

ФИЗИЧЕСКИЕ ПОЛЯ КОРАБЛЯ

УДК 621.45.038.72:629.5.023
EDN: UZZDZC

А.М. Вишневский , А.Я. Лаповок, А.А. Фирсова
ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ЛАКОКРАСОЧНОГО ПОКРЫТИЯ КОРПУСА ПО ПОТЕНЦИАЛАМ И ТОКАМ СИСТЕМЫ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ СУДНА

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является система катодной защиты судна от коррозии наложенным током. Цель состоит в разработке аналитической модели для экспресс-оценки распределения защитного потенциала и сопротивления лакокрасочного покрытия (ЛКП) подводной части корпуса судна в процессе эксплуатации системы.

Материалы и методы. Показателем состояния лакокрасочного покрытия является его удельное поверхностное электрическое сопротивление. Сопротивление покрытия оценивается с помощью аналитической модели системы точечных источников тока, распределенных на плоской окрашенной поверхности. Для проверки модели применяются численные методы граничных элементов.

Основные результаты. Разработанная аналитическая модель позволяет рассчитать распределение защитного потенциала и оценить сопротивление лакокрасочного покрытия корпуса судна по данным измерений потенциала на электродах сравнения и величинам токов анодов системы катодной защиты. Модель верифицирована расчетами осесимметричного электрического поля одиночного анода с околоанодным экраном и трехмерного электрического поля системы катодной защиты судна.

Закключение. Предлагаемая модель позволяет в процессе плавания оценить сопротивление и коэффициент разрушения лакокрасочного покрытия подводной части судна, оборудованного системой катодной защиты наложенным током. Оценка защитного потенциала вблизи анодов позволяет идентифицировать перезащиту и дает возможность адаптивно перенастраивать регуляторы тока анодов путем изменения установочных потенциалов электродов сравнения.

Ключевые слова: катодная защита судна наложенным током, сопротивление лакокрасочного покрытия, анод, электрод сравнения, регулятор тока анодов.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP SIGNATURES

UDC 621.45.038.72:629.5.023
EDN: UZZDZC

A.M. Vishnevsky , A.Ya. Lapovok, A.A. Firsova
Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

APPRAISAL OF HULL PAINT COATING BASED ON POTENTIALS AND CURRENTS OF SHIP'S ICCP

Object and purpose of research. The object of research is the impressed current cathodic protection system (ICCP). The purpose is to develop an analytical model for prompt in-service appraisal of protection potential and resistance distribution in the underwater hull paint coating.

Для цитирования: Вишневский А.М., Лаповок А.Я., Фирсова А.А. Оценка состояния лакокрасочного покрытия корпуса по потенциалам и токам системы катодной защиты судна. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 3(417): 115–121.

For citations: Vishnevsky A.M., Lapovok A.Ya., Firsova A.A. Appraisal of hull paint coating based on potentials and currents of ship's ICCP. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 3(417): 115–121 (in Russian).

Materials and methods. Status of the paint coating is judged by its specific surface resistance. The coating resistance is appraised using an analytical model of the point current sources distributed on a painted flat surface. The model is verified by numerical boundary element method.

Main results. The analytical model developed in the study makes it possible to calculate distributions of the protective potential and evaluate the paint coating resistance based on measurements of the potential by reference electrodes as well as the currents of ICCP anodes. The model is verified by estimation of the axisymmetric electric field of a single anode with by-anode screen and the 3D electric field of ship's ICCP.

Conclusion. The suggested model allows in-service evaluations of the resistance and paint damage coefficient for underwater hull outfitted with ICCP. Protective potential appraisals near anodes identify overprotection and allow adaptive adjustments to regulate anode current by updating potential settings in reference electrodes.

Keywords: ICCP system, paint coating resistance, anode, reference electrode, anode current regulator.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Для обеспечения противокоррозионной защиты подводной части корпуса морские суда оборудуют электрохимическими системами катодной защиты наложенным током (КЗНТ). КЗНТ включает аноды со стеклопластиковыми околоанодными экранами (ОЭ), электроды сравнения (ЭС) и регулируемые источники питания анодов. Отечественными системами КЗНТ являются системы типа «Луга» [1].

В соответствии с ГОСТом [2], определяющим общие требования по электрохимической защите (катодной и протекторной) корпусов морских судов, защитным потенциалом подводной части судов из углеродистых и низколегированных сталей является потенциал -800 мВ по хлорсеребряному электроду сравнения, что соответствует смещению потенциала на 150 мВ в отрицательную сторону относительно равновесного потенциала стали -650 мВ. В зависимости от условий эксплуатации (солености и температуры морской воды, состояния ЛКП, износа анодов и протекторов) в процессе работы системы электрохимической защиты допускается колебание защитного потенциала корпуса от -750 мВ до -950 мВ. У края околоанодного экрана потенциал корпуса должен быть более -1200 мВ.

При работе КЗНТ значения потенциала в удаленных от анодов точках регистрируются ЭС, потенциал на краю околоанодных экранов в настоящее время не измеряется.

Состояние ЛКП с учетом катодной поляризации металла в порах покрытия, заполненных морской водой, характеризуется величиной удельного поверхностного сопротивления ρ . Зная величину ρ и наклон катодной поляризационной кривой металла корпуса $u = f_k(j)$ (u – потенциал, В, j – плотность

тока, А/м²), можно оценить коэффициент разрушения покрытия:

$$k_p = \frac{b_k}{\rho},$$

где $b_k = f'_k(j)|_{j=0}$ – катодное поляризационное сопротивление голого металла.

Коэффициент разрушения k_p является основной характеристикой, определяющей состояние покрытия и необходимость возобновления ЛКП в доке [3].

При большой величине ρ (свежей краске корпуса) распределение потенциала по корпусу судна, находящегося в морской воде с электропроводностью σ от 2 до 5 См/м, достаточно равномерно. В этом случае при числе анодов и ЭС, выбранном в соответствии с правилами и нормами проектирования [4], отношение β защитного смещения потенциала у края ОЭ и на ЭС близко к 1 . В процессе эксплуатации судна происходят разрушение ЛКП и уменьшение ρ . Неравномерность распределения потенциала по корпусу возрастает, значение β увеличивается. На ходу судна величина ρ в несколько раз меньше, чем на стоянке [5], а неравномерность защитного потенциала возрастает. Особенно резкий рост наблюдается при заходе судна в опресненную воду: при σ менее $0,5$ См/м требования электрохимической защиты практически невозможно выполнить.

При большой величине β возникает опасность слишком высокого катодного смещения потенциала (перезащиты) поверхности корпуса вблизи анодов. При перезащите меняется тип основной электрохимической реакции на катоде: вместо восстановления кислорода происходит выделение водорода. Выделение газообразного водорода в порах покрытия приводит к его отслаиванию.

При колебании защитного потенциала корпуса судна в пределах от -750 мВ до -950 мВ величина β ,

определяющая допустимый уровень перезащиты, изменяется в диапазоне от 1,8 до 5,5. Отсюда следует, что можно избежать перезащиты за счет корректировки установочных значений потенциалов ЭС, по которым регулируются токи анодов. Для этого нужно знать текущее значение потенциала на краю околоанодного экрана.

Таким образом, для повышения эффективности катодной защиты и, соответственно, увеличения периода между докованиями необходимо в процессе эксплуатации судна получать текущую оценку распределения защитного потенциала и сопротивления ЛКП на подводной поверхности судна. В статье описывается, как это можно сделать, используя данные по потенциалам ЭС и токам анодов КЗНТ, работающей в автоматическом режиме.

Модели для оценки защитного смещения потенциала при работе катодной защиты наложенным током

Models for assessing the protective potential bias in ICCP

Для точечного анода без экрана, расположенного на бесконечной плоской окрашенной поверхности [6]:

$$u = \frac{I_0}{2\pi\sigma r} \left(1 - \frac{\pi}{2} R [H_0(R) - Y_0(R)] \right),$$

где u – катодное смещение потенциала в отрицательную сторону, I_0 – ток анода, $R = \frac{r}{\sigma\rho}$; σ – электропроводность воды, r – расстояние от анода до точки наблюдения, H_0 и Y_0 – функции Струве и Неймана нулевого порядка.

Для учета влияния изоляции экрана увеличим ток анода так, чтобы на поверхность диска вне экрана замыкался ток I_0 . В этом случае

$$u = \frac{I_0}{2\pi\sigma r} \frac{1 - \frac{\pi}{2} R [H_0(R) - Y_0(R)]}{1 - \alpha(R_1)}, \quad (1)$$

где $\alpha(R) = 1 - R \frac{\pi}{2} [H_1(R) - Y_1(R)] + R$ – часть тока, замыкающаяся на диск безразмерного радиуса R ,

$R_1 = \frac{r_1}{\sigma\rho}$, r_1 – радиус околоанодного экрана, H_1 и Y_1 – функции Струве и Неймана первого порядка.

В [7] для точечного анода с экраном предложена приближенная формула

$$u = \frac{I_0}{2\pi\sigma r} \frac{\sqrt{R}}{\sqrt{R_1}} \frac{K_1(2\sqrt{R})}{K_1(2\sqrt{R_1}) + \sqrt{R_1} K_0(2\sqrt{R_1})}, \quad (2)$$

где K_0 и K_1 – функции Макдональда нулевого и первого порядков.

На рис. 1 (см. вклейку) приведены зависимости отношения $\beta = u_1/u_2$ смещения потенциала на краю экрана ($r = r_1$) и на электроде сравнения ($r = r_2$)

от параметра $k = \frac{r_2}{r_1\sigma\rho} = \frac{R_2}{\sqrt{R_1}}$, где $R_2 = \frac{r_2}{\sigma\rho}$. Гра-

фики, полученные по формулам (1) и (2), практически совпадают, но сами по себе непригодны для оценки защитного потенциала и идентификации перезащиты при работе КЗНТ. В 3D компьютерной модели электрического поля КЗНТ перезащита $\beta > 3$ при потенциале ЭС –850 мВ возникает для $k > 2$, а согласно рис. 1 $\beta > 10$ для $k > 1$. Основная причина в том, что в (1) и (2) используется модель одиночного анода на бесконечной поверхности. В такой модели при большом сопротивлении покрытия ρ ток анода распределяется по площади, которая может значительно превышать площадь поверхности защищаемого объекта.

Чтобы учесть влияние других анодов КЗНТ на распределение потенциала, рассмотрим бесконечную систему точечных источников анодного тока, которые равномерно распределены по плоской поверхности с шагом $2r_2$ (рис. 2) и имеют одинаковый ток I_0 .

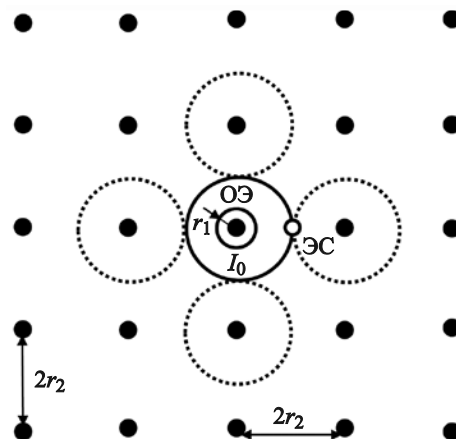


Рис. 2. Бесконечная система точечных источников тока

Fig. 2. Infinite system of current point sources

Применение формулы (1) для бесконечной периодической системы источников дает

$$u = \frac{I_0}{2\pi\sigma r} G(R, R_1, R_2), \quad (3)$$

где

$$G(R, R_1, R_2) = \frac{R}{1 - \alpha(R_1)} \left(\frac{F(R)}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\xi=\pm 1} \frac{F(R_{n\xi})}{R_{n\xi}} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F(R_{m1})}{R_{m1}} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\xi=\pm 1} \frac{F(R_{mn\xi})}{R_{mn\xi}} \right), \quad (4)$$

$$F(R) = 1 - \frac{\pi}{2} R [H_0(R) - Y_0(R)],$$

$$R_{n\xi} = 2nR_2 - \xi R; \quad R_{m1} = \sqrt{R^2 + (2mR_2)^2},$$

$$R_{mn\xi} = \sqrt{(2nR_2 - \xi R)^2 + (2mR_2)^2}.$$

Вместо суммирования по бесконечному числу анодов в (4) можно использовать только соседние аноды, увеличивая их эффективный ток так, чтобы исходный ток I_0 замыкался на поверхность кольца с наружным радиусом r_2 и внутренним радиусом r_1 . Используем вариант с четырьмя соседними анодами, как показано на рис. 2. Тогда

$$G(R, R_1, R_2) = \frac{F(R)}{1 - \alpha(R_1)} + \frac{R}{\alpha(R_2) - \alpha(R_1)} \times \left[2 \frac{F(R_{11})}{R_{11}} + \sum_{\xi=\pm 1} \frac{F(R_{1\xi})}{R_{1\xi}} \right], \quad (5)$$

$$\text{где } R_{1\xi} = 2R_2 - \xi R; \quad R_{11} = \sqrt{R^2 + (2R_2)^2}.$$

Оценка поверхностного сопротивления покрытия

Assessment of paint surface resistance

Оценка ρ производится по текущему значению смещения потенциала u_2 на электроде сравнения, которое зависит от токов анодов, ближайших к ЭС. Для этого в соответствии с (3) надо найти величину R_2 из нелинейного уравнения

$$G_2(R_1, R_2) = G(R, R_1, R_2)|_{R=R_2} = a, \quad (6)$$

$$\text{где } a = \frac{2\pi\sigma r_2 u_2}{I_0}.$$

Графики функции $G_2(R_1, R_2)$, вычисленной по формуле (5) при разных соотношениях $s = R_2/R_1 = r_2/r_1$, приведены на рис. 3 (см. вклейку). При $R_2 \leq 5$ можно использовать приближение

$$G_2(R_1, R_2) \cong \frac{1,3}{R_2^{1,2}}.$$

После определения R_2 рассчитываются:

- оценка сопротивления покрытия

$$\hat{\rho} = \frac{r_2}{\sigma R_2}, \quad (7)$$

- величина $R_1 = \frac{r_1}{\sigma \hat{\rho}} = \frac{r_1}{r_2} \frac{R_2}{s},$

- оценка смещения потенциала на краю экрана

$$\hat{u}_1 = u_2 \beta(R_1, R_2), \quad (8)$$

$$\text{где } \beta(R_1, R_2) = \frac{R_1 G_1(R_1, R_2)}{R_2 G_2(R_1, R_2)},$$

$$G_1(R_1, R_2) = G(R, R_1, R_2)|_{R=R_1}.$$

Графики функции β , вычисленной с помощью формулы (5), приведены на рис. 4 (см. вклейку).

Численные результаты

Numerical results

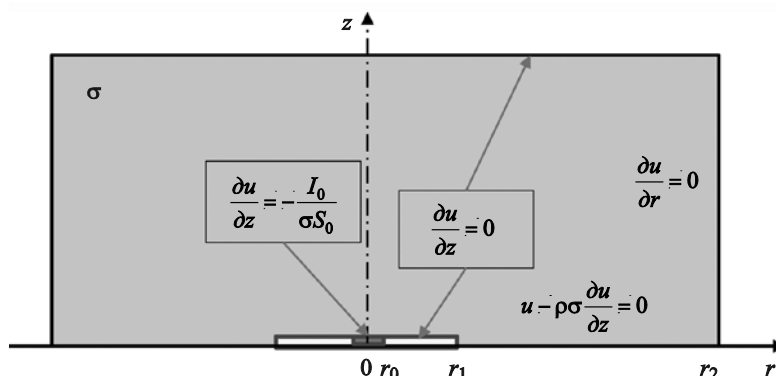
Проверим предлагаемый метод на 2D осесимметричной расчетной модели одиночного анода с экраном, показанной на рис. 5. Модель учитывает конечные размеры защищаемой окрашенной поверхности. Решается внутренняя краевая задача для смещения потенциала u , удовлетворяющего уравнению Лапласа $\Delta u = 0$, граничные условия приведены на рисунке. Радиус диска анода $r_0 = 0,1$ м, расстояние от центра диска до электрода сравнения $r_2 = 7,5$ м. Ток анода I_0 выбирался исходя из смещения $u_2 = 200$ мВ в точке расположения ЭС ($r = r_2$).

Величина ρ сопротивления краски выбиралась в пределах от 25 до 5 Ом·м² в соответствии с типовыми моделями разрушения ЛКП в междоковый период [8, 9]. Электропроводность σ изменялась в диапазоне от 0,5 до 3 См/м, что характерно для перехода судна из опресненной воды в морскую.

Результаты расчета приведены в табл. 1. При вычислении $G(R, R_1, R_2)$ по формуле (4) здесь и далее верхний предел суммирования по m и n равен 30. Формула (5) уступает (4) по точности определения смещения потенциала на краю экра-

Рис. 5. Расчетная модель: I_0 – ток анода, r_0 – радиус анода, S_0 – площадь поверхности анода, r_1 – радиус околоанодного экрана, r_2 – радиус точки расположения электрода сравнения, ρ – сопротивление лакокрасочного покрытия, σ – электропроводность электролита

Fig. 5. Analytical model: I_0 – anode current, r_0 – anode radius, S_0 – anode surface, r_1 – by-anode screen radius, r_2 – radius of reference electrode point, ρ – resistance of paint coating, σ – electrolyte conductivity



на, но позволяет лучше оценить сопротивление ЛКП. Обе формулы правильно идентифицируют перезащиту $u_1 > 550$ мВ, как показано на рис. 6 (см. вклейку).

В табл. 2 приведены оценки сопротивления ЛКП, полученные с помощью 3D моделирования электрического поля [10]. Компьютерная модель КЗНТ, включающая 10 анодов и 7 ЭС

Таблица 1. Оценка сопротивления краски $\hat{\rho}$ и смещения потенциала $\hat{u}_1$ на краю экрана, 2D модель

Table 1. Appraisal of paint resistance $\hat{\rho}$ and potential bias $\hat{u}_1$ at screen edge, 2D model

k	ρ , Ом·м ²	σ , См/м	r_1 , м	u_1 , мВ	$\hat{\rho}$, Ом·м ²		$\hat{u}_1$, мВ	
					формула (4)	формула (5)	формула (4)	формула (5)
5,5	5	0,5	0,75	3867	5,7	6,1	4022	4050
4,7	5	0,5	1	2625	5,8	6,0	2678	2682
2,4	25	0,5	0,75	767	32	29	778	748
2,2	5	3	0,75	648	6,5	5,7	667	637
2,1	25	0,5	1	600	31	28	609	577
1,9	5	3	1	520	6,4	5,5	530	499
1,9	20	1	0,75	540	26	22	554	524
1,8	7,5	3	0,75	492	10	8,2	504	474
1	25	3	0,75	286	41	25	287	261
0,9	25	3	1	257	41	24	261	236

Таблица 2. Оценка сопротивления краски $\hat{\rho}$ и смещения потенциала $\hat{u}_1$ на краю экрана, 3D модель

Table 2. Appraisal of paint resistance $\hat{\rho}$ and potential bias $\hat{u}_1$ at screen edge, 3D model

ρ , Ом·м ²	ЭС, Анод	r_2 , м	u_1 , мВ	r_1 , м	$\hat{u}_1$, мВ		$\hat{\rho}$, Ом·м ²	
					формула (4)	формула (5)	формула (4)	формула (5)
4,8	ЭС1, А1	8	560	1,25	501	468	6,5	5,5
	ЭС3, А4	7,5	580	1	547	515	6,3	5,4
	ЭС7, А10	5,5	1180	1	1098	1063	1,3	1,3
25	ЭС1, А1	8	245	1	252	228	46	26
	ЭС3, А4	7,5	260	1	256	231	38	23
	ЭС7, А10	5,5	700	1	697	661	2,3	2,1

по каждому борту судна, показана на рис. 7 (см. вклейку).

Рассмотрены три анода правого борта: носовой анод № 1, миделевый анод № 4 и кормовой анод № 10. Последний работает не только на корпус с сопротивлением покрытия ρ , но и на гребной винт с поляризационным сопротивлением $\rho_B = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$. Электродные потенциалы металлов корпуса и гребного винта $\varphi_K = -660 \text{ мВ}$ и $\varphi_B = 330 \text{ мВ}$. Электропроводность морской воды $\sigma = 3 \text{ См/м}$.

Как и в случае 2D модели, формула (5) дает менее точную оценку смещения потенциала на краю ОЭ и более точно оценивает сопротивление ЛКП по сравнению с (4). Последнее особенно заметно в случае свежей краски с $\rho = 25 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$.

Значения $\hat{\rho}$, получаемые для кормового анода A10, в основном определяются поляризационным сопротивлением поверхности винта $\rho_B = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ и не могут использоваться для оценки состояния ЛКП корпуса судна.

Заключение

Conclusion

Для повышения эффективности современных систем катодной защиты морских судов с цифровым управлением требуется адаптивное регулирование, при котором параметры регуляторов тока анодов изменяются в зависимости от электропроводности морской воды, скорости хода и состояния лакокрасочного покрытия корпуса судна.

Информацию о скорости хода можно получить от навигационного комплекса судна. Электропроводность воды можно определить по данным о географических координатах с навигационного комплекса или из соотношения между напряжением и током источников питания анодов.

Задача оценки состояния ЛКП в процессе плавания является более сложной. Для ее решения в статье предложена аналитическая модель электрического поля анода КЗНТ в виде потенциала системы точечных источников тока, равномерно распределенных на плоской окрашенной поверхности. В модели используются пять параметров: ток анода, потенциал ближайшего к аноду электрода сравнения, радиус околоанодного экрана, расстояние от анода до ЭС, электропроводность воды. При известных параметрах для определения сопротивления покрытия участка корпуса, за катодную защиту которого отвечает анод, достаточно решить нелинейное уравнение (6) с одним не-

известным. Полученное значение сопротивления используется для идентификации перезащиты по значению потенциала на краю экрана рассматриваемого анода.

Результаты решения тестовых задач, в т.ч. полученные на 3D гранично-элементной модели электрического поля многозональной КЗНТ, подтверждают возможность оценки сопротивления покрытия и защитного потенциала на краю околоанодного экрана предложенным методом.

В качестве дальнейшего развития работы планируется экспериментальная проверка метода на макете КЗНТ в лабораторном бассейне.

Список использованной литературы

1. Автоматическая система катодной защиты «Луга-1» / Ю.Я. Кузьмин, Н.Н. Бибииков, В.Г. Зимин, Л.В. Поворова // Судостроение. 1973. № 3. С. 16–18.
2. ГОСТ 26501-85. Корпуса морских судов. Общие требования к электрохимической защите. Москва : Изд-во стандартов, 1985. 8 с.
3. РД 31.28.10-97. Комплексные методы защиты судовых конструкций от коррозии / М-во транспорта РФ ; Служба морского флота. Ленинград, 1997. 169 с.
4. РД 5.9149-83. Единая система защиты от коррозии и старения. Защита катодная корпусов судов. Правила и нормы проектирования. Ленинград : Ритм, 1983. 22 с.
5. Cathodic protection of a container ship using a detailed BEM model / D.T. Kalovelonis, D.C. Rodopoulos, T.V. Gortsas [et al.] // Journal of marine science and engineering. 2020. Vol. 8, No. 5. P. 359. DOI: 10.3390/jmse8050359.
6. Мячин В.Ф. Автоматизация катодной защиты морских судов от коррозии : (характеристики объекта и принципы регулирования). Ленинград : Судостроение, 1973. 111 с.
7. Коррозия и защита морских судов / [И.Я. Богорад, Е.В. Искра, В.А. Климова, Ю.Л. Кузьмин]. Ленинград : Судостроение, 1973. 392 с.
8. DNV-RP-B401. Cathodic protection design : Recommended practice / Det Norske Veritas. [S.l.], 2021. 70 p.
9. EN 16222:2012. Cathodic protection of ship hulls : Geneva, Switzerland, 2012.
10. Программа расчета электрического поля STAR3D Electric : свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ 2011617901 Рос. Федерация / А.Я. Лаповок. № 2011616006; заявл. 09.08.2011; опубл. 07.10.2011. 1 с.

References

1. Automated system of cathodic protection *Luga-1* / Yu.A. Kuzmin, N.N. Bibikov, V.G. Zimin, L.V. Povorova // Sudostroenie. 1973. No. 3. P. 16–18 (in Russian).

2. GOST 26501-85. Marine ship hulls. General requirements for electrochemical protection. Moscow : Izd-vo Standartov, 1985. 8 p. (*in Russian*).
3. RD 31.28.10-97. Comprehensive methods of corrosion protection for ship structures / RF Ministry of Transport ; Marine Fleet Service. Leningrad, 1997. 169 p. (*in Russian*).
4. RD5.9149-83. Unified system of corrosion and aging protection. Cathodic protection of ship hulls. Design rules and regulations. Leningrad ; Ritm, 1983. 22 p. (*in Russian*).
5. Cathodic protection of a container ship using a detailed BEM model / D.T. Kalovelonis, D.C. Rodopoulos, T.V. Gortsas [et al.] // Journal of marine science and engineering. 2020. Vol. 8, No. 5. P. 359. DOI: 10.3390/jmse8050359.
6. Myachin V.F. Automation of cathodic protection against corrosion for sea-going ships (object characteristics and regulation principles). Leningrad : Sudostroenie, 1973. 111 p. (*in Russian*).
7. Corrosion and protection of sea-going ships / [I.Ya. Bogorad, E.V. Iskra, V.A. Klimova, Yu.L. Kuzmin]. Leningrad : Sudostroenie, 1973. 392 p. (*in Russian*).
8. DNV-RP-B401. Cathodic protection design : Recommended practice / Det Norske Veritas. [S.l.], 2021. 70 p.
9. EN 16222:2012. Cathodic protection of ship hulls : Geneva, Switzerland, 2012.
10. STAR3D Electric Software for calculation of electric field. Russia Federation Certificate of State Registration for Computer Software 2011617901 / A.Ya. Lapovok. No. 2011616006; application on 09.08.2011; published on 07.10.2011. 1 p. (*in Russian*).

Сведения об авторах

Вишневский Александр Михайлович, д.т.н., профессор, заместитель начальника 7 отделения ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-65-10. E-mail: 7_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4795-0113>.

Лаповок Андрей Яковлевич, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. Тел.: +7 (812) 415-65-33. E-mail: alapovok@gmail.com.

Фирсова Анна Анатольевна, к.т.н., ведущий научный сотрудник ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, д. 44. E-mail: nurka100@mail.ru.

About the authors

Alexander M. Vishnevsky, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Deputy Head of Division, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-65-10. E-mail: 7_otd@ksrc.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4795-0113>.

Andrei Ya. Lapovok, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: +7 (812) 415-65-33. E-mail: alapovok@gmail.com.

Anna A. Firsova, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. E-mail: nurka100@mail.ru.

Поступила / Received: 26.01.26

Принята в печать / Accepted: 27.07.26

© Вишневский А.М., Лаповок А.Я., Фирсова А.А., 2026

Рис. 1. Отношение смещения потенциала на краю околоанодного экрана к смещению потенциала на электроде сравнения

Fig. 1. Ratio of protective potential bias at the edge of by-anode screen and potential bias at reference electrode

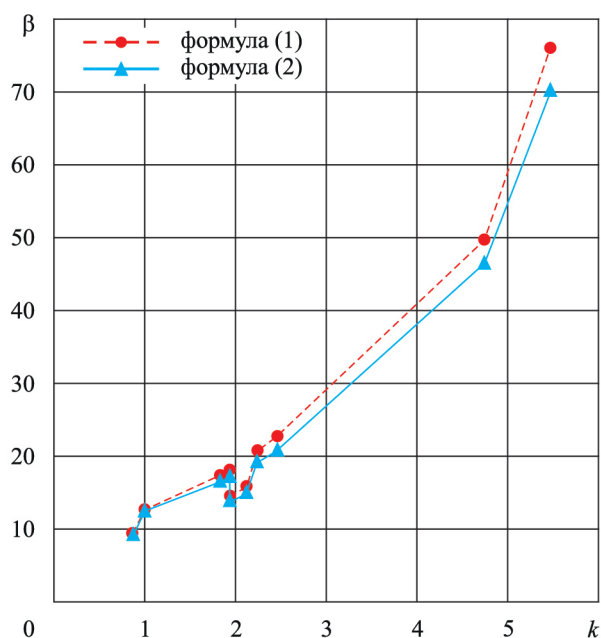
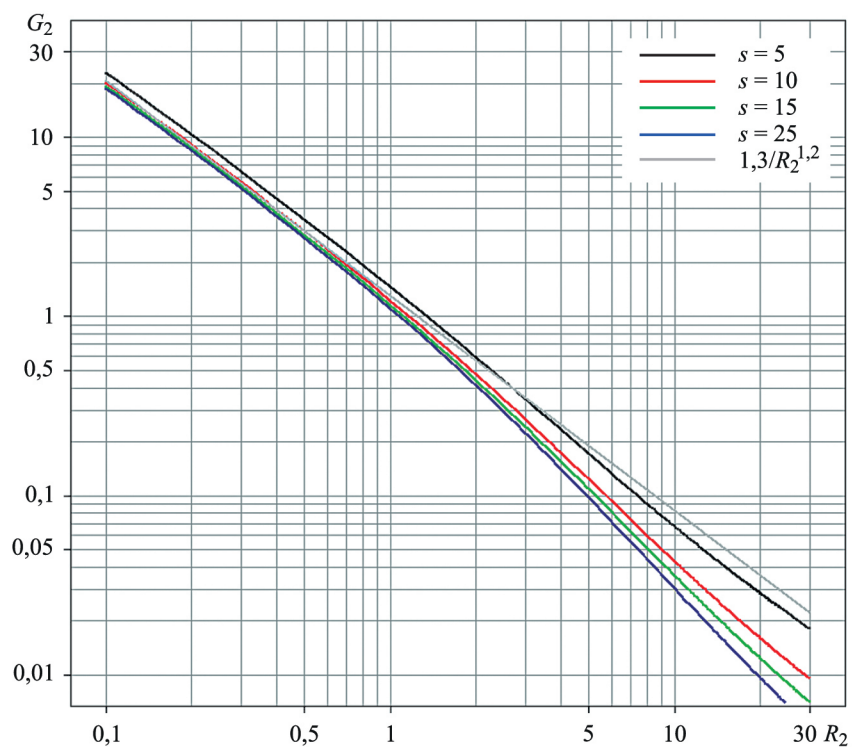


Рис. 3. Функция $G_2(R_1, R_2)$ для определения параметра $R_2 = r_2/(\sigma\rho)$ по смещению потенциала на электродах сравнения

Fig. 3. Function $G_2(R_1, R_2)$ for finding the parameter $R_2 = r_2/(\sigma\rho)$ from potential bias at reference electrodes



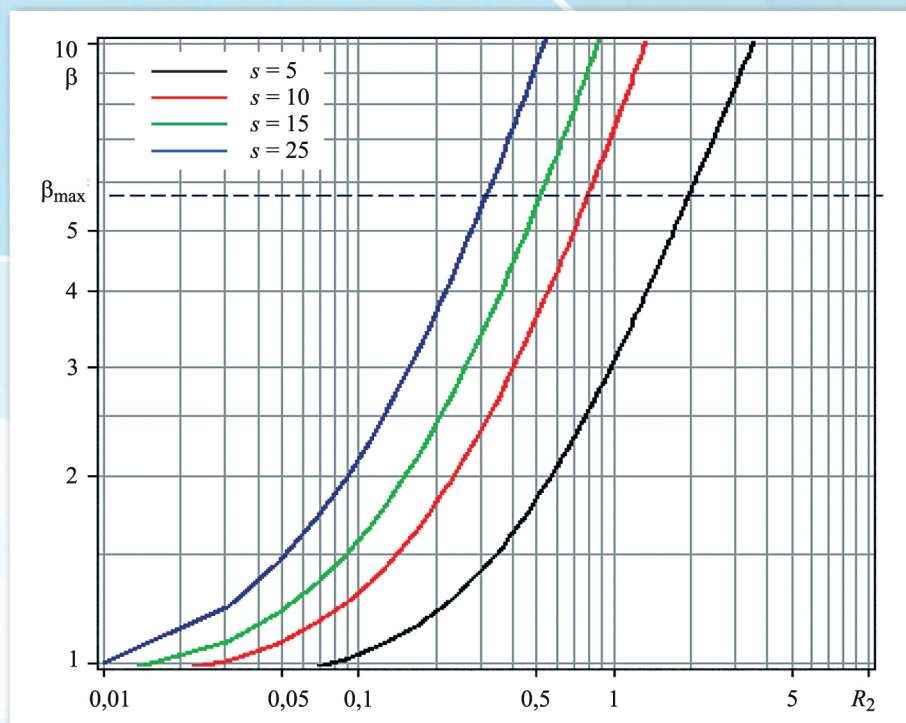


Рис. 4. Функция $\beta(R_1, R_2)$ для определения потенциала на краю экрана. Пунктирной линией показана граница $\beta_{\max} = 5,5$ допустимых значений параметра β в катодной защите наложенным током

Fig. 4. Function $\beta(R_1, R_2)$ for finding the potential at screen edge. Dashed line shows the boundary $\beta_{\max} = 5.5$ of allowable β values in ICCP

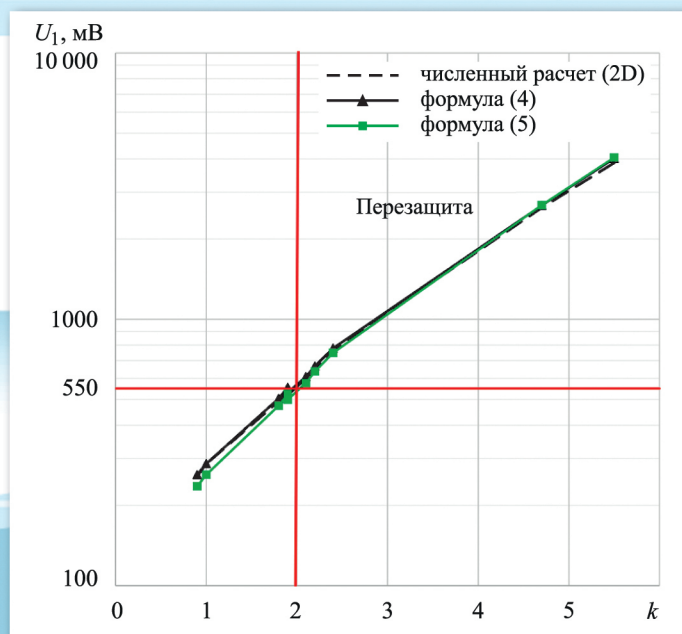


Рис. 6. Идентификация перезащиты с помощью формул (4) и (5)

Fig. 6. Identification of overprotection using formulas (4), (5)

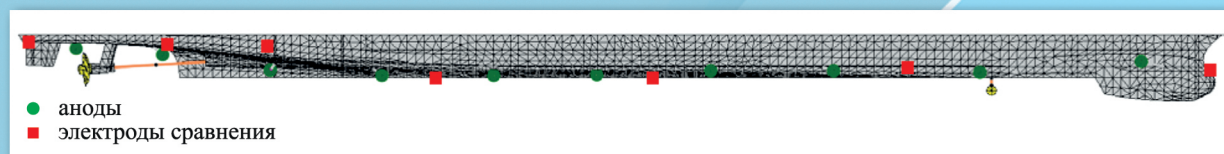


Рис. 7. Компьютерная модель катодной защиты наложенным током

Fig. 7. Computer model of impressed current cathodic protection