЕ

О.А. Белов, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет», канд. техн. наук, *boa-1@mail.ru*

И.В. Малолетко, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет», *kletn@yandex.ru*

И.А. Романенков, ФГБОУ ВО «Камчатский государственный технический университет», *kletn@yandex.ru*

С.А. Клементьев, нач. отд. ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, *klements@extech.ru*

Рецензент: И.Н. Якутов

Одним из наиболее распространенных видов коррозии судов является контактная коррозия, возникающая в местах сопряжений омываемых разнородных металлов. Она представляет серьезную опасность для корпуса судна и судовых металлических конструкций, так как приводит к резкому возрастанию скорости коррозионных повреждений одного из контактирующих металлов. Поэтому борьба с контактной коррозией является одной из наиболее актуальных задач в области противокоррозионной защиты судов. Защита судов от контактной коррозии требует решения комплекса взаимосвязанных инженерных задач, требующих количественной оценки скорости протекания коррозионных процессов на судовых конструкциях и эффективности используемых на судах средств противокоррозионной защиты [1, 2].

В статье рассматривается аналитический подход при оценке локальной скорости процессов электрохимической коррозии судовых корпусных конструкций на основании явления поляризации с использованием поляризационных кривых и методов аппроксимации.

Ключевые слова: электрохимическая коррозия, электрохимическая защита, техническая эксплуатация, защитный потенциал, катодный ток.

ANALYTICAL CALCULATION OF THE POTENTIAL FOR CONTACT CORROSION OF METALS IN THE MARINE ENVIRONMENT

О.А. Белов, Kamchatka State Technical University, Doctor of Engineering, *boa-1@mail.ru*

И.В. Малолетко, Kamchatka State Technical University, *kletn@yandex.ru*

И.А. Романенков, Kamchatka State Technical University, *kletn@yandex.ru*

С.А. Клементьев, Head of Department, FSBSI SRI FRCEC, *klements@extech.ru*

One of the most common types of ship corrosion is contact corrosion, which occurs at the interface of dissimilar metals being washed. It poses a serious danger to the ship's hull and ship metal structures, as it leads to a sharp increase in the rate of corrosion damage to one of the contacting metals. Therefore, the fight against contact corrosion is one of the most urgent tasks in the field of anti-corrosion protection of ships. Protection of ships from contact corrosion requires solving a set of interrelated engineering problems that require a quantitative assessment of the rate

of corrosion processes on ship structures and the effectiveness of anti-corrosion protection means used on ships [1, 2].

The article discusses an analytical approach in assessing the local rate of electrochemical corrosion processes of ship hull structures based on the phenomenon of polarization using polarization curves and approximation methods.

Keywords: electrochemical corrosion, electrochemical protection, technical operation, protective potential, cathodic current.

Основной задачей расчета и моделирования контактной коррозии судов (судовых корпусных конструкций) является получение количественных данных об интенсивности и распределении их коррозионных повреждений, возникающих при сопряжении разнородных металлов [3].

Интенсивность локальных коррозионных повреждений металла Π за единицу времени может быть представлена в виде:

$$\Pi = \Pi_3 j_a, \quad (1)$$

где: j_a – плотность анодного тока; Π_3 – электрохимический эквивалент, значения которого для некоторых металлов, эксплуатируемых в морской воде, представлены в табл. 1 [4].

Таблица 1
Значения электрохимического эквивалента для некоторых металлов

Металл	Алюминий	Железо	Медь	Цинк	Кадмий	Магний
$\Pi_3 \frac{\text{мм} \cdot \text{м}^2}{\text{А} \cdot \text{год}}$	1,06	1,14	1,17	1,47	2,08	2,27

В силу соотношения (1) задача определения параметров контактной коррозии сводится к расчету распределения коррозионного тока по анодной поверхности. Однако в большинстве случаев плотность тока на поверхности металла непосредственно определена быть не может. Для ее расчета необходимо предварительно найти распределение потенциала в коррозионной среде и затем воспользоваться законом Ома в дифференциальной форме:

$$j_n = -\gamma \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_s, \quad (2)$$

где: γ – удельная электропроводность коррозионной среды; n – внутренняя нормаль к поверхности металла s .

Сущность данной задачи заключается в нахождении потенциала в производной точке коррозионной среды по известным геометрическим и электрохимическим параметрам металлов, образующих рассматриваемую коррозионную систему [5]. Найдя потенциал как функцию координат, можно затем определить плотность тока по формуле (2).

Расчет потенциала в коррозионной среде является одной из частных задач и сводится к интегрированию дифференциального уравнения Лапласа с учетом условий, заданных на границе рассматриваемой области (границы условий).

Уравнение Лапласа описывает распределение потенциала, в том числе и коррозионного, в любой однородной среде, не содержащей источников (в данном случае источников тока), и является одним из основных уравнений теории потенциала.

Конкретный вид уравнения Лапласа зависит от выбранной системы координат – оно выражает равенство нулю суммы вторых производных потенциала по всем трем координатам:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0. \quad (3)$$

Уравнение Лапласа, как и всякое другое дифференциальное уравнение, имеет бесчисленное множество решений. Для выделения из них единственного решения, выражающего потенциал контактной коррозии, необходимо использовать граничные условия, определяемые формой поверхности металла и характеристиками двойного электрического слоя на границе металла с морской водой.

Поскольку рассмотренные электрохимические процессы протекают при избытке индифферентного электролита, то ионы, разряжающиеся на поверхности металла, практически не влияют на структуру двойного электрохимического слоя. Поэтому вызванный наличием такого слоя скачок потенциала между металлом и коррозионной средой может быть представлен в виде суммы стационарного потенциала соответствующего процесса и его перенапряжения [6, 7].

Это позволяет ввести в рассмотрение эквивалентную схему двойного электрического слоя в виде, изображенном на рис. 1.

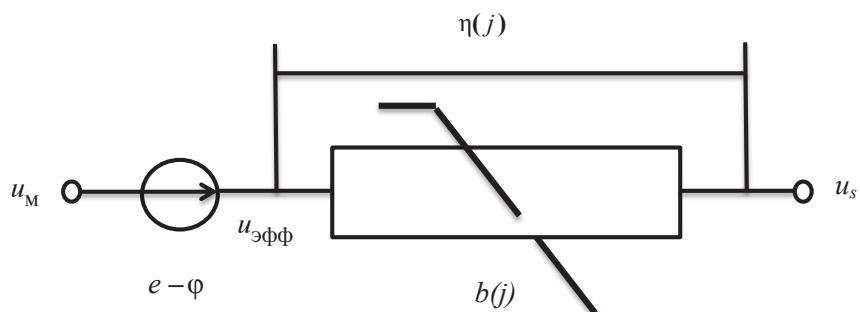


Рис. 1. Эквивалентная схема двойного электрического слоя на границе металла с морской водой: $e = -\varphi$ – распределенная э.д.с., имитирующая стационарный электродный потенциал; $\eta(j)$ – падение напряжения на нелинейном сопротивлении $b(j)$; u_m – потенциал металла; u_s – граничный потенциал, расположенный в коррозионной среде; $u_{\text{эфф}}$ – эффективный потенциал, $u_{\text{эфф}} = u_m - \varphi$.

Поскольку стационарный электродный потенциал можно считать постоянным для данного металла и электролита, а удельную электропроводность металла – много большей, чем электропроводность коррозионной среды, то величины u_m и $u_{\text{эфф}}$ являются постоянными на поверхности данного металла, тогда как величина u_s зависит от локальной плотности тока и, следовательно, от положения точки на рассматриваемой поверхности [8, 9].

В силу исчезающе малой толщины двойного электрического слоя на границе металлов с морской водой граничная поверхность при расчете потенциала может быть совмещена

с любой из его обкладок или расположена между ними. Тогда согласно рис. 1 граничное условие может быть представлено в виде:

$$u_M - u_s = \varphi + \eta(j_n), \quad (4)$$

где функция (j_n) определяется вольт-амперными характеристиками электрохимических процессов.

Следовательно, в общем случае граничное условие (4) является, как и функция $\eta(j_n)$, нелинейным.

Учет нелинейных граничных условий при расчете и при моделировании затруднителен. Поэтому в расчетах возникает необходимость упрощения указанных граничных условий путем приведения их к приближенным линейным условиям. При расчете потенциала контактной коррозии металлов в морской воде эти упрощения связаны обычно с пренебрежением анодной поляризацией $[\eta_a(j_n) = 0]$ и с линеаризацией катодных поляризационных кривых.

Первое из этих допущений оправдывается тем, что процесс ионизации металла в морской воде протекает с весьма слабой химической поляризацией при практическом отсутствии концентрационной поляризации, особенно при интенсивном омывании поверхности корпуса морской водой.

Указанные обстоятельства позволяют, как правило, считать неокрашенные анодные поверхности эквипотенциальными ($b = 0$) и задавать на них свои граничные условия:

$$u_s = u_M - \varphi, \quad (5)$$

называемые граничными условиями первого рода. Линеаризация катодной поляризационной кривой основана на априорной оценке возможного интервала изменения плотности тока на катоде относительно стандартных значений, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Значения максимальной катодной плотности тока для некоторых пар металлов в морской воде

Анод	Катод	$J_k \text{ max, A/m}^2$	Анод	Катод	$J_k \text{ max, A/m}^2$
Сплав АМг61	Бронза АМц9-2	0,15	Стали типа АК	Бронза АМц9-2	0,10
	Сталь 4С	0,25		Латунь ЛО62-1	0,15
	Сталь Х18Н10Т	0,25		Сталь Х18Н10Т	0,18
	Латунь ЛО62-1	0,25		Латунь ЛМцЖ55-3-1	0,40
	Сталь 09Г2	0,35		Бронза «НЕВА-70»	0,43
	Латунь ЛМцЖ55-3-1	0,50		Латунь ЛАМцЖ67-5-2-2	0,50
	Бронза «НЕВА-70»	0,50		Медь М3С	0,70
	Латунь ЛАМцЖ67-5-2-2	0,60			
	Медь М3С	0,90			

При непосредственном контакте разнородных металлов максимальное значение катодной плотности тока может быть определено непосредственно из граничных условий или графическим методом с помощью катодной поляризационной кривой и известного стационарного потенциала анода. Из-за непрерывности изменения u_s при переходе через границу этих металлов максимальная катодная плотность тока находится графически как абсцисса точки пересечения катодной поляризационной кривой и горизонтальной прямой с ординатой, равной стационарному потенциалу анода (рис. 2).

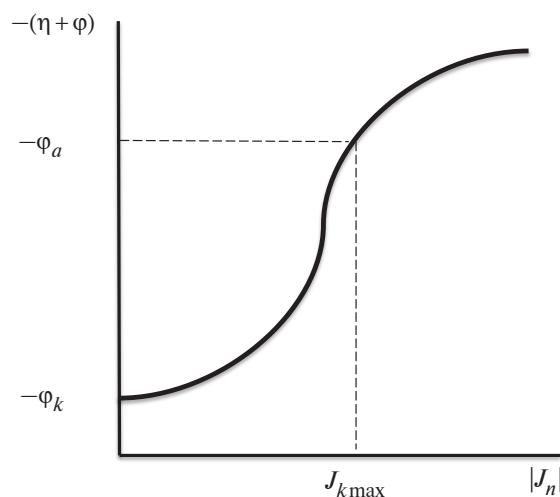


Рис. 2. Схема графического расчета максимальной катодной плотности тока при сопряжении разнородных металлов

Известное значение максимальной катодной плотности тока позволяет выделить на катодной поляризационной кривой ее рабочий участок и применить для его линеаризации метод частичной или полной линейной аппроксимации. Это представляется возможным, так как интервал изменения плотности тока на катоде лежит в пределах участка поляризационной кривой, достаточно близкого к линейному.

Таким образом, при линеаризации любого участка катодной поляризационной кривой граничные условия (4) могут быть сведены к граничным условиям третьего рода, если величину удельной поляризуемости принять равной значению на этом участке, а стационарный электродный потенциал уменьшить на величину η' [10].

Полная линейная аппроксимация поляризационной кривой применяется в тех случаях, когда предполагаемый интервал плотности тока $[j_{\min}, j_{\max}]$ не укладывается в пределы какого-либо одного характерного участка кривой. При этом зависимость (j) заменяется линейной на всем интервале $[j_{\min}, j_{\max}]$ что приводит к граничным условиям:

$$\left(u - b\gamma \frac{\partial u}{\partial n} \right)_s = u_m - \varphi , \quad (6)$$

где b – средняя удельная поляризуемость.

Рассмотренные граничные условия относятся к случаю, когда металлическая поверхность не имеет какого-либо покрытия [11–13].

Однако большинство морских сооружений, и в первую очередь морских судов, как правило, защищено слоем краски или другим покрытием заданной проводимости. В таких случаях зависимость скачка потенциала между обкладками двойного слоя от плотности тока определяется не только поляризацией металла, но и сопротивлением покрытия. Поэтому величина удельной поляризуемости b в формуле (6) должна быть заменена для покрытого металла некоторым другим коэффициентом, учитывающим влияние как поляризации металла, так и сопротивления покрытия, который называют обычно удельным переходным сопротивлением ρ_p . Тогда граничное условие (6) принимает вид:

$$\left(u - p_{\Pi} \gamma \frac{\partial u}{\partial n} \right)_S = u_M - \varphi. \quad (7)$$

Величина p_{Π} может быть определена из поляризационных кривых покрытого металла, для которых возможности и точность линеаризации значительно выше, чем при непокрытом металле.

Если удельное поперечное сопротивление покрытия значительно превышает по величине удельную поляризуемость металла, поляризационная кривая принимает вид прямой линии, угол наклона которой к горизонтальной оси определяется величиной p_{Π} .

Подводная поверхность корпуса судна представляет многоэлектродную систему, представленную на рис. 3а, где на подводной части судна в общем случае расположено N электродов (конструкций, выполненных из разнородных металлов) [14, 15].

Из них M электродов – без поверхностных покрытий, а Q электродов – с покрытием заданной проводимости. Кроме того, на подводной части расположено T участков, имеющих электроизоляционное покрытие или выполненных из изоляционных материалов.

При расчете такой системы возможны два основных случая:

1) электроды имеют контакт по металлу (короткозамкнутые по внутренней цепи системы) (рис. 3б);

2) электроды соединены между собой по внутренней цепи через постоянные омические сопротивления, например в узлах электрического разъединения, применяемых для борьбы с контактной коррозией (рис. 3в).

Таким образом, задача нахождения распределения потенциала многоэлектродной коррозионной системы может быть окончательно сформулирована в виде:

$$\left(u - b_m \gamma \frac{\partial u}{\partial n} \right)_{s_m} = u_m m - \varphi_{m,1}; \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (8)$$

$$\left(u - p_{\Pi_q} \gamma \frac{\partial u}{\partial n} \right)_{s_q} = u_m q - \varphi_{q,1}; \quad q = 1, 2, \dots, Q. \quad (9)$$

При расчете систем катодной защиты для некоторых электродов заданными параметрами являются не разности стационарных потенциалов, а суммарные токи. В этом случае граничные условия задачи видоизменяются следующим образом:

$$\left(u - b_m \gamma \frac{\partial u}{\partial n} \right)_{s_m} = c_m; \quad m = 1, 2, \dots, M, \quad (10)$$

$$\left(u - p_{\Pi_q} \gamma \frac{\partial u}{\partial n} \right)_{s_q} = c_q; \quad q = 1, 2, \dots, Q, \quad (11)$$

где c_m и c_q – константы электронейтральности.

Таким образом, рассмотренный подход позволяет в приближении определить основные параметры, характеризующие кинетику процессов морской электрохимической коррозии в реальных условиях. Погрешность объясняется влиянием различных пленок на поверхности металла подводной части корпуса судна, неконтролируемых условий обтекания этой поверхности и многих других факторов [16, 17].

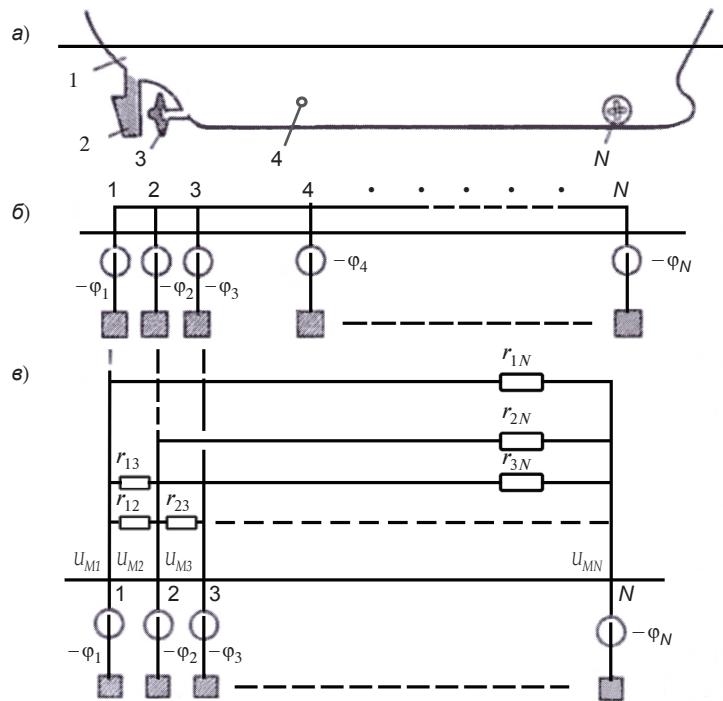


Рис. 3. Общие схемы многоэлектродных систем на подводной части корпуса судна:

а) примерная схема расположения омываемых деталей на подводной части корпуса; б) эквивалентная схема при короткозамкнутой внутренней цепи; в) эквивалентная схема при наличии во внутренней цепи омических сопротивлений; 1, 2, 3, 4, ..., N – номера электродов

С изменением электрохимических условий, например при повреждении лакокрасочных покрытий, изменении эксплуатационных или гидрофизических условий плавания судна, результаты проводимых расчетов существенно изменяются. Поэтому для получения достаточно полных данных распределения коррозионного потенциала и тока в процессе эксплуатации судов необходима также информация о динамике рассматриваемых электрохимических процессов. В связи с этим при технической эксплуатации средств защиты от контактной коррозии требуется использование специальных методов расчета, моделирования и натурных измерений [18, 19].

Список литературы

1. Белов О.А. Антикоррозионные мероприятия как фактор экологической безопасности на морском транспорте // В сб.: Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое / Мат-лы X Национальной (всероссийской) науч.-практ. конф. 2019. С. 76–79.
2. Белов О.А., Швецов В.А., Ястребов Д.П. и др. Разработка мероприятий по защите корпусов судов от электрокоррозии на судоремонтных предприятиях // В сб.: Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития / Мат-лы международной науч.-техн. конф. 2019. С. 31–32.
3. Белов О.А., Зайцев С.А., Кротенко Д.С. Общие принципы расчета и установки подвесной протекторной защиты на судах при долговременном стояночном режиме // В сб.: Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование / Мат-лы IX Всероссийской науч.-практ. конф. 2018. С. 114–118.
4. Зобочев Ю.Е. и др. Коррозия и защита морских судов. Л.: Судостроение, 1973. 392 с.

5. Швецов В.А., Белов О.А., Шунькин Д.В. и др. Оценка эффективности методик измерения потенциала стальных корпусов рыбопромысловых судов // В сб.: Наука, образование, инновации: пути развития / Мат-лы Седьмой всероссийской научно-практической конференции. 2016. С. 191–193.
6. Белов О.А., Швецов В.А., Ястребов Д.П. Обоснование оптимальной периодичности контроля работы протекторной защиты стальных корпусов судов // Эксплуатация морского транспорта. 2017. № 1 (82). С. 55–58.
7. Белов О.А. Задачи оценки безопасного уровня электрохимической защиты корпуса в процессе эксплуатации морских судов // В сб.: Наука, образование, инновации: пути развития / Мат-лы Девятой всероссийской науч.-практ. конф. 2018. С. 17–20.
8. Белов О.А., Шуваева А.О., Клементьев С.А., Федин А.В. Оперативный контроль состояния антикоррозионной защиты как фактор безопасности технической эксплуатации морских судов // Инноватика и экспертиза. 2020. № 1 (29). С. 152–159.
9. Белов О.А., Швецов В.А., Шунькин Д.В., Белавина О.А. Совершенствование контроля защищенности стальных корпусов морских судов от электрокоррозии // Коррозия: материалы, защита. 2018. № 5. С. 9–16.
10. Белов О.А., Дороганов А.Б. Проблемы методологии контроля электрохимической защиты стальных корпусов кораблей и судов // Вестник Камчатского гос. техн. ун-та. 2016. № 37. С. 10–13.
11. Белов О.А., Ястребов Д.П., Швецов В.А., Белавина О.А. Контроль качества ремонта систем ПЗ и ЛКП на судах типа МРС // В сб.: Наука, образование, инновации: пути развития / Мат-лы Восьмой всероссийской науч.-практ. конф. 2017. С. 58–59.
12. Белов О.А., Швецов В.А., Арчибисов Д.А., Белавина О.А. К вопросу о продолжительности периода эффективной работы систем защиты от коррозии стальных корпусов вспомогательных судов // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2017. № 3. С. 7–15.
13. Белов О.А., Швецов В.А., Ястребов Д.П. и др. Внедрение усовершенствованного способа контроля систем протекторной защиты стальных корпусов судов Камчатского флота // Вестник Камчатского гос. техн. ун-та. 2017. № 39. С. 6–11.
14. Белов О.А. Современное состояние организации комплексной защиты металлических корпусов кораблей и судов от коррозии // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2017. № 3 (118). С. 115–120.
15. Белов О.А., Клементьев С.А., Дороганов А.Б. Corrosion processes as a factor in reducing the safety of operation of sea-going vessels // Инноватика и экспертиза. 2017. № 1 (19). С. 123–126.
16. Белов О.А. Проблемы защиты судов Камчатского флота от коррозии и пути их решения // В сб.: Природные ресурсы, их современное состояние, охрана, промысловое и техническое использование / Мат-лы IX Всероссийской науч.-практ. конф. 2018. С. 110–113.
17. Ястребов Д.П., Белов О.А., Швецов В.А., Белавина О.А. О выборе электродов для контроля систем протекторной защиты стальных судов и кораблей // Вестник Астраханского гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2019. № 4. С. 39–45.
18. Патент на полезную модель RU 169581 U1, 23.03.2017. Устройство для контроля протекторной защиты стальных корпусов кораблей и судов / В.А. Швецов, О.А. Белов, Д.В. Шунькин, О.А. Белавина, С.П. Лысянский, В.В. Адельшина / Заявитель и патентообладатель – Камчатский гос. техн. ун-т (RU). Заявка № 2016139086 от 04.10.2016.
19. Патент на изобретение RU 2643709 C1, 05.02.2018. Способ контроля защищенности стальных корпусов кораблей и судов от электрохимической коррозии и электрокоррозии / О.А. Белов, В.А. Швецов, О.А. Белавина / Заявитель и патентообладатель – Камчатский гос. техн. ун-т (RU). Заявка № 2017115308 от 28.04.2017.

References

1. Belov O.A. (2019) Anticorrosive measures as a factor of environmental safety in maritime transport. In the collection: Natural resources, their current state, protection, commercial and technical. Proceedings of the X National (All-Russian) scientific and practical conference. P. 76–79.

2. Belov O.A. (2019) Development of measures for the protection of ship hulls from electrocorrosion at ship repair enterprises. Ed. O.A. Belov, V.A. Shvetsov, D.P. Yastrebov, V.A. Vetrov, A.D. Shchelkanov, I.I. Bondarchuk. In the collection: Technical operation of water transport: problems and ways of development. Proceedings of the international scientific and technical conference. P. 3–32.
3. Belov O.A., Zaytsev S.A., Krotenco D.S. (2018) General principles of calculation and installation of suspended tread shields on ships under long-term parking conditions. In the collection: Natural resources, their current state, protection, industrial and technical use. Proceedings of the IX All-Russian Scientific and practical conference. P. 114–118.
4. Zobochev Yu. E. and others. (1973) Corrosion and protection of marine vessels. Shipbuilding. Leningrad. 392 p.
5. Shvetsov V.A. (2016) Evaluation of the effectiveness of methods for measuring the potential of steel hulls of fishing vessels. Ed. V.A. Shvetsov, O.A. Belov, D.V. Shunkin, O.A. Belavina, A.Yu. Bessonov. In the collection: Science, Education, Innovation: ways of development. Materials of the Seventh All-Russian scientific and practical Conference. P. 191–193.
6. Belov O.A. (2017) Substantiation of the optimal periodicity of monitoring the work of the protective protection of steel hulls of ships. Ed. O.A. Belov, V.A. Shvetsov, D.P. Yastrebov. Operation of sea transport. No. 1 (82). P. 55–58.
7. Belov O.A. (2018) Problems of assessing the safe level of electrochemical protection of the hull in the operation of marine vessels. Ed. O.A. Belov. In the collection: Science, Education, Innovation: ways of development. Proceedings of the Ninth All-Russian scientific and Practical Conference. P. 17–20.
8. Belov O.A. (2020) Operational control of the state of anticorrosive protection as a factor of safety of technical operation of marine vessels. Ed. O.A. Belov, A.O. Shuvaeva, S.A. Klementyev, A.V. Fedin. Innovatika and expert examination. No. 1 (29). P. 152–159.
9. Belov O.A., Shvetsov V.A., Shunkin D.V., Berevina O.A. (2018) Improving the control of the protection of steel hulls of marine vessels from electrocorrosion. Corrosion: materials, protection. No. 5. P. 9–16.
10. Belov O.A. (2016) Problems of methodology of control of electrochemical protection of steel hulls of ships and vessels. Ed. O.A. Belov, A.B. Doroganov. Bulletin of the Kamchatka State Technical University. No. 37. P. 10–13.
11. Belov O.A., Yastrebov D.P., Shvetsov V.A., Belavina O.A. (2017) Quality control of repair of PZ and LCP systems on vessels of the MRS type. In the collection: Science, education, innovations: ways of development. Materials of the Eighth All-Russian Scientific and Practical Conference. P. 58–59.
12. Belov O.A. (2017) On the question of the duration of the period of effective work of systems for corrosion protection of steel hulls of auxiliary vessels. Ed. O.A. Belov, V.A. Shvetsov, D.A. Archibisov, O.A. Belavina. Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technology. No. 3. P. 7–15.
13. Belov O.A., Shvetsov V.A., Yastrebov D.P., Belavina O.A., Shunkin D.V. (2017) Introduction of an improved method for monitoring systems of protective protection of steel hulls of ships of the Kamchatka Fleet. Bulletin of the Kamchatka State Technical University. No. 39. P. 6–11.
14. Belov O.A. (2017) Modern state of the organization of complex protection of metal hulls of ships and vessels from corrosion. Ed. O.A. Belov. Trudy NSTU n.a. R.E. Alekseev. No. 3 (118). P. 115–120.
15. Belov O.A. (2017) Corrosion processes as a factor in reducing the safety of operation of sea-going vessels. Ed. O.A. Belov, S.A. Klementyev, A.B. Doroganov. Innovatika and expert examination. No. 1 (19). P. 123–126.
16. Belov O.A. (2018) Problems of protection of vessels of the Kamchatka Fleet from corrosion and ways of their solution. Ed. O.A. Belov. In the collection: Natural resources, their current state, protection, commercial and technical use. Proceedings of the IX All-Russian Scientific and Practical conference. P. 110–113.
17. Yastrebov D.P., Belov O.A., Shvetsov V.A., Belavina O.A. (2019) On the choice of electrodes for the control of tread protection systems of steel vessels and ships. Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Marine engineering and technology. No. 4. P. 39–45.

18. Utility model patent RU 169581 U1, 23.03.2017. Device for controlling the tread protection of steel hulls of ships and vessels. V.A. Shvetsov, O.A. Belov, D.V. Shunkin, O.A. Belavina, S.P. Lysyansky, V.V. Adelshina. Applicant and patent holder Kamchatka State Technical University (RU). Application No. 2016139086 dated 04.10.2016.

19. Patent for the invention RU 2643709 C1, 05.02.2018. Method for monitoring the protection of steel hulls of ships and vessels from electrochemical corrosion and electro-corrosion. O.A. Belov, V.A. Shvetsov, O.A. Belavina. Applicant and patent holder Kamchatka State Technical University (RU). Application No. 2017115308 dated 28.04.2017.