

И. А. Фатхуллин, А. Ф. Дресвянников

АНОДНЫЕ ЗАЕМЛИТЕЛИ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Ключевые слова: катодная защита, анодные заземлители, резервуары вертикальные стальные, электрохимическая коррозия, ферросилид, магнетит, аноды с покрытием ММО, вентильные металлы, плотность анодного тока.

Коррозионное разрушение стальных вертикальных резервуаров (РВС), эксплуатируемых в нефтегазовой отрасли, является одной из ключевых причин снижения промышленной и экологической безопасности объектов хранения углеводородного сырья. Наиболее интенсивные коррозионные процессы развиваются в зоне контакта металла с подтоварной водой, характеризующейся высокой минерализацией, присутствием растворённого кислорода, углекислого газа и сероводорода. В этих условиях применение исключительно защитных покрытий не обеспечивает требуемой долговечности оборудования, что обуславливает необходимость использования систем электрохимической защиты. Эффективность катодной защиты в значительной степени определяется характеристиками анодных заземлителей, обеспечивающих протекание защитного тока в жидкости - электролите. В статье представлен системный анализ современных и перспективных анодных материалов, применяемых при катодной защите внутренних поверхностей РВС. Рассмотрены электрохимические основы работы анодов, механизмы анодной поляризации и факторы, влияющие на скорость анодного растворения. Проведена классификация анодных заземлителей по типу материала и принципу функционирования: растворимые аноды на основе высококремнистого чугуна, магнетитовые и графитовые электроды, аноды из полимерных композиционных материалов, а также инертные аноды на основе вентильных металлов с покрытиями из смешанных оксидов металлов платиновой группы (ММО). Выполнен сравнительный анализ рабочих плотностей тока, удельной скорости растворения и эксплуатационных ограничений различных материалов. Показано, что выбор анодного заземлителя должен осуществляться с учётом минерализации среды, требуемого срока службы системы и допустимых токовых нагрузок. Определены перспективные направления развития анодных систем для повышения их ресурса и энергоэффективности.

I. A. Fatkhullin, A. F. Dresvyannikov

ANODE GROUNDBEDS FOR CATHODIC PROTECTION OF STEEL TANKS AGAINST CORROSION

Keywords: cathodic protection, anode groundbeds, vertical steel tanks, electrochemical corrosion, ferrosilicon, magnetite, MMO-coated anodes, valve metals, anode current density.

Corrosion damage to vertical steel storage tanks (VSTs) used in the oil and gas industry is one of the key factors contributing to reduced industrial and environmental safety at hydrocarbon storage facilities. The most intense corrosion processes occur in the zone where the metal comes into contact with bottom water, which is characterized by high mineralization and the presence of dissolved oxygen, carbon dioxide, and hydrogen sulfide. Under these conditions, the use of protective coatings alone does not ensure the required durability of the equipment, which necessitates the use of electrochemical protection systems. The effectiveness of cathodic protection is largely determined by the characteristics of the anode grounding electrodes, which ensure the flow of protective current in the liquid electrolyte. This article presents a systematic analysis of modern and promising anode materials used in the cathodic protection of internal surfaces of pressure vessels. The electrochemical principles of anode operation, mechanisms of anode polarization, and factors influencing the rate of anode dissolution are examined. Anodic sacrificial anodes are classified by material type and operating principle: soluble anodes based on high-silicon cast iron, magnetite and graphite electrodes, anodes made of polymer composite materials, as well as inert anodes based on noble metals with coatings of mixed oxides of platinum group metals (MMO). A comparative analysis of operating current densities, specific dissolution rates, and operational limitations of various materials has been performed. It is shown that the selection of an anode grounding system should be based on the mineralization of the environment, the required service life of the system, and permissible current loads. Promising directions for the development of anode systems to increase their service life and energy efficiency have been identified.

Введение

Коррозия металлических конструкций является неизбежным следствием их термодинамической неустойчивости в условиях эксплуатации и представляет собой один из основных факторов снижения надёжности и промышленной безопасности объектов нефтегазовой отрасли [1, 2]. Для резервуаров вертикальных стальных (РВС), предназначенных для хранения нефти и нефтепродуктов, наибольшую опасность представляет внутренняя электрохимическая коррозия в зоне контакта металла с подтоварной водой [3, 4]. Наличие в водной фазе растворённого кислорода, углекислого газа, сероводорода и хлорид-ионов формирует электролитическую среду с

высокой электропроводностью, способствующую интенсификации анодных процессов растворения, стали и развитию локальных коррозионных повреждений [3-5].

Согласно действующим нормативным требованиям по защите металлических сооружений от коррозии, обеспечение требуемого срока службы резервуарных конструкций достигается применением комплексной системы противокоррозионной защиты, включающей защитные покрытия и электрохимическую защиту [6-10]. Однако эксплуатационная практика показывает, что деградация покрытий в условиях высокой минерализации и механических воздействий приводит к образованию дефектов, через которые развивается локальная коррозия [11,

12]. В этих условиях решающую роль в обеспечении долговечности конструкции играет катодная защита.

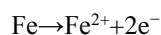
Она основана на смещении потенциала защищаемой конструкции в область, при которой скорость анодного растворения стали существенно снижается. Реализация данного метода требует обеспечения протекания защитного тока в электролите с помощью анодных заземлителей, которые становятся ключевым элементом системы. От их электрохимических характеристик зависят стабильность распределения потенциала, величина рабочих плотностей тока и расчётный ресурс установки [13-15].

Несмотря на широкое применение ферросилидовых, магнетитовых электродов и анодов на основе вентильных металлов с покрытиями из смешанных оксидов, вопросы их рационального выбора для условий эксплуатации РВС остаются актуальными. В опубликованных работах, как правило, рассматриваются отдельные типы анодов либо общие принципы катодной защиты, тогда как комплексный сравнительный анализ электрохимических характеристик анодных материалов применительно к защите внутренней поверхности резервуаров представлен фрагментарно. К тому же практически отсутствует унифицированный подход к сопоставлению допустимых плотностей тока, скорости разрушения и прогнозируемого срока службы анодных систем в условиях повышенной минерализации подтоварной воды [18, 19].

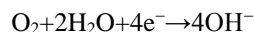
В связи с этим целью настоящей работы является систематизация и сравнительный анализ современных анодных заземлителей, применяемых в системах катодной защиты внутренних поверхностей РВС, с учётом их природы, электрохимических свойств, эксплуатационных ограничений и области рационального применения.

Электрохимические основы работы анодных заземлителей в системах катодной защиты РВС

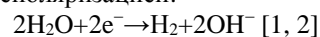
Катодная защита внутренних поверхностей резервуаров вертикальных стальных реализуется путём смещения потенциала защищаемой конструкции в область, при которой скорость анодного растворения стали существенно уменьшается. В водных электролитах нейтрального и слабощелочного характера защитный потенциал углеродистых сталей обычно находится в диапазоне $-0,80 \dots -1,05$ В относительно хлоридсеребряного электрода сравнения [14, 15, 20]. При достижении этих значений подавляется анодная реакция растворения железа:



Катодные процессы в системе определяются составом подтоварной воды. В условиях аэрации основной реакцией является восстановление кислорода:

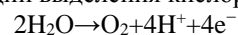


При ограниченном доступе кислорода возможно протекание реакции выделения водорода с водородной деполаризацией:

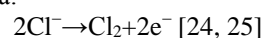


В присутствии сероводорода и сульфид-ионов возможны дополнительные катодные процессы, способные влиять на кинетику поляризации и распределение потенциала [21-23].

Анодный заземлитель в системе катодной защиты выполняет функцию источника тока в электролите и является местом протекания процессов окисления. В случае растворимых анодов протекает реакция электрохимического растворения материала, сопровождающаяся потерей массы. Для малорастворимых и инертных анодов характерно протекание реакций выделения кислорода:



или, в хлоридсодержащих средах, реакции выделения хлора:



Конструктивная схема системы катодной защиты РВС с анодным заземлителем представлена на рисунке 1.

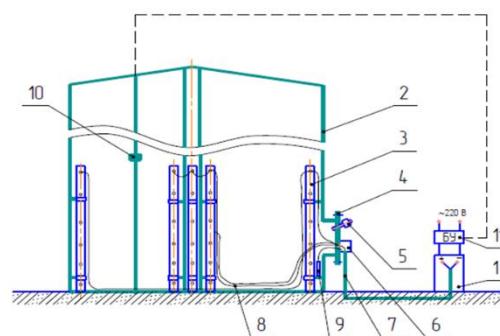


Рис. 1 – Принципиальная схема системы катодной защиты резервуара с анодным заземлителем

Fig. 1 – Schematic diagram of a tank cathodic protection system with an anode grounding electrode

На схеме (рис. 1) показаны основные элементы системы: СКЗ (1), резервуар (2), анодный узел (3) и монтажный люк (4), узел замера потенциала (5), вводная коробка (6), дренажный кабель (7), анодные выводы (8), электрод сравнения (9). Подача тока от положительного полюса источника к анодному заземлителю обеспечивает протекание защитного тока в электролите, после чего ток распространяется в направлении к металлической поверхности резервуара, обеспечивая её катодную поляризацию.

Скорость разрушения анодного материала определяется плотностью анодного тока j_a , электрохимической стойкостью материала и агрессивностью среды. Для растворимых анодов ключевым параметром является удельная скорость растворения (кг/А·год), определяющая расчётный срок службы. При превышении допустимых плотностей тока возможно развитие перепассивации, сопровождающееся резким ростом скорости растворения и локальным разрушением поверхности [26-28].

Внутренние системы защиты РВС функционируют в условиях повышенной минерализации подтоварной воды, что приводит к увеличению электропроводности среды и изменению распределения защитного потенциала по поверхности металла. Высокая концентрация хлорид-ионов способствует интенсификации анодных процессов и обуславливает повышение требований к коррозионной стойкости материала анода. В этих условиях стабильность работы анодного заземлителя определяется способностью сохранять структурную целостность и электрохимические характеристики при длительной анодной поляризации [29-31].

Пример конфигурации размещения анодных элементов в системе внутренней катодной защиты резервуара представлен на рисунке 2.

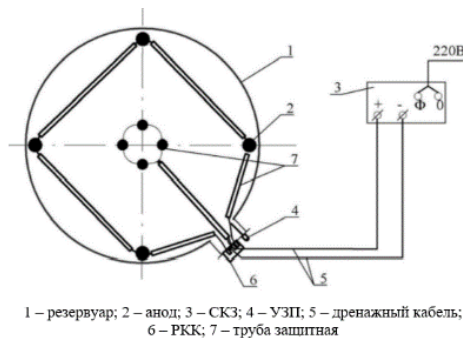


Рис. 2 – Схема размещения анодных элементов в резервуаре вертикальном стальном

Fig. 2 – Layout of anode elements in a vertical steel tank

На схеме (рис. 2) показаны: резервуар (1), анодные элементы (2), станция катодной защиты (3), узел электрического подключения (4), дренажный кабель (5), распределительная коробка (6) и защитная труба (7). Кольцевая и радиальная компоновка анодов обеспечивает более равномерное распределение плотности защитного тока по поверхности дна резервуара, что снижает вероятность локальной недополяризации и повышает эффективность электрохимической защиты [32, 33].

При проектировании внутренней катодной защиты вертикальных стальных резервуаров определение требуемого защитного тока является одним из ключевых этапов расчёта. Величина тока зависит от площади защищаемой поверхности, плотности защитного тока и коэффициента неравномерности распределения потенциала.

Расчётный защитный ток определяется выражением:

$$I = j \cdot S \cdot k$$

где I - суммарный защитный ток, А;

j - требуемая плотность защитного тока, А/м²;

S - площадь защищаемой поверхности, м²;

k - коэффициент неравномерности (1,1-1,3).

Для резервуара диаметром 20 м площадь дна составляет:

$$S = \pi D^2 / 4 \approx 314 \text{ м}^2.$$

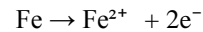
При плотности защитного тока 0,02-0,05 А/м² расчётный ток системы составляет 6-15 А. Полученное значение используется для определения количества и типа анодных элементов [20, 34, 35].

Выбор анодного материала должен основываться на анализе его поляризационных характеристик, допустимых рабочих плотностей тока, устойчивости к хлоридной и сероводородной среде, а также прогнозируемом ресурсе эксплуатации. Эти параметры являются определяющими при сравнении различных типов анодных заземлителей, применяемых в системах катодной защиты внутренних поверхностей РВС.

Ферросилидовые анодные заземлители

Ферросилид (высококремнистый чугун с содержанием кремния порядка 14-18 %) относится к числу традиционных материалов, применяемых в системах катодной защиты резервуарных конструкций. Его электрохимическая стойкость обусловлена формированием на поверхности тонкой пассивной плёнки, содержащей оксид кремния, которая замедляет скорость анодного растворения при рабочих плотностях тока [36, 37].

Анодные процессы в ферросилиде протекают с растворением железной составляющей сплава:



при этом кремний практически не растворяется и способствует формированию защитного слоя. В нейтральных и слабощелочных средах удельная скорость растворения ферросилидовых анодов обычно составляет порядка 0,3-0,6 кг/А·год, что позволяет прогнозировать срок службы анода в пределах нескольких лет при корректном выборе плотности тока [36-38].

Однако устойчивость ферросилида существенным образом зависит от условий эксплуатации. При увеличении плотности анодного тока выше допустимых значений возможно развитие перепассивации, сопровождающейся разрушением защитной плёнки и резким ростом скорости растворения. В хлоридсодержащих средах это может приводить к локальным коррозионным повреждениям поверхности и снижению механической прочности анода [26-28, 38].

Дополнительным ограничивающим фактором является наличие сероводорода в подтоварной воде. В сульфидных средах возможно образование неустойчивых поверхностных соединений, ухудшающих электрохимическую стабильность материала [21-23, 39]. Поэтому при проектировании внутренних систем катодной защиты РВС на основе ферросилидовых анодов требуется ограничение рабочих плотностей тока и увеличение числа анодных элементов для равномерного распределения защитного потенциала.

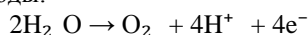
К преимуществам ферросилидовых анодов относятся сравнительно невысокая стоимость, технологичность изготовления и достаточная стойкость в средах с умеренной минерализацией. Однако при повышенных токовых нагрузках и высокой концентрации хлоридов их ресурс

существенно сокращается, что ограничивает область рационального применения.

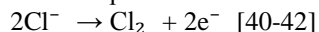
Магнетитовые аноды

Магнетитовые аноды представляют собой электроды на основе оксида железа (Fe_3O_4), обладающего высокой химической и электрохимической устойчивостью в водных электролитах. В отличие от ферросилидových анодов, магнетит не относится к активно растворимым материалам; его функционирование в системе катодной защиты сопровождается преимущественно реакциями выделения кислорода при минимальной деградации основной структуры электрода [40-42].

Анодный процесс на поверхности магнетита в нейтральных средах протекает по реакции разложения воды:



При наличии хлорид-ионов возможно протекание реакции выделения хлора:



Электрохимическая устойчивость магнетита обусловлена его оксидной природой и относительно низкой растворимостью в широком диапазоне pH. Удельная скорость разрушения магнетитовых анодов существенно ниже, чем у ферросилидových, и определяется преимущественно механическими факторами (микротрещины, сколы, внутренние напряжения), а не электрохимическим растворением [40, 41].

Допустимые рабочие плотности тока для магнетитовых анодов, как правило, выше по сравнению с ферросилидowymi, что позволяет использовать их в условиях повышенной токовой нагрузки. Однако хрупкость материала ограничивает их применение в системах, подверженных механическим воздействиям или вибрационным нагрузкам. Кроме того, в средах с высокой концентрацией хлоридов и при значительном газовыделении возможно развитие локальных дефектов поверхности [41-43].

Преимуществами магнетитовых анодов являются: высокая электрохимическая стойкость, сравнительно низкий расход материала и стабильность характеристик при длительной эксплуатации. К ограничениям относятся технологическая сложность изготовления, относительная хрупкость и чувствительность к ударным нагрузкам.

В условиях эксплуатации РВС магнетитовые аноды целесообразно применять при повышенных требованиях к сроку службы системы катодной защиты и стабильности работы при средних и высоких плотностях тока, особенно в случаях, когда применение растворимых анодов экономически или технически неэффективно.

Аноды на основе вентильных металлов с покрытиями из смешанных оксидов (ММО)

Аноды на основе вентильных металлов, преимущественно титана, с нанесёнными

покрытиями из смешанных оксидов металлов платиновой группы (RuO_2 , IrO_2 , Ta_2O_5 и др.) относятся к классу размерно-стабильных анодов и в настоящее время рассматриваются как наиболее технологически совершенные материалы для систем катодной защиты внутренних поверхностей вертикальных стальных резервуаров [24, 25, 44,45]. Электрохимическая активность таких анодов определяется свойствами тонкого оксидного покрытия, тогда как металлическая основа выполняет несущую функцию и практически не вовлекается в процесс растворения.

При анодной поляризации на поверхности ММО-покрытия преимущественно протекают реакции выделения кислорода, а в хлоридсодержащих средах - реакции выделения хлора. Высокая каталитическая активность оксидных слоёв обеспечивает снижение перенапряжения анодных реакций и позволяет реализовывать работу при существенно более высоких плотностях тока по сравнению с ферросилидowymi и магнетитowymi анодами [24, 25, 46]. При этом геометрические размеры электрода сохраняются в течение всего расчётного срока службы, а деградация связана главным образом с постепенным истощением активного оксидного слоя.

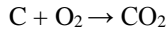
Скорость разрушения анодов данного типа значительно ниже, чем у растворимых материалов, и определяется стабильностью адгезии покрытия к основе, структурой оксидного слоя и условиями эксплуатации. Расчётный срок службы при корректно выбранных токовых нагрузках может составлять десятки лет [47-50, 52]. Это делает аноды с покрытием ММО особенно эффективными в системах, ориентированных на длительную безремонтную эксплуатацию.

В условиях внутренней катодной защиты РВС, где подтоварная вода характеризуется повышенной минерализацией и значительным содержанием хлорид-ионов, такие аноды демонстрируют устойчивость к анодной поляризации и обеспечивают стабильное распределение защитного потенциала. Вместе с тем их применение требует соблюдения технологических требований к монтажу и эксплуатации, поскольку повреждение активного покрытия способно привести к локальной активации основы и ускоренному выходу элемента из строя [51, 52]. Более высокая стоимость по сравнению с традиционными материалами компенсируется увеличенным ресурсом и снижением эксплуатационных затрат на замену анодов.

Анодные заземлители из графита и углеродных материалов

Анодный заземлитель на основе графита отличается скоростью растворения порядка 1,2 кг/А×год, для которого наибольшая плотность тока достигает 5 А/м². В зависимости от используемых связующих материалов различают гибкий и жесткий анодный заземлитель. При достаточном росте уровня тока на аноде происходит выделение кислорода, что ускоряет повреждение изделия. Значительным преимуществом графитового анода является его

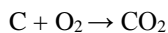
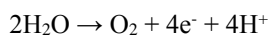
низкая скорость растворения — до 1,2 кг/А×год. Среди недостатков можно выделить высокое сопротивление графитного материала; хрупкость (для чистых составов); небольшую рабочую плотность тока; риск «холодного горения». Графитовые аноды, как известно, применяются и при электрохимической защите в водной среде и грунте с высоким содержанием хлоридов [53]. На этих электродах протекают сложные анодные реакции, дополнительно происходит окисление углерода с образованием углекислого газа:



Известен прием изготовления анодного заземлителя, где исходным материалом графитового электрода является витритовая фракция жирных углей, которая может быть получена дроблением угля и отделением от него фузита. Эта операция выполняется путем флотации, позволяющей разделить петрографические ингредиенты [53].

Для получения композиции полимерного электрода, производят пластификацию каучукоосновного связующего, а также вводят в смесь пластификатор и наполнитель, содержащий углерод [54]. Материал разрушается в агрессивной среде при повышении анодного тока, из-за чего появляется тонкая анодная пленка. Анод имеет достаточно гибкий и длиннолинейный каркас, напоминающий кабель. Его располагают в непосредственной близости от защищаемой конструкции и обеспечивают протекание равномерного тока катодной защиты. Полимерный гибкий анод позволяет разрешать некоторые технологические трудности катодной защиты, такие как помехи от внешних структур, проблемы применения в средах с высокими показателями сопротивления, распределения тока на дне резервуара и т.д. Он имеет множество преимуществ, таких как: распределение тока, низкое энергопотребление, длительный срок службы [55].

В период эксплуатации на полимерном АЗ протекают реакция образования кислорода из воды, присутствующей в емкости:



Как результат, заземляющее изделие теряет защитные свойства из-за окисления и деструкции.

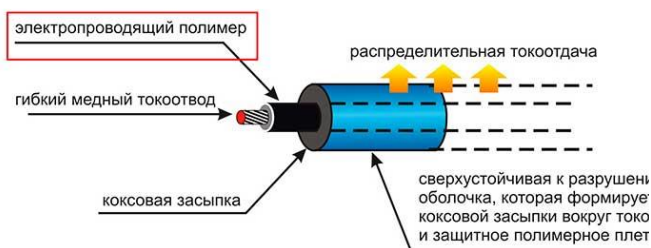


Рис.3 – Схема конструкции полимерного анода

Fig. 3 – Schematic diagram of a polymer anode

Значительным преимуществом композиционных полимерных анодных заземлителей, безусловно, является их низкая стоимость. Среди недостатков можно выделить следующие:

- минимальная механическая надежность;
- низкие показатели максимального анодного тока;
- повышение переходного сопротивления контурного элемента;
- быстрая потеря эффективности.

Существенным минусом полимерных заземлителей является их негативное влияние на экологию. При выработке гарантийного срока эксплуатации и полного анодного растворения технического углерода остается полимерная матрица, которая не разрушается с течением длительного времени.

В работе [45] приводятся как минимум три примера изготовления принципиально новых анодных заземлителей. В первом примере в пластифицированный полиизопреновый каучук вводят стабилизаторы и отходы металлургических производств, таких как магнитный графит в смешении с отходами чугунолитейного и доменного производств. У такого анода предельно допустимое значение анодного тока составляет: $11 \pm 0,5$ А, анодная растворимость: $0,25 \pm 0,3 \frac{\text{кг}}{\text{А} \times \text{год}}$, эластичность: 45 ± 27 %. В качестве полимера используют дивинилстирольный термоэластопласт, в который вводят углеродсодержащий шлак. Характеристики такого заземлителя, следующие: предельно допустимое значение анодного тока: $10,8 \pm 0,2$ А, анодная растворимость: $0,24 \pm 0,2 \frac{\text{кг}}{\text{А} \times \text{год}}$, эластичность 46%.

В композицию по примеру 1 вводят токовод из латунированной стальной проволоки или графита, продольное сопротивление, которого должно составлять 8×10^{-5} Ом×м. Авторы [56] утверждают, что такая технология упрощает изготовление, а также значительно снижает стоимость готового изделия за счет использования отходов металлургических производств. Отходы металлургических производств при этом должны составлять в изделии не менее 10 мас. %, а оксиды железа и цинка не менее, чем 3 мас. % [56]. Изготавливаемый, согласно вышеописанной технологии, анодный заземлитель обладает низким удельным электросопротивлением, высоким допустимым значением анодного тока, эластичностью, низкой анодной растворимостью, долговечностью, превышающей 35 лет. При этом повышается экологическая чистота изделия за счет того, что углеродсодержащие компоненты не подкисляют среду.

В работе [57] проведены исследования по созданию анодного заземлителя, который имеет низкую себестоимость без ухудшения характеристик. Это достигается за счет выполнения электрода из связующей смеси, в качестве компонентов которой используют полиуретан, а также малорастворимый углеродсодержащий материал при соотношении компонентов, масс. %: углеродсодержащий материал 70-90, полиуретан 10-

30. При этом в качестве углеродсодержащего материала может использоваться литейный графит или смесь графита и магнетита в соотношении, масс. %: графит литейный 30-50, магнетит 50-70.

Использование в качестве связующего полиуретана, двухкомпонентного эластомера, отверждающегося при 18-25 °С, позволяет снизить свободную пористость электрода, что исключает его механическую деструкцию за счет расклинивающего давления проникающего в поры раствора [58]. Прессование компонентов при давлении 10-50 мПа при комнатной температуре обеспечивает максимальную электропроводность за счет большой площади межзеренных контактов углеродсодержащих компонентов электрода. Полиуретановое связующее при длительном контакте с растворами не подвергается гидролизу с образованием экологически опасных продуктов, что предотвращает химическую деструкцию материала электрода.

Жесткая фиксация материала электрода в полимерной матрице снижает скорость его деструкции за счет заполнения пор газообразными продуктами окисления графита и создания избыточного давления в микрополостях материала. Это также исключает рост потенциала электрода в процессе функционирования и, соответственно, повышенный расход электроэнергии. Наличие токопроводящего (глухого) торца, остающегося открытым вследствие наличия контактного узла только в одном торце электрода, увеличивает рабочую поверхность электрода, что в одном из вариантов устройства заземления обеспечивает функционирование при возникновении на боковой поверхности слабопроводящего слоя [59].

Композитный анод, в частности, но не исключительно, на основе магния содержит множество отливок жертвенного материала, каждая из которых расположена вокруг электрического разъема для прикрепления к защищаемой конструкции, причем отливки соединены друг с другом электрически только через электрические соединители [60]. Размещение провода токоввода без изгибов осуществляется под слоем герметика. Защитные свойства изолирующей оболочки обусловлены ее компонентом, обладающим высокой адгезией к материалу электрода, вязкостью и текучестью, обеспечивающими затекание до отверждения или уплотнения во все полости контактного узла, а также устойчивостью к перепадам температур. В качестве изолирующего материала могут использоваться силиконовые герметики, полиуретаны. Применение смеси литейного графита и магнетита способствует снижению скорости саморастворения электрода в средах с повышенной коррозионной активностью [61].

Сравнительный анализ анодных материалов, применяемых в системах катодной защиты РВС

Сопоставление эксплуатационных характеристик ферросилидовых, магнетитовых и анодов на основе

вентильных металлов с покрытиями из смешанных оксидов показывает, что выбор материала определяется не только его электрохимической стойкостью, но и режимом работы системы, минерализацией подтоварной воды и требуемым сроком службы установки.

Основные эксплуатационные параметры рассматриваемых анодных материалов сведены в табл. 1 [35-37, 40-42, 47-49].

Таблица 1 - Основные характеристики некоторых анодных материалов

Table 1 - Key characteristics of selected anode materials

Материал	Плотность тока, А/м ²	Скорость разрушения, кг/(А·год)	Срок службы
Ферросилид	5-10	0,3-0,6	3-7 лет
Магнетит	10-20	≤0,1	10-15 лет
Ti/ММО	20-100	<0,01	20 лет и более

Представленные данные подтверждают, что повышение электрохимической стойкости сопровождается расширением диапазона допустимых плотностей тока и увеличением срока службы анодных элементов.

Ферросилидовые аноды характеризуются предсказуемой скоростью электрохимического растворения и технологической доступностью. Их применение экономически оправдано при умеренных плотностях тока и относительно невысокой минерализации среды. Однако ресурс таких анодов прямо пропорционален величине токовой нагрузки, а при превышении допустимых значений возможно развитие перепассивации и ускоренное разрушение материала. В условиях высокой концентрации хлорид-ионов стабильность ферросилида снижается, что требует увеличения числа анодных элементов и ограничения рабочих параметров [26-28, 36-38].

Магнетитовые аноды обладают более высокой электрохимической стойкостью и меньшей удельной скоростью разрушения. Их работа основана преимущественно на реакции выделения кислорода, что обеспечивает стабильность при длительной анодной поляризации. Вместе с тем хрупкость материала ограничивает применение в системах, где возможны механические воздействия или неравномерное распределение токовой нагрузки. Экономическая эффективность магнетита проявляется в случаях, когда требуется увеличение срока службы по сравнению с ферросилидом без перехода к более дорогостоящим системам [40-43].

При эксплуатации стальных вертикальных резервуаров в условиях повышенной минерализации подтоварной воды (50-300 г/л по суммарному содержанию солей) растет электропроводность среды, что изменяет характер распределения защитного тока по поверхности днища [29-31, 32, 33].

При плотностях анодного тока выше 15-20 А/м² у ферросилидových анодов увеличивается вероятность локальной перепассивации и ускоренного разрушения материала, особенно в хлоридсодержащих средах [26-28, 36-38].

В случае применения анодов на основе вентильных металлов с покрытием из смешанных оксидов допустимый диапазон рабочих плотностей тока может достигать 50-100 А/м² без существенной деградации геометрии анодного элемента [47-49, 46]. Это позволяет снизить количество анодов в системе при сохранении требуемого уровня катодной поляризации и повысить энергетическую эффективность установки.

Конструктивное исполнение магнетитового анода, применяемого в системах катодной защиты резервуаров, представлено на рисунке 4.



Рис. 4 – Магнетитовый анод для систем катодной защиты резервуаров

Fig. 4 – Magnetite anode for tank cathodic protection systems

Конструкция анода включает активный магнетитовый элемент и контактный вывод для подключения к анодному кабелю. Применение подобных анодов обеспечивает стабильную работу системы при длительной анодной поляризации и позволяет эксплуатировать систему катодной защиты в условиях повышенной минерализации подтоварной воды.

Аноды на основе вентильных металлов с покрытиями ММО обеспечивают наиболее широкий диапазон допустимых плотностей тока и минимальную деградацию геометрии электрода. Их применение особенно целесообразно в резервуарах с высокой минерализацией подтоварной воды, где требуются повышенные токовые нагрузки и длительная эксплуатация без замены анодных элементов. Повышенная стоимость компенсируется снижением эксплуатационных затрат и стабильностью электрохимических параметров в течение всего срока службы [47-50].

Отдельную группу нерастворимых анодов составляют титан-диоксидмарганцевые аноды, получаемые нанесением слоя электроактивного диоксида марганца на подготовленную поверхность титановой основы методом термохимического разложения растворов нитрата или карбоната марганца [62].

Работа таких анодов основана на протекании анодных реакций выделения кислорода, при этом титановая основа выполняет несущую функцию и

должна сохранять устойчивость к анодной поляризации.

Основными недостатками традиционных титан-диоксидмарганцевых анодов являются сравнительно низкая адгезионная прочность оксидного слоя, вероятность пассивации титановой основы при длительной эксплуатации, а также технологическая сложность формирования плотного и электропроводного слоя β-MnO₂ значительной толщины [63]. Недостаточная электропроводность покрытия ограничивает допустимую плотность анодного тока и снижает эффективность работы в средах с повышенной минерализацией.

В ряде исследований предложены усовершенствованные способы получения рельефной поверхности титановой основы без механического формирования макроуглублений и методы модификации оксидного слоя, направленные на повышение электропроводности и допустимой плотности тока [15, 64–68]. Применение таких технологий позволяет сократить трудоёмкость изготовления, повысить ресурс анода и расширить область его применения.

Титан-диоксидмарганцевые аноды рассматриваются как перспективные для использования в обсадных скважинах, припортовых сооружениях и системах защиты нефтепромысловых ёмкостей от внутренней коррозии [69]. Однако по совокупности эксплуатационных характеристик и стабильности каталитических свойств они, как правило, уступают современным анодам с покрытиями из смешанных оксидов металлов платиновой группы [70-71].

При проектировании внутренней катодной защиты РВС выбор анодного материала должен осуществляться с учётом плотности защитного тока, электропроводности среды, наличия хлоридов и сероводорода, а также экономических критериев. Рациональный выбор типа анода позволяет обеспечить требуемый уровень смещения потенциала при минимальном расходе материала и оптимальных энергетических затратах.

Для растворимых анодов срок службы определяется массой активного материала и удельной скоростью его электрохимического растворения. Расчёт этого показателя может быть выполнен по уравнению:

$$T = m / (q \cdot I),$$

где T - срок службы, лет;

m - масса анодного материала, кг;

q - удельная скорость растворения, кг/(А·год);

I - рабочий ток анода, А.

Так, например, при массе ферросилидového анода 25 кг, удельной скорости растворения 0,4 кг/(А·год) и токе 5 А, расчётный срок службы составит около 12 лет [36-38]. Для магнетитовых и ММО-анодов ресурс определяется преимущественно стабильностью покрытия и условиями эксплуатации, поскольку потеря их массы минимальна.

Существенное влияние на эффективность катодной защиты оказывает геометрия резервуара и схема размещения анодных элементов. При увеличении диаметра резервуара возрастает

вероятность неравномерного распределения потенциала, особенно в центральной зоне днища [32, 33]. Применение кольцевых и радиальных схем размещения анодов позволяет обеспечить более равномерное распределение плотности защитного тока.

Дополнительным фактором является высота уровня подтоварной воды. Увеличение толщины водной фазы повышает электропроводность среды, но одновременно усиливает агрессивность за счёт концентрации растворённых солей и газов. Поэтому проектирование анодной системы должно учитывать, как электрохимические характеристики материала, так и пространственную конфигурацию резервуара.

Эффективность работы анодных заземлителей в системе катодной защиты определяется не только достижением защитного потенциала, но и стабильностью его поддержания во времени [13-15, 34]. В процессе эксплуатации резервуаров наблюдаются изменения электропроводности подтоварной воды, колебания температурных режимов и изменение уровня водной фазы, что влияет на распределение тока и работу анодных элементов.

Практика эксплуатации показывает, что контроль эффективности должен включать не только измерение потенциала конструкции, но и анализ динамики токовых параметров системы. Резкое снижение потребляемого тока может свидетельствовать о нарушении электрического контакта анода, тогда как его рост — о повышении агрессивности среды или локальном повреждении покрытия.

Для резервуаров большого диаметра рекомендуется проводить картирование потенциалов по площади днища с использованием нескольких измерительных точек [32, 33]. Это позволяет выявлять зоны с пониженной степенью поляризации и корректировать расположение анодных элементов, либо режим работы станции катодной защиты.

Дополнительным диагностическим параметром является контроль падения напряжения на анодной линии [38, 39]. Его увеличение может указывать на деградацию контактных соединений или повышение переходного сопротивления в зоне засыпки анода.

Эффективная эксплуатация анодных систем требует комплексного мониторинга, включающего контроль потенциалов, токов, сопротивления цепи и состояния соединений, что позволяет своевременно корректировать параметры работы системы и предотвращать развитие локальной коррозии.

Несмотря на высокую электрохимическую стойкость современных анодных материалов, в процессе эксплуатации возможны различные механизмы деградации анодных заземлителей. Для растворимых анодов основным фактором является неравномерное электрохимическое растворение, приводящее к изменению геометрии элемента и локальному повышению плотности тока на отдельных участках поверхности.

Для ферросилидových анодов характерным механизмом разрушения является перепассивация, возникающая при превышении допустимой

плотности тока в хлоридсодержащих средах [26-28, 36-38]. В этом случае происходит локальное разрушение защитной плёнки, что может сопровождаться интенсивным анодным растворением и снижением ресурса элемента.

Магнетитовые аноды отличаются высокой устойчивостью к растворению, однако возможным фактором деградации является разрушение контактного узла или механические повреждения, возникающие при монтаже и эксплуатации. В системах с анодами на основе вентильных металлов с покрытием из смешанных оксидов металлов платиновой группы основным механизмом снижения эффективности является постепенная деградация каталитического покрытия, связанная с длительной анодной поляризацией [47-50].

Дополнительное влияние оказывают изменения химического состава подтоварной воды, включая повышение концентрации хлорид-ионов и растворённого кислорода. Увеличение агрессивности среды может приводить к перераспределению плотности тока и росту локальных нагрузок на отдельные анодные элементы.

Надёжность анодной системы определяется не только выбором материала, но и соблюдением расчётных токовых нагрузок, корректностью размещения элементов и качеством электрических соединений. Учет факторов деградации на стадии проектирования позволяет повысить долговечность системы катодной защиты и снизить риск внеплановых ремонтов.

Заключение

Проведённый анализ анодных заземлителей, применяемых в системах катодной защиты внутренних поверхностей вертикальных стальных резервуаров, показал, что эффективность и долговечность защиты в значительной степени определяются электрохимическими характеристиками анодного материала и условиями эксплуатации. Ключевыми параметрами являются: допустимая плотность анодного тока, удельная скорость разрушения материала, устойчивость к хлоридным и сероводородным средам, а также прогнозируемый срок службы системы.

Ферросилидovые аноды характеризуются предсказуемой скоростью электрохимического растворения и экономической доступностью, что делает их применение целесообразным при умеренных токовых нагрузках и ограниченных сроках эксплуатации. Однако их использование в условиях высокой минерализации сопровождается риском перепассивации и ускоренного разрушения при превышении допустимых плотностей тока.

Магнетитовые аноды обеспечивают более высокую электрохимическую стойкость и меньшую скорость разрушения, однако их использование ограничено конструктивными особенностями материала и чувствительностью к механическим воздействиям. Аноды на основе вентильных металлов с покрытиями из смешанных оксидов обладают наиболее широким диапазоном

допустимых рабочих плотностей тока и минимальной деградацией геометрии, что обеспечивает возможность длительной эксплуатации без замены анодных элементов.

Анодные материалы на основе углерода и созданные с применением полимерных носителей являются перспективными, однако, на данный момент в некоторых случаях уступают по ряду технологических характеристик анодам на основе неорганических материалов.

Выбор типа анодного заземлителя для внутренней катодной защиты стальных резервуаров должен осуществляться на основе комплексного учёта электрохимических параметров среды, требуемого срока службы, плотности защитного тока и экономической эффективности. Рациональный выбор материала анодного заземлителя позволяет обеспечить стабильное смещение потенциала защищаемой конструкции и снижение коррозионных потерь при оптимальных энергетических затратах.

Литература

- ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии: - М.: Госстандарт России, 1998. - 42 с.
- ГОСТ 9.602-2016. ЕЗКС. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии: - М.: Стандартинформ, 2016. - 55 с.
- ГОСТ 31385-2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов: - М.: Стандартинформ, 2016. - 121 с.
- СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии: - М.: Минстрой России, 2017.
- API RP 651. Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks. - Washington, API (current edition).
- API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage. - Washington, API (current edition).
- API Standard 653. Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. - Washington, API (current edition).
- ISO 15589-1. Cathodic protection of pipeline transportation systems. Part 1. - Geneva, ISO, 2015.
- EN 12499. Cathodic protection of metallic structures. Internal cathodic protection. - Brussels, CEN, 2003.
- AMPP SP0388. Impressed Current Cathodic Protection of Internal Submerged Surfaces of Steel Water Storage Tanks. - Houston, AMPP (current edition).
- A.W. Peabody, R.L. Bianchetti. Peabody's Control of Pipeline Corrosion. - Houston, NACE International, 2001. 347 p.
- R.W. Revie, H.H. Uhlig. Corrosion and Corrosion Control. - Hoboken, Wiley, 2008. 512 p.
- M.G. Fontana. Corrosion Engineering. - New York, McGraw-Hill, 1986. 736 p.
- M. Pourbaix. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. - Houston, NACE, 1974. 644 p.
- В. Бекман, В. Швенк. Катодная защита от коррозии. - М., Металлургия, 1984. 495 с.
- И.В. Стрижевский, А. М. Зиневич, К. К. Никольский и др. Защита металлических сооружений от подземной коррозии. - М., Недра, 1987. 293 с.
- L.K. Xu, J.D. Scantlebury, Electrochim. Acta, 48, 1109-1117 (2003). DOI: 10.1016/S0013-4686(02)00822-4.
- G. Chen, P.L. Yue, J. Phys. Chem. B, 106, 4364-4371 (2002). DOI: 10.1021/jp013387o.
- S.F. Mirseyed et al., Corros. Sci., 215, 111046 (2023). DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111046.
- Y. Chen, X. Li, Corros. Sci., 150, 1-10 (2019). DOI: 10.1016/j.corsci.2019.01.020.
- R. Kötz, S. Stucki, Electrochim. Acta, 31, 1311-1316 (1986). DOI: 10.1016/0013-4686(86)80144-7.
- S. Trasatti, J. Electroanal. Chem., 111, 125-131 (1980). DOI: 10.1016/S0022-0728(80)80084-6.
- B. Linder, Mater. Perform., 17, 24-29 (1978).
- J.E. Bennett, Corrosion, 37, 555-560 (1981). DOI: 10.5006/1.3580793.
- D.H. Kroon, Mater. Perform., 46, 48-52 (2007).
- J. Xu, X. Wang, Mater. Corros., 69, 1176-1184 (2018). DOI: 10.1002/maco.201709864.
- F. Mansfeld, Corrosion, 37, 301-307 (1981). DOI: 10.5006/1.3580793.
- Y. Jiang, Y.F. Cheng, Corros. Sci., 63, 1-9 (2012). DOI: 10.1016/j.corsci.2012.04.034.
- W. Li, F. Song, Eng. Fail. Anal., 66, 389-399 (2016). DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.05.008.
- S. Papavinasam. Corrosion Control in the Oil and Gas Industry. - Houston, Gulf Professional Publishing, 2014. 992 p.
- X. Li, Y.F. Cheng, J. Pet. Sci. Eng., 190, 107043 (2020). DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107043.
- Y. Wang et al., Corros. Sci., 182, 109298 (2021). DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109298.
- H. Zhang, X. Zhao, Mater. Des., 162, 112-121 (2019). DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.049.
- J. Sun, Z. Liu, Mater. Perform., 61, 34-39 (2022).
- А.Н. Маркин, В.Э. Ткачева, А.Ф. Дресвянников, А.Н. Ахметова. Коррозия и защита нефтепромыслового оборудования. - Казань, КНИТУ, 2022. 188 с.
- S. Kim, J. Park, Corros. Eng. Sci. Technol., 53, 278-285 (2018). DOI: 10.1080/1478422X.2018.1470082
- ISO 8044. Corrosion of metals and alloys. Vocabulary. - Geneva, ISO, 2020.
- AMPP SP0572. Design and Maintenance of Impressed Current Systems. - Houston, AMPP (current edition).
- NACE TM0108. Measurement Techniques Related to Cathodic Protection. - Houston, NACE.
- ISO 21809-3. External coatings for buried pipelines. Part 3. - Geneva, ISO, 2016.
- EN 12954. Cathodic protection of buried metallic structures. - Brussels, CEN, 2019.
- Z. Ahmad. Principles of Corrosion Engineering. - Oxford, Butterworth-Heinemann, 2006. 656 p.
- D.A. Jones. Principles and Prevention of Corrosion. - Prentice Hall, 1996. 572 p.
- P. Marcus. Corrosion Mechanisms in Theory and Practice. - CRC Press, 2011. 941 p.
- Ю.Р. Польшгалов, А.Ф. Дресвянников, Вестник технологического университета, 27, 3, 5-21 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_3_5
- D. Landolt. Corrosion and Surface Chemistry of Metals. - EPFL Press, 2007. 622 p.
- L. L. Shreir, T. Burstein, R. Jarman. Corrosion. - Butterworth-Heinemann, 1994. 3184 p.
- Z. Chen, Y. Li, Electrochim. Acta, 354, 136668 (2020). DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136668
- R. Kumar, R. Singh, J. Loss Prev. Process Ind., 59, 63-72 (2019). DOI: 10.1016/j.jlp.2019.03.004
- Y. Zhao, J. Wu, Corros. Rev., 39, 487-502 (2021). DOI: 10.1515/correv-2021-0032
- M. Patel, T. Brown, Mater. Perform., 62, 42-48 (2023).
- L. Wang, H. Li, Corros. Sci., 230, 111800 (2024). DOI: 10.1016/j.corsci.2024.111800.
- Пат. WO/2010/043908 (2010).
- Пат. США 20100314262 (2010).
- Electrodes and Electrode Materials Information // GlobalSpec (2023).

56. Анодные заземлители: материалы, свойства и использование при электрохимической защите // ЭХЗ центр экспорт (2023).
 57. Анодный заземлитель полимерный «Радуга» // Корпорация ПСС экспорт (2023).
 58. П.А. Катасонов, Р.А. Гарифуллин, Вектор науки Тольяттинского государственного университета, 2, 38-41 (2012).
 59. Patent CN 114059072 (2022).
 60. Patent CN 218026351 (2022).
 61. А.А. Даминов, Территория Нефтегаз, 8, 32-36 (2009).
 62. А.В. Валюшок, Территория Нефтегаз, 2, 30-33 (2010).
 63. А.В. Дворцов, Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики, 11-12, 125-127 (2012).
 64. Пат. 2468126 Российская Федерация (2012). 64
 65. В.В. Притула, С.В. Сериков, С.П. Сидоренко, Трубопроводный транспорт: теория и практика, 3-4, 29-33 (2014). 65
 66. Пат. 2148012 Российская Федерация (2000).
 67. Пат. 2613803 Российская Федерация (2017).
 68. Пат. 2593855 Российская Федерация (2016).
 69. Пат. 2407824 Российская Федерация (2010).
 70. Пат. 2574618 Российская Федерация (2016).
 71. Пат. 2533387 Российская Федерация (2014).

References

1. GOST R 51164-98. Main steel pipelines. General requirements for corrosion protection. - Moscow: Gosstandart of Russia, 1998. - 42 p.
2. GOST 9.602-2016. EKZKS. Underground structures. General requirements for corrosion protection. - Moscow: Standartinform, 2016. - 55 p.
3. GOST 31385-2016. Vertical cylindrical steel tanks for oil and petroleum products. - Moscow: Standartinform, 2016. - 121 p.
4. SP 28.13330.2017. Protection of building structures from corrosion. - Moscow: Ministry of Construction of the Russian Federation, 2017.
5. API RP 651. Cathodic Protection of Aboveground Petroleum Storage Tanks. - Washington, API (current edition).
6. API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage. - Washington, API (current edition).
7. API Standard 653. Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction. - Washington, API (current edition).
8. ISO 15589-1. Cathodic protection of pipeline transportation systems. Part 1. - Geneva, ISO, 2015.
9. EN 12499. Cathodic protection of metallic structures. Internal cathodic protection. - Brussels, CEN, 2003.
10. AMPP SP0388. Impressed Current Cathodic Protection of Internal Submerged Surfaces of Steel Water Storage Tanks. - Houston, AMPP (current edition).
11. A.W. Peabody, R.L. Bianchetti. Peabody's Control of Pipeline Corrosion. - Houston, NACE International, 2001. 347 p.
12. R.W. Revie, H.H. Uhlig. Corrosion and Corrosion Control. - Hoboken, Wiley, 2008. 512 p.
13. M.G. Fontana. Corrosion Engineering. - New York, McGraw-Hill, 1986. 736 p.
14. M. Pourbaix. Atlas of Electrochemical Equilibria in Aqueous Solutions. - Houston, NACE, 1974. 644 p.
15. V. Beckman, W. Schwenk. Cathodic Protection Against Corrosion. - Moscow, Metallurgiya, 1984. 495 p.
16. I.V. Strizhevsky, A.M. Zinevich, K.K. Nickolsky. Protection of Metal Structures from Underground Corrosion. - Moscow, Nedra, 1987. 293 p.
17. L.K. Xu, J.D. Scantlebury, Electrochim. Acta, 48, 1109-1117 (2003). DOI: 10.1016/S0013-4686(02)00822-4
18. G. Chen, P.L. Yue, J. Phys. Chem. B, 106, 4364-4371 (2002). DOI: 10.1021/jp013387o
19. S.F. Mirseyed et al., Corros. Sci., 215, 111046 (2023). DOI: 10.1016/j.corsci.2023.111046
20. Y. Chen, X. Li, Corros. Sci., 150, 1-10 (2019). DOI: 10.1016/j.corsci.2019.01.020
21. R. Kötz, S. Stucki, Electrochim. Acta, 31, 1311-1316 (1986). DOI: 10.1016/0013-4686(86)80144-7
22. S. Trasatti, J. Electroanal. Chem., 111, 125-131 (1980). DOI: 10.1016/S0022-0728(80)80084-6
23. B. Linder, Mater. Perform., 17, 24-29 (1978).
24. J.E. Bennett, Corrosion, 37, 555-560 (1981). DOI: 10.5006/1.3580793
25. D.H. Kroon, Mater. Perform., 46, 48-52 (2007).
26. J. Xu, X. Wang, Mater. Corros., 69, 1176-1184 (2018). DOI: 10.1002/maco.201709864
27. F. Mansfeld, Corrosion, 37, 301-307 (1981). DOI: 10.5006/1.3580793
28. Y. Jiang, Y.F. Cheng, Corros. Sci., 63, 1-9 (2012). DOI: 10.1016/j.corsci.2012.04.034
29. W. Li, F. Song, Eng. Fail. Anal., 66, 389-399 (2016). DOI: 10.1016/j.engfailanal.2016.05.008
30. S. Papavinasam. Corrosion Control in the Oil and Gas Industry. - Houston, Gulf Professional Publishing, 2014.
31. X. Li, Y.F. Cheng, J. Pet. Sci. Eng., 190, 107043 (2020). DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107043
32. Y. Wang et al., Corros. Sci., 182, 109298 (2021). DOI: 10.1016/j.corsci.2021.109298
33. H. Zhang, X. Zhao, Mater. Des., 162, 112-121 (2019). DOI: 10.1016/j.matdes.2018.11.049
34. J. Sun, Z. Liu, Mater. Perform., 61, 34-39 (2022).
35. A.N. Markin, V.E. Tkacheva, A.F. Dresvyannikov, A.N. Akhmetova. Corrosion and Protection of Oilfield Equipment. - Kazan, KNRTU, 2022. 188 p. ISBN: 978-5-7882-3262-1
36. S. Kim, J. Park, Corros. Eng. Sci. Technol., 53, 278-285 (2018). DOI: 10.1080/1478422X.2018.1470082
37. ISO 8044. Corrosion of metals and alloys. Vocabulary. - Geneva, ISO, 2020.
38. AMPP SP0572. Design and Maintenance of Impressed Current Systems. - Houston, AMPP (current edition).
39. NACE TM0108. Measurement Techniques Related to Cathodic Protection. - Houston, NACE.
40. ISO 21809-3. External coatings for buried pipelines. Part 3. - Geneva, ISO, 2016.
41. EN 12954. Cathodic protection of buried metallic structures. - Brussels, CEN, 2019.
42. Z. Ahmad. Principles of Corrosion Engineering. - Oxford, Butterworth-Heinemann, 2006. 656 p.
43. D.A. Jones. Principles and Prevention of Corrosion. - Prentice Hall, 1996. 572 p.
44. P. Marcus. Corrosion Mechanisms in Theory and Practice. - CRC Press, 2012. 941 p.
45. Yu.R. Polygalov, A.F. Dresvyannikov, Herald of Technological University, 27, 3, 5-21 (2024). DOI: 10.55421/1998-7072_2024_27_3_5
46. D. Landolt. Corrosion and Surface Chemistry of Metals. - EPFL Press, 2007. 622 p.
47. L. L. Shreir, T. Burstein, R. Jarman. Corrosion. - Butterworth-Heinemann, 1994. 3184 p.
48. Z. Chen, Y. Li, Electrochim. Acta, 354, 136668 (2020). DOI: 10.1016/j.electacta.2020.136668
49. R. Kumar, R. Singh, J. Loss Prev. Process Ind., 59, 63-72 (2019). DOI: 10.1016/j.jlp.2019.03.004
50. Y. Zhao, J. Wu, Corros. Rev., 39, 487-502 (2021). DOI: 10.1515/corrrev-2021-0032
51. M. Patel, T. Brown, Mater. Perform., 62, 42-48 (2023).
52. L. Wang, H. Li, Corros. Sci., 230, 111800 (2024). DOI: 10.1016/j.corsci.2024.111800
53. Patent WO/2010/043908 (2010).
54. Patent US 20100314262 (2010).
55. Electrodes and Electrode Materials Information // GlobalSpec (2023).

56. Anode Groundbeds: Materials, Properties and Application in Electrochemical Protection // EHZ Center Export (2023).
57. Polymer Anode Groundbed "Raduga" // PSS Corporation (2023).
58. P.A. Katasonov, R.A. Garifullin, Vector of Science of Togliatti State University, 2, 38-41 (2012).
59. Patent CN 114059072 (2022).
60. Patent CN 218026351 (2022).
61. A.A. Daminov, Territory Neftegaz, 8, 32-36 (2009).
62. A.V. Valyushok, Territory Neftegaz, 2, 30-33 (2010).
63. A.V. Dvortsov, Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki, 11-12, 125-127 (2012).
64. Patent RU 2468126 (2012).
65. V.V. Pritula, S.V. Serikov, S.P. Sidorenko, Pipeline Transport: Theory and Practice, 3-4, 29-33 (2014).
66. Patent RU 2148012 (2000).
67. Patent RU 2613803 (2017).
68. Patent RU 2593855 (2016).
69. Patent RU 2407824 (2010).
70. Patent RU 2574618 (2016).
71. Patent RU 2533387 (2014).

© **И. А. Фатхуллин** – аспирант, Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, Ildar3723@mail.ru; **А. Ф. Дресвянников** – д-р хим. наук, профессор каф. Аналитической химии, сертификации и менеджмента качества, КНИТУ, a.dresvyannikov@mail.ru.

© **I. A. Fatkhullin** – PhD-student, Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, Ildar3723@mail.ru; **A. F. Dresvyannikov** – Doctor of Sciences (Chemical Sci.), Professor, KNRTU, a.dresvyannikov@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 02.03.26.

Дата принятия рукописи в печать – 27.03.26.