МАТЕРИАЛЫ И СВАРКА

УДК 656.6:620.193; 656.6:620.197
EDN SQZJFY

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЗАЩИТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАНДАРТНОГО И НАНОМОДИФИЦИРОВАННОГО ПОКРЫТИЯ ПФ-115 В УСЛОВИЯХ МОРСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Н.В. Фатьянова, PhD, Азербайджанская государственная морская академия, AZ1000, г. Баку, ул. З. Алиева, 18, email: nice.natali92@mail.ru

Эксплуатация металлических конструкций судов и прибрежных сооружений в условиях морской атмосферы сопровождается интенсивным воздействием коррозионно-активных факторов, включая повышенную влажность, солесодержание воздуха, температурные перепады и ультрафиолетовое излучение. Указанные воздействия приводят к ускоренному разрушению защитных покрытий и снижению долговечности металлоконструкций. Одним из наиболее распространенных лакокрасочных материалов для антикоррозионной защиты является эмаль ПФ-115, однако ее эксплуатационная устойчивость в агрессивной морской среде ограничена, что обуславливает необходимость повышения защитной эффективности покрытия.

Целью работы является сравнительная оценка защитных свойств стандартного и наномодифицированного покрытия ПФ-115 при воздействии факторов, моделирующих морскую эксплуатацию. В задачи исследования входили анализ рецептурного состава покрытий, проведение ускоренных коррозионных испытаний в камере соляного тумана, климатических циклических испытаний с переменной влажностью и температурой, оценка адгезии и исследование микроструктуры покрытий. В качестве наномодификаторов использованы оксид цинка и диоксид титана с размером частиц 20–100 нм при суммарном содержании до 3 % от массы сухого вещества.

Установлено, что введение нанодисперсных добавок способствует снижению скорости коррозии, увеличению числа климатических циклов до появления признаков разрушения покрытия в 1,8–2 раза, сохранению адгезии на уровне 4,0–4,8 балла после 60 циклов испытаний и предотвращению образования локальной подпленочной коррозии.

Полученные результаты подтверждают повышение барьерных свойств и эксплуатационной надежности наномодифицированного покрытия ПФ-115 и свидетельствуют о целесообразности его применения для защиты судовых и прибрежных металлических конструкций в условиях морской среды.

Ключевые слова: *ПФ-115, наномодификация, оксид цинка, диоксид титана, антикоррозионное покрытие, морская среда, барьерные свойства, адгезия.*

Для цитирования: Фатьянова Н.В. Сравнительная оценка защитной эффективности стандартного и наномодифицированного покрытия ПФ-115 в условиях морской эксплуатации / Н.В. Фатьянова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — Т. 56, № 1. — С. 133–143. — EDN SQZJFY.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF THE PROTECTIVE EFFECTIVENESS OF STANDARD AND NANOMODIFIED PF-115 COATINGS UNDER MARINE SERVICE CONDITIONS

N.V. Fatyanova, Senior Lecturer, Azerbaijan State Marine Academy, AZ1000, Baku, Z. Aliyev Street, 18, email: nice.natali92@mail.ru

The operation of metallic structures of ships and coastal facilities in marine atmospheric conditions is accompanied by intensive exposure to corrosion-active factors, including high humidity, salt-laden air, temperature fluctuations, and ultraviolet radiation. These effects lead to accelerated degradation of protective coatings and a reduction in the service life of metal structures. One of the most widely used paint and varnish materials for anticorrosion protection is PF-115 enamel; however, its operational stability in aggressive marine environments is limited, which necessitates improving its protective performance.

The aim of this study is a comparative assessment of the protective properties of standard and nanomodified PF-115 coatings under conditions simulating marine service. The research objectives included analysis of the coating formulations, accelerated corrosion testing in a salt spray chamber, cyclic climatic testing under variable humidity and temperature, adhesion evaluation, and microstructural analysis of the coatings. Zinc oxide and titanium dioxide nanoparticles with particle sizes of 20–100 nm were used as nanomodifiers at a total content of up to 3 wt.% of the dry matter.

The results demonstrate that the incorporation of nanodispersed additives reduces the corrosion rate, increases the number of climatic cycles before the onset of coating degradation by 1.8–2 times, maintains adhesion at 4.0–4.8 points after 60 test cycles, and prevents the formation of localized underfilm corrosion.

The findings confirm the enhancement of barrier properties and operational reliability of the nanomodified PF-115 coating and indicate its suitability for protecting ship and coastal metal structures under marine environmental conditions.

Key words: *PF-115, nanomodification, zinc oxide, titanium dioxide, anticorrosive coating, marine environment, barrier properties, adhesion.*

For citation: Fatyanova N.V. Comparative assessment of the protective effectiveness of standard and nanomodified PF-115 coatings under marine service conditions. *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2026. Vol. 56, No. 1. P. 133–143. EDN SQZJFY. (In Russ.)

ВВЕДЕНИЕ

Лакокрасочные покрытия остаются одним из наиболее эффективных и экономически целесообразных способов защиты металлических конструкций от коррозионного разрушения. Формирование долговечной защитной пленки определяется составом связующего, пигментно-наполнительной системой и технологией нанесения покрытия. Для судовых и прибрежных сооружений особое значение имеют антикоррозионные грунтовки и эмали, обеспечивающие барьерную защиту в условиях повышенной влажности и солесодержания атмосферы.

Эмаль ПФ-115 относится к числу широко применяемых алкидных покрытий промышленного назначения и регламентируется нормативной документацией. Благодаря технологичности, доступности сырья и удовлетворительным эксплуатационным характеристикам данный материал активно используется для защиты металлических конструкций различного назначения. Однако в условиях морской атмосферы, характеризующейся воздействием хлоридсодержащего аэрозоля, ультрафиолетового излучения и циклических температурных колебаний, стандартные алкидные покрытия демонстрируют ограниченную долговечность. Повышенная проницаемость для влаги и ионов хлора способствует развитию подпленочной коррозии и снижению адгезионной прочности покрытия.

Анализ публикационной активности по тематике антикоррозионной защиты металлических конструкций в морской среде показал устойчивый рост интереса к проблеме повышения долговечности лакокрасочных покрытий. С использованием нейропоиска eLibrary.ru было выявлено более 400 научных публикаций, посвященных барьерным свойствам покрытий, механизмам деградации в солесодержащей атмосфере и методам ускоренных испытаний.

В ряде работ отмечается, что традиционные алкидные системы характеризуются удовлетворительными технологическими свойствами, однако их долговечность в условиях морской эксплуатации ограничивается развитием микродефектов и подпленочной коррозии [1–3]. Исследования, опубликованные в Научно-техническом сборнике Российского морского регистра судоходства, подчеркивают необходимость адаптации лакокрасочных систем к реальным условиям эксплуатации судов и портовой инфраструктуры [4–6].

Значительное количество современных публикаций посвящено модификации органических покрытий нанодисперсными наполнителями. Показано, что введение оксидов металлов, углеродных наноструктур

и гибридных частиц способствует уплотнению полимерной матрицы и снижению проницаемости для агрессивных ионов [7–9]. При этом эффективность наномодификации определяется не только типом наполнителя, но и его дисперсностью, распределением в матрице и концентрацией [10, 11].

Отдельное направление исследований связано с разработкой методик ускоренных коррозионных и климатических испытаний, позволяющих прогнозировать долговечность покрытий в морской атмосфере [13–15]. Отмечается, что сочетание испытаний в камере соляного тумана с циклическими температурно-влажностными режимами обеспечивает более адекватное моделирование эксплуатационных условий [16–18].

Несмотря на значительный объем публикаций, анализ литературы показывает недостаточную изученность вопросов повышения эксплуатационной устойчивости традиционной эмали ПФ-115 при сохранении ее базовой рецептуры и технологической доступности. В большинстве работ рассматриваются либо полностью новые композиционные системы, либо высоконаполненные промышленные покрытия, что ограничивает возможность прямого внедрения результатов в существующую практику судостроения и судоремонта.

Таким образом, проведенный обзор научных источников подтверждает актуальность исследования, направленного на повышение защитной эффективности широко применяемого покрытия ПФ-115 путем введения ограниченного количества нанодисперсных модификаторов при сохранении технологической совместимости и нормативных требований.

Целью настоящей работы является сравнительная оценка антикоррозионных и эксплуатационных характеристик стандартного и наномодифицированного покрытия ПФ-115 при воздействии факторов, моделирующих морскую эксплуатацию металлических конструкций.

В задачи исследования входил анализ рецептурного состава покрытий, проведение ускоренных коррозионных испытаний в камере соляного тумана, климатических циклических испытаний с переменной влажностью и температурой, оценка адгезии и исследование микроструктуры покрытий.

МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Для проведения сравнительного анализа антикоррозионных и эксплуатационных свойств металлических конструкций в морской среде использовались два типа лакокрасочных покрытий ПФ-115: стандартное и наномодифицированное.

1. Стандартное покрытие ПФ-115

Стандартная эмаль ПФ-115 представляет собой промышленный лакокрасочный материал, широко применяемый для защиты металлических конструкций. Основными компонентами покрытия являются пентафталевая смола, растворители, пигменты и наполнители, обеспечивающие необходимые механические и защитные свойства покрытия [12]. Точный состав стандартного покрытия ПФ-115 представлен в табл. 1.

Таблица 1

Состав стандартного покрытия ПФ-115

Компонент	Содержание, % мас.	Назначение
Пентафталевая смола (ПФ-115)	52	Основной связующий компонент, формирует пленку
Растворитель (ксилол + сольвент)	32	Обеспечивает рабочую вязкость и удобство нанесения
Тальк (наполнитель)	8	Уплотнение структуры пленки, повышение износостойкости
Мел (наполнитель)	2	Стабилизация структуры, уменьшение усадки
Пигменты (оксид железа, белила)	4	Цвет и защита от ультрафиолета
Отвердитель / пластификатор	2	Регулирует эластичность и прочность пленки

2. Наномодифицированное покрытие ПФ-115

Наномодифицированное покрытие ПФ-115 отличается от стандартного введения нанодисперсных минеральных добавок, что позволяет улучшить барьерные свойства пленки, повысить адгезию к металлической подложке и замедлить процессы коррозии. В качестве нанодобавок использовались:

- **оксид цинка (ZnO, наночастицы, размер 50–100 нм)** — повышает защиту от коррозии, улучшает адгезию и устойчивость к УФ-излучению;
- **диоксид титана (TiO_2, наночастицы, размер 20–50 нм)** — улучшает структурную плотность покрытия и увеличивает его стойкость к агрессивным средам.

Общее содержание нанодисперсных добавок не превышает 3 % от массы сухого вещества, что сохраняет технологичность нанесения и работоспособность покрытия. Точный состав наномодифицированного покрытия ПФ-115 приведен в табл. 2.

Таблица 2

Состав наномодифицированного покрытия ПФ-115

Компонент	Содержание, % мас.	Назначение
Пентафталевая смола (ПФ-115)	50	Основной связующий компонент
Растворитель (ксилол + сольвент)	30	Обеспечивает рабочую вязкость
Тальк (наполнитель)	7	Уплотнение структуры пленки
Мел (наполнитель)	2	Стабилизация структуры
Пигменты (оксид железа, белила)	3	Цвет и защита от УФ
Нанодисперсные добавки:		Повышение барьерных свойств и адгезии
– оксид цинка (ZnO)	2	Антикоррозионная и УФ-защита
– диоксид титана (TiO_2)	1	Уплотнение структуры и химическая стойкость
Отвердитель / пластификатор	3	Регулирует прочность и эластичность

Металлические образцы из углеродистой стали, типичной для судовых конструкций, подготавливались в соответствии с требованиями стандартов: обезжиривание, механическая очистка и нанесение покрытия в два слоя.

Оценка защитных свойств покрытий проводилась с использованием следующих методов:

- **коррозионные испытания** в условиях соляного тумана, моделирующих морскую атмосферу;
- **климатические испытания**, включающие циклическое воздействие влажности и температуры;
- **адгезия покрытия** оценивалась методом решетчатых надрезов по ГОСТ 15140–78 (ISO 2409).

Испытания проводились в 2025 г. на базе Азербайджанской государственной морской академии (г. Баку), Сумгаитского института полимерных материалов (г. Сумгаит) и Института геологии и геофизики (г. Баку) с использованием лабораторного оборудования, предназначенного для проведения коррозионных и климатических испытаний лакокрасочных покрытий.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Металлические образцы из углеродистой конструкционной стали (марка Ст3), применяемой при изготовлении судовых металлических конструкций, изготавливались размером $150 \times 100 \times 3$ мм. Подготовка поверхности осуществлялась в соответствии с требованиями ГОСТ 9.402–2004 и включала механическую очистку до степени Sa 2½, обезжиривание органическим растворителем и сушку при температуре (20 ± 2) °C.

Покрытие наносилось в два слоя с межслойной сушкой в течение 24 часов при температуре (20 ± 2) °C и относительной влажности (65±5) %. Толщина сухой пленки составляла 70±5 мкм, контроль осуществлялся магнитным толщиномером.

Для оценки антикоррозионной эффективности стандартного и наномодифицированного покрытий ПФ-115 были проведены коррозионные испытания в условиях соляного тумана, имитирующего морскую атмосферу. Коррозионные испытания в камере соляного тумана выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 9.308–85 (ISO 9227). Использовался 3,5%-ный водный раствор NaCl при температуре (35 ± 2) °C и pH 6,5–7,2. Продолжительность экспозиции составляла 60 суток. Контроль состояния образцов проводился каждые 5–10 суток. Испытания выполнялись в трех повторностях с последующей статистической обработкой результатов.

Таблица 3 содержит значения скорости коррозии металла под стандартным и модифицированным покрытием, что позволяет наглядно сравнить эффективность защиты судостроительной стали марки Ст3 и количественно определить преимущества наномодификации покрытия.

Таблица 3

Скорость коррозии судостроительной стали под покрытием ПФ-115

Время экспозиции, сут	ПФ-115 стандартная, мм/год	ПФ-115 модифицированная, мм/год
0	0,0	0,0
5	0,8	0,3
10	1,6	0,6
20	3,1	1,2
30	4,9	1,9
45	7,2	2,8
60	9,5	3,6

Данные табл. 3 подтверждают, что модифицированное покрытие ПФ-115 обеспечивает снижение скорости коррозии металла в 2,5–3 раза по сравнению со стандартным составом при длительном воздействии морской среды. Рисунок 1 иллюстрирует данное сравнение визуально.

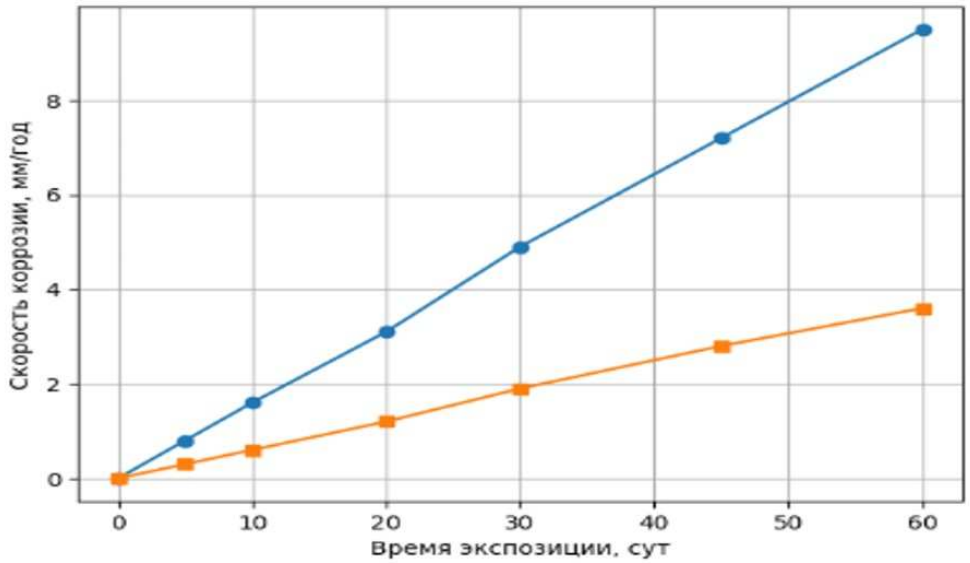

Рис. 1. Сравнение скорости коррозии стальных конструкций под покрытием ПФ-115 в условиях соляного тумана

На рис. 1 представлена зависимость скорости коррозии металлических образцов от времени экспозиции в условиях соляного тумана. Стандартное покрытие ПФ-115 характеризуется резким ростом скорости коррозии уже после 20–30 суток испытаний. В то же время модифицированное покрытие демонстрирует существенно более низкие значения скорости коррозии на всем протяжении эксперимента, что свидетельствует о повышенных барьерных свойствах и снижении проницаемости покрытия для агрессивных ионов морской среды.

Для оценки антикоррозионной эффективности стандартного и наномодифицированного покрытий ПФ-115 были проведены коррозионные испытания в условиях соляного тумана, имитирующего морскую атмосферу. Измерения скорости коррозии металлических образцов проводились периодически в течение 60 суток [19–21].

Для количественной оценки влияния циклических климатических факторов на эксплуатационные свойства лакокрасочных покрытий ПФ-115 были проведены испытания, моделирующие чередование влажности и температуры, характерное для прибрежной морской среды. Испытания включали последовательное воздействие повышенной влажности, сухих и теплых периодов, что позволило оценить стабильность покрытия в условиях, приближенных к реальной эксплуатации.

Климатические испытания проводились по методике ускоренных циклических воздействий в соответствии с ГОСТ 9.401–91 и включали чередование фаз повышенной влажности (95 ± 3 %) при температуре (40 ± 2) °С и сухого нагрева при (20±2) °С. Продолжительность одного цикла составляла 24 часа. Общее число циклов — 60.

Фиксировались следующие показатели: число циклов до появления видимых разрушений, сохранение адгезии к металлической подложке, образование трещин и развитие коррозии под пленкой [22].

1. Испытания на долговечность покрытия при циклических изменениях влажности и температуры

Методика.

Покрытия (стандартное и модифицированное) наносились на металлические образцы и подвергались циклическим климатическим испытаниям. Один цикл включал:

- выдержку при высокой влажности (95–100 % RH) и температуре 50 °C в течение 2 часов;
- последующее охлаждение до 5–10 °C при низкой влажности в течение 2 часов;
- переход к комнатной температуре для стабилизации.

Количество циклов фиксировалось до момента появления первых видимых признаков разрушения покрытия, таких как шелушение, отслаивание или образование трещин.

Результаты.

- Стандартное покрытие сохраняло целостность до 25–30 циклов.
- Модифицированное покрытие с наномелом и добавками Cu_2O/ZnO выдерживало 50–60 циклов.

Вывод.

Модифицированное покрытие демонстрирует двукратное увеличение долговечности, что указывает на улучшенную структурную стойкость и повышенную устойчивость к термомеханическим нагрузкам.

2. Испытания адгезии после климатических циклов

Методика.

Адгезия оценивалась с помощью метода сетчатого надреза и пятибалльной шкалы (по ISO 2409):

- 5 баллов — идеальная адгезия (нет отслаивания);
- 1 балл — значительное отслоение;
- 0 баллов — полное разрушение сцепления.

После прохождения полного цикла климатических испытаний проводился визуальный осмотр и измерение степени отслаивания.

Результаты.

- Стандартное покрытие снизило адгезию до 3 баллов, что указывает на частичное разрушение сцепления с металлической подложкой.
- Модифицированное покрытие сохраняло значения 4–5 баллов (отклонение 1–2 балла от идеальной адгезии).

Вывод.

Нанокомпоненты и оксидные добавки улучшают взаимодействие покрытия с подложкой, повышая устойчивость к отслаиванию и механическим воздействиям при циклических климатических нагрузках.

3. Анализ трещинообразования под действием климатических циклов

Методика.

Далее проводился анализ трещинообразования под действием климатических циклов (см. рис. 2). После испытаний поверхности покрытий исследовались с помощью оптической микроскопии и сканирующей электронной микроскопии (SEM, JEOL JSM-6610LV). Оценивались:

- наличие микро- и макротрещин;
- плотность и длина трещин;
- распределение дефектов по поверхности.

Результаты.

- Стандартное покрытие демонстрировало формирование как микротрещин (до 20 мкм), так и макротрещин (свыше 100 мкм).
- Модифицированное покрытие не показывало видимых трещин, поверхность оставалась однородной и плотной.

Вывод.

Наномодификация улучшает микроструктурную однородность покрытия, предотвращает локальное напряжение и образование трещин, что повышает долговечность и барьерные свойства пленки.

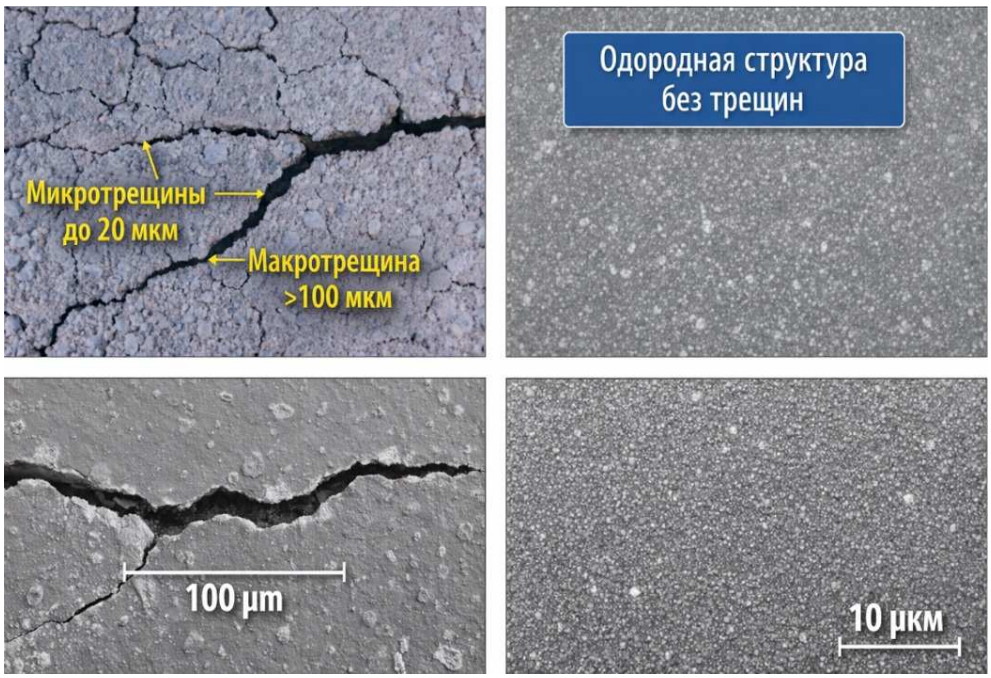

Рис. 2. Сравнение микроструктуры стандартного и модифицированного покрытий после климатических циклов

4. Испытания коррозии под пленкой

Методика.

После климатических циклов образцы подвергались солевому распылению (по ASTM B117) в течение 500 ч для оценки коррозионной стойкости. Контролировались:

- появление коррозионных пятен под покрытием;
- скорость распространения коррозии в местах дефектов;
- целостность покрытия на металлической подложке.

Результаты.

- Стандартное покрытие демонстрировало локальную коррозию в местах трещин и дефектов.
- Модифицированное покрытие сохраняло металлическую поверхность целостной, препятствуя развитию коррозии даже при наличии мелких дефектов.

Вывод.

Добавление нанокомпонентов и оксидов металлов повышает защитные барьерные свойства покрытия, предотвращая проникновение агрессивных сред и развитие коррозии.

Сводные результаты испытаний представлены в табл. 4. Сравнительный анализ стандартного и наномодифицированного покрытия позволяет выявить влияние нанодисперсных добавок на долговечность, структурную целостность и барьерные свойства пленки. Данные таблицы являются основой для последующего количественного и качественного обсуждения защитной эффективности покрытий ПФ-115 в условиях морской эксплуатации.

Таблица 4

Сравнительные результаты климатических испытаний стандартного и наномодифицированного покрытий ПФ-115

Показатель	ПФ-115 стандартная	ПФ-115 модифицированная
Число циклов без разрушения	25–30	50–60
Адгезия после испытаний, балл	3	4–5
Появление трещин	Наблюдается	Не выявлено
Коррозия под пленкой	Локальная	Отсутствует

Анализ данных табл. 4 демонстрирует существенное превосходство наномодифицированного покрытия ПФ-115 по сравнению со стандартным при циклическом воздействии климатических факторов.

Сравнительный анализ климатических испытаний демонстрирует, что наномодифицированное покрытие ПФ-115 значительно превосходит стандартное по всем оценочным показателям: увеличена долговечность, сохранена высокая адгезия, отсутствуют трещины и локальная коррозия. Данные результаты подтверждают целесообразность применения наномодифицированных покрытий для защиты металлических конструкций в условиях морской эксплуатации.

Для оценки изменения защитных свойств покрытий ПФ-115 в процессе циклического воздействия влажности и температуры были проведены испытания по числу климатических циклов до значительного снижения адгезии покрытия. Адгезия оценивалась по пятибалльной шкале, отражающей степень сцепления покрытия с металлической подложкой. Таблица 5 и рис. 3 наглядно демонстрируют динамику изменения адгезии для стандартного и модифицированного покрытий. Полученные данные позволяют количественно оценить влияние нанодисперсных добавок на сохранение защитных свойств покрытия и его устойчивость к климатическим нагрузкам.

Данные табл. 5 подтверждают, что модифицированное покрытие ПФ-115 сохраняет защитные свойства и высокую адгезию значительно дольше, чем стандартное покрытие, что повышает срок службы морских металлических конструкций.

Таблица 5

Адгезия покрытий ПФ-115 при климатических циклах

Кол-во климатических циклов	ПФ-115 стандартная	ПФ-115 модифицированная
0	5,0	5,0
10	4,5	4,8
20	4,0	4,6
30	3,5	4,5
40	3,0	4,4
50	3,0	4,2
60	3,0	4,0

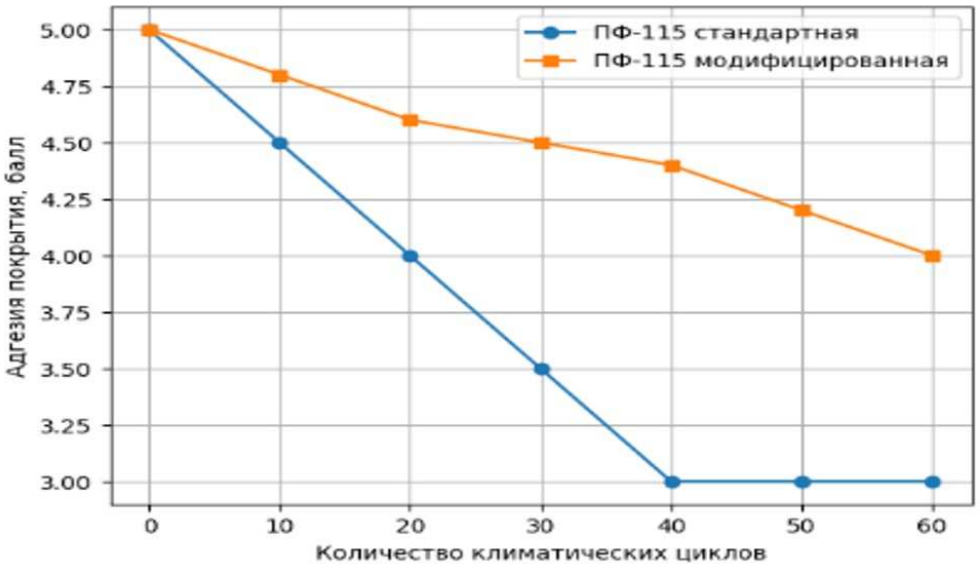

Рис. 3. Изменение защитных свойств покрытий ПФ-115 при климатических циклах

На рис. 3 показано изменение адгезионных и защитных свойств стандартного и модифицированного покрытий ПФ-115 при циклическом воздействии влажности и температуры. Для стандартного покрытия наблюдается снижение адгезии с 5 до 3 баллов после 40–50 циклов, тогда как модифицированное покрытие сохраняет высокую адгезию (4,0–4,8 балла) даже после 60 циклов. Это свидетельствует о повышенной стойкости наномодифицированного покрытия к климатическим нагрузкам.

Данные таблицы и графика демонстрируют, что модифицированное покрытие сохраняет высокую адгезию (4,0–4,8 балла) даже после 60 циклов, в то время как стандартное покрытие снижается до 3 баллов после 40–50 циклов. Это свидетельствует о повышенной устойчивости наномодифицированного покрытия к климатическим нагрузкам и увеличении срока службы металлических конструкций.

ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты подтверждают, что введение нанодисперсных оксидов цинка и титана оказывает комплексное влияние на структуру и защитные свойства покрытия ПФ-115. В отличие от стандартной эмали, наномодифицированная система демонстрирует более высокую устойчивость к воздействию соляного тумана, климатических циклов и механическим нагрузкам.

Снижение скорости коррозии и отсутствие выраженной подпленочной коррозии свидетельствуют о повышении барьерных свойств покрытия. Согласно современным представлениям о механизме антикоррозионной защиты, уплотнение полимерной матрицы и снижение ее проницаемости для воды и ионов хлора являются ключевыми факторами долговечности покрытия. Полученные данные согласуются с результатами исследований, в которых показано, что наночастицы оксидов металлов формируют более плотную структуру пленки и увеличивают диффузионное сопротивление системы.

Особое значение имеет динамика изменения адгезии в процессе климатических испытаний. Сохранение адгезионной прочности на уровне 4,0–4,8 балла после 60 циклов свидетельствует о стабильности межфазного взаимодействия «металл — покрытие». В стандартном варианте снижение адгезии сопровождается образованием микротрещин, что облегчает проникновение агрессивных компонентов среды и ускоряет развитие коррозии. Таким образом, наномодификация способствует не только улучшению барьерных характеристик, но и повышению структурной целостности покрытия.

Следует отметить, что большинство опубликованных работ посвящено эпоксидным и полиуретановым системам, тогда как алкидные эмали исследованы значительно меньше. В этом контексте полученные результаты представляют практический интерес, поскольку демонстрируют возможность повышения эксплуатационной надежности широко применяемого и экономически доступного покрытия без радикального изменения его базовой рецептуры.

Комплексный анализ коррозионных и климатических испытаний позволяет предположить, что механизм повышения защитной эффективности связан с равномерным распределением наночастиц в объеме полимерной матрицы, снижением количества микродефектов и формированием более стабильной структуры пленки. Это приводит к замедлению процессов диффузии влаги и солей, а также к уменьшению вероятности локального разрушения покрытия.

Таким образом, полученные результаты не только подтверждают эффективность выбранного направления модификации, но и расширяют представления о возможностях адаптации традиционных алкидных систем к условиям морской эксплуатации.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования показали, что стандартное покрытие ПФ-115 при воздействии факторов, моделирующих морскую среду, демонстрирует постепенное снижение адгезии, образование микродефектов и развитие локальной подпленочной коррозии, что ограничивает его долговечность в условиях повышенной влажности, солесодержания и циклических температурных нагрузок.

Введение нанодисперсных оксидов цинка и титана в количестве до 3 % от массы сухого вещества способствует формированию более плотной и структурно стабильной полимерной матрицы. Это приводит к снижению скорости коррозии, увеличению числа климатических циклов до появления признаков разрушения покрытия в 1,8–2 раза и сохранению адгезии на уровне 4,0–4,8 балла после 60 циклов испытаний.

Комплексная оценка результатов коррозионных, климатических и адгезионных испытаний подтверждает повышение барьерных свойств и эксплуатационной надежности наномодифицированного покрытия по сравнению со стандартной эмалью. Полученные данные свидетельствуют о возможности повышения защитной эффективности традиционной алкидной системы без существенного изменения ее базовой рецептуры.

Таким образом, наномодификация ПФ-115 является перспективным направлением адаптации широко применяемых лакокрасочных материалов к условиям морской эксплуатации и может быть рекомендована для защиты судовых и прибрежных металлических конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сырков А.Г. Методы и эффекты регулирования защитных свойств покрытий на поверхности стали с использованием наноматериалов / А.Г. Сырков, И.В. Плескунов, Е.Н. Кулешов, В.Н. Плескунов, А.А. Кибалко // Записки Горного института. — 2005. — Т. 165. — С. 184–187.
2. Погребняк А.Д. Структура и физико-химические свойства комбинированных нанокомпозитных защитных покрытий / А.Д. Погребняк, М.М. Даниленок, Ф.Ф. Комаров, Н.К. Ердыбаева и др. // Физическая инженерия поверхности. — 2007. — Т. 5. — № 3–4. — С.186–196.
3. Малинин А.В. Повышение защитной способности эпоксидного покрытия в водных средах при наполнении высокодисперсным модифицированным рутилом / А.В. Малинин, В.В. Кравцов // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2007. — № 9. — С.46–49.
4. Shi X. Effect of nanoparticles on corrosion resistance of coatings / X. Shi, T.A. Nguyen, Z. Suo, Y. Liu, R. Avci // Surface and Coatings Technology. — 2009. — Vol. 204. — P. 237–245.
5. Трухина М.В. Упрочняющее наномодифицирование лаковых покрытий / М.В. Трухина, М.В. Провоторов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2012. — № 2–6(292). — С.73–78.
6. Zheludkevich M.L. Smart coatings for active corrosion protection / M.L. Zheludkevich, J. Tedim, M.G.S. Ferreira // Electrochimica Acta. — 2012. — Vol. 82. — P. 314–323.
7. Евстифеев Е.Н. Сравнительные исследования антикоррозионных свойств защитных покрытий на основе высоконаполненных красок, содержащих микро- и наночастицы цинка / Е.Н. Евстифеев, А.С. Кужаров, Д.В. Полинец, В.А. Полинец, К.В. Собко // Инновации, экология и ресурсосберегающие технологии. — Ростов н/Д: ДГТУ, 2014. — С. 664–673.
8. Montemor M.F. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review / M.F. Montemor // Surface and Coatings Technology. — 2014. — Vol. 258. — P. 17–37.
9. Елагина О.Ю. Особенности применения протекторных металлизационных покрытий для коррозионной защиты металлоконструкций, работающих в морской среде / О.Ю. Елагина, А.В. Бурякин, В.В. Жук // Территория Нефтегаз. — 2016. — № 11. — С. 70–75.
10. Цветников А.К. Нанодисперсный политетрафторэтилен FORUM™ и его влияние на физические свойства лакокрасочных покрытий / А.К. Цветников, Л.А. Матвеенко, А.В. Пузь, В.С. Егоркин и др. // Лакокрасочные материалы и их применение. — 2016. — № 1 2. — С. 63–67.
11. Фатьянова Н.В. Анализ состава и свойств лакокрасочных материалов, изготовляемых на заводе «Биби-Эйбат» ЗАО КМП / Н.В. Фатьянова // Научно-технический сборник Российского морского регистра судоходства. — 2019. — № 56/57. — С. 94–100.
12. Shilova O.A. Environmentally friendly antifouling transparent coatings based on sol gel “epoxy/titanium tetrabutoxide” composition modified with detonation nanodiamond / O.A. Shilova, I.B. Glebova, V.I. Voshchikov, V.L. Ugolkov et al. // Journal of Advanced Materials and Technologies. — 2022. — Т. 7, № 3. — P. 201–218.
13. Ревин П.О. Исследование свойств антикоррозионных покрытий подводного нанесения для защиты портовых сооружений / П.О. Ревин, А.В. Макаренко, Р.А. Харисов, И.Р. Фархетдинов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2022. — Т. 12, № 4. — С. 385–393.
14. Прокопчук Н.Р. Улучшение свойств покрытий по металлу наноалмазными частицами / Н.Р. Прокопчук, А.И. Глоба, И.О. Лаптик, А.Г. Сырков // Цветные металлы. — 2021. — № 6. — С. 50–54.
15. Пичельников А.В. Повышение долговечности защитных покрытий машин и оборудования АПК наномодифицированными лакокрасочными материалами / А.В. Пичельников, В.В. Коротких, А.П. Илясов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. — 2021. — № 10(204). — С. 106–111.
16. Пласкеева Е.И. Атмосферостойкие системы покрытия для судостроительной верфи / Е.И. Пласкеева, Д.А. Полянская, В.И. Трусов, Р.С. Ходжаев, Г.В. Черкаев // Морские интеллектуальные технологии. — 2021. — № 1, ч. 2(51). — С. 75–78.
17. Пичугин А.П. Оценка эффективности использования нанодобавок в защитных покрытиях / А.П. Пичугин, А.В. Пчельников, В.Ф. Хританков, А.К. Туляганов // Строительные материалы. — 2023. — № 3. — С. 20–26.
18. Pchel’nikov A.V. Chemically resistant nanostructured protective coatings for metal surfaces / A.V. Pchel’nikov, A.P. Pichugin // Journal of Advanced Materials and Technologies. — 2025. — Т. 10, № 2. — С. 117–128.
19. Борчаковская И.Н. Натурные испытания перспективных противообрастающих покрытий контактного типа с антикоррозионными свойствами в Черном море / И.Н. Борчаковская, Н.А. Шкабара, А.Б. Фурсина, Н.Н. Петров, З.А. Темердашев // Экология и промышленность России. — 2025. — Т. 29, № 10. — С. 23–29.
20. Габышева В.А. Оценка технологичности использования антикоррозионных покрытий для защиты деталей НТТС / В.А. Габышева // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. — 2019. — № 1(19). — С. 2.
21. Chukhlanov V.Y. Protective coating based on siloxane polymer nanopatterned by alkoxytitanate / V.Y. Chukhlanov, O.G. Selivanov, N.V. Chukhlanova // Materials Science Forum. — 2019. — Т. 945. — С. 718–723.
22. Пичугин А.П. Влияние нанорастворных добавок на адгезионную способность защитных полимерных покрытий / А.П. Пичугин, А.В. Пчельников, В.Ф. Хританков, В.В. Банул // Строительные материалы. — 2018. — № 1 2. — С. 39–44.

REFERENCES

1. Syrkov A.G., Pleskunov I.V., Kuleshov E.N., Pleskunov V.N., Kibalko A.A. Methods and effects of regulation of protective properties of coatings on steel surface using nanomaterials. *Journal of Mining Institute*. 2005. Vol. 165. P. 184–187. (In Russ.)
2. Pogrebnyak A.D., Danilenok M.M., Komarov F.F., Erdybaeva N.K. et al. Struktura i fiziko-khimicheskie svoystva kombinirovannykh nanokompozitnykh zashchitnykh pokrytiy [Structure and physico-chemical properties of combined nanocomposite protective coatings]. *Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti [Physical surface engineering]*. 2007. Vol. 5, No. 3–4. P. 186–196.
3. Malinin A.V., Kravtsov V.V. Povishenie zashchitnoi sposobnosti epoksidnogo pokrytiya v vodnykh sredakh pri napolnenii vysokodispersnym modifitsirovannym rutilem [Enhancement of protective ability of epoxy coating in aqueous media using high-dispersed modified rutile]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie [Paints and varnishes and their application]*. 2007. No. 9. P. 46–49.
4. Shi X., Nguyen T.A., Suo Z., Liu Y., Avci R. Effect of nanoparticles on corrosion resistance of coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 204. P. 237–245.
5. Trukhina M.V., Provotorov M.V. Uprochnyayushchee nanomodifitsirovanie lakovykh pokrytiy [Strengthening nanomodification of varnish coatings]. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii [Fundamental and applied problems of engineering and technology]*. 2012. No. 2–6(292). P. 73–78.
6. Zheludkevich M.L., Tedim J., Ferreira M.G.S. Smart coatings for active corrosion protection. *Electrochimica Acta*. 2012. Vol. 82. P. 314–323.
7. Evstifeev E.N., Kuzharov A.S., Polinets D.V., Polinets V.A., Sobko K.V. Sravnitel'nye issledovaniya antikorrozionnykh svoistv zashchitnykh pokrytiy na osnove vysokonapolnennykh krasok, soderzhashchikh mikro- i nanogchastitsy tsinka [Comparative studies of anticorrosive properties of coatings based on highly filled paints containing micro- and nanoparticles of zinc]. *Innovatsii, ekologiya i resursosberegayushchie tekhnologii [Innovation, ecology and resource-saving technologies]*. Rostov-on-Don: DGTU, 2014. P. 664–673.
8. Montemor M.F. Functional and smart coatings for corrosion protection: A review. *Surface and Coatings Technology*. 2014. Vol. 258. P. 17–37.
9. Elagina O.Yu., Buryakin A.V., Zhuk V.V. Osobennosti primeneniya protektornykh metallizatsionnykh pokrytiy dlya korrozionnoi zashchity metallokonstruktsiy, rabotayushchikh v morskoi srede [Features of protective metallization coatings for corrosion protection of marine structures]. *Territoriya Neftegaz*. 2016. No. 11. P. 70–75.
10. Tsvetnikov A.K., Matveenko L.A., Puz' A.V., Egorkin V.S., Golub A.V. et al. Nanodispersny politetrafluoroethilen FORUM™ i ego vliyanie na fizicheskie svoistva lakokrasochnykh pokrytiy [Nanodispersed polytetrafluoroethylene FORUM™ and its influence on physical properties of coatings]. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie [Paints and varnishes and their application]*. 2016. No. 1–2. P. 63–67.
11. Fatyanova N.V. Analysis of composition and properties of varnish and paints produced at the Bibi-Eybat factory of CJSC "ASCO". *Research Bulletin by Russian Maritime Register of Shipping*. 2019. No. 56/57. P. 94–100. (In Russ.)
12. Shilova O.A., Glebova I.B., Voshchikov V.I., Ugolkov V.L., Dolmatov V.Yu. Environmentally friendly antifouling transparent coatings based on sol-gel "epoxy/titanium tetrabutoxide" composition modified with detonation nanodiamond. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2022. Vol. 7, No. 3. P. 201–218.
13. Revin P.O., Makarenko A.V., Kharisov R.A., Farkhetdinov I.R. Issledovanie svoistv antikorrozionnykh pokrytiy podvodnogo naneseniya dlya zashchity portovykh sooruzhenii [Study of underwater anticorrosive coatings for port structures]. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov [Science and technology of pipeline transportation of oil and petroleum products]*. 2022. Vol. 12, No. 4. P. 385–393.
14. Prokopchuk N.R., Globa A.I., Laptik I.O., Syrkov A.G. Uluchshenie svoistv pokrytiy po metallu nanoalmaznymi chastitsami [Improvement of metal coatings with nanodiamond particles]. *Tsvetnye metally [Non-ferrous metals]*. 2021. No. 6. P. 50–54.
15. Pchelnikov A.V., Korotkikh V.V., Ilyasov A.P. Increasing durability of protective coatings of farm machinery and equipment with nano-modified paintwork materials. *Bulletin of Altai State Agricultural University*. 2021. No. 10(204). P. 106–111. (In Russ.)
16. Plaskeeva E.I., Polyanskaya D.A., Trusov V.I., Khodzhaev R.S., Cherkaev G.V. Atmospheric resistant coating systems for shipbuilding yard. *Marine Intellectual Technologies*. 2021. No. 1, part 2(51). P. 75–78. (In Russ.)
17. Pichugin A.P., Pchelnikov A.V., Khristankov V.F., Tulyaganov A.K. Evaluation of the effectiveness of the use of nano-additives in protective coatings. *Stroitel'nye materialy (Construction Materials Russia)*. 2023. No. 3. P. 20–26. (In Russ.)
18. Pchel'nikov A.V., Pichugin A.P. Chemically resistant nanostructured protective coatings for metal surfaces. *Journal of Advanced Materials and Technologies*. 2025. Vol. 10, No. 2. P. 117–128.
19. Borchakovskaya I.N., Shkabara N.A., Fursina A.B., Petrov N.N., Temerdashev Z.A. Field tests in the Black Sea of promising contact-type antifouling coatings with anticorrosion properties. *Ecology and Industry of Russia*. 2025. Vol. 29, No. 10. P. 23–29. (In Russ.)
20. Gabysheva V.A. Otsenka tekhnologichnosti ispol'zovaniya antikorrozionnykh pokrytiy dlya zashchity detaley NTTS [Assessment of manufacturability of anticorrosive coatings for NTTS parts]. *Avtomobil. Doroga. Infrastruktura*. 2019. No. 1(19). P. 2.
21. Chukhlanov V.Y., Selivanov O.G., Chukhlanova N.V. Protective coating based on siloxane polymer nanopatterned by alkoxytitanate. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 945. P. 718–723.
22. Pichugin A.P., Pchelnikov A.V., Khristankov V.F., Banul V.V. Influence of nano-dimensional additives on adhesion ability of protective polymer coatings. *Stroitel'nye materialy (Construction Materials Russia)*. 2018. No. 1–2. P. 39–44.

Статья поступила в редакцию 12.01.2026.
Принята к публикации 10.03.2026.