Нефтегазовое дело. 2026. Т. 24, № 1. С. 124-139. ISSN 2073-0128 (print)
Petroleum Engineering. 2026. Vol. 24. No. 1. P. 124-139. ISSN 2073-0128 (print)
Научная статья
УДК 620.197.6:622.279.51
DOI: 10.17122/ngdelo-2026-1-124-139

ИСПЫТАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ПОЛИМЕРНОГО ПОКРЫТИЯ НАСОСНО-КОМПРЕССОРНЫХ ТРУБ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКЕ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Андрей Викторович Максимук[1,2], Денис Валентинович Берков[1], Вадим Эдуардович Касаткин[3], Александр Петрович Амосов[2], Александр Григорьевич Веревкин[1], Анна Юрьевна Поздеева[1,2]

[1]ООО «Научно-производственный центр «Самара», Самара, Российская Федерация
[2]Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация
[3]Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской Академии Наук, Москва, Российская Федерация

Автор, ответственный за переписку
Денис Валентинович Берков, berkov@npcsamara.ru

Аннотация. В работе представлены результаты комплексного исследования эксплуатационных свойств внутреннего полимерного покрытия насосно-компрессорных труб Ø73 мм (НКТ73) с использованием существующих методов оценки, а также с применением разработанного авторами статьи метода с применением «Электрохимической ячейки высокого давления для испытаний антикоррозионных защитных покрытий, нанесенных на внутреннюю поверхность труб». Рассмотрены микроструктурные изменения покрытия, адгезионные характеристики, а также электрохимическое поведение в процессе испытаний. Для имитации реальных условий эксплуатации нефтяных скважин проведены автоклавные испытания при температуре 90 °С и давлении 80 атм в среде, содержащей сероводород и хлорид натрия. Показано, что после 10 суток автоклавных испытаний наблюдается значительное снижение адгезии покрытия к металлической подложке, а при увеличении времени выдержки до 30 суток происходит полное отслоение покрытия. Электрохимические измерения, выполненные после автоклавных испытаний в стандартной трёхэлектродной ячейке, не отразили деградацию покрытия, что связано с восстановлением его барьерных свойств при нормальных условиях. Для проведения электрохимических исследований непосредственно в условиях высокой температуры и давления разработана «Электрохимическая ячейка высокого давления для испытаний антикоррозионных защитных покрытий, нанесенных на внутреннюю поверхность труб» (ЭЯВД), обеспечивающая регистрацию поляризационных кривых и спектров электрохимического импеданса по принципу in situ. Полученные данные показали постепенное смещение годографов в сторону увеличения резистивного отклика и рост плотности тока коррозии по мере увеличения продолжительности испытаний, что согласуется с результатами микроструктурного и адгезионного анализа. Таким образом, продемонстрирована эффективность применения «Электрохимической ячейки высокого давления для испытаний антикоррозионных защитных покрытий, нанесенных на внутреннюю поверхность труб» для оценки деградации антикоррозионных покрытий в режиме in situ. Предложенный метод позволяет повы-

Ключевые слова
внутренние покрытия НКТ; электрохимическая импедансная спектроскопия; поляризационные кривые в координатах Тафеля; автоклавные испытания; метод in situ; электрохимическая ячейка высокого давления

© Максимук А.В., Берков Д.В., Касаткин В.Э., Амосов А.П., Веревкин А.Г., Поздеева А.Ю., 2026

сить информативность лабораторных испытаний внутренних покрытий НКТ и обеспечить более точное прогнозирование срока службы покрытий в реальных условиях эксплуатации нефтяных скважин.

Для цитирования
Максимук А.В., Берков Д.В., Касаткин В.Э., Амосов А.П., Веревкин А.Г., Поздеева А.Ю. Испытание внутреннего полимерного покрытия насосно-компрессорных труб в электрохимической ячейке высокого давления // Нефтегазовое дело. 2026. Т. 24, № 1 С. 124-139. https://doi.org/10.17122/ngdelo-2026-1-124-139.

Original article

TESTING OF INNER POLYMER COATING OF TUBING IN HIGH-PRESSURE ELECTROCHEMICAL CELL

Andrey V. Maksimuk[1,2], Denis V. Berkov[1], Vadim E. Kasatkin[3], Aleksandr P. Amosov[2], Aleksandr G. Verevkin[1], Anna Yu. Pozdeeva[1,2]

[1]«Scientific and Production Center «Samara» LLC Samara, Russian Federation
[2]Samara state technical university, Samara, Russian Federation
[3]Physical chemistry and electrochemistry institute named after A.N. Frumkin, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Corresponding author
Denis V. Berkov, berkov@npcsamara.ru

Abstract. The paper presents the results of a comprehensive study of the operational properties of the inner polymer coating of Ø73 mm (NKT73) tubing using existing assessment methods, as well as using the method developed by the authors of the article «High-pressure electrochemical cell for testing anti-corrosion protective coatings applied to the inner surface of pipes». Microstructural changes in the coating, adhesive characteristics, as well as electrochemical behavior during testing are considered. To simulate the actual operating conditions of oil wells, autoclave tests were carried out at a temperature of 90 °C and a pressure of 80 atm in a medium containing hydrogen sulfide and sodium chloride. It was shown that after 10 days of autoclave tests, a significant decrease in the adhesion of the coating to the metal substrate was observed, and when the holding time was increased to 30 days, the coating completely peeled off. Electrochemical measurements performed after autoclave tests in a standard three-electrode cell did not reflect the degradation of the coating, which is associated with the restoration of its barrier properties under normal conditions. For conducting electrochemical studies directly under conditions of high temperature and pressure, a «High-pressure electrochemical cell for testing anti-corrosion protective coatings applied to the inner surface of pipes» (EEVD) has been developed, which provides registration of polarization curves and spectra of electrochemical impedance on an in situ basis. The obtained data showed a gradual shift of hodographs towards an increase in the resistive response and an increase in the corrosion current density as the test duration increased, which is consistent with the results of microstructural and adhesion analysis. Thus, the effectiveness of the «High-pressure electrochemical cell for testing anti-corrosion protective coatings applied to the inner surface of pipes» for assessing the degradation of anti-corrosion coatings in situ has been demonstrated. The proposed method makes it possible to increase the informative value of laboratory tests of internal coats of tubing and to provide more accurate prediction of service life of coats in real conditions of oil well operation.

Keywords
inner coatings of tubing; electrochemical impedance spectroscopy; polarization curves in Tafel coordinates; autoclave tests; in situ method; high-pressure electrochemical cell

For citation
Maksimuk A.V., Berkov D.V., Kasatkin V.E., Amosov A.P., Verevkin A.G., Pozdeeva A.Yu. Ispytanie vnutrennego polimernogo pokrytiya nasosno-kompressornyh trub v elektrohimicheskoj yachejke vysokogo davleniya// [Testing of inner polymer coating of tubing in high-pressure electrochemical cell] // *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering,* 2026, Vol. 24, No. 1. pp. 124-139. [in Russian]. https://doi.org/10.17122/ngdelo-2026-1-124-139.

Введение

Коррозия нефтегазового оборудования, в частности нефтепромысловых и насосно-компрессорных труб, является одним из наиболее распространенных осложняющих факторов при добыче нефти. Проблема борьбы с коррозией особенно актуальна в связи с высокой обводненностью, коррозивностью пластовых жидкостей, обусловленной сильной минерализацией технологических сред и наличием коррозионно-активных газовых компонентов (H_2S, CO_2). Кроме того, на процесс коррозии влияет длительность эксплуатации скважин и трубопроводов, соответственно, сопровождаемая износом оборудования и дальнейшим ростом частоты нарушений [1].

Защитные покрытия представляют собой наиболее часто используемые средства предотвращения коррозии, в том числе и сероводородной. К причинам их повсеместного использования можно отнести простоту и невысокие затраты на нанесение [2]. При выборе подходящих защитных покрытий основным критерием является стойкость к условиям эксплуатации трубопровода — рабочей температуре, давлению, химическому составу среды. Для эффективной защиты НКТ покрытие должно иметь низкую влаго- и газопроницаемость, высокие механические характеристики, высокую и стабильную во времени адгезию покрытия к стали, стойкость к катодному отслаиванию, хорошие диэлектрические характеристики, устойчивость к УФ-лучам и тепловому старению [2]. Большой интерес нефтяных компаний и производителей труб к внутренним защитным покрытиям способствует пополнению отечественного рынка новыми лакокрасочными материалами российского и зарубежного производства [3]. Но важно понимание того, насколько эффективно будет применение конкретной марки защитного полимерного покрытия в жестких условиях эксплуатации нефтяной скважины. При этом подбор покрытия и внедрение его часто ограничивается длительностью проведения опытно-промысловых испытаний. Сроки проведения таких работ обычно занимают не менее одного года [4].

К настоящему времени отечественными исследователями были разработаны различные методы, позволяющие моделировать воздействия осложняющих факторов на испытуемый образец защитного покрытия в лабораторных условиях. Проведение ускоренных лабораторных испытаний позволило сократить время оценки качества покрытий в условиях применения осложнённого фонда скважин (по сравнению со сроками проведения опытно-промысловых испытаний). Также для защитных лакокрасочных покрытий внутренней поверхности был разработан отечественный стандарт ГОСТ Р 58346-2019. Несмотря на успехи, достигнутые отечественными исследователями в разработке методов испытания покрытий и отраслевого стандарта, регламентирующего процедуру испытаний покрытий, по прежнему актуальной задачей является контроль качества внутренних антикоррозионных полимерных покрытий, прогнозирование срока их эксплуатации в условиях нефтедобычи.

Оптимальным лабораторным методом воспроизведения эксплуатационных условий в скважине (высокая температура, высокое давление, минерализованная среда с растворенными коррозионно-активными газами) является проведение автоклавных испытаний покрытий [5–9]. Помимо воспроизведения эксплуатационных условий для внутренних покрытий НКТ, требуется оценка состояния покрытия до и после автоклавного испытания. Кроме визуальной оценки качества покрытия и анализа морфологии его поверхности и физических свойств наиболее часто определяется адгезия покрытия к защищаемому металлу. Сила адгезионной связи функциональных групп покрытия с активными областями на металле в достаточной степени является мерой его изоляционных противокоррозионных свойств [10–12]. Однако использование адгезии в этом качестве имеет серьезный недостаток — все разновидности данного метода являются разрушающими для покрытия. Поэтому, для набора статистически значимого массива данных и построения прогностических моделей на основании измерения адгезии покрытия необходимо огромное количества циклов выдержки образцов в автоклаве с различным режимами. Необходим неразрушающий метод контроля свойств покрытий, позволяющий обеспечить испытания одних и тех же образцов после различных назначенных режимов и временииx выдержки в автоклаве. В этом качестве наибольший интерес представляют электрохимические методы контроля свойств покрытия и выявления подповерхностной коррозии металла. В частности, речь идет о методе электрохимической

импедансной спектроскопии (ЭИС) (в зарубежных публикациях применяется термин Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)).

На практике метод ЭИС часто применяется совместно с другими электрохимическими методами, основанными на построении поляризационных кривых. Такая комбинация методов особенно эффективна при исследовании покрытий [13, 14]. Тем не менее, при всех достоинствах электрохимических методов, существуют и ограничения для их применения, связанные со сложностью работы с объектами, обладающими чрезвычайно высоким электрическим сопротивлением. Очень низкие токи, возникающие при наложении поляризации на такие объекты, могут находиться на грани чувствительности аппаратуры и подвергаться наводкам, снижая точность и информативность получаемых результатов.

При исследовании покрытий с высокими барьерными свойствами проникновение электролита через покрытие к металлу, определяющее сопротивление объекта, возможно только при одновременном воздействии на покрытие высокой температуры и давления растворенных газов. При этом, если провести электрохимические испытания такого покрытия при атмосферном давлении и комнатной температуре после извлечения из автоклава, покрытие может вновь демонстрировать высокие барьерные свойства (при сохранении целостности покрытия) [15]. Поэтому потребовалась разработка специальной методики, позволяющей проводить электрохимические исследования покрытий непосредственно во время автоклавной выдержки («in situ»). Авторами данной статьи была разработана «Электрохимическая ячейка высокого давления для испытаний антикоррозионных защитных покрытий, нанесенных на внутреннюю поверхность труб» (ЭЯВД) [15][1]. Такая конструкция обеспечивает возможность одновременного применения автоклавного метода испытания покрытий и электрохимических методов оценки состояния покрытия: «Автоклав+Электрохимические методы» (рисунок 1).

При апробации предложенного метода испытания внутренних защитных покрытий НКТ требуется сопоставление его результатов с результатами традиционных методов: автоклавная выдержка с последующим определением адгезии покрытия к металлической подложке, изучение микроструктуры покрытия до и после выдержки в автоклаве. В настоящей статье будут описаны исследования покрытий различными методами испытаний, и полученные результаты будут соотнесены между собой. Структура исследований данной статьи приведена на рисунке 2.

Материалы и методы

В качестве объекта исследования выбрана стальная труба Ø73 мм НКТ73 (изготовленная по ГОСТ 633-80) с внутренним полимерным антикоррозионным эпоксидно-фенольным

[1] Максимук А.В., Юдин П.Е., Веревкин А.Г., Касаткин В.Э., Желдак М.В., Берков Д.В., Богатов М.В., Юдин Д.М., Сургаева Е.С. Заявка на изобретение № 2025116076 от 09.06.2025 в Федеральный институт промышленной собственности (ФИПС) «Электрохимическая ячейка высокого давления для испытаний антикоррозионных защитных покрытий, нанесенных на внутреннюю поверхность насосно-компрессорных труб». URL: https://www1.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet?DB=RUPATAP&DocNumber=2025116076&TypeFile=html



Рисунок 1. Электрохимическая ячейка высокого давления для совместного метода автоклавных испытаний и электрохимических методов исследования покрытия

Figure 1. High-pressure electrochemical cell for joint autoclave test method and electrochemical coating test methods

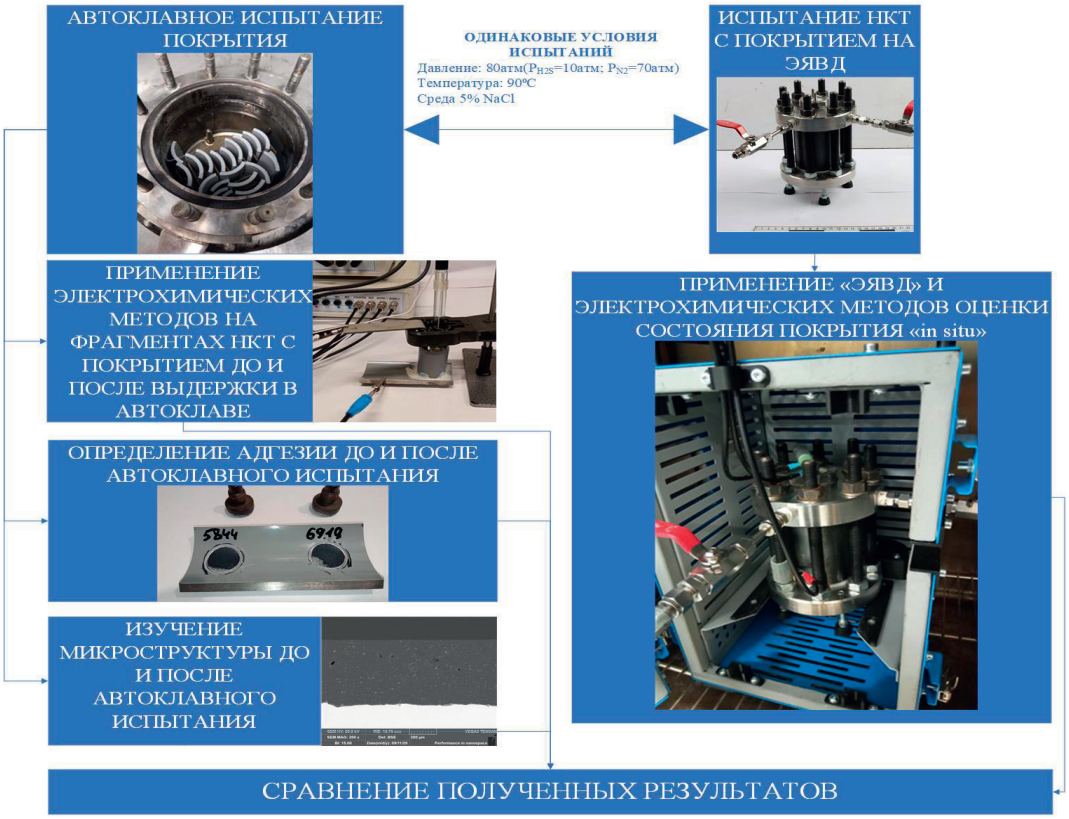


Рисунок 2. Структура проведенных исследований

Figure 2. Structure of conducted studies

покрытием. Изучение эксплуатационных свойств НКТ73 с внутренним защитным покрытием включало в себя проведение следующих видов испытания.

Автоклавные испытания покрытия при давлении 80 атм (P_{H_2S} = 10 атм; P_{N_2} = 70 атм) и температуре 90 ºС:

— определение адгезии покрытия к металлической подложке методом отрыва (ГОСТ Р 58346-2019) покрытия в исходном состоянии и после проведения автоклавных испытаний;

— электронная микроскопия с применением локального рентгеноспектрального анализа (анализ морфологии и состава покрытия до и после проведения автоклавных испытаний);

— изучение покрытия методом ЭИС до и после проведения автоклавных испытаний;

— изучение покрытия методом построения поляризационных кривых Тафеля.

Испытание покрытия с помощью «Электрохимической ячейки высокого давления для испытаний антикоррозионных защитных покрытий, нанесенных на внутреннюю поверхность труб» при давлении 80 атм (P_{H_2S} = 10 атм; P_{N_2} = 70 атм) и температуре 90 ºС (условия — такие же как в параллельно проводимых автоклавных испытаниях):

— изучение состояния внутреннего покрытия НКТ73 непосредственно во время проведения испытания покрытия на ЭЯВД с помощью импедансной спектроскопии (по принципу «in situ»);

— изучение состояния внутреннего покрытия НКТ73 непосредственно во время проведения испытания покрытия на ЭЯВД методом построения поляризационных кривых Тафеля («in situ»).

Все описанные в данной статье электрохимические исследования выполнялись с помощью потенциостатического комплекса для электрохимических и коррозионных исследований на базе потенциостата IPC-ProMF с модулем измерения импеданса FRA-2 [16]. Обработка результатов выполнялась при помощи программного обеспечения, разработанного в ИФХЭ РАН, г. Москва [19]. В классической трехэлектродной ячейке (рисунок 10) в качестве электрода сравнения применяли насыщенный хлорсеребряный электрод, противоэлектрод выполнен из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Рабочим электродом являлся образец трубы с покрытием. При работе

с ЭЯВД в качестве электрода сравнения использовался сульфидсеребряный электрод.

Результаты

Для проведения автоклавных испытаний из НКТ73 были изготовлены специальные фрагменты, которые далее помещались в автоклав (рисунок 3).

Была проведена серия автоклавных испытаний при давлении 80 атм (P_{H_2S} = 10 атм; P_{N_2} = 70 атм) и температуре 90 ºС в среде 5 % NaCl продолжительностью 10, 20 и 30 суток. Далее была проведена оценка состояния покрытия до и после автоклавных выдержек с помощью изучения микроструктуры покрытия, определения адгезии покрытия, а также с помощью электрохимических методов.

Изучение микроструктуры защитного покрытия. Исследуемое покрытие представляет собой основной слой покрытия, нанесенный на тонкий слой праймера. Общая толщина исследуемого покрытия составляет 549–586 мкм (рисунок 4). В микроструктуре основного слоя покрытия наблюдаются частицы мелкодисперсного наполнителя, неоднородные по своим размерам и практически равномерно распределенные по толщине слоя. Покрытие плотно прилегает к поверхности металла. Видимых повреждений и дефектов (поры, трещины, расслоения) на покрытии, находящемся в исходном состоянии (до проведения автоклавных испытаний), не зафиксировано.

В микроструктуре покрытия, подвергнутого автоклавной выдержке в течение десяти суток, заметны произошедшие изменения. В слое покрытия образовались поры размером до 40 мкм, а энергодисперсионный анализ показал наличие продуктов коррозии на металлической подложке под покрытием (рисунок 5). При этом покрытие также плотно прилегает к металлу.

Изучение микроструктуры покрытия после двадцати суточной выдержки в автоклаве показало дальнейший процесс деградации покрытия. На рисунке 6, а видно, как размер пор в длину увеличился до 600 мкм. Также наблюдается образование трещин, направленных вдоль слоя покрытия. Поперечных трещин в покрытии не выявлено. Отмечено появление зазора между металлической подложкой и покрытием (частичным отслоением покрытия от металла). Присутствуют локальные области с плотным слоем продуктов коррозии под по-

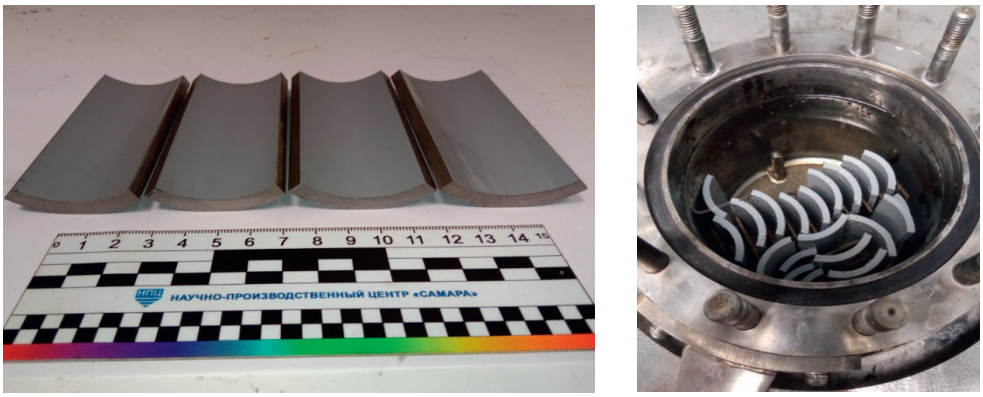


Рисунок 3. Фрагменты НКТ с покрытием для проведения автоклавных испытаний

Figure 3. Coated tubing fragments for autoclave testing

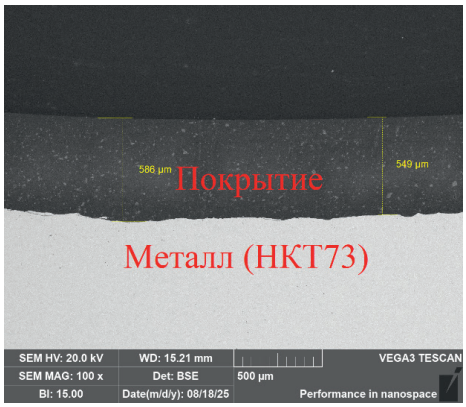


Рисунок 4. Микроструктура покрытия до проведения автоклавных испытаний (в исходном состоянии)

Figure 4. Coating microstructure prior to autoclave testing (initial)

крытием, что свидетельствует о проникновении электролита под покрытие.

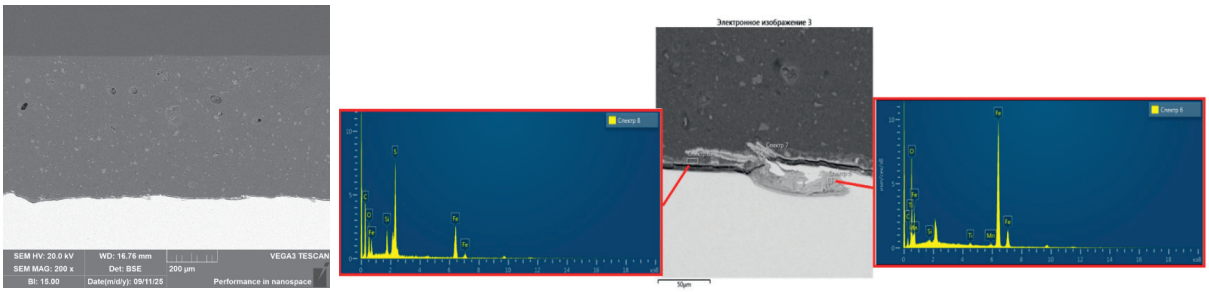
Микроструктура покрытия, подвергнутого тридцати суточной выдержке в автоклаве, показала, что в результате воздействия условий испытания произошло полное отслоение покрытия от металлической подложки. Но при этом покрытие сохранило единый целостный слой (рисунок 6, б).

Таким образом, микроструктура демонстрирует изменение состояния внутреннего покрытия под воздействием условий испытания (рисунки 4–6).

Параллельно с изучением микроструктуры защитных покрытий, были осуществлены измерения адгезии покрытия к металлической подложке (рисунок 7) на различных стадиях испытания (10, 20 и 30 суток).

В таблице 1 представлены результаты измерения адгезии покрытия к металлической подложке после различных сроков выдержки в автоклаве.

Результаты измерений показывают снижение адгезии между покрытием и металлом на 89 % после выдержки в автоклаве на протяжении 10 суток, что вероятнее всего, связано с образованием продуктов коррозии под покрытием, снижающих сцепление слоя покрытия с металлом. Дальнейшие испытания покрытия (20 суток выдержки) не привели к уменьшению адгезии по сравнению с покрытием после десятисуточных автоклавных испытаний. А в результате 30 суточных автоклавных испытаний произошло полное отслоение покрытия, о чем свидетельствуют и данные по адге-



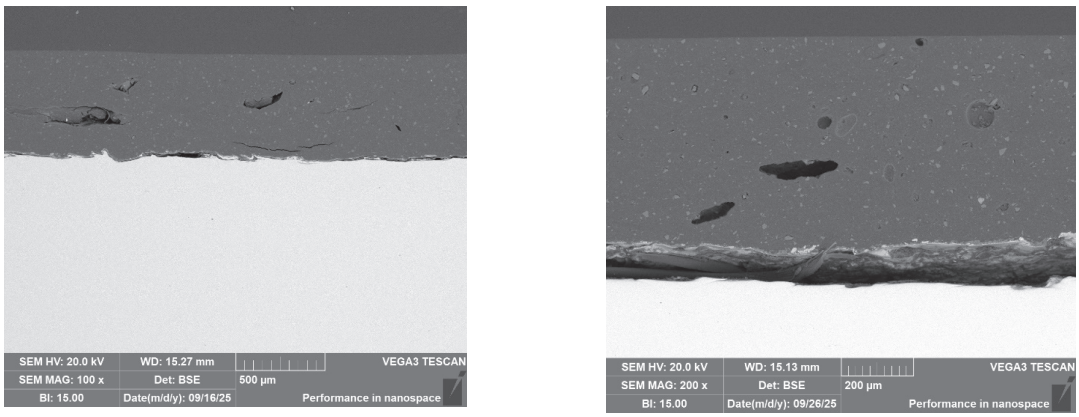
а) б)

а) внешний вид покрытия; б) продукты коррозии, образованные под покрытием

a) appearance of the coating; b) corrosion products formed under the coating

Рисунок 5. Микроструктура покрытия после выдержки в автоклаве на протяжении 10 суток

Figure 5. Coating microstructure after holding in autoclave for 10 days



а) б)

а) 20 суток; б) 30 суток

a) 20 days; b) 30 days

Рисунок 6. Микроструктура покрытия после выдержки в автоклаве

Figure 6. Coating microstructure after autoclave holding

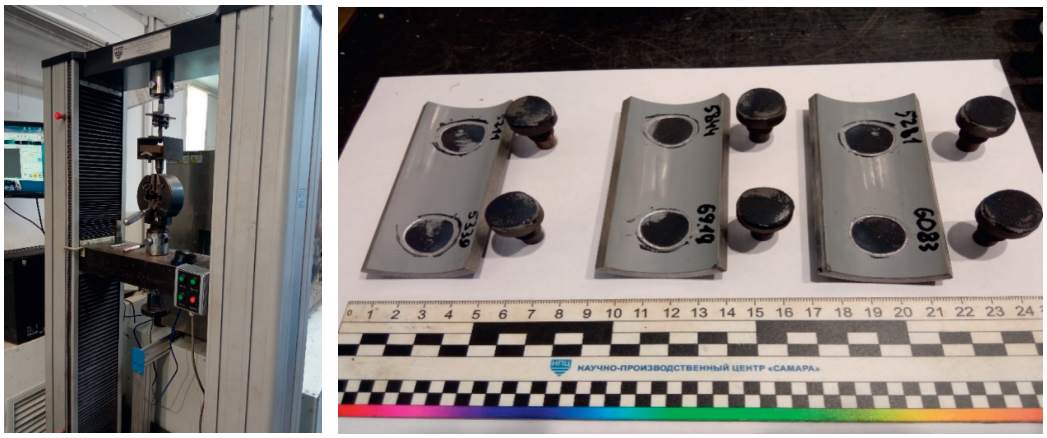


Рисунок 7. Измерение адгезии покрытия к металлической подложке методом отрыва

Figure 7. Measurement of coating adhesion to metal substrate by tearing-off method

Таблица 1. Параметры адгезионной прочности покрытия

Table 1. Coating adhesion strength parameters

Маркировка образца	Номер «грибка»	Площадь заготовки (A), мм^2	Разрывное усилие, кН	Прочность при отрыве, МПа	Характер разрушений*	Среднее значение прочности при отрыве, МПа
Покрытие в исходном состоянии	1	318,25	5,844	18	Y-100	19
	2		6,919	22	Y-100	
	3		5,281	17	Y-100	
	4		6,083	19	Y-100	
	5		5,711	18	Y-100	
	6		5,339	17	Y-100	
Покрытие после 10 суток в автоклаве (T=90 ºC, 10 атм H_2S+70 атм N_2, 5 % NaCl)	1	318,25	0,625	2	AB-100	2
	2		0,547	2	AB-100	
	3		0,683	2	AB-100	
	4		0,718	2	AB-100	
	5		0,533	2	AB-100	
	6		0,644	2	AB-100	
Покрытие после 20 суток в автоклаве (T=90 ºC, 10 атм H_2S+70 атм N_2, 5 % NaCl)	1	318,25	0,245	1	AB-100	2
	2		0,655	2	AB-100	
	3		0,744	2	AB-100	
	4		0,502	2	AB-100	
	5		0,643	2	AB-100	
	6		0,517	2	AB-100	
Покрытие после 30 суток в автоклаве (T=90 ºC, 10 атм H_2S+70 атм N_2, 5 % NaCl)	1	318,25	0	0	—	0 Отслоение покрытия
	2		0	0	—	
	3		0	0	—	
	4		0	0	—	
	5		0	0	—	
	6		0	0	—	

** Y — когезионное разрушение слоя клея, A/B — адгезионное разрушение между окрашиваемой поверхностью и первым слоем покрытия*

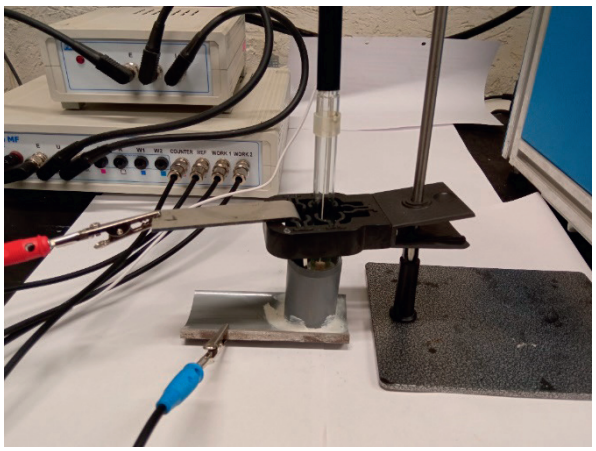


Рисунок 8. Трехэлектродная ячейка для исследования фрагмента НКТ73 с защитным покрытием

Figure 8. Three-electrode cell for examination of NKT73 fragment with protective coating

зии (таблица 1) и изменения в микроструктуре (рисунок 6).

Также фрагменты НКТ73 с покрытием (в исходном состоянии и после автоклавных испытаний) были изучены при помощи электрохимических методов: регистрации поляризационных кривых и ЭИС.

Поляризационные кривые в координатах Тафеля были получены при скорости развертки потенциала 10мВ/с от минус 800 до плюс 800 мВ. Для всех образцов НКТ с покрытием, подвергнутым различным по продолжительности испытаниям в автоклаве при поляризации в указанных пределах, регистрировались токи на пределе чувствительности комплекса (порядка наноампер), которые не имели явной зависимости от наложенного потенциала.

Такие низкие токи обычно свидетельствуют об отсутствии значимых электрохимических процессов в исследуемой системе в изученном диапазоне потенциалов. Однако, исследование покрытия после испытаний с помощью электронного микроскопа показало наличие продуктов коррозии под покрытием, а результаты измерения адгезии показали, что после тридцати суток испытаний покрытие отделилось от металлической подложки. Следовательно, полученные поляризационные зависимости не отображают реального состояния полимерных покрытий после проведения автоклавного испытания из-за слишком высокого сопротивления данной системы по постоянному току.

Также с помощью трёхэлектродной ячейки (рисунок 8) были изучены образцы с покрытием, прошедшие разные по длительности автоклавные испытания, методом ЭИС.

Из рисунка 9 видно, что все годографы имеют преимущественно емкостную природу.

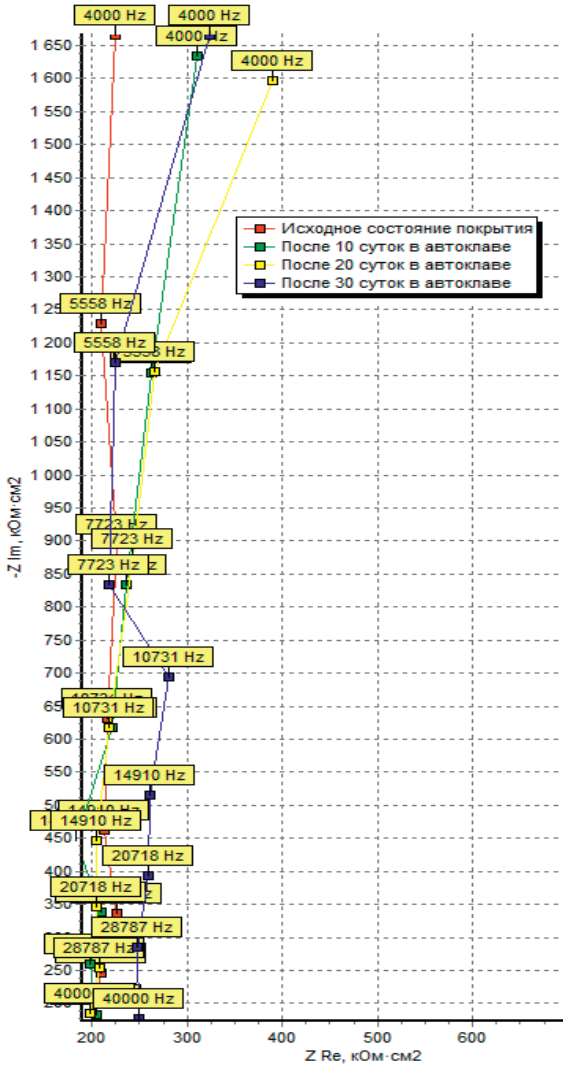


Рисунок 9. Диаграммы Найквиста (годографы) для покрытий, подвергшихся различным по продолжительности испытаниям в автоклаве

Figure 9. Nyquist diagrams for coatings subjected to various duration autoclave tests

Покрытие на металле может рассматриваться, как слой диэлектрика, который разделяет заряды ионов в растворе и электронов в металле. Образуется конденсатор, который при измерении ЭИС поляризуется переменным током, вызывая сдвиг фаз. Поэтому годографы имеют вид почти вертикальных линий на комплексной плоскости.

Импеданс конденсатора Z ёмкостью C зависит от частоты переменного тока $\omega = 2\pi F$ по формуле (1):

$$Z = -\frac{j}{\omega \cdot C}, \quad (1)$$

где j — комплексная единица. Сопротивление конденсатора определённой емкости переменному току возрастает по мере снижения частоты. Если бы такой конденсатор был шунтирован резистором, вызывающим протекание тока без сдвига фаз, годограф такой системы имел бы вид дуги полуокружности, диаметр которой зависел от сопротивления резистора. Поскольку коррозионные электрохимические процессы на металле протекают без сдвига фаз, они могут рассматриваться в качестве такого шунтирующего конденсатор резистора.

Наблюдаемые годографы образцов стали с покрытием ограничены частотой 4 кГц, поскольку уже при той частоте общий импеданс системы становится очень высоким и протекающие токи оказываются ниже уровня наводок от внешних электромагнитных полей. Это приводит к хаотичному расположению точек на годографе в области низких частот, так как полезный сигнал фактически не проходит через диэлектрический барьер. Такое поведение является прямым свидетельством эффективных барьерных свойств полимерного покрытия и высокого сопротивления электрохимическим реакциям на металле под покрытием (и низкой скорости коррозии).

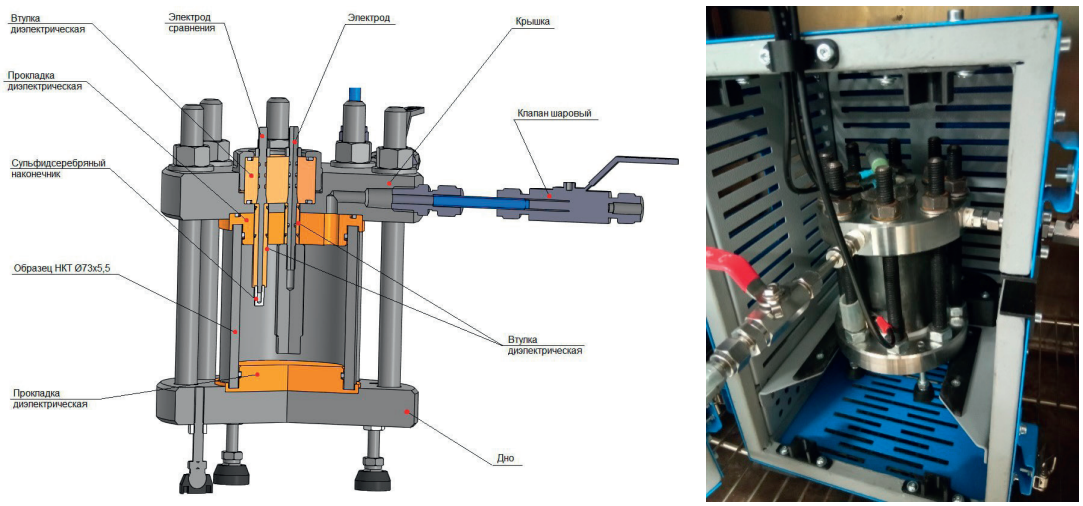
С другой стороны, результаты исследования микроструктур покрытия и его адгезии показывают начало коррозионных процессов под покрытием. Почему электрохимические методы не смогли регистрировать эти процессы после автоклавных выдержек? Можно предположить, что после извлечения покрытия из автоклава в отсутствии высокой температуры и давления на воздухе эластичное полимерное покрытие восстанавливает свои барьерные свойства и электрохимические процессы практически блокируются. Наблюдаемые на поперечных шлифах под покрытием продукты коррозии образовывались при нарушении барьерных свойств в условиях автоклавных испытаний. Хотя они присутствуют на металле, они надёжно изолированы от раствора при проведении поляризации электрохимическими методами. Следовательно, для определения состояния полимерного покрытия, электрохимические измерения необходимо осуществлять непосредственно во время испытания при воздействии на покрытие высоких температуры и давления в присутствии коррозионно-активных газов в испытательной среде «in situ» [15]. Кроме того, для преодоления проблем, вызванных чрезвычайно высоким сопротивлением исследуемых объектов, необходимо значительно увеличить площадь поляризуемой поверхности образцов и размещать ячейку в экранирующей клетке Фарадея.

Дальнейшие испытания проводились в электрохимической ячейке высокого давления (ЭЯВД). Объектом исследования являлся фрагмент трубы НКТ73 с внутренним покрытием, который одновременно являлся и рабочим электродом, и стенками рабочей камеры ЭЯВД. На рисунке 10 представлена ЭЯВД.

Во внутренней полости ЭЯВД были созданы такие же условия испытаний, как и в автоклаве. Провода, ведущие от потенциостата к ЭЯВД, подсоединялись таким образом, чтобы фрагмент НКТ73 являлся рабочим электродом, а в раствор электролита были погружены противоэлектрод и электрод сравнения. Площадь рабочего электрода составляет 97,34 см^2.

Обсуждение

После того, как в ЭЯВД были созданы условия испытания, сразу была снята поляризационная кривая Тафеля. В первые сутки испытания регистрировались лишь шумовые токи без явной зависимости от потенциала. Это свидетельствует об отсутствии электрохимических процессов в рассматриваемой системе. Но поляризационная кривая, полученная после испытания продолжительностью в пять суток, уже принимает классический вид тафелевской кривой. С помощью ЭЯВД и потенциостата IPC-ProMF были получены поляризационные кривые после испытаний продолжительностью 5, 10, 15, 20, 25, 30 суток. На рисунке 11 представлены наиболее представительные поляризационные кривые в координатах Тафеля для образца НКТ с



а) б)

а) принципиальная схема; б) в сборе в испытательном стенде

a) schematic diagram b) assembled in the test bench

Рисунок 10. Электрохимическая ячейка высокого давления (ЭЯВД)

Figure 10. High pressure electrochemical cell (ECHP)

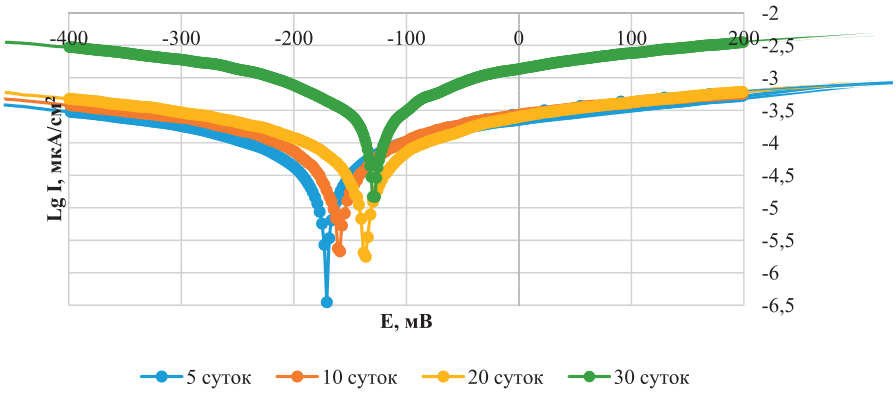


Рисунок 11. Поляризационные кривые в координатах Тафеля для образца НКТ73 с внутренним покрытием, полученного на ЭЯВД в режиме «in situ»

Figure 11. Tafel polarization curves for an inline coated NKT73 sample generated by an ECHP in in situ mode

внутренним покрытием, полученные на ЭЯВД в режиме «in situ», в процессе выдержки.

В таблице 2 представлены параметры электрохимической коррозии НКТ с покрытием, полученные с помощью поляризационных кривых Тафеля на разных стадиях испытания на ЭЯВД.

Согласно результатам, полученным по коррозионным характеристикам, с увеличением длительности испытаний плотность тока коррозии увеличивается, а поляризационное сопротивление снижается, что иллюстрирует снижение коррозионной стойкости покрытия.

Таким образом, с помощью метода построения поляризационных кривых в координатах Тафеля, при использовании ЭЯВД, получили результаты, отличающиеся от результатов, полученных на обычной трехэлектродной ячейке для образцов НКТ с покрытием, прошедшим автоклавные испытания. В таблице 2 показаны величины скорости коррозии, рассчитанные при помощи метода построения поляризационных кривых в координатах Тафеля. Характер изменения величин скорости коррозии не противоречит результатам определения адгезии и изучения микроструктур покрытия. Увеличение скорости коррозии с 5,946 нм/год (20 суток испытаний) до 23,506 нм/год (30 суток испытаний), вероятно, связано с отслоением покрытия, которое про-

Таблица 2. Параметры электрохимической коррозии покрытия

Table 2. Coating electrochemical corrosion parameters

Продолжительность испытания, сут	Плотность тока коррозии i_0, нА/см^2	Потенциал коррозии $E_{корр.}$, мВ	Поляризационное сопротивление, $R_{пол.}$, МОм·см^2	Скорость коррозии, нм/год
0	0	67	—	0
5	0,243	минус 172,0	94,454	2,848
10	0,382	минус 157,4	77,815	4,483
15	0,369	минус 145,8	79,392	4,324
20	0,507	минус 134,7	73,983	5,946
25	1,950	минус 129,6	13,174	22,878
30	2,004	минус 128,7	12,782	23,506

изошло между данными временными отметками (между 20 и 30 сутками испытания) продолжительности испытания, о чем свидетельствуют результаты определения адгезии (таблица 1) и результаты изучения микроструктур (рисунки 5–6). Следовательно, полученные с помощью ЭЯВД поляризационные кривые на разных сроках продолжительности испытания отображают действительные процессы снижения барьерных свойств покрытия, которые происходят в результате воздействия на покрытие созданных условий испытания. Представленные скорости коррозии рассчитаны на полную поверхность образца трубы, погруженную в электролит, то есть поверхность рабочего электрода. Полученные значения очень малы, однако при наличии локальных повреждений покрытия (поры, трещины) или металла (питтинг) даже такие малые скорости могут оказать существенное влияние на ресурс НКТ. При этом, согласно микроструктурному анализу, наблюдается образование плотных слоев продуктов коррозии на поверхности металла даже при отсутствии сквозных дефектов покрытия.

Также с помощью «Электрохимической ячейки высокого давления для испытаний антикоррозионных защитных покрытий, нанесенных на внутреннюю поверхность труб» был применен метод электрохимической импедансной спектроскопии (ЭИС) по принципу «in situ».

Из рисунка 12 видно, что в самом начале проведения испытания годограф имеет преи-

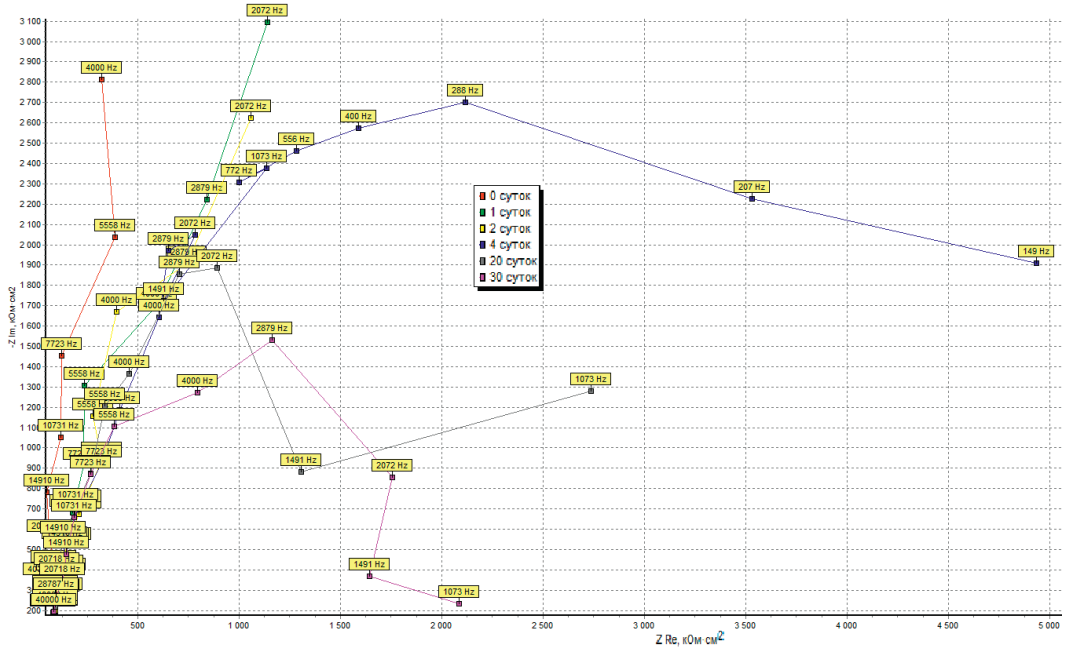


Рисунок 12. Годографы полимерного покрытия, полученные с помощью ЭЯВД на различных продолжительностях испытания

Figure 12. Polymer coating hodographs produced by ECHP over various test durations

мущественно емкостную природу. Наблюдаемый годограф (0 суток испытания) НКТ с покрытием ограничен частотой 4 кГц, поскольку уже при той частоте общий импеданс системы становится очень высоким, и протекающие токи оказываются ниже уровня наводок от внешних электромагнитных полей. Годографы, соответствующие испытаниям 1 и 2 суток, ограничены частотой 2 кГц. После испытания продолжительностью в 4 суток, намечается стремление годографа к форме полукруга, которая свойственна для параллельных RC-цепей. При дальнейшем проведении испытаний наблюдалось постепенное смещение годографа в сторону увеличения доли резистивного отклика, что указывает на снижение сопротивления внутреннего покрытия в связи с появлением дефектов, вызванных длительным пребыванием в агрессивных условиях (температура, давление, присутствие сероводорода).

При снижении частоты, при достижении определенного порога частот, на диаграмме Боде наблюдалась область хаотичного разброса получаемых точек на годографепо углу сдвига фаз. При этом модульные значения импеданса определялись без разброса. Это вызвано электромагнитными помехами от работы оборудования, которые влияют на измерения импеданса высокоомных объектов. Требуется проведение мероприятий для устранения помех. Но даже на их фоне, удалось с помощью ЭЯВД и метода ЭИС наблюдать изменение ёмкостно-омических характеристик защитного покрытия (рисунок 12). При этом, например, изучение покрытий методом ЭИС после автоклава на обычной трехэлектродной ячейке не показало произошедших с покрытием изменений в ходе автоклавных испытаний (рисунок 9).

Таким образом, в данной статье была продемонстрирована возможность применения электрохимических методов для оценки качества внутренних антикоррозионных полимерных покрытий НКТ, обладающих высокими барьерными свойствами. Информативными оказались измерения«in situ» во время непосредственного воздействия на покрытия воссозданных условий эксплуатации (давление газов, температура).

Выводы

В ходе проведённой работы выполнено комплексное исследование эксплуатационных свойств внутреннего полимерного покрытия насосно-компрессорной трубы (НКТ73) с применением как существующих методов, так и с применением предлагаемого метода оценки покрытия при помощи ЭЯВД. Проведено сопоставление результатов автоклавных испытаний, микроструктурного анализа, измерения адгезии, а также электрохимических методов диагностики, включая спектроскопию электрохимического импеданса (ЭИС) и метод поляризационных кривых Тафеля. Показано, что традиционные электрохимические исследования, примененные для изучения образцов НКТ с покрытием после автоклавных испытаний при атмосферных условиях, не позволяют достоверно отразить реальные процессы деградации покрытия вследствие восстановления его барьерных после извлечения из условий испытания (давление газов, температура). В то же время разработанная авторами электрохимическая ячейка высокого давления (ЭЯВД) обеспечивает возможность проведения испытаний по принципу insitu, то есть в условиях, максимально приближённых к эксплуатационным (высокое давление, температура и наличие коррозионно-активных газов). Использование ЭЯВД позволило зарегистрировать постепенные изменения электрохимических характеристик покрытия в процессе испытаний: наблюдалось смещение годографов в сторону увеличения резистивного отклика, что указывает на деградацию защитных свойств. Тафелевские поляризационные кривые в ячейке под давлением подтвердили закономерный рост плотности тока коррозии (т.е. развитие коррозионного процесса) с увеличением длительности испытаний, что коррелирует с результатами определения адгезии и микроструктурного анализа. Таким образом, доказана эффективность применения разработанной электрохимической ячейки высокого давления для комплексной оценки деградации внутренних антикоррозионных полимерных покрытий НКТ в режиме in situ. Методика позволяет повысить информативность лабораторных испытаний внутренних покрытий НКТ и обеспечить более точное прогнозирование срока службы покрытий в реальных условиях эксплуатации нефтяных скважин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИК

1. Апасов Г.Т., Апасов Т.К., Порожняков Д.В. Протекторная защита от коррозии насосного оборудования и НКТ // Опыт, актуальные проблемы и перспективы развития нефтегазового комплекса: матер. V региональной науч.-практ. конф. обучающихся ВО, аспирантов и ученых. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет, 2015. С. 283-291. EDN: UISVBB.

2. Давыдова В.А., Зубарев А.М., Болдырев В.С., Богомолов Б.Б. Алгоритм выбора защитного покрытия трубопроводной арматуры в сероводородной среде // Необратимые процессы в природе и технике: тр. Одиннадцатой Всеросс. конф. в 2 т. М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана. 2021. Т. 2. С. 63-66. EDN: PDNQUY.

3. Малыхина Л.В., Тахаутдинова Г.Л., Боклина Н.В., Тимерзянов М.Г. Сравнительная оценка антикоррозионных свойств порошковых систем покрытий для внутренней поверхности насосно-компрессорных труб // Сб. науч. тр. ТатНИПИнефть. Том Выпуск LXXXVIII. ПАО «ТАТНЕФТЬ». М.: ЗАО «Издательство «Нефтяное хозяйство», 2020. С. 290-298. EDN: PDISDN.

4. Юдин П.Е. Комплексные испытания внутренних покрытий нефтяных труб, эксплуатирующихся в осложненном фонде // Нефтегазовое дело. 2025. Т. 23. № 2. С. 78-90. DOI: 10.17122/ngdelo-2025-2-78-90. EDN: OFCICC.

5. Александров Е.В., Юдин П.Е., Князева Ж.В. Новая методика автоклавного теста для экспресс-анализа антикоррозионных покрытий // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2015. № 3 (49). С. 3-11. EDN: UHCFNH.

6. Пат. 130878 U1 РФ, МПК B01J 3/04, B01L 1/02. Лабораторный автоклав / П.Е. Юдин, М.В. Желдак, С.С. Петров, Е.В. Александров, А.М. Манахов. 2013107637/05, Заявлено 20.02.2013; Опубл. 10.08.2013. EDN: ZWONIT.

7. Юдин П.Е., Богатов М.В. Изменение физико-механических свойств свободной пленки полимерного покрытия при моделировании эксплуатационных условий в автоклавном комплексе // Физическое материаловедение (ШФМ-2025): сб. матер. XII междунар. школы-конф. Тольятти: Тольяттинский государственный университет, 2025. С. 107-108. EDN: CTVMMA.

8. Alkordy F.M. Evaluation of Organic Protective Coatings as Corrosion Prevention for The Interior of Subsea Pipelines in Sour Gas Service. 2015.

9. Rajagopalan, N., Weinell, C. E., Dam-Johansen, K., Kiil, S. Influence of CO2 at HPHT conditions on the properties and failures of an amine-cured epoxy novolac coating // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2021. Vol. 60. No. 41. P. 14768-14778. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c02713.

10. Croll S.G. Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: A review // Progress in organic Coatings. 2020. Vol. 148. P. 105847. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105847.

11. Наконечная К.В., Елагина О.Ю. Исследование потери свойств внутренних полимерных покрытий под действием промысловых сред // Междунар. науч.-технич. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 300-летию Российской академии наук. 2022. С. 228-233. EDN: PIUASJ.

12. Наконечная К.В., Елагина О.Ю. Оценка долговечности внутренних покрытий промысловых трубопроводов // Техника и технологии машиностроения: матер. X междунар. науч.-технич. конф. Омск: Омский государственный технический университет. 2021. С. 90-93. EDN: PXHQFZ.

13. Nan D., Li X., Li D., Liu Q., Wang B., Gao X., Dong J. Preparation and Anticorrosive Performance of Waterborne Epoxy Resin Composite Coating with Amino-Modified Graphene Oxide // Polymers. 2022. Vol. 15. No. 1. P. 27. DOI: 10.3390/polym15010027.

14. Ding C., Wu J., Liu Y., Sheng X., Cheng X., Xiong X., Zhao W. A Waterborne Epoxy Composite Coating with Smart Corrosion Resistance Based On 2-Phenylbenzimidazole-5-Sulfonic Acid/Layered Double Hydroxide Composite // Molecules. 2023. Vol. 28. No. 13. P. 5199. DOI: 10.3390/molecules28135199.

15. Максимук А.В., Берков Д.В., Веревкин А.Г., Богатов М.В. Разработка электрохимической ячейки высокого давления для испытаний внутренних антикоррозионных покрытий НКТ // Нефтегазовое дело. 2025. Т. 23. № 5. С. 141-153. DOI: 10.17122/ngdelo-2025-5-141-153. EDN: OTXTXO.

16. Касаткин В.Э. Потенциостатический комплекс IPC-FRA для электрохимических и коррозионных исследований // Фундаментальные и прикладные вопросы электрохимического и химико-каталитического осаждения металлов и сплавов: Тез. док. конф. М.: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, 2017. С. 116. EDN: UZYXIM.

REFERENCES

1. Apasov G.T., Apasov T.K., Porozhnyakov D.V. Protektornaya zashchita ot korrozii nasosnogo oborudovaniya i NKT [Corrosion Protection of Pumping Equipment and Tubing]. *Materialy V regional'noj nauchno-prakticheskoj konferencii obuchayushchihsya VO, aspirantov i uchenyh «Opyt, aktual'nye problemy i perspektivy razvitiya neftegazovogo kompleksa»* [Materials of the V regional scientific-practical conference of students of higher education institutions, graduate students and scientists «Experience, current problems and prospects for the development of the oil and gas complex»]. 2015, pp. 283-291. EDN: UISVBB. [in Russian].

2. Davydova V.A., Zubarev A.M., Boldyrev V.S., Bogomolov B.B. Algoritm vybora zashchitnogo pokrytiya truboprovodnoj armatury v serovodorodnoj srede [Algorithm for Selecting the Protective Coating of Pipeline Valves in a Hydrogen Sulfide Environment]. *Trudy Odinnadcatoj Vserossijskoj konferencii: v 2 t. «Neobratimye processy v prirode i tekhnike»* [Proceedings of the Eleventh All-Russian Conference: in 2 volumes «Irreversible processes in nature and technology»]. Moscow, Publishing House MSTU named after N.E. Bauman. 2021. Vol. 2, pp. 63-66. EDN: PDNQUY. [in Russian].

3. Malykhina L.V., Takhautdinova G.L., Boklina N.V., Timerzyanov M.G. Sravnitel'naya ocenka antikorrozionnyh svojstv poroshkovyh sistem pokrytij dlya vnutrennej poverhnosti nasosno-kompressornyh trub [Comparative Evaluation of Anti-Corrosion Properties of Powder Coating Systems for The Inner Surface of Tubing]. *Sbornik nauch-*

nyh trudov TatNIPIneft' tom vypusk LXXXVIII. PAO «TATNEFT'» [Collection of scientific works of TatNIPIneft volume LXXXVIII. PJSC TATNEFT]. Moscow, CJSC Publishing House «Oil Economy,» 2020. pp. 290-298. EDN: PDISDN. [in Russian].

4. Yudin P.E. Kompleksnye ispytaniya vnutrennih pokrytij neftyanyh trub, ekspluatiruyushchihsya v oslozhnennom fonde [Complex Tests of Internal Coatings of Oil Pipes Operated in Complicated Stock]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2025, Vol. 23, No. 2, pp. 78-90. DOI: 10.17122/ngdelo-2025-2-78-90. EDN: OFCICC. [in Russian].

5. Aleksandrov E.V., Yudin P.Y., Knyazeva J.V. Novaya metodika avtoklavnogo testa dlya ekspress-analiza antikorrozionnyh pokrytij [The New Technique of Autoclave Test for the Rapid Analysis of Anticorrosion Coatings]. *Truboprovodnyj transport: teoriya i praktika — Pipeline Transport: Theory and Practice*, 2015, No. 3 (49), pp. 3-11. EDN: UHCFNH. [in Russian].

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

7. Yudin P.E., Bogatov M.V. Izmenenie fiziko-mekhanicheskih svojstv svobodnoj plenki polimernogo pokrytiya pri modelirovanii ekspluatacionnyh uslovij v avtoklavnom komplekse [Change in The Physical and Mechanical Properties of The Free Film of The Polymer Coating When Modeling the Operating Conditions in the Autoclave Complex]. *Sbornik materialov XII mezhdunarodnoj shkoly-konferencii «Fizicheskoe materialovedenie (ShFM-2025)»* [Collection of materials of the XII international school-conference «Physical materials science (ShFM-2025)»]. Togliatti, Togliatti State University Publ., 2025. pp. 107-108. EDN: CTVMMA. [in Russian].

8. Alkordy F.M. Evaluation of Organic Protective Coatings as Corrosion Prevention for The Interior of Subsea Pipelines in Sour Gas Service. 2015.

9. Rajagopalan, N., Weinell, C.E., Dam-Johansen, K., Kiil, S. Influence of CO_2 at HPHT conditions on the properties and failures of an amine-cured epoxy novolac coating. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, Vol. 60, No. 41, pp. 14768-14778. DOI: 10.1021/acs.iecr.1c02713.

10. Croll S.G. Surface roughness profile and its effect on coating adhesion and corrosion protection: A review. *Progress in organic Coatings*, 2020, Vol. 148, pp. 105847. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2020.105847.

11. Nakonechnaya K.V., Elagina O.Yu. Issledovanie poteri svojstv vnutrennih polimernyh pokrytij pod dejstviem promyslovyh sred [Study of Loss of Properties of Internal Polymer Coatings Under the Influence of Field Media]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferenciya molodyh uchenyh BGTU im. V.G. Shuhova, posvyashchennaya 300-letiyu Rossijskoj akademii nauk* [International Scientific and Technical Conference of Young Scientists BSTU named after V.G. Shukhov, dedicated to the 300th anniversary of the Russian Academy of Sciences]. 2022. pp. 228-233. EDN: PIUASJ. [in Russian].

12. Nakonechnaya K.V., Elagina O.Yu. Ocenka dolgovechnosti vnutrennih pokrytij promyslovyh truboprovodov [Evaluation of Pipeline Internal Coating Durability]. *Materialy X Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii «Tekhnika i tekhnologii mashinostroeniya»* [Materials of the X International Scientific and Technical Conference «Mechanical Engineering Technology»]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2021. pp. 90-93. EDN: PXHQFZ. [in Russian].

13. Nan D., Li X., Li D., Liu Q., Wang B., Gao X., Dong J. Preparation and Anticorrosive Performance of Waterborne Epoxy Resin Composite Coating with Amino-Modified Graphene Oxide. *Polymers*, 2022, Vol. 15, No. 1, pp. 27. DOI: 10.3390/polym15010027.

14. Ding C., Wu J., Liu Y., Sheng X., Cheng X., Xiong X., Zhao W. A Waterborne Epoxy Composite Coating with Smart Corrosion Resistance Based On 2-Phenylbenzimidazole-5-Sulfonic Acid/Layered Double Hydroxide Composite. *Molecules,* 2023, Vol. 28, No. 13, pp. 5199. DOI: 10.3390/molecules28135199.

15. Maksimuk A.V., Berkov D.V., Verevkin A.G., Bogatov M.V. [Development of Electrochemical Cell of High Pressure for Tests of Anticorrosion Protective Coatings Applied on Inner Surface of Tubing]. *Neftegazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2025, Vol. 23, No. 5, pp. 141-153. DOI: 10.17122/ngdelo-2025-5-141-153. EDN: OTXTXO. [in Russian].

16. Kasatkin V.E. Potenciostaticheskij kompleks IPC-FRA dlya elektrohimicheskih i korrozionnyh issledovanij [Potentiostatic Complex IPC-FRA for Electrochemical and Corrosion Studies]. *Tezisov dokladov konferencii «Fundamental'nye i prikladnye voprosy elektrohimicheskogo i himiko-kataliticheskogo osazhdeniya metallov i splav»* [Abstracts of the conference «Fundamental and applied issues of electrochemical and chemical-catalytic deposition of metals and alloy»]. Moscow, Federal State Budgetary Institution of Science A.N. Frumkin Institute of Physical Chemistry and Electrochemistry of the Russian Academy of Sciences Publ., 2017, pp. 116. EDN: UZYXIM. [in Russian].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ
INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Андрей Викторович Максимук, *управляющий, ООО «НПЦ «Самара»;*
аспирант, Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация

Andrey V. Maksimuk, *manager, SPC Samara LLC;*
postgraduate student, Samara state technical university, Samara, Russian Federation

maximuk@npcsamara.ru

Денис Валентинович Берков, *кандидат технических наук,*
ведущий инженер, ООО «НПЦ «Самара», Самара, Российская Федерация

Denis V. Berkov, *candidate of technical sciences, lead engineer, SPC Samara LLC, Samara, Russian Federation*

berkov@npcsamara.ru

Вадим Эдуардович Касаткин, *кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник,*
Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН,
Москва, Российская Федерация

Vadim E. Kasatkin, *candidate of chemical sciences, lead researcher, Physical chemistry and electrochemistry institute named after A.N. Frumkin, RAS, Moscow, Russian Federation*

vadim_kasatkin@mail.ru

Александр Петрович Амосов, *доктор физико-математических наук, профессор,*
заведующий кафедрой «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы»,
Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация

Aleksandr P. Amosov, *doctor of physics and mathematics, professor, head of the Metal science,*
powder metallurgy, nanomaterials department, Samara state technical university, Samara, Russian Federation

egundor@yandex.ru

Александр Григорьевич Веревкин, *кандидат химических наук, директор по развитию,*
ООО «НПЦ «Самара», Самара, Российская Федерация

Aleksandr G. Verevkin, *candidate of chemical sciences, development director,*
SPC Samara LLC, Samara, Russian Federation

verevkin@npcsamara.ru

Анна Юрьевна Поздеева, *научный сотрудник аналитического отдела, ООО «НПЦ «Самара»;*
аспирант, Самарский государственный технический университет, Самара, Российская Федерация

Anna Yu. Pozdeeva, *researcher, Analytical department, SPC Samara LLC;*
postgraduate student, Samara state technical university, Samara, Russian Federation

pozdeeva@npcsamara.ru

Статья поступила в редакцию 05.12.2025; одобрена после рецензирования 14.01.2026; принята к публикации 30.01.2026.

The article was submitted 05.12.2025; approved after reviewing 14.01.2026; accepted for publication 30.01.2026.