



doi:10.31615/j.corros.prot.2023.110.4-4

**Распределение тока катодной защиты и остаточной коррозии
в дефектах изоляции магистральных нефтегазопроводов большого диаметра**

В.И. Хижняков, А.В. Негодин, В.С. Калиниченко✉

Томский государственный архитектурно-строительный университет,
РФ, 634003, г. Томск, пл. Соляная, д. 2

e-mail: kvs-2010@mail.ru

Аннотация. Представлены результаты длительных коррозионных испытаний образцов из трубной стали 17ГС в натуральных условиях на специально оборудованном полигоне с использованием трубы диаметром 1220 мм.

Установлено, что сезонное промерзание грунта не оказывает заметного влияния на протекание токов коррозионных макропар дифференциальной аэрации. Перераспределение убыли массы образцов за счет протекания макропар дифференциальной аэрации в высокоомных грунтах таежно-болотной зоны центральной части Западной Сибири не превышает 2...5% от общей убыли массы образцов, что свидетельствует о том, что наиболее эффективны в этих условиях токи коррозионных микропар.

На основе результатов длительных коррозионных испытаний установлено, что когда плотность тока катодной защиты равна плотности предельного тока по кислороду, при катодной поляризации 0,15...0,30 В, на всех образцах скорость коррозии уменьшается до значений, не превышающих 0,005...0,010 мм/год, хотя в отсутствие катодной защиты скорости коррозии этих образцов, находящихся в различных условиях доставки кислорода, составляли 0,08...0,13 мм/год.

Показано, что решающим критерием при выборе оптимальных режимов катодной защиты, позволяющему в экспрессном режиме определять остаточную скорость коррозии сталей при различных режимах катодной защиты и сводить к контролируемому минимуму протекание реакции катодного разложения воды с выделением на защищаемой поверхности водорода, может служить отношение плотности тока катодной защиты к плотности предельного тока по кислороду.

Ключевые слова: магистральные нефтегазопроводы, изоляция, коррозия, испытания, катодная защита, оптимальные параметры.

Для цитирования: Хижняков В.И., Негодин А.В., Калиниченко В.С. Распределение тока катодной защиты и остаточной коррозии в дефектах изоляции магистральных нефтегазопроводов большого диаметра // Практика противокоррозионной защиты. – 2023. – Т. 28, № 4. – С. 30-39. doi:10.31615/j.corros.prot.2023.110.4-4

Статья получена: 08.02.2023, опубликована 01.12.2023.

**Distribution of cathodic protection current and residual corrosion
in insulation defects of large-diameter oil and gas pipelines**

V.I. Khizhnyakov, A.V. Negodin, V.S. Kalinichenko✉

Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering,
2, Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russian Federation

e-mail: kvs-2010@mail.ru

Abstract. The results of long-term corrosion tests of 17GS pipe steel samples under field conditions at a specially equipped landfill using a pipe with a diameter of 1220 mm are presented.

It is established that seasonal freezing of the soil does not have a noticeable effect on the flow of currents of corrosive macroparticles of differential aeration. The redistribution of the loss of mass of samples due to the flow of macroparticles of differential aeration in high-resistance soils of the taiga-swamp zone of the central part of Western Siberia does not exceed 2...5% of the total loss of mass of samples, which indicates that the currents of corrosive microparticles are most effective in these conditions.

Based on the results of long-term corrosion tests, it was found that when the cathodic protection current density is equal to the oxygen limit current density, with cathodic polarization of 0,15...0,30 V, the residual corrosion rate due to the effect of self-regulation of cathodic protection on all samples decreases to values not exceeding 0,005...0,010 mm/year, although in the absence of cathodic The corrosion protection rates of these samples under various oxygen delivery conditions were 0,08...0,13 mm/year.

It is shown that the ratio of the cathodic protection current density to the oxygen limit current can serve as the decisive criterion for choosing the optimal cathodic protection modes, which allows determining the residual corrosion rate of steels in express mode under various cathodic protection modes and reducing the cathodic decomposition reaction of water with the release of hydrogen on the protected surface to a controlled minimum.

Keywords: main oil and gas pipelines, insulation, corrosion, corrosion, testing, cathodic protection, optimal parameters.

For citation: Khizhnyakov, V. I., Negodin, A. V., & Kalinichenko, V. S. (2023). Distribution of cathodic protection current and residual corrosion in insulation defects of large-diameter oil and gas pipelines. *Theory and Practice of Corrosion Protection*, 28(4), 30-39. doi:10.31615/j.corros.prot.2023.110.4-4

Received: February 08, 2023. Published: December 01, 2023.

Введение

Важнейшим направлением обеспечения безаварийной эксплуатации магистральных нефтегазопроводов является обеспечение их противокоррозионной защиты, преимущественно определяемой эффективностью катодной защиты. Катодная защита наиболее эффективно подавляет течение коррозионного процесса с кислородной деполяризацией (в нейтральных и слабощелочных грунтах), когда скорость коррозии лимитируется стадией массопереноса молекул кислорода из объема грунта к корродирующей поверхности трубопровода. Перенос кислорода из окружающего грунта к оголенной катодно защищаемой поверхности трубопровода осуществляется за счет диффузии и конвективного переноса вместе с движущимся почвенным электролитом. Прохождение тока катодной защиты сопровождается изменением концентрации кислорода на защищаемой поверхности трубопровода и появлением концентрационной поляризации $\Delta\varphi_{con}$, которая пропорциональна разности логарифмов концентраций кислорода на защищаемой поверхности трубопровода C_s и в объеме почвенного электролита C_v :

$$\Delta\varphi_{con} = \frac{RT}{nF} \ln C_s - \frac{RT}{nF} \ln C_v = -\frac{RT}{nF} \ln \frac{C_M}{C}. \quad (1)$$

При постоянном напряжении станции катодной защиты (СКЗ) плотность тока катодной защиты j_{pro} определяется величиной поляризационного сопротивления R_{pol} , удельным сопротивлением грунта R_{gr} и сопротивлением металлических проводов R_{pr} , которым, вследствие его малости по сравнению с R_{gr} и R_{pol} , можно пренебречь. Таким образом, общее сопротивление для протекания тока катодной защиты равно:

$$R_{\Sigma} = R_{pol} + R_{gr}. \quad (2)$$

Поляризационное сопротивление R_{pol} на

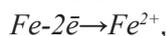
границе «труба–земля» зависит от условий доставки кислорода в зону реакции. Плотность тока катодной защиты j_{pro} связана с плотностью тока коррозии j_{cor} и требуемой величиной катодной поляризации $\Delta\varphi_{con}$ соотношением:

$$j_{pro} = j_{cor} \exp(\Delta\varphi / R_{pol}). \quad (3)$$

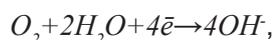
Поляризационное сопротивление R_{pol} , помимо R_{gr} , представляет собой дополнительное сопротивление для протекания защитного тока: увеличение величины катодной поляризации препятствует дальнейшему изменению концентрации кислорода. Для условий, когда плотность катодного тока лимитируется доставкой кислорода к корродирующей поверхности, $R_{pol} \rightarrow \infty$, следовательно, $\exp(\Delta\varphi_{con} / R_{pol}) \rightarrow 1$, а величина плотности тока катодной защиты приближается к исходной скорости коррозии $j_{pro} = j_{cor}$. Именно для этих условий катодная защита экономически оправдана и находит широкое применение [1]. Следует подчеркнуть, что в почвенном электролите присутствуют как катионы H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Fe^{3+} , так и анионы OH^- , Cl^- , CO_3^{2-} , NO_3^- , SO_4^{2-} . При включении СКЗ у анодного заземления возникает облако отрицательных ионов, а у трубопровода – положительных ионов, которые экранируют поле катодной защиты трубопровода. Помимо кислорода, на катодно защищаемой поверхности могут восстанавливаться катионы H^+ , Fe^{3+} . Катионы, K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , содержащиеся в почвенном электролите, по отношению к электрону остаются индифферентными. Следует заметить, что при постоянном напряжении на выходе СКЗ все катионы и анионы, содержащиеся в почвенном электролите под воздействием электрического поля между анодным заземлением и трубопроводами, участвуют в переносе тока катодной защиты. При достаточно большом расстоянии между анодным за-

землением и трубопроводом (более 250 м) трубопровод и анодное заземление можно рассматривать отдельно, принимая потенциал в толще грунта между трубопроводом и анодным заземлением равным нулю.

В отсутствие катодной защиты, при образовании сквозных дефектов изоляции на подземном стальном трубопроводе при контакте оголенной поверхности трубопровода с почвенным электролитом, начинается ионизация атомов железа:



валентные электроны которого забирают растворенный в почвенном электролите кислород:



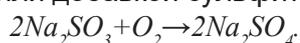
не вступая в прямое взаимодействие с железом. Поскольку возникающий электрический ток между анодными и катодными участками пропорционален площади корродирующей поверхности S , количественной характеристикой коррозионного процесса является плотность коррозионного тока:

$$j = \frac{I}{S}, \quad (4)$$

где I – ток коррозии;

S – площадь рабочей поверхности стального образца.

В слабоминерализованных высокоомных грунтах таежно-болотной зоны центральной части Западной Сибири скорость коррозии по истечении коррозионных испытаний за один год устанавливается в пределах 0,08...0,13 мм/год. В отсутствие кислорода скорость коррозии в модельном электролите слабоминерализованных грунтов (0,05%-ный раствор $NaCl$) не превышает 0,01 мм/год (время лабораторных коррозионных испытаний 720 час), что свидетельствует о том, что роль основного окислителя, химически связывающего электроны в катодном процессе, выполняют молекулы растворенного в почвенном электролите кислорода. Обескислороживание модельного электролита осуществляли добавкой сульфата натрия:

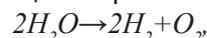


При включении катодной защиты, когда плотность защитного тока достигает значений плотности предельного (диффузионного) тока по кислороду, концентрация кислорода на катодно защищаемой поверхности

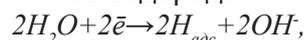
трубопровода равна нулю, то есть весь кислород, поступающий к оголенной поверхности трубы, восстанавливается за счет электронов внешнего источника тока. В процессе проведения лабораторных коррозионных испытаний установлено, что катодная защита позволяет снизить скорость коррозии трубных сталей до значений, не превышающих 0,005...0,010 мм/год, соответствующих 3-му баллу коррозионной стойкости металлов (стойкое), когда плотность тока катодной защиты j_{pro} совпадает с плотностью предельного тока по кислороду j_{lim} [2]. То есть для условий коррозии с кислородной деполаризацией скорость остаточной коррозии можно не только легко определить по соотношению между плотностью тока катодной защиты j_{pro} и плотностью предельного тока по кислороду $j_{np} : j_{pro}/j_{lim}$, но и регулировать путем изменения j_{pro} . Когда $j_{pro} < j_{lim}$, на практике наблюдается недозащита, когда кислород, поступающий к образцу не полностью связывается под воздействием тока катодной защиты и часть его расходуется на окисление металла – катодная защита не обеспечивает подавление коррозии до допустимых величин. При $j_{pro} = j_{lim}$ – катодная защита обеспечивает подавление коррозии до допустимых значений, так как весь кислород, поступающий в зону реакции восстанавливается за счет тока катодной защиты:



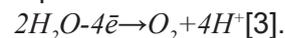
При $j_{pro} > j_{lim}$ – наступает перезащита, когда потенциал катодной защиты достигает значений потенциала разложения воды:



и под воздействием тока катодной защиты на защищаемой поверхности трубопровода начинает протекать особо нежелательная реакция катодного разложения воды с посадкой ад-атомов водорода:



а на анодном заземлении – с выделением кислорода и протонов:



Представляет интерес то, как распределяется плотность тока катодной защиты при постоянном напряжении СКЗ по периметру трубопровода большого диаметра – 1220 мм, до каких значений ток катодной защиты подавляет течение коррозионного процесса, когда скорость коррозии в отсутствие катодной за-

щиты при неизменном режиме СКЗ в верхней части трубы, на боковой поверхности и под трубой изменяется в широких пределах.

На рис. 1 представлена схема полигона для исследования распределения плотности тока катодной защиты и плотности остаточной скорости коррозии на трубопроводе диаметром 1220 мм, когда условия протекания коррозии в дефектах изоляции различны. В качестве образцов для коррозионных испытаний была выбрана трубная сталь 17ГС феррито-перлитного класса. Скорость коррозии стальных образцов определяли весовым методом (ГОСТ 9.506-87). Затем весовой показатель коррозии пересчитывали в глубинный:

$$h_{cor}^d = 8,76 \cdot K_{cor}^w / \rho_{st}, \quad (5)$$

где h_{cor}^d – глубинный показатель коррозии, мм/год;

K_{cor}^w – весовой показатель коррозии, г/м²·час;

ρ_{st} – плотность стали, г/м³.

Длительность коррозионных испытаний образцов – 1 год. Образцы укладывали в глинистый грунт у верхней, боковой и нижней образующей трубопровода. С целью изучения сезонных изменений величины коррозионных токов макропар дифференциальной аэрации часть образцов нижней боковой и верхней образующей трубопровода были короткозамкнуты через микроамперметры М906, вторая часть образцов находилась в свободном разомкнутом состоянии. Для контроля глубины промерзания грунта на полигоне, на глубину укладки трубы (до нижней образующей), была установлена полиэтиленовая трубка (ПНД) диаметром 20 мм, в которую опускали резиновую трубку диаметром 12 мм, заполненную водой. Глубина укладки трубы (до нижней образующей) составляла 2,4 м. Зимой резиновую трубку вынимали и по длине льда в трубке определяли глубину промерзания грунта в данный момент времени.

Стальные образцы у верхней образую-

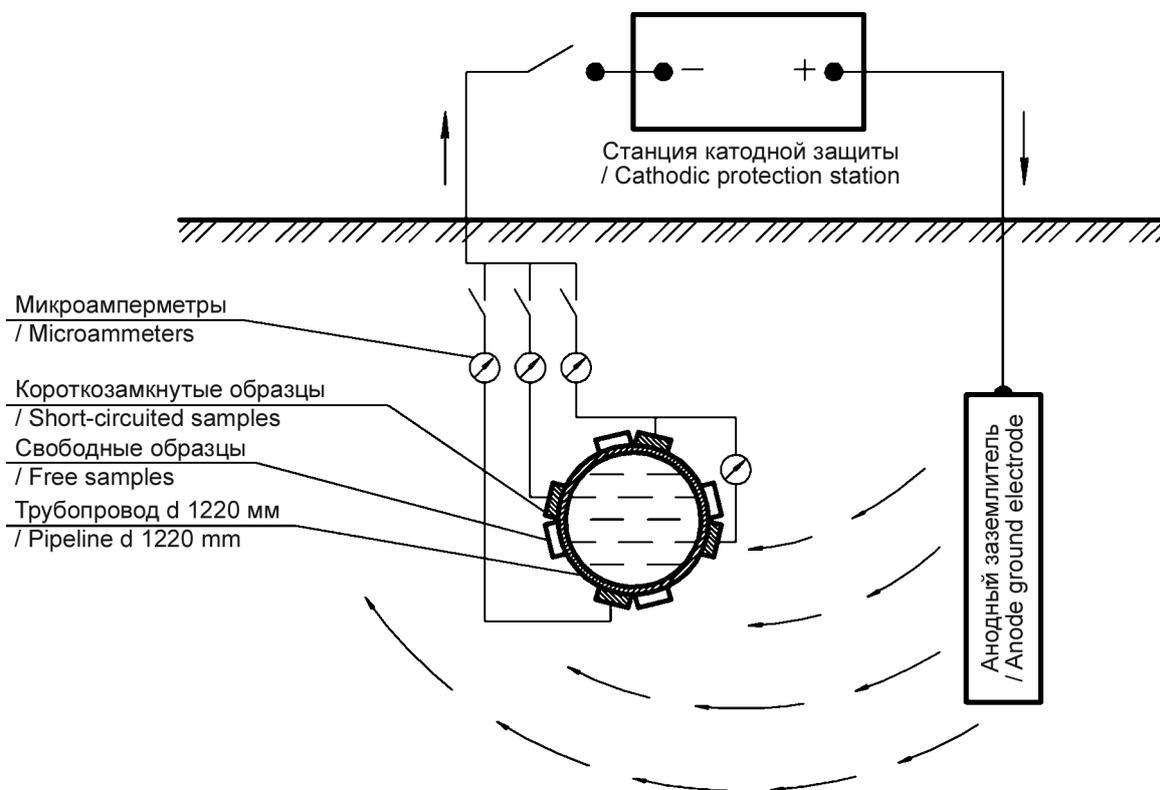


Рис. 1. Схема полигона для исследования распределения плотности тока катодной защиты и остаточной скорости коррозии на трубопроводе диаметром 1220 мм

Fig. 1. Scheme of the test site for studying the distribution of cathodic protection current density and residual corrosion rate on a pipeline with a diameter of 1220 mm

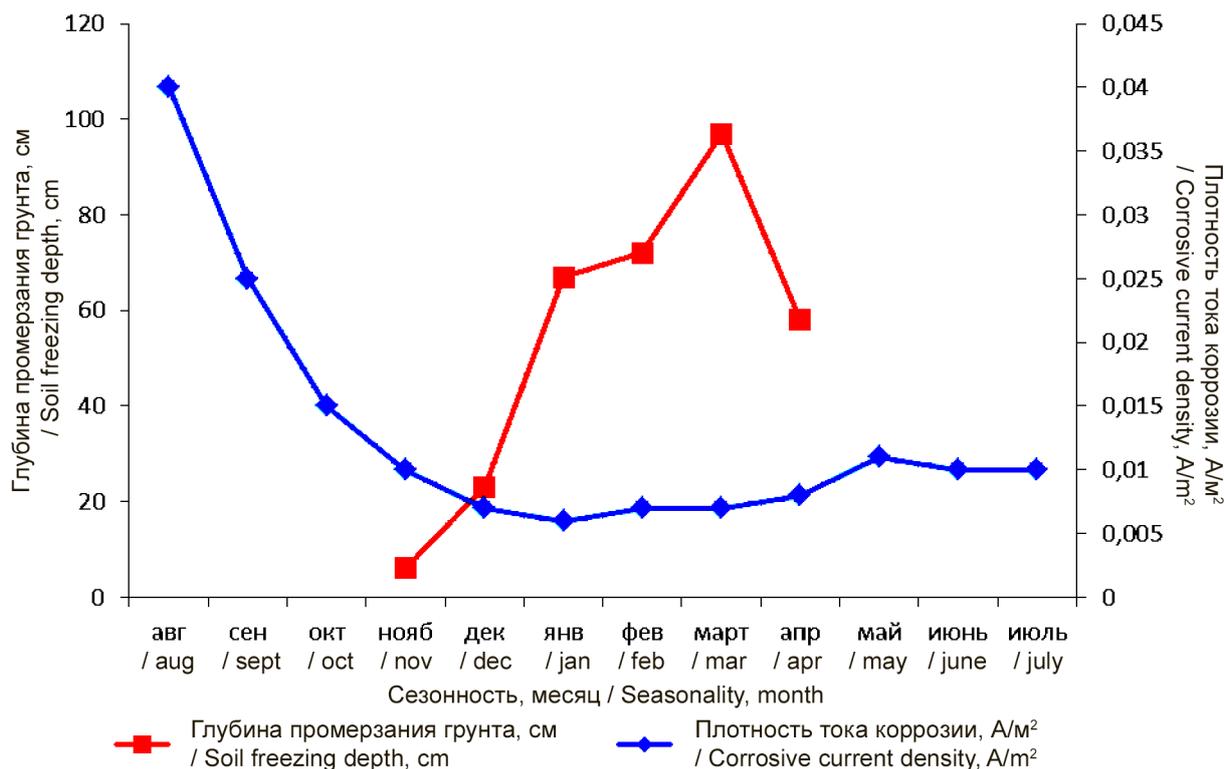


Рис. 2. Изменение глубины промерзания глинистого грунта и токов пар дифференциальной аэрации в течение года

Fig. 2. Changes in the freezing depth of clay soil and differential aeration vapor currents throughout the year

щей трубопровода находились на глубине 1,2 м, у боковой – на глубине 1,8 м и нижней – на глубине 2,4 м.

На рис. 2 представлена зависимость глубины промерзания глинистого грунта и тока макропары дифференциальной аэрации, протекающей между образцами, установленными у верхней образующей и нижней (под трубой) от времени в течение года.

В течение года максимальная глубина промерзания грунта составила 0,97 м. Образцы в течение всего эксперимента находились в талом грунте. Ход экспериментальных результатов, представленных на рис. 2, свидетельствует о том, что промерзание верхнего слоя грунта на глубину 0,97 м практически не оказывает влияние на величину токов коррозионных макропар дифференциальной аэрации. Наблюдаемое явление обусловлено, по-видимому, тем, что в порах грунта кислорода достаточно для протекания коррозионного процесса, в том числе и зимой, при промерзании его верхнего горизонта.

На рис. 3 представлены результаты коррозионных испытаний свободных и короткозамкнутых образцов верхней и нижней образующей трубопровода диаметром 1220 мм.

Представленные на рис. 3 результаты коррозионных испытаний стальных образцов свидетельствуют о том, что плотность тока коррозии максимальна на свободных и короткозамкнутых образцах верхней образующей, где доставка кислорода к корродирующей поверхности наиболее облегчена – 0,066...0,080 А/м². Плотность коррозионного тока на образцах нижней образующей (под трубой), где доставка кислорода к корродирующей поверхности наиболее затруднена, не превышает 0,03...0,04 А/м². Плотность коррозионного тока на образцах рассчитывали по убыли массы образцов по формуле:

$$j_{cor} = \Delta M / q \cdot \tau \cdot s, \quad (6)$$

где ΔM – убыль массы образца за 1 год коррозионных испытаний, г;

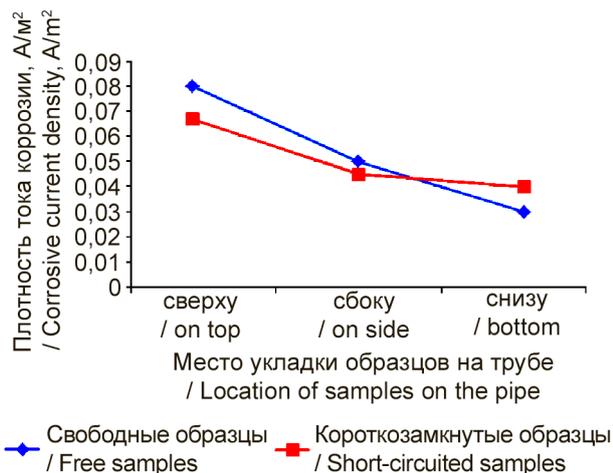


Рис. 3. Распределение плотности коррозионного тока свободных и короткозамкнутых образцов по периметру трубопровода диаметром 1220 мм

Fig. 3. Distribution of the corrosion current density of free and short-circuited samples along the perimeter of a pipeline with a diameter of 1220 mm

q – электрохимический эквивалент Fe^{2+} , $q = 1,042$ г/А·ч;
 τ – время коррозионный испытаний, $\tau = 8876$ ч;
 S – площадь рабочей поверхности образцов, $S = 0,0025$ м².

Убыль массы короткозамкнутых образцов верхней образующей, за счет протекания тока дифференциальной аэрации, уменьшилась по сравнению со свободными образцами на 0,347 г, а убыль массы короткозамкнутых образцов нижней образующей, наоборот, увеличилась по сравнению со свободными образцами на 0,301 г. Уменьшение убыли массы короткозамкнутых образцов верхней образующей трубопровода за счет протекания тока коррозионной макропары дифференциальной аэрации практически соответствует увеличению убыли массы образцов нижней образующей. Плотность коррозионного тока макропары дифференциальной аэрации между образцами верхней и нижней образующей трубопровода диаметром 1220 мм в течение года изменялась в пределах от 0,04 (в начале) до 0,01 А/м² (в конце коррозионных испытаний, рис. 2). На основе полученных значений перераспределенной убыли массы образцов

верхней и нижней образующей средняя расчетная плотность тока коррозионной макропары дифференциальной аэрации равна 0,0014 А/м², что составляет 2% от величины коррозионного тока образцов верхней образующей и 5,33% для образцов нижней образующей трубопровода. Незначительное перераспределение убыли массы образцов за счет функционирования макропары дифференциальной аэрации, по-видимому, обусловлена значительным удельным сопротивлением глинистого грунта, которое, на момент извлечения образцов из грунта, составляло 45 Ом·м. В этих условиях наиболее эффективны токи коррозионных микропар из-за малых расстояний между анодными и катодными участками корродирующей поверхности. В условиях эксперимента высокое сопротивление грунта существенно ограничивало протекание коррозионного тока макропары и практически не оказывало влияния на протекание коррозионных токов микропар.

Характер распределения плотности тока коррозии короткозамкнутых и свободных образцов верхней, боковой и нижней образующей трубопровода диаметром 1220 мм (рис. 3) свидетельствуют о существенной неравномерности протекания коррозионного процесса. Скорости коррозии образцов различаются в 1,5...2,5 раза. Для этих условий представляет интерес вопрос о распределении плотности защитного тока и остаточной скорости коррозии этих образцов при постоянном напряжении на СКЗ. Схема экспериментального полигона для проведения коррозионных испытаний в полевых условиях (рис. 1) позволяла установить основную закономерность распределения плотности защитного тока на образцах, имитирующих сквозные дефекты изоляции трубопровода $D_y = 1220$ мм, находящихся в различных коррозионных условиях. На рис. 4 представлена картина распределения плотности тока катодной защиты и величины катодной поляризации по периметру трубопровода диаметром 1220 мм.

Результаты измерений, представленные на рис. 4, свидетельствуют о том, что плотность тока катодной защиты на короткозамкнутых образцах (имитирующих дефекты изоляции трубопровода), находящихся в

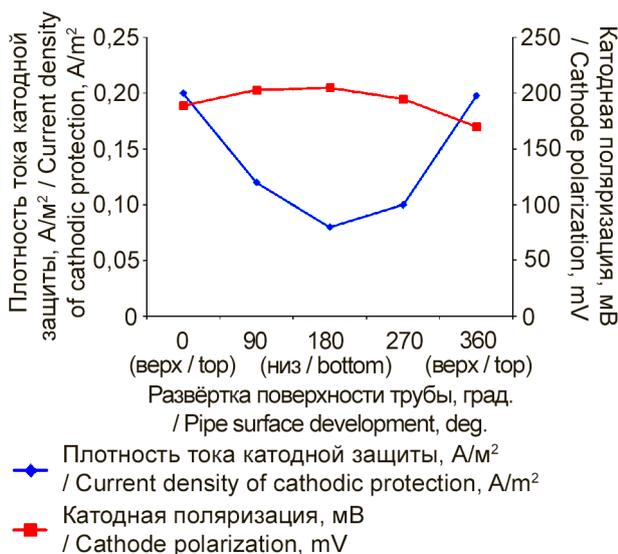


Рис. 4. Распределение плотности тока катодной защиты и величины катодной поляризации по периметру трубопровода $D_y=1220$ мм при неизменном режиме катодной защиты

Fig. 4. Distribution of cathodic protection current density and cathodic polarization value along the perimeter of the pipeline $D=1220$ mm with a constant cathodic protection mode

различных условиях доставки кислорода, при постоянном напряжении СКЗ изменяется от $0,23 \text{ A/m}^2$ (у верхней образующей, где доставка кислорода облегчена) до $0,07 \text{ A/m}^2$ (у нижней образующей, где доставка кислорода наиболее затруднена). Неравномерность распределения тока катодной защиты связана с различными сопротивлениями, которые преодолевает ток при прохождении от анодного заземления до защищаемых образцов (дефектов изоляции катодно защищаемого трубопровода). Выше было сказано, что общее сопротивление цепи катодной защиты складывается из поляризационного и омического сопротивлений:

$$R_{\Sigma} = R_{pol} + R_{gr} . \quad (7)$$

Величина удельного омического сопротивления грунта R_{gr} по периметру трубы была практически одинакова – $45 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, тогда становится очевидно, что неравномерное распределение защитного тока по периметру трубопровода большого диа-

метра связана с величиной поляризационного сопротивления R_{pol} . Поляризационное сопротивление R_{pol} , локализованное на границе «труба–земля» обусловлено преимущественно медленностью протекания реакции электровосстановления молекулярного кислорода, определяемой скоростью его диффузии в зону реакции из толщи грунта. Результаты измерений свидетельствуют о том, что плотность тока катодной защиты в дефектах верхней и нижней образующих различается примерно в тех же пределах, что и плотность тока коррозии в отсутствие катодной защиты – в $1,5...2,5$ раза. Следовательно, неизменность величины катодной поляризации на всех образцах по периметру трубы $D_y=1220$ мм связана с тем, что между величиной катодной поляризации $\Delta\varphi$ и отношением j_{pro}/j_{cor} наблюдается пропорциональная зависимость, что соответствует уравнению концентрационной поляризации:

$$\Delta\varphi_{con} = -\frac{RT}{nF} \ln \frac{j_{pro}}{j_{cor}} . \quad (8)$$

В условиях эксперимента плотность тока катодной защиты практически повторяет ход распределения плотности коррозионного тока в отсутствие катодной защиты и подавляет течение коррозионного процесса образцов практически до одной и той же величины во всех пространственных положениях относительно трубопровода диаметром 1220 мм, независимо от условий доставки основного окислителя – кислорода (рис. 5).

Сопоставление результатов коррозионных испытаний стальных образцов приведенных на рис. 4, рис. 5 и представленных в таблице, свидетельствуют о том, что несмотря на большое различие плотностей защитного тока, величина катодной поляризации $\Delta\varphi$, отношение плотности тока катодной защиты к плотности коррозионного тока и скорость остаточной коррозии в условиях эксперимента оставались практически неизменными на всех образцах, независимо от их пространственного положения.

Совокупность экспериментальных результатов, представленных в таблице, свидетельствует о том, что в дефектах изо-

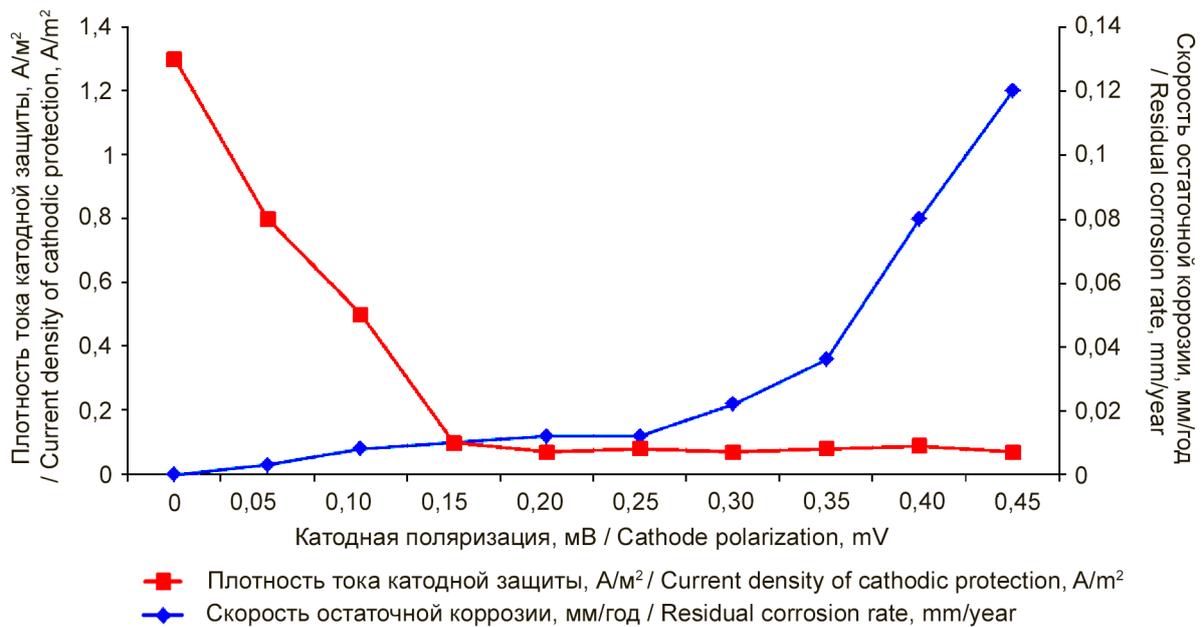


Рис. 6. Распределение плотности тока катодной защиты и остаточной скорости коррозии по периметру трубопровода диаметром 1220 мм при $\Delta\phi=0,25$ В

Fig. 6. Distribution of cathodic protection current density and residual corrosion rate along the perimeter of a pipeline with a diameter of 1220 mm at $\Delta\phi=0,25$ V

Таблица. Распределение величины катодной поляризации $\Delta\phi$, отношения j_{pro}/j_{cor} и остаточной скорости коррозии по периметру трубопровода диаметром 1220 мм

Table. Distribution of cathodic polarization value $\Delta\phi$, ratio j_{pro}/j_{cor} and residual corrosion rate along the perimeter of a pipeline with a diameter of 1220 mm

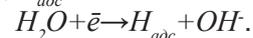
Развертка поверхности трубы, град / Pipe surface development, deg	0 Верх трубы / Top of the pipe	90 Бок трубы / Side of the pipe	180 Под трубой / Under the pipe
Величина катодной поляризации $\Delta\phi$, мВ / Magnitude of cathodic polarization $\Delta\phi$, mV	180	200	205
Отношение $j_{pro}/j_{cor}=const$ / Attitude $j_{pro}/j_{cor}=const$	2,67	2,46	2,5
Остаточная скорость коррозии, мм/год при $j_{pro}/j_{cor}=1...5$ / Residual corrosion rate, mm/year at $j_{pro}/j_{cor}=1...5$	0,018	0,013	0,015

ляции трубопровода, находящихся в различных условиях доставки кислорода сохраняется соотношение $j_{pro}/j_{cor}=const$, что, в свою очередь, обуславливает неизменность величины катодной поляризации $\Delta\phi=const$ и остаточной скорости коррозии в дефектах, находящихся в различных коррозионных условиях.

При $j_{pro}/j_{cor}=1...5$ остаточная скорость коррозии образцов, находящихся в различных коррозионных условиях подавлялась током катодной защиты до значений, не превышающих 0,013...0,018 мм/год, хотя в отсутствие катодной защиты она изменялась в пределах от 0,08...0,13 мм/год (у верхней образующей) до 0,025...0,040 мм/год – у нижней (под трубой). Следует отметить, что увеличение катодной поляризации за пределы реализации предельного тока по кислороду (более 0,3 В) не приводит к уменьшению остаточной скорости коррозии. Действительно, на рис. 6 представлены значения плотности тока катодной защиты и значения величины остаточной скорости коррозии стальных образцов при различных значениях катодной поляризации.

Представленные на рис. 6 результаты свидетельствуют о том, что при смещении потенциала от стационарного значения на 150...300 мВ реализуется площадка предельного тока по кислороду, когда концентрация кислорода на защищаемой поверхности равна нулю. При этом режиме катодной защиты весь молекулярный кислород, доставляемый в единицу времени к защищаемой поверхности, немедленно восстанавливается за счет электронов, поступающих от СКЗ, а не за счет электронов реакции окисления стальных образцов. При равенстве j_{pro}/j_{cor} остаточная скорость коррозии не превышает допустимых для магистральных нефтегазопроводов значений 0,005...0,010 мм/год, соответствующих стойкому коррозионному состоянию. Дальнейшее увеличение катодной поляризации более 300 мВ приводит к резкому увеличению плотности тока катодной защиты, что связано с началом протекания реакции катодного разложения воды с выделением катодного водорода на защищаемой поверхности образцов. Выделение на катодно защищаемой поверхности трубопровода га-

зообразного водорода H_2 и диффузионное проникновение водорода в структуру трубной стали идут через одинаковую промежуточную стадию – адсорбированный атомарный водород H_{ad} :



Следует особо отметить, что протекание реакции катодного разложения воды не приводит к уменьшению остаточной скорости коррозии (рис. 6). Посадка ад-атомов водорода H_{ad} на катодно защищаемой поверхности приводит к наводороживанию структуры трубной стали без практического уменьшения скорости остаточной коррозии. Адсорбция водорода на напряженной поверхности длительно эксплуатируемых высоконапорных газонефтепроводов приводит к появлению стресс-коррозионных трещин, ориентированных перпендикулярно максимальным кольцевым растягивающим напряжениям, создаваемых рабочим давлением в трубопроводе [4] (рис. 7).

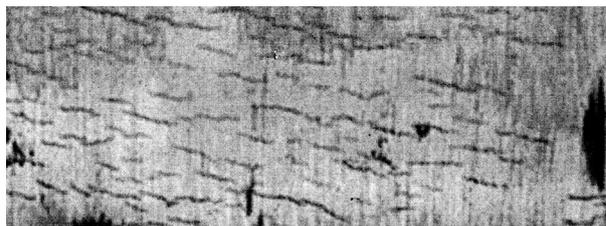


Рис. 7. Поверхностные стресс-коррозионные трещины под отслоившейся изоляцией на катодно защищаемой поверхности высоконапорного магистрального газопровода

Fig. 7. Surface stress-corrosion cracks under peeled insulation on the cathodically protected surface of a high-pressure main gas pipeline

Замедленное разрушение высоконапорных магистральных нефтегазопроводов всегда начинается с появлением и развитием коррозионных язв и стресс-коррозионных трещин на их внешней катодно защищаемой поверхности, что вызывает настоятельную необходимость разработки инструментального метода контроля режимов катодной защиты, при которых образование коррозионных язв и посадка ад-атомов водорода были бы исключены. Коррозионные язвы на

катодно защищаемой поверхности образуются, когда величина катодной поляризации $\Delta\varphi < 150$ мВ, а ад-атомы на поверхности трубопровода появляются, когда величина катодной поляризации превышает $\Delta\varphi > 300$ мВ (рис. 6). На практике определить величину катодной поляризации катодно защищаемого трубопровода в большинстве случаев не представляется возможным. В то время, как отношение j_{pro}/j_{cor} можно легко определить на любом участке трассы магистрального трубопровода при наличии контрольно-измерительной колонки [5].

Таким образом, полученная совокупность экспериментальных результатов свидетельствует о том, что решающим критерием при выборе оптимальных режимов катодной защиты, позволяющим в экспрессном режиме определять остаточную скорость коррозии сталей при различных режимах катодной защиты и сводить к контролируемому минимуму протекание реакции катодного разложения воды с посадкой на защищаемой поверхности ад-атомов водорода может служить отношение плотности тока катодной защиты к плотности предельного тока по кислороду j_{pro}/j_{cor} .

Литература

1. Колотыркин Я.М. Металл и коррозия. – М.: Металлургия, 1985. – 88 с.
2. Хижняков В.И. Определение остаточной скорости коррозии трубопроводов при различных режимах катодной защиты // Практика противокоррозионной защиты. – 2008. – № 2. – С. 18-22.
3. Хижняков В.И. Предупреждение выде-

ления водорода при выборе потенциалов катодной защиты подземных стальных трубопроводов // Коррозия: материалы, защита. – 2009. – № 9. – С. 7-10.

4. Хижняков В.И., Негодин А.В. Коррозионное растрескивание катодно защищаемых газонефтепроводов в процессе длительной эксплуатации. // Вестник ТГАСУ. – 2017. – № 4. – С. 82-92.

5. Хижняков В.И., Иванов Ю.А., Назаров Б.Ф., Мошкин В.В. Датчики и приборы для диагностики и повышения эффективности катодной защиты газотранспортных систем // В сб. Газотранспортные системы: настоящее и будущее. – 2007. – С. 100-101.

References

1. Kolotyrykin, Ya. M. (1985). *Metal and corrosion*. Moscow: Metallurgy.
2. Khizhnyakov, V. I. (2008). Determination of the residual corrosion rate of pipelines under various cathodic protection modes. *Theory and Practice of corrosion protection*, (2), 18-22.
3. Khizhnyakov, V. I. (2009). Prevention of hydrogen evolution when choosing cathodic protection potentials for underground steel pipelines. *Corrosion: materials, protection*, (9), 7-9.
4. Khizhnyakov, V. I., Negodin, A. V. (2017). Corrosion cracking of cathodically protected gas and oil pipelines during long-term operation. *Bulletin of TGASU*, (4), 82-92.
5. Khizhnyakov, V. I. Ivanov, Yu. A., Nazarov, B. F., & Moshkin, V. V. (2007). Sensors and devices for diagnostics and increasing the efficiency of cathodic protection of gas transportation systems. *Gas transmission systems: present and future*. 100-101.

Информация об авторах

Хижняков Валентин Игнатьевич, д.т.н., профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ), г. Томск, Российская Федерация
Негодин Александр Викторович, старший преподаватель, ТГАСУ, г. Томск, Российская Федерация
Калиниченко Владимир Сергеевич, старший преподаватель, ТГАСУ, г. Томск, Российская Федерация

Information about authors

Valentin I. Khizhnyakov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering (TGASU), Tomsk, Russian Federation
Alexander V. Negodin, senior lecturer, TSASU, Tomsk, Russian Federation
Vladimir S. Kalinichenko, senior lecturer, TGASU, Tomsk, Russian Federation