

# Материалы и конструкции в нефтегазовой отрасли

## Materials and structures in the oil and gas industry

2.8.4. Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений (технические науки)

Научная статья / Original research article

УДК 622.276.53

DOI: <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-1-113-128>

EDN: RLCTMI



### **Обоснование применения технологий нанесения защитных покрытий на примере месторождений Западной Сибири**

**М. И. Королев<sup>1\*</sup>, С. С. Павлова<sup>1</sup>, Л. А. Фаррахов<sup>2</sup>, И. В. Квач<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Морнефтегазпроект, Санкт-Петербург, Российская Федерация

<sup>3</sup>Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

\*[m\\_korolev@ugrasu.ru](mailto:m_korolev@ugrasu.ru)

**Аннотация.** Коррозия металлических конструкций представляет собой одну из наиболее серьезных проблем нефтегазовой отрасли. Влияние коррозии очень существенно. В-первых, прямые потери: протекание коррозионных процессов приводит к внезапному выходу из строя оборудования. Во-вторых, сопутствующие экономические затраты, вызванные ремонтом, заменой оборудования и вынужденным простоем. Проблема борьбы с коррозией становится еще более актуальной в связи с растущими требованиями к добыче и транспортировке нефти и нефтепродуктов, что, в свою очередь, делает необходимой разработку новых материалов для защиты металлических конструкций и технологий их нанесения. Это исследование посвящено углубленному анализу современных разработок в области защитных материалов и технологий их нанесения на металлические конструкции, предназначенные для эксплуатации в агрессивных средах и условиях интенсивного абразивного износа. Проведена идентификация наиболее уязвимых узлов нефтедобывающего оборудования, подверженных наиболее сильному износу. Определены решающие негативные факторы, такие как высокая температура, воздействие сероводорода, солей, влаги механическое трение и истирание. В качестве наиболее эффективных защитных материалов выделены карбид вольфрама, а также нитриды и бориды переходных металлов, в частности титана. Особое внимание уделено методам нанесения керамических покрытий, среди которых наиболее перспективными являются высокоскоростное плазменное напыление (HVOF), физическое осаждение из паровой фазы (PVD), магнетронное распыление и другие. Выбор этих методов обусловлен их высокой эффективностью, возможностью получения покрытий с заданными свойствами и высоким качеством адгезии к основе.

**Ключевые слова:** коррозия, абразивный износ, защитные покрытия, методы защиты, напыление, пассивация

**Для цитирования:** Королев М. И., Павлова С. С., Фаррахов Л. А., Квач И. В. Обоснование применения технологий нанесения защитных покрытий на примере месторождений Западной Сибири. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ.* 2026;30(1):113–128. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-1-113-128> EDN: RLCTMI

### **Justification for the application technologies of protective coating based on the example of oil fields in West Siberian**

**Maxim I. Korolev<sup>1\*</sup>, Svetlana S. Pavlova<sup>1</sup>, Linar A. Farrakhov<sup>2</sup>, Irina V. Kvach<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Yugra State University, Khanty-Mansiysk, Russian Federation*

<sup>2</sup> *Morneftegazproekt, Saint Petersburg, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Baltic State Technical University "VOENMEKH" named after D.F. Ustinov, Saint Petersburg, Russian Federation*

\**m\_korolev@ugrasu.ru*

**Abstract.** Corrosion of metal structures represents one of the most serious problems in the oil and gas industry. Its impact is profound. First, corrosion processes cause direct losses, as they often lead to sudden equipment failure. Second, corrosion results in additional economic costs related to repair, equipment replacement, and forced downtime. With increasing requirements for oil production and transportation, corrosion control has become even more critical. This dictates the need to develop new protective materials for metal structures and the application technologies of them. This study focuses on an in-depth analysis of modern developments in protective materials and application technologies for metal structures operating in aggressive environments and under conditions of intensive abrasive wear. The authors of this article identify the most vulnerable components of oil production equipment that are subject to the highest wear rates. The researchers also determine key negative factors, such as high temperature, exposure to hydrogen sulfide, salts, moisture, mechanical friction, and abrasion. The most effective protective materials include tungsten carbide, nitrides and borides of transition metals, particularly titanium. The article pays special attention to application methods of ceramic coating. Methods as high-velocity oxygen fuel spraying (HVOF), physical vapor deposition (PVD), magnetron sputtering, and related processes demonstrate the greatest potential. These methods offer high efficiency, allow precise control of coating properties, and ensure strong adhesion to the substrate.

**Keywords:** corrosion, abrasive wear, protective coating, protection methods, spraying, passivation

**For citation:** Korolev M. I., Pavlova S. S., Farrakhov L. A., Kvach I. V. Justification for the application technologies of protective coating based on the example of oil fields in West Siberian. *Oil and Gas Studies*. 2026;30(1):113–128. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2026-1-113-128>

## **Введение**

Коррозия — это разрушительный процесс, представляющий собой сложную цепь химических и электрохимических реакций, которые приводят к постепенному разложению материалов, преимущественно металлов, тем самым изменяя их структуру и физико-химические свойства. Ежегодный экономический ущерб от коррозии оценивается в несколько триллионов долларов, что сопоставимо с ВВП многих развитых стран. Эти цифры включают не только прямые затраты на ремонт и замену поврежденных конструкций, оборудования и инфраструктуры, но и косвенные потери, связанные с производственными остановками, снижением производительности, авариями, дополнительными мерами безопасности и экологическим ущербом.

Добыча нефти — та область, в которой коррозионные процессы, протекающие на металлоконструкциях, приводят к разливу нефти, нанося значительный экологический ущерб окружающей среде. Это влечет дополнительные экономические потери, связанные с необходимостью проводить мероприятия по устранению разливов, последующие работы по рекультивации земель и выплате штрафных санкций [1, 2].

Разработка новых антикоррозионных и абразивно стойких материалов и усовершенствование методов их нанесения — необходимые способы снижения экономического ущерба, вызываемого коррозией.

### Объект и методы исследования

Для анализа было выбрано 3 объекта на различных нефтегазодобывающих предприятиях в Западной Сибири. Согласно полученным промышленным данным и классификатору по коррозии<sup>1</sup> на объектах 1 и 2 выявлен углекислотный тип коррозии, на объекте 3 — коррозионно-эрозионный тип, результаты представлены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1.** Показатели негативного воздействия по объектам 1 и 2

**Table 1.** Indicators of negative impact for objects 1 and 2

pH	Общая минерализация, мг/дм <sup>3</sup>	Содержание растворенного CO <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	Содержание растворенного Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Содержание растворенного O <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>
Объект 1				
6,93	70000	350	33403,47	3,12
Объект 2				
6,9	22690	46,1	13201,9	0,03

**Таблица 2.** Показатели негативного воздействия по объекту 3

**Table 2.** Indicators of negative impact for object 3

Осложняющий фактор	Значение	ЕИ
Вязкость	67	МПа·с
Плотность	930	кг/м <sup>3</sup>
Газовый фактор	500–1 000	м <sup>3</sup> /т
КВЧ	700–50 000	мг/л
Скоростной режим	> 300	м <sup>3</sup> /сут.
Микротвердость частиц по Моосу	до 7	баллы
Размер частиц	менее 0,125	мм
Устьевые давления	6,3	МПа

Также на основе промышленных данных сформирована база оборудования и ЗИП, подвергающихся негативному влиянию в процессе эксплуатации. Результаты представлены в таблице 3.

<sup>1</sup>ГОСТ ISO 9223-2017. Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная агрессивность атмосферы. Классификация, определение и оценка. Введен в действие: 01.07.2019. Москва : Стандартинформ, 2018.

**Таблица 3. Перечень оборудования и ЗИП**  
**Table 3. Equipment list and spare parts, tools and accessories**

Объект	Название оборудования	Твердость; НВ	T <sub>раб</sub> (°C)	ОФ	Факторы агрессивной среды
Объект 1	Штуцерная камера, арматура фонтанная комплектная	84–88,3	от –60 до 45	КФ	Высокое содержание CO <sub>2</sub>
	Обратный клапан АФК	84–88,3	от –60 до 45	КФ	Высокое содержание CO <sub>2</sub>
	Обратный клапан АГЗУ	84–88,3	Нет данных	КФ	Высокое содержание CO <sub>2</sub>
	Обратный клапан-73 (в составе НКТ)	84–88,3	до 60	КФ	Высокое содержание CO <sub>2</sub>
Объект 2	Рабочий орган ЦНС	126–197	до 60	КФ	Высокое содержание CO <sub>2</sub>
	РО насос тип «Д»	248	до 60	КФ	Высокое содержание CO <sub>2</sub>
	Плашки на ЗРА	84–248	до 225	КФ	Высокое содержание CO <sub>2</sub>
Объект 3	ЗРА	125–248	от –60 до 120	ЭФ	Скоростной режим, КВЧ
	Трубопроводная арматура	Нет данных	от –60 до 240	ЭФ	Скоростной режим, КВЧ
	Клапаны-регуляторы	84–248	до 225	ЭФ	Скоростной режим, КВЧ

### **Негативные факторы воздействия на оборудование при добыче нефти**

Нефть, содержащая в своем составе агрессивные вещества, такие как хлориды, сульфиды, меркаптаны и прочее, а также попутный нефтяной газ и пластовая вода негативно воздействуют на нефтедобывающее оборудование [3].

Рассмотрим более подробно два осложняющих фактора — коррозионную и эрозионную агрессивность.

Хотя углекислый газ (CO<sub>2</sub>) присутствует в атмосфере (около 0,04 %) и растворяется в воде лучше, чем кислород, он все равно служит важным составляющим в коррозионных процессах. Это объясняется большей окислительной способностью кислорода и его парциальным давлением. Более того, CO<sub>2</sub>, растворяясь в воде, может образовывать защитные карбонатные пленки на некоторых металлах, препятствуя коррозии.

На ранних этапах нефтедобычи (первая половина XX века) даже при наличии попутного газа с содержанием до 10 %  $\text{CO}_2$  углекислотная коррозия оборудования не была такой проблемой, как сейчас. Это объяснялось небольшими глубинами скважин (использовались в основном штанговые насосы), низким давлением пластов (20–40 атм) и более значительными проблемами, вызванными попаданием кислорода из воздуха в открытые системы сбора нефти.

Ранее существовало деление скважин на две группы: к первой относили скважины, в которых добывалась нефть, содержащая сероводород (кислая среда); ко второй — нефть, содержащая агрессивные кислород и углекислый газы.

После открытия глубокозалегающих месторождений с высокими значениями давления и содержания углекислого газа при низком содержании сероводорода это разделение претерпело изменения.

Начиная с 1970-х годов в России при эксплуатации таких месторождений использовались герметизированные системы сбора, исключая попадание кислорода. В итоге  $\text{CO}_2$  стал основным коррозионным компонентом из-за высокого давления, создавая в водной фазе кислый раствор водородного показателя (рН 4–5,5).

В 1980-х годах на Самотлорском и других месторождениях Западной Сибири была зафиксирована интенсивная коррозия трубопроводов в системах сбора нефти и газа. Изначально считалось, что это вызвано небольшим количеством сероводорода в водной фазе. Однако исследования показали, что сероводород присутствует преимущественно в виде сульфатов, исключая типичную сероводородную коррозию. Анализ участков поврежденной коррозией трубопроводов выявил сульфиды и карбонаты, указывая на другую причину коррозии [4].

Нефтяные месторождения Западной Сибири характеризуются низким содержанием углекислого газа (0,08–2 %) в нефти и попутном газе, что приводит к низкому парциальному давлению  $\text{CO}_2$  в скважинах и трубопроводах. Тем не менее скорость коррозии оборудования здесь высока (3–4 мм/год, а в отдельных случаях до 6–8 мм/год), что является показателем высокой коррозионной агрессивности. В нефтегазодобыче выделяют два типа коррозии, связанных с содержанием  $\text{CO}_2$ : с высоким и низким давлением. Во втором случае коррозия обусловлена, главным образом, минерализованной водной фазой с растворенным  $\text{CO}_2$ . Рассмотрим коррозионные и эррозивные процессы подробнее [5].

Коррозионная агрессивность пластовых жидкостей определяется комплексом факторов: температурой, давлением, скоростью потока, минерализацией воды, соотношением вода/углеводород, наличием механических примесей, коррозионно-активных газов ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ), наличием сульфатвосстанавливающих бактерий (СВБ). Повышенное содержание коррозионно-активных газов и наличие факта бактериального заражения пластового флюида СВБ значительно ускоряют коррозию нефтегазового оборудования.

Износ, эрозия деталей насосов (рабочих органов, подшипников и т. д.) зависит от степени абразивности добываемой продукции скважины. Твердость абразива (например, кварца, песчаника, карбонатов) играет решающую роль. Более твердые частицы вызывают более интенсивную эрозию. Значение имеет также гранулометрический состав — распределение частиц по размерам. Мелкие частицы, как правило, проникают глубже в структуру металла, вызывая усталостное разрушение. Содержание кварца в добываемой продукции — важный индикатор абразивности, так как кварц обладает высокой твердостью и хрупкостью. Высокая скорость потока усиливает кинетическую энергию абразивных частиц, увеличивая силу их удара о поверхность оборудования. Это приводит к ускорению процесса эрозии, особенно в зонах с турбулентным течением жидкости. Наличие вихрей и завихрений также способствует концентрации абразивных частиц в определенных областях, усиливая локальное разрушение.

Существует два основных подхода к защите оборудования: технологические и специализированные методы.

1. Технологические (предупредительные): снижение скорости потока ГЖС, оптимизация режимов работы насосов, уменьшение давления — все это может снизить интенсивность эрозии.

2. Специализированные: использование материалов с высокой твердостью и износостойкостью (например, специальные стали, керамика, композиционные материалы) для изготовления наиболее подверженных эрозии деталей [6].

Наиболее распространенный метод защиты от влияния эрозии и коррозии в нефтегазопромысловой практике — применение различных защитных покрытий.

#### **Типы покрытий для защиты от коррозии и абразивного износа**

Множество вариантов защитных покрытий можно разделить на три типа: органические, неорганические и металлические. Каждый тип обеспечивает защиту от того или иного воздействия, имеет свои преимущества и недостатки перед другими [7].

*Органические покрытия* представляют собой полимерные материалы, основанные на углероде и эффективно защищающие от коррозионных воздействий благодаря своим барьерным свойствам. Одной из инновационных разработок в сфере органических покрытий является технология применения графена — двумерного углеродного наноматериала, обладающего такими характеристиками, как непроницаемость для коррозионных агентов и способность блокировать диффузию влаги и ионов. На практике использование графена позволило значительно расширить область применения органических покрытий, в частности из-за повышения их устойчивости к разрушительному воздействию УФ-лучей и износу под механическим давлением [8–11].

*Неорганические и керамические покрытия.* Соединения, такие как оксиды металлов, обладают повышенной стойкостью к высоким температурам и воздействию агрессивных химических веществ. Эволюция неорганических и керамических покрытий была направлена на улучшение их производительности. Одним из ключевых направлений стало развитие методов модификации поверхности, нацеленных на усиление коррозионной стойкости. Например, применение технологий, таких как ионная имплантация или лазерная обработка, позволяет изменять структуру поверхности покрытия, что значительно увеличивает его защитные свойства. Наибольшую популярность приобрели оксиды, карбиды, нитриды и бориды. Карбиды, в частности покрытия из карбида вольфрама, заняли нишу в средах, чреватых абразивным износом и коррозионными средами [12, 13].

*Металлические покрытия* в подавляющем большинстве выступают в роли протекторной защиты. Классическими металлами, применяемыми для легирования сталей, являются хром, никель или молибден. Традиционные металлические покрытия, часто содержащие опасные компоненты, такие как шестивалентный хром, вызывают экологические проблемы [14].

В настоящее время работы ведутся в направлении разработки смеси легирующих добавок для борьбы с определенными коррозионными средами [15, 16]. Экологически чистые сплавы, такие как сплавы цинка и алюминия, выступают яркими примерами эффективности, сочетающейся с экологической безопасностью [17].

Другое перспективное направление — разработка *гибридных покрытий*, которые рассматриваются как полимерные матрицы с включением мелкодисперсных неорганических компонентов. Благодаря пластичным органическим и эластичным органическим веществам в составе покрытия можно получить тонкие пленки с хорошей адгезией, способные принимать любую форму поверхности. Присутствие неорганических частиц придает таким покрытиям твердость и прочность. Способы получения гибридных покрытий достаточно сложны, так как определяются требованиями, предъявляемыми к свойствам этого покрытия. Наиболее популярны различные методы диспергирования мелкодисперсных частиц в растворе полимера. Однако для достижения оптимальных свойств необходимо тщательно контролировать размер и равномерность распределения наночастиц и обеспечить прочное взаимодействие между органической и неорганической фазами [18].

#### **Методы нанесения защитных покрытий**

Наиболее перспективный метод нанесения керамических покрытий — напыление (HVOF, PVD и др.) [19–21]. Преимущество керамики перед полимерными материалами состоит в том, что методами напыления удастся получить покрытия, обладающие, помимо высокой коррозионной стойкости, еще и достаточно высокими показателями микротвердости, что позволяет их использовать не только для защиты от коррозии, но и для уменьшения абразивного износа.

Плазменное напыление, а именно высокоскоростное плазменное напыление (HVOF) [22] — одна из самых передовых аддитивных технологий, используемых для нанесения защитных и функциональных покрытий на различные подложки. HVOF заключается в осаждении путем распыления предварительно расплавленного порошкового материала. Под давлением расплавленные частицы приобретают избыточную кинетическую энергию, которая в момент соударения с подложкой позволяет защитному материалу образовать узкие тонкие пленки, обеспечивая высокую адгезию с поверхностью и формирование кристаллических или аморфных фаз.

Характеристики получаемого покрытия определяются параметрами напыления, такими как конструкция распылителя, способ внесения порошка в распылитель, природа газа, образующего плазму, и давление в распылительной камере. Все эти параметры задают скорость частиц, их размер и температуру, следовательно, влияют на качество получаемого покрытия.

К положительным сторонам плазменного напыления относятся возможность получения покрытия на поверхностях со сложной геометрией. При этом наблюдается высококачественное сцепление с подложкой и сохранение следующих физико-химических свойств наносимого материала: химическая и термическая устойчивость, механическая прочность. Помимо приведенных достоинств, у технологии имеются и недостатки. Например, процесс требует значительных энергетических затрат и может быть чувствителен к условиям окружающей среды, что ограничивает его применение в некоторых случаях.

При физическом осаждении (PVD) [23] материал покрытия переходит в газовую фазу под воздействием высокой температуры или ионного распыления, затем в вакуумной камере происходит осаждение компонентов газовой фазы на подложку, при этом образуется тонкослойное покрытие.

Главное преимущество метода — достаточно низкая температура нанесения, которая не достигает 600 °С, поскольку такие температуры позволяют сохранять механические свойства материала подложки, а именно — устойчивость к деформациям и прочность на изгиб. Нанесение покрытия на изделия сложной формы, имеющие изгибы, резьбу или форму спирали, также требует минимального воздействия температуры для сохранения функциональных свойств. Еще одно неоспоримое достоинство метода PVD заключается в возможности упрочнения материала за счет создания в поверхностном слое напряжения, вызывающего деформацию в направлении приложенной нагрузки.

Как и другие методы, PVD имеет свои недостатки. Во-первых, это высокая сложность и стоимость оборудования. Во-вторых, продолжительное время нанесения покрытия, по сравнению с другими технологиями. В-третьих, сложность технологического процесса, который не всегда позволяет получить равномерное по толщине и составу покрытие, в результате чего на поверхности подложки могут возникнуть растрескивания. Эти несовершенства способны привести к снижению ударной вязкости, твердости и общего срока службы инструмента, особенно при обработке высокопрочных материалов с высокой ударной нагрузкой. Следует отметить, что

стандартные технологии PVD часто ограничивают геометрию изделий, что не всегда устраивает производителей специализированных инструментов.

Электродуговое напыление (Arc-PVD) — высокоэффективный метод нанесения покрытий, основанный на расплавлении металлической проволоки с помощью электрической дуги. В отличие от обычной дуговой сварки, где основная цель — соединение металлов, Arc-PVD фокусируется на создании тонкого, но прочного покрытия на поверхности подложки. Процесс начинается с подачи двух расходимых проволочных электродов, изготовленных из материала покрытия, в специальный пистолет. Электроды подключаются к источнику постоянного тока высокой мощности (DC), создавая между их концами электрическую дугу. Высокая температура дуги расплавляет концы электродов, образуя капли жидкого металла.

Энергоэффективность Arc-PVD — одно из главных его преимуществ. Электрическая энергия, подаваемая на электроды, почти полностью преобразуется в тепловую, за счет которой происходит плавление металла. Потери энергии минимальны, что делает этот метод экономически выгодным, особенно при нанесении толстых покрытий. Скорость напыления в Arc-PVD напрямую зависит от силы тока, подаваемого на электроды. Более высокие токи приводят к более высокому темпу расплавления проволоки и, соответственно, к более высокой скорости напыления. Однако слишком высокие токи могут привести к перегреву электродов и пистолета, а также к снижению качества покрытия из-за образования крупных капель металла. Поэтому выбор оптимального тока выступает компромиссом между скоростью и качеством. Температура подложки при Arc-PVD может быть относительно низкой [24, 25]. Это связано с тем, что горячая струя расплавленного металла и газа не концентрируется непосредственно на подложке, а распределяется по ее поверхности, что предотвращает перегрев и деформацию подложки. Тем не менее температуру подложки необходимо контролировать, чтобы обеспечить оптимальное сцепление покрытия. В некоторых случаях может потребоваться предварительный нагрев подложки для улучшения адгезии.

Выбор метода зависит от материала детали, требуемых свойств покрытия и технических возможностей производства. В некоторых случаях, для оптимального результата, целесообразно комбинировать различные методы нанесения, например, использовать распыление для основных поверхностей и дополнительную обработку резьбы специальными составами.

### **Выводы и рекомендации**

Покрытия — эффективный метод защиты нефтегазового оборудования, предотвращающего контакт металла с окружающей средой, являющейся источником коррозии. Разнообразие существующих покрытий позволяет подобрать оптимальное решение для различных условий эксплуатации и типов металлов.

На основе промышленных данных, литературных данных и общедоступных интернет-ресурсов, описывающих различные защитные антикорро-

зионные и абразивостойкие покрытия с технологиями их нанесения, были сформированы предложения, представленные в таблицах 4 и 5.

**Таблица 4.** Рекомендации по подбору покрытий при коррозионном воздействии  
**Table 4.** Recommendations for the selection of coatings in corrosive effect

Объект	Наименование оборудования	Рекомендуемое покрытие и метод нанесения
Объект 1	Штуцерная камера, арматура фонтанная комплектная	железо, карбид вольфрама (электровзрывное напыление), 59,05% Ni, 28,86% W, 5,33% Cr, 1,74% Fe, 1,18% B, 2,45% Si, 1,39% C (холодное газопламенное напыление) Zr <sub>1-x</sub> Al <sub>x</sub> N, Ti (магнетронное напыление)
	Обратный клапан АФК	
	Обратный клапан АГЗУ	
Объект 2	Обратный клапан-73 (в составе НКТ)	
	Рабочий орган ЦНС	
	РО насос тип «Д»	
	Плашки на ЗРА	

Предложенные материалы покрытия характеризуются малой толщиной порядка нескольких мкм, при этом достаточно большой твердостью от 400 до 2500 НВ.

Кроме того, можно отметить следующие покрытия:

1. Оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (газотермическое высокоскоростное напыление по методу HVOF) (твердость 2000 НВ, толщина покрытия варьируется в интервале от 15 до 500 мкм, в зависимости от способа нанесения и предназначения) [28].

2. Углеродсодержащее покрытие состава: углерод 80 ат. %, кремний 12 ат. %, кислород и азот в сумме около 8 ат. % (C+Si+O<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>), полученное методом PECVD (параметр износа 10<sup>-6</sup>–10<sup>-8</sup> мм<sup>3</sup>/(Нм), коэффициент трения в диапазоне от 0,02 до 0,1) [29].

**Таблица 5.** Рекомендации по подбору покрытий при воздействии эрозии  
**Table 5.** Recommendations for the selection of coatings in erosion effect

Объект	Название оборудования	Рекомендуемое покрытие и метод нанесения
Объект 3	ЗРА	Двухкомпонентный нитрид титана и трехкомпонентный нитрид титана и алюминия (магнетронное напыление, электродуговое испарение, твердость 2500 НВ) Ti-Al-Mo-N (PVD, твердость 3900 НВ), Ta-Zr-Si-B-C (магнетронное напыление и электроискровое легирование, твердость 2800 НВ)
	Трубопроводная арматура	
	Клапаны-регуляторы	

Помимо указанного значения твердости покрытий, немаловажным показателем является их толщина, которая с использованием данных методов нанесения составляет от 3 до 54 мкм.

Удовлетворительные показатели имеют такие покрытия, как оксид алюминия  $Al_2O_3$  и керамическое покрытие  $C+Si+O_2+N_2$ , указанные выше, а также титан-диоксид титана  $TiO_2$ , получаемые микроплазменным напылением (твердость покрытия составляет 1 000 НВ, толщина слоя 450 мкм, и износостойкость 0,008 г/л.).

В результате сравнительного анализа были выявлены наиболее перспективные технологии, отвечающие требованиям нефтегазовой промышленности. На рынке наряду с готовыми присутствуют технологии, требующие апробации, обладающие высоким потенциалом в части повышения надежности и долговечности оборудования, используемого в нефтегазовой промышленности.

Для успешного внедрения отобранных технологий требуются дополнительные исследования, направленные на доработку и оптимизацию параметров процесса нанесения покрытий, а также адаптацию их к конкретным условиям эксплуатации.

#### **Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

#### **Author contributions**

All authors contributed equally to the preparation of the manuscript.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
**Conflict of interests.** The authors declare no conflicts of interest.

#### **Список источников**

1. Davis J. R. The effects and economic impact of corrosion. *Corrosion: Understanding the basics*. 2000;(164):62–66.
2. Al-Moubaraki A. H., Obot I. B. Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2021;25(12):101370. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101370>
3. Колесова С. Б., Миронычев В. Г., Борхович С. Ю. *Современные технологии извлечения нефти и газа. Перспективы развития минеральносырьевого комплекса*. Ижевск: Издательский дом «Удмуртский университет»; 2016. 444 с.
4. Мищенко И. Т. *Скважинная добыча нефти*. Москва: Нефть и газ, РГТУ им. Губкина; 2003. 816 с.
5. Маркин А. Н., Низамов Р. Э. *CO<sub>2</sub> Коррозия нефтепромыслового оборудования*. Москва; 2003. 188 с.
6. Насыров А. М., Масленников Е. П., Нагуманов М. М. *Технологические аспекты охраны окружающей среды в добыче нефти*. Ижевск: Парацельс Принт; 2013. 287 с.

7. Saleh B., Fathi R., Shi H., Wei H. Advanced Corrosion Protection through Coatings and Surface Rebuilding. *Coatings*. 2023;13(1):180. <https://doi.org/10.3390/coatings13010180>
8. Kumar S. S. A., Bashir S., Ramesh K., Ramesh S. New perspectives on graphene/graphene oxide based polymer nanocomposites for corrosion applications: the relevance of the graphene/polymer barrier coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2021;154(1):106215. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106215>
9. Георгиев Д. Открытые инновации 2014: события, тенденции, перспективные разработки. *Наноиндустрия*. 2014;7(53):20–35.
10. Othman N. H., Ismail M. C., Mustapha M., Sallih N., Kee K. E., Jaal R. A. Graphene-based polymer nanocomposites as barrier coatings for corrosion protection. *Progress in Organic Coatings*. 2019;(135):82–99. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.05.030>
11. Чжу Цзян, Аграуол Горав, Чакраборти Сом. *Нанопокрyтия для изделий*. Российская Федерация. Патент № 2012139313. 17 февраля 2011. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_2012139313\\_20140327\\_A\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_2012139313_20140327_A_RU/)
12. Абрашов А. А., Григорян Н. С., Ваграмян Т. А., Жиленко Д. Ю. Защитные керамические оксидно-титановые нанопокрyтия. В сб. *Сборник тезисов докладов сателлитной конференции XX Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. V Международная конференция-школа по химической технологии. Волгоград, 16–20 мая 2016*. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет, 2016. С. 171–173.
13. Шикунов С. Л., Ершов А. Е., Курлов В. Н. Новые подходы к получению керамических композиционных материалов и защитных покрyтий на основе карбида кремния. В сб. *трудов конференции «Химия твердого тела и функциональные материалы–2016», XI семинар «Термодинамика и материаловедение». Екатеринбург, 20–23 сентября 2016*. Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2016. С. 338–340.
14. Тигунов Л. П., Пикалова В. С., Быховский Л. З. Легирующие металлы России. Минерально-сырьевая база: состояние, использование, перспективы развития. *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2017;(12):3–11.
15. Raza A., Abdulahad S., Kang B., Ryu H. J., Hong S. H. Corrosion resistance of weight reduced Al<sub>x</sub>CrFeMoV high entropy alloys, *Applied Surface Science*. 2019;(485):368–374. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.173>
16. Fu Y., Li J., Luo H., Du C., Li X. Recent advances on environmental corrosion behavior and mechanism of high-entropy alloys. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021;(80):217–233. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.044>
17. Бабичев А. П., Иванов В. В., Попов С. И., Донцов Н. С. Особенности механизма формирования вибрационного химико-механического цинкового покрyтия. *Упрочняющие технологии и покрyтия*. 2018;(14-2):51–54.
18. Qi C., Weinell C. E., Dam-Johansen K., Wu H. Assessment of anticorrosion performance of zinc-rich epoxy coatings added with zinc fibers for corrosion protection of steel. *ACS omega*. 2023;8(2):1912–1922.
19. Бэйли Дж. Р., Бидигер Э. А., Бангару Н.-Р. В., Озекцин А., Джин Х., Йех Ч. Ш.-Х. и др. *Устройства с покрyтием для эксплуатации нефтяной и газовой скважины*. Российская Федерация. Патент № 2 529 600 С2. 20 августа 2009. URL: <https://searchplatform.rospatent.gov.ru/media/National/RU/C2/2014/09/27/0002529600//DOCUMENT.PDF>

20. Каменева А. Л., Бублик Н. В. *Способ получения коррозионностойкого покрытия*. Российская Федерация. Патент № 2 768 053. 24 ноября 2021. URL: <https://searchplatform.rospatent.gov.ru/media/National/RU/C1/2022/03/23/0002768053//document.pdf>
21. Картапова Т. С., Гильмутдинов Ф. З., Воробьев В. Л., Решетников С. М., Борисова Е. М. *Способ нанесения смешанного углеродно-азотного защитного покрытия для повышения коррозионной стойкости железа*. Российская Федерация. Патент № 2 659537 С1. 26 сентября 2017. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002659537\\_20180702\\_C1\\_RU](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002659537_20180702_C1_RU)
22. Жабин А. Н., Няфкин А. Н., Серпова В. М., Краснов Е. И. Методы физического осаждения из газовой фазы для изготовления металлических композиционных материалов (обзор). *Труды ВИАМ*. 2020;11(93):68–75. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-11-68-75>
23. Гильманов Т. И. Обзор технологий нанесения износостойких покрытий. *Инновационная наука*. 2022;(4-1):10–12.
24. Дружнова Я. С. Развитие методов газотермического напыления упрочняющих покрытий на основе карбидов вольфрама и хрома (обзор). *Труды ВИАМ*. 2022;10(116):100–115. <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115>
25. Клуонис, А. С., Плотников С. А. Обзор современных методов нанесения износостойких покрытий и их сравнительный анализ. В сб.: *Инновационные решения в технологиях и механизации сельскохозяйственного производства*. Горки: Белорусская государственная сельскохозяйственная академия; 2023. С. 284–287.
26. Балдаев Л. Х., Балдаев С. Л., Игнатова С. А., Козлов Н. С., Мазилин И. В., Маньковский С. А. и др. *Способ электродугового напыления покрытия*. Российская Федерация. Патент № 2715827 С1. 18 октября 2019. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002715827\\_20200303\\_C1\\_RU](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002715827_20200303_C1_RU)
27. Исакаев М.-Э. Х., Мордынский В. Б., Катаржис В. А. *Устройство для электродуговой металлизации*. Российская Федерация. Патент № 2530580. 18 июня 2013. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002530580\\_20141010\\_C1\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002530580_20141010_C1_RU/)
28. Чуйко А. Г., Кузьев Ф. Ф., Ракоч А. Г., Чуйко К. А., Кудрявцев А. М., Швецов А. Ю. и др. *Запорный орган для шарового крана и способ его изготовления*. Российская Федерация. Патент № 2347126 С1. 02 мая 2007. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002347126\\_20090220\\_C1\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002347126_20090220_C1_RU/)
29. Гренадёрв А. С., Соловьёв А. А., Оскомов К. В., Жульков М. О. Зависимость механических и трибологических свойств а-C : Н : SiO<sub>x</sub>-пленок от амплитуды напряжения смещения подложки. *Журнал технической физики*. 2021;91(8):1286–1292. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.08.51106.15-21>

### References

- Davis J. R. The effects and economic impact of corrosion. *Corrosion: Understanding the basics*. 2000;(164):62–66.
- Al-Moubaraki A. H., Obot I. B. Corrosion challenges in petroleum refinery operations: Sources, mechanisms, mitigation, and future outlook. *Journal of Saudi Chemical Society*. 2021;25(12):101370. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101370>
- Kolesova S. B., Mironychev V. G., Borkhovich S. Yu. *Sovremennye tekhnologii izvlecheniya nefti i gaza. Perspektivy razvitiya mineral'nosyr'evogo kompleksa*. Izhevsk: Izdatel'skiy dom "Udmurtskiy universitet"; 2016. (In Russ.).
- Mishchenko I. T. *Skvazhinnaya dobycha nefti*. Moscow: Neft' i gaz, RGTU im. Gubkina; 2003. (In Russ.).

5. Markin A. N., Nizamov R. E. *SO<sub>2</sub> Korroziya neftepromyslovogo oborudovaniya*. Moscow; 2003. (In Russ.).
6. Nasyrov A. M., Maslennikov E. P., Nagumanov M. M. *Tekhnologicheskie aspekty okhrany okruzhayushchei sredy v dobyche nefi*. Izhevsk: Paratsel's Print; 2013. (In Russ.).
7. Saleh B., Fathi R., Shi H., Wei H. Advanced Corrosion Protection through Coatings and Surface Rebuilding. *Coatings*, 2023;13(1):180. <https://doi.org/10.3390/coatings13010180>
8. Kumar S. S. A., Bashir S., Ramesh K., Ramesh S. New perspectives on graphene/graphene oxide based polymer nanocomposites for corrosion applications: the relevance of the graphene/polymer barrier coatings, *Progress in Organic Coatings*. 2021;154(1):106215. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2021.106215>
9. Georgiev D. Open innovations 2014: events, trends, promising developments. *Nanoindustry*. 2014;7(53):20–35. (In Russ.).
10. Othman N. H., Ismail M. C., Mustapha M., Sallih N., Kee K. E., Jaal R. A. Graphene-based polymer nanocomposites as barrier coatings for corrosion protection. *Progress in Organic Coatings*. 2019;(135):82–99. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.05.030>
11. Chzhu Tszyan, Agrauol Gorav, Soma Chakraborti. Nanopokrytiya dlya izdelii. Russian Federation. Patent No. 2012139313. 17 February 2011. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_2012139313\\_20140327\\_A\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_2012139313_20140327_A_RU/)
12. Abrashov A. A., Grigoryan N. S., Vagramyan T. A., ZHilenko D. Yu. Zashchitnye keramicheskie oksidno-titanovye nanopokrytiya. V sb. *Sbornik tezisov dokladov satellitnoy konferentsii KHKH Mendeleevskogo s"ezda po obshchey i prikladnoy khimii. V Mezhdunarodnaya konferentsiya-shkola po khimiche-skoy tekhnologii. Volgograd, 16–20 maya 2016*. Volgograd : Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet; 2016. P. 171–173. (In Russ.).
13. Shikunov S. L., Ershov A. E., Kurlov V. N. Novye podkhody k polucheniyu keramicheskikh kompozitsionnykh materialov i zashchitnykh pokrytiy na osnove karbida kremniya. In: *trudu konferentsii KHimiya tverdogo tela i funktsional'nye materialy–2016", XI seminar "Termodinamika i materialovedenie". Ekaterinburg, 20–23 sentyabrya 2016*. Ekaterinburg: Ural'skoe otdelenie RAN, 2016. P. 338–340.
14. Tiginov L. P., Pikalova V. S., Bykhovskii L. Z. Legiruyushchie metally Rossii. Mineral'no-syr'evaya baza: sostoyanie, ispol'zovanie, perspektivy razvitiya. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2017;(12):3–11. (In Russ.).
15. Raza A., Abdulahad S., Kang B., Ryu H. J., Hong S. H. Corrosion resistance of weight reduced Al<sub>x</sub>CrFeMoV high entropy alloys, *Applied Surface Science*. 2019;(485):368–374. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.173>
16. Fu Y., Li J., Luo H., Du C., Li X. Recent advances on environmental corrosion behavior and mechanism of high-entropy alloys, *Journal of Materials Science & Technology*, 2021;(80):217–233. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2020.11.044>
17. Babichev A. P., Ivanov V. V., Popov S. I., Dontsov N. S. Features of the mechanism of chemical-mechanical vibrating zinc coating formation. *Strengthening technologies and coatings*. 2018;(14-2):51–54. (In Russ.).
18. Qi C., Weinell C. E., Dam-Johansen K., Wu H. Assessment of anticorrosion performance of zinc-rich epoxy coatings added with zinc fibers for corrosion protection of steel. *ACS omega*. 2023;8(2):1912–1922.

19. Bailey J. R., Biediger E. A. O., Bangaru N.-R. V., Ozekcin A., Jin H., Yen C. S.-H. et al. Devices with coatings for operation of oil and gas wells. Russian Federation. Patent No. 2 529 600 C2. 20 August 2009. (In Russ.) URL: [https:// searchplatform.rospatent.gov.ru/media/National/RU/C2/2014/09/27/0002529600//DOCUMENT.PDF](https://searchplatform.rospatent.gov.ru/media/National/RU/C2/2014/09/27/0002529600//DOCUMENT.PDF)
20. Kameneva A. L., Bublik N. V. *Method for producing corrosion-resistant coating*. Russian Federation. Patent No. 2 768 053. 24 November 2021. (In Russ.). URL: <https://searchplatform.rospatent.gov.ru/media/National/RU/C1/2022/03/23/0002768053//document.pdf>
21. Kartapova T. S., Gilmudinov F. Z., Vorobev V. L., Reshetnikov S. M., Borisova E. M. *Method of application of mixed carbon-nitrogen protective coating to increase corrosive stability of iron*. Russian Federation. Patent No. 2 659537 C1. 26 September 2017. (In Russ.). URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002659537\\_20180702\\_C1\\_RU](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002659537_20180702_C1_RU)
22. Zhabin A. N., Nyafkin A. N., Serpova V. M., Krasnov E. I. Methods of physical vapor deposition for the manufacture of metal matrix composites (review). *Proceedings of VIAM*. 2020;11(93):68–75. (In Russ.). <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2020-0-11-68-75>
23. Gil'manov T. I. Obzor tekhnologii naneseniya iznosostoikikh pokrytii. *Innovation science*. 2022;(4-1):10–12. (In Russ.).
24. Druzhnova Ya. S. Development of methods for thermal spraying of hardening tires based on tungsten and chromium carbides (review). *Proceedings of VIAM*. 2022;10(116):100–115. (In Russ.) <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2022-0-10-100-115>
25. Kluonis, A. S., Plotnikov S. A. Obzor sovremennykh metodov naneseniya iznosostoykikh pokrytiy i ikh sravnitel'nyy analiz. In *Innovatsionnye resheniya v tekhnologiyakh i mekhanizatsii sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva*. Gorki: Belorusskaya gosudarstvennaya sel'skokhozyaystvennaya akademiya; 2023. P. 284–287. (In Russ.).
26. Baldaev L. Kh., Baldaev S. L., Ignatova S. A., Kozlov N. S., Mazilin I. V., Man'kovskii S. A. et al. Method of electric arc spraying of coating. Russian Federation. Patent No. 2715827 C1. 18 October 2019. (In Russ.). URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002715827\\_20200303\\_C1\\_RU](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002715827_20200303_C1_RU)
27. Isakaev M.-E. Kh., Mordynskii V. B., Katarzhis V. A. Electric arc spraying device. Russian Federation. Patent No. 2530580. 18 June 2013. (In Russ.). URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002530580\\_20141010\\_C1\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002530580_20141010_C1_RU/)
28. Chujko A. G., Kuzjaev F. F., Rakoch A. G., Chujko K. A., Kudrjavtsev A. M., Shvetsov A. Ju. Ball valve shut-off member and method of its production. Russian Federation. Patent No. 2347126 C1. 02 May 2007. (In Russ.). URL: [https://rusneb.ru/catalog/000224\\_000128\\_0002347126\\_20090220\\_C1\\_RU/](https://rusneb.ru/catalog/000224_000128_0002347126_20090220_C1_RU/)
29. Grenaderov A. S., Solovyov A. A., Oskomov K. V., Zhulkov M. O. Dependence of mechanical and tribological properties of a-C : H : SiO<sub>x</sub> films on the amplitude of substrate bias voltage. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 2021;91(8):1286–1292. (In Russ.) <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.08.51106.15-21>

#### **Информация об авторах/ Information about the authors**

**Королев Максим Игоревич**, кандидат технических наук, руководитель высшей нефтяной школы, Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск, [m\\_korolev@ugrasu.ru](mailto:m_korolev@ugrasu.ru)

**Maxim I. Korolev**, Candidate of Engineering Sciences, Head of the Higher Oil School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk, [m\\_korolev@ugrasu.ru](mailto:m_korolev@ugrasu.ru)

**Павлова Светлана Станиславовна**, кандидат технических наук, доцент высшей нефтяной школы, Югорский государственный университет, г. Ханты-Мансийск

**Фаррахов Линар Анирович**, руководитель проекта, проектный офис по реализации технологических проектов, Морнефтегазпроект, г. Санкт-Петербург

**Квач Ирина Валериевна**, старший преподаватель кафедры инженерной графики, Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург, irina.kvach2015@yandex.ru

**Svetlana S. Pavlova**, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Higher Oil School, Yugra State University, Khanty-Mansiysk

**Linar A. Farrakhov**, Project Manager, Project Office for the Implementation of Technological Projects, Morneftegazproekt, Saint Petersburg

**Irina V. Kvach**, Senior Lecturer of the Department of Engineering Graphics, Baltic State Technical University "VOENMEKH" named after D. F. Ustinov, irina.kvach2015@yandex.ru

Поступила в редакцию / Received 27.08.2025

Поступила после рецензирования / Revised 09.10.2025

Принята к публикации / Accepted 13.10.2025