Нефтегазовое дело. 2025. Т. 23, № 1. С. 77-90. ISSN 2073-0128 (print)
Petroleum Engineering. 2025. Vol. 23. No. 1. P. 77-90. ISSN 2073-0128 (print)
Научная статья
УДК 691.175.5/.8
DOI: 10.17122/ngdelo-2025-1-77-90

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВОБОДНОЙ ПЛЕНКИ ПОКРЫТИЯ

Максим Валерьевич Богатов[1,2], Павел Евгеньевич Юдин[1,2], Дмитрий Александрович Майдан[2]

[1]ООО «НПЦ «Самара», Самара, Россия
[2]Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Автор, ответственный за переписку
Максим Валерьевич Богатов, bogatov@npcsamara.ru

Аннотация. Внедрение современных внутренних полимерных покрытий нефтепроводных и насосно-компрессорных труб ведет к значительному повышению надежности и эксплуатационной безопасности объектов топливно-энергетического комплекса. Большинство вертикально интегрированных нефтяных компаний перешагнули порог 50 % по вновь строящемуся парку трубопроводов, защищенных внутренними покрытиями, а такие компании, как ООО «ЛУКОЙЛ Западная Сибирь» и ОАО «Сургутнефтегаз» приблизились к показателю 100 %. Однако, до сих пор нет внедренных методов диагностики труб с внутренними покрытиями (ВП).
В связи с этим важной задачей является прогнозирование ресурса внутренних полимерных покрытий труб. Лабораторные методы исследования позволяют в короткие сроки и с наименьшими затратами смоделировать условия эксплуатации внутренних полимерных покрытий. Исходя из этого, можно сделать вывод о целесообразности применения различных видов внутренних полимерных покрытий для сопротивления воздействию коррозионно-агрессивной среды. Одним из основных факторов в снижении физико-механических свойств внутренних полимерных покрытий является процесс водопоглощения. Поскольку данный процесс протекает в первые сутки от начала эксплуатации, дальнейшее взаимодействие со средой и обеспечение барьерных свойств происходят в водонасыщенном состоянии. Как показал эксперимент, наблюдаются значительные отличия физико-механических свойств, изменение которых не учитывается при оценке и прогнозировании ресурса внутренних полимерных покрытий. В первом приближении описать процесс водопоглощения полимерного покрытия можно следующим образом: процесс адсорбции компонентов среды → диффузионное проникновение компонентов среды в слой покрытия → деформация межмолекулярных связей→ начало процесса деструкции полимера. Результаты проведенных исследований показали, что существует предел насыщения свободной пленки полимерного покрытия, который в моделируемых условиях автоклавного теста составляет 20 суток, после чего данный процесс прекращается. Наиболее значимым с практической точки зрения результатом является снижение температуры стеклования на 30 °С по сравнению с исходным состоянием. При выборе максимально допустимой температуры эксплуатации можно рассматривать параметр Tg-30 °С как первый ориентировочный и далее, с учетом этого, планировать комплекс испытаний по ГОСТ Р 58346-2019.

Ключевые слова
свободная пленка полимерного покрытия; водопоглощение; автоклавный комплекс; предел насыщения; физико-механические свойства; осложняющие факторы

© Богатов М.В., Юдин П.Е., Майдан Д.А., 2025

Для цитирования
Богатов М.В., Юдин П.Е., Майдан Д.А. Влияние процесса водопоглощения на физико-механические свойства свободной пленки покрытия // Нефтегазовое дело. 2025. Т. 23, № 1. С. 77-90. https://doi.org/10.17122/ngdelo-2025-1-77-90.

Original article

INFLUENCE OF WATER ABSORPTION PROCESS ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FREE COATING FILM

Maxim V. Bogatov[1,2], Pavel E. Yudin[1,2], Dmitry A. Maidan[2]

[1]RPC Samara Ltd» LLC, Samara, Russia
[2]Samara State Technical University, Samara, Russia

Corresponding author
Maxim V. Bogatov, bogatov@npcsamara.ru

Abstract. Implementation of modern internal polymer coatings of oil pipelines and pump-compressor pipes leads to a significant increase in the reliability and operational safety of fuel and energy complex facilities. Most vertically integrated oil companies have crossed the 50 % threshold for newly built pipeline fleet protected by internal coatings, and such companies as LUKOIL Western Siberia LLC and Surgutneftegaz OJSC have approached 100 %. However, there are still no implemented methods for diagnosing pipes with internal coatings (IC). In this regard, an important task is to predict the resource of internal polymer coatings of pipes. Laboratory research methods allow simulating the operating conditions of internal polymer coatings in a short time and with the least cost. Based on this, we can conclude that it is advisable to use various types of internal polymer coatings to resist the effects of a corrosive environment. One of the main factors in reducing the physical and mechanical properties of internal polymer coatings is the process of water absorption. Since this process occurs during the first day from the start of operation, further interaction with the environment and provision of barrier properties occur in a water-saturated state. As the experiment showed, significant differences in physical and mechanical properties are observed, the change of which is not taken into account when assessing and predicting the resource of internal polymer coatings. In a first approximation, the process of water absorption by a polymer coating can be described as follows: the process of adsorption of the components of the medium → diffusion penetration of the components of the medium into the coating layer → deformation of intermolecular bonds → the beginning of the process of destruction of the polymer. The results of the studies showed that there is a saturation limit of the free film of the polymer coating, which in the simulated conditions of the autoclave test is 20 days, after which this process stops. The most significant, from a practical point of view, result is a decrease in the glass transition temperature by 30 °C compared to the initial state. When selecting the maximum permissible operating temperature, the parameter Tg-30 °C can be considered as the first approximate one and then, taking this into account, plan a set of tests according to State Standard R 58346-2019.

Keywords

free film of polymer coating; water absorption; autoclave complex; saturation limit; physical and mechanical properties; complicating factors

For citation
Bogatov M.V., Yudin P.E., Maidan D.A. Vliyanie processa vodopogloshcheniya na fiziko-mekhanicheskie svojstva svobodnoj plenki pokrytiya // [Influence of water absorption process on physical and mechanical properties of free coating film] // *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2025, Vol. 23, No. 1. pp. 77-90. [in Russian]. https://doi.org/10.17122/ngdelo-2025-1-77-90

Введение

Переход нефтяной промышленности на позднюю стадию разработки месторождений затрудняется различными осложняющими факторами [1–3]. Наиболее распространенными являются: повышенная минерализация, высокая обводненность нефтяного флюида, высокий газовый фактор, образование асфальтосмолопарафиновых отложений и неорганических солеотложений, коррозионно-эрозионный износ и т.д. [4–6]. Все эти осложняющие процессы могут присутствовать как в отдельности, так и в различной совокупности друг с другом, что может привести к синергетическому эффекту в развитии и интенсификации коррозионных процессов внутри насосно-компрессорных труб (НКТ) и в нефтегазопроводных трубах (НГПТ). Благодаря развитию коррозионных процессов добывающие компании несут большие издержки по добыче полезных ископаемых. Поэтому существуют методы защиты от внутренней коррозии НКТ и НГПТ: выбор соответствующего коррозионностойкого материала исполнения труб, либо использование неметаллических материалов в качестве футеровки, применение ингибиторов коррозии, поглотителей кислорода, биоцидов, металлических и неметаллических облицовок или покрытий [7–10]. Практика использования (полимерных) трубных покрытий и материалов при добыче и транспортировке нефти и газа становится наиболее популярной и является надежным решением для замедления или исключения процессов коррозии. Помимо барьерных свойств полимерные покрытия также снижают гидравлическое сопротивление за счет низкой шероховатости, защищают трубные изделия от сорбционно-механического износа, сокращают частоту ремонтов, обеспечивают теплоизоляцию труб, исключают использование высоколегированных сталей, ингибиторов коррозии и т.д. [11]. Однако проникновение транспортируемой среды в барьерный слой и в пространство между трубой и покрытием возможно, как при воздействии на систему различными факторами (высокая температура более 130 °С, повышенное давление ~100 атм., наличие коррозионно-активных газов O_2, CO_2, H_2S), так и при нормальных условиях, что, в свою очередь, ограничивает их применение. Различные провоцирующие факторы (давление, температура, коррозионно-активная среда) влияют на функциональные параметры внутренних полимерных покрытий путем снижения их физико-механических свойств. Происходит ухудшение эксплуатационных характеристик. С течением времени полимерное покрытие теряет свое непосредственное предназначение — защита трубной продукции от воздействия коррозионно-агрессивной среды [12–14]. В настоящее время тестирование внутренних трубных покрытий на комплекс свойств производится согласно ГОСТ Р 58346-2019 [15]. В данном нормативном документе для прогнозирования ресурса отражены эксперименты гидротермальных выдержек в моделируемых условиях автоклавного комплекса. Основным критерием оценки снижения физико-механических свойств покрытия является адгезионная прочность методом отрыва [16]. Данный параметр является количественным, но недостаточным для того, чтобы в полной мере оценить снижение физико-механических свойств внутреннего полимерного покрытия в дальнейших условиях эксплуатации.

Существуют различные методики ускоренных лабораторных испытаний, которые позволяют сделать вывод о способности покрытий сопротивляться осложняющим факторам: моделирование условий образования асфальтосмолопарафиновых отложений [17, 18], моделирование процесса образования неорганических солеотложений [19], моделирование условий поведения покрытий в автоклавном комплексе (прогнозирование коррозионных процессов под слоем покрытия) [20]. Исходя из наличия лабораторного оборудования и потребности в моделировании условий поведения внутреннего полимерного покрытия, эксперимент по определению насыщения и изменению физико-механических свойств в условиях автоклавного теста в коррозионно-активной среде является актуальным исследованием. Данный метод испытания позволяет за короткий промежуток времени сделать предположение об эксплуатационных характеристиках внутреннего полимерного покрытия для конкретных условий эксплуатации [21–23].

Целью данной работы является определение влияния процесса водопоглащения на изменение физико-механических свойств внутреннего полимерного покрытия, применяемого в нефтегазовой отрасли.

Методы

В качестве объекта исследования было взято наиболее распространенное полимерное покрытие (свободная пленка формата А4) марки ПЭП-585. Данное покрытие предоставлено заводом изготовителем и отверждено при условиях, указанных в таблице 1. Средняя толщина полимерного покрытия находится в диапазоне от 0,6 до 1,3 мм. Основные технологические параметры, свойства и структура полимерного покрытия марки ПЭП-585 представлены в таблице 1 [24] и на рисунке 1.

Микроструктура покрытия (рисунок 1) имеет эпоксидную основу, в качестве наполнителей используются сульфид бария $BaSO_4$, тальк ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), кварц (SiO_2), диоксид титана (TiO_2), которые равномерно распределены по всему объему полимерной матрицы.

Условия по определению насыщения полимерного покрытия были следующие:

— коррозионно-активный газ 1±0,5 МПа H_2S;

— общее давление в системе 5±0,5 МПа N_2;

— температура 80±3 °С;

— электролит раствор хлористого натрия в дистиллированной воде, с массовой долей 3 %, объем составлял 4±0,1 л.

Образцы из свободной полимерной пленки размерами 20×20xt мм (t-толщина покрытия) в количестве 3 шт, маркировались, взвешивались с точностью 0,1 мг, помещались в испытательный автоклавный комплекс, представленный на рисунке 2. В течение 5 минут производилась продувка азотом для удаления адсорбционного кислорода с поверхности

Таблица 1. Основные технологические параметры материала и свойства ПЭП-585

Table 1. Main technological parameters of the material and properties of PEP-585

Марка порошковой краски	Температура, °С		Время		Растекаемость, см	Плотность, г/см^3
	Предварительного нагрева	Полимеризации	Полимеризация, мин	Гелеобразование, с		
ПЭП-585	180-220	180-185	20	70-80	6-8	1,38

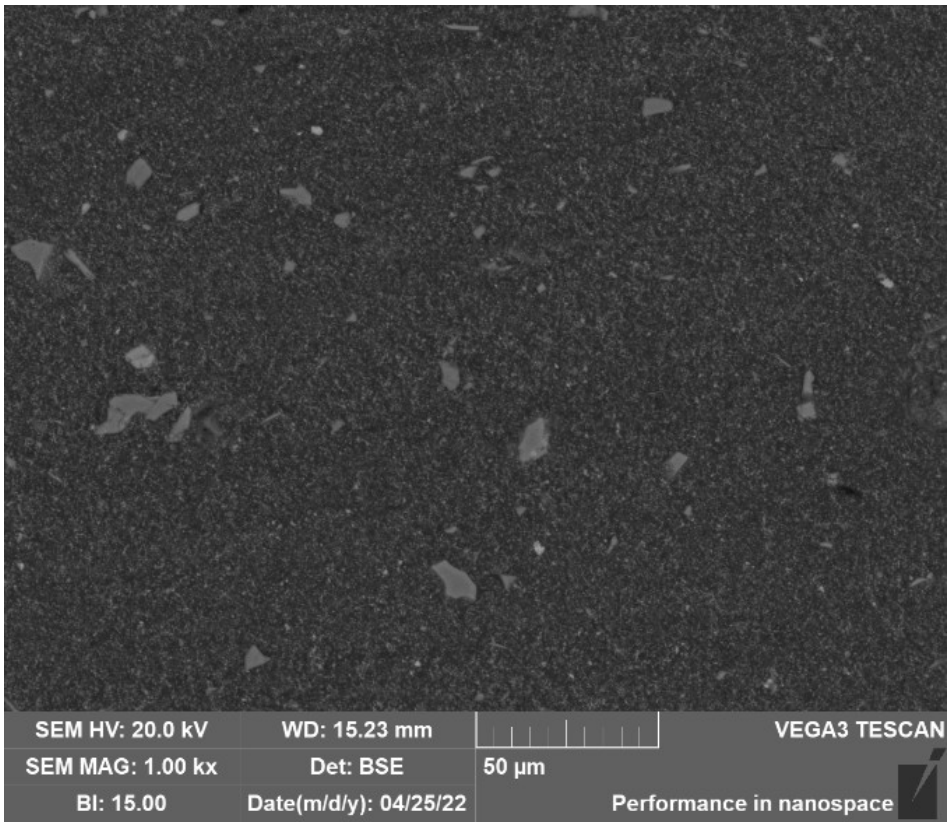


Рисунок 1. Микроструктура полимерной пленки марки ПЭП-585

Figure 1. Microstructure of polymer film grade PEP-585

образцов и из раствора электролита. Сбрасывали давление азота до атмосферного. В автоклав подавали H_2S при температуре 20±5 °С. Испытательную среду выдерживали до наступления равновесия, при необходимости добавляли H_2S до заданного давления. Производили нагрев до температуры 80±3 °С и после выхода на режим добавляли азот до общего давления. После заданного времени выдержки производили отключение нагрева и сброс давления. Извлекали образцы, промокали их с помощью фильтровальной бумаги и производили взвешивание, затем определяли водопоглощение (С) согласно формуле (1). За результат проведения испытания принимали среднеарифметическое значение трех показателей, полученных при одинаковой продолжительности выдержки в автоклавном комплексе. В данном эксперименте были выбраны следующие промежутки времени для определения параметра насыщения (4 ч.; 12 ч.; 24 ч.; 3 сут.; 7 сут.; 10 сут.; 20 сут.):

$$C = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100\ \%, \qquad (1)$$

где m_1 — масса испытуемого образца до проведения эксперимента, мг; m_2 — масса испытуемого образца после проведения эксперимента, мг.

После экспозиции в автоклавном комплексе, помимо нахождения предела насыщения, испытывали образцы для определения предела прочности и относительного удлинения полимерного покрытия (рисунок 3). Из свободной пленки полимерного покрытия изготовили «лопатки», так как корректным образом невозможно осуществить условия проведения испытания согласно ГОСТ 18299-72 [25]. Данный нормативный документ предусматривает изготовление образцов прямоугольной формы, которые рвутся в захватах разрывной машины. Согласно нормативной документации «п. 4.4. Образцы, которые в процессе испытания разрушаются за пределами рабочей части или перед зажимами, в расчет не принимаются». В связи с этим были изготовлены образцы по ГОСТ 11262-2017 (тип 1), которые за счет своей формы подразумевают разрыв в рабочей зоне [26]. За результат проведения испытания принимали среднеарифметическое значение трех значений, полученных при одинаковой продолжительности выдержки в автоклавном комплексе.

Термокинетические характеристики покрытия регистрировали с помощью дифференциального сканирующего калориметра (DSC NETZSCH 214 Polyma), согласно стандарту (CSA Z245.20Series:22) [27]. Изначально на первой пробе (проба №1) определялась температура стеклования образца (T_g). Затем регистрировался параметр изменения температуры стеклования с течением экспозиции образцов после выдержки (ΔT_g) (проба №2). Вес испытуемого образца составлял 10±1 мг, скорость нагрева 10 К/мин, газообразная

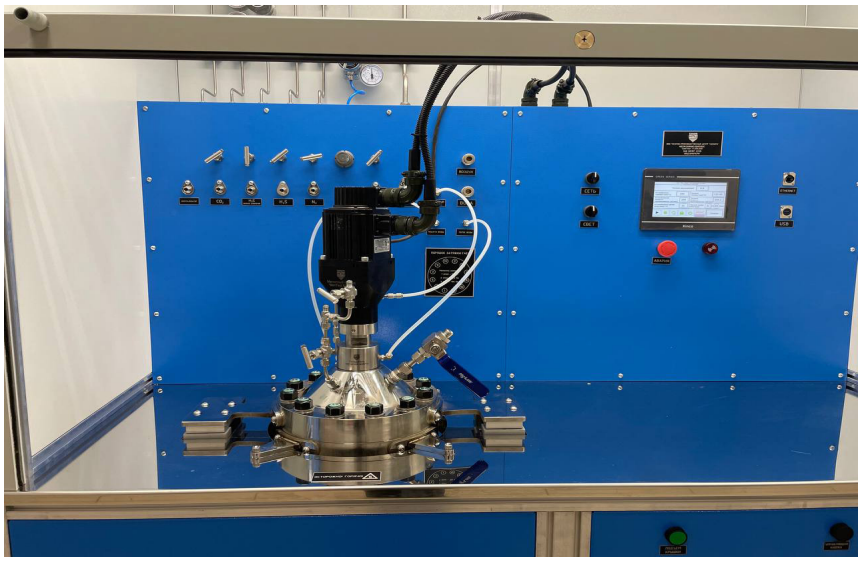


Рисунок 2. Автоклавный комплекс, предназначенный для моделирования условий эксплуатации трубной продукции при извлечении нефтяного флюида

Figure 2. Autoclave complex designed to simulate operating conditions of tubular products during extraction of petroleum fluid

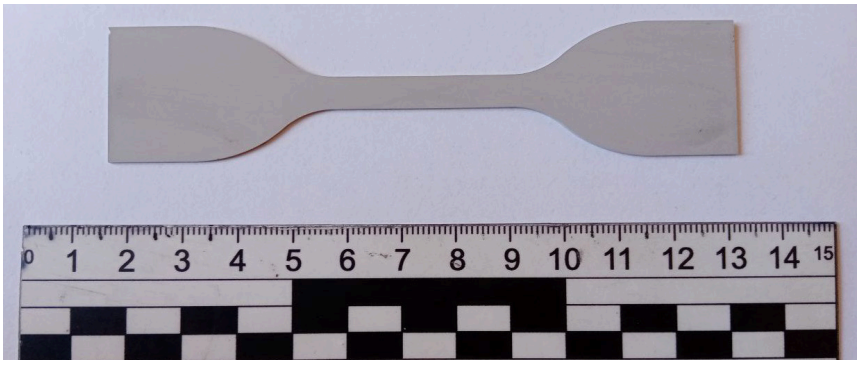


Рисунок 3. Схематичное изображение лопаток для проведения испытаний согласно ГОСТ 11262-2017, (тип 1)

Figure 3. Schematic illustration of blades for testing according to SS 11262-2017 (type 1)

среда — аргон, температурные режимы нагрева представлены в таблице 2. Было проведено по три испытания, и определялось среднеарифметическое значение полученных результатов измерения.

Также был определен параметр твердости покрытия по Бухгольцу согласно ISO 2815-2003 [28]. За результат проведения испытания, так же как и в предыдущих испытаниях, принимали среднеарифметическое значение трех значений, полученных при одинаковой продолжительности выдержки в автоклавном комплексе.

Результаты

Зависимость водопоглощения от времени можно описать логарифмической функцией, где предельное насыщение наступает на 10-е сутки эксперимента и составляет приблизительно 3 % масс. (рисунок 4). Далее график зависимости будет представлять из себя прямую, параллельную оси абсцисс, где насыщение полимерной пленки во времени останавливается. При этом, при выдержке в нормальных условиях максимальное водопоглощение составляет 0,52 % масс. за такой же промежуток времени. Следовательно, корректная оценка изменения физико-механических свойств, происходящих в покрытии и при эксплуатации в составе колонны НКТ или нефтепровода, возможна только при автоклавных тестах.

Характеристика ΔT_g (рисунок 5) описывается несколькими зависимостями: логарифмической и линейной. До 3 суток происходит интенсивное насыщение полимерной пленки, далее график функции описывается линейной зависимостью, значение которой постоянно во времени и составляет ΔT_g приблизительно 30 °C. В данном случае пластификация полимерной основы вызвана деформацией межмолекулярных связей и обусловлена поглоще-

Таблица 2. Режимы нагрева полимерной пленки для определения термокинетических характеристик покрытия

Table 2. Polymer film heating modes for determining the thermokinetic characteristics of the coating

1. Нагрев 1-ой пробы от (25±3 °C) до (285±3 °C)	Определяем: T_g A= T_g-40 °C B= T_g+10 °C D= $T_{\text{начало деструкции}}$ + 30 °C
2. Нагрев 2-ой пробы от A до B	Выдержите изотермически в Вв течение 1,5 мин., затем немедленно охладите до A;
3. Нагрев 2-ой пробы от A до D	Затем немедленно охладите до A; Определяем T_{g3}; Определяем E= T_{g3} + 50 °C
4. Нагрев 2-ой пробы от A до E	Определяем T_{g4}
$\Delta T_g = \vdots T_{g4} - T_{g3} \vdots$	

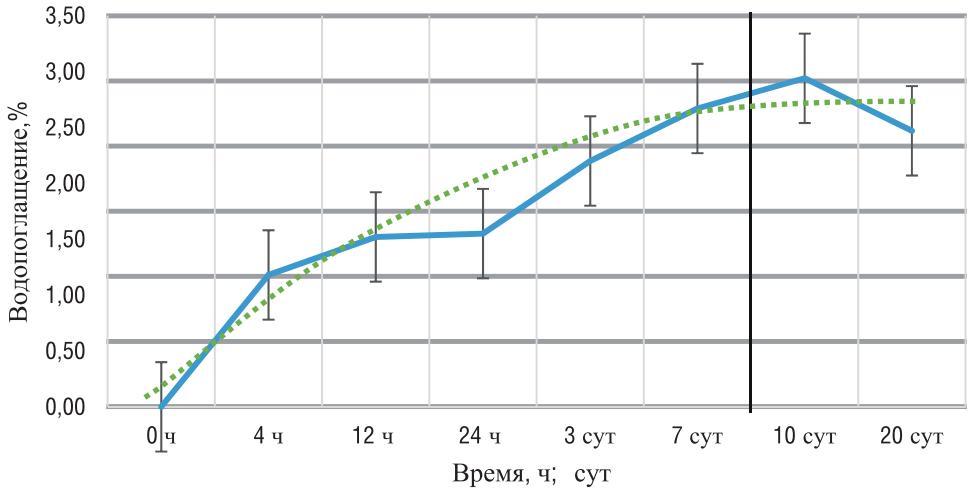


Рисунок 4. Зависимость водопоглощения тестируемых полимерных образцов от времени экспозиции

Figure 4. Dependence of water absorption of the tested polymer samples on exposure time

нием воды. Она имеет предел, после которого удлинение связей невозможно. Последующие процессы будут приводить к разрыву связей (деструкции полимера). Насыщение полимера электролитом в размере около 3 % масс. является предельным. Аналогичные явления наблюдаются при длительном хранении труб на открытом воздухе, при котором происходит постепенный, плавный рост ΔT_g (рисунок 6). До сих пор определение ΔT_g как критерия степени полимеризации является не только сдаточным (в течение суток после нанесения покрытий), но и приемочным критерием, что приводит к неоправданной отбраковке. Эксперимент показывает, что сушка полимера при температуре 110 °С в течение 10–15 минут, приводит к возврату показателя ΔT_g в референсные значения ±3 °С (рисунок 7).

При насыщении полимерной пленки раствором электролита происходит снижение механических свойств покрытия. Вначале происходит небольшое увеличение прочностных свойств полимерной пленки за счет процесса пластификации. Затем происходит снижение свойств и выход на плато после 24 часов выдержки в моделируемой среде. В целом, показатель прочности при разрыве полимерных образцов уменьшается на 22 % от исходного значения (рисунок 8). График функции, как и в предыдущем случае, описывается логарифмической и линейной зависимостью.

При процессе насыщения полимерного покрытия электролитом происходит уменьшение поверхностной твердости на 36 % от исходного значения (рисунок 9). Стоит отметить, что как в одном, так и в другом случае,

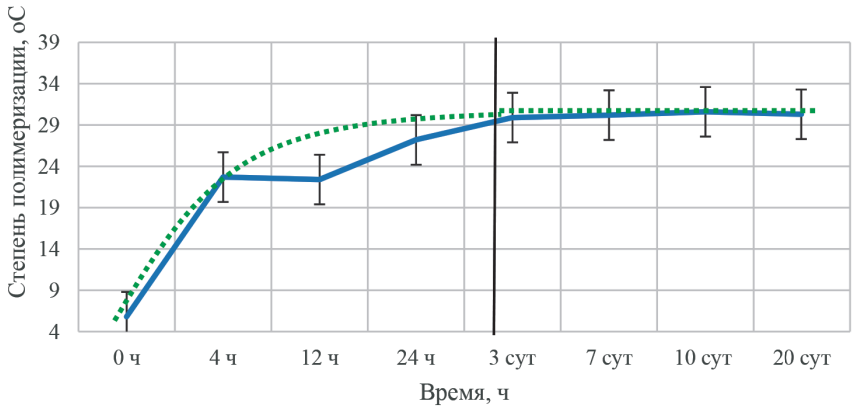


Рисунок 5. Зависимость изменения температуры стеклования тестируемых полимерных образцов от времени экспозиции

Figure 5. Dependence of the change in glass transition temperature of the tested polymer samples on the exposure time

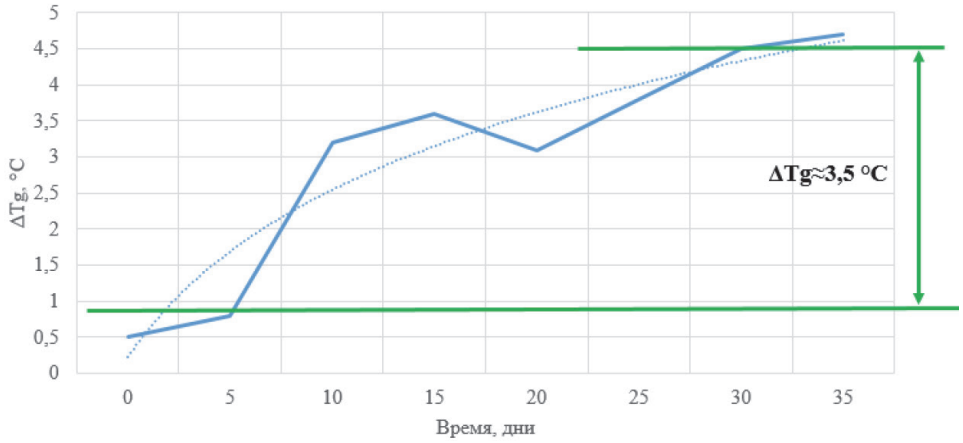
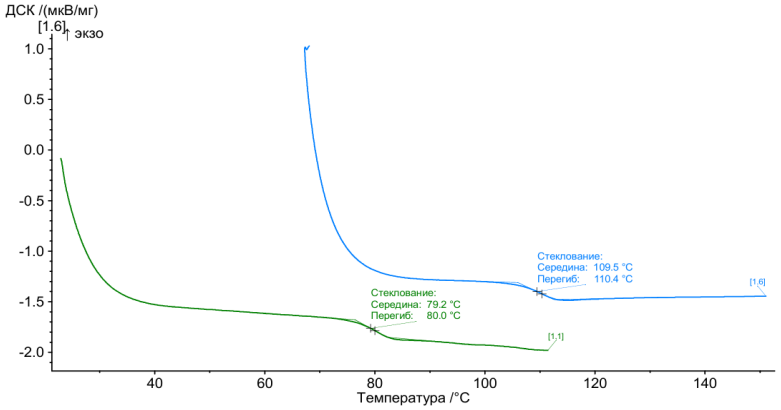
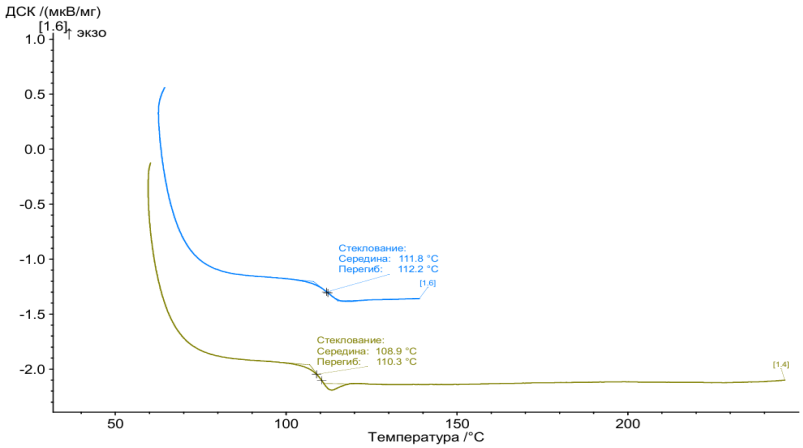


Рисунок 6. Зависимость изменения температуры стеклования полимерных образцов от времени выдержки при нормальных условиях

Figure 6. Dependence of the change in the glass transition temperature of the tested polymer samples on the holding time under normal conditions



а) ΔT_g = 30,3 °C



б) ΔT_g = 2,9 °C

а) после водопоглощения в течение 20 суток; б) сушка в течение 15 минут при 110 °C

a) after water absorption for 20 days; b) drying for 15 minutes at 110 °C

Рисунок 7. Термограммы покрытия ПЭП-585

Figure 7. Thermograms of the PEP-585 coating

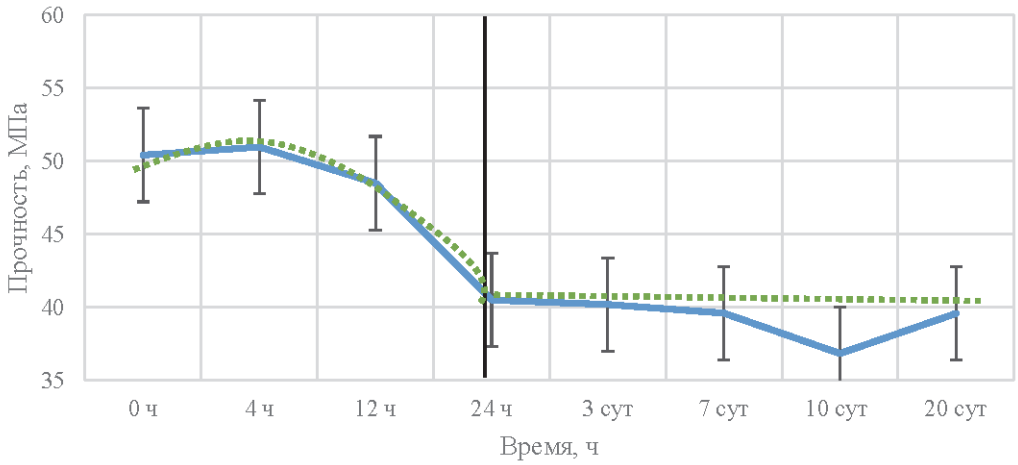


Рисунок 8. Зависимость предела прочности тестируемых полимерных образцов от времени экспозиции

Figure 8. Dependence of the tensile strength of the tested polymer samples on the exposure time

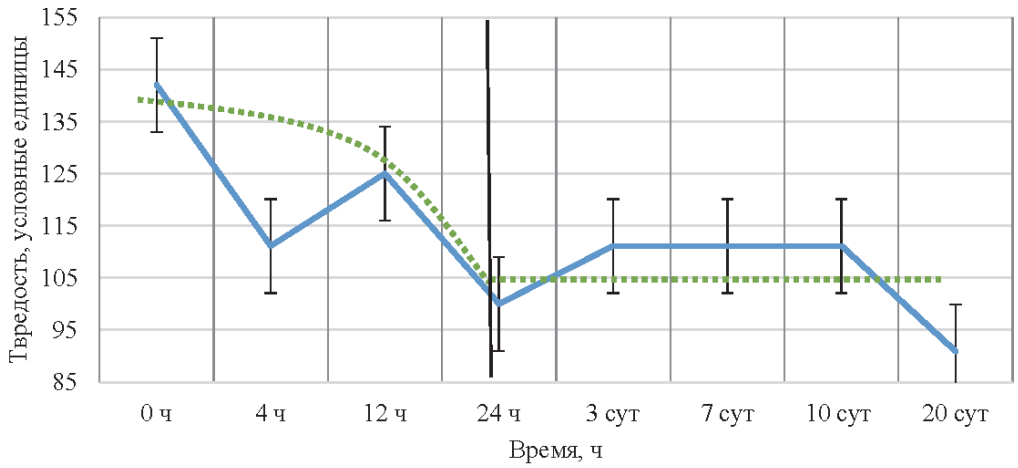


Рисунок 9. Зависимость твердости по Бухгольцу тестируемых полимерных образцов от времени экспозиции

Figure 9. Dependence of the Buchholz hardness of the tested polymer samples on the exposure time

механические показатели имеют тенденцию к выходу на стационарный режим после 24 часов выдержки в автоклавном комплексе, при заданных режимах моделирования. Вероятно, процесс снижения механических свойств связан с процессами массопереноса и диффузии, в результате чего происходит переориентация межмолекулярных связей.

Водопоглощение не сказывается на изменении относительного удлинения за исключением снижения 15 % при 1 % электролита в полимере (рисунок 10).

Обсуждение

Процесс водопоглощения полимерного покрытия, по мнению авторов, можно описать по следующей схеме: адсорбция компонентов испытательной жидкости на поверхности полимерного покрытия → диффузионное проникновение компонентов среды в поры и микродефекты без химического взаимодействия с полимером → деформация межмолекулярных связей; ухудшение механических свойств; снижение температуры стеклования (все эти процессы могут протекать параллельно) → начало процесса деструкции полимера.

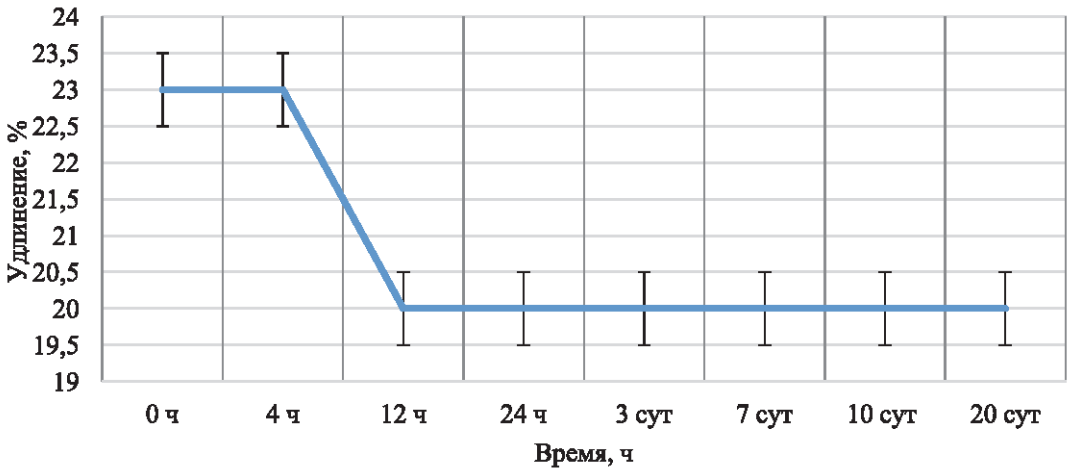


Рисунок 10. Зависимость относительного удлинения тестируемых полимерных образцов от времени экспозиции

Figure 10. Dependence of relative elongation of the tested polymer samples on exposure time

Полученные результаты показывают, что процесс водопоглощения с течением времени имеет предел насыщения и носит конечный характер при моделировании в условиях автоклавного теста. Насыщение полимерного покрытия происходит за 20 суток и после данный процесс завершается. Помимо этого, установлено, что процесс водопоглащения значительно изменяет физико-механические свойства покрытий.

Выводы

1. Установлено, что с течением времени за счет процесса водопоглощения происходит насыщение полимерного покрытия раствором электролита и снижение температуры стеклования исследуемого образца на величину приблизительно 30 °С. В связи с этим при выборе максимально допустимой температуры эксплуатации труб с внутренним полимерным покрытием необходимо учитывать T_g — 30 °С как первый ориентировочный и далее, с учетом этого, планировать комплекс испытаний по ГОСТ Р 58346-2019.

2. Определено, что показатель ΔT_g с течением времени увеличивается при открытом хранении труб не менее, чем на 3,5 °С от исходного. Покрытие способно к возврату ΔT_g после термического воздействия в референсные значения ±3 °С.

3. Показано, что при проведении эксперимента наблюдается изменение физико-механических свойств, которые не учитываются при оценке и прогнозировании ресурса внутренних полимерных покрытий.

4. Показано, что ключевым фактором в изменении физико-механических свойств внутреннего полимерного покрытия в начальные моменты эксплуатации, является процесс насыщения жидкостью, а не процесс деструкции.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шаймарданов К.Н., Нотфуллин Н.Д. Повышение эффективности выработки запасов нефти на поздней стадии разработки месторождения // СТАРТ в НАУКЕ — 2022: сб. ст. II Междунар. науч.-исслед. конк.: в 2 ч. Петрозаводск: Международный центр научного партнерства «Новая Наука», 2022. С. 71–75. EDN: BVUDXB.

2. Рафиков Р.Б., Чиркунов А.П., Вафин Р.В. Подходы и технологии снижения обводнённости добываемой продукции на поздней стадии разработки нефтяного месторождения // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2021. № 3. С. 20-35. DOI: 10.17122/ntj-oil-2021-3-20-35. EDN: QFILXN.

3. Бакиров Д.Л., Бабушкин Э.В., Щербаков А.В., Баранников Я.И., Русских Е.В., Денисова Е.В. Новые подходы к оптимизации схем кустования на поздней стадии разработки месторождений // Бурение и нефть. 2021. № 4. С. 9-12. EDN: TVMMAS.

4. Насыров А.М., Галикеев И.А., Насыров В.А. Эксплуатация месторождений нефти в осложненных условиях. Ижевск: Парацельс Принт, 2015. 354 с.

5. Сургаева Е.С., Юдин П.Е., Амосов А.П. Разрушение внутренних антикоррозионных полимерных покрытий нефтепромысловых труб при эксплуатации. // Безопасность техногенных и природных систем. 2024. № 4. С. 90-100. DOI: 10.23947/2541-9129-2024-8-2-90-100. EDN: CHUJHA.

6. Князева Ж.В., Юдин П.Е., Петров С.С., Максимук А.В. Применение металлизационных покрытий для защиты погружных электродвигателей насосного обо-

рудования от воздействия осложняющих факторов в нефтяных скважинах // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2020. № 1. С. 75-86. DOI: 10.17073/1997-308X-2020-75-86. EDN: UIKEZS.

7. Маркин А.Н., Низамов Р.Э. CO_2-коррозия нефтепромыслового оборудования. М.: ОАО «ВНИИОЭНГ». 2003. 188 с.

8. Сорокин В.В., Пичкунов А.П. Основные методы защиты магистральных трубопроводов от коррозии изоляционными материалами // Дальний Восток: проблемы развития архитектурно-строительного комплекса. 2017. № 1. С. 357–360. EDN: ZXJIIL.

9. Бейсембаева К.А., Балмасов Д.Т. Защита стальных материалов методами ингибиторов сопряженного процесса коррозии и наводораживания в кислой нефтяной среде // Вестник современной науки. 2015. № 2. С. 32-35. EDN: RWXKHX.

10. Хайдерсбах Р. Защита от коррозии и металловедение оборудования для добычи нефти и газа. Санкт-Петербург: Профессия. 2015. 480 с.

11. Маркин А.Н., Низамов Р.Э., Суховерхов С.В. Нефтепромысловая химия: практическое руководство. Владивосток: Дальнаука, 2011. 288 с.

12. Мяленко Д.М. Влияние термического, радиационно-химического и фотометрического воздействия на деструктцию и «старение» полимерных материалов // Актуальные вопросы молочной промышленности, межотраслевые технологии и системы управления качеством. 2020. № 1. С. 406-411. DOI: 10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-406-411. EDN: TMXMFF.

13. Мингаряев Н.Н. Прогнозирование старения полимерных материалов и покрытий // Междун. молодёж. науч. конф., посвящен. 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ: XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых). Казань: Индивидуальный предприниматель Сагиева А.Р., 2021. С. 498-500. EDN: MBUMNA.

14. Сарваева Г.А., Павлов М.Р., Лаптев А.Б. Определение и прогнозирование изменения свойств полимерных композиционных материалов при высокотемпературном старении // Полимерные композиционные материалы и производственные технологии нового поколения: сб. док. V всерос. науч.-технич. конф. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», 2021. С. 114-131. EDN: FDYMVR.

15. ГОСТ Р 58346-2019. Национальный стандарт Российской Федерации. Трубы и соединительные детали стальные для нефтяной промышленности. Покрытия защитные лакокрасочные внутренней поверхности. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2019. 23 с.

16. ГОСТ 32299-2013. Межгосударственный стандарт. Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом отрыва. М.: Стандартинформ, 2013. 15 с.

17. Пат. RU 202556 U1 РФ. Лабораторно-исследовательский циркуляционный стенд для испытаний методов противодействия процессам седиментации и коррозии в колонне насосно-компрессорных труб / Н.А. Баранов, М.В. Желдак, Е.А. Макаров, П.Е. Юдин, А.В. Максимук, С.С. Петров, И.С. Трофимов, М.В. Богатов. 2020112059, Заявлено 23.03.2020; Опубл. 24.02.2021. Бюл. № 6.

18. Пат. RU 2802764 C1 РФ. Лабораторный испытательный стенд для воспроизведения эксплуатационных условий внутри погруженной в нефтяную скважину колонны насосно-компрессорных труб при испытаниях различных методов противодействия коррозии и седиментации / А.В. Максимук, П.Е. Юдин, А.Г. Веревкин, М.В. Желдак, М.В. Богатов, Д.В. Берков, Д.А. Крысина, Д.С. Вязгин, А.В. Иванов. 2022134462, Заявлено 26.12.2022; Опубл. 01.09.2023. Бюл. № 25.

19. Пат. RU 2825169 C1 РФ. Лабораторный исследовательский стенд для оценки стойкости внутренних покрытий нефтепромысловых труб к неорганическим солеотложениям / А.В. Максимук, П.Е. Юдин, А.Г. Веревкин, М.В. Желдак, И.И. Костюк, Д.В. Берков. 2023115483, Заявлено 13.06.2023; Опубл. 21.08.2024. Бюл. № 24.

20. Пат. RU 130878 U1. Лабораторный автоклав / М.В. Желдак, А.М. Манахов, П.Е. Юдин, Е.В. Александров, С.С. Петров. 20131076; Заявлено. 20.02.2013; Опубл. 30.05.2013. Бюл. №22

21. Богатов М.В., Юдин П.Е., Амосов А.П. Применение внутренних многофункциональных покрытий насосно-компрессорных труб для защиты от образования асфальтосмолопарафиновых отложений // Нефтегазовое дело. 2023. № 3. С. 149-160. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-3-149-160. EDN: QFUTZL.

22. Берков Д.В., Костюк И.И., Юдин П.Е., Веревкин А.Г. Разработка стенда оценки стойкости внутренних защитных покрытий НКТ к неорганическим солеотложениям // Нефтегазовое дело. 2024. №1. С. 160-172. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-1-160-172. EDN: QEEYLT.

23. Петров С.С., Юдин П.Е., Максимук А.В., Князева Ж.В. Исследование барьерных свойств металлизационных покрытий // Нефтегазовое дело. 2021. №1. С. 121-130. DOI: 10.17122/ngdelo-2021-1-121-130. EDN: JZZWDU.

24. Тахаутдинова Г.Л., Токмачева И.С., Гареев Р.Р. Новые полимерные покрытия для антикоррозионной защиты внутренней поверхности труб // Молодежная науч.-практ. конф. института «ТатНИПИнефть». Бугульма: ТатНИПИнефть, 2016. С. 9.

25. ГОСТ 18299-72 Государственный стандарт Союза ССР. Материалы лакокрасочные. Метод определения предела прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и модуля упругости. М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1974. 10 с.

26. ГОСТ 11262-2017. Межгосударственный стандарт. Пластмассы. Метод испытания на растяжение. М.: Стандартинформ, 2018. 24 с.

27. CSA-Z245.20 SERIES:22 Plant-Applied External Coatings For Steel Pipe. 178 Rexdale Blvd. Toronto, Ontario M9W 1R3 Canada. 2022. 138 p.

28. ISO 2815:2003. Paints and varnishes — Buchholz indentation test. 2003. 11 p.

REFERENCES

1. Shaimardanov K.N., Notfullin N.D. Povyshenie effektivnosti vyrabotki zapasov nefti na pozdnej stadii razrabotki mestorozhdeniya [Increasing the Efficiency of Oil Reserves Development at The Late Stage of Field Development]. *Sbornik statej II Mezhdunarodnogo nauchno-issledovatel'skogo konkursa: v 2 chastyah. «START V NAUKE - 2022»* [Collection of articles of the II International Research Competition: in 2 parts. «START IN SCIENCE - 2022»]. Petrozavodsk, International Center for Scientific Partnership «New Science» Publ., 2022. pp. 71–75. EDN: BVUDXB. [in Russian].

2. Rafikov R.B., Chirkunov A.P., Vafin R.V., Egorov A.F., Dyyachuk I.A. Podhody i tekhnologii snizheniya obvodnyonnosti dobyvaemoj produkcii na pozdnej stadii razrabotki neftyanogo mestorozhdeniya [Approaches and Technologies to Reduce Water Cut of Oil at the Later Stage of Oil Field Development]. *Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov — Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products,* 2021, No. 3, pp. 20-35. DOI: 10.17122/ntj-oil-2021-3-20-35. EDN: QFILXN. [in Russian].

3. Bakirov D.L., Babushkin E.V., Shcherbakov A.V., Barannikov Ya.I., Russkih E.V., Denisova E.V. Novye podhody k optimizacii skhem kustovaniya na pozdnej stadii razrabotki mestorozhdenij [New Approaches to Optimization of Well Pad Distribution Pattern at the Late Stage of Field Development]. *Burenie i neft' — Drilling and Oil*, 2021, No. 4, pp. 9-12. EDN: TVMMAS. [in Russian].

4. Nasyrov A.M., Galikeev I.A., Nasyrov V.A. *Ekspluataciya mestorozhdenij nefti v oslozhnennyh usloviyah* [Operation of Oil Fields Under Difficult Conditions]. Izhevsk, Paracelsus Print Publ., 2015. 354 p. [in Russian].

5. Surgaeva E.S., Yudin P.E., Amosov A.P. Razrushenie vnutrennih antikorrozionnyh polimernyh pokrytij neftepromyslovyh trub pri ekspluatacii [Destruction of Internal Anticorrosive Polymer Coatings of Oilfield Pipes During Operation]. *Bezopasnost' tekhnogennyh i prirodnyh system — Safety of Technogenic and Natural Systems*, 2024, No. 4, pp. 90-100. DOI: 10.23947/2541-9129-2024-8-2-90-100. EDN: CHUJHA. [in Russian].

6. Knyazeva Zh.V., Yudin P.E., Petrov S.S., Maksimuk A.V. Primenenie metallizacionnyh pokrytij dlya zashchity pogruzhnyh elektrodvigatelej nasosnogo oborudovaniya ot vozdejstviya oslozhnyayushchih faktorov v neftyanyh skvazhinah [Application of Metallization Coatings for Protection of Submersible Electric Motors of Pumping Equipment from Influence of Complicating Factors in Oil Wells]. *Izvestiya vuzov. Poroshkovaya metallurgiya i funkcional'nye pokrytiya — Powder Metallurgy and Functional Coatings*, 2020, No. 1, pp. 75-86. DOI: 10.17073/1997-308X-2020-75-86. EDN: UIKEZS. [in Russian].

7. Markin A.N., Nizamov R.E. *CO2-korroziya neftepromyslovogo oborudovaniya* [CO2 Corrosion of Oilfield Equipment]. Moscow, OJSC VNIIOENG Publ., 2003. 188 p. [in Russian].

8. Sorokin V.V., Pichkunov A.P. Osnovnye metody zashchity magistral'nyh truboprovodov ot korrozii izolyacionnymi materialami [Basic Methods of Protecting Pipelines Insulation Polymer Materials]. *Dal'nij Vostok: problemy razvitiya arhitekturno-stroitel'nogo kompleksa — Far East: Problems of The Development of the Architectural and Construction Complex*, 2017, No. 1, pp. 357–360. EDN: ZXJIIL. [in Russian].

9. Beisembaeva K.A., Balmasov D.T. Zashchita stal'nyh materialov metodami ingibitorov sopryazhennogo processa korrozii i navodorazhivaniya v kisloj neftyanoj srede [Protection of Steel Materials by Methods of Inhibitors of the Conjugate Corrosion and Hydrogenation Process in an Acidic Oil Environment]. *Vestnik sovremennoj nauki — Herald of Modern Science*, 2015, No 2, p. 32-35. EDN: RWXKHX. [in Russian].

10. Heidersbach R. *Zashchita ot korrozii i metallovedenie oborudovaniya dlya dobychi nefti i gaza* [Corrosion Protection and Metalworking of Oil and Gas Production Equipment]. St. Petersburg, Profession Publ. 2015. 480 p. [in Russian].

11. Markin A.N., Nizamov R.E., Sukhoverkhov S.V. *Neftepromyslovaya himiya: prakticheskoe rukovodstvo* [Oilfield Chemistry: a Practical Guide]. Vladivostok, Dalnauka Publ., 2011. 288 p. [in Russian].

12. Myalenko D.M. Vliyanie termicheskogo, radiacionno-himicheskogo i fotometricheskogo vozdejstviya na destruktciyu i «starenie» polimernyh materialov [The Effect of Thermal, Radiation-Chemical and Photometric Impact on Destruction And "Agening" Of Polymeric Materials]. *Aktual'nye voprosy molochnoj promyshlennosti, mezhotraslevye tekhnologii i sistemy upravleniya kachestvom — Topical Issues of the Dairy Industry, Intersectoral Technologies and Quality Management Systems*, 2020, No. 1, pp. 406-411. DOI: 10.37442/978-5-6043854-1-8-2020-1-406-411. EDN: TMXMFF. [in Russian].

13. Mingaryaev N.N. Prognozirovanie stareniya polimernyh materialov i pokrytij [Prediction of Aging of Polymer Materials and Coatings]. *Mezhdunarodnaya molodyozhnaya nauchnaya konferenciya, posvyashchennaya 60-letiyu so dnya osushchestvleniya Pervogo poleta cheloveka v kosmicheskoe prostranstvo i 90-letiyu Kazanskogo nacional'nogo issledovatel'skogo tekhnicheskogo universiteta im. A.N. Tupoleva-KAI «XXV Tupolevskie chteniya (shkola molodyh uchenyh)»* [International youth scientific conference dedicated to the 60th anniversary of the First Human Space Flight and the 90th anniversary of Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI «XXV Tupolev readings (school of young scientists)»]. Kazan, Individual entrepreneur Sagieva A.R. Publ., 2021. pp. 498-500. EDN: MBUMNA. [in Russian].

14. Sarvaeva G.A., Pavlov M.R., Laptev A.B. Opredelenie i prognozirovanie izmeneniya svojstv polimernyh kompozicionnyh materialov pri vysokotemperaturnom starenii [Determination and Prediction of Changes in the Properties of Polymer Composite Materials During High-Temperature Aging]. *Sbornik dokladov v vserossijskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii «Polimernye kompozicionnye materialy i proizvodstvennye tekhnologii novogo pokoleniya»* [Collection of reports of the V All-Russian Scientific and Technical Conference «New Generation Polymer Composites and Production Technologies»]. Moscow, Vserossijskij nauchno-issledovatel'skij institut aviacionnyh materialov Nacional'nogo issledovatel'skogo centra «Kurchatovskij institut» Publ., 2021, pp. 114-131. EDN: FDYMVR. [in Russian].

15. *GOST 32299-2013. Mezhgosudarstvennyj standart. Materialy lakokrasochnye. Opredelenie adgezii metodom otryva* [State Standard 58346-2019. Steel Pipes and Fittings for Oil Industry. Inner Surface Protective Paint Coatings.

General Technical Requirements]. Moscow, Standartinform Publ., 2019. 23 p. [in Russian].

16. *GOST 32299-2013. Mezhgosudarstvennyj standart. Materialy lakokrasochnye. Opredelenie adgezii metodom otryva* [State Standard 32299-2013. Interstate standard. Paint materials. Adhesion by tearing]. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 15 p. [in Russian].

17. Baranov N.A., Zheldak M.V., Makarov E.A., Yudin P.E., Maksimuk A.V., Petrov S.S., Trofimov I.S., Bogatov M.V. *Laboratorno-issledovatel'skij cirkulyacionnyj stend dlya ispytanij metodov protivodejstviya processam sedimentacii i korrozii v kolonne nasosno-kompressornyh trub* [Laboratory-Research Circulation Stand for Testing Methods of Counteracting Sedimentation and Corrosion Processes in The Tubing String]. Patent RF, No. 202556. 2021. [in Russian].

18. Maksimuk A.V., Yudin P.E., Verevkin A.G., Zheldak M.V., Bogatov M.V., Berkov D.V., Krysina D.A., Vyazgin D.S., Ivanov A.V. *Laboratornyj ispytatel'nyj stend dlya vosproizvedeniya ekspluatacionnyh uslovij vnutri pogruzhennoj v neftyanuyu skvazhinu kolonny nasosno-kompressornyh trub pri ispytaniyah razlichnyh metodov protivodejstviya korrozii i sedimentacii* [Laboratory Test Bench for Reproducing Operating Conditions Inside a Tubing String Submerged in an Oil Well During Testing Various Methods to Counter Corrosion and Sedimentation]. Patent RF, No. 2802764, 2023. [in Russian].

19. Maksimuk A.V., Yudin P.E., Verevkin A.G., Zheldak M.V., Kostyuk I.I., Berkov D.V. *Laboratornyj issledovatel'skij stend dlya ocenki stojkosti vnutrennih pokrytij neftepromyslovyh trub k neorganicheskim soleotlozheniyam* [Laboratory Research Stand for Evaluation of Resistance of Internal Coatings of Oil-Field Pipes to Inorganic Salt Deposits]. Patent RF, No. 2825169, 2024. [in Russian].

20. Zheldak M.V., Manakhov A.M., Yudin P.E., Alexandrov E.V., Petrov S.S. *Laboratornyj avtoklav* [Laboratory Autoclave]. Patent RF, No. 130878, 2013. [in Russian].

21. Bogatov M.V., Yudin P.E., Amosov A.P. Primenenie vnutrennih mnogofunkcional'nyh pokrytij nasosno-kompressornyh trub dlya zashchity ot obrazovaniya asfal'tosmoloparafinovyh otlozhenij [The Use of Internal Multifunctional Coatings for Pump and Compressor Pipes to Protect Against the Formation of Asphalt, Resin and Paraffin Deposits]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2023, No. 3, pp. 149-160. DOI: 10.17122/ngdelo-2023-3-149-160. EDN: QFUTZL. [in Russian].

22. Berkov D.V., Kostyuk I.I., Yudin P.E., Verevkin A.G. Razrabotka stenda ocenki stojkosti vnutrennih zashchitnyh pokrytij NKT k neorganicheskim soleotlozheniyam [Development of Test Bench for Evaluation of Resistance of Internal Protective Tubing Coatings to Inorganic Salt Deposits]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2024, No. 1, pp. 160-172. DOI: 10.17122/ngdelo-2024-1-160-172. EDN: QEEYLT. [in Russian].

23. Knyazeva Zh.V., Yudin P.E., Petrov S.S., Maximuk A.V. Issledovanie bar'ernyh svojstv metallizacionnyh pokrytij [Study of Metallization Coatings Barrier Properties]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2021, No. 1, pp. 121-130. DOI: 10.17122/ngdelo-2021-1-121-130. EDN: JZZWDU. [in Russian].

24. Takhautdinova G.L., Tokmacheva I.S., Gareev R.R. Novye polimernye pokrytiya dlya antikorrozionnoj zashchity vnutrennej poverhnosti trub [New Polymer Coatings for Corrosion Protection of The Inner Surface of Pipes]. *Molodezhnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya instituta «TatNIPIneft'»* [Youth Scientific and Practical Conference of TatNIPIneft Institute]. Bugulma, TatNIPIneft, 2016. pp. 9. [in Russian].

25. *GOST 18299-72 Gosudarstvennyj standart Soyuza SSR. Materialy lakokrasochnye. Metod opredeleniya predela prochnosti pri rastyazhenii, otnositel'nogo udlineniya pri razryve i modulya uprugosti* [State Standard 18299-72. Paintwork Materials. Method for Determination of Tensile Strength, Relative Elongation at Tear and Modulus of Elasticity]. Moscow, Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam Publ., 1974. 10 p. [in Russian].

26. *GOST 11262-2017. Mezhgosudarstvennyj standart. Plastmassy. Metod ispytaniya na rastyazhenie* [State Standard 11262-2017. Plastics. Tensile Test Method]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 24 p. [in Russian].

27. CSA-Z245.20 SERIES:22 *Plant-Applied External Coatings for Steel Pipe*. 178 Rexdale Blvd. Toronto, Ontario M9W 1R3 Canada. 2022. 138 p.

28. ISO 2815:2003. *Paints and varnishes — Buchholz indentation test*. 2003. 11 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Максим Валерьевич Богатов, *кандидат технических наук, инженер первой категории испытательной лаборатории, ООО «НПЦ «Самара», Самара, Россия;*
доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Maksim V. Bogatov, *candidate of technical sciences, engineer of the 1st category of the testing laboratory, «RPC Samara Ltd» LLC, Samara, Russia;*
associate professor, Metallurgy, powder metallurgy, nanomaterials department, Samara state technical university, Samara, Russia

bogatov@npcsamara.ru

Павел Евгеньевич Юдин, *кандидат технических наук, директор по науке, ООО «НПЦ «Самара»; доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», Самарский государственный технический университет, Самара, Россия*

Pavel E. Yudin, *candidate of technical sciences, science director, «RPC Samara Ltd» LLC, Samara, Russia; associate professor, Metallurgy, powder metallurgy, nanomaterials department, Samara state technical university, Samara, Russia*

Дмитрий Александрович Майдан, *кандидат технических наук, доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы», Самарский государственный технический университет, Самара, Россия*

Dmitry A. Maidan, *candidate of technical sciences, associate professor, Metallurgy, powder metallurgy, nanomaterials department, Samara state technical university, Samara, Russia*

Статья поступила в редакцию 11.11.2024; одобрена после рецензирования 05.12.2024; принята к публикации 30.01.2025.

The article was submitted 11.11.2024; approved after reviewing 05.12.2024; accepted for publication 30.01.2025.