

# ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

#### DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1141-1151

## EFFICIENCY EVALUATION OF A CATHODIC PROTECTION DEVICE FOR MARINE STRUCTURES USING POWER FROM SOLAR PANELS

#### V. M. Vu<sup>1,2</sup>, B. B. Chernov<sup>1</sup>, A. M. Nugmanov<sup>1</sup>

 <sup>1</sup> — Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy, Vladivostok, Russian Federation
 <sup>2</sup> — Vietnam Maritime University, Haiphong, Vietnam

The operability of a cathodic protection device for marine structures powered only by a solar panel without the use of other direct current sources is experimentally studied. A quantitative assessment of the corrosion protection ability of such a device is carried out at four current densities of cathodic protection for low-alloy metals. To determine the possibility of using such protection of objects that may have corrosion products on their surface in comparison with objects that immediately after immersion in sea water are protected by cathodic protection, four test samples have a clean surface before testing, and the other four have corrosion products of low-allow steel. It is shown that the protective effect of pure samples reaches 64% at a current density of 0,387 Amperes per square meter, and the protective effect of samples with corrosion products reaches 70% and 95% at protection current densities of 0,203 and 0,387 Amperes per square meter respectively. In order to ensure maximum protection of steels, cathodic current densities of more than 0,2 Amperes per square meter are required, which are easily achieved by using solar panels. The protective ability of such modes to protect the marine structures from corrosion is achieved by the formation of coatings of calcium carbonate and magnesium hydroxide in the daytime, which are able to protect objects in the night, currentless period of time. The using possibility of cathodic protection for protecting metals in seawater using solar panels when other direct current sources are not used is proved. Obviously, it is advisable to use such devices to protect offshore structures in the areas located away from stationary sources of electricity and human resources, while saving significant material resources.

*Keywords: cathodic protection, corrosion, current density, solar panel, galvanostatic mode, calcareous deposits, protective coating, seawater, solar panel, galvanostatic mode.* 

#### For citation:

Vu, Van-Mung, Boris B. Chernov, and Anas M. Nugmanov. "Efficiency evaluation of a cathodic protection device for marine structures using power from solar panels." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morsk-ogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1141–1151. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1141-1151.

#### УДК 620.197.5

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УСТАНОВКИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ МОРСКИХ СООРУЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИТАНИЯ ОТ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ

#### В. М. Ву<sup>1,2</sup>, Б. Б. Чернов<sup>1</sup>, А. М. Нугманов<sup>1</sup>

 <sup>1</sup> — Морской Государственный университет им. адм. Г. И. Невельского, Владивосток, Российская Федерация
 <sup>2</sup> — Вьетнамский морской университет, Хайфон, Вьетнам

Экспериментально изучена работоспособность пилотной установки по катодной защите металлов в морской воде, которая питается только от солнечной панели без использования других источников постоянного тока. Проведена количественная оценка защитной способности от коррозии малолегированных металлов при использовании четырех плотностей тока катодной защиты. Для определения



возможности применения такой защиты объектов, которые могут на своей поверхности иметь продукты коррозии по сравнению с объектами, которые сразу после погружения в морскую воду защищаются катодной защитой, четыре испытуемых образца перед испытаниями имели чистую поверхность, а другие четыре имели продукты коррозии. Показано, что защитный эффект чистых образцов достигает 64 % при плотности тока  $0,387 \ A/m^2$ , а степень защиты образцов с продуктами коррозии достигает 70 % и 95 % при плотностях тока защиты  $0,203 \ u \ 0,387 \ A/m^2$ . Для обеспечения максимальной защиты малолегированных сталей необходимы плотности катодного тока более  $0,2 \ A/m^2$ , которые легко достигаются при использовании солнечных панелей. Защитная способность таких режимов для защиты от коррозии морских конструкций достигается за счет формирования покрытий из карбоната кальция и гидроксида магния в дневное время суток, которые способны защищать объекты и в ночной, бестоковый период времени. Доказана возможность использования катодной защить при защите металлов в морской воде с использованием солнечных панелей, когда другие источники постоянного тока не используются. Очевидно, что целесообразно использовать такие устройства для защиты морских сооружений в районах, удаленных от стационарных источников электроэнергии и людских ресурсов, достигая при этом значительной материальной экономии средств.

Ключевые слова: катодная защита, коррозия, плотность тока, солнечная панель, гальваностатический режим, солевые катодные осадки, защитное покрытие, морская вода.

#### Для цитирования:

*Ву В. М.* Оценка эффективности установки катодной защиты морских сооружений с использованием питания от солнечных панелей / В. М. Ву, Б. Б. Чернов, А. М. Нугманов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1141–1151. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1141-1151.

#### Введение (Introduction)

В настоящее время катодная защита применяется не только непосредственно для предотвращения коррозии, но и специально направлена на рост покрытий из солевых катодных осадков (СКО) [1]–[4], обладающих возможностью снижать коррозию металлов или полностью защищать морские сооружения при отключении катодной защиты [5], [6]. Факторы, влияющие на образование СКО на катодно-защищенной поверхности стали, достаточно хорошо исследованы в работах [7]–[11]. Составы СКО исследованы авторами работ [12]–[14]. В последнее время наблюдается значительное увеличение количества научных работ по проблеме роста СКО и соотношения Са/ Mg в них [4], [7], [9], [15], а также рост интереса к применению солнечных панелей в качестве источника постоянного тока [16]–[20]. Однако при этом не учитывается использование только солнечных панелей в качестве единственного источника тока (без использования аккумуляторов, ветряных установок, гальванических пар) при катодной защите металлических поверхностей в морской воде. Попытки применения такой защиты для морских сооружений, которые ранее не подвергались защите, неизвестны.

Специалисты, занимающиеся установкой катодной защиты для морских сооружений, сталкиваются с проблемой, насколько быстро после ввода сооружения в эксплуатацию можно применять катодную защиту. Особую значимость эта проблема имеет при использовании в катодной защите солнечных панелей как единственных источников постоянного тока, поскольку закономерности формирования СКО на чистой поверхности металлов и на поверхности металлов с продуктами коррозии специально не исследовались. Оценка защитной способности катодной защиты от солнечных панелей для металлов, покрытых продуктами коррозии, и металлов с чистой поверхностью в природной морской воде при различных токовых режимах и явилась целью данной работы.

#### Методы и материалы (Methods and Materials)

Пилотная установка по катодной защите с питанием от солнечной панели была изготовлена на кафедре химии и экологии Морского государственного университета им. адм. Г. И. Невельского. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1. Преобразователи напряжения 2 и 4, получающие питание при достижении своих порогов срабатывания (3,0 В для преобразовате-



ля 2 и 6,0 В для преобразователя 4) на своих выходах выдают 12 В и 6,0 В. При этом напряжение на анод А не подается до истечения установленного времени задержки  $t_{3aa}$  блока 3, которое устанавливалось с промежутком времени  $t_{3aa} = 6$  мин. При срабатывании электромагнитного реле блока 3 схема катодной защиты получает электропитание, которое распределяется по токам в соответствии с номиналами калиброванных резисторов R1-R4 в цепи.



*Рис. 1.* Принципиальная схема устройства катодной защиты с питанием от солнечной панели: *1* — солнечная панель; *2* — преобразователь напряжения с выходом 12 В; *3* — блок задержки времен с электромагнитным реле; *4* — преобразователь напряжения с выходом 6,0 В; *5* — рамка с анодом, образцами под катодной защитой и контрольными образцами;
A — анод; К *1*–4 — защищенные образцы с чистой поверхностью,
К *01–04* — защищенные образцы, которые были покрыты продуктами коррозии; *R*<sub>1</sub>–*R*<sub>4</sub> — резисторы

Номиналы резисторов: R1 = 2R2 = 4R3 = 8R4 ( $R1 = 5,4 \ \kappa\Omega$ ;  $R2 = 2,7 \ \kappa\Omega$ ;  $R3 = 1,35 \ \kappa\Omega$ ;  $R4 = 675 \ \Omega$ ), соответственно, должны быть кратны преобразователям напряжения 2 и плотности токов на катодных образцах: 58; 116; 231; 463 (мА/м<sup>2</sup>). Когда выходное напряжение солнечной панели *1* падает до 6,0 В, отключается преобразователь напряжения 4, а при падении до 3,0 В — преобразователь 2. Схема катодной защиты обесточивается до следующего цикла.

В качестве защищаемых образцов и контрольных были использованы образцы из стали Ст3хп (по ГОСТу 19903–74) с приблизительным составом (в массах %): Fe — 99,26; Mn — 0,441; Cr — 0,150; Cu — 0,146; размером  $50 \times 80 \times 1,5$  мм. Нерастворимым анодом  $400 \times 25 \times 1,5$  мм служил платинированный титан. Четыре образца из восьми, которые защищались катодно, выдерживалась в морской воде в течение семи суток, после чего «чистые» и частично прокорродировавшие образцы подключались к токовой защите. Образцы и анод крепились на рамке размером  $520 \times 400$  мм при помощи полиэтиленового шнура (рис. 2). Рамка с испытуемыми образцами опускалась на глубину 2 м и закреплялась на пирсе. Образцы перед опытом обрабатывали соляной кислотой (1:3), промывали дистиллированной водой, сушили при 90 °C в течение 0,5 ч и взвешивали на аналитических весах AW-220 («Shimadzu»).





Рис. 2. Схема размещения нерастворимого анода, защищаемых и контрольных образцов на рамке:
 А – анод; К1–К4 — катодные образцы под разными защитными токами (1–4 — чистые образцы, 01–04 — ржавые образцы);
 11–14 — контрольные образцы (11, 12 — ржавые; 13, 14 — чистые); ХСЭ — хлорсеребряный электрод сравнения

Испытание установки проводили с использованием пирса яхт-клуба МГУ им. адм. Г. И. Невельского, г. Владивосток (см. рис. 3). Средние физические и химические свойства морской воды в период испытаний представлены в табл. 1 [21].





*Рис. 3.* Общий вид пилотной установки катодной защиты в морской воде с питанием от солнечной панели в яхт-клубе МГУ им. адм. Г. И. Невельского



Таблица 1

#### Параметры морской воды в месте и в период испытаний

Параметры	Значение
Глубина, м	2,0
Температура, °С	10-18
Скорость течения, м/с	< 0,1
Растворенный кислород, мг/л	5,6-8,8
pH	7,4–8,2
Соленость, ‰	28,1–32,3

В качестве источника постоянного тока применялась монокристаллическая солнечная панель (SOLARLAND, модель SLP030S-12), параметры которой представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры	Значение
Напряжение без нагрузки, В	21,6
Оптимальное рабочее напряжение, В	17,2
Ток короткого замыкания, А	1,93
Оптимальный рабочий ток, А	1,74
Максимальная мощность, Вт	30
Стандартное условие испытания, Вт/м <sup>2</sup>	1000

#### Параметры солнечной панели

В качестве электрода сравнения использовали хлорсеребряный электрод. После эксперимента с образцов удаляли продукты коррозии по ГОСТу 9.907–83 (100 мл конц.  $H_2SO_4 + 5 \Gamma CS(NH_2)_2$  на 1 л воды), промывали, высушивали при 90 °С и взвешивали на аналитических весах для определения изменения массы образцов  $\Delta m_{\text{кор}}$ . Для образцов с продуктами коррозии в  $\Delta m_{\text{кор}}$  входила поправка, связанная с потерей массы за 7 сут., равной 0,240 г. По изменениям массы оценивали толщины коррозионных потерь *h* и скорости коррозии  $V_k$ :

$$h = \frac{\Delta m_{\text{kop}}}{S\rho} \tag{1}$$

И

$$V_{\kappa} = \frac{h}{\Delta t},\tag{2}$$

где S — площадь образцов, см<sup>2</sup>; h — толщина коррозионных потерь, см;  $\rho$  — плотность металла (для стали  $\rho$  = 7,8 г/см<sup>3</sup>);  $\Delta t$  — время экспозиции, лет.

Степень защиты образцов определяли по формуле

$$\eta = \frac{V_{c.\kappa} - V_{3.\kappa}}{V_{c.\kappa}} 100 \%,$$
(3)

где  $V_{c,\kappa}$  — средняя скорость коррозии четырех контрольных образцов;  $V_{3,\kappa}$  — скорость коррозии защищенных образцов.

#### Результаты и их обсуждение (Results and discussion)

Установка эксплуатировалась 94 сут. Результаты проведенных измерений и расчетные значения коррозионных потерь и скоростей коррозии представлены в табл. 3 и 4 и на рис. 4 и 5.



Таблица 3

Плотность	Время работы устройства, сут.						Средние	
тока, А/м <sup>2</sup>	0	3	7	17	26	34	94	значения
i <sub>1</sub>	0,0537	0,0517	0,0532	0,0523	0,0495	0,0516	0,0528	0,0521
i <sub>2</sub>	0,106	0,100	0,104	0,103	0,0962	0,100	0,103	0,102
i <sub>3</sub>	0,215	0,202	0,213	0,202	0,186	0,195	0,210	0,203
i <sub>4</sub>	0,429	0,380	0,397	0,392	0,359	0,372	0,379	0,387

Плотности тока защиты образцов от времени испытаний

Из табл. 3 следует, что плотности тока в образцах практически не изменялись во время испытаний, хотя на поверхности образцов образовались СКО, происходило биообрастание и формировались продукты коррозии. Такую закономерность можно объяснить тем, что сопротивление продуктов, образующихся в процессе коррозии, много меньше, чем сопротивление резисторов *R*1–*R*4 установки [22]. Такая закономерность характеризует работу установки в гальваностатическом режиме для всех образцов при всех четырех режимах тока защиты.

б)



Рис. 4. Общий вид всех образцов до опытов (а) и после опытов (б)

Из рис. 4 и 5 видно, что в ходе экспериментов наблюдалось биообрастание образцов, на их поверхности формировались продукты коррозии и солевые осадки (см. рис. 4). На поверхности незащищаемых образцов (рис. 5,  $\epsilon$ ) и защищаемых образцов низким током 0,102 A/м<sup>2</sup> (рис. 5,  $\epsilon$ ) наблюдалось большее количество продуктов коррозии красного цвета, по-видимому в виде Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. На поверхности чистых образцов и с первоначальными продуктами коррозии, защищаемых током 0,387 A/м<sup>2</sup>, продуктов коррозии было меньше (см. рис. 5, а,  $\epsilon$ ). Однако это только качественная оценка коррозионных потерь. Точная оценка результатов по коррозионным потерям и скоростям коррозии образцов после удаления продуктов коррозии приведена в табл. 4.

a)





*Рис.* 5. Общий вид образцов после эксперимента: *а* — -4; *б* — -04; *в* — -2; *г* — -14

Таблица 4

## Результаты испытаний защищенных и контрольных образцов, полученных на пилотной установке по катодной защите с использованием солнечной панели

	M	Іасса образцов, г	Коррозионные потери		Скорость	Степень			
<i>i</i> , А/м <sup>2</sup>	Исходная	После снятия солевого и	$\Delta m, \Gamma$	<i>h</i> , мкм	коррозии;	защиты,			
		оксидного покрытии			<i>v</i> <sub>к</sub> , мм/тод	/0			
Чистые образцы под защитным током									
0,0521	48,1365	46,2521	1,8844	30,2	0,117	0,1			
0,102	48,8189	47,4126	1,4063	22,5	0,087	26			
0,203	40,0869	39,3215	0,7654	12,3	0,048	59			
0,387	48,9907	48,3153	0,6754	10,8	0,042	64			
Предварительно прокорродировавшие образцы под защитным током									
0,0521	43,2368	41,4896	1,7472	28,0	0,109	8			
0,102	49,3617	47,7273	1,6344	26,2	0,101	14			
0,203	48,8978	48,3347	0,5631	9,0	0,035	70			
0,387	44,5007	44,4023	0,0984	1,6	0,006	95			
Контрольные образцы									
_	48,5127	46,6220	1,8907	30,3	0,118	_			
_	48,8421	46,9764	1,8657	29,9	0,116	_			
_	49,4359	47,5065	1,9294	30,9	0,120	_			
_	47,8369	45,9155	1,9214	30,8	0,119	_			

2019 год. Том 11. № 6 1147



Из табл. 4 следует, что для рассматриваемых образцов всегда проявляется защитный эффект, который с ростом плотности защитного тока возрастает, достигая при плотности тока 0,387 А/м<sup>2</sup> степени защиты 64 %. Степень защиты более выражена при плотностях тока более 0,2 А/м<sup>2</sup> у чистых и предварительно прокорродировавших образцов. Для образцов с продуктами коррозии степень защиты достигает 70 % и 95 % при значениях плотности защиты, соответственно, 0,203 А/м<sup>2</sup> и 0,387 А/м<sup>2</sup>. Среднее значение скорости коррозии контрольных образцов за время экспозиции составило 0,118 мм/год, что соответствует экспериментальным величинам, полученным ранее [21], [23]. Из результатов экспериментов следует, что при плотностях тока более 0,15 А/м<sup>2</sup> скорость коррозии образцов, которые предварительно подверглись коррозии, меньше, чем скорость коррозии чистых образцов. Снижение скорости коррозии предварительно прокорродировавших образцов можно объяснить образованием покрытий из продуктов коррозии и из СКО на поверхности образцов, которые обладают более защитными свойствами.

#### Заключение (Conclusion)

Экспериментально изучена работоспособность пилотной установки по катодной защите металлов в морской воде, которая питается только от солнечной панели без использования других источников постоянного тока. Проведена количественная оценка защитной способности от коррозии такой установки при четырех плотностях тока катодной защиты для малолегированных металлов. Для определения возможности использования защиты таких объектов, которые могут на своей поверхности иметь продукты коррозии по сравнению с объектами, подверженными катодной защите сразу после погружения их в морскую воду, четыре испытуемых образца изначально имели чистую поверхность, другие четыре — продукты коррозии.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Показано, что для обеспечения максимальной защиты малолегированных сталей необходимы плотности катодного тока более 0,2 A/м<sup>2</sup>, которые легко достигаются при использовании солнечных панелей. Защитная способность таких режимов от коррозии морских конструкций достигается за счет формирования покрытий из CaCO<sub>3</sub> и Mg(OH)<sub>2</sub> в дневное время суток, которые сохраняют данную способность и в ночной, бестоковый период времени.

 Показано, что катодная защита металлов в морской воде, питающаяся от солнечной панели как единственного источника постоянного тока, может защищать морские конструкции, которые после своего строительства в течение длительного периода времени находились без защиты.

3. Доказана возможность использования катодной защиты металлов в морской воде с использованием солнечных панелей, когда не используются другие источники постоянного тока. Очевидно, что целесообразно использование таких устройств для защиты морских сооружений в районах, удаленных от стационарных источников электроэнергии и людских ресурсов, экономя при этом значительные материальные средства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Чернов Б. Б.* Кристаллизация CaCO<sub>3</sub> на поверхности стали при катодной защите морских сооружений / Б. Б. Чернов, В. М. Ву, А. М. Нугманов, Л. Ю. Фирсова // Морские интеллектуальные технологии. — 2017. — № 2-3 (37). — С. 133–140.

2. *Чернов Б. Б.* Формирование солевых отложений на стальной поверхности при катодной защите инженерных сооружений в морской воде / Б. Б. Чернов [и др.] // Морские интеллектуальные технологии. — 2018. — № 5-4 (42). — С. 120–124.

3. *Ву М.* Формирование осадков на стальной поверхности при катодной защите / М. Ву, Б. Б. Чернов // Проблемы транспорта Дальнего Востока. — 2017. — № 2 (2). — С. 173–183.

4. *Ву В. М.* К теории массовой кристаллизации труднорастворимых соединений на поверхности катода в жесткой воде / В. М. Ву, А. М. Нугманов, Б. Б. Чернов // Журнал физической химии. — 2019. — Т. 93. — № 5. — С. 764–769. DOI: 10.1134/S0044453719050327.



5. *Hartt W. H.* Cathodic Protection of Offshore Structures–History and Current Status / W. H. Hartt // Corrosion. — 2012. — Vol. 68. — No. 12. — Pp. 1063–1075. DOI: 10.5006/0010-9312-68.12.1063.

6. *Grabowski, M.* Cathodic Corrosion of Magnesium Alloy AM50 in Deicing Salt Solutions During "Cathodic Protection"// M. Grabowski, S. Virtanen // Corrosion. — 2017. — Vol. 73. —Is. 5. — Pp. 563–582. DOI:10.5006/2301.

7. *Barchiche C*. Role of sulphate ions on the formation of calcareous deposits on steel in artificial seawater; the formation of green rust compounds during cathodic protection / C. Barchiche [et al] // Electrochimica Acta. — 2009. — Vol. 54. — Is. 13. — Pp. 3580–3588. DOI: 10.1016/j.electacta.2009.01.023.

8. *Zhang Y.* Influence of Mg<sup>2+</sup> on the kinetics of calcite precipitation and calcite crystal morphology / Y. Zhang, R. A. Dawe // Chemical Geology. — 2000. — Vol. 163. — Is. 1-4. — Pp. 129–138. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00097-2.

9. *Eashwara, M.* Sunlight-enhanced calcareous deposition on cathodic stainless steel in natural seawater / M. Eashwara, P. Sathish Kumara, R. Ravishankarb, G. Subramaniand // Biofouling. — 2013. — Vol. 29. — Is. 2. Pp. 185–193. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00097-2

10. *Möller H*. The influence of Mg<sup>2+</sup> on the formation of calcareous deposits on a freely corroding low carbon steel in seawater / H. Möller // Corrosion Science. — 2007. — Vol. 49. — Is. 4. — Pp. 1992–2001. DOI: 10.1016/ j.corsci.2006.10.011.

11. *Okstad T*. Significance of Hydrogen Evolution during Cathodic Protection of Carbon Steel in Seawater / T. Okstad [et al] // Corrosion. — 2007. — Vol. 63. — Is. 9. — Pp. 857–865. DOI: 10.5006/1.3278436.

12. *Li C*. Influence of dissolved oxygen on the protectiveness and morphological characteristics of calcareous deposits with galvanostatic / C. Li, M. Du, R. Gao // Journal of Ocean University of China. — 2017. — Vol. 16. — Is. 2 — Pp. 243–248. DOI: 10.1007/s11802-017-2933-4.

13. *Refait P.* Electrochemical formation and transformation of corrosion products on carbon steel under cathodic protection in seawater / P. Refait [et al]// Corrosion Science. — 2013. — Vol. 71. — Pp. 32–36. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.01.042.

14. *Liu F. G.* Characterisation of calcareous deposits on freely corroding low carbon steel in artificial sea water / F. G. Liu, S. R. Wu, C. S. Lu // Corrosion Engineering, Science and Technology. — 2011. — Vol. 46. — Is. 5. — Pp. 611–617. DOI: 10.1179/147842210X12754747500487.

15. *Akamine K*. Corrosion Protection of Steel by Calcareous Electrodeposition in Seawater (Part 2)/K. Akamine, I. Kashiki // Zairyo-to-Kankyo. — 2003. — Vol. 52. — Is. 8. — C. 401–407. DOI: 10.3323/jcorr1991.52.401.

16. *Laoun B*. Cathodic protection of a buried pipeline by solar energy / B. Laoun, K. Niboucha, L. Serir // Revue des Energies Renouvelables. — 2008. — Vol. 12. — No. 1. — Pp. 99–104.

17. *Yalçin H.* Solar power for cathodic protection of steel pipeline / H. Yalçin, T. Koç // Solar Energy. — 1993. — Vol. 51. — Is. 5. — Pp. 415–418. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90155-H.

18. *Mishra P. R.* Design of a solar photovoltaic-powered mini cathodic protection system/ P.R. Mishra, J.C. Joshi, B. Roy // Solar Energy Materials and Solar Cells. — 2000. — Vol. 61. — Is. 4. — Pp. 383–391. DOI: 10.1016/S0927-0248(99)00121-X.

19. El Ghitani H. Microprocessor-based cathodic protection system using photovoltaic energy / H. El Ghitani, A. H. Shousha // Applied Energy. — 1995. — Vol. 52. — Is. 2-3. — Pp. 299–305. DOI: 10.1016/0306-2619(95)00033-O.

20. *Tian T*. Electrochemical Anti-corrosion System of Iron Tower Based on Solar Power Supply / T. Tian, S.Xiao // MATEC Web of Conferences. — EDP Sciences, 2018. — Vol. 160. — Pp. 03006. DOI: 10.1051/matec-conf/201816003006.

21. *Chernov B. B.* Corrosion performance of low alloy steels in sub-Arctic natural seawater / B. B. Chernov, I. A. Chaves, A. M. Nugmanov, R. E. Melchers // Corrosion. — 2018. — Vol. 74. — Is. 12. — Pp. 1466–1475. DOI: 10.5006/2951.

22. ВСН 39-84. Катодная защита от коррозии оборудования и металлических конструкций гидротехнических сооружений. — Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1985.

23. *Нугманов А. М.* Изучение начальных стадий процессов коррозии стали в различных районах амурского залива / А. М. Нугманов, Г. П. Щетинина, Б. Б. Чернов // Вестник Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского. Серия «Теория и практика защиты моря». — 2012. — № 55. — С. 30–35.



#### REFERENCES

1. Chernov, Boris Borisovich, Van Mung Vu, Anas Maskharovich Nugmanov, and Lyudmila Yurevna Firsova. "The crystallization CaCO<sub>3</sub> on the surface of steel at cathodic protection of sea constructions." *Marine intellectual technologies* 2-3(37) (2017): 133–147.

2. Chernov, Boris B., Van M. Vu, Anas M. Nugmanov, and Liudmila Yu. Firsova. "Formation of salt deposits on a steel surface at cathodic protection of engineering constructions in sea water." *Marine intellectual technologies* 5-4(42) (2018): 120–124.

3. Vu, M., and B. B. Chernov. "Formirovaniye osadkov na stal'noi poverkhnosti pri katodnoi zashchite." *Problemy transporta Dal'nego Vostoka* 2(2) (2017): 173–183.

4. Vu, V. M., A. M. Nugmanov, and B. B. Chernov. "Theory of the mass crystallization of poorly soluble compounds on a cathode's surface in hard water." *Russian Journal of Physical Chemistry* 93.5 (2019): 764–769. DOI: 10.1134/S0044453719050327.

5. Hartt, William H. "Cathodic Protection of Offshore Structures—History and Current Status." *Corrosion* 68.12 (2012): 1063–1075. DOI: 10.5006/0010-9312-68.12.1063.

6. Grabowski, M., and S. Virtanen. "Cathodic corrosion of magnesium alloy AM50 in deicing salt solutions during "cathodic protection"." *Corrosion* 73.5 (2017): 563–582. DOI:10.5006/2301.

7. Barchiche, C., C. Deslouis, O. Gil, S. Joiret, P. Refait, and B. Tribollet. "Role of sulphate ions on the formation of calcareous deposits on steel in artificial seawater; the formation of green rust compounds during cathodic protection." Electrochimica Acta 54.13 (2009): 3580–3588. DOI: 10.1016/j.electacta.2009.01.023.

8. Zhang Yuping, and Richard A. Dawe. "Influence of Mg2+ on the kinetics of calcite precipitation and calcite crystal morphology." *Chemical Geology* 163.1-4 (2000): 129–138. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00097-2.

9. Eashwar, M., P. Sathish Kumara, R. Ravishankarb, and G. Subramaniand. "Sunlight-enhanced calcareous deposition on cathodic stainless steel in natural seawater." *Biofouling* 29.2 (2013): 185-193. DOI: 10.1016/S0009-2541(99)00097-2.

10. Möller, H. "The influence of Mg2+ on the formation of calcareous deposits on a freely corroding low carbon steel in seawater." *Corrosion Science* 49.4 (2007): 1992–2001. DOI: 10.1016/j.corsci.2006.10.011.

11. Okstad, T., Ø. Rannestad, R. Johnsen, and K. Nisancioglu. "Significance of Hydrogen Evolution during Cathodic Protection of Carbon Steel in Seawater." *Corrosion* 63.9 (2007): 857–865. DOI: 10.5006/1.3278436.

12. Li, Chengjie, Min Du, and Rongjie Gao. "Influence of dissolved oxygen on the protectiveness and morphological characteristics of calcareous deposits with galvanostatic polarization." *Journal of Ocean University of China* 16.2 (2017): 243–248. DOI: 10.1007/s11802-017-2933-4.

13. Refait, Ph., M. Jeannin, R. Sabot, H. Antony, and S. Pineau. "Electrochemical formation and transformation of corrosion products on carbon steel under cathodic protection in seawater." *Corrosion Science* 71 (2013): 32–36. DOI: 10.1016/j.corsci.2013.01.042.

14. Liu, F. G., S. R. Wu, and C. S. Lu. "Characterisation of calcareous deposits on freely corroding low carbon steel in artificial sea water." *Corrosion Engineering, Science and Technology* 46.5 (2011): 611–617. DOI: 10.1179/14 7842210X12754747500487.

15. Akamine, Kenichi, and Isamu Kashiki. "Corrosion Protection of Steel by Calcareous Electrodeposition in Seawater (Part 2)." Zairyo-to-Kankyo 52.8 (2003): 401–407. DOI: 10.3323/jcorr1991.52.401.

16. Laoun, Brahim, Karima Niboucha, and Lazhar Serir. "Cathodic protection of a buried pipeline by solar energy." *Revue des Energies Renouvelables* 12.1 (2008): 99–104.

17. Yalçin, Hayri, and Timur Koç. "Solar power for cathodic protection of steel pipeline." *Solar ener*gy 51.5 (1993): 415–418. DOI: 10.1016/0038-092X(93)90155-H.

18. Mishra, P. R., J. C. Joshi, and B. Roy. "Design of a solar photovoltaic-powered mini cathodic protection system." *Solar energy materials and solar cells* 61.4 (2000): 383–391. DOI: 10.1016/S0927-0248(99)00121-X.

19. El Ghitani, H., and A. H. Shousha. "Microprocessor-based cathodic protection system using photovoltaic energy." *Applied energy* 52.2-3 (1995): 299–305. DOI: 10.1016/0306-2619(95)00033-O.

20. Tian, Tian, and Shiwu Xiao. "Electrochemical Anti-corrosion System of Iron Tower Based on Solar Power Supply." *MATEC Web of Conferences*. Vol. 160. EDP Sciences, 2018. DOI: 10.1051/matecco-nf/201816003006.

21. Chernov, B.B., I.A. Chaves, A.M. Nugmanov, and R.E. Melchers. "Corrosion performance of low alloy steels in sub-Arctic natural seawater." *Corrosion* 74.12 (2018): 1466–1475. DOI: 10.5006/2951.



22. VSN 39-84. Katodnaya zashchita ot korrozii oborudovaniya i metallicheskikh konstruktsii gidrotekhnicheskikh sooruzhenii. L: VNIIG im. B.E. Vedeneeva, 1985.

23. Nugmanov, A.M., G.P. Shchetinina, and B.B. Chernov. "Izucheniye nachal'nykh stadiy protsessov korrozii stali v razlichnykh mestakh amurskogo zaliva." *Vestnik Morskogo gosudarstvennogo universiteta im. adm. G.I. Nevel'skogo. Seriya «Teoriya i praktika zashchity morya»* 55 (2012): 30–35.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

Ву Ван-Мынг — аспирант Научный руководитель: Чернов Борис Борисович Морской Государственный университет им. адм. Г. И. Невельского 690003, Российская Федерация, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а Вьетнамский морской университет 180000, Вьетнам, г. Хайфон, ул. Лаччау, 484 e-mail: *vumungmtb@gmail.com* Чернов Борис Борисович доктор химических наук, профессор Морской Государственный университет им. адм. Г. И. Невельского 690003, Российская Федерация, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50А e-mail: chernov@msun.ru Нугманов Анас Масхарович научный сотрудник Морской Государственный университет им. адм. Г. И. Невельского 690003, Российская Федерация, Владивосток, ул. Верхнепортовая, 50а e-mail: alexnugmanov@mail.ru

Vu, Van-Mung — Postgraduate Supervisor: Chernov, Boris B. Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy 50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059, **Russian Federation** Vietnam Maritime University 484 Lach Tray Str., Haiphong, 180000, Vietnam e-mail: *vumungmtb@gmail.com* Chernov, Boris B. — Dr. of Chemical Sciences, professor Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy 50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059, **Russian Federation** e-mail: chernov@msun.ru Nugmanov, Anas M. — Researcher Maritime State University named after adm. G.I. Nevelskoy 50a Verkhneportovaya Str., Vladivostok, 690059, **Russian Federation** e-mail: *alexnugmanov@mail.ru* 

Статья поступила в редакцию 7 октября 2019 г. Received: October 7, 2019.