

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ АНАЛИЗА И КОНТРОЛЯ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

METHODS AND INSTRUMENTS FOR ANALYSIS AND MONITORING OF THE NATURAL ENVIRONMENT, SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS

УДК 62-503.56
DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-3-255-266

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ЗАГЛУБЛЕННЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Д. А. Васин¹, Е. Е. Кардаш², Е. Л. Карнавский¹, А. Г. Коротяев³, С. В. Ларцов⁴,
А. Ю. Михалев³, С. А. Никулин^{4*}, С. В. Савченков¹

¹ Гипрогазцентр, Нижний Новгород, Россия

² Газпром трансгаз Ухта, Россия

³ Газпром, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, Россия

* s.nikulin.ggc@gmail.com

Аннотация. Рассмотрены пути оптимизации работы системы противокоррозионной защиты протяженных заглубленных магистральных трубопроводов. Модернизирована математическая модель системы, формирующаяся в режиме самодиагностики и позволяющая эксплуатировать систему в режиме самонастройки. Новая математическая модель актуальна и позволяет корректно использовать как традиционные методы параметрической оптимизации по критерию минимизации суммарного тока всех станций катодной защиты системы, так и структурную оптимизацию по критерию увеличения срока эксплуатации системы на основе прогноза состояния элементов системы.

Ключевые слова: заглубленный трубопровод, коррозия, система противокоррозионной защиты, самодиагностика, самонастройка, оптимизация

Ссылка для цитирования: Васин Д. А., Кардаш Е. Е., Карнавский Е. Л., Коротяев А. Г., Ларцов С. В., Михалев А. Ю., Никулин С. А., Савченков С. В. Оптимизация режимов функционирования системы противокоррозионной защиты заглубленных магистральных трубопроводов // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 3. С. 255–266. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-3-255-266.

OPTIMIZATION OF OPERATING MODES OF THE ANTICORROSION PROTECTION SYSTEM FOR BURIED MAIN PIPELINES

D. A. Vasin¹, E. E. Kardash², E. L. Karnavsky¹, A. G. Korotyaev³, S. V. Lartsov⁴, A. Yu. Mikhalev³,
S. A. Nikulin^{4*}, S. V. Savchenkov¹

¹ Giprogaztsentr, Nizhny Novgorod, Russia

² Gazprom Transgaz Ukhta, Ukhta, Russia

³ Gazprom, St. Petersburg, Russia

⁴ R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Nizhny Novgorod, Russia

* s.nikulin.ggc@gmail.com

Abstract. The ways of optimizing the operation of the anticorrosive protection system for extended buried main pipelines are considered. The mathematical model of the system, which is formed in the self-diagnostics mode and allows to operate the system in the self-tuning mode, is modernized. The new mathematical model is relevant and allows to correctly use both traditional methods of parametric optimization according to the criterion of minimizing the total current of all cathodic protection stations of the system, and structural optimization according to the criterion of increasing the service life of the system based on the forecast of the state of the system elements.

Keywords: buried pipeline, corrosion, anticorrosive protection system, self-diagnosis, self-tuning, optimization

For citation: Vasin D. A., Kardash E. E., Karnavsky E. L., Korotyaev A. G., Lartsov S. V., Mikhalev A. Yu., Nikulin S. A., Savchenkov S. V. Optimization of operating modes of the anticorrosive protection system for buried main pipelines. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 3. P. 255–266 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-3-255-266.

Введение. Традиционно защита от коррозии заглубленных магистральных нефтегазопроводов (трубопроводов) осуществляется изоляционными покрытиями [1] и средствами электрохимической защиты (ЭХЗ) [2]. Средства ЭХЗ создают защитный потенциал U между защищаемым объектом и грунтом путем генерации станцией катодной защиты (СКЗ) катодного тока, который пропускается между погруженным в грунт анодным заземлителем (АЗ) и защищаемым объектом [2]. В результате коррозионные процессы смещаются на АЗ, иногда называемый жертвенным анодом [2].

Заглубленный магистральный трубопровод является протяженным объектом, на котором защитный потенциал поддерживается в допустимых пределах с помощью нескольких СКЗ. Диапазон допустимых значений защитного потенциала U в зависимости от параметров грунта и материала трубопровода для магистральных трубопроводов определен гос. стандартами* и нормативными документами [3]; типичные значения U :

$$-0,85 \text{ В} < U < -1,5 \text{ В (до } -3,5 \text{ В)} \quad (1)$$

На практике СКЗ на магистральных нефтегазопроводах располагаются на расстоянии 20...25 км друг от друга [4]. Управление катодным током и контроль за его значением на временных СКЗ выполняются дистанционно. Контроль защитного потенциала на защищаемом трубопроводе осуществляется контрольно-измерительными пунктами (КИП, далее на рис. 1 — КП), расположенными примерно через 1 км друг от друга. Все СКЗ и КИП объединяются системой передачи данных с автоматизированным рабочим местом специалиста ЭХЗ (АРМ ЭХЗ), образуя систему противокоррозионной защиты (СПКЗ). На рис. 1 представлена схема СПКЗ для участка газопровода с двумя СКЗ. Настройка СПКЗ заключается в подборе таких амплитуд катодных токов СКЗ, чтобы на всех КИП выполнялось условие (1).

По мнению создателей первых СПКЗ, в результате воздействия нескольких СКЗ в каждой точке заглубленного трубопровода возникает защитный потенциал, величина которого определяется стационарным потенциалом ϕ_0 гальванической пары „трубопровод–грунт“ и влиянием значений катодных токов всех СКЗ в виде линейных зависимостей, при этом и стационарный потенциал, и коэффициенты указанных линейных зависимостей не изменяются во времени [5].

В итоге была создана формально используемая в настоящее время методика настройки СПКЗ, в соответствии с которой система настраивается один раз в результате пусконаладочных работ при ее запуске в производство [5]. При пусконаладочных работах значения катодных токов всех СКЗ оптимизируются по критерию минимизации суммарного тока всех СКЗ [6]. Как показала практика, после настройки СПКЗ успешно работает в течение достаточно длительного, но ограниченного времени (от нескольких месяцев до года), затем условие (1) перестает выполняться (математическая модель СПКЗ становится некорректной), поэтому требуется дополнительная подстройка СПКЗ, которая осуществляется силами персонала, обслуживающего систему. При такой дополнительной настройке СПКЗ выполняются новые пусконаладочные работы и полевые измерения, которые в общей сложности занимают около месяца с одновременными отключениями на несколько дней всех СКЗ. В результате этого проводимая оптимизация СПКЗ становится не вполне корректной и не может соответствовать требованиям технологического процесса.

* ГОСТ ИСО 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2016.

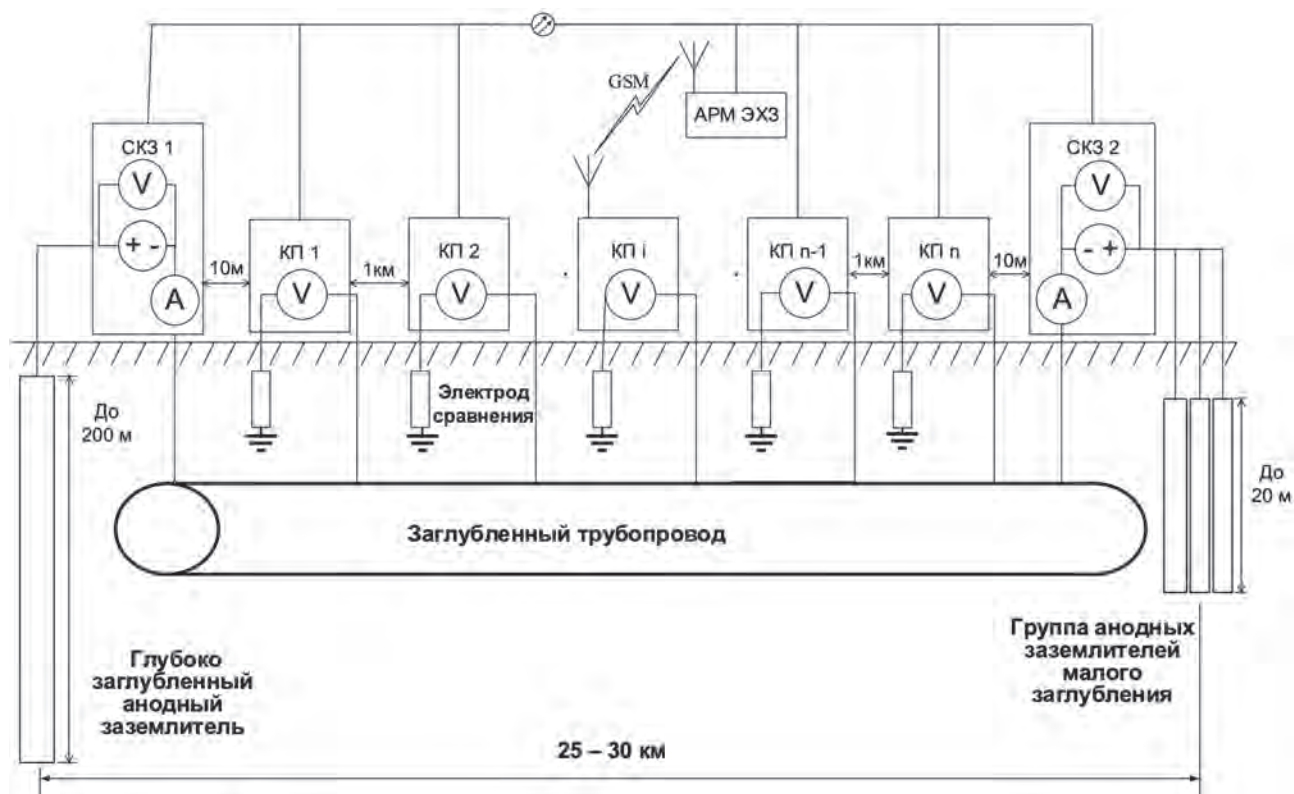


Рис. 1

Такое положение вещей перестало удовлетворять эксплуатирующие организации с появлением современного поколения дистанционно управляемых процессорных СКЗ и КИП с каналом передачи данных, так как существующая методика настройки СПКЗ стала кардинально отставать от уровня техники.

Цель представляемой разработки — создание новой математической модели и методики настройки системы противокоррозионной защиты, которые в совокупности обеспечат постоянную корректность работы системы в части поддержания защитного потенциала в рамках условия (1) и возможность ее оптимизации по выбранному критерию.

Разработка новой математической модели и методики настройки СПКЗ выполнена на основе анализа возможностей современных станций катодной защиты и контрольно-измерительных пунктов.

Принцип работы системы противокоррозионной защиты. Для пояснения работы СПКЗ рассмотрим эквивалентную электрическую схему участка из четырех СКЗ, представленную на рис. 2. При этом будем учитывать все электрические поля, существенные при измерении защитного потенциала на J -м КИП. Здесь $i, i+1, i-1$ и $i-2$ — n -я СКЗ; J — точка измерения защитного потенциала U_j в области J -го КИП; ϕ_{0j} — стационарный потенциал гальванопары „трубопровод–грунт“ в области J -го КИП; C_j, R_j — емкость и сопротивление изоляции защищаемого трубопровода в области J -го КИП; $E_{jвн}$ — потенциал, создаваемый внешними известными источниками систем электрохимической защиты соседних заглубленных объектов; E_{jp} — потенциал, создаваемый в области J -го КИП неизвестными помеховыми источниками электрического поля; $E_i, E_{i+1}, E_{i-1}, E_{i-2}$ — ЭДС, создаваемая на n -й СКЗ между трубопроводом и анодным заземлителем; $I_i, I_{i+1}, I_{i-1}, I_{i-2}$ — катодные токи, генерируемые n -й СКЗ в трубопроводе и анодном заземлителе; I_j — ток, протекающий через изоляцию в области J -го КИП; $r_i, r_{i+1}, r_{i-1}, r_{i-2}$ — внутренние сопротивления n -й СКЗ; $r_{j,i}$ — сопротивление трубопровода от $i-1$ -й СКЗ до точки J измерения защитного потенциала U_j в области J -го КИП; $r_{j,i-1}$ — сопротивление трубопровода от $i-1$ -й СКЗ до точки J измерения защитного потенциала U_j в области J -го КИП; $r_{i,i+1}$ — сопротивление трубопровода от i -й СКЗ до $i+1$ -й СКЗ; $r_{i-1,i-2}$ — сопротивление трубопровода от $i-1$ -й СКЗ

до $i - 2$ -й СКЗ; R_{i-2} , R_{i-1} , R_i , R_{i+1} — сопротивления АЗ; $R_{j,i+1}$ — сопротивление грунта от J -го КИП до $i + 1$ -й СКЗ; $R_{j,i}$ — сопротивление грунта от J -го КИП до i -й СКЗ; $R_{j,i-1}$ — сопротивление грунта от J -го КИП до $i - 1$ -й СКЗ; $R_{j,i-2}$ — сопротивление грунта от J -го КИП до $i - 2$ -й СКЗ.

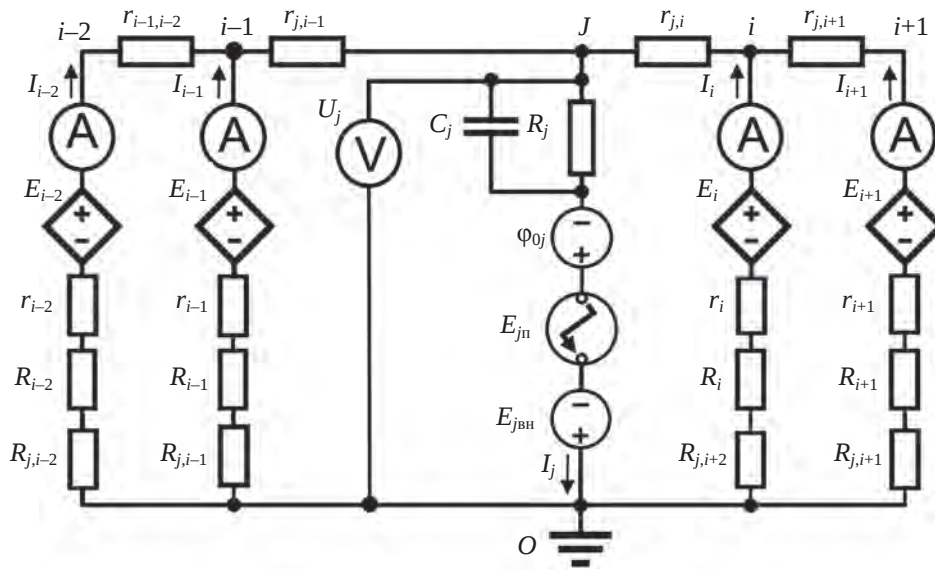


Рис. 2

Часть величин на эквивалентной электрической схеме участка СПКЗ в области J -го КИП характеризуют суммарный вклад распределенных параметров. Это сопротивления трубопровода $r_{j,i}$, $r_{j,i-1}$, $r_{i,i+1}$, $r_{i-1,i-2}$, емкость и сопротивление изоляции C_j , R_j , а также сопротивления грунта $R_{j,i+1}$, $R_{j,i}$, $R_{j,i-1}$, $R_{j,i-2}$. Кроме того, большая часть токов I_i , I_{i+1} , I_{i-1} , I_{i-2} будет растекаться в других направлениях, однако между ними и величиной I_j существует линейная связь.

С учетом данных ограничений можно записать уравнения Кирхгофа для токов в узле O и для участков цепи между точками J и O , между которыми измеряется напряжение U_j на КИП:

$$I_j = I_{i+1}k_{j,i+1} + I_i k_{j,i} + I_{i-1}k_{j,i-1} + I_{i-2}k_{j,i-2}; \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} U_j &= \varphi_{0j} + E_{jп} + E_{jвн} - I_j R_j; \\ U_j &= E_{i+1} - I_{i+1}(r_{i+1} + R_{i+1} + k_{j,i+1}R_{i,i+1} + r_{i,i+1} + r_{j,i}); \\ U_j &= E_i - I_i(r_i + R_i + r_{j,i} + k_{j,i}R_{j,i}); \\ U_j &= E_{i-1} - I_{i-1}(r_{i-1} + R_{i-1} + k_{j,i-1}R_{j,i-1} + r_{j,i-1}); \\ U_j &= E_{i-2} - I_{i-2}(r_{i-2} + R_{i-2} + k_{j,i-2}R_{j,i-2} + r_{i-1,i-2} + r_{j,i-1}), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $k_{j,i+1}$, $k_{j,i}$, $k_{j,i-1}$, $k_{j,i-2}$ — неизвестные коэффициенты.

Опыт эксплуатации позволяет охарактеризовать величины, входящие в (2) и (3), а именно коэффициенты $k_{j,i+1}$, $k_{j,i}$, $k_{j,i-1}$, $k_{j,i-2}$, необходимые для решения уравнений (2), (3), могут быть найдены из электродинамических уравнений растекания тока, генерируемого СКЗ, по земной поверхности и натекания этого тока на трубопровод. Данная задача рассматривается некоторыми исследователями [7–9] при поиске оптимальной конфигурации СПКЗ для заглубленных трубопроводов. Однако для ее корректного решения нужно знать большой объем информации о поверхностных и глубинных электрических параметрах грунта на всем протяжении защищаемого трубопровода [10], что практически невозможно. Учитывая зависимость этих параметров от текущих условий среды, примем, что:

φ_{0j} — изменяемая, практически стабильная величина, которая может сезонно меняться при изменении влажности грунта или при появлении на поверхности трубопровода окислов, через которые будет протекать катодный ток;

C_j — практически постоянная величина;

R_j — очень медленно меняющаяся величина, характеризующая состояние изоляции, соответственно ее изменение характеризует скорость старения изоляции;

$E_{j\text{вн}}$ — величина, определяемая свойствами внешних электрических источников, так как они считаются известными, то в принципе могут быть отключены на некоторое время (хотя это и не всегда возможно); $E_{j\text{вн}}$, как правило, считается стабильной величиной или с известным законом изменения, ее нестабильность связана с нестабильностью электрических свойств грунта на протяжении от J -го КИП до конкретного известного внешнего электрического источника;

$E_{j\text{п}}$ — неизвестные помеховые источники электрического поля, кратковременные, например разряды молнии, зарницы, электросварка, электротранспорт (в СПКЗ их амплитуда ограничивается разрядниками) или достаточно медленно (часы) меняющиеся во времени;

U_j — величина, измеряемая на J -м КИП;

$I_i, I_{i+1}, I_{i-1}, I_{i-2}, I_j$ — величины, измеряемые на соответствующих СКЗ;

$r_i, r_{i+1}, r_{i-1}, r_{i-2}$ — известные постоянные величины;

$R_{i-2}, R_{i-1}, R_i, R_{i+1}, R_{j,i+1}, R_{j,i}, R_{j,i-1}, R_{j,i-2}$ — неизвестные, медленно изменяющиеся величины, определяемые электрическими параметрами почвы.

Задачей настройки СПКЗ является определение значений катодных токов $I_i, I_{i+1}, I_{i-1}, I_{i-2}$, которые должны быть установлены на СКЗ для выполнения требования (1). В принципе, соотношение (2) и система уравнений (3) позволяют найти эти значения. Проблема заключается в том, что в выражениях (2) и (3) содержится много априори неизвестных величин, для теоретического вычисления которых отсутствуют исходные данные. Поэтому целесообразно рассмотреть возможность настройки СПКЗ на основе определения необходимых величин с помощью измерительных средств СПКЗ. Это предполагает преобразование выражений (2) и (3) в систему уравнений для настройки системы, получившей название математической модели СПКЗ [5].

Формирование математической модели системы противокоррозионной защиты. Для формирования математической модели СПКЗ выражение (2) вставим в первое уравнение системы (3):

$$U_j = \varphi_{0j} + E_{j\text{п}} + E_{j\text{вн}} - (I_{i+1}k_{j,i+1} + I_ik_{j,i} + I_{i-1}k_{j,i-1} + I_{i-2}k_{j,i-2})R_j. \quad (4)$$

Величины первых трех членов уравнения (4) трудно измерить по отдельности [11], в частности, если $E_{j\text{вн}}$ можно временно отключить или изменить на некоторую определенную величину для косвенного вычисления [2], то $E_{j\text{п}}$ в принципе не может быть устранена, а ее характеристики априори не известны, вычисление затруднено.

Создатели первых СПКЗ [5] при формировании математической модели и методики настройки предложили, что

$$\varphi_{0j} \gg E_{j\text{п}}, E_{j\text{вн}}, \varphi_{0j}, k_{j,i+1}, k_{j,i}, k_{j,i-1}, k_{j,i-2} \text{ при } R_j = \text{const}. \quad (5)$$

Упрощения (5) позволили сформировать математическую модель и методику настройки СПКЗ в условиях, когда оборудование системы не имело функций дистанционного контроля и настройки. При этом, как было указано выше, настройка представляла собой длительную процедуру с отключением всех СКЗ системы и привлечением дополнительных измерительных средств [12].

Новые принципы настройки и управления СПКЗ с использованием современных СКЗ и КИП можно сформулировать в виде двух достаточно простых положений, вытекающих из реальных задач и практических возможностей:

1) в уравнениях модели используются только известные или реально измеряемые физические величины;

2) измерения и необходимые вычисления выполняются средствами СПКЗ, использующими возможности современного оборудования, а именно дистанционное управление значением

$$\left. \begin{array}{l} \Delta U_1 = \Delta I_i A_{1,I}, \\ \dots\dots\dots \\ \Delta U_j = \Delta I_i A_{j,I}, \\ \dots\dots\dots \\ \Delta U_m = \Delta I_i A_{m,I}. \end{array} \right\} \quad (10)$$

Изменяя аналогичным образом одну за другой ЭДС всех СКЗ, за n шагов можно определить все коэффициенты $A_{j,i}$, $j = 1, m$; $i = 1, n$, после чего из (8) легко вычисляются все φ_j , $j = 1, m$.

Типичное расстояние между компрессорными станциями составляет 120...150 км, соответственно на этом промежутке находится примерно 6 СКЗ. Если для обмена данными в СПКЗ используются каналы линейной телемеханики с типичным периодом опроса 15 мин, то полный цикл самодиагностики и самонастройки СПКЗ на таком участке составит $\approx 1,5$ ч.

Суть методики настройки СПКЗ заключается в нахождении корректных решений актуализированной математической модели (8), т. е. таких значений катодных токов $I_1, \dots, I_i, \dots, I_n$, которые соответствуют ограничениям (1). Отметим, что решения (8) успешно находятся с помощью стандартных программ поиска решений систем линейных уравнений с известными коэффициентами, которые могут быть установлены на АРМ ЭХЗ. В наборе возможных решений системы (8) наблюдается избыточность, при этом даже после исключения решений, не удовлетворяющих (1), остается ансамбль из значительного числа возможных вариантов значений катодных токов, генерируемых СКЗ. Указанная избыточность может быть использована для параметрической оптимизации работы СПКЗ в соответствии с выбранным критерием [6] путем „полного перебора“, в частности на основе критерия минимума суммарного тока через жертвенные аноды всех СКЗ. Естественно, задача определения значений катодных токов СКЗ решается после каждого обновления параметров математической модели, соответственно СПКЗ становится постоянно адаптируемой системой, а результаты решения оптимизационной задачи всегда корректными.

Отметим, что при эксплуатации СПКЗ возможна не только параметрическая оптимизация значений катодных токов СКЗ, но и структурная оптимизация СПКЗ [15, 16]. Дело в том, что при генерации малых токов СКЗ находится в неэкономичном режиме с невысоким КПД. В таких случаях проще изменить структуру СПКЗ, т. е. временно исключить (отключить) данные СКЗ. Такие ситуации возникают либо в начале эксплуатации СПКЗ, когда количество дефектов изоляционного покрытия защищаемого трубопровода очень мало, либо в результате сезонных изменений, когда, например, вследствие высыхания или промерзания грунта или при низких температурах все электрохимические процессы, в том числе и коррозия, замедляются.

Новый метод расчета режимов СКЗ с оптимизацией значений катодных токов был внедрен на газопроводах ООО „Газпром трансгаз Нижний Новгород“, ООО „Газпром трансгаз Москва“, в оборудовании ЭХЗ, выпускаемом ЗАО „Трубопроводные системы и технологии“ (Щелково, Московская обл.), в проектах СПКЗ, разработанных АО „Гипрогазцентр“ (Нижний Новгород) и ООО „Газпром проектирование“ (Санкт-Петербург) [17]. При переходе на новую модель СПКЗ суммарное энергопотребление СКЗ уменьшилось до 10 раз [15]. Отметим, что для внедрения разработанных модели и методики настройки СПКЗ, включающих поиск оптимальных значений катодных токов СКЗ, на большинстве существующих СПКЗ достаточно лишь заменить программное обеспечение АРМ ЭХЗ. Использование самодиагностики и самонастройки при эксплуатации СПКЗ позволяет отказаться от процедур ее настройки, система должна сама выходить на оптимальный режим работы через несколько часов после монтажа, проверки работоспособности отдельных элементов и включения.

Выбор критерия для задачи оптимального управления системой противокоррозионной защиты. На сегодняшний день задача оптимизации СПКЗ рассматривается на основе критерия минимизации суммарного катодного тока всех СКЗ [6]. Такой критерий представляется

естественным и удобным, так как его применение сводится к простому перебору допустимых решений модели СПКЗ. Физически он связан с экономией электроэнергии и минимизацией суммарной потери вещества жертвенных анодов на окисление. Авторы статьи не являются принципиальными противниками применения данного критерия, однако не считают его обоснованным и основным, так как при таком подходе не ставится и не решается соответствующая оптимизационная задача.

Очевидно, что для СПКЗ оптимизационная задача должна соответствовать основной задаче системы — в течение максимально длительного времени обеспечивать коррозионную защиту трубопровода [14–16] с минимизацией потребляемых ресурсов и, прежде всего, главного ресурса. Соответственно критерий минимизации суммарного катодного тока или суммарного вещества АЗ всех СКЗ не является главным ресурсом СПКЗ исходя из ее основной задачи. Например, этот критерий не учитывает возможную неравномерность расхода материала всех АЗ, которая может привести к преждевременному выходу из строя одного из них и внеплановой остановке СПКЗ.

Таким образом, сегодня отсутствует главный критерий для оптимизации управления СПКЗ. Для выбора критерия оптимизации СПКЗ рассмотрим процессы, протекающие на участке защищаемого системой магистрального трубопровода.

1. *Старение изоляции* — физико-химический процесс, скорость которого зависит от свойств изоляции и грунта, а также условий их взаимодействия. Данный процесс определяет возникновение коррозионных явлений на трубопроводе и необходимость применения ЭХЗ. В настоящее время не существует средств какого-либо влияния на изменение скорости старения изоляции, можно только наблюдать, фиксировать и прогнозировать параметры данного процесса.

2. *Коррозия защищаемого трубопровода, обусловленная дефектами изоляции*, — электрохимический процесс, скорость которого зависит от размеров дефектов изоляции, агрессивности грунта, подверженности материала трубопровода коррозии, электрических параметров гальванической пары „материал трубопровода — грунт“, внешнего защитного потенциала, создаваемого СКЗ, который смещает процесс коррозии с трубопровода на АЗ. Прогноз развития данного процесса в принципе возможен.

3. *Коррозия анодного заземлителя* — электрохимический процесс, скорость которого зависит от свойств грунта, материала и конструкции АЗ и значения катодного тока, протекающего от СКЗ через АЗ. Прогноз развития данного процесса в принципе возможен.

4. *Изменение электрической нагрузки СКЗ* — электрохимический процесс, скорость которого в основном определяется скоростью коррозии анодного заземлителя, скоростью появления дефектов изоляции, сезонными процессами изменения электрических параметров грунта между анодным заземлителем и защищаемым трубопроводом. Следует отметить, что для любой СКЗ, как источника ЭДС, существует некоторая максимальная величина электрической нагрузки, при достижении которой СКЗ не сможет обеспечивать необходимое значение катодного тока и, соответственно, величину защитного потенциала. В таком случае нужно либо заменять СКЗ с увеличением ее мощности, либо провести замену АЗ. Прогноз развития данного процесса в принципе возможен.

Таким образом, оптимальная эксплуатация СПКЗ — это не мероприятия по экономии электроэнергии и даже материала АЗ. Оптимальная эксплуатация СПКЗ — это прежде всего организация диагностической системы контроля состояния электроизоляции, выявление участков, где могут возникнуть и протекать коррозионные процессы, разумное распределение ресурсов пар СКЗ — АЗ для обеспечения гарантированного постоянного защитного потенциала на всем протяжении защищаемого трубопровода в течение возможно более длительного времени.

Следует иметь в виду, что стратегия оптимизации тесно связана со стратегией ремонта оборудования СПКЗ, принятой в конкретной эксплуатирующей организации. Возможны, по крайней мере, две различные стратегии оптимальной эксплуатации СПКЗ:

- одновременный ремонт всего оборудования с остановкой СПКЗ (капитальный ремонт);
- текущий ремонт (замена) одного или нескольких компонентов СПКЗ, израсходовавших ресурс, например СКЗ вместе с АЗ.

В соответствии с выбранной стратегией для капитального ремонта нужно и затраты ресурсов в СПКЗ планировать так, чтобы к началу ремонта все пары СКЗ — АЗ имели показатели износа, близкие к 100 %, но обеспечивали как можно дольше коррозионную защиту согласно условию (1). Во втором случае стратегия сводится к тому, чтобы к началу ремонта показатели износа заменяемого оборудования были максимальными (близкими к 100 %), а оборудования, остающегося в эксплуатации, — по возможности минимальными.

Такая постановка задачи требует наличия в СПКЗ функции постоянного самодиагностирования и прогнозирования состояния отдельного оборудования и системы в целом. Одним из положительных результатов использования новой модели является возможность накопления корректного архива базы данных СПКЗ (параметров модели и режимов работы системы). По мнению авторов, эта база данных может стать источником для формирования корректных оценок реального состояния элементов и СПКЗ в целом, а также для предсказаний их изменений в ближайшем будущем, что открывает новые возможности в решении задачи оптимального управления СПКЗ.

Применение такого подхода к оптимизации работы СПКЗ должно базироваться на методах извлечения (агрегирования) информации из архивной базы данных СПКЗ, разработка которых ведется авторами настоящей статьи и другими исследователями в следующих направлениях:

- оценка состояния и прогнозирование времени надежного функционирования СПКЗ [18];
- оценка и прогнозирование состояния электроизоляционного покрытия [19, 20];
- оценка состояния и прогнозирование времени надежного функционирования пары СКЗ — АЗ [21];
- оценка состояния и прогнозирование времени надежного функционирования АЗ [22];
- оценка состояния и запаса СКЗ по возможностям генерации катодного тока и напряжения [23].

Рассмотрим в качестве примера общий подход к решению задачи прогнозирования надежного функционирования СПКЗ, которую можно сформулировать как задачу оценки изменения значений всех коэффициентов математической модели (8) через некоторый определенный срок.

Как уже отмечалось, величина φ_j сторонней разности потенциалов „труба — земля“ зависит от внешних случайных помеховых факторов, а также от гальванического потенциала „грунт — труба“ в месте расположения J -го КИП. Соответственно, среднее значение φ_j после усреднения сезонных факторов не должно измениться.

Коэффициенты влияния $A_{j,i}$ зависят от изменений внешнего фактора — сезонно изменяющегося около среднего значения сопротивления грунта на пространстве от J -го КИП до i -й СКЗ — и от изменений внутренних факторов: увеличивающегося сопротивления АЗ и уменьшающегося сопротивления изоляции вследствие появления дефектов в области J -го КИП.

Соответственно, при усреднении сезонных факторов могут быть прослежены тенденции изменений, связанных с факторами старения АЗ и изоляции, и аппроксимированы на некоторый близлежащий период.

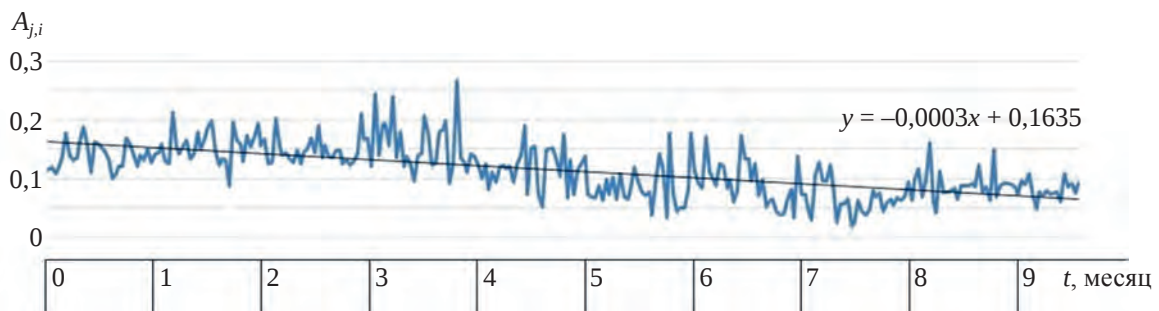


Рис. 3

На рис. 3 представлен пример изменения коэффициента $A_{j,i}$ на одном из магистральных газопроводов центра России. График показывает, что на основе аппроксимации и экстраполяции трендов коэффициентов математической модели возможно прогнозирование их значений через некоторое время.

Используя известное усредненное значение φ_j и прогнозируемые значения коэффициентов влияния $A_{j,i}$, можно предсказать момент, когда коэффициенты влияния станут такими, что прогнозистических решений математической модели, удовлетворяющих условию (1), не будет. Этот момент времени и соответствует предельному прогнозируемому времени работоспособности СПКЗ.

Заключение. Применение новой математической модели и методики настройки системы противокоррозионной защиты, использующих механизмы самодиагностики и самонастройки, базирующиеся на возможностях современного оборудования электрохимической защиты, позволяет отказаться от выключений технологической схемы для настройки СКПЗ и обеспечивает ее постоянную надежность по поддержанию на защищаемом трубопроводе защитного потенциала в заданных пределах и возможность ее одновременной оптимизации на двух временных уровнях:

— структурной оптимизации в течение достаточно длительного временного периода (несколько месяцев и более) по критерию максимизации времени гарантированной надежной работы системы противокоррозионной защиты или согласования сроков расходования отдельных ресурсов системы с планами ремонтов, основанной на диагностических и прогностических методах извлечения (агрегирования) информации из архивной базы данных системы противокоррозионной защиты и задающей структуру системы, а также рамки и ограничения по выбору значений катодных токов, генерируемых станциями катодной защиты;

— параметрической оптимизации в реальном режиме времени по критерию минимизации суммарного тока станций катодной защиты путем постоянного поддержания значений катодных токов, выбираемых по данному критерию из ансамбля постоянно уточняемых решений уравнений математической модели системы противокоррозионной защиты с учетом рамок, определяемых структурной оптимизацией.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агиней Р. В., Никулин С. А., Александров Ю. В., Александров О. Ю., Исламов Р. Р., Исупова Е. В., Пак А. Л. Защита нефтегазопроводов от коррозии. Защитные покрытия Вологда: Инфра-Инженерия, 2019. 472 с.
2. Александров В. Ю. Коррозия газонефтепроводов. Электрохимические методы защиты. СПб: Недра, 2011. 420 с.
3. СТО Газпром 2-3.5-047-2006. Инструкция по расчету и проектированию электрохимической защиты от коррозии магистральных газопроводов. М., 2006.
4. Блинов И. Г., Валушкин А. В., Старочкин А. В. К вопросу об уточнении степени коррозионной опасности участков нефте- и нефтепродуктопроводов // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2014, № 2 (14). С. 58–61.
5. Фатрахманов Ф. К., Винокурцев В. Г. Определение оптимальных параметров катодной защиты при защите коммуникаций промплощадок. Защита технологического оборудования от коррозии // Сб. тр. ВНИПИГАЗ. Баку: ВНИПИГАЗ, 1983.
6. Винокурцев А. Г., Винокурцев Г. Г., Иванов В. В., Первунин В. В., Крупин В. А. Результаты исследования эффективности электрохимической защиты городских систем газоснабжения // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2007. № 1. С. 55–62.
7. Болотнов А. М., Глазов Н. П. и др. Математическое моделирование и численное исследование электрических полей в системах с протяженными электродами // Вестн. Башкирского ун-та. 2006. № 2. С. 17–21.
8. Arabei A.B., Bolotov A.A., Marshakov A. I. et al. Ranking sections of main pipelines according to corrosion damage based on field polarization measurements // Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces. 2012. Vol. 48, N 7. P. 7.
9. Maocheng Yan, Wang Jianqiu, Han Enhou, Ke Wei. Local environment under simulated disbonded coating on steel pipelines in soil solution // Corrosion Science. 2008. Vol. 50, iss. 5. P. 1331–1339.
10. Chan Li, Bei Cao, Yinshun Wu. An electrochemical method for evaluating the resistance to cathodic disbondment of anti-corrosion coatings on buried pipelines // Journal of University of Science and Technology Beijing, Mineral, Metallurgy, Material. 2007. Vol. 14, iss. 5. P. 414–419.

11. Запевалов Д. Н. Контроль внешних коррозионных воздействий при оценке технического состояния газопроводов // Вести газовой науки. 2014. № 1. С. 44–48.
12. Фатрахманов Ф. К. Методика измерений потенциала при „интенсивных“ обследованиях подземных трубопроводов с несинхронными отключениями УКЗ // Проблемы надежности конструкций газотранспортных систем М.: ВНИИГАЗ, 1998. С. 195–200.
13. Пат. 2659543 РФ. Способ регулирования параметров катодной защиты подземных трубопроводов / А. Ф. Пуужайло, Р. В. Агинец, С. А. Никулин, Е. Л. Карнавский, С. В. Савченков, В. В. Марянин. Оpubл. 02.07.2018.
14. Nikulin S. A., Lartsov S. V., Karnavsky E. L. About the mathematical model of electrochemical corrosion protection system // AIP Conf. Proceedings. 2020. N 2467. P. 060001. DOI: 10.1063/5.0092478.
15. Никулин С. А., Спиридович Е. А., Агинец Р. В., Карнавский Е. Л. Реализация методов оптимального регулирования режимов работы станций катодной защиты на действующем магистральном газопроводе // Трубопроводный транспорт: теория и практика. 2015. № 3 (49). С. 30–33.
16. Никулин С. А., Карнавский Е. Л., Милов В. Р., Шиберт Р. Л. Структурно-параметрическая идентификация системы „труба–земля“ в задаче электрохимической защиты магистральных газопроводов // Нейрокомпьютеры. 2014. № 11. С. 79–85.
17. Никулин С. А. Противокоррозионная защита нефтегазопроводов на базе внедрения самодиагностики: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Н. Новгород, 2022.
18. Никулин С. А., Богачев Е. П., Карнавский Е. Л., Свердлик Ю. М. Основные показатели надежности системы противокоррозионной защиты // Газовая промышленность. 2020. № 1 (795). С. 30–36.
19. Никулин С. А., Карнавский Е. Л. Способ определения состояния изоляционного покрытия участка нефтегазопровода по значениям коэффициентов математической модели защищенности объекта // Наука и техника в газовой промышленности. 2021. № 1 (85). С. 80–90.
20. Пат. 2626609 РФ. Способ оценки технического состояния изоляционного покрытия подземного трубопровода / Агинец Р. В., Никулин С. А., Карнавский Е. Л., Третьякова М. В. Оpubл. 31.07.2017. Бюл. № 22.
21. Никулин С. А., Васин Д. А., Шеферов А. И., Карнавский Е. Л., Косарева Л. А. Оптимальное регулирование работы станции катодной защиты на основании показателей надежности и остаточного ресурса // Практика противокоррозионной защиты. 2022. Т. 27, № 2.
22. Никулин С. А., Карнавский Е. Л. Определение остаточного ресурса анодного заземления как элемента системы электрохимической защиты от коррозии // Газовая промышленность. 2018. № 11 (777). С. 50–58.
23. Никулин С. А., Карнавский Е. Л., Милов В. Р., Шиберт Р. Л., Модина М. Г. Процедуры управления режимами работы станций катодной защиты // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2015. № 3. С. 20–27.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Денис Александрович Васин	— АО „Гипрогазцентр“, отдел электрохимической защиты; инженер; E-mail: d.vasin@ggc.nnov.ru
Евгений Евгеньевич Кардаш	— ООО „Газпром трансгаз Ухта“, отдел защиты от коррозии; начальник отдела; E-mail: e_kardash@sgp.gazprom.ru
Евгений Львович Карнавский	— АО „Гипрогазцентр“, отдел электрохимической защиты; начальник отдела; E-mail: e.karnavsky@ggc.nnov.ru
Алексей Геннадьевич Коротяев	— ПАО „Газпром“, отдел защиты от коррозии; главный технолог; E-mail: a_korotyaev@adm.gazprom.ru
Сергей Викторович Ларцов	— д-р техн. наук, профессор; Нижегородский государственный техни- ческий университет им. Р. Е. Алексеева, кафедра проектирования и эксплуатации газонефтепроводов и газонефтехранилищ; E-mail: s.lartsov@ggc.nnov.ru
Андрей Юрьевич Михалев	— канд. техн. наук, доцент; ПАО „Газпром“, научно-технический отдел; заместитель начальника отдела; E-mail: a_mikhalev@adm.gazprom.ru
Сергей Александрович Никулин	— д-р техн. наук, доцент; Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, кафедра проектирования и эксплуа- тации газонефтепроводов и газонефтехранилищ; профессор; E-mail: s.nikulin.ggc@gmail.com
Савченков Сергей Викторович	— канд. техн. наук; АО „Гипрогазцентр“, генеральный директор; E-mail: info@ggc.nnov.ru

Поступила в редакцию 27.05.24; одобрена после рецензирования 10.09.24; принята к публикации 28.01.25.

REFERENCES

1. Aginei R.V., Nikulin S.A., Aleksandrov Yu.V., Aleksandrov O.Yu., Islamov R.R., Isupova E.V., Pak A.L. *Zashchita neftegazoprovodov ot korrozii. Zashchitnyye pokrytiya* (Protection of Oil and Gas Pipelines from Corrosion. Protective Coatings), Vologda, 2019, 472 p. (in Russ.)
2. Aleksandrov V.Yu. *Korroziya gazonefteprovodov. Elektrokhimicheskiye metody zashchity* (Corrosion of Gas and Oil Pipelines. Electrochemical methods of Protection), St. Petersburg, 2011, 420 p. (in Russ.)
3. *STO Gazprom 2-3.5-047-2006 Instruksiya po raschetu i proyektirovaniyu elektrokhimicheskoy zashchity ot korrozii magistral'nykh gazoprovodov* (STO Gazprom 2-3.5-047-2006 Instructions for the Calculation and Design of Electrochemical Protection Against Corrosion of Main Gas Pipelines), Moscow, 2006. (in Russ.)
4. Blinov I.G., Valyushkin A.V., Starochkin A.V. *Science and Technologies: Oil and Oil Products Pipeline Transportation*, 2014, no. 2(14), pp. 58–61. (in Russ.)
5. Fatrakhmanov F.K., Vinokurtsev V.G. *Collection of works of VNIPIGAZ*, Baku, 1983, pp. 4. (in Russ.)
6. Vinokurtsev A.G., Vinokurtsev G.G., Ivanov V.V., Pervunin V.V., Krupin V.A. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical sciences*, 2007, no. 1, pp. 55–62. (in Russ.)
7. Bolotnov A.M., Glazov N.P. et al. *Bulletin of the Bashkir University*, 2006, no. 2, pp. 17–21. (in Russ.)
8. Arabei A.B., Bolotov A.A., Marshakov A.I. et al. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2012, no. 7(48), pp. 7.
9. Maocheng Yan, Wang Jianqiu, Han Enhou, Ke Wei, *Corrosion Science*, 2008, no. 5(50), pp. 1331–1339.
10. Chan Li, Bei Cao, Yinshun Wu. *Journal of University of Science and Technology*, Beijing, Mineral, Metallurgy, Material, 2007, no. 5(14), pp. 414–419.
11. Zapevalov D.N. *News of Gas Science*, 2014, no. 1, pp. 44–48. (in Russ.)
12. Fatrakhmanov F.K. *Problemy nadezhnosti konstruktivnykh gazotransportnykh sistem* (Problems of Reliability of Gas Transportation System Designs), Moscow, 1998, pp. 195–200. (in Russ.)
13. Patent RU 2659543, *Sposob regulirovaniya parametrov katodnoy zashchity podzemnykh truboprovodov* (Method for Regulating the Parameters of Cathodic Protection of Underground Pipelines), A.F. Puzhailo, R.V. Aginei, S.A. Nikulin, E.L. Karnavsky, S.V. Savchenkov, V.V. Maryanin, Published 02.07.2018. (in Russ.)
14. Nikulin S.A., Lartsov S.V., Karnavsky E.L. *AIP Conference Proceedings*, 2022, vol. 2467, pp. 060001, <https://doi.org/10.1063/5.0092478>.
15. Nikulin S.A., Spiridovich E.A., Aginei R.V., Karnavskiy E.L. *Pipeline transport: theory and practice*, 2015, no. 3(49), pp. 30–33. (in Russ.)
16. Nikulin S.A., Karnavskiy E.L., Milov V.R., Shibert R.L. *Neurocomputers*, 2014, no. 11, pp. 79–85. (in Russ.)
17. Nikulin S.A. *Protivokorroziionnaya zashchita neftegazoprovodov na baze vnedreniya samodiagnostiki* (Anti-Corrosion Protection of Oil and Gas Pipelines Based on the Implementation of Self-Diagnostics), Doctor's thesis, Nizhny Novgorod, 2022. (in Russ.)
18. Nikulin S.A., Bogachev E.P., Karnavskiy E.L., Sverdluk Yu.M. *Gas Industry*, 2020, no. 1(795), pp. 66–72. (in Russ.)
19. Nikulin S.A., Karnavsky E.L. *Science and Technology in the Gas Industry*, 2021, no. 1(85), pp. 80–90. (in Russ.)
20. Patent RU 2626609, *Sposob otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya izolyatsionnogo pokrytiya podzemnogo truboprovoda* (Method for Assessing the Technical Condition of the Insulation Coating of an Underground Pipeline), R.V. Aginei, S.A. Nikulin, E.L. Karnavsky, M.V. Tretyakova, Published 31.07.2017, Bulletin 22. (in Russ.)
21. Nikulin S.A., Vasin D.A., Sheferov A.I., Karnavsky E.L., Kosareva L.A. *Practice of anti-corrosion protection*, 2022, no. 2(27). (in Russ.)
22. Nikulin S.A., Karnavsky E.L. *Gas Industry*, 2018, no. 11(777), pp. 50–58. (in Russ.)
23. Karnavsky E.L., Milov V.R., Nikulin S.A., Shibert R.L., Modina M.G. *Information-Measuring and Control Systems*, 2015, no. 3, pp. 19–25. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- | | |
|-----------------------------|--|
| Denis A. Vasin | — Giprogaztsentr JSC, Department of Electrochemical Protection; Engineer; E-mail: d.vasin@ggc.nnov.ru |
| Evgeny E. Kardash | — Gazprom Transgaz Ukhta LLC, Corrosion Protection Department, Head of the Department; E-mail: e_kardash@sgp.gazprom.ru |
| Evgeny L. Karnavsky | — Giprogaztsentr JSC, Department of Electrochemical Protection; Head of the Department; E-mail: e.karnavsky@ggc.nnov.ru |
| Alexey G. Korotyaev | — Gazprom PJSC, Corrosion Protection Department; Chief Technologist; E-mail: a_korotyaev@adm.gazprom.ru |
| Sergey V. Lartsov | — Dr. Sci., Professor; R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Department of Design and Operation of Gas and Oil Pipelines and Gas and Oil Storage Facilities; E-mail: s.lartsov@ggc.nnov.ru |
| Andrey Yu. Mikhalev | — PhD, Associate Professor; Gazprom PJSC, Scientific and Technical Department; Deputy Head of the Department; E-mail: a_mikhalev@adm.gazprom.ru |
| Sergey A. Nikulin | — Dr. Sci., Associate Professor; R. E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, Department of Design and Operation of Gas and Oil Pipelines and Gas and Oil Storage Facilities; Professor; E-mail: s.nikulin.ggc@gmail.com |
| Sergey S. Savchenkov | — PhD; Giprogaztsentr JSC; General Manager; E-mail: info@ggc.nnov.ru |

Received 27.05.24; approved after reviewing 10.09.24; accepted for publication 28.01.25.