

УДК 620.197.5::622.691.4

С.И. Бойко¹, e-mail: siboiko@mai.ru; С.В. Шумилов², e-mail: shumsv59@yandex.ru

¹ ООО «Лидер НК» (Москва, Россия).

² ООО «Газпром трансгаз Саратов» (Саратов, Россия).

АПРОБАЦИЯ ИННОВАЦИОННЫХ МЕТОДИК И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

В статье описаны инновационные способы защиты от коррозии подземных (подводных) металлических трубопроводов. Рассмотрены вопросы опасного коррозионного взаимного влияния катодной защиты параллельно уложенных, сближающихся, пересекающихся трубопроводов и повышения ее эффективности. Представлены две схемы совместной катодной защиты с наличием/отсутствием диодно-резисторного блока. Предложен принцип оптимизации катодной поляризации многониточных подземных (подводных) трубопроводов в технологических коридорах по уровню потенциала защиты «труба – земля» относительно медносульфатного электрода сравнения в зависимости от расположения нитки по отношению к общему анодному заземлению при организации совместной защиты от общей катодной установки.

Авторами предложен способ защиты от коррозии переменным током в случаях, когда катодная защита неэффективна или ее применимость существенно ограничена неудовлетворительным состоянием изоляционного покрытия, структурой и текстурой грунта, природно-климатическими условиями, технической сложностью или невозможностью реализации (наземная и надземная прокладка), высокой стоимостью создания и обслуживания, энергоемкостью и другими факторами. Кратко изложена теория, описывающая влияние слабого переменного тока на кинетику коррозионного процесса подземного (подводного) трубопровода. Приведены основные практические результаты лабораторных гравиметрических испытаний образцов-свидетелей коррозии в электролитических ячейках с защитой наложением переменного тока и без нее. Представленный инновационный подход к вопросу защиты от коррозии подземных (подводных) и технологических металлических трубопроводов, скважин и трубопроводов коммунального хозяйства (водопроводы, теплотрассы, продуктопроводы, канализация) будет интересен специалистам предприятий и организаций, связанных с добычей и транспортировкой продуктов трубопроводными системами, а также студентам и преподавателям учебных заведений.

Ключевые слова: КОРРОЗИЯ, КАТОДНАЯ СОВМЕСТНАЯ ЗАЩИТА, ПОЛЯРИЗАЦИЯ, ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК, ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ ПАРА, ОБРАЗЕЦ – СВИДЕТЕЛЬ КОРРОЗИИ, ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЕ ИСПЫТАНИЕ.

Противокоррозионная защита подземных (подводных) трубопроводов с применением катодной поляризации и изоляционных покрытий – это эффективное средство борьбы

с электрохимической коррозией наружных поверхностей металлических трубопроводных систем. С ростом разветвленности сетей и протяженности многониточных

технологических коридоров катодная защита параллельно уложенных, сближающихся и пересекающихся подземных (подводных) трубопроводов должна проектиро-

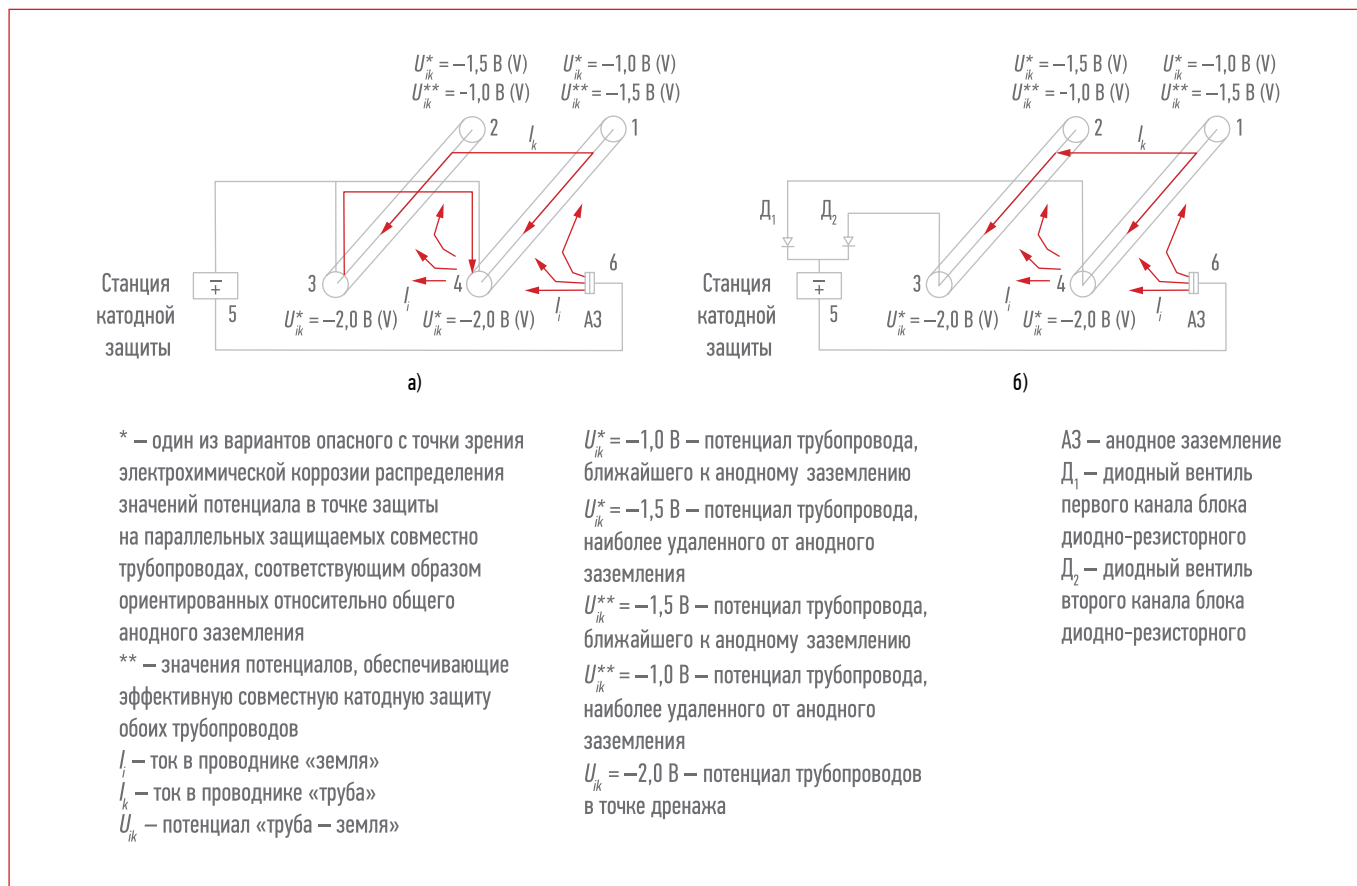


Рис. 1. Совместная катодная защита: а) без блока диодно-резисторного; б) с блоком диодно-резисторным

ваться и эксплуатироваться с учетом этих факторов для исключения провоцирующего коррозию взаимного влияния.

Многониточные коридоры состоят из трубопроводов с разными сроком службы, диаметром, состоянием изоляционного покрытия; грунт вдоль трассы и по ширине коридора меняет коррозионную активность. Это приводит к изменению катодной поляризации между нитками при использовании схемы совместной защиты. Применение отдельной катодной защиты (с отдельными источниками и анодными заземлениями) для многониточных коридоров трудно реализуемо и неоправданно дорого.

В настоящей работе предложен способ оптимизации катодной поляризации многониточных подземных (подводных) трубопроводов в технологических коридорах путем настройки защитных потенциалов относительно общего анод-

ного заземления. Рекомендовано применить инновационный метод раздельной защиты каждой нитки за счет наложения переменного тока.

МЕТОДОЛОГИЯ

Поскольку катодная поляризация многониточных трубопроводов представляет собой распределение постоянного тока в сложной разветвленной цепи, содержащей несколько контуров защиты, которые могут иметь общие участки и несколько источников электродвижущей силы (ЭДС), решать задачу поляризации рационально на базе законов Кирхгофа.

Для этого необходимо сделать следующее.

Измерить направление токов на всех участках цепи. Действительное направление токов определяется из следующего условия: если искомым ток получится положительным, его направление было выбрано пра-

вильно, если отрицательным – его действительное направление противоположно выбранному.

Выбрать направление обхода контура и строго его придерживаться. Произведение силы тока и сопротивления считается положительным, если направление тока на данном участке совпадает с направлением обхода, и наоборот. Аналогично величина ЭДС, действующей вдоль выбранного направления обхода, принимается положительной.

Составить систему уравнений, достаточную для определения искомым величин (в нее необходимо включить все сопротивления и ЭДС рассматриваемой цепи). Очевидно, что каждый контур должен содержать хотя бы один элемент, отсутствующий в предыдущих контурах. Поскольку физическая цепь катодной защиты – это замкнутый контур разветвленной цепи, согласно второму закону Кирхгофа:



Рис. 2. Принцип организации противокоррозионной защиты наложением переменного тока

$$\sum_i I_i R_i = \sum_k \varepsilon_k, \quad (1)$$

где I_i – распределенный ток катодной защиты в проводнике «земля» с учетом сопротивления изоляционного покрытия, А; R_i – интегральная величина распределенного сопротивления проводника «земля» и изоляционного покрытия в конкретном контуре, Ом; ε_k – ЭДС, В. При этом алгебраическая сумма токов, сходящихся в узле (место соединения или сближения трубопроводов), равна нулю (первый закон Кирхгофа):

$$\sum_k I_k = 0, \quad (2)$$

где I_k – ток в проводнике «труба», А (разветвленная цепь многониточного трубопровода).

Поскольку решение поставленных задач усложняется наличием многофункциональной зависимости R_i от погодных, географических, промышленных, временных и прочих условий эксплуатации, в настоящей работе предложен следующий подход.

Рассмотрим две схемы совместной защиты, встречающиеся на реальных объектах, и средств электрохимической защиты (ЭХЗ) (рис. 1). Несмотря на то что представленный на рис. 1а вариант согласно последним требованиям нормативной документации [1] не должен применяться, он встречается так же часто, как и другой (рис. 1б)

(особенно на трубопроводах, эксплуатирующихся более 25 лет).

В первой схеме (рис. 1а) совместная защита осуществляется с помощью непосредственного подключения дренажа трубопроводов к «минусу» системы коррозионной защиты (СКЗ). В этом варианте цепь защиты замыкается через дренажные кабели СКЗ или через глухую перемычку между трубопроводами. Согласно [1] в схемах ЭХЗ недопустимо применение глухих перемычек.

Если поляризация трубопроводов приводит к значениям U_{ik}^* $-1,0$, $-1,5$ В, в цепи совместной защиты образуется три контура для тока защиты:

- контур 1: 6–4–5–6;
- контур 2: 6–1–2–3–5–6;
- контур 3: 6–3–5–6.

В контуре 2 часть защитного тока от общей СКЗ переходит в электроток коррозии, обозначенный стрелкой между точками 1 и 2. Очевидно, что ток контура 2 приведет со временем к коррозионному разрушению точки 1 на границе «металл – грунт».

Вариант совместной защиты (рис. 1б) со значениями U_{ik}^* отличается от первой схемы тем, что при неработающей СКЗ электрическая связь между трубопроводами через глухую перемычку отсутствует, соответственно, коррозионные электроток между ними минимизируются. Кроме того, здесь можно изменять поляризацию трубопроводов, например на значения U_{ik}^* путем регулирования дренажных токов с помощью реостатов диодно-резисторного блока (на рисунках опущены) за счет изменения потенциалов в точках дренажа в допустимых пределах [2].

Значения $U_{ik}^* = -2,0$ В на рис. 1 приведены условно в целях констатации факта изначального равенства поляризации трубопроводов и ее дальнейшей разбалансировки вдоль трассы.

В случае, когда поляризация трубопроводов приводит к значениям

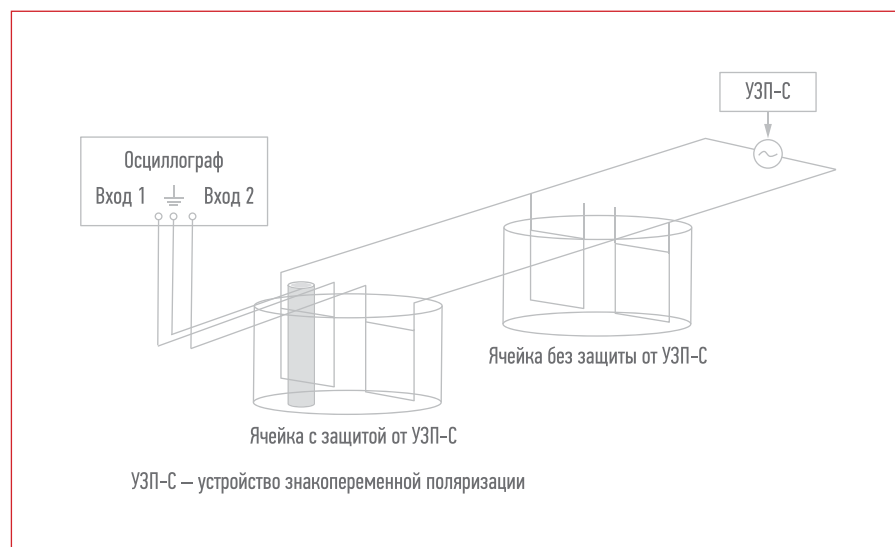


Рис. 3. Схема сравнительных коррозионных испытаний и подключения измерительного оборудования к ячейке с защитой

U_{ik}^{**} , ток в контуре 2 не образуется, следовательно, коррозия в точке 1 на границе «металл – грунт» не будет протекать, что свидетельствует об эффективности работы совместной защиты.

Защита от коррозии постоянным током

В связи с этим авторы предлагают настраивать совместную защиту таким образом, чтобы абсолютное значение катодной поляризации от общей СКЗ параллельно уложенных трубопроводов снижалось (интегрально): среднее значение защитного потенциала уменьшалось на единицу длины от ближайшего трубопровода в сторону удаленного от анодного заземления, при этом значения потенциалов должны лежать в установленных [2] пределах. Следует отметить тот факт, что в коррозионной среде любой металл, приобретая естественный потенциал поляризации, изменяет его за счет воздействия постоянного тока катодной за-

щиты, поскольку коррозионная среда представляет собой проводник защитного и блуждающих токов. Следовательно, свойства СКЗ и системы ЭХЗ не взаимосвязаны и изменяются с течением времени. Поэтому для корректной работы СКЗ требуется периодически проводить эксплуатационный контроль и регулировку, особенно в условиях многоточечной прокладки трубопроводных коридоров.

Защита от коррозии переменным током

Эффективность катодной защиты может быть существенно ограничена неудовлетворительным состоянием изоляционного покрытия, структурой и текстурой грунта, природно-климатическими условиями, технической неприменимостью (надземная и наземная прокладка), высокой стоимостью реализации, обслуживания, энергоемкостью и другими факторами. Для этих случаев авторы разработали способ защиты

от коррозии переменным током [3]. Его лабораторные коррозионные гравиметрические испытания провели в АО «Всероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт нефтяного машиностроения» (ВНИИНЕФТЕМАШ), в химической лаборатории ГНЦ ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт черной металлургии им. И.П. Бардина» (ЦНИИчермет им. И.П. Бардина) (в рамках договора с ООО «Компания «Магистраль-Сервис») и в ООО «ЛИДЕР НК». В результате была подтверждена эффективность способа в отношении защиты образцов-свидетелей (металлические пластинки, предназначенные для определения скорости коррозии гравиметрическим методом при коррозионном мониторинге) без изоляционного покрытия с полным и неполным погружением в агрессивный электролит. Суть метода заключается в воздействии слабого переменного тока на двойной электрический слой



Аппарат для дуговой штифтовой пайки выводов ЭХЗ обеспечивает максимальную надежность и экономичность, а также высокое качество

Преимущества использования:

- **Скорость создания соединения**
Пайка занимает 1–2 секунды.
Весь процесс с подготовки занимает 1–2 минуты.
- **Низкая температура при пайке**
Низкая температура плавления припоя (до 650 °С) и малое время процесса (1–2 секунды) сводят к минимуму тепловые воздействия на металл основы.
- **Простота использования**
Оператора можно обучить эффективному техническому обслуживанию и эксплуатации оборудования менее чем за один час.
- **Высокий уровень безопасности**
Напряжение питания оборудования – 36 В. Встроенная защита от удара током.



Москва,
Берингов пр., д. 3
Тел.: +7 (499) 119-74-37
info@pinbrazing.ru

www.pinbrazing.ru



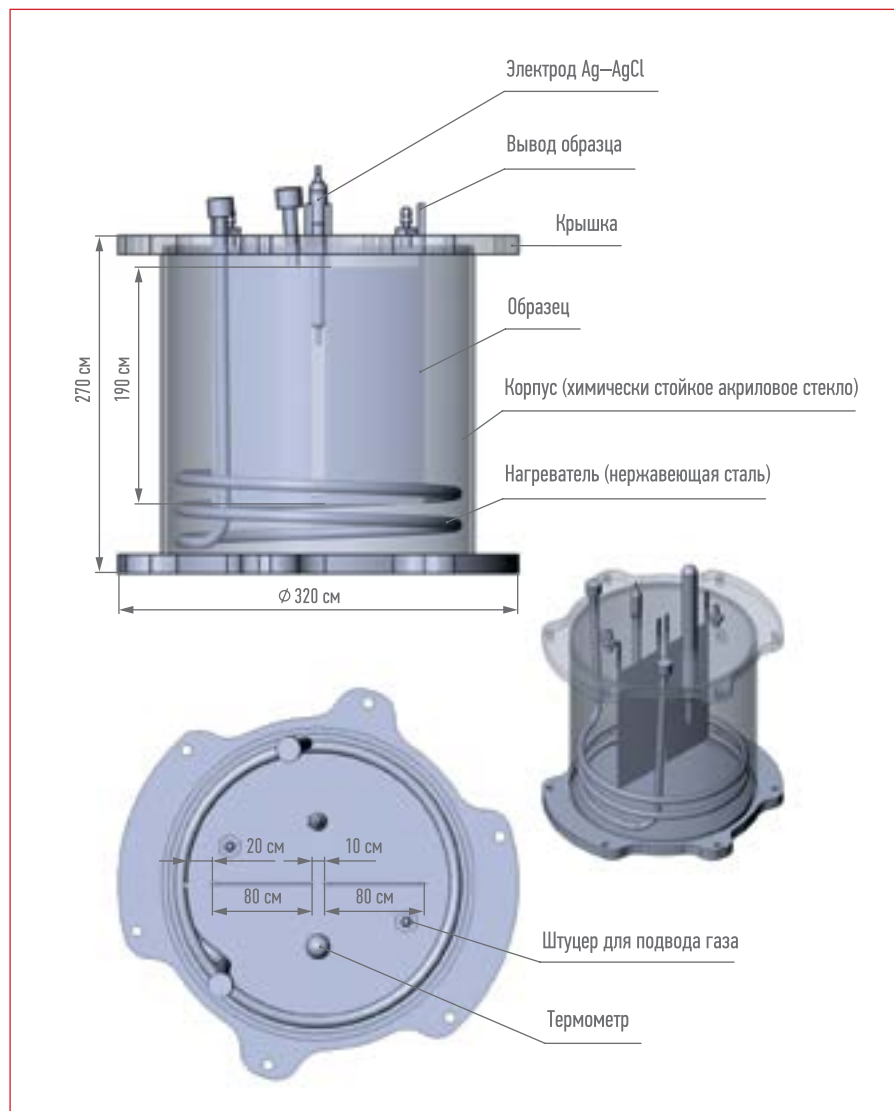


Рис. 4. Компонновка испытательных ячеек

(ДЭС), образующийся на поверхности металла объекта защиты за счет адсорбции ионов из электролита и ориентирования полярных молекул на границе раздела фаз. Такое воздействие в значительной степени нивелирует гетерогенность распределения значения потенциалов ДЭС, что, в свою очередь, снижает активность действующих коррозионных гальванических пар электрохимической коррозии и предупреждает возникновение новых. Для реализации способа разработано и изготовлено устройство знакопеременной поляризации УЗП-С (рис. 2). Оно представляет собой блок подачи на защищаемые участки трубопро-

вода слабого переменного тока инфранизкой частоты, разделенный электроизолирующей вставкой (ВЭИ). Период знакопеременного воздействия УЗП-С сравним с характерным временем образования гальванических пар в гетерогенно распределенном ДЭС по поверхности защищаемых участков трубопровода при специально подобранных значениях амплитуды поляризации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно результатам ускоренных лабораторных сравнительных испытаний (10–30 сут) воздействие на металл слабым переменным током с помощью устройства

УЗП-С позволяет замедлить общую коррозию образцов из конструкционной стали марки 20: при полном погружении в раствор электролита – на 20–40 %, при неполном погружении с воздушным выпуском – на 45 %. Каждая пара образцов, включенных в электрическую цепь УЗП-С, предохраняла себя от коррозии без дополнительной пассивной защиты рабочих поверхностей (изоляционное покрытие) и жертвенного анода в цепи ЭХЗ.

На рис. 3 представлена схема проведения сравнительных коррозионных испытаний образцов-свидетелей для определения общей коррозии по критерию потери массы образцов в соответствующих ячейках. В качестве электроизмерительного оборудования применяли УЗП-С, цифровой осциллограф DS1052E (RIGOL Technologies, Inc.), хлорсеребряный электрод сравнения. Образцы взвешивали на электронных весах ViBRA AB-323 RCE (Shinko Denshi Co., Ltd.) с точностью ± 1 мг. Визуальный контроль проводили путем осмотра поверхности при 8,75-кратном увеличении с помощью бинокулярного микроскопа БМ-51–2 (ОАО «Казанский оптико-механический завод»).

Испытательные ячейки (емкость до 8 л) комплектовали термоэлектронагревателями с регуляторами для поддержания температуры коррозионной среды (рис. 4), а также герметическими крышками для снижения скорости испарения электролита, снабженными штуцерами для подвода атмосферного воздуха в целях газового обогащения электролита и отверстиями для контактных выводов образцов. Выбранная форма образцов (рис. 5) и конструкция испытательных электрохимических ячеек позволяют наиболее эффективно контролировать потерю массы образцов и дают возможность существенно менять условия тестов (температура, газовое обогащение, перемешивание), проводя текущие электроизмерения без нарушения исходных условий процесса.

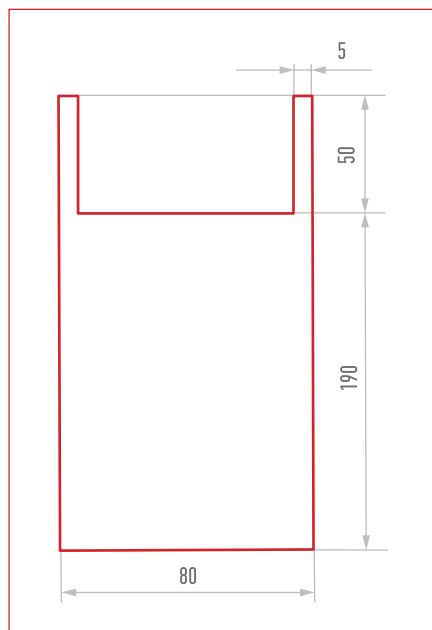


Рис. 5. Форма и размеры (см) образцов для испытаний

Для определения оптимальных амплитудно-частотных характеристик УЗП-С испытаниям подвергли 60 образцов при различных режимах защиты. На рис. 6 представлен внешний вид образцов-свидетелей из ячеек с защитой и без защиты сразу после выдержки (10 сут) в растворе NaCl (3 масс. %) с воздушным барботированием без нагревания (средняя температура электролита 20 °С) (верхняя часть – погруженная в раствор поверхность, нижняя – зона воздушного выпуска). Результаты гравиметрических лабораторных испытаний образцов № 9–12, проведенных в ООО «ЛИДЕР НК» для количественной оценки защитной способности метода наложения переменного тока, суммированы в таблице.

С использованием критерия потери массы образцов-свидетелей получена количественная характеристика защиты поверхности металла от коррозии: 45,27 % при отсутствии изоляционного покрытия. Интерес к теме влияния переменного тока на скорость коррозии металлов растет во всем мире. Освоение новых месторождений на шельфе повышает риск корро-



1 – образцы были защищены наложением переменного тока
2 – образцы не были защищены наложением переменного тока

Рис. 6. Внешний вид образцов после выдержки в течение 10 сут в растворе NaCl (3 масс. %) при температуре 20 °С

зии в связи с низким значением сопротивления морской воды и ограниченностью применения катодной защиты. Это влияние необходимо учитывать и при прокладке коммуникаций в общих коридорах с различным состоянием изоляционного покрытия и степенью катодной защищенности.

Как правило, эта тема рассматривается только с точки зрения вредного воздействия переменного тока. Однако возможность заметного провоцирования коррозии переменным током на проложенные в земле трубы и кабели – спорный вопрос. Часто наблюдаемая коррозия заземляющих проводов происходит при контакте различных металлов. Обусловленное электролизом под действием переменного тока разрушение материала наступает только в том случае, если анодный полупериод допускает реализацию процесса:



Степень коррозии под действием переменного тока значительно зависит от его частоты и плотности. Например, при плотности переменного тока обычной частоты (50 Гц)

от 10 мА/дм² и ниже опасность коррозии отсутствует [4].

Действие переменного тока (в частности, в инфрачастотном диапазоне) на функционирование гальванопар в коррозионных системах теоретически не рассматривалось, вероятно, в связи со сложностью математических расчетов. Как правило, для описания его влияния используют тафелевскую зависимость электрохимической поляризации от плотности тока при достаточно больших значениях $i_a > 1 \cdot 10^{-2} \text{ А/м}^2$ [4]:

$$\Delta V_a = a_1 + b_1 \log i_a \quad (4)$$

где ΔV_a – приращение потенциала металла под действием переменного тока; a_1 – постоянная, зависящая от материала и состояния поверхности анода, температуры и др.; b_1 – постоянная, связанная с механизмом возникновения перенапряжения ионизации металла; i_a – плотность анодного тока. При низких значениях плотности анодного тока ($i_a < 1 \cdot 10^{-2} \text{ А/м}^2$) зависимость от него перенапряжения ионизации металлов выражается уравнением [4]:

$$\Delta V_a = K_1 \log i_a \quad (5)$$

Результаты гравиметрических испытаний образцов-свидетелей (водный раствор NaCl, 10 сут, 20 °С)

№ образца	Исходная масса (m_{int}), г	Конечная масса (m_{10}), г	$\Delta_s = m_{int} - m_{10}$, г	$\Delta_z = \Sigma \Delta_s$, г	$\Delta = \Delta_z$ (без защиты) – Δ_z (с защитой), г (%)
9	105,696	105,080	0,616	1,268	1,049 (45,27)*
10	107,409	106,757	0,652		
11	108,769	107,726	1,043	2,317	
12	108,365	107,091	1,274		

* *Примечание.* От среднего значения исходной массы образцов № 9–12

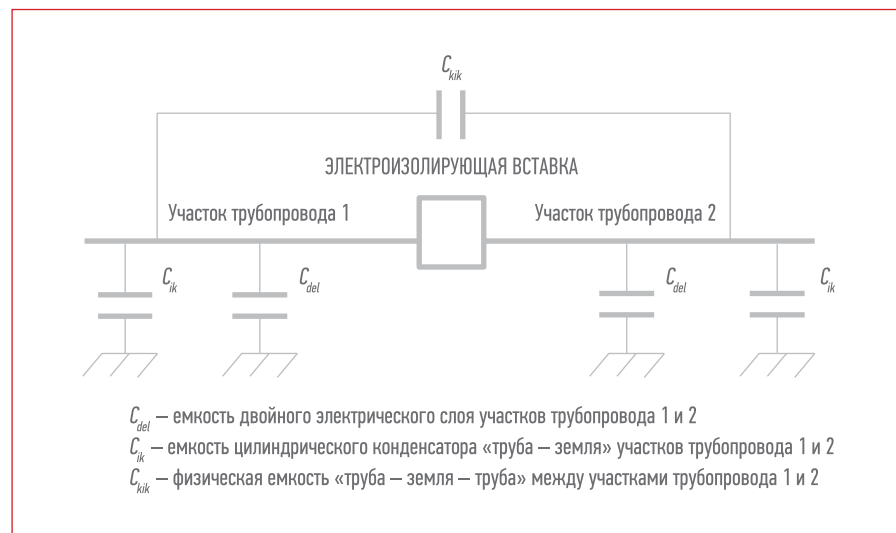


Рис. 7. Эквивалентная схема параллельно-последовательного соединения емкости двойного электрического слоя участков трубопровода и физической емкости «труба – земля – труба»



Рис. 8. Форма сигнала защитного тока от устройства знакопеременной поляризации УЗП-С на образцах гравиметрических лабораторных испытаний

где K_1 – постоянная, определяемая материалом и состоянием поверхности анода, температурой и др. Соотношение (5) следует применять для описания процессов анодной (положительной) и катодной

(отрицательной) поляризации в результате наложения переменного тока [4]. Это значит, что смещение потенциала коррозии под действием переменного тока практически одинаково в отрицательную и поло-

жительную стороны. При определенном соотношении кинетических характеристик анодных и катодных реакций, протекающих на коррозионных гальванопарах, можно добиться снижения скорости коррозии. Управлять этим процессом позволяет наложение переменного тока определенных амплитуды и частоты на разделенные ВЭИ участки корродирующего объекта (трубопровода).

Кроме того, необходимо рассмотреть влияние наложенного переменного тока на кинетику коррозионного процесса, в частности применительно к подземным (подводным) объектам, принимая во внимание заряд/разряд параллельно-последовательного соединения емкости ДЭС участков трубопровода и физической емкости «труба – земля – труба» без учета коррозии внутренней стенки (рис. 7).

Для обобщения результатов исследования авторы провели обзорный анализ существующей литературы, описывающей кинетику коррозионных процессов трубных сталей под действием переменного тока [5, 6]. Оказалось, что в открытых источниках не описаны процессы коррозии трубной стали при частотах тока ниже 5 Гц.

В наиболее информативной работе [7] энергетическое воздействие переменного тока рассматривается от значений наложенных потенциалов не меньше уровня потенциалов коррозии при частоте воздействия от 20 Гц и выше. При этом не отрицается физическая возможность снижения скорости коррозии путем наложения переменного тока. Так-

же в литературе не найдена информация об организации совместной защиты от общей СКЗ параллельно уложенных трубопроводов описанным в статье способом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для достижения положительного антикоррозионного эффекта от наложения переменного тока необходимо достичь такого соотношения силы тока и его частоты, при котором форма сигнала будет

соответствовать представленной на рис. 8. При этом процессы пассивации и катодной поляризации могут взаимно дополняться.

Экспериментальные данные, полученные при участии ВНИИНЕФТЕМАШ в химической лаборатории ЦФМК ЦНИИчермет им. И.П. Бардина, ООО «ЛИДЕР НК» и ООО «Компания «Магистраль-Сервис», подтверждают эффективность способа снижения скорости коррозии [3] при отсутствии изоляционного по-

крытия и без применения в цепи ЭХЗ жертвенного анода.

Оптимизация катодной поляризации трубопроводных ниток в технологических коридорах при организации совместной катодной защиты, а также применение инновационного способа отдельной защиты каждой нитки наложением переменного тока позволят увеличить срок службы металлических трубопроводов и снизить стоимость их строительства и обслуживания.

Литература:

1. ВРД 39-1.10-006-2000. Правила технической эксплуатации магистральных газопроводов [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://samara-tr.gazprom.ru/d/textpage/8e/142/vrd-39-1.10-006-2000-pravila-tekhnicheskoj-ehspluatatsii-mg.pdf> (дата обращения: 11.06.2020).
2. ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200001879> (дата обращения: 11.06.2020).
3. Способ антикоррозионной защиты внутренней и внешней поверхностей металлических трубопроводов наложением переменного тока: пат. RU 2533467 С2; МПК С23F 15/00, С23F 13/04/ С.И. Бойко, А.В. Петров. Патентообладатели С.И. Бойко, А.В. Петров; № 2012151375/02; заявл. 30.11.2012; опубл. 20.11.2014, Бюл. № 16. 7 с.
4. Справочник химика: в 7 т. / Под ред. Б.П. Никольского. Т. 3. Химическое равновесие и кинетика. Растворы. Электрохимия. Аналитическая и техническая химия. М.: Госхимиздат, 1952. 1192 с.
5. Яблучанский П.А. Обоснование мероприятий по защите подземных нефтепроводов от коррозионного воздействия высоковольтных линий электропередачи переменного тока: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014.
6. Захаров Д.Б., Яблучанский П.А., Титов А.В. Об оценке коррозионного воздействия ЛЭП на подземный трубопровод при их пересечении // Территория «НЕФТЕГАЗ». 2013. № 12. С. 70-77.
7. Yunovich M., Thompson N.G. AC Corrosion: Mechanism and Proposed Model // Conference Proceedings of the International Pipeline Conference. Calgary, Canada, 2004. P. 183-195.



19-я Северо-Каспийская
региональная выставка
«Атырау Нефть и Газ»

26 - 28 августа 2020
Казахстан, Атырау



Подробная информация:
www.oil-gas.kz