

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 5 (179). С. 21-29.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 5 (179). P. 21-29.

Научная статья
УДК 621.45.038.72
doi: 10.30987/2223-4608-2026-5-21-29

Оптимизация соотношения связующего и отвердителя в эпоксидном полимере с точки зрения адгезионной прочности его соединения с металлом

Степан Викторович Ильин, аспирант
Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия
stephan91@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0003-6840-8344>

Аннотация. В нефтегазовой отрасли скважинное оборудование подвергается воздействию агрессивных сред. Для снижения влияния негативных факторов применяют комплексные меры защиты от коррозионного воздействия, в том числе используют полимерные защитные покрытия. На эффективность работы защитных покрытий влияет множество факторов, в том числе адгезионная прочность их соединения с подложкой. Изменяя соотношение компонентов в эпоксидном полимере, можно получить материал с оптимальными свойствами под конкретную область применения. В статье приведены результаты исследования влияния количества отвердителя в составе эпоксидного полимера на его свойства. Используя метод Бокса-Уилсона, был проведен поиск оптимального количества отвердителя ХТ-450 в составе эпоксидного полимера на основе ЭД-22 с точки зрения максимальной адгезионной прочности его соединения с металлом на отрыв. По результатам экспериментов были получены два пика значений адгезионной прочности: при количестве отвердителя 0,6 мл и 1,75 мл. Было выдвинуто предположение, что увеличение адгезионной прочности при низком содержании отвердителя может быть связано с наличием свободных эпоксидных групп, а при высоком содержании отвердителя – с наличием свободных аминных групп при отверждении эпоксидного полимера. При анализе характера разрушения соединения эпоксидного полимера с металлом определено, что неотвержденный эпоксидный полимер (при количестве отвердителя в составе ниже 1,25 мл) характеризуется когезионным разрушением соединения, при увеличении количества отвердителя в составе эпоксидного полимера характер разрушения его соединения с металлом меняется с когезионного на адгезионное разрушение по слою полимер/клей и полимер/сталь. Определено, что максимальное значение твердости эпоксидного полимера достигается при оптимальном соотношении эпоксидной смолы ЭД-22 и отвердителя ХТ-450: 2,5 мл к 1,75 мл соответственно. Результаты, полученные в данной работе, послужат основой при разработке полимерного покрытия для защиты скважинного оборудования от агрессивной среды.

Ключевые слова: скважинное оборудование, защитные покрытия, эпоксидный полимер, адгезионная прочность

Для цитирования: Ильин С.В. Оптимизация соотношения связующего и отвердителя в эпоксидном полимере с точки зрения адгезионной прочности его соединения с металлом // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2026. № 5 (179). С. 21-29. doi: 10.30987/2223-4608-2026-5-21-29

Optimization of the ratio of binding substance and hardener in an epoxy polymer in terms of the adhesion strength for its combination with metal

Stepan V. Ilyin, PhD student
Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Russia
stephan91@mail.ru

Abstract. In the oil and gas industry, borehole equipment is exposed to aggressive environments. To reduce the impact of negative factors, comprehensive corrosion protection measures are used, including the use of polymer protective coatings. The effectiveness of protective coatings is influenced by many factors, including the adhesion strength of their connection with template. By changing the ratio of components in an epoxy polymer, it is possible to obtain a material with optimal properties for a specific application. The article presents research results of the hardener amount effect in the epoxy polymer composition on its properties. Using the Box-Wilson method, a search was carried out for the optimal amount of XT-450 hardener in the composition of an ED-22-based epoxy polymer in terms of the maximum adhesion tearing strength of its combination with metal. The experiments have resulted in two peaks of adhesion strength values: for a hardener amount of 0,6 ml and 1,75 ml. It has been suggested that an increase in adhesive strength with a low hardener content may be due to the presence of free epoxy groups, and with a high hardener content, to the presence of free amine groups under the epoxy polymer curing. When analyzing the nature of the destruction of the epoxy polymer combination with metal, it was determined that an uncured epoxy polymer (with the amount of hardener in the composition below 1,25 ml) is characterized by cohesive failure of the compound, with an increase in the amount of hardener in the epoxy polymer, the nature of such failure in its combination with metal changes from cohesive failure to adhesive fracture along the polymer/glue and polymer/steel layers. It was determined that the maximum hardness of the epoxy polymer is achieved with an optimal ratio of ED-22 epoxy resin and XT-450 hardener: 2,5 ml to 1,75 ml, respectively. The results obtained in this work will serve as the basis for the development of a polymer coating to protect downhole equipment from aggressive environments.

Keywords: downhole equipment, protective coatings, epoxy polymer, adhesion strength

For citation: Ilyin S.V. Optimization of the ratio of binding substance and hardener in an epoxy polymer in terms of the adhesion strength for its combination with metal / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2026. № 5 (179). P. 21-29 doi: 10.30987/2223-4608-2026-5-21-29

Введение

При добыче нефти внутрискважинное оборудование и насосно-компрессорные трубы (НКТ) подвергаются коррозионному воздействию от различных агрессивных сред. По данным промысловой статистики АО «Оренбургнефть», на 2021 г. количество отказов, связанных с коррозией внутрискважинного оборудования, достигало 20 % от общего числа отказов [1], а в структуре осложненного фонда скважин ОАО «Удмуртнефть» на 2019 г. – 39 % [2]. Согласно [3], в 2023 г. коррозия стала второй по распространенности причиной отказа глубинно-насосного оборудования. При этом ущерб от коррозии и затраты на борьбу с ее последствиями в 2020 г. составили порядка 2,2 трлн. долл. [4]. Аварии,

происходящие в результате выхода из строя оборудования, приводят к большим экономическим потерям в результате простоя скважины во время ремонта, затрат на замену оборудования и ликвидацию последствий [5 – 7].

НКТ используются в нефтяной и газовой промышленности при эксплуатации скважин. Они предназначены для транспортировки добываемых углеводородов из скважины на поверхность и проведения различных технологических операций в скважине. Статические и динамические нагрузки, а также воздействие агрессивных сред в скважине приводят к ускоренной коррозии НКТ. Классификация способов антикоррозионной защиты внутренней поверхности НКТ, предложенная в [8], представлена на рис. 1.



Рис. 1. Классификация методов борьбы с коррозией внутренней поверхности насосно-компрессорных труб [8]

Fig. 1. Classification of methods for internal corrosion prevention in tubing surfaces [8]

На сегодняшний день наиболее эффективным методом борьбы с коррозией НКТ является применение антикоррозионных защитных покрытий [9]. В [10] показаны критерии применимости различных покрытий для защиты скважинного оборудования в зависимости от коррозионной агрессивности добываемой продукции.

В зависимости от типа защищаемого оборудования для борьбы с коррозией применяют силикатно-эмалевые, полимерные, а также дуплексные покрытия [7]. Силикатно-эмалевые покрытия обладают высокой теплоустойчивостью и устойчивостью к воздействию агрессивных сред, однако их недостатками являются хрупкость, склонность к скалыванию и необходимость термоотверждения при $t = 850...950$ °С на поверхности трубы, что делает невозможным нанесение такого покрытия на стальные трубы в термообработанном состоянии [11]. Полимерные покрытия создают физический барьер, препятствующий проникновению коррозионной среды к поверхности металла. При воздействии на покрытие повышенных температур и агрессивных сред барьерные свойства покрытия снижаются, что приводит к разрушению покрытия и металла трубы [12].

Относительно новым техническим решением являются дуплексные покрытия, которые сочетают полимерный слой с металлическим [8]. Анодное металлическое покрытие используется в качестве протекторного слоя, при разрушении которого образуются оксиды, гидроксиды, карбонаты препятствующие образованию коррозии. Полимерный слой обеспечивает барьерную защиту металла [13].

Основным недостатком дуплексных покрытий является высокая стоимость.

На эффективность работы защитных полимерных покрытий влияет множество факторов, в том числе адгезионная прочность их соединения с подложкой [14, 15]. В [15] получена зависимость адгезионной прочности соединения эпоксидного покрытия с поверхностью бронзовых пластин от содержания отвердителя. Авторы утверждают, что чем больше количество не вступивших в реакцию эпоксидных групп, тем больше адгезия отвержденного эпоксидного покрытия к бронзе. В данной работе также отмечается, что избыток эпоксидных групп, образующихся в полимере при количестве отвердителя менее стехиометрического, обеспечивает адгезионную прочность, превышающую когезионную. В [16] показано, что чем меньше содержание отвердителя, тем выше вероятность когезионного разрушения покрытия.

Изменяя компоненты полимерного покрытия и их соотношение, можно получить материал с оптимальными свойствами под конкретную область применения. Таким образом, при разработке полимерного покрытия актуальным является оптимизация соотношения связующего и отвердителя с точки зрения адгезионной прочности его соединения с металлом.

Материалы и методы

Исследовался эпоксидный полимер, состоящий из эпоксидно-диановой смолы ЭД-22 и отвердителя ХТ-450. Исследуемые составы приведены в табл. 1.

1. Составы исследуемых покрытий

1. Compositions of the investigated coatings

№ покрытия	Количество эпоксидной смолы ЭД-22, мл	Количество отвердителя ХТ-450, мл
1	2,5	0,6
2	2,5	0,8
3	2,5	1,0
4	2,5	1,2
5	2,5	1,5
6	2,5	1,75
7	2,5	2,0

Определение адгезионной прочности соединения покрытия с подложкой осуществляли в соответствии с ГОСТ 32299-2013 с помощью адгезиметра АМЦ-1. В основу работы прибора положен принцип измерения усилия отрыва грибка, приклеиваемого к контролируемому покрытию. Усилие отрыва создается поворотным механизмом, состоящим из пары винт-гайка, взводящим пружинный механизм, связанный с грибком. Величина удельного усилия отрыва считывается по положению верхней грани корпуса относительно шкалы, соответствующей номеру грибка. В работе применялся грибок № 1, которому соответствовала шкала № 1, имеющая максимальное значение 10 МПа.

Компоненты эпоксидного полимера смешивали в необходимых пропорциях, после чего наносили его на поверхность образца. После выдержки в течение 24 ч, приклеивали грибки адгезиметра. По истечению 24 ч проводили испытание на отрыв. Характер разрушения соединения оценивали в соответствии с ГОСТ 32299-2013. На рис. 2 представлена схема образца, подготовленного для определения адгезионной прочности на отрыв.

Измерение твердости эпоксидного полимера проводили на твердомере Wilson Hardness 574T с использованием шкалы HR15T. При измерении твердости по Супер-Роквеллу при малых нагрузках по шкале HR15T наконечник стандартного типа (стальной шар диаметром 1,5875 мм) вдавливался в испытуемый образец под действием последовательно прилагаемых предварительной

(29,42 Н) и основной (147,1 Н) нагрузок, и после снятия основной нагрузки измеряется остаточное увеличение глубин проникновения наконечника.

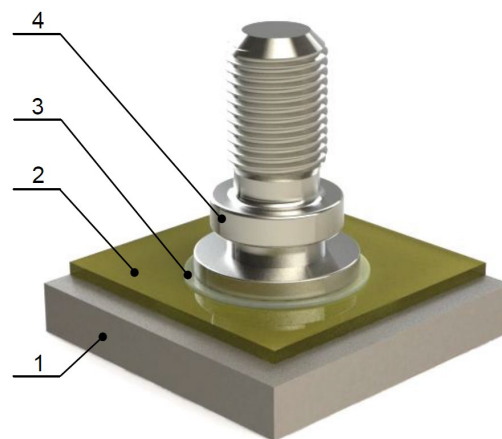


Рис. 2. Схема образца, подготовленного для определения адгезионной прочности на отрыв:
1 – стальная подложка; 2 – эпоксидный полимер; 3 – клей; 4 – грибок адгезиметра

Fig. 2. Diagram of the sample prepared for determination of the adhesion tearing strength:
1 – steel template; 2 – epoxy polymer; 3 – glue; 4 – mushroom head of an adhesion tester

Анализ и обсуждение

При смешивании эпоксидной смолы и аминного отвердителя в стехиометрическом соотношении образуется полимерная сетка, не содержащая непрореагировавших эпоксидных или аминных групп. Был проведен расчет стехиометрического количества отвердителя ХТ-450, необходимого на 100 г эпоксидной смолы ЭД-22 [17]

$$m_0 = \frac{H\text{-эквивалент}}{\text{Эпоксидный эквивалент}} \times 100\% = \frac{97,2}{195} \times 100\% = 49,8 \sim 50 \text{ г}, \quad (1)$$

где m_0 – стехиометрическое количества отвердителя, г; H -эквивалент – величина аминного эквивалента отвердителя, г/экв.

Таким образом, для стехиометрического отверждения 100 г смолы марки ЭД-22 необходимо 50 г отвердителя ХТ-450.

Производители аминofункциональных отвердителей указывают в паспортах стехиометрическое количество, рассчитываемое по формуле (1), однако оно не всегда является оптимальным [18]. Для определения оптимального количества отвердителя ХТ-450 в составе эпоксидного полимера на основе ЭД-22 с

точки зрения максимальной адгезионной прочности его соединения с металлом использовали метод Бокса-Уилсона.

В качестве фактора, влияющего на адгезионную прочность соединения эпоксидного полимера с металлом y , было выбрано x – количество отвердителя (мл). Согласно

литературным данным [15, 16], на первом этапе для проведения эксперимента использовали количество отвердителя меньше стехиометрического соотношения, определенного по формуле (1). Полученные результаты представлены в табл. 2.

2. Результаты определения адгезионной прочности на отрыв на первом этапе

2. The results of the determination of adhesion tearing strength at the first stage

Количество отвердителя x , мл	Адгезионная прочность на отрыв, МПа			
	1 образец	2 образец	3 образец	Среднее значение
0,6	10,0	9,5	10	9,83
0,8	7,9	7,6	7,5	7,67
1,0	3,0	3,5	4,0	3,5

По данным табл. 2 были рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии и получено уравнение: $y = - 15,83 \cdot x + 19,66$. Проверка на адекватность по критерию Фишера показала, что уравнение адекватно, следовательно, может быть использовано для оптимизации.

На втором этапе был рассчитан шаг крутого восхождения $J = 0,25$. От

стехиометрического количества отвердителя $x = 1,25$ мл, с учетом этого шага, продолжили проведение эксперимента, пока наблюдалось увеличение параметра оптимизации y . Результаты представлены в табл. 3.

3. Результаты определения адгезионной прочности на отрыв на втором этапе

3. Results of the determination of adhesion tearing strength at the second stage

Количество отвердителя x , мл	Адгезионная прочность на отрыв, МПа			
	1 образец	2 образец	3 образец	Среднее значение
1,5	7,0	6,0	8,0	7,0
1,75	10,0	8,5	7,0	8,5
2	3,7	3,5	4,0	3,73

По данным табл. 3 были рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии и получено уравнение: $y = - 6,54 \cdot x + 17,84$. Проверка на адекватность по критерию Фишера показала, что уравнение неадекватно, следовательно,

была достигнута область близкая к экстремуму.

На рис. 3 представлен график с обобщенными результатами проведенных экспериментов согласно табл. 2 и 3.

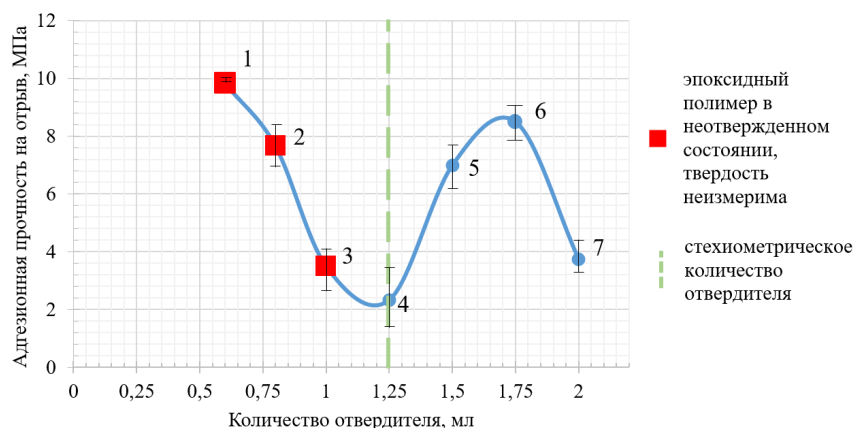


Рис. 3. Зависимость адгезионной прочности соединения эпоксидного полимера с металлом на отрыв от количества отвердителя в его составе

Fig. 3. Dependence of the adhesion strength of the combination of an epoxy polymer with a metal on the amount of hardener in its composition

По графику видно, что образуются два пика при количестве отвердителя 0,6 мл и 1,75 мл. Было выдвинуто предположение, что увеличение адгезионной прочности при низком содержании отвердителя может быть связано с наличием свободных эпоксидных групп, а при высоком содержании отвердителя с наличием свободных аминных групп при отверждении эпоксидного полимера.

На диаграмме (рис. 4) наблюдается экстремум в точке при количестве отвердителя 1,75 мл, что также может быть связано с

наличием свободных аминных групп при отверждении эпоксидного полимера. Поскольку при количестве отвердителя в составе ниже 1,25 мл эпоксидные полимеры по истечению 24 ч находились в неотвержденном состоянии и их твердость измерить не удалось, левый пик адгезионной прочности не учитывался. Оптимальным с точки зрения максимальной адгезионной прочности соединения эпоксидного полимера с металлом является состав с содержанием отвердителя ХТ-450 в количестве 1,75 мл.

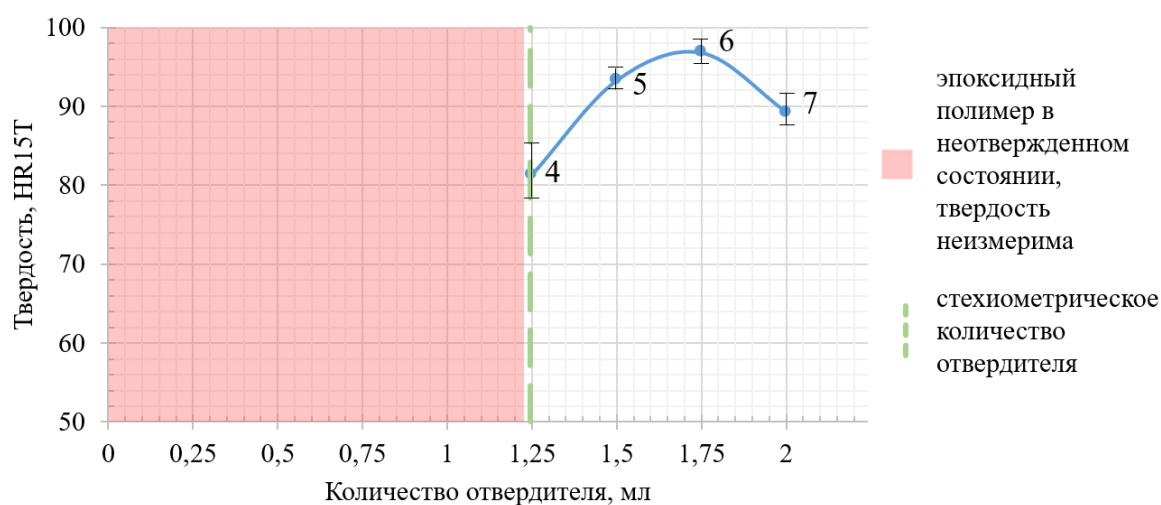


Рис. 4. Зависимость твердости эпоксидного полимера от количества отвердителя в его составе

Fig. 4. The dependence of the hardness of the epoxy polymer on the amount of hardener in its composition


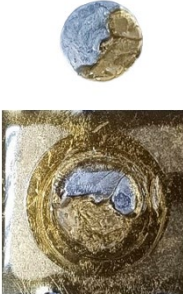


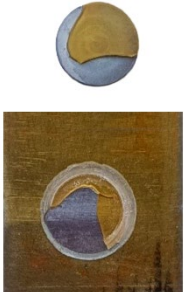


Адгезионная прочность соединения эпоксидного полимера с металлом на отрыв (рис. 3) коррелирует с твердостью эпоксидного полимера (рис. 4). Максимальное значение адгезионной прочности и твердости достигается при оптимальном соотношении эпоксидной смолы ЭД-22 и отвердителя ХТ-450. При дальнейшем увеличении количества

отвердителя эти показатели эпоксидного полимера ухудшаются.

В табл. 4 представлены результаты анализа характера разрушения соединения эпоксидного полимера с металлом. Приведены фотографии по одному из трех образцов, исследованных для каждого состава.

4. Анализ характера разрушения соединения эпоксидного полимера с подложкой

4. Analysis of the nature of the destruction of the epoxy polymer connection with the template

Номер состава	1	2	3	4
Внешний вид разрушения соединения				
Характер разрушения соединения	100 % В	100 % В	30 % В, 70 % -/У	75 % А/В, 25 % -/У
Номер состава	5	6	7	
Внешний вид разрушения соединения				
Характер разрушения соединения	80 % А/В, 20 % -/У	100 % А/В	100 % А/В	
<p><i>Примечание.</i> В соответствии с ГОСТ 32299-2013: А/В – адгезионное разрушение между окрашиваемой поверхностью и первым слоем покрытия; В – когезионное разрушение первого слоя покрытия; -/У – адгезионное разрушение между последним слоем покрытия и клеем.</p>				

Неотвержденный эпоксидный полимер (составы 1, 2 и 3) характеризуется когезионным разрушением соединения. При увеличении количества отвердителя в составе

эпоксидного полимера характер разрушения его соединения с металлом меняется с когезионного на адгезионное разрушение по слою

полимер / клей (составы 4, 5) и полимер / сталь (составы 6, 7).

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать выводы:

1. Используя метод Бокса-Уилсона, проведен поиск оптимального количества отвердителя в составе эпоксидного полимера с точки зрения максимальной адгезионной прочности его соединения с металлом на отрыв. Определено, что для 2,5 мл эпоксидной смолы ЭД-22 оптимальным является 1,75 мл отвердителя ХТ-450.

2. Адгезионная прочность соединения исследованного эпоксидного полимера с металлом на отрыв коррелирует с твердостью данного эпоксидного полимера. Максимальное значение адгезионной прочности и твердости достигается при оптимальном соотношении эпоксидной смолы ЭД-22 и отвердителя ХТ-450.

3. Неотвержденный эпоксидный полимер характеризуется когезионным разрушением его соединения с металлом. При увеличении количества отвердителя в составе эпоксидного полимера характер разрушения меняется на адгезионный по слою полимер / клей и полимер / сталь.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ткачева В.Э., Маркин А.Н., Кшнякин Д.В., Мальцев Д.И., Носов В.В. Коррозия внутрискважинного оборудования в сероводородсодержащих средах // Практика противокоррозионной защиты. 2021. Т. 26. № 2. С. 7–26. EDN: YFHMWQ.

2. Агафонов А.А., Наседкин И.Г., Новикова Н.В., Булдакова Н.С. Оценка эффективности применения магнитного индуктора для борьбы с АСПО на добывающем фонде ОАО «Удмуртнефть» // Инженерная практика. 2020. № 1. С. 20–24.

3. Вторенко Е.А., Валекжанин И.В., Латыпов О.А., Хакимов А.М. Определение скорости локальной коррозии насосно-компрессорных труб как необходимый элемент коррозионного мониторинга // Экспозиция Нефть Газ. 2024. № 4 (105). С. 40–44. EDN: NWXLIT.

4. Мустафин Ф.М., Чэнь Ц., Мустафин О.Ф., Халикова Д.Г., Гайнитдинов Б. Пассивная защита Трубопроводов от коррозии // Деловой журнал Neftegaz.RU. 2020. № (98). С. 86–90. EDN: LZWMZF.

5. Ладоскин А.И., Шовкун С.Ф. Механизм снижения затрат на ремонт и эксплуатацию нефтяного оборудования // Вестник Самарского государственного

технического университета. Серия: Экономические науки. 2013. № 4 (10). С. 36–42. EDN: RUOMNX.

6. Fayomi O.S.I., Akande I.G., Odigie S. Economic impact of corrosion in oil sectors and prevention: An overview // Journal of Physics: Conference Series. 2019. № 1378 (2). P.022037. DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022037.

7. Юдин П.Е., Петров С.С., Максимук А.В., Князева Ж.В., Прокудин А.В. Особенности эксплуатации насосно-компрессорных труб в условиях скважин коррозионного фонда // Коррозия Территории Нефтегаз. 2018. № 40 (2). С. 50–54.

8. Юдин П.Е. Функциональные покрытия погружного нефтепромыслового оборудования для защиты от коррозии, асфальтосмолопарафинных и солевых отложений: Обзор // Известия высших учебных заведений. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2025. Т. 19. № 1. С. 58–74. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-1-58-74>.

9. Даминов А.А., Рагулин В.В., Волошин А.И., Телин А.Г. Современная практика применения противокоррозионной защиты оборудования нефтедобывающих скважин // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2020. № 6. С. 30–44. EDN: YQNHXC.

10. Амосов А.П., Юдин П.Е., Акулинин А.А., Петров С.С. Обзор методов антикоррозионной защиты элементов ТЭК // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2014. № 3. С. 24–28. EDN: UDEJAD.

11. Родионова Е.Е., Кожаева А.В., Ахметгалиев Р.Р., Суяшев И.Ф. Анализ свойств покрытий, применяемых для защиты внутренней поверхности трубопроводов // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2023. № 4. С. 40–56. DOI: 10.17122/ogbus-2023-4-40-56.

12. Павлычева Е.А. Разработка полимерной композиции для получения защитного покрытия на металлических поверхностях // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2022. № 2. С. 33–36. EDN: IAUIYA.

13. Ильина В.Н., Гафарова В.А., Бугай Д.Е., Ильин С.В., Кузеев И.Р. Адгезионная и когезионная прочность композиционного материала с углеродными наполнителями для заделки трещин // Нефтегазовое дело. 2021. Т. 19. № 6. С. 124–133. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-124-133>.

14. Цветков Ю.Н., Власов М.Ю., Фиакистов Я.О. Адгезия эпоксидного компаунда к алюминиевой бронзе // Вестник астраханского государственного технического университета. Серия: морская техника и технология. 2024. № 3. С. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-3-49-57>.

15. Хаперских С.А., Анањева Е.С., Коркина А.А. Особенности структурообразования эпоксидной смолы в процессе отверждения аминным отвердителем // Ползуновский вестник. 2021. № 1. С. 179–186. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.025.

16. Шутова А.Л., Сабадаха Е.Н. Основы рецептуростроения лакокрасочных материалов. Минск: БГТУ. 2017. 126 с. EDN FNSRQD.

REFERENCES

1. Tkacheva V.E., Markin A.N., Kshnyakin D.V., Maltsev D.I., Nosov V.V. Corrosion of downhole equipment in hydrogen sulfur-containing environments. Theory and Practice of Corrosion Protection. 2021, vol. 26. No. 2. pp. 7–26. EDN: YFHMQW.
2. Agafonov A.A., Nasedkin I.G., Novikova N.V., Buldakova N.S. Evaluation of the efficiency of using a magnetic inductor for combat cutting with ARPD on the production fund of PJSC «Udmurtneft» // Engineering practice. 2020. No. 1. pp. 20–24.
3. Vtorenko E.A., Valekzhanin I.V., Latypov O.A., Khakimov A.M. Determination of the rate of local corrosion of tubing as a necessary element of corrosion monitoring // Exposition Oil Gas, 2024, issue 4, pp. 40–44. EDN: NWXLIT.
4. Mustafin F.M., Chen C., Mustafin O.F., Khalikova D.G., Gainitdinov B. Passive protection of Pipelines from corrosion // Business Magazine Neftegaz.RU 2020. no. (98). pp. 86–90. EDN: LZWMZF.
5. Ladoshkin A.I., Shovkun S.F. Cost reduction mechanism for repairs and maintenance oil equipment // Bulletin of Samara State Technical University. Issue: Economic Sciences. 2013. No. 4 (10). pp. 36–42. EDN: RUOMNX.
6. Fayomi O.S.I., Akande I.G., Odigie S. Economic impact of corrosion in oil sectors and prevention: An overview // Journal of Physics: Conference Series. 2019. No. 1378 (2). P. 022037. DOI: 10.1088/1742-6596/1378/2/022037.
7. Yudin P.E., Petrov S.S., Maksimuk A.V., Knyazeva Zh.V., Prokudin A.V. Features of operation of pumping and compressor pipes in conditions of wells of a corrosive fund // CorrosiyaTerritorii Neftegaz. 2018. No. 40 (2). pp. 50–54.
8. Yudin P.E. Functional coatings of submersible oil-field equipment for protection against corrosion, asphalt, resin, paraffin and salt deposits: Review // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Powder metallurgy and functional coatings. 2025, vol. 19. No. 1. pp. 58–74. <https://doi.org/10.17073/1997-308X-2025-1-58-74>.
9. Daminov A.A., Ragulin V.V., Voloshin A.I., Telin A.G. Current practice of anti-corrosion protection of oil well equipment // Problems of gathering, treatment and transportation of oil and oil products. 2020. No. 6. pp. 30–44. EDN: YQNHXC.
10. Amosov A.P., Yudin P.E., Akulinin A.A., Petrov S.S. Review of methods of anticorrosive protection of fuel and energy complex elements // Pipeline transport: theory and practice. 2014. No. 3. Pp. 24–28. EDN: UDEJAD.
11. Rodionova E.E., Kozhaeva A.V., Akhmetgaliev R.R., Suyashev I.F. Analysis of the properties of coatings used to protect the inner surface of pipelines // Electronic scientific journal Oil and Gas Business. 2023. No. 4. pp. 40–56. DOI: 10.17122/ogbus-2023-4-40-56.
12. Pavlycheva E.A. Development of polymer composition for obtaining a protective coating on metal surfaces // International Journal of Applied and Fundamental Research. 2022. No. 2. pp. 33–36. EDN: IAUIYA.
13. Ilyina V.N., Gafarova V.A., Bugai D.E., Ilyin S.V., Kuzeev I.R. Adhesive and cohesive strength of composite materials with carbon fillers for sealing cracks. 2021. Vol.19. No. 6. pp. 124–133. DOI: <https://doi.org/10.17122/ngdelo-2021-6-124-133>.
14. Tsvetkov Yu.N., Vlasov M.Yu., Fiaktistov Ya.O. Adhesion of epoxy compound to aluminum bronze // Bulletin of Astrakhan State Technical University. Series: marine engineering and technology. 2024. No. 3. pp. 49–57. DOI: <https://doi.org/10.24143/2073-1574-2024-3-49-57>
15. Khaperskikh S.A., Ananyeva E.S., Korkina A.A. Structure formation features of epoxy resin during cure process with amine hardener // Polzunovskiy vestnik. 2021. No. 1. pp. 179–186. DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.01.025
16. Shutova A.L., Sabadakha E.N. Fundamentals of formulation of paint and varnishes. Minsk: BSTU. 2017. 126 p. EDN FNSRQD.

Статья поступила в редакцию 18.01.2026; одобрена после рецензирования 14.04.2026; принята к публикации 27.04.2026.

The article was submitted 18.01.2026; approved after reviewing 14.04.2026; assepted for publication 27.04.2026.