

СЕКЦИЯ 1.

Прочность и надежность судовых конструкций

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-7-18

УДК 620.178.16:669.14+629.5.023

EDN: OAEZWG

А.В. Родкина , В.А. Крамарь , О.А. Иванова , О.Н. Шацких 

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, Россия

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ИЗНОСА СТАЛИ В РАЙОНЕ ПЕРЕМЕННОЙ ВАТЕРЛИНИИ

Объектом исследования являются корпусные конструкции судов и океанотехнических объектов. Цель исследования – разработка методики определения уровня износа стали в районе переменной ватерлинии (ПВЛ), позволяющей осуществить подбор защитных параметров для предотвращения повреждения и разрушения корпусов морских судов и океанотехнических объектов в районе ПВЛ.

С помощью метода анализа иерархии обоснован выбор типа защиты океанотехнических объектов от коррозионно-механических разрушений в районе ПВЛ. С использованием интегрированной системы энергодисперсионного микроанализа проведены микроскопические исследования поверхности стали. Компьютерный анализ выполнен на основе системы технического зрения. В результате исследования разработана методика определения уровня износа стали в районе ПВЛ. Также разработана методика исследования поверхностного слоя стали для условий непрерывного погружения в модельный раствор морской воды и района ПВЛ судов и океанотехнических объектов, которая позволит определять уровень износа стали. Для промышленного применения данной методики требуется прогнозная оценка дальнейшего срока службы объекта. Выполнен анализ существующих способов обработки изображений микроскопии судостроительных сталей после моделирования различных условий морской воды с применением искусственного интеллекта и нейронных сетей. Выявлены предпосылки разработки методики компьютерного анализа данных, полученных после микроскопии моделируемых различных условий присутствия морской воды, в т.ч. и после моделирования района ПВЛ океанотехнических объектов и морских робототехнических комплексов.

Ключевые слова: коррозионно-механические разрушения, переменная ватерлиния, микроскопия, океанотехнические объекты, защита от коррозии.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SECTION 1.

Strength and reliability of ship structures

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-7-18

UDC 620.178.16:669.14+629.5.023

EDN: OAEZWG

A.V. Rodkina , V.A. Kramar , O.A. Ivanova , O.N. Shatskih 

Sevastopol State University, Sevastopol, Russia

STEEL WEAR DETERMINATION PROCEDURE FOR VARIABLE-WATERLINE ZONE

This paper discusses hull structures of ships and marine platforms. The purpose of the study was to develop a determination procedure for steel wear in the variable-waterline zone so as to prevent hull damage and failure by proper adjustment of protection parameters.

Following the method of hierarchy analysis, this paper justifies the selection for platform corrosion and mechanical protection systems of marine platforms in their variable-waterline zones. Steel surface microstructure was investigated by means of an integrated system of energy dispersion analysis at microscopic level. Computer-based analysis was performed by a technical

Для цитирования: Родкина А.В., Крамарь В.А., Иванова О.А., Шацких О.Н. Методика определения уровня износа стали в районе переменной ватерлинии. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; Специальный выпуск 1: 7–18.

For citations: Rodkina A.V., Kramar V.A., Ivanova O.A., Shatskih O.N. Steel wear determination procedure for variable-waterline zone. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023; Special Issue 1: 7–18 (in Russian).

vision system. As a result, it was possible to determine steel wear parameters for variable-waterline zone. The authors also managed to develop an investigation procedure for non-stop immersion of steel surfaces (representing variable-waterline structures of ships and marine platforms) into model sea water solution, so as to determine steel wear parameters. To apply this procedure at the industrial scale, it will be necessary to estimate residual lifetime of the object under investigation. The paper analyses existing methods of microstructure image processing for shipbuilding steels after simulation of various sea water conditions by means of artificial intelligence and neural networks. It also identifies pre-requisites for the development of computer-based analysis procedure that would handle the microscopy of various sea water effect upon various structures, including variable-waterline areas of marine platforms and robots.

Keywords: corrosion and mechanical damage, variable waterline, microscopy, marine platforms, corrosion protection.

The authors declare no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Строительство и эксплуатация океанотехнических объектов связаны с огромными капитальными затратами, и борьба с коррозией – одно из важных мероприятий по обеспечению их длительной работоспособности. На систему противокоррозионной защиты уходит порядка 10 % общей стоимости объекта. Район воздействия окружающей среды на океанотехнические объекты влияет на скорость коррозии и вид разрушения. Различают:

- атмосферный район (рис. 1: 7) характерен атмосферной коррозией (рис. 1: 2) с незначительными повреждениями; скорость коррозии в этом районе зависит от высоты над уровнем моря, на высоте ~13 м скорость составляет ~0,4 мм/год;
- район брызг (рис. 1: 8) по мере приближения к уровню моря способствует увеличению скорости коррозии до ~0,7 мм/год, это происходит из-за того, что хлорид натрия (NaCl), уносимый воздухом, и морские брызги осаждаются на металле под действием ветра;

- район переменной ватерлинии (рис. 1: 9) характерен повышенной коррозией (рис. 1: 3) с самой высокой скоростью, ~0,95 мм/год, это связано с высоким содержанием кислорода и хлоридов в повторяющихся брызгах морской воды, которые разрушают любую защитную пленку, которая может образоваться на поверхности стали;
- подводный район (рис. 1: 10) подвержен нескольким видам коррозии – электрохимической (рис. 1: 1), биологической (рис. 1: 4), контактной (рис. 1: 5), локальной (рис. 1: 6) – со средней скоростью коррозии ~0,35 мм/год, ниже по стальной поверхности коррозия определяется скоростью диффузии кислорода через воду и морскими образованиями, присутствующими на поверхности металла;
- район недр (рис. 1: 11), где скорость коррозии контролируется наличием кислорода в почве и может достигать 0,03 мм/год [1].

Цель исследования: разработка методики определения уровня износа стали в районе переменной ватерлинии, позволяющей осуществить подбор защитных параметров для предотвращения повреждения и разрушения корпусов морских судов и океанотехнических объектов в районе ПВЛ.

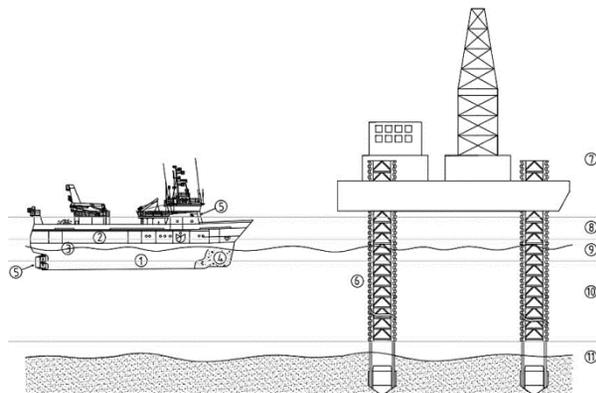


Рис. 1. Виды коррозионного разрушения и районы воздействия окружающей среды

Fig. 1. Corrosion damage types and structural areas exposed to environmental effects

Типы защиты океанотехнических объектов и морских робототехнических комплексов от коррозионно-механических разрушений в районе переменной ватерлинии

Types of corrosion and mechanical protection systems for variable-waterline zones of marine platforms and robots

В зависимости от характера коррозии и условий ее протекания в тех или иных условиях применяются различные методы защиты корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений. Выбор того или иного способа определяется его эффек-

тивностью в данном конкретном случае, а также экономической целесообразностью. Любой метод защиты от коррозии изменяет ход коррозионного процесса, либо уменьшая скорость, либо прекращая его полностью.

Одним из самых распространенных способов борьбы с интенсивной коррозией сталей в районе ПВЛ является применение коррозионноустойчивых сталей [2], отличающихся высокой устойчивостью к коррозионным процессам. Данное свойство получается вследствие добавления к базовому химическому составу легирующего элемента – хрома, более 13 %. Этот элемент сам по себе проявляет повышенную противокислительную стойкость, а при введении в состав сплава образует на поверхности защитную пассивную пленку, которая препятствует взаимодействию металла и кислорода, сдерживая процессы окисления на поверхности и не давая им проникать внутрь кристаллической структуры стали.

Цинкосодержащие лакокрасочные покрытия являются наиболее распространенными и легкодоступными защитными материалами. Добавление цинка в состав лакокрасочного вещества обеспечивает защитные свойства, которые определяются диффузной проницаемостью, электрохимическими процессами на границе раздела «подложка – покрытие» и адгезионной прочностью. Однако в последнее время наблюдается тенденция снижения содержания цинка в покрытии за счет изменения формы частиц от сферических к чешуйчатым [3].

Преимуществами данного типа защиты являются: легкость технологии нанесения; большой диапазон применения; высокая вариативность метода;



Рис. 2. Система MarineProtect [5]

Fig. 2. MarineProtect system [5]

высокая совместимость с защищаемым материалом. Также для защиты океанотехнических объектов и морских робототехнических комплексов применяется гальваностегия – покрытие металлической поверхности тонким слоем другого металла. Для этого изделие, которое хотят покрыть другим металлом, например медью, погружают в раствор соли этого металла, покрываемое изделие служит катодом. В качестве анода применяется пластинка из того же металла, которым хотят покрыть изделие (в рассматриваемом случае медная). При включении такой электролитической ванны в сеть постоянного тока положительные ионы меди направляются к катоду, разряжаются, вследствие чего на изделии осаждается слой меди. Одновременно с анодной пластинки в раствор переходят ионы меди и образуют с ионами SO_4^{2-} новые порции соли сульфата меди [4].

Одним из современных и перспективных типов защиты района ПВЛ океанотехнических сооружений является защита с применением изоляционной ленты (системы защитных кожухов) – иностранного (рис. 2 [5]) и отечественного производства (рис. 3 [6]).

Технология антикоррозионной защиты эксплуатирующихся в агрессивной морской среде океанотехнических объектов состоит в применении трехкомпонентного изоляционного покрытия, включающего в себя три элемента: антикоррозионный праймер, ленту, защитный кожух, обязательное и последовательное нанесение которых составляет суть технологии [5].

Данная технология обладает рядом преимуществ в сравнении с альтернативными методами защиты от коррозии: удобность проведения ре-

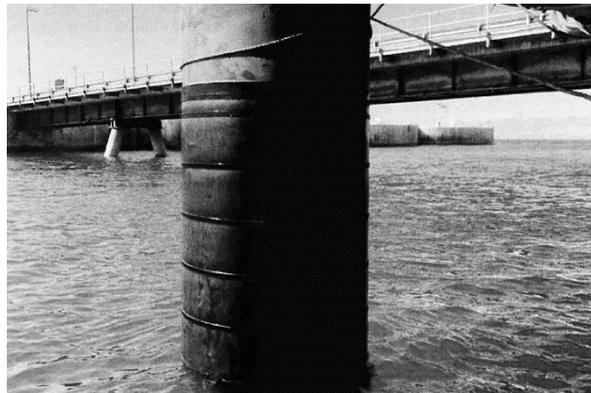


Рис. 3. Защита свайных оснований портов в зоне переменного смачивания с помощью защитных кожухов [6]

Fig. 3. Protective casings for variable-waterline zones of support pillars in harbours [6]

монтажных работ, не требующих применения гермокамер и т.п.; применение экологически чистых материалов; устойчивость компонентов к агрессивной среде; высокий уровень устойчивости к температурным перепадам. Суть технологии защиты с помощью защитных кожухов отечественного производства заключается в создании многослойного покрытия вокруг опорного основания океанотехнического объекта, которое защищает его от внешних воздействий. Готовая правильно смонтированная система способна обеспечить надежную защиту от коррозии и герметичность на срок до 30 лет [5]. Преимуществами системы защитных кожухов являются: долговечность; простота и скорость монтажа; экономичность; ремонтпригодность.

Электрохимическая защита является способом противокоррозионной защиты металлических материалов, основанным на снижении скорости их коррозии путем смещения потенциала до значений, соответствующих крайне низким скоростям растворения. Сущность данного типа защиты состоит в уменьшении скорости электрохимической коррозии металла при контакте с добавочным электродом, являющимся анодом по отношению к корпусным конструкциям судов и плавучих технических сооружений (протекторная защита), или при поляризации корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений от источника постоянного тока (катодная защита) [7–9]. Механизм электрохимической защиты металлов от коррозии с помощью анодного протектора состоит в том, что при протекании электрического тока через границу защищаемого металла с коррозионной средой поверхность защищаемого металла поляризуется катодно, ее потенциал уменьшается, что может приводить к почти полному прекращению коррозионного разрушения. На поверхности протектора при этом протекает анодный процесс, который постепенно приводит к его растворению, потому протектор необходимо периодически возобновлять, каждые 3–4 года [10]. Но в случае коррозионно-механических разрушений корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений протекторная защита не в силах в полной мере противостоять этому типу разрушений.

Катодная поляризация – это активный способ защиты металла от разрушений. Она позволяет использовать в самых широких интервалах потенциал и ток защиты, в ней заложены возможности регулирования параметров защиты, в том числе и автоматического. Эффективность катодной поляризации, в отличие от покрытий, не зависит от времени

эксплуатации [11–13]. Она может применяться самостоятельно и в сочетании с другими способами защиты: покрытиями, упрочнениями и т.д. Данный тип защиты обладает следующими преимуществами: широкий спектр применения; легкость монтажных работ; экономическая выгода [13–14]. Для определения наиболее эффективного типа защиты морских объектов в районе ПВЛ от коррозионно-механических разрушений применим метод анализа иерархий (МАИ) [15].

Определение наиболее эффективного способа защиты морских сооружений в районе переменной ватерлинии от коррозионно-механических разрушений с помощью метода анализа иерархий

Determination of the most efficient corrosion and mechanical protection method for variable-waterline zone of marine platforms by means of hierarchy analysis

Первым этапом была выявлена проблема и структурирована в виде иерархии и поставлена цель оптимизационной задачи – «выбор наиболее эффективной защиты морских сооружений в районе ПВЛ от коррозионно-механических разрушений». Сформулированы критерии выбора типа защиты: K1 – износостойкость; K2 – область применения; K3 – стоимость; K4 – инновационность; K5 – доступность. Определен перечень альтернатив: A1 – изоляционная лента; A2 – электрохимическая защита; A3 – коррозионностойкие сплавы; A4 – цинкосодержащие лакокрасочные покрытия; A5 – покрытие другим металлом.

Вторым этапом по принципу дискриминации и сравнительных суждений, путем построения матрицы попарных сравнений второго уровня, проводилось попарное сравнение критериев, чтобы установить приоритеты критериев выбора метода исследования, выявляя самый важный из них. Затем вычислялся вектор приоритетов для матрицы попарных сравнений следующим образом: рассчитывалось геометрическое среднее в каждой строке матрицы попарных сравнений, суммировались полученные значения, после чего вычислялся вектор локальных приоритетов, производилось нормирование полученных результатов. Анализ результатов этапа вычисления вектора приоритетов для матрицы попарных сравнений второго уровня показал, что вес критерия «доступность» является прене-

брежимо малым, его вес составляет 5 % от суммарного веса критериев.

Третьим этапом проводилось попарное сравнение альтернатив методов исследования для установления приоритетов критериев и оценки каждой из альтернатив по критериям выбора типа защиты, выявив самую важную из них, таким образом, определив оптимальный тип защиты. Были построены пять (по количеству критериев выбора типа защиты) матриц попарных сравнений третьего уровня и вычислены пять векторов приоритетов соответствующих матриц. Для каждого критерия

проводятся попарные сравнения альтернатив, реализуется этап синтеза локальных приоритетов и исследование матрицы на согласованность аналогично предшествующему. Результаты построения сведены в табл. 1.

Анализ результатов этапа вычисления вектора приоритетов для матриц попарных сравнений третьего уровня приведен в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что тип защиты с помощью изоляционной ленты имеет превосходство над остальными предлагаемыми методами. Следующим этапом был выполнен анализ вкладов критериев

Таблица 1. Матрица попарных сравнений третьего уровня по критериям

Table 1. Matrix of pair comparisons (third level) by criteria

Износостойкость	A1	A2	A3	A4	A5	B	X
A1	1,00	3,00	3,00	7,00	3,00	2,85	0,42
A2	0,33	1,00	3,00	7,00	3,00	1,84	0,27
A3	0,33	0,33	1,00	7,00	3,00	1,18	0,17
A4	0,14	0,14	0,14	1,00	0,33	0,25	0,04
A5	0,33	0,33	0,33	3,00	1,00	0,64	0,10
						6,77	1,00
Область применения	A1	A2	A3	A4	A5	B	X
A1	1,00	0,20	0,33	0,20	1,00	0,42	0,07
A2	5,00	1,00	0,33	3,00	5,00	1,90	0,30
A3	3,00	3,00	1,00	0,20	5,00	1,55	0,24
A4	5,00	0,33	5,00	1,00	5,00	2,11	0,33
A5	1,00	0,20	0,20	0,20	1,00	0,38	0,06
						6,37	1,00
Стоимость	A1	A2	A3	A4	A5	B	X
A1	1,00	3,00	5,00	7,00	7,00	3,74	0,50
A2	0,33	1,00	3,00	7,00	5,00	2,04	0,27
A3	0,20	0,33	1,00	5,00	3,00	1,00	0,13
A4	0,14	0,14	0,20	1,00	3,00	0,41	0,06
A5	0,14	0,20	0,33	0,33	1,00	0,32	0,04
						7,51	1,00
Инновационность	A1	A2	A3	A4	A5	B	X
A1	1,00	5,00	5,00	7,00	5,00	3,88	0,54
A2	0,20	1,00	3,00	3,00	3,00	1,40	0,19
A3	0,20	0,33	1,00	0,33	0,33	0,37	0,05
A4	0,14	0,33	3,00	1,00	1,00	0,68	0,09
A5	0,20	0,33	3,00	3,00	1,00	0,90	0,12
						7,23	1,00
Доступность	A1	A2	A3	A4	A5	B	X
A1	1,00	0,33	0,20	0,14	0,20	0,29	0,04
A2	3,00	1,00	0,33	0,20	0,33	0,58	0,08
A3	5,00	3,00	1,00	0,20	0,33	1,00	0,14
A4	7,00	5,00	5,00	1,00	3,00	3,50	0,49
A5	5,00	3,00	3,00	0,33	1,00	1,72	0,24
						7,09	1,00

Таблица 2. Суммарное количество первых, вторых и третьих мест, занятых каждой альтернативой

Table 2. Total score (cumulative number of first, second and third ranks) for each alternative

Альтернатива	Место				
	1	2	3	4	5
A1 – изоляционная лента	3	–	–	1	1
A2 – электрохимическая защита	–	4	–	1	–
A3 – коррозионностойкие сплавы	–	–	4	–	1
A4 – цинкосодержащие лакокрасочные покрытия	2	–	–	2	1
A5 – покрытие другим металлом	–	1	1	1	2

риев для этого метода, который показал, что в оценку данной альтернативы наибольший вклад внес критерий «износостойкость».

Результаты исследования показали, что наиболее эффективным типом защиты от коррозионно-механических разрушений океанотехнических объектов и морских робототехнических комплексов является система защитных кожухов. При этом наибольший вклад в выбор данного типа защиты составил критерий «износостойкость», который определяет степень противостояния защиты агрессивному воздействию внешней среды.

Специфика установки системы защитных кожухов заключается в нанесении многослойного покрытия, включающего в себя три элемента: антикоррозионный праймер или пасту, обеспечивающую заполнение всех неровностей на поверхности конструкции; ленту; защитный кожух.

Данная особенность резко сокращает численность океанотехнических объектов, для которых система защитных кожухов может быть использована, а именно, весьма сложно будет применить ее для стационарных оснований или самоподъемных плавучих буровых установок в случае ферменного исполнения опорного основания (колонн). Сложно обеспечить необходимую плотность прилегания кожухов при их применении для защиты района переменной ватерлинии морских судов.

В качестве альтернативы для океанотехнических объектов, исходя из результатов проведенного исследования, можно рекомендовать к применению электрохимическую защиту. Однако следует изучить эффективность ее применения на участках смоченной поверхности района переменной ватерлинии, но не имеющих с водой непосредственного контакта в конкретный момент времени.

Исследование влияния искусственного смачивания стали на эффективность катодной поляризации

Effect of steel watering upon the efficiency of cathodic polarization

Для проведения исследования по изучению эффективности ее применения на участках смоченной поверхности района переменной ватерлинии, но не имеющих с водой непосредственного контакта в конкретный момент времени, на основе комплекса [16] (рис. 4а) разработан комплекс для исследования электрохимического потенциала поверхностного слоя стали в условиях моделирования района ПВЛ при катодной поляризации (рис. 4б) с дополнительным элементом – брусом пиафлора для поддержания постоянно влажной среды вокруг исследуемого образца (исследуемый образец устанавливается в предусмотренный паз в верхней грани бруса).

В ходе проведения лабораторного эксперимента обнаружено, что увеличение площади постоянно смачиваемой поверхности на район переменной ватерлинии океанотехнических объектов и морских робототехнических комплексов посредством применения влагопроводимого материала позволяет распространить применение катодной защиты наложенным током на район ПВЛ и предотвратить осушение данной поверхности, таким образом переведя возможный коррозионный износ из высокой степени на уровень поверхности подводной части.

Определение высоты района переменной ватерлинии

Determination of variable-waterline zone height

Для моделирования коррозионных процессов района переменной ватерлинии были изучены климатические особенности приливов, отливов и волнения для временного периода июнь 2022 г. – май 2023 г. [17] крупнейшего действующего морского месторождения в Черном море – Штормового газоконденсатного месторождения [18], где эксплуатируется океанотехнический объект – морская стационарная платформа МСП-17. Для разработки методики защиты района переменной ватерлинии от коррозионно-механических разрушений на основе нейросетевого моделирования была определена высота района ПВЛ на базе данных прогностической системы Гидрометцентра, представляющей прогностические карты параметров ветро-

вого волнения для акватории Черного моря. На основе проанализированного временного периода максимальное среднемесячное значение максимальных высот волн наблюдается в январе, феврале и апреле от 1 до 5 дней (примерно 2 м), не более 17 % месяца (рис. 5).

На основании проведенного анализа были определены данные волн за период июнь 2022 – май 2023, характеризующие район ПВЛ, на примере МСП-17, установленной в Черном море.

Микроскопия поверхностного слоя района переменной ватерлинии

Surface microscopy of variable-waterline zone

Исследование поверхностного слоя судостроительной конструкционной стали на микроскопе Phenom ProX [19, 20] позволило детально изучить его структуру для чистого образца; после длительного погружения в модельный раствор; после моделирования условий района переменной ватерлинии. Для получения подробных изображений были выполнены следующие шаги:

1. Подготавливается образец. Условия создания требуемой поверхности – различные для трех вариантов эксперимента: чистый образец готовится как классический микрошлиф; образец поверхности после длительного погружения в модельный раствор выдерживался в модельном растворе морской воды; образец поверхности после моделирования условий района переменной ватерлинии погружался в модельный раствор морской воды каждые 48 часов, затем 48 часов находился в идентичных лабораторных атмосферных условиях, при проведении манипуляций с образцом обязательно отслеживалась сохранность рабочей стороны образца, исключая любые контакты с инструментами.

2. Образец размещается на предметном столике микроскопа и фиксируется в держателе. Чтобы избежать загрязнения образца, в рабочем пространстве микроскопа создается среда вакуума.

3. Проводится непосредственно микроскопия, в результате которой сохраняется информация о спектре материалов и выводится в виде отчета (рис. 6) для каждой выбранной точки определенного цвета на изображении.

Полученный массив изображений с данными об элементном составе требует подробного анализа.

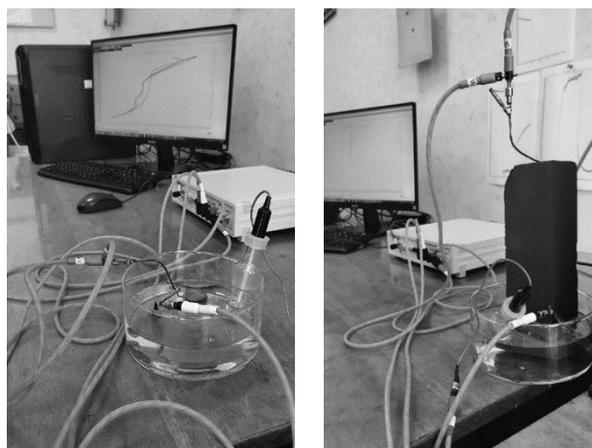


Рис. 4. Комплекс для исследования электрохимического потенциала поверхностного слоя стали в условиях непрерывного погружения в модельный раствор морской воды и в районе переменной ватерлинии при катодной поляризации

Fig. 4. System for investigation of electrochemical potentials for steel surfaces continuously immersed into model sea water solution, as well as for variable-waterline structures with cathodic polarization

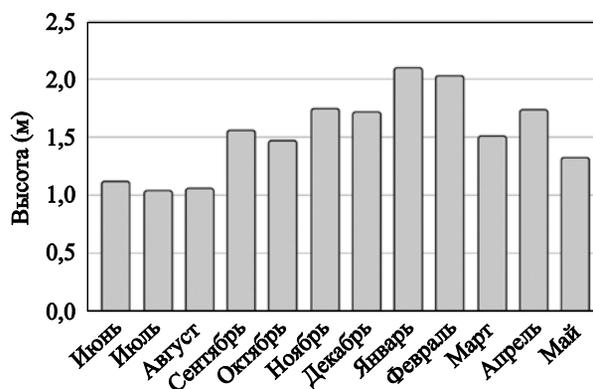


Рис. 5. Сводный график максимальных высот волн
Fig. 5. Maximum wave heights: summary plot

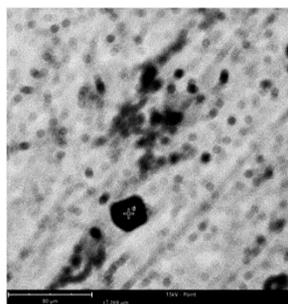
Компьютерный анализ снимков микроскопии поверхностного слоя стали

Computer-based analysis of steel surface microscopy

Выполнен анализ существующих способов обработки изображений с применением искусственного интеллекта и нейронных сетей, однако они не вы-

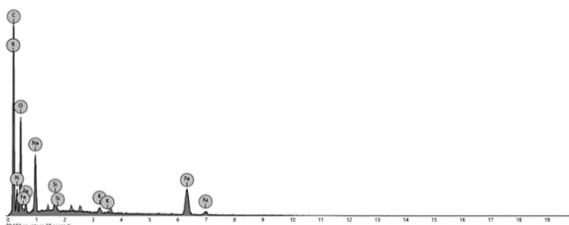
PHENOMWORLD

6. spot



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
O	42.63	33.86		
Fe	8.98	24.89		
Na	17.22	19.66		
C	20.00	11.93		
N	8.99	6.25		
Si	1.48	2.06		
K	0.69	1.35		

FOV: 269 µm, Mode: 15kV - Point, Detector: BSD Full



Disabled elements: B, La, Te

Рис. 6. Пример отчета для одной из точек поверхности образца после длительного погружения в модельный раствор

Fig. 6. Example of a report for one of the points on sample surface after long immersion into model solution

полняют задачу определения оттенков микроскопии судостроительных сталей после моделирования различных условий морской воды [21–26].

На полученных изображениях микроскопии необходимо обнаруживать участки, имеющие цвет, соот-

ветствующий точке исследования элементного состава. Изображения поступают в формате RGB, однако он не особенно точен при затемнении изображения, поэтому требуется конвертация цветового пространства RGB в HSV с использованием канала Value, который отражает яркость цвета из цветовой модели [27]. Яркость на изображении в формате HSV исчисляется в процентном соотношении, где 0 – это отсутствие яркости (черный цвет), 100 % – максимальная яркость (белый цвет).

Для автоматизации данного решения была разработана программа, которая позволила добавить к полученному количественному элементному составу смоделированного поверхностного слоя точный тон цвета, соответствующего данному составу (рис. 7).

В ходе компьютерного анализа снимков микроскопии поверхностного слоя стали в чистом виде образца после длительного погружения в модельный раствор и после моделирования условий района переменной ватерлинии было обнаружено несколько десятков оттенков серого. Среди них оказалось всего семь цветов (табл. 3), которые присутствуют одновременно в двух-трех видах поверхностной пленки.

Для этих цветов выполнен анализ элементного состава для чистого образца (белые ячейки), после длительного погружения в модельный раствор (темно-серые ячейки), после моделирования условий района переменной ватерлинии (светло-серые ячейки) (табл. 4).

Определены элементы, отсутствующие при визуализации каждого цвета в результате микроскопии.

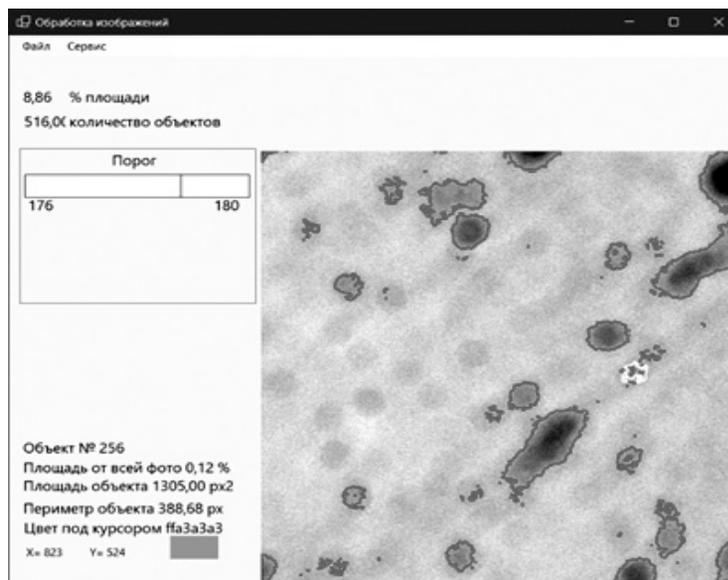


Рис. 7. Интерфейс программы

Fig. 7. Software interface

Таблица 3. Обнаруженные цвета

Table 3. Detected colours

Поверхностный слой стали в чистом виде образца	Поверхностный слой стали после длительного погружения в модельный раствор	Поверхностный слой стали после моделирования условий района переменной ватерлинии	https://htmlcolorcodes.com/hex-to-rgb/
ff000000	ff000000	ff000000	0, 0, 0 черный
ffa3a3a3	ffa3a3a3	ffa3a3a3	163, 163, 163
ffc0c0c0	ffc0c0c0	ffc0c0c0	192, 192, 192
	ffc0c0c0	ffc0c0c0	203, 203, 203
	ffd5d5d5	ffd5d5d5	213, 213, 213
	ffe4e4e4	ffe4e4e4	228, 228, 228
ffffff	ffffff	ffffff	255, 255, 255 белый

Заключение

Conclusion

Для решения поставленной цели обоснован выбор типа защиты в зависимости от условий эксплуатации океанотехнических объектов от коррозионно-

механических разрушений в районе ПВЛ. Одним из эффективных типов защиты от коррозионно-механических разрушений океанотехнических объектов является система защитных кожухов, однако особенность ее исполнения недопустима для стационарных оснований или самоподъемных плавучих буровых установок в случае ферменного исполнения опорного основания (колонн). В качестве альтернативы для таких объектов рекомендована электрохимическая защита, однако потребовалось изучить эффективность ее применения на участках смоченной поверхности района ПВЛ, не имеющих с водой постоянного контакта.

В результате исследования разработана методика определения уровня износа стали в районе ПВЛ, которая предполагает следующие действия:

- установление характеристик морской воды (солености и др.), климатических особенностей приливов, отливов и волнения для координат эксплуатации океанотехнического объекта;
- сбор статистической информации по уровню волнения с координатной привязкой на корпусе сооружения для определения высоты района ПВЛ;
- выбор и проведение микроскопии поверхностного слоя района ПВЛ корпусной конструкции океанотехнического объекта на уровне высоты, определенной на предыдущем этапе;

Таблица 4. Сравнение элементного состава поверхностного слоя стали по результатам микроскопии обнаруженного цвета ff000000 (химические элементы Sm, Er – отсутствуют)

Table 4. Steel surface chemistry comparison as per the results of microscopy in terms of colour ff000000 (samarium (Sm) and erbium (Er) were not found)

Шифр	Fe	Cr	O	C	Cl	Si	Na	Te	Mn	Al	N	K	Sr	Rh	Co	Eu
1W	60,48	1,13	35,63			2,48										
1W	71,27	0,58	16,10			1,11				10,60						
1W	97,86			0,53		1,61										
6W	24,89		33,86	11,93		2,06	19,66				6,25	1,35				
1W	63,87		25,05	0,60		1,12	9,36									
1W	45,11		36,30			13,82	2,45						1,86			
1W	31,60		50,38	0,77	1,03		15,50	0,71								
1W	81,84		8,38				3,30								4,34	2,14
1W	100,0															
1W	76,80		14,80	0,56	0,91		5,19		1,73							
2W	83,66		11,32				4,43	0,60								

- выявление элементного состава поверхностного слоя на основе результатов микроскопии с целью определения уровня износа стали корпусных конструкций;
- на основе полученных данных выполняется подбор защитных параметров для предотвращения повреждения и разрушения корпусов морских судов и океанотехнических объектов в районе ПВЛ.

Обнаружено, что в составе поверхностного слоя после моделирования условий района ПВЛ присутствуют хлор и натрий, являющиеся основными элементами, характеризующими морскую воду соленостью. Следует отметить, что в поверхностном слое после длительного погружения в модельный раствор морской воды не наблюдается данных элементов, что позволит в дальнейших исследованиях выполнить прогнозные оценки о сохранности корпусных конструкций океанотехнических объектов и морских робототехнических комплексов.

Выявлены предпосылки разработки методики компьютерного анализа данных, полученных после микроскопии моделируемых различных условий присутствия морской воды, в т.ч. и после моделирования района ПВЛ океанотехнических объектов и морских робототехнических комплексов. Применение данной методики позволит повысить точность подбора защитных параметров катодной поляризации наложенным током для предотвращения коррозионного повреждения и разрушения корпусных конструкций морских судов, океанотехнических объектов и морских робототехнических комплексов в районе ПВЛ вследствие коррозионного износа стали.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-01321, <https://rscf.ru/project/22-29-01321/>.

Список использованной литературы

1. *Byron F.* Corrosion impact of offshore platforms, structures, and vessels // *Materials performance* : [site]. 2020. 30 nov. URL: <https://www.materialsperformance.com/articles/corrosion-basics/2020/12/corrosion-impact-of-offshore-platforms-structures-and-vessels> (Accessed: 12.07.2023).
2. РД 31.28.10–97. Комплексные методы защиты судовых конструкций от коррозии / разработаны ЦНИИМФ. Санкт-Петербург, 1997. 169 с.
3. *Зеленская А.Д., Федякова Н.В., Павлов А.В.* Функциональное цинкосодержащее лакокрасочное покрытие по металлу // *Успехи в химии и химической технологии*. 2020. Т. 34, № 7. С. 93–95.
4. *Тамаров М.А.* Неорганическая химия. 2-е изд., испр. и доп. Москва : Медицина, 1974. 480 с.
5. Коррозия и методы защиты зоны переменного смачивания металлоконструкций гидротехнических сооружений эстакадного типа / *Р.А. Маркович, М.К. Кан, С.В. Михайлов* // *Гидротехника*. 2014. № 4. С. 28–35.
6. Производство // Корпорация ПСС : [сайт]. Пермь, 2023. URL: <https://pss.ru/services/proizvodstvo> (дата обращения: 12.07.2023).
7. *Семенова И.В., Флорианович Г.М., Хорошилов А.В.* Коррозия и защита от коррозии. 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Физматлит, 2010. 414 с.
8. *Kim J.-H., Kim Y.-S., Kim J.-G.* Cathodic protection criteria of ship hull steel under flow condition in seawater // *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 115. P. 149–158. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.02.024.
9. *Mainier F.B., Perassolli V.* Ship hull corrosion caused by default and lack of maintenance on the impressed current cathodic protection // *IOSR Journal of Engineering*. 2014. Vol. 4, No. 2. P. 34–39.
10. Катодное восстановление и анодное формирование комплексов металлов / *Н.Б. Березин, Т.Н. Березина, Ж.В. Межевич* [и др.] // *Вестник технологического университета*. 2015. Т. 18, No. 6. С. 75–77.
11. Simulation and selection of a protection types in the design stage of ships and offshore structures / *A. Rodkina, O. Ivanova, V. Kramar* [et al.] // *Brodogradnja*. 2022. Vol. 73, No. 2. P. 59–77. DOI: 10.21278/brod73204.
12. Optimization the quantity, locations and output currents of anodes to improve cathodic protection effect of semi-submersible crane vessel / *S.H. Xing, Y. Li, H.Q. Song, Y.G. Yan, M.X. Sun* // *Ocean Engineering*. 2016. Vol. 113. P. 144–150. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.12.047.
13. Analysis technology and cathodic protection for hull structures of ships and floating facilities / *V. Kramar, A. Rodkina, O. Ivanova* [et al.] // *Inventions*. 2021. Vol. 6, No. 4. P. 74 (19 p.). DOI: 10.3390/inventions6040074.
14. *Грамузов Е.М., Родькина А.В., Иванова О.А.* Анализ технико-экономических показателей защиты корпусных конструкции судов от коррозии // *Вестник Волжской гос. академии водного транспорта*. 2019. Вып. 60. С. 77–90.
15. *Саати Т., Кернс К.* Аналитическое планирование. Организация систем / Пер. с англ. *Р.Г. Вачнадзе*. Москва : Радио и связь, 1991. 223, [1] с.
16. Комплекс для исследования электрохимических характеристик корпусных конструкций судов и плавучих технических сооружений : пат. 2695961 Российская Федерация / *А.В. Родькина, О.А. Иванова, В.П. Душко, В.А. Крамарь*. № 2018134086; заявл. 26.09.2018; опубл. 29.07.2019, Бюл. № 22. 18 с.

17. Справочные данные по режиму ветра и волнения Балтийского, Северного, Черного, Азовского и Средиземного морей / Рос. морской регистр судоходства. Санкт-Петербург, 2006. 450, [2] с.
18. Карта // Черноморнефтегаз : [сайт]. Симферополь, 2023. URL: <http://gas.crimea.ru/component/content/article/23-novosti/69-karta> (дата обращения: 12.07.2023).
19. Емельянов В.А., Емельянова Н.Ю., Черный С.Г. Проектирование архитектуры информационной системы металлографического контроля качества металлов // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2023. № 2. С. 1–7. DOI: 10.36535/0548-0027-2023-02-1.
20. Электронный микроскоп Thermo Fisher Scientific Phenom ProX // Pharma : [сайт]. Москва, 2023. URL: <https://pharma-se.ru/products/nastolnye-elektronnye-mikroskopy/elektronnyu-mikroskop-thermo-fisher-scientific-phenom-prox> (дата обращения: 12.07.2023).
21. Маркова С.В., Жигалов К.Ю. Применение нейронной сети для создания системы распознавания изображений // Фундаментальные исследования. 2017. № 8–1. С. 60–64.
22. Серебряная Л.В., Шушина О.А. Нейросетевой подход к распознаванию образов // Доклады БГУИР. 2009. № 8(46). С. 85–92.
23. Разработка алгоритмов обработки изображений интеллектуальными мобильными роботами на основе нечеткой логики и нейронных сетей / Ч.Х. Аунг, З.П. Тант, А.Р. Федоров, П.А. Федоров // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 6. С. 1–9.
24. Долгов В.А. Обзор методов распознавания изображений // Современные тенденции технических наук : материалы VI Междунар. науч. конференции. Казань : Молодой ученый, 2018. С. 7–9.
25. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. 2-е изд., стереотип. Москва : Горячая линия – Телеком, 2002. 382 с.
26. Жигалов К.Ю. Подготовка техники к использованию в системах автоматизированного управления строительства автодорог // Естественные и технические науки. 2014. № 1(69). С. 285–287.
27. Detection and recognition of the underwater object with designated features using the technical stereo vision system / V. Kramar, A. Kabanov, O. Kramar [et al.] // Fluids. 2023. Vol. 8, No. 3. P. 92 (23 p.). DOI: 10.3390/fluids8030092.
28. Regulatory Document RD 31.28.10–97. Integrated corrosion protection methods for ship structures. Developed by TsNIIMF. St. Petersburg, 1997, 169 pp. (in Russian).
29. A. Zelenskaya, N. Fedyakova, A. Pavlov. Functional Zn-containing paint coating for metal // Advances in Chemistry and Chemical Technology, 2020, vol. 34, No. 7, pp. 93-95 (in Russian).
30. M. Tamarov. Inorganic Chemistry. 2nd edition, rev. and enl. Moscow, Meditsina, 1974, 480 pp. (in Russian).
31. R. Markovich, M. Kan, S. Mikhailov. Corrosion and protection methods for cyclic-wetting zones on metal structures of trestleworks at hydrotechnical facilities // Hydrotechnika, 2014, No. 4, pp. 28-35 (in Russian).
32. Production // PSS Corporation web site. Perm, 2023, URL: <https://pss.ru/services/proizvodstvo> (accessed on 12.07.2023), (in Russian).
33. I. Semenova, G. Florianovich, A. Khoroshilov. Corrosion and corrosion protection. 3rd edition. rev. and enl. Moscow, Fizmatlit, 2010, 414 pp. (in Russian).
34. Kim J.-H., Kim Y.-S., Kim J.-G. Cathodic protection criteria of ship hull steel under flow condition in seawater // Ocean Engineering. 2016. Vol. 115. P. 149–158. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.02.024.
35. Mainier F.B., Perassolli V. Ship hull corrosion caused by default and lack of maintenance on the impressed current cathodic protection // IOSR Journal of Engineering. 2014. Vol. 4, No. 2. P. 34–39.
36. N. Berezin, T. Berezina, Zh. Mezhevich et al. Cathodic reduction and anodic shaping of metal compounds // Herald of Technological University, 2015, Vol. 18, No. 6, pp. 75-77 (in Russian).
37. Simulation and selection of a protection types in the design stage of ships and offshore structures / A. Rodkina, O. Ivanova, V. Kramar [et al.] // Brodogradnja. 2022. Vol. 73, No. 2. P. 59–77. DOI: 10.21278/brod73204.
38. Optimization the quantity, locations and output currents of anodes to improve cathodic protection effect of semi-submersible crane vessel / S.H. Xing, Y. Li, H.Q. Song, Y.G. Yan, M.X. Sun // Ocean Engineering. 2016. Vol. 113. P. 144–150. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.12.047.
39. Analysis technology and cathodic protection for hull structures of ships and floating facilities / V. Kramar, A. Rodkina, O. Ivanova [et al.] // Inventions. 2021. Vol. 6, No. 4. P. 74 (19 p.). DOI: 10.3390/inventions6040074.
40. Ye. Gramuzov, A. Rodkina, O. Ivanova. Performance and cost efficiency analysis of corrosion protection for hull structures. Transactions of Volga State University of Water Transport, 2019, Issue No. 60, pp. 77-90 (in Russian).
41. T. Saati, K. Kearns. Analytical Planning: the Organization of Systems (Russian translation by R. Vachnadze). Radio i svyaz, 1991, 223 [1] pp.

References

1. Byron F. Corrosion impact of offshore platforms, structures, and vessels // Materials performance : [site]. 2020. 30 nov. URL: <https://www.materialsperformance.com/articles/corrosion-basics/2020/12/corrosion-impact-of-offshore-platforms-structures-and-vessels> (Accessed: 12.07.2023).

16. System for electrochemical investigations on hull structures of ships and floating structures. Patent No. 2695961 Russian Federation / A. Rodkina, O. Ivanova, V. Dushko, V. Kramar. No. 2018134086. appl. date 26.09.2018; publ. date 29.07.2019, Bul. No. 22, 18 pp. (*in Russian*).
17. Wind and wave conditions in the Baltic Sea, the North Sea, the Black Sea, the Sea of Azov and the Mediterranean Sea. Reference Book. Russian Maritime Register of Shipping. St. Petersburg, 2006, 450 [2] pp. (*in Russian*).
18. Map // Chernomorneftegaz web site. Simferopol, 2023, URL: <http://gas.crimea.ru/component/content/article/23-novosti/69-karta> (accessed on 12.07.2023) (*in Russian*).
19. V. Yemelyanov, N. Yemelyanova, S. Cherny. Architectural design of information system for metallographic quality control of metals // Nauchno-Tekhnicheskaya Informaciya. Seriya 2: Informatsionnye processy i sistemy (Research & Engineering Information. Series 2: Information processes and systems), 2023, No. 2, pp. 1-7, DOI: 10.36535/0548-0027-2023-02-1 (*in Russian*).
20. Electronic microscope THERMO FISHER SCIENTIFIC Phenom ProX // Pharma (web site), Moscow, 2023, URL: <https://pharma-se.ru/products/nastolnye-elektronnye-mikroskopy/elektronnyy-mikroskop-thermo-fisher-scientific-phenom-prox> (accessed on 12.07.2023), *in Russian*.
21. S. Markova, K. Zhigalov. Neural network applications in image recognition systems // Fundamental Research, 2017, No. 8-1, pp. 60-64 (*in Russian*).
22. L. Serebryanaya, O. Shushina. Neural network-based approach to image recognition // Doklady BGUIR (Transactions of Belarus State University of Informatics and Radioelectronics), 2009, No. 8(46), pp. 85-92 (*in Russian*).
23. Ch. Kh. Aung, Z.P. Tant, A. Fyodorov, P. Fyodorov. Development of image processing algorithms for intelligent mobile robots based on fuzzy logic and neural networks // Current Challenges in Science and Education, 2014, No. 6, pp. 1-9 (*in Russian*).
24. V. Dolgov. Review of image recognition methods // Modern Trends in Technical Sciences: Materials of the 6th International Scientific Conference. Kazan. Young Scientist, 2018, pp. 7-9 (*in Russian*).
25. V. Kruglov, V. Borisov. Artificial neural networks. Theory and Practice. 2nd edition, stereotype. Moscow, Goryachaya Liniya – Telekom, 2002, 382 pp. (*in Russian*).
26. K. Zhigalov. Preparation of equipment for use in automated systems for highway engineering supervision // Natural and Technical Sciences, 2014, No. 1(69), pp. 258-287 (*in Russian*).
27. Detection and recognition of the underwater object with designated features using the technical stereo vision system / V. Kramar, A. Kabanov, O. Kramar [et al.] // Fluids. 2023. Vol. 8, No. 3. P. 92 (23 p.). DOI: 10.3390/fluids8030092.

Сведения об авторах

Родькина Анна Владимировна, к.т.н., доцент ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». Адрес: 299053, Россия, Севастополь, Университетская ул., д. 33. E-mail: a.v.rodkina@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4593-4259>.

Крамарь Вадим Александрович, д.т.н., профессор ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». Адрес: 299053, Россия, Севастополь, Университетская ул., д. 33. E-mail: kramarv@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0528-1978>.

Иванова Ольга Александровна, к.т.н., доцент ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». Адрес: 299053, Россия, Севастополь, Университетская ул., д. 33. E-mail: o.a.ivanova.kmt@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3034-0968>.

Шацких Ольга Николаевна, лаборант-исследователь ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». Адрес: 299053, Россия, Севастополь, Университетская ул., д. 33. E-mail: olia.shatskikh@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7806-5849>.

About the authors

Anna V. Rodkina, Cand.Sc., Ass. Prof., Sevastopol State University, address: 33, Universitetskaya st., Sevastopol, Russia, post code 299053, E-mail: a.v.rodkina@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-4593-4259>.

Vadim A. Kramar, D.Sc., Prof., Sevastopol State University, address: 33, Universitetskaya st., Sevastopol, Russia, post code 299053, E-mail: kramarv@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0528-1978>.

Olga A. Ivanova, Cand.Sc., Ass. Prof., Sevastopol State University, address: 33, Universitetskaya st., Sevastopol, Russia, post code 299053, E-mail: o.a.ivanova.kmt@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0002-3034-0968>.

Olga N. Shatskikh, Lab Researcher, Sevastopol State University, address: 33, Universitetskaya st., Sevastopol, Russia, post code 299053, E-mail: olia.shatskikh@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0001-7806-5849>.

Поступила / Received: 10.07.23
Принята в печать / Accepted: 04.08.23
© Коллектив авторов, 2023