

УДК 622.691.4+622.692.4

*ХИЖНЯКОВ ВАЛЕНТИН ИГНАТЬЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
val@tpu.ru*

*НЕГОДИН АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ, ст. преподаватель,
semerka.82@mail.ru*

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

КОРРОЗИОННОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ КАТОДНО ЗАЩИЩАЕМЫХ ГАЗОНЕФТЕПРОВОДОВ В ПРОЦЕССЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Приведены результаты коррозионных обследований линейной части магистральных газонефтепроводов. Показано, что трещины КРПН (коррозионное растрескивание под напряжением) на внешней катодно защищаемой поверхности обследуемых труб локализируются в средах, содержащих H_2S до 20 мг/л, при практическом отсутствии кислорода. В этих условиях происходит охрупчивание трубной стали, и образуются стресс-коррозионные дефекты на внешней катодно защищаемой поверхности. Изучена кинетика продвижения трещины КРПН вглубь стенки и вдоль трубы при эксплуатации газонефтепроводов.

Ключевые слова: катодно защищаемая поверхность; магистральные газонефтепроводы; плотность тока катодной защиты; плотность предельного тока по кислороду; остаточная скорость коррозии; катодный водород; атмосферы Коттрелла; электролитическое наводороживание; стресс-коррозионные дефекты; эффект Ребиндера.

*VALENTIN I. KHIZHNYAKOV, DSc, Professor,
val@tpu.ru*

*ALEKSANDR V. NEGODIN, Senior Lecturer,
semerka.82@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

CRACKING CORROSION OF CATHODICALLY PROTECTED GAS OIL PIPES DURING LONG-TERM OPERATION

The paper presents results of corrosion tests of the linear portion of the main pipeline. It is shown that stress corrosion cracking on the outer cathodically protected pipe localize in media containing up to 20 mg/l H_2S practically without oxygen. Under these conditions, embrittlement of the tubular steel occurs, and stress corrosion cracking is observed on the outer cathodically protected surface. The kinetics of crack propagation deep into the pipe wall and along the pipe is studied during the operation of gas oil pipelines.

Keywords: cathodically protected surface; main pipeline; current density of cathodic protection; limiting current density by oxygen; corrosion residual velocity; cathodic hydrogen; Cottrell atmosphere; electrolytic hydrogenation; stress corrosion cracking; Reh binder effect.

Стресс-коррозионные трещины в сквозных дефектах изоляции на внешней катодно защищаемой поверхности (КЗП) подземных стальных трубопроводов практически повсеместно зарождаются локально, вблизи концентраторов напряжений. Здесь, за счет высоких остаточных напряжений, межатомные связи кристаллической решетки ослаблены, что делает эти участки уязвимыми для наиболее активных компонентов коррозионной среды: кислорода, анионов хлора и адатомов водорода. Проблема взаимодействия активных компонентов коррозионной среды с наружной напряженно-деформированной поверхностью подземных стальных трубопроводов является в настоящее время актуальной и сложной. В отличие от других активных компонентов коррозионной среды, в том числе и газов, содержащихся в пленке влаги на внешней катодно защищаемой поверхности подземных стальных трубопроводов, только водород способен к хемосорбции и диффузии в стенку трубы. Водород на внешней КЗП подземных стальных трубопроводов, проложенных в грунтах с pH 5–7, появляется при перезащите, когда плотность тока катодной защиты $j_{\text{защ}}$ превышает плотность предельного тока по кислороду j_{O_2} в десятки раз [1, 2]. При катодной перезащите избыток электронов в стенке трубы приводит к их эмиссии и восстановлению молекул воды на катодно защищаемой поверхности трубы в сквозных дефектах изоляции



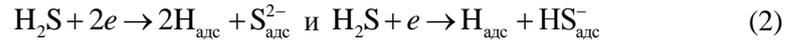
Молекулы воды восстанавливаются за счет эмитирующихся из стенки трубы электронов, что приводит к посадке на КЗП трубопровода адатомов водорода $\text{H}_{\text{адс}}$. Результаты комплексных коррозионных обследований линейной части магистральных газонефтепроводов свидетельствуют о том, что трещины КРН локализуются преимущественно в застойных болотистых грунтах, содержащих до 20 мг/л H_2S при практическом отсутствии кислорода (рис. 1, а).



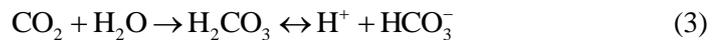
Рис. 1. Продольная стресс-коррозионная трещина на внешней КЗП магистрального газопровода Ду1020 мм в области продольного сварного шва (а); стресс-коррозионный излом стенки трубы толщиной 12 мм (б)

Наблюдаемое явление связано с тем, что кислород обладает большим сродством к электрону по сравнению с водородом. Наличие на поверхности трубы оксидной пленки препятствует проникновению водорода в структуру трубной стали в аэрируемых грунтах. В застойных болотистых грунтах кислород поглощают гниющие растительные остатки. В этих условиях недостаток кислорода усиливает действие эффекта Ребиндера, оксидная пленка на

поверхности трубы разрыхляется болотной водой, способствуя образованию непосредственного контакта: «сталь – почвенный электролит» и созданию условий для электролитического насыщения стенки трубы водородом при перезащите, когда $j_{\text{защ}} \gg j_{\text{O}_2}$. Содержащийся в болотной воде сероводород снижает перенапряжение выделения водорода и способствует его накоплению в приповерхностном слое стенки трубы. H_2S повышает степень заполнения хемосорбированного слоя атомарным водородом θ_{H} , диффундирующим в структуру трубной стали



Эффективным стимулятором наводороживания является и содержащийся в болотной воде углекислый газ [3]



Механизмом поглощения сталью атомарного водорода служит обратимая реакция ($\text{H}_{\text{адс}}^{\text{P}} \leftrightarrow \text{H}_{\text{адс}}^{\text{S}}$) (рис. 2). При перезащите на внешней поверхности подземного трубопровода существуют две формы адсорбированного водорода – надповерхностная $\text{H}_{\text{адс}}^{\text{P}}$ и подповерхностная $\text{H}_{\text{адс}}^{\text{S}}$ [4].

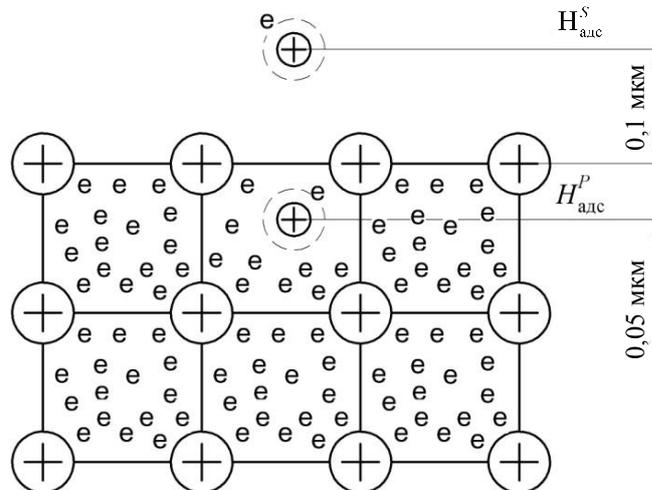


Рис. 2. Схема внедрения катодного водорода в кристаллическую решетку трубной стали

Обе формы: прочно связанная со стальной поверхностью $\text{H}_{\text{адс}}^{\text{P}}$ и существенно менее связанная $\text{H}_{\text{адс}}^{\text{S}}$ – находятся в равновесии: $\text{H}_{\text{адс}}^{\text{P}} \leftrightarrow \text{H}_{\text{адс}}^{\text{S}}$. $\text{H}_{\text{адс}}^{\text{P}}$ имеет минимум энергии и располагается непосредственно над положительно заряженными ионами кристаллической решетки на расстоянии 0,1 нм. $\text{H}_{\text{адс}}^{\text{S}}$

находится в плоскости, параллельной плоскости двойного электрического слоя и расположенной на расстоянии 0,05 нм внутри кристаллической решетки. $H_{\text{адс}}^S$ – атомы водорода, не связанные ни с каким фиксированным атомом кристаллической решетки трубной стали, и по существу представляют собой растворенный в стали протон H^+ и электрон в зоне проводимости. Параметр объемно-центрированной кубической решетки ферритно-перлитной трубной стали равен 0,2861 нм (2,8608 Å⁰). Диаметр атома водорода, состоящего из одного протона и одного электрона, составляет около 0,1 нм (1 Å⁰). Размер протона в сто тысяч раз меньше – 10⁻⁶ нм (10⁻⁵ Å⁰). Поэтому водород в стенку трубы проникает в ионизированном состоянии в виде протонного газа. Атомы водорода в стенке трубы находятся в том же состоянии, что и атомы железа: электроны атомов водорода «обобществляются» со свободными электронами атомов железа, т. е. атомы водорода являются примесью внедрения [5, 7].

Вследствие диффузии протонов вблизи конца трещины в стенке трубы в приповерхностном слое образуется область охрупченной стали. Охрупчивающее действие протонов определяется их концентрацией, которая зависит от степени превышения плотности тока катодной защиты над плотностью предельного тока по кислороду: $j_{\text{защ}} \gg j_{O_2}$, и наличием концентраторов напряжений на поверхности трубы, где происходит накопление H^+ , там, где кристаллическая решетка наиболее напряжена (атмосферы Коттрелла). В связи с этим возникает необходимость в формировании новых подходов к оценке эффективности катодной защиты подземных стальных трубопроводов с учетом напряжений в стенке трубы и катодного водорода. Замедленное разрушение стенки трубы под воздействием катодного водорода и напряжений меньше предела текучести на практике опасно из-за внезапности его проявления.

При нормальных условиях растворимость водорода в доэвтектоидных сталях трубного сортамента ферритно-перлитного класса мала и не превышает 2–5 см³/100 г. Проникающая способность водорода в стенку трубы существенно снижается при наличии на поверхности трубы адсорбированного кислорода, окисных пленок и окалины. Казалось бы, наводороживание стенки трубы при катодной перезащите ничтожно мало или даже исключено. Однако это не так. При катодном наводороживании стенки трубы, когда $j_{\text{защ}} \gg j_{O_2}$, важнейшую роль играют остаточные напряжения в стенке трубы при наличии дислокаций, включений, неоднородностей структуры вблизи кольцевых и продольных сварных швов труб, что приводит к существенному увеличению растворимости водорода в стали. При формовке труб в зонах интенсивной деформации вблизи продольных заводских сварных швов в стенке трубы возникают напряжения, близкие к пределу прочности, что приводит к преимущественному зарождению здесь стресс-коррозионных микротрещин.

Фрактографический анализ стресс-коррозионного излома (рис. 1, б) показал, что трещина образуется и растет в охрупченном наводороженном слое со стороны внешней КЗП. Толщина хрупкого излома достигает 25 % от толщины стенки трубы. Далее наблюдается переходная зона, сочетающая области скола с вязкими разрывами (до 10 %). На завершающей стадии (со стороны внутренней катодно незащищаемой поверхности) – вязкий механический

доллом – 65 %. В процессе длительной эксплуатации подземных стальных газонефтепроводов хрупкий излом вблизи внешней катодно защищаемой поверхности обусловлен накоплением здесь катодного водорода (при перезащите) и кольцевых растягивающих напряжений, создаваемых рабочим давлением в трубопроводе. Когда $j_{\text{защ}} \gg j_{\text{O}_2}$, в процессе длительной эксплуатации подземных стальных трубопроводов, количество поглощенного водорода в стали существенно превышает его «родословную» металлургическую концентрацию [8]. Когда концентрация водорода в вершине трещины достигает критического значения, трещина скачкообразно подрастает в продольном направлении вдоль трубы (перпендикулярно кольцевым растягивающим напряжениям) и вглубь стенки трубы на расстояние, равное толщине наводороженного слоя. Содержание водорода в трубной стали вблизи трещин КРПН достигает 15–17 см³/100 г, что в 5–7 раз превышает его растворимость в междоузлиях кристаллической решетки. Анализ структуры излома продольной трещины КРПН (труба диаметром 1020 мм, толщина стенки 12 мм, сталь 17ГС) свидетельствует о том, что излом имеет слоистую структуру, образованную скачкообразными хрупкими разрывами преимущественно перлитной составляющей наводороженного приповерхностного слоя трубы и их слиянием по мере развития трещины (см. рис. 1, б). Катодное наводороживание приповерхностного слоя стенки трубы всегда локально, т. к. по мере развития продольной трещины структура излома разная. В наводороженных (приповерхностных) областях преобладает доля хрупкого излома, в ненаводороженных (или менее наводороженных) по мере продвижения вглубь стенки трубы преобладает вязкая составляющая излома. Вблизи КЗП трубопровода под воздействием кольцевых растягивающих напряжений катодный водород диффундирует в зону предразрушения трещины, где скапливаются дислокации, образуя атмосферы Коттрелла. При совместном воздействии кольцевых напряжений, напрягающих кристаллическую решетку трубной стали и катодного водорода, понижающего ее когезионную прочность, преимущественно образуются зоны хрупкого излома. При недостатке катодного (избыточного) водорода в изломе доминирует вязкий доллом за счет освобождения потенциальной энергии напряженно-деформируемого трубопровода и возрастания поверхностной энергии в процессе развития продольной трещины.

Причина проникновения трещины вглубь стенки трубы и ее развитие в продольном направлении с последующим разрывом трубопровода коренится в появлении «водородного надреза» на внешней поверхности напряженно-деформированного трубопровода, контактирующей с почвенным электролитом. Появление на внешней поверхности трубопровода «водородного надреза» связано с локальным наводороживанием стенки трубы под действием плотности тока наводороживания в области высоких остаточных напряжений вблизи конца микротрещины в приповерхностном слое стенки трубы и последовательном ее ростом до критической глубины. При перезащите поверхность свежесформированной микротрещины в приповерхностном слое стенки трубы покрыта адатомами водорода и заполнена почвенным электролитом. Максимальная концентрация адатомов водорода при перезащите сосредоточена в вершине трещины. Катодный водород оказывает двоякое действие. С одной

стороны, он повышает твердость приповерхностного слоя стенки трубы, охрупчивая трубную сталь и уменьшая ее способность к деформации, снижая тем самым значение критического коэффициента интенсивности напряжений (КИН). С другой – водород, являясь примесным атомом внедрения, «напрягает» кристаллическую решетку трубной стали. Эти растягивающие напряжения в охрупченном приповерхностном слое совместно с кольцевыми растягивающими напряжениями от давления в трубе приводят к образованию локальных разрывов стенки трубы вблизи наружной катодно защищаемой поверхности трубопровода по направлению развития продольной магистральной трещины. Поверхность трубопровода по направлению развития продольной магистральной трещины показано на рис. 3.

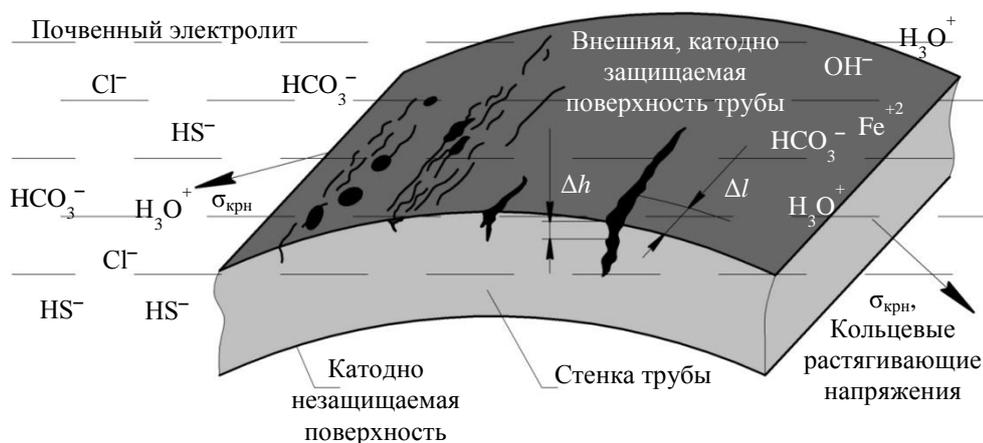


Рис. 3. Схема роста трещины КРПН на внешней катодно защищаемой поверхности трубопровода под воздействием катодного водорода и кольцевых растягивающих напряжений

Рост магистральной трещины вдоль трубы происходит скачкообразно. При этом величина скачков определяется рабочим давлением в трубопроводе и степенью превышения плотности тока катодной защиты над плотностью предельного тока по кислороду $j_{\text{защ}} / j_{\text{O}_2}$.

Изучение структуры излома трещин КРПН на трубопроводе диаметром 1020 мм с толщиной стенки 12 мм свидетельствует о том, что начальная глубина проникновения трещины («водородного надреза») составила 0,3–0,5 мм с последующим ее пропорциональным уменьшением при проникновении вглубь стенки трубы каждый раз с коэффициентом пропорциональности, примерно равным –0,01. Разрыв стенки трубы произошел, когда в сечении излома хрупкая составляющая составила 25 %, а вязкий долом с учетом переходной зоны – 75 %. Толщина приповерхностного от КЗП хрупкого слоя в изломе составила 3,1 мм, вязкого долома (к внутренней поверхности трубы) – 8,9 мм. Разрыв трубы произошел при рабочем давлении 3,5 МПа, что соответствует кольцевым растягивающим напряжениям в стенке трубы $0,45\sigma_{02}$.

На момент обнаружения трещины магистральный газопровод находился в эксплуатации в течение 36 лет. Излом трещины КРПН изучали с помощью измерительной лупы ЛИ-3-10 с десятикратным увеличением с точностью измерений до 0,1 мм. Излом имеет слоистую структуру, образованную скачкообразными хрупкими разрывами. При десятикратном увеличении количество коррозионных слоев до вязкой составляющей на разных участках исследуемой трещины составляло 9–13. При изучении излома было установлено, что до образования первого скачка («водородного надреза») магистральный газопровод эксплуатировался примерно 9–10 лет (инкубационный период), после чего в области образовавшейся за этот период коррозионной язвы (концентратор напряжений) появилась микротрещина – «водородный надрез», и микротрещина начала расти. При этом частота скачков трещины не превышала одного за 2,5–3 года. В таком случае шаг скачка трещины вглубь стенки трубы (рис. 3) выразим уравнением $\Delta h = h(t)$, где t – длительность эксплуатации трубопровода. Математическая модель распространения трещины вглубь стенки трубы под воздействием рабочего давления и катодного водорода, если первоначальная глубина коррозионной язвы на КЗП составила 0,3–0,5 мм и шаг распространения трещины вглубь стенки трубы каждый раз уменьшался с коэффициентом пропорциональности, примерно равным – 0,01, может быть получена на основе решения дифференциального уравнения

$$\begin{cases} \frac{dh}{dt} = -0,01ht; \\ h(t=0) = 0,3. \end{cases} \quad (6)$$

После разделения переменных решение уравнения

$$\frac{dh}{dt} = -0,01ht$$

имеет вид

$$h = 0,3 \exp(-0,005t^2), \quad (7)$$

где h – шаг скачка трещины от внешней КЗП трубопровода вглубь стенки трубы, который зависит от состояния поверхности трубы в сквозных дефектах изоляции, давления в трубе и степени превышения плотности тока катодной защиты над плотностью предельного тока по кислороду: $j_{\text{заш}} / j_{\text{O}_2}$. Рассчитанные шаги продвижения трещины вглубь стенки трубы, на основе полученного уравнения (7) в сопоставлении с фактически измеренными скачками, представлены на рис. 4.

Результаты фрактографического анализа излома стенки трубы, представленные на рис. 4, свидетельствуют о том, что шаг скачка трещины вглубь стенки трубы последовательно уменьшается от величины первоначального скачка, равного 0,3 мм. Фактическая глубина проникновения трещины вглубь стенки трубы составила 3,5 мм. Рассчитанная на основе полученной зависимости (7) глубина хрупкого излома в наводороженном (охрупченном) слое стенки трубы составила 3,43 мм, что практически совпадает с фактической глубиной проникновения трещины.



Рис. 4. Кинетика продвижения трещины вглубь стенки трубы магистрального газопровода диаметром 1020 мм, толщина стенки трубы – 12 мм

На момент исследования полудлина трещины в продольном направлении составила 54 см. Трещина начала распространяться вдоль трубы при наличии на поверхности коррозионной язвы диаметром 7–9 мм. Шаг распространения трещины в продольном направлении (см. рис. 3) $\Delta l = l(t)$, по мере увеличения толщины охрупченного водородом приповерхностного слоя, каждый раз увеличивался от 7–9 до 80–85 мм с коэффициентом пропорциональности, примерно равным 0,01. В этом случае после интегрирования дифференциального уравнения

$$\begin{cases} \frac{dl}{dt} = 0,01lt; \\ l(t = 0) = 9 \end{cases} \quad (8)$$

получим зависимость, определяющую длину разового скачка продольной трещины на внешней КЗП трубы в процессе эксплуатации магистрального газопровода

$$l = 9 \exp(0,005t^2). \quad (9)$$

Продольная трещина развивалась скачкообразно под воздействием катодного водорода и кольцевых растягивающих напряжений при рабочем давлении в трубопроводе 3–3,5 МПа. При проведении расчетов было принято, что трещина начала распространяться на катодно защищаемой поверхности вдоль трубы, когда ее начальная длина составляла 9 мм. Рассчитанные значения величин скачков трещины в процессе эксплуатации магистрального газопровода в продольном направлении (вдоль трубы) на основе полученного уравнения (9) и реально измеренных скачков в сопоставлении представлены на рис. 5.



Рис. 5. Кинетика продвижения трещины вдоль трубы магистрального газопровода диаметром 1020 мм, толщина стенки трубы – 12 мм

Рассчитанная на основе полученной зависимости (9) полуудлина трещины в продольном направлении в наводороженном (охрупченном) слое стенки трубы составила 545,5 мм, что практически совпадает с фактической полуудлиной, равной 540 мм.

Сопоставление результатов, представленных на рис. 4 и 5, свидетельствует о том, что рассчитанные и фактически измеренные значения скачков роста трещины практически совпадают. Установленным фактом является положение о замедлении скачков продвижения трещины от внешнего наводороженного слоя вглубь стенки трубы (в ненаводороженную область) и об увеличении скачков продвижения трещины по мере увеличения толщины наводороженного (охрупченного) слоя вдоль трубы с коэффициентами пропорциональности, соответственно равными $\pm 0,01$. Итоговые параметры распространения стресскоррозионной трещины от внешней катодно защищаемой поверхности вглубь стенки трубы и в продольном направлении практически совпадают с расчетными значениями. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в процессе длительной перезащиты концентрация протонов в приповерхностном слое трубы монотонно возрастает, что приводит к снижению пластических деформаций в приповерхностном слое и скачкообразному распространению трещин в продольном направлении и вглубь стенки трубы.

В связи с этим выбор потенциалов катодной защиты магистральных газонефтепроводов необходимо осуществлять с учетом протекания на внешней КЗП парциальных электрохимических реакций, не допуская электролитического катодного наводороживания приповерхностного слоя стенки трубы. Установлено [9, 10], что в различных грунтах с pH 5,5–7,5 (торф, глина, песок) при различной влажности, когда $3 \leq j_{\text{защ}} / j_{\text{O}_2} \leq 7$, остаточная скорость коррозии

сталей трубного сортамента не превышает 0,005–0,007 мм/год при практическом отсутствии выделения водорода на внешней КЗП трубопровода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хижняков, В.И. Коррозионное растрескивание трубопроводов под напряжением при транспорте нефти и газа / В.И. Хижняков. – М. : Изд-во КАРТЭК, 2013. – С. 37.
2. Хижняков, В.И. Превышение тока катодной защиты над предельным по кислороду – фактор коррозионного растрескивания трубопроводов под напряжением / В.И. Хижняков, Е.В. Трофимова // Практика противокоррозионной защиты. – 2009. – № 1. – С. 57–61.
3. Вигдорович, В.И. Влияние диоксиэтилтриэтилентетрамина на поток диффузии водорода через стальную мембрану из слабокислых и нейтральных хлоридных растворов, содержащих H_2S и CO_2 / В.И. Вигдорович // Защита металлов. – 2000. – Т. 36. – № 5. – С. 541–545.
4. Хориути, Д. Хемосорбция водорода / Д. Хориути, Т. Тоя // Поверхностные свойства твердых тел. – М. : Мир, 1972. – С. 23.
5. Басиев, К.Д. Механо-коррозионные процессы в грунтах и стресс-коррозия в магистральных нефтегазопроводах / К.Д. Басиев, А.А. Бигулаев, М.Ю. Кодзаев // Вестник Владикавказского научного центра. – 2005. – Т. V. – № 1. – С. 47–53.
6. Колачев, Б.А. Водородная хрупкость металлов / Б.А. Колачев. – М. : Metallurgia, 1985. – С. 72.
7. Шаповалов, В.И. Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов / В.И. Шаповалов. – М. : Metallurgia, 1982. – С. 165.
8. Хижняков, В.И. Определение инкубационного периода образования дефектов КРН на катодно защищаемой поверхности подземных стальных трубопроводов / В.И. Хижняков, А.В. Жилин // Практика противокоррозионной защиты. – 2009. – № 4. – С. 44–48.
9. Хижняков, В.И. Новый критерий выбора режимов катодной защиты подземных стальных трубопроводов / В.И. Хижняков // Практика противокоррозионной защиты. – 2009. – № 4. – С. 13–15.
10. Хижняков, В.И. Анализ механизма токообразования при катодной защите подземных стальных трубопроводов от коррозии / В.И. Хижняков, Е.В. Трофимова // Практика противокоррозионной защиты. – 2014. – № 3. – С. 5–13.

REFERENCES

1. Khizhnyakov V.I. Korrozionnoe rastreskivanie truboprovodov pod napryazheniem pri transporte nefiti i gaza [Corrosion cracking of pipelines under voltage in the transport of oil and gas]. Moscow: Kartek Publ., 2013. P. 37. (rus)
2. Khizhnyakov V.I., Trofimova E.V. Prevyschenie toka katodnoi zashchity nad predel'nyim po kislorodu – faktor korrozionnogo rastreskivaniya truboprovodov pod napryazheniem [Excess of cathodic protection current over the oxygen limit as stress corrosion cracking factor of pipelines]. *Praktika protivokorroziionnoi zashchity*. 2009. No. 1. Pp. 57–61. (rus)
3. Vidorovich V.I. Vliyanie dioksietiltriethylentetramina na potok diffuzii vodoroda cherez stal'nyuyu membranu iz slabokislykh i neutral'nykh khloridnykh rastvorov, soderzhashchikh N_2S i SO_2 [The effect of dioxyethyltriethylenetetramine on hydrogen diffusion via steel membrane from subacid and neutral chloride solutions containing H_2S and CO_2]. *Zashchita metallov*. 2000. V. 36. No. 5. Pp. 541–545. (rus)
4. Horiuti D.T. Toya Khemosorbtsiya vodoroda [Hydrogen chemisorption]. Solid state surface science. Moscow: Mir Publ., 1972. P. 23. (transl. from Engl.)
5. Basiev K.D., Bigulayev A.A., Kodzaev M.Yu. Mekhano-korroziionnye protsessy v gruntakh i stress-korroziya v magistral'nykh neftegazoprovodakh [Mechanical-corrosion processes in soils and stress corrosion in main pipelines]. *Vestnik Vladikavkazskogo nauchnogo tsentra*. 2005. V. 5. No. 1. Pp. 47–53. (rus)
6. Kolachev B.A. Vodorodnaya khрупkost' metallov [Hydrogen brittleness of metals]. Moscow: Metallurgia Publ., 1985. P. 72. (rus)

7. *Shapovalov V.I.* Vliyanie vodoroda na strukturu i svoystva zhelezouglerodistykh splavov [Influence of hydrogen on structure and properties of iron-carbon alloys]. Moscow: Metallurgia Publ., 1982. P. 165. (rus)
8. *Khizhnyakov V.I. Zhilin A.V.* Opredelenie inkubatsionnogo perioda obrazovaniya defektov KRN na katodno za-shchishchaemoy poverkhnosti podzemnykh stal'nykh truboprovodov [Determination of incubation period for the formation of stress corrosion defects on cathodically protected surface of underground steel pipelines]. *Praktika protivokorroziionnoi zashchity*. 2009. No. 4. Pp. 44–48. (rus)
9. *Khizhnyakov V.I.* Novyi kriterii vybora rezhimov katodnoi zashchity podzemnykh stal'nykh truboprovodov [New criteria for selecting cathodic protections for underground steel pipelines]. *Praktika protivokorroziionnoi zashchity*. 2009. No. 4. Pp. 13–15. (rus)
10. *Khizhnyakov V.I. Trofimova E.V.* Analiz mekhanizma tokoobrazovaniya pri katodnoi zashchite podzemnykh stal'nykh truboprovodov ot korrozii [Analysis of current formation at cathodic protection of underground steel pipelines]. *Praktika protivokorroziionnoi zashchity*. 2014. No. 3. Pp. 5–13. (rus)