

Nəticə. 1. Təyin edilmişdir ki, tədqiqatda nəzərdə tutulmuş rejimlər üzrə aparılmış BKBP prosesi BT6 ərintisinin bərklik dərəcəsini 1,1 dəfə, möhkəmlik xassələrini isə 1,2 dəfə artırmış, plastiklik göstəricilərini isə 1,4 dəfə azaltmışdır.

2. Göstərilmişdir ki, BKBP-dən sonra BT6 ərintisinin plastiklik göstəriciləri azalsa da, UXD quruluşa malik ərintinin zərbə özlülüyü (KCV) sınaq temperaturlarının -186°C-dən 200°C-ə qədər olan intervalında ilkin (İD) vəziyyətdəki ərintinin KCV göstəricilərindən demək olar ki, fərqlənməmişdir, bu isə ərintini konstruktiv möhkəmlik baxımından müsbət səciyyələndirmişdir.

Ədəbiyyat

1. Шляхова Г.В., Данилов В. И., Зуев Л.Б., Карташов Е.Ю. Разрушение ультрамелкозернистого титана // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки, 2016, №3
2. Черняева Е.Ю., Семенова И.П. Влияние деформации и термообработки на коррозионное поведение двухфазных титановых сплавов // Вестник УГАТУ. 2011. №1 (41).
3. Сурикова Н.С., Панин В.Е., Деревягина Л.С., Микромеханизмы деформации и разрушения слоистого материала из титанового сплава BT6 при ударном нагружении // Физ. мезомех. 2014. №5.
4. Салищев Г. А., Кудрявцев Е. А., Жеребцов С. В. Структурные изменения и механическое поведение при низкотемпературной сверхпластичности наноструктурного сплава BT6 // Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. 2012. №17 (136).
5. Исламгалиев Р. К., Ганеев А. В., Никитина М. А., Караваева М.В. Структура и свойства ультрамелкозернистой мартенситной стали // Вестник УГАТУ. 2016. №3 (73).

*Məqalə qəbul olunub: 29.10.25
Təvsiyə edib: dos. Xankişiyev İ.A.*

УДК 656.6:620.193; 656.6:620.197

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗРАБОТКИ СУДОВЫХ ЛАКОКРАСОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАНОМОДИФИКАТОРАМИ И БИОЦИДНЫМИ ДОБАВКАМИ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Фатьянова Н.В.

*ПЮЛ “Азербайджанская Государственная Морская Академия”
Аз1000, г. Баку, ул. З.Алиевой, 18
E-mail: nice.natali92@mail.ru*

Аннотация. В статье представлен аналитический обзор современных тенденций в разработке судовых лакокрасочных материалов (ЛКМ) с использованием наномодификаторов и биоцидных добавок. Рассмотрены физико-химические механизмы повышения антикоррозионных и противообрастающих свойств покрытий, а также влияние наночастиц на структуру и долговечность ЛКМ в условиях агрессивных морских сред. Проведено сравнение мировых технологий и нормативных требований, включая экологические аспекты применения биоцидов. Выявлены ключевые проблемы внедрения инновационных компонентов и намечены перспективные направления дальнейших исследований.

Xülasə. Məqalədə nanomodifikatorlar və biosid əlavələr tətbiq olunan gəmi lak-boya materiallarının (LBM) hazırlanmasında müasir meyllərin analitik icmal təqdim olunur. Örtüklərin

antikorroziya və yapışma əleyhinə xüsusiyyətlərinin artırılmasının fiziki-kimyəvi mexanizmləri, həmçinin aqressiv dəniz mühitlərində LBM-in quruluşuna və dayanıqlığına nanosistemlərin təsiri araşdırılır. Dünyada tətbiq olunan texnologiyalar və normativ tələblər, eləcə də biosidlərin ekoloji aspektləri müqayisə edilmişdir. İnnovativ komponentlərin tətbiqində əsas problemlər müəyyən edilmiş və gələcək tədqiqat istiqamətləri göstərilmişdir.

Abstract. The article presents an analytical review of current trends in the development of marine coatings incorporating nanomodifiers and biocidal additives. The physicochemical mechanisms of enhancing anticorrosive and antifouling properties of coatings are discussed, along with the impact of nanoparticles on the structure and durability of paints under aggressive marine conditions. A comparative analysis of global technologies and regulatory requirements is provided, with special attention to the environmental aspects of biocide application. Key challenges to the adoption of innovative components are identified, and future research directions are outlined.

Ключевые слова: судовые покрытия, наноматериалы, биоциды, антикоррозионная защита, противообрастающие свойства, морская среда, экологическая безопасность

Açar sözlər: gəmi örtükləri, nanomateriallar, biosidlər, antikorroziya mühafizəsi, yapışma əleyhinə xüsusiyyətlər, dəniz mühiti, ekoloji təhlükəsizlik

Key words: marine coatings, nanomaterials, biocides, anticorrosion protection, antifouling properties, marine environment, environmental safety

Введение. Современная судостроительная и судоремонтная отрасль испытывает постоянную потребность в эффективных методах защиты металлических поверхностей от коррозии и биологического обрастания. Лакокрасочные материалы (ЛКМ) являются одним из ключевых средств, обеспечивающих долговечность и надежность судовых конструкций в агрессивных условиях морской среды. Однако классические рецептуры ЛКМ часто демонстрируют ограниченную стойкость к многофакторному воздействию, включая соленую воду, ультрафиолетовое излучение, механическое истирание и рост морских организмов.

В последние десятилетия в области разработки судовых покрытий отмечается интенсивное внедрение нанотехнологий и биоцидных компонентов, которые существенно расширяют функциональные возможности ЛКМ. Наномодификаторы, такие как наномел, диоксид титана и графен, способствуют улучшению барьерных и механических свойств покрытий, повышая их устойчивость к коррозионным процессам. Биоцидные добавки, включая оксид меди и оксид цинка, обеспечивают надежную защиту от биообрастания, снижая эксплуатационные расходы и повышая безопасность мореплавания.

Данная статья ставит своей целью комплексный анализ современных тенденций в разработке судовых лакокрасочных материалов с использованием наномодификаторов и биоцидных добавок. В работе рассматриваются физико-химические механизмы повышения антикоррозионных и противообрастающих свойств покрытий, проводится сравнение мировых технологий и нормативных требований, а также выделяются основные проблемы и перспективы развития в данной области.

Основная часть. Современные судовые лакокрасочные материалы (ЛКМ) представляют собой сложные композиционные системы, основная задача которых — создание прочного защитного слоя на металлических поверхностях судов, способного противостоять коррозии и биологическому обрастанию в условиях агрессивной морской среды.

Традиционные судовые покрытия преимущественно базируются на пентафталевых лаках (например, ПФ-115), эпоксидных и полиуретановых смолах. Они обладают хорошей адгезией, механической прочностью и умеренной химической стойкостью. Однако при длительной эксплуатации в морской среде возникают ряд проблем:

- Проникновение влаги через микропоры и микротрещины, что ускоряет коррозионные процессы.

- Низкая устойчивость к ультрафиолетовому излучению, приводящая к выцветанию и потере прочности.
- Недостаточная эффективность против биообрастания, что увеличивает эксплуатационные расходы на очистку и ремонт.
- Экологические ограничения, связанные с применением токсичных компонентов, особенно биоцидов.

Для преодоления этих ограничений ведется активное внедрение новых технологий, в частности наномодификаторов и биоцидных добавок, способных значительно улучшить эксплуатационные характеристики покрытий.

Внедрение наноматериалов в состав судовых лакокрасочных материалов стало одним из ключевых направлений модернизации покрытий благодаря их уникальным физико-химическим свойствам. Наночастицы обладают высокой удельной поверхностью и способны улучшать структуру покрытия на микроскопическом уровне, что значительно повышает его защитные функции.

Основные наномодификаторами, которые применяются в судовых ЛКМ являются:

- **Наномел (наноразмерный мел)** — широко применяется как наполнители для улучшения барьерных свойств покрытия, повышения механической прочности и стойкости к истиранию. Наномел способствует уменьшению пористости пленки, что снижает проникновение влаги и агрессивных ионов к металлической поверхности.
- **Диоксид титана (TiO_2)** — обладает фотокаталитическими свойствами, что позволяет использовать его для самоочищающихся и антибактериальных покрытий. Кроме того, TiO_2 улучшает устойчивость ЛКМ к ультрафиолетовому излучению и повышает механическую прочность.
- **Графен** — двумерный углеродный наноматериал с исключительной прочностью, гидрофобностью и электропроводностью. Включение графена в ЛКМ улучшает защиту от коррозии за счет формирования плотного барьера и уменьшения адгезии коррозионных продуктов.

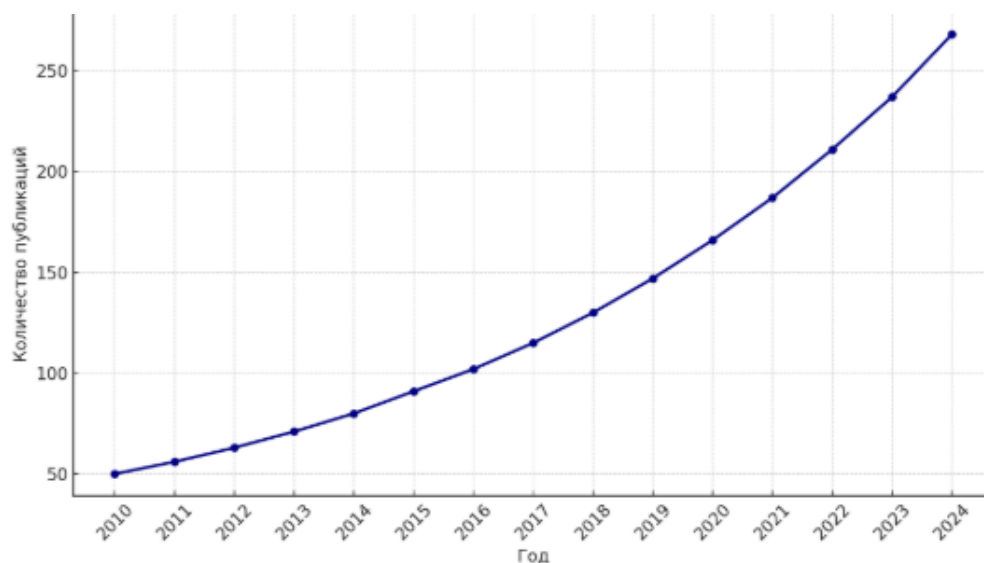


Рис. 1. Динамика публикаций по наноматериалам в судовых ЛКМ (2010-2024)

Анализ публикаций в международных научных базах данных (Scopus, Web of Science) демонстрирует стабильный рост числа исследований, посвящённых применению наноматериалов в судовых покрытиях за последние 15 лет. Это свидетельствует о возрастающем интересе и перспективности данного направления.

На рис. 1 представлен модельный график динамики публикаций по теме наноматериалов в судовых лакокрасочных материалах за 2010–2024 гг. Как видно из графика в последние годы наблюдается устойчивый рост интереса исследователей к наноматериалам.

Однако в морской среде судовые покрытия подвергаются не только коррозионному, но и биологическому воздействию, связанному с обрастанием поверхности микро- и макроорганизмами. Для предотвращения данного процесса в состав ЛКМ вводят биоцидные добавки, обеспечивающие подавление жизнедеятельности морской флоры и фауны на границе раздела «покрытие – морская вода». Использование биоцидов позволяет существенно снизить эксплуатационные расходы, связанные с очисткой корпусов судов, а также улучшить гидродинамические характеристики и долговечность покрытий.

Биоциды для судовых покрытий можно условно разделить на две основные группы:

1. **Минеральные биоциды** – неорганические соединения с пролонгированным действием.
 - **Оксид меди (Cu_2O)** — традиционный компонент с высокой биоцидной активностью, но с определёнными экологическими ограничениями.
 - **Оксид цинка (ZnO)** — обладает умеренной биоцидной активностью, повышает белизну и стойкость покрытия к УФ-излучению.
 - **Оксид церия (CeO_2)** — в первую очередь антикоррозионный ингибитор, но также замедляет развитие биоплёнок за счёт влияния на адгезию микроорганизмов.
2. **Органические биоциды** – синтетические соединения, разрушаемые в морской воде за определённый период, обеспечивающие контролируемое высвобождение активного вещества.
 - Имидазолы, изотиазолиноны, трибутилоловянные соединения (в ряде стран запрещены).

Механизм действия минеральных биоцидов заключается в постепенном высвобождении ионов, которые нарушают метаболизм микроорганизмов и предотвращают их прикрепление к поверхности покрытия, оказывая нижеследующие эффекты:

- **Цитотоксическое воздействие** – разрушение клеточных мембран микроорганизмов (Cu_2O , органические биоциды).
- **Фотокаталитический эффект** – образование активных форм кислорода под действием света (ZnO , CeO_2).
- **Ингибирование адгезии** – создание поверхностных условий, препятствующих прикреплению организмов (CeO_2 , гидрофобные органические модификаторы).

В таблице 1 приведена сравнительная характеристика минеральных и органических биоцидов.

Как показывает мировой опыт, разработка и применение судовых лакокрасочных материалов с наномодификаторами и биоцидными добавками во многом определяется региональными стандартами, экологическими нормами и технологическим уровнем судостроительной отрасли в конкретных странах. При этом международные организации играют ключевую роль в формировании единых требований к защитным покрытиям:

- **IMO (International Maritime Organization)** – регламентирует использование противообрастающих покрытий, устанавливая запрет на органоолово-содержащие соединения и ограничивая использование высокотоксичных биоцидов.
- **REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)** – европейское регулирование, требующее оценки экологической и токсикологической безопасности всех химических компонентов ЛКМ.
- **BPR (Biocidal Products Regulation)** – дополняет REACH и определяет порядок регистрации и допуска биоцидных веществ в ЕС.

- **US EPA (United States Environmental Protection Agency)** — контролирует применение биоцидов в морских покрытиях в США, включая предельные нормы содержания меди и цинка.
- **Японские и корейские стандарты** — акцентируют внимание на долговечности покрытий и устойчивости к биообрастанию в условиях интенсивного судоходства.

Таблица 1

Сравнительная таблица минеральных и органических биоцидов

Биоцид	Тип	Эффективность против водорослей	Эффективность против моллюсков	Антикоррозионный эффект	Экологическая безопасность
Cu ₂ O	Минеральный	Высокая	Высокая	Средний	Средняя (ограничения норм)
ZnO	Минеральный	Средняя	Средняя	Средний	Высокая
CeO ₂	Минеральный	Средняя	Средняя	Высокая	Высокая
Изотиазолиноны	Органический	Высокая	Средняя	Нет	Средняя
ТБТ (запрещён)	Органический	Очень высокая	Очень высокая	Нет	Низкая

В таблице 2 представлены сравнительные нормативные требования к судовым ЛКМ со стороны международных организаций по использованию минеральных и органических биоцидов.

Как показывает мировая практика внедрения наномодификаторов и биоцидов в составы судовых ЛКМ, в европейских странах доминирует применение высокотехнологичных multifunctional покрытий, сочетающих антикоррозионные и противообрастающие свойства. Большое внимание уделяется экологической безопасности — биоциды проходят строгую регистрацию в рамках REACH и BPR. Наблюдается рост интереса к нанокomпозиционным покрытиям с TiO₂, ZnO и CeO₂, которые обеспечивают долговечность и снижают частоту обслуживания судов.

В Японии и Южной Корее распространены системы с повышенной стойкостью к истиранию и воздействию морских микроорганизмов, ориентированные на долгосрочную эксплуатацию в условиях интенсивного судоходства. Китай активно инвестирует в разработку бюджетных, но эффективных наномодифицированных ЛКМ, в том числе с применением наномела и оксидов металлов. При этом экологические ограничения здесь мягче, чем в ЕС, что ускоряет внедрение инноваций.

США и Канада делают акцент на энергоэффективности судоходства за счёт снижения гидродинамического сопротивления. Популярны покрытия с низкой шероховатостью, в том числе силиконовые и фторполимерные, модифицированные наночастицами. Контроль за экологической безопасностью веществ осуществляется Агентством по охране окружающей среды (EPA), при этом допускаются более широкие диапазоны концентраций ZnO и Cu₂O, чем в ЕС, но с обязательным мониторингом выщелачивания.

Таблица 2

Сравнительные нормативные требования к судовым ЛКМ

Регламент / Страна	Ограничения по биоциду Cu_2O	Ограничения по ZnO	Запреты на органические биоциды	Особенности
IMO	Нет прямого запрета, но контроль по экотоксичности	Нет прямого запрета	Запрет ТВТ и аналогов	Международный стандарт
REACH (ЕС)	Требуется регистрация, оценка токсичности	Требуется регистрация	Ограничение по содержанию	Жёсткий экологический контроль
BPR (ЕС)	Подробная процедура допуска	Подробная процедура допуска	Полный контроль списка веществ	Усиленные требования к доказательной базе
US EPA (США)	Ограничение по концентрации	Ограничение по концентрации	Контроль отдельных веществ	Региональная специфика
Япония / Корея	Регулирование по сроку выщелачивания	Нет прямого запрета	Контроль органики	Ориентация на долговечность

Несмотря на значительные успехи в разработке судовых лакокрасочных материалов (ЛКМ) с наномодификаторами и биоцидными добавками, их широкое внедрение сопровождается рядом сложностей, связанных как с технологическими, так и с экологическими и экономическими факторами.

Мировая практика демонстрирует постепенное ужесточение норм, регулирующих применение биоцидов в судовых покрытиях. Международные и региональные регламенты (IMO, REACH, BPR, US EPA) требуют детальной оценки токсичности и долговременного воздействия используемых веществ. Особенно это касается медьсодержащих и органических биоцидов, которые при неконтролируемом выщелачивании могут негативно влиять на экосистемы портовых зон.

Интеграция наночастиц в традиционные ЛКМ требует оптимизации рецептуры, так как наноматериалы могут агломерироваться, снижая эффективность модификации. Кроме того, введение биоцидов в присутствии наномодификаторов может влиять на равномерность распределения активных веществ и адгезию покрытия.

Высокая стоимость синтеза и подготовки наноматериалов, а также регистрация новых биоцидных добавок увеличивают себестоимость готовой продукции. Для судовладельцев это может стать сдерживающим фактором, особенно в сегменте коммерческого флота с невысокой маржинальностью перевозок.

Отсутствие универсальных стандартов по оценке эффективности наномодифицированных и биоцидных покрытий в реальных морских условиях затрудняет их сертификацию и международное признание результатов испытаний. Это особенно актуально для инновационных составов, в которых применяются новые наноструктурированные материалы.

Как показывает анализ разработок иностранных ученых, в ближайшие годы прогнозируется значительный рост наноматериалов и биоцидов в ЛКМ. Это представлено графиком, показанным на рис. 2.

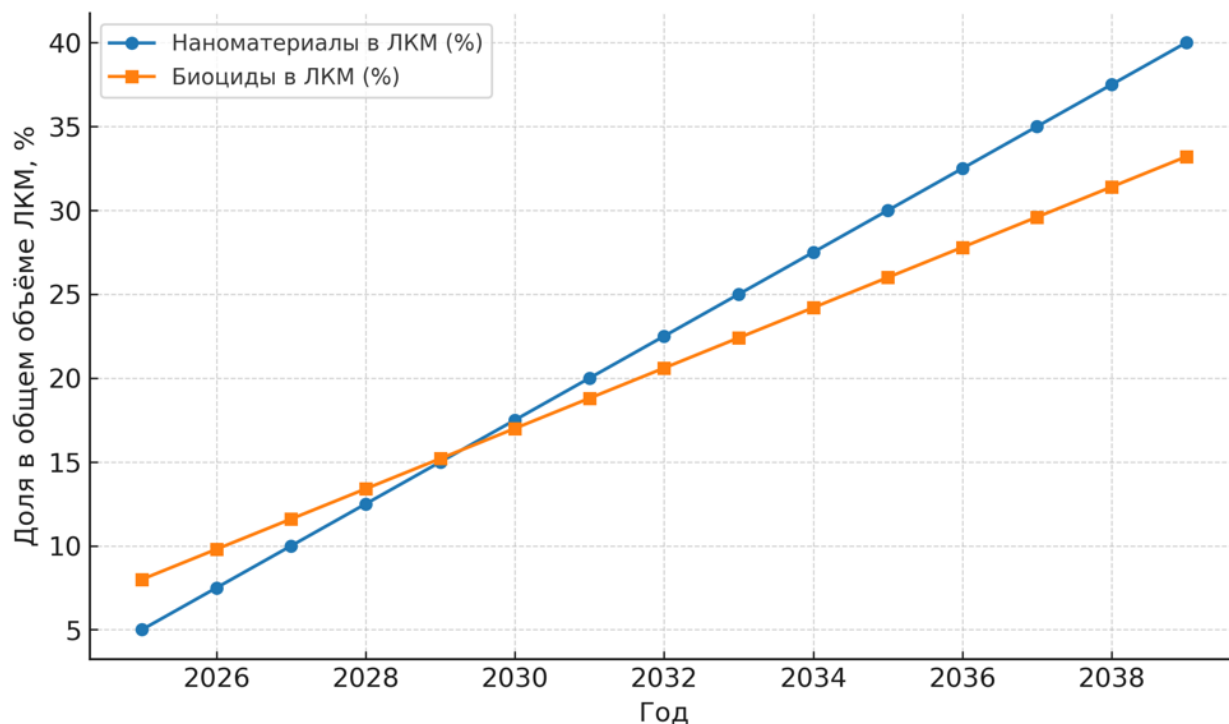


Рис. 2. Прогноз развития технологий ЛКМ для судостроения (2026-2038)

В ближайшие 10–15 лет развитие судовых лакокрасочных покрытий будет определяться сочетанием инновационных материалов, ужесточающихся экологических требований и переходом к технологиям «умных» покрытий.

Ключевыми направлениями развития станут:

- **Интеграция многофункциональных наноконпонентов** (ZnO , CeO_2) в традиционные полимерные матрицы для повышения срока службы покрытия до 15–20 лет.
- **Разработка био- и экосовместимых биоцидов** на основе меди, цинка и редкоземельных элементов, обеспечивающих пролонгированный эффект против обрастания.
- **Применение интеллектуальных покрытий**, способных изменять свои свойства в зависимости от температуры, солёности воды и интенсивности обрастания.
- **Внедрение технологий аддитивного производства** (3D-печать элементов покрытия) и роботизированного нанесения ЛКМ на корпус судна.
- **Снижение содержания летучих органических соединений (ЛОС)** и переход к водоразбавляемым или высокотвёрдым системам, что соответствует мировым экологическим трендам.

Согласно модельному прогнозу (рис. 3), наибольший рост ожидается в сегменте ЛКМ с наномодификаторами на основе оксида цинка и оксида церия, обладающих одновременно высокими антикоррозионными и противообрастающими свойствами. Эти материалы будут востребованы в связи с их устойчивостью к агрессивным морским условиям и совместимостью с экологическими стандартами IMO и MARPOL.

Прогнозируется, что в течение ближайших 5–7 лет доля инновационных ЛКМ с наноконпонентами на мировом рынке достигнет 35–40%, а к 2040 году – превысит 65%. При этом произойдёт смещение акцента от традиционных медьсодержащих биоцидов к многофункциональным нанодобавкам, обеспечивающим пролонгированную защиту. Также

ождается более активное использование гибридных связующих, сочетающих свойства органических и неорганических полимеров, что позволит увеличить срок службы покрытий до 12–15 лет без ремонта.

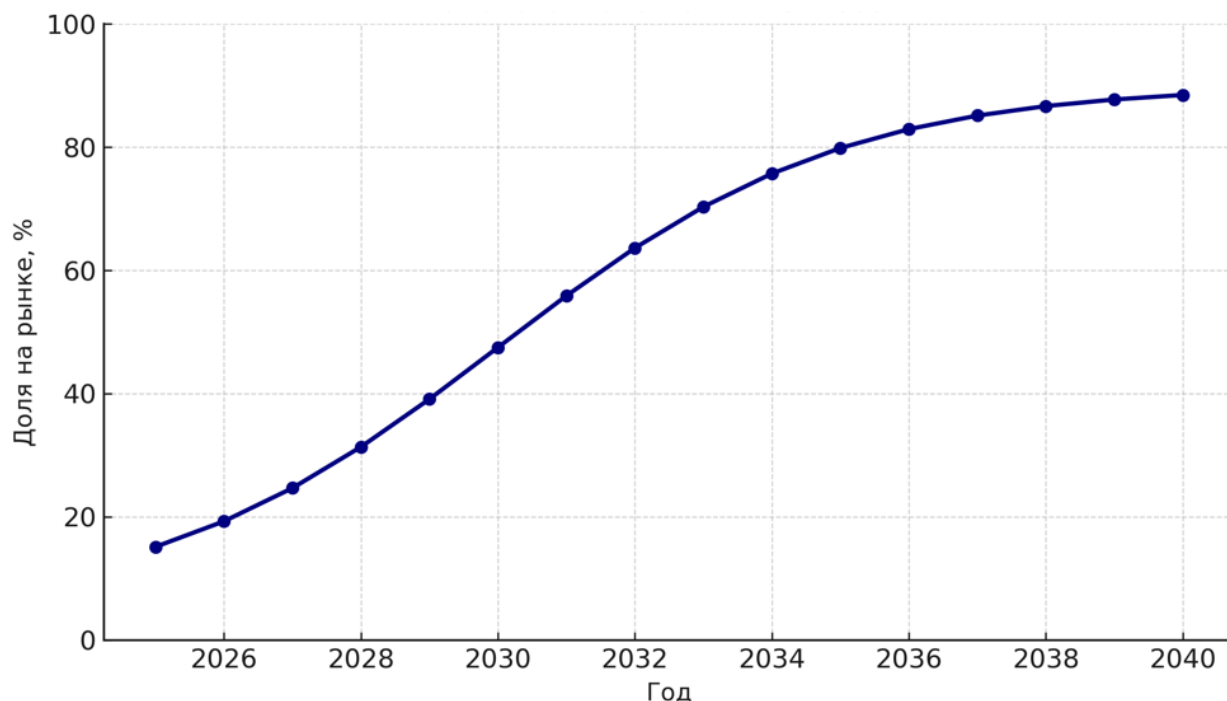


Рис. 3. Модельный прогноз темпов внедрения инновационных судовых ЛКМ с нанокompонентами ZnO и CeO_2

Выводы.

1. Введение нанокompонентов оксида цинка (ZnO) и оксида церия (CeO_2) в состав судовых лакокрасочных покрытий ПФ-115 обеспечивает комплексное улучшение их эксплуатационных характеристик в агрессивных морских условиях, включая повышение коррозионной стойкости, устойчивости к биообрастанию и механической прочности.
2. Результаты анализа показывают, что оксид цинка проявляет выраженные фотокаталитические и антибактериальные свойства, препятствующие развитию биопленок, а оксид церия играет роль мощного ингибитора коррозии, формируя защитную оксидную пленку на металлической поверхности.
3. Моделирование прогнозов на 10–15 лет указывает на значительное увеличение доли применения наномодифицированных ЛКМ в судостроении и судоремонте, что связано с их более длительным сроком службы и снижением затрат на обслуживание.
4. Комплексное применение ZnO и CeO_2 позволяет добиться синергетического эффекта: увеличение срока междокового периода эксплуатации судов, сокращение частоты перекрасок, снижение суммарных эксплуатационных расходов.
5. Перспективным направлением дальнейших исследований является оптимизация содержания нанокompонентов, разработка новых композиционных матриц с наноструктурированными модификаторами, а также испытания покрытий в реальных морских условиях с учетом климатических и биологических факторов.
6. Внедрение наномодифицированных ЛКМ с ZnO и CeO_2 может стать ключевым технологическим трендом в судостроительной отрасли, обеспечивая переход к более экологичным и ресурсосберегающим решениям.

Литература

1. Хавкин, А.Я. Антикоррозионные лакокрасочные материалы: теория и практика. – М.: Химия, 2018. – 356 с.
2. Шульга, В.Н., Жуков, А.В. Наноматериалы в лакокрасочной промышленности. – СПб.: Политехника, 2019. – 284 с.
3. Nguyen, T., et al. "Nanostructured Coatings for Marine Anti-Corrosion Applications." *Progress in Organic Coatings*, vol. 142, 2020, 105–118.
4. Yuan, J., et al. "Synergistic Effect of ZnO and CeO₂ Nanoparticles on the Anti-corrosion Performance of Epoxy Coatings." *Corrosion Science*, vol. 180, 2021, 109–126.
5. ISO 20340:2020 – Paints and varnishes – Performance requirements for protective paint systems for offshore and related structures.
6. Callow, M.E., Callow, J.A. "Trends in the Development of Environmentally Friendly Fouling-Resistant Marine Coatings." *Nature Communications*, 2020, 11:146.
7. Ларионов, А.В., Смирнов, К.П. "Противообрастающие покрытия для морского флота: перспективы развития." *Судостроение*, №4, 2022, с. 21–28.
8. Li, Y., et al. "Cerium-based Conversion Coatings for Corrosion Protection: A Review." *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 857, 2021, 157–188.

*Məqalə qəbul olunub: 29.10.25
Təvsiyə edib: prof. İsmayilov N.Ş.*

UOT 629.5.083

GƏMİ AVADANLIQLARININ TƏMİRİNDƏ EHTİYAT HİSSƏLƏRƏ TƏLƏBATIN PROQNOZLAŞDIRILMASI

¹Həsənov Y.N., ^{1,2}Çələbi İ.Q., ¹Rəhimov B.R.

¹ "Azərbaycan Dövlət Dəniz Akademiyası" PHŞ

AZ1000, Bakı şəh., Z.Əliyeva küç, 18

^{1,2} "Azərbaycan Texniki Universiteti" PHŞ

AZ1073, Bakı şəh., H. Cavid pr., 25

E-mail: yusif_nadiroglu@mail.ru i_chalabi@aztu.edu.az

Xülasə. Məqalədə gəmi avadanlıqlarının müxtəlif komponentlərinin yenilənməsi məqsədi ilə ehtiyat hissələrinin müəyyən istismar dövrü ərzində və ya təmir tsikli üzrə tələb olunan miqdarının proqnozlaşdırılması məsələsinə baxılmışdır. Bu məqsədlə həmin komponentlərin imtinalarının paylanma qanunlarını düzgün seçmək və imtinalar intensivliyinin zamandan asılılığını müəyyənləşdirmək mühüm əhəmiyyət kəsb edir. Yalnız lazım olan sayda ehtiyat hissələrinin saxlanması ambar xərclərinin minimum olmasına imkan verir. Ambarlarda həmişə ehtiyat hissəsinin olması isə imtinalar zamanı boşdayanmaların azalmasına, istehsalat prosesinin intensivləşməsinə və əmək məhsuldarlığının yüksəlməsinə səbəb olur. Elektrik mühərrikləri misalı üzərində irəli sürülən metodika tətbiq olunmuş və 10 il istismar dövründə illər üzrə tələb olunan ehtiyatın miqdarı təyin olunmuşdur.

Abstract. The article considers the issue of forecasting the required number of spare parts for a certain period of operation or for a repair cycle in order to update various components of the ship's equipment. To this end, it is important to choose the right laws for the distribution of failures of these components and determine the dependence of the failure rate on time. Storing only the