

УДК 620.193

М.Г. Абрамова¹**К ВОПРОСУ О ПОДТВЕРЖДЕНИИ ИДЕНТИЧНОСТИ МЕХАНИЗМА
КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ (обзор)****Часть 2. Коррозия в морской воде***

Представлен обзор исследований механизмов коррозионного разрушения алюминиевых сплавов в морской воде. Рассмотрены основные факторы, оказывающие наибольшее воздействие на коррозию: физико-химические параметры, глубина расположения объектов испытаний, а также роль биообрастания.

Установлено, что параметр видового состава обрастателей является важным фактором коррозии металлов в морской воде и должен учитываться при идентификации механизма коррозионного разрушения при испытаниях в различных условиях.

Ключевые слова: коррозия, натурные морские испытания, испытания в морской воде.

M.G. Abramova¹**REVISITING THE CONFIRMATION OF THE IDENTITY
OF THE CORROSION DESTRUCTION MECHANISM
OF ALUMINUM ALLOYS (review)****Part 2. Corrosion in sea water**

The paper presents an overview of studies of the corrosion destruction mechanisms of aluminum alloys in seawater. The main factors that have the greatest impact on corrosion are considered: physical and chemical parameters, the depth of the test objects, as well as the role of biofouling.

It has been determined that the parameter of the species composition of the fouling organisms is an important factor in the corrosion of metals in seawater and should be taken into account when identifying the mechanism of corrosion destruction during tests under various conditions.

Keywords: corrosion, full-scale marine tests, tests in sea water.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Согласно Стратегии развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года [1], основой экономической, транспортно-логистической и общественной эффективности работы российских портов является качественная модернизация и повышение конкурентоспособности услуг морской портовой инфраструктуры. Приказом Минтранса РФ от 12.05.2005 №45 «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года» [2] утверждены положения о развитии морского транспорта, необходимые для достижения геополитических, экономических и социальных целей. Для выполнения поставленных задач необходимы разработка и внедрение новых материалов и систем защиты с улучшенными свойствами (в первую очередь – более экологичные материалы и защитные покрытия), что, в свою очередь,

* Часть 1 – см. «Авиационные материалы и технологии», №4 (61), 2020.

требует разработки методов экспресс-оценки коррозионной стойкости материалов к воздействию внешней среды, необходимых для подтверждения сохраняемости их свойств на длительный период эксплуатации [3–7].

Морская вода является одной из наиболее распространенных и наиболее агрессивных коррозионных сред. Под «морской средой» понимают совокупность физических условий – от насыщенного мельчайшей водяной пылью морского воздуха до ила на дне океана [8]. Таким образом, к экспозиции в морской среде правомерно относить не только испытания при непосредственном контакте с морской водой, но также в условиях открытой атмосферы на станциях берегового типа [9].

Разработка новых методик коррозионных испытаний для подтверждения сохраняемости свойств материалов на длительный период эксплуатации требует доказанной возможности их применения для прогнозирования поведения материала в реальных условиях, основой которого является подтверждение соответствия (идентификация) механизма коррозионного разрушения при испытаниях и эксплуатации изделий в естественных условиях [10].

Вторая часть данной статьи посвящена аналитическому обзору коррозионного разрушения и поиску методов исследования механизма коррозии алюминиевых сплавов в морской воде.

Параметры морской воды, оказывающие влияние на коррозию металлов

Морская вода является сложной коррозионной средой, содержащей неорганические примеси – растворы солей, растворенные газы и органические примеси – бактерии, микроводоросли, растительные остатки и живые организмы, что накладывает дополнительные сложности при имитации коррозионного разрушения.

Согласно работе [8], факторы, влияющие на коррозию металлов в морской воде, разделяют на химические (растворенные газы, кислород, диоксид углерода, соленость, химическое равновесие, pH среды, растворимость карбонатов), физические (скорость, температура и давление воды, наличие в ней пузырьков воздуха и взвешенного ила), а также биологические (обрастание, наличие организмов с твердыми раковинами, особенности жизнедеятельности растений и животных, поглощение/выделение CO_2 , O_2 и др.).

Концентрация минеральных солей в зависимости от морского региона может колебаться от 0,2 (Балтийское море) до 4,1% (Красное море). Солевой состав океанской воды состоит в основном из NaCl (77,8%) и MgCl_2 (10,9%), общее содержание остальных солей не превышает 5% [11].

Наличие загрязнений в морской воде (в частности, сероводорода) приводит к значительному увеличению коррозии стали [12]. Важным аспектом проведения натурных морских испытаний является глубина расположения объекта исследования, так как физико-химические параметры морской воды (температура, pH, растворенный кислород) и ее биологическая составляющая изменяются по мере погружения. К наиболее важным параметрам, оказывающим непосредственное влияние на коррозию металлов в морской воде, относится концентрация растворенного кислорода [13], которая в значительной степени определяет состав морской экосистемы. Концентрация растворенного кислорода обратно пропорциональна содержанию в морской воде солей. Повышение температуры воды также снижает величину растворимости кислорода [11].

Следует отметить сложность контроля параметров морской воды [14], в связи с чем актуальным является вопрос о необходимости установления единых требований к измерениям параметров морской воды: перечня обязательных для контроля параметров на станциях морского типа, требований к аппаратному комплексу и точности измерений.

Проведение испытаний в морской среде

Несмотря на большой объем регламентирующих документов в части защиты металлических корпусов кораблей и судов от коррозии и обрастания [15–17], вопрос об обеспечении нормативной документацией в части установления требований к проведению испытаний в морской среде в нашей стране актуален. Приведенный в работе [18] анализ существующих методов исследования, отраженных в отечественных и зарубежных стандартах, позволил сделать заключение о необходимости разработки комплекса нормативной документации, а также специализированного унифицированного оборудования для проведения натурных морских испытаний материалов, предназначенных для изделий судостроения и портовой инфраструктуры.

В зависимости от степени воздействия морской среды коррозионное поведение материалов может изменяться в достаточно широком диапазоне, поэтому, изучая стойкость материала к воздействию морской среды, необходимо четко определять условия экспозиции – будь то зоны полного погружения или ватерлинии, зоны брызг или атмосфера.

Агрессивность испытаний *в атмосфере* приморского климата определяется скоростью осаждения хлорид-ионов, которая главным образом зависит от ветрового режима, а именно частоты, продолжительности и силы воздействия ветров морских направлений [19].

При испытаниях *в зоне брызг* поверхность материала подвергается смачиванию хорошо аэрированной водой, при этом обрастания не происходит. При частом воздействии штормов разрушение материала или защитного покрытия также может быть вызвано ударным волновым воздействием. Повышенная агрессивность зоны брызг для ряда материалов обусловлена содержащимися в брызгах пузырьками воздуха, оказывающими мощное деструктирующее воздействие на защитные пленки и покрытия.

Условия экспозиции *в зоне ватерлинии* (приливно-отливной зоне или зоне переменного смачивания) характеризуются частым попеременным воздействием аэрированной морской воды и воздуха, что обуславливает высокие скорости развития процессов коррозии. Экспозиция в зоне ватерлинии также сопровождается интенсивным биообрастанием, которое, в зависимости от испытываемого материала, может быть как ускорителем, так и замедлителем процессов коррозионного разрушения. Большой опыт эксплуатации конструкций из металлических материалов, не полностью погруженных в морскую воду, показал, что наибольшая скорость коррозии характерна именно для этой зоны, при этом интенсивность коррозионного воздействия определяется волновым режимом, т. е. частотой смачивания поверхности [11, 18, 20].

Экспозиция в условиях постоянного *полного погружения* в морскую воду по агрессивности коррозионного воздействия может быть разделена на ряд подкатегорий в зависимости от глубины проведения испытаний и концентрации содержащегося в толще воды растворенного кислорода. Отдельной подгруппой испытаний в морской воде является выдержка в зоне ила, коррозионная активность которой зависит от физических, химических и биологических свойств донных отложений [8, 21].

Для защиты подводной части корпусов судов в настоящее время наиболее часто применяется электрохимическая защита двух типов в зависимости от функционального назначения судна и предполагаемых условий эксплуатации: катодная и протекторная [22, 23], поэтому для моделирования поведения материалов в естественной морской воде наиболее часто используют электрохимические методы, позволяющие получить данные о потенциале коррозии, токе скорости коррозии, токе пассивности и потенциале питтинговой коррозии [24–27]. Широко применяемыми методами оценки коррозионного поведения материалов являются потенциодинамические поляризационные исследования и электрохимическая импедансная спектроскопия [28]. Преимущество

электрохимических методов исследований состоит в возможности быстрого получения сравнительных данных по коррозионной активности различных материалов, а также выявления склонности к локальным видам коррозии (чаще – питтинговой). В частности, в работе [28] исследования с применением импедансной спектроскопии позволили оценить защитное воздействие различных ингибирующих составов применительно к алюминиевому сплаву, применяемому в обшивке корпуса судна.

Ввиду широкого применения для защиты от коррозии в морской воде ингибирующих составов, большой объем работ посвящен исследованиям их защитной способности в зависимости от состава, основное внимание при разработке которого уделяется повышению экологических характеристик, и материала-подложки [29, 30].

Помимо электрохимических методов исследования, в зависимости от целей испытаний, в качестве ускоренных могут быть применены методы вибрационного воздействия с целью имитации кавитационного изнашивания [31, 32], а также испытания в движущейся морской воде [33–36] и при эрозионном износе в турбулентном потоке [37].

Роль биообрастания

Коррозионное разрушение металлов в морской воде неизменно сопряжено с воздействием биопленки микроорганизмов [38], которая может оказывать как ускоряющий, так и тормозящий коррозионные процессы эффект.

Начальной стадией развития процессов коррозионного разрушения алюминиевых сплавов служит пробой защитной пассивной пленки, возникающий при отсутствии доступа кислорода, необходимого для ее формирования. Если в условиях воздействия атмосферных факторов нарушение доступа кислорода к поверхности материала происходит вследствие образования растворимых соединений с хлором, вызывающих развитие локальной коррозии, то в морской среде ограничение доступа кислорода к поверхности материала вызывают биопленки микроорганизмов, поглощающие кислород в процессе своей жизнедеятельности.

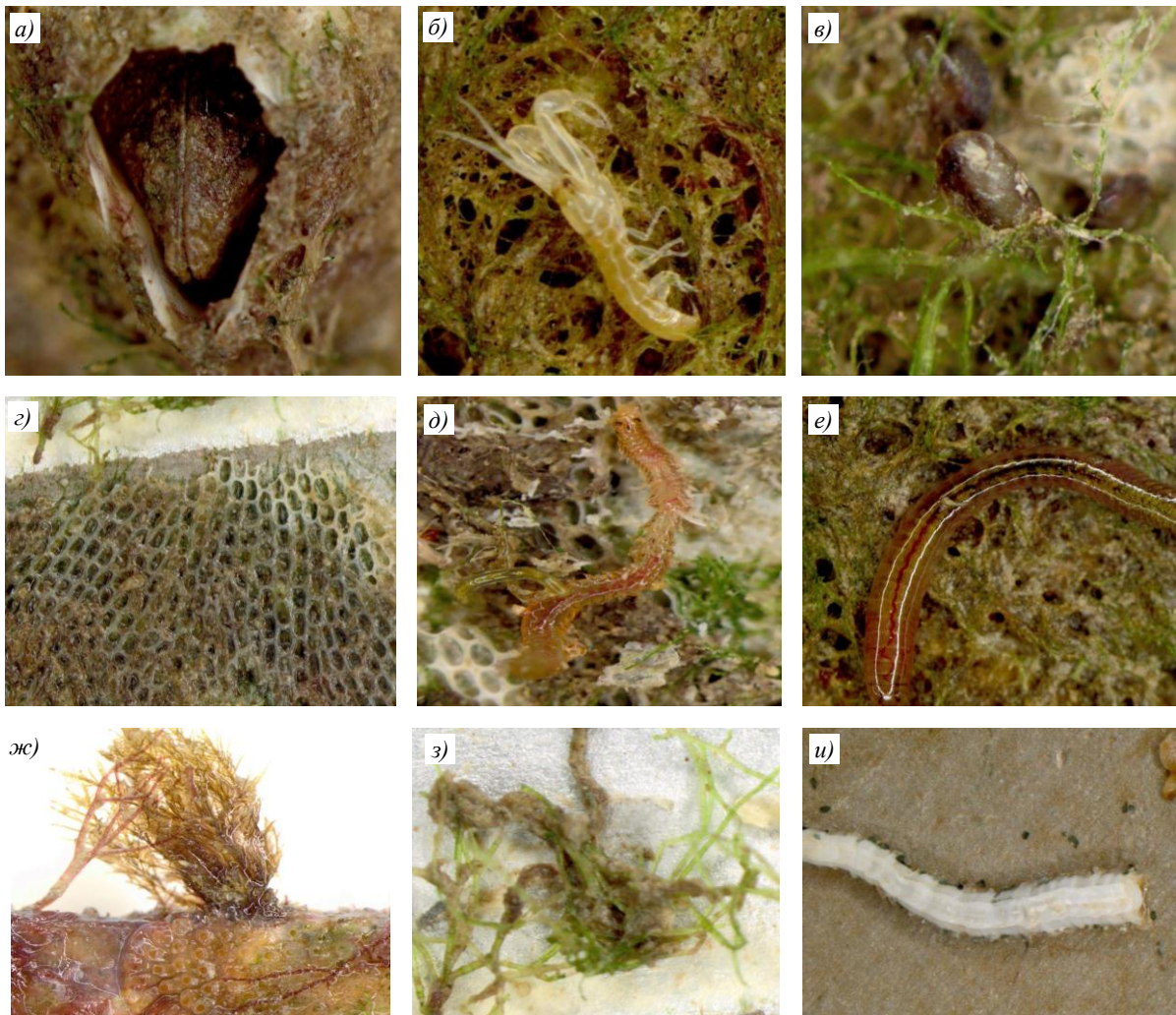
Адгезированные на поверхности материалов аэробные бактерии в результате своей жизнедеятельности выделяют органические кислоты и тем самым значительно повышают коррозионную агрессивность среды. Образование под биопленкой колоний анаэробных сульфатвосстанавливающих бактерий, вырабатывающих биогенный сероводород, вызывает интенсивное разрушение металлов.

На интенсивность коррозии металлов в морской воде обрастание поверхности морскими организмами влияет по-разному. В работах [39–43] показано, что на разрушение металлов обрастание не оказывает особо заметного влияния, чаще ингибируя коррозионные процессы (вследствие снижения содержания кислорода и кроющего действия обрастателей), однако коррозия при биообрастании может и усиливаться при наличии сульфатвосстанавливающих бактерий [44]. В работе [45] приведены результаты исследований, показывающие негативное воздействие бактерий *Pseudomonas aeruginosa*, вызывающих ускорение процессов коррозии углеродистой стали в 1,6 раза по сравнению с результатами испытаний в стерильной морской воде.

Многолетние исследования процессов микро- и макрообрастания ряда металлических материалов в морской воде показали, что коррозия металлической поверхности изначально инициируется первичным бактериальным сообществом [43, 46–48]. Разрушение пассивной пленки на металле более интенсивно в естественной морской воде по сравнению с искусственной морской водой, что связано с активностью микроорганизмов в биопленке, образующейся в первые часы экспозиции именно в естественной морской воде и препятствующей доступу кислорода для восстановления пассивной пленки.

По результатам проведенных исследований, в работе [38] установлена прямая зависимость между значениями активности микроорганизмов и скоростью коррозии алюминиевого сплава (активность определялась методом мультисубстратного тестирования).

Приведенные в работе [48] результаты исследований биологического обрастания образцов из алюминиевого сплава показывают различие видового разнообразия обрастателей при натурных испытаниях в различных условиях экспозиции в Геленджикской бухте, включающего зообентосные и фитобентосные организмы (см. рисунок).



Обрастатели, выделенные с образцов, экспонирующихся в акватории Геленджикской бухты: а – *Balanus improvises*; б – рачки отряда *Amphipoda*; в – *Mytilus galloprovincialis*; г – мшанки (тип *Bryozoa*); д, е – представители семейства *Nereidae*; ж – *Gelidium sp.*; з – *Cladophora sp.*; и – известковые домики представителей семейства *Serpulidae*

Отмечается, что наличие тех или иных обрастателей является показателем чистоты морской воды. Так, представители *Balanus improvises* представляют собой биофильтр, в связи с чем получают наибольшее распространение в загрязненных водах. В работе [18] показано, что бентосные организмы при закреплении на поверхности образцов алюминиевых сплавов могут вызывать разрушение пассивной пленки и питтингообразование.

Аналогично, в работе [49] по результатам испытаний в трех зонах залива Маннар (Индия) получены различные результаты по степени и видовому составу обрастателей в зависимости от конкретных условий экспозиции, отличающихся друг от друга степенью загрязнения. Наибольшие скорости коррозии, также как в работе [48], получены на образцах, экспонировавшихся в условиях открытого моря.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что качественные и количественные показатели биообрастания важны для процессов коррозионного разрушения металлоконструкций в морской воде и должны быть учтены при исследовании механизма их коррозионного разрушения. Учет этого фактора является одним из самых трудновоспроизводимых процессов при разработке ускоренных методов испытаний в морской воде, в то время как воспроизведение физико-химических параметров в лабораторных условиях не представляет сложности, однако параметр биофактора воспроизвести лабораторным методом не представляется возможным. Поэтому для проведения испытаний в морской воде в лабораторных условиях наиболее правильным является использование морской воды, забранной из естественной акватории.

Критерии подтверждения идентичности механизма коррозионного разрушения алюминиевых сплавов в морской воде

Разработка ускоренных методов испытаний с целью имитации работы материала в тех или иных условиях воздействия морской воды (в том числе с наложением факторов кавитационного и эрозионного воздействия, а также при испытаниях в движущейся морской воде) может проводиться при условии использования в качестве рабочей среды морской воды, забранной из естественной акватории. Соблюдение этих условий при разработке новых методов испытаний с целью прогнозирования поведения материалов в реальных условиях эксплуатации необходимо для учета биологической составляющей экспозиции в морской воде, при которой механизм коррозионного разрушения на начальном этапе основывается на разрушении пассивной пленки в результате поглощения кислорода биообрастателями.

В дополнение к приведенному в первой части данной работы [10] перечню критериев установления соответствия механизмов коррозии алюминиевых сплавов при различных методах испытаний, включающему кинетику развития параметров коррозионного разрушения, установление соответствия склонности к одним и тем же видам коррозии, соответствие характера коррозионного разрушения и морфологии поверхности, соответствие ранжирования различных материалов при проведении сравнительных испытаний, для испытаний в морской воде следует добавить фактор соответствия видового состава обрастателей, жизнедеятельность которых во многом предопределяет характер и степень дальнейшего коррозионного разрушения.

Комплексный подход к оценке соответствия механизма коррозионного разрушения согласно вышеперечисленным критериям позволит разрабатывать методы ускоренных коррозионных испытаний алюминиевых сплавов, наилучшим образом соответствующих реальным условиям эксплуатации в морской среде с идентичным механизмом коррозионного разрушения.

Библиографический список

1. Стратегия развития морской портовой инфраструктуры России до 2030 года. URL: <http://sudact.ru/law/strategiia-razvitiia-morskoi-portovoi-infrastruktury-rossii-do-iv/4.3/> (дата обращения: 01.07.2020).
2. Приказ Минтранса РФ от 12.05.2005 №45 «Об утверждении Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2020 года». URL: <http://sudact.ru/law/prikaz-mintransa-rf-ot-12052005-n-45/transportnaia-strategiia-rossiiskoi-federatsii-na-razdel-3/3.4/> (дата обращения: 01.07.2020).
3. Абрамова М.Г., Луценко А.Н., Варченко Е.А. Об особенностях подтверждения соответствия климатической стойкости материалов авиационного назначения на всех этапах жизненного цикла (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2020. №1 (58). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-1-86-94.

4. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
5. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // *Интеллект и технологии*. 2016. №2 (14). С. 16–21.
6. Каблов Е.Н., Подживотов Н.Ю., Луценко А.Н. О необходимости создания единого информационно-аналитического центра авиационных материалов РФ // *Проблемы машиностроения и автоматизации*. 2019. №3. С. 28–32.
7. Карпов В.А. Биокоррозия в морской среде и основы применения защитных покрытий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: ИПЭЭ РАН, 2012. 47 с.
8. Шумахер М. Морская коррозия: справочник. М.: Metallurgia, 1983. 512 с.
9. ГОСТ 9.906–83. ЕСЗКС. Станции климатические испытательные. Общие требования. М.: Изд-во стандартов, 1983. 36 с.
10. Абрамова М.Г. К вопросу о подтверждении идентичности механизма коррозионного разрушения алюминиевых сплавов (обзор). Часть 1. Атмосферная коррозия // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. №4 (61). С. 86–94. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-86-94.
11. Богорад И.Я., Искра Е.В., Климова В.А., Кузьмин Ю.Л. Коррозия и защита морских судов. Л.: Судостроение, 1973. 392 с.
12. Качество поверхностных вод Российской Федерации. Информация о наиболее загрязненных водных объектах Российской Федерации: приложение к ежегоднику / Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Ростов н/Д, 2016. 150 с.
13. Полонский А.Б., Свищев С.В. Сезонные и междесятилетние изменения концентрации кислорода в поверхностных водных массах Черного моря // *Системы контроля окружающей среды*. 2014. №20. С. 153–156.
14. Breaker L.C., Gilhousen D.B., Burroughs L.D. Preliminary Results from Long-Term Measurements of Atmospheric Moisture in the Marine Boundary Layer in the Gulf of Mexico // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. 1998. Vol. 15. P. 661–676.
15. РД 31.28.10–97. Комплексные методы защиты судовых конструкций от коррозии. М.: Стандартиформ, 1998. 37 с.
16. Руководство по защите корпусов надводных кораблей ВМФ от коррозии и обрастания. М.: Воен. изд-во, 2002. 350 с.
17. ГОСТ 9.056–75. Стальные корпуса кораблей и судов. Общие требования к электрохимической защите при долговременном стояночном режиме. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200015017> (дата обращения: 03.07.2020).
18. Варченко Е.А., Курс М.Г. Натурные испытания металлических материалов в морской воде: ключевые подходы к оценке стойкости к коррозии и биоповреждению // *Труды ВИАМ*. 2017. №11 (59). Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.04.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-11-12-12.
19. Абрамова М.Г., Панченко Ю.М., Ветрова Е.Ю., Ненашева Т.А. Коррозионная агрессивность атмосферы в различных климатических районах РФ // *Коррозия: материалы, защита*. 2020. №3. С. 12–22. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-3-12-22.
20. Альхименко А.А., Колюшев И.Е., Харьков А.А., Шапошников Н.О., Цветков А.С. Коррозионная стойкость стальных свайных опор в морской воде // *Коррозия: материалы, защита*. 2020. №2. С. 16–20. DOI: 10.31044/1813-7016-2020-0-2-16-20.
21. Wang X., Duan J., Li Y., Zhang J., Ma S., Hou B. Corrosion of steel structures in sea-bed sediment // *Bulletin of Materials Science*. 2005. Vol. 28. P. 81–85.
22. Белов О.А. Современное состояние организации комплексной защиты металлических корпусов кораблей и судов от коррозии // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2017. №3 (118). С. 115–120.
23. Чернов Б.Б., Ву В.М., Нугманов А.М., Фирсова Л.Ю. Формирование солевых отложений на стальной поверхности при катодной защите инженерных сооружений в морской воде // *Морские интеллектуальные технологии*. 2018. №4–5 (42). С. 120–124.

24. Vera R., Vinciguerra F., Bagnara M. Comparative Study of the Behavior of API 5L-X65 Grade Steel and ASTM A53-B Grade Steel against Corrosion in Seawater // *Corrosion Science*. 2015. Vol. 10. P. 6187–6198.
25. Zhao M., Liu M., Song G., Atrens A. Influence of pH and chloride ion concentration on the corrosion of Mg alloy ZE41 // *Corrosion Science*. 2008. Vol. 50. P. 3168–3178.
26. Marlaud T., Malki B., Deschamps A., Baroux B. Electrochemical aspects of exfoliation corrosion of aluminium alloys: The effects of heat treatment // *Corrosion Science*. 2011. Vol. 53. P. 1394–1400.
27. Szklarska-Smialowska Z. Pitting corrosion of aluminum // *Corrosion Science*. 1999. Vol. 41. P. 1743–1767.
28. Wan Nik W.B., Sulaiman O., Fadhli A., Rosliza R. Corrosion behaviour of aluminum alloy in seawater // *Proceedings of MARTEC 2010 The International Conference on Marine Technology*. Dhaka, 2010. P. 175–180.
29. Broddy S., Sudhakar K.V. Corrosion Inhibition: Investigation of Lanolin Coating on the Corrosion Characteristics of Low Carbon Steel in Simulated Sea Water // *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2017. Vol. 53. P. 1125–1130.
30. Xavier J.R., Nallaiyan R. Corrosion inhibitive properties and electrochemical adsorption behaviour of some piperidine derivatives on brass in natural sea water // *Journal of Solid State Electrochemistry*. 2012. Vol. 16. P. 391–402.
31. Цветков Ю.Н., Горбаченко Е.О. Особенности изменения профиля поверхности алюминиевых бронз при кавитационном изнашивании в морской воде // *Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова*. 2018. Т. 10. №5. С. 1004–1014. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-5-1004-1014.
32. Зубрилов С.П., Растрьгин Н.В. Исследование процесса кавитации и возможности снижения эрозионного износа // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова*. 2019. Т. 11. №4. С. 705–717. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.
33. Люблинский Е.Я. Коррозия и защита судов: справочник. Л.: Судостроение, 1987. 376 с.
34. Сорокин А.И. Исследование процесса разрушения алюминиевого сплава от контактной коррозии в высокоскоростном потоке морской воды // *Вісник СевНТУ*. 2012. Сер.: Механіка, енергетика, екологія. Вип. 132. С. 135–141.
35. Подгорный Ю.И., Сорокин А.И. Коррозионно-эрозионная стойкость и электрохимическое поведение некоторых судостроительных сплавов в быстро движущейся морской воде // *Состояние и перспективы создания и внедрения коррозионно-стойких материалов, средств и методов противокоррозионной защиты судов: тез. докл. Второго науч.-техн. совещания*. Л., 1982. С. 53–55.
36. Ваганов А.М. Проектирование скоростных судов. Л.: Судостроение, 1978. 279 с.
37. Rashidi A.M., Packnezhad M., Moshrefi-Torbati M., Walsh F.C. Erosion–corrosion synergism in an alumina/sea water nanofluid // *Microfluidics and Nanofluidics*. 2014. Vol. 17. P. 225–232.
38. Карпов В.А., Ковальчук Ю.Л., Беленева И.А., Петросян В.Г. Исследование коррозии металлов в тропических морских водах // *Новости материаловедения. Наука и техника*. 2016. №6 (24). Ст. 3. URL: <http://www.materialsnews.ru> (дата обращения: 06.07.2020).
39. Heitz E., Flemming H.C., Sand W. *Microbially Influenced Corrosion of Materials*. Springer, 1996. 475 p.
40. Compere C., Le Bozec N. Behaviour of stainless steel in natural seawater // *The First Stainless Steel Congress in Thailand*. Bangkok, 1997. URL: <https://archimer.ifremer.fr/doc/00089/19989/17653.pdf> (дата обращения: 06.07.2020).
41. Yang D., Liu J., Xiaoxue E., Jiang L. Experimental study of composition and influence factors on fouling of stainless steel and copper in seawater // *Annals of Nuclear Energy*. 2016. Vol. 94. P. 767–772.
42. Al-Muhanna K., Habib K. Marine bio-fouling of different alloys exposed to continuous flowing fresh seawater by electrochemical impedance spectroscopy // *Journal of Saudi Chemical Society*. 2016. Vol. 20. Is. 4. P. 391–396.

43. Mansfeld F., Little B. Microbiologically influenced corrosion of copper-based materials exposed to natural seawater // *Electrochimica Acta*. 1992. Vol. 37. Is. 12. P. 2291–2297.
44. Михеев А.И. Влияние обрастания и низких температур на безопасную эксплуатацию судов // *Водный транспорт*. 2013. №3 (18). С. 056–061.
45. Hamzah E., Hussain M.F., Ibrahim Z., Abdolahi A. Corrosion Behaviour of Carbon Steel in Sea Water Medium in Presence of *P. aeruginosa* Bacteria // *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2014. Vol. 39. P. 6863–6870.
46. Коряков М.Д., Филоненко Н.Ю., Каплин Ю.М. Исследование коррозии высоколегированных сталей в морской воде под баянусами // *Защита металлов*. 1995. Т. 31. №2. С. 219–221.
47. Каплин Ю.М., Корякова М.Д., Никитин В.М., Супонина А.П. Механизм коррозии стали под основанием баянуса // *Защита металлов*. 1998. Т. 34. №1. С. 89–93.
48. Варченко Е.А., Ветрова Е.Ю. Исследование биологической и коррозионной стойкости образцов алюминиевого сплава после натурных испытаний в Геленджикской бухте. Часть 1 // *Труды ВИАМ*. 2020. №6–7 (89). Ст. 10. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 29.07.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-67-91-100.
49. Subramanian G., Palanichamy S. Influence of fouling assemblage on the corrosion behaviour of mild steel in the coastal waters of the Gulf of Mannar, India // *Journal of Marine Science and Application*. 2013. Vol. 12. P. 500–509.