

DOI 10.5862/JEST.231.11

УДК 621.311.22(075.8)

*В.Г. Киселев*

## **ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ЗАЩИТНОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ПОДЗЕМНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ТРУБОПРОВОДАХ**

*V.G. Kiselev*

### **PROBLEMS OF THE GUARANTEE OF POLARIZATION SHIELDING POTENTIAL ON THE UNDERGROUND METALLIC CONDUITS**

В статье показано, что с ростом удельного электрического сопротивления грунта и размеров дефектов наблюдается устойчивая тенденция к снижению поляризационного защитного потенциала подземных металлических сооружений (ПМС). Отмечено, что наибольшую опасность это явление представляет в зонах с минимальным значением защитного поляризационного потенциала, определяемого в соответствии с требованиями ГОСТ 9.602 – 2005. Рассмотрен комплекс мероприятий, снижающих потенциальные риски ненадлежащей катодной защиты ПМС, среди которых можно выделить следующие: 1) постоянный мониторинг состояния изоляции ПМС как в процессе строительства, так и в процессе эксплуатации с акцентом внимания на зоны с повышенным удельным электрическим сопротивлением грунта и проведение незамедлительных ремонтных работ в случае обнаружения дефектов изоляции; 2) выбор расположения при наличии такой возможности точки дренирования защитного тока в трубопровод в зонах с повышенным удельным электрическим сопротивлением грунта и пониженным качеством изоляции.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА; КАТОДНАЯ ЗАЩИТА; КОРРОЗИЯ; ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ; КОМБИНИРОВАННАЯ ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ; ПРОТЕКТОРНАЯ ЗАЩИТА.

In the article it is shown that with an increase in the resistivity of soil and sizes of defects is observed the steady tendency toward reduction in the polarization shielding potential of underground metallic construction (PMS). It is noted, that the greatest danger this phenomenon has in the zones with the minimum value of the shielding polarization potential, determined in accordance with the requirements THE ALL-UNION STATE STAN. 9.602 – 2005. Is given the complex of measures, which decreases the potential risks of the irrelevant cathode protection PMS, among which it is possible to isolate the following: a constant monitoring of the state of isolation PMS both in the process of building and in the process of operation, accentuating special attention to the zones with the increased resistivity of soil, and conducting immediate repair work, in the case of the flaw detection of isolation; the arrangement of the point of the drainage of shielding current into the conduit, with the presence of this possibility, in the zones with the increased resistivity of soil and the lowered quality of isolation.

ELECTROCHEMICAL PROTECTION; CATHODE PROTECTION; CORROSION; ELECTROCHEMICAL CORROSION; THE COMBINED CORROSION PROTECTION; PROTECTOR PROTECTION.

#### **Формулировка проблемы**

При разработке и внедрении в производство новых изделий, оборудования, конструкций и сооружений различного типа существенную роль играет их коррозионная стойкость. В последнее время для защиты от коррозии подземных ме-

таллических сооружений (ПМС) всё чаще используют комбинированные методы, включающие совместное применение покрытий и электрохимической защиты. В то же время существующие нормативные документы, например ГОСТ 9.602 – 2005 [1] и ГОСТ Р 51164 – 98,

[2] требуют безусловного обеспечения поляризационного защитного потенциала, измеренного относительно насыщенного медно-сульфатного электрода сравнения на всем протяжении защитной зоны ПМС. Так, например, для стальных подземных трубопроводов интервал допустимых значений в обычных условиях колеблется от  $-0,85$  до  $-1,15$  В [1]. Как показывает практика, если вблизи точки дренирования подземного трубопровода защитный поляризационный потенциал достижим практически всегда, то в конце защитной зоны трубопровода, где его величина снижается в соответствии с типовыми методиками расчета [3] (по абсолютной величине) на  $0,3$  В, обеспечение надлежащей электрохимической защиты зачастую проблематично. Очевидно, что выяснение причин этого явления более чем актуально и может быть сопряжено с необходимостью разработки конкретных мероприятий по обеспечению надлежащей антикоррозионной защиты ПМС в проблемных зонах. Предлагаемая статья является попыткой решения этой задачи.

#### Оценка влияния на защищенность ПМС в зонах с минимальным значением защитного поляризационного потенциала удельного электрического сопротивления грунта и размеров дефектов

Произведен типовой расчет зоны защиты подземного трубопровода, в соответствии с которым в конце защитной зоны, максимально удаленной от точки дренирования, наблюдается минимальное (по абсолютной величине) значение защитного потенциала. Кроме того, на основе анализа зависимости поляризационного потенциала от удельного электрического сопротивления грунта и размеров дефекта показано, что в этих областях возможно снижение поляризационного защитного потенциала ниже допустимого по ГОСТ 9.602 – 2005 [1].

#### Основные принципы катодной защиты от коррозии подземных металлических сооружений и исходные данные для ее расчета

Катодная защита от коррозии наложенным током (в дальнейшем – катодная защита, или электрохимическая защита) в случае ПМС используется в основном для защиты от почвенной коррозии, а также для защиты от коррозии вызываемой постоянными и переменными блуж-

дающими токами. Современные устройства катодной защиты представляют собой, как правило, выпрямители переменного тока, снабженные специальными блоками, обеспечивающими автоматическое регулирование электрических характеристик электрохимической защиты (рис. 1). В качестве основного параметра, подлежащего регулировке, обычно выбирается электрохимический потенциал защищаемого сооружения по отношению к грунту. При отсутствии особых условий агрессивности его поддерживают в границах от  $-0,85$  до  $-1,15$  В [1]. Измерения в этом случае проводят, как правило, с использованием медно-сульфатных электродов сравнения.

В соответствии с DIN 30676 [4] необходимыми предпосылками для осуществления качественной электрохимической защиты от коррозии являются:

обеспечение высокой продольной проводимости трубопроводов (отсутствие изолирующих фланцев, устранение в трубопроводе соединений с высоким электрическим сопротивлением и т. д.);

отсутствие контактов с заземленными сооружениями (заземляющие устройства, арматура железобетонных фундаментов, другие подземные металлические сооружения, не подлежащие защите и т. д.);

наличие качественной диэлектрической изоляции.

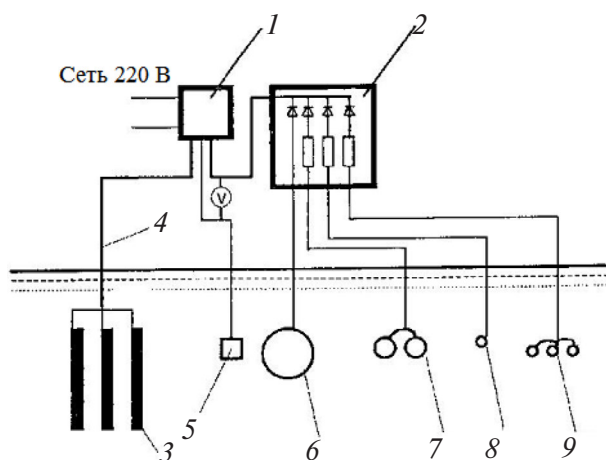


Схема катодной защиты:

1 – катодная станция (преобразователь); 2 – БДР (блок диодно-резисторный); 3 – аноды (контур анодного заземления); 4 – контурный кабель; 5 – электрод сравнения; 6 – водопровод; 7 – теплоноситель; 8 – телефонные кабели; 9 – силовые кабели высокого напряжения

Будем считать, что все эти требования выполнены, и приступим к собственно расчету основных параметров катодной защиты как функции от изменения удельного сопротивления грунта и размеров дефекта в конце защитной зоны трубопровода. Известно, что для этой части ПМС при использовании типовых методик расчета получаются минимальные значения (по абсолютной величине) защитного потенциала.

Основные принципы катодной защиты хорошо изучены, а ее особенности, связанные с различными свойствами диэлектрической изоляции трубопровода, изложены, например, в публикации «Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений» [5]. Для реализации поставленной цели воспользуемся некоторыми данными, полученными в этой работе. Пусть трубопровод характеризуется следующими параметрами: удельное сопротивление материала (стали)  $\rho_s$  равно  $0,18 \cdot 10^{-6}$  Ом·м; наружный диаметр трубопровода  $d = 321$  мм;  $s$  – толщина стенки трубопровода,  $s = 6$  мм. В соответствии со справочником [6] удельный защитный ток  $j_s$  в этом случае, для трубопроводов, проложенных в грунте, изменяется в пределах от  $10^{-5}$  до  $10^{-6}$  А/м<sup>2</sup>. Примем, что в нашем случае он равен  $10^{-5}$  ампер на квадратный метр.

Основываясь на этих данных и типовой методике, представленной, в частности, в работе [5], рассчитаем основные параметры катодной защиты рассматриваемого трубопровода для выбранной величины плотности защитного тока. Для расчета протекторной защиты можно использовать работу «Основные принципы проектирования протекторной защиты подземных металлических сооружений» [7].

#### Определение основных параметров катодной защиты ПМС

Определение величины  $2L$  защитной зоны трубопровода будем проводить по типовой методике по формуле, взятой из справочника [6], при условии, что омическое падение потенциала в его зоне защиты равно 0,3 В:

$$2L = \sqrt{\frac{2,4s}{\rho_s j_s}}, \quad (1)$$

где  $j_s$  – плотность защитного тока;  $\rho_s$  – удельное сопротивление стали;  $s$  – толщина стенки трубопровода.

Расчет будем вести при выбранных значениях плотности защитного тока, удельного сопротивления стали и толщины стенки трубопровода. Получено следующее значение протяженности защитной зоны трубопровода при исходной величине «плотности защитного тока»  $j_s = 10^{-5}$  А/м<sup>2</sup>:  $2L = 89,443$  км.

Для определения величины защитного тока  $I_0$  можно воспользоваться следующей хорошо известной формулой из справочника [6]:

$$I_0 = 2\pi d j_s L, \quad (2)$$

где  $d$  – наружный диаметр трубопровода.

Расчет будем вести при выбранных значениях плотности защитного тока и других параметров, предложенных ранее. Полученное значение  $I_0$  следующее:  $I_0 = 0,902$  А.

Как видно из приведенных результатов расчета, выбранные плотности защитного тока  $j_s$ , А/м<sup>2</sup>, определяют протяженность  $2L$ , км, зоны катодной защиты трубопровода и защитный ток трубопровода  $I_0$ , А. Однако в соответствии с расчетными формулами как зона защиты, так и общий защитный ток не зависят от удельного сопротивления грунта. Фактически, конечно, такая зависимость существует, но она «прячется» в параметре «плотность защитного тока». Рассмотрим, как эта величина определяется и влияет на возможность определения защитного потенциала в конце защитной зоны трубопровода в зависимости от удельного сопротивления грунта (электролит) и размеров дефектов диэлектрического покрытия трубопровода.

#### Оценка влияния на защитный потенциал ПМС в зоне с его минимальным значением удельного электрического сопротивления грунта и размера дефектов диэлектрического покрытия

Исходные данные и основные модельные представления. Первый этап проектирования любой электрохимической защиты – это определение необходимой плотности защитного тока  $j_s$ . Оценить значение этой величины можно либо экспериментально (при наличии уже построенного ПМС), либо теоретически (при проектировании нового подземного металлического сооружения с использованием соответствующих нормативных документов, например инструкции [8]). Очевидно, что затраты на электрохимическую защиту будут снижаться с уменьшением величины защитного тока. Снижения этого параметра добиваются прежде всего путем созда-

ния качественной изоляции ПМС и устранением контактов подземного металлического сооружения с другими металлическими сооружениями, соприкасающимися с грунтом. Кроме того, для трубопроводов уменьшению затрат на электрохимическую защиту способствует увеличение их продольной проводимости. Однако возможность уменьшения величины защитного тока ограничивается требованием безусловного обеспечения защитного потенциала на трубопроводе.

При этом экспериментальное определение величины защитного тока всегда сопровождается измерением поляризационного потенциала ПМС, на величину которого (в соответствии с его определением) омическое падение потенциала в электролите не оказывает никакого влияния. Однако измерение данного параметра всегда сопряжено с исключением омического падения потенциала на дефекте, которое как раз является функцией удельного сопротивления грунта, размера и формы дефекта, толщины покрытия. Похожая проблема возникает и при осуществлении собственно катодной защиты. В этом случае, полагая собственную проводимость диэлектрического покрытия крайне малой по сравнению с проводимостью дефектов (что доказывается, в частности, в работе [9]), для расчета сопротивления дефекта круглой формы можно воспользоваться следующими типовыми соотношениями из справочника [6]:

а) формулой, определяющей поляризационное сопротивление  $R_p$  дефекта,

$$R_p = \frac{r_p}{A}, \quad (3)$$

где  $r_p$  – удельное поляризационное сопротивление металлической поверхности в зоне дефекта покрытия (в соответствии со справочными данными [5]  $r_p = 1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ ;  $A$ , м, – площадь дефекта покрытия;

б) формулой, определяющей сопротивление  $R_D$  покрывного слоя, возникающего на поверхности металла в процессе работы установки катодной защиты,

$$R_D = \frac{r_d}{A}, \quad (4)$$

где  $r_d$  – удельное сопротивление покрывного слоя, возникающего при длительной работе такой установки;

в) формулой для расчета сопротивления грунта  $R_F$  в дефекте круглой формы:

$$R_F = \frac{\rho l}{A}, \quad (5)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление грунта;  $l$  – толщина слоя диэлектрического покрытия трубопровода;

г) формулой для расчета сопротивления растекания  $R_S$  применительно к дефекту круглой формы,

$$R_S = \frac{\rho}{2a}, \quad (6)$$

где  $a$  – диаметр дефекта круглой формы.

Очевидно, что общее сопротивление  $R$  дефекта в этом случае представляет собой сумму поляризационного  $R_p$  и омического  $R_G$  сопротивлений:

$$R = R_p + R_G, \quad (7)$$

где, в свою очередь,  $R_G$  определяет омическое падение потенциала в дефекте и может быть рассчитано с использованием соотношения

$$R_G = R_D + R_F + R_S. \quad (8)$$

Необходимо отметить, что сопротивление  $R_D$  покрывного слоя, образующегося при относительно длительной работе установки катодной защиты, по определению мало зависит от удельного сопротивления грунта. Следовательно, в рамках заявленной темы статьи его можно не рассматривать, полагая, что система находится в состоянии, когда, например, покрывной слой отсутствует. Данная ситуация возможна как при малом времени работы катодной защиты, так и в кислых грунтах, в которых образование покрывного слоя весьма затруднено.

Для определения влияния изменения удельного сопротивления грунта в зоне расположения трубопровода на величину поляризационного защитного потенциала можно воспользоваться следующими модельными представлениями.

Пусть трубопровод имеет диэлектрическое, например полиэтиленовое, покрытие толщиной 5 мм (удельное сопротивление полиэтилена  $\rho_D$  составляет порядка  $10^{18} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ). Лабораторные и практические измерения показывают [9], что при длительном нахождении в грунте удельное сопротивление полиэтилена снижается приблизительно на два – три порядка, т. е. составляет приблизительно  $10^{15} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Обозначим эту величину  $\rho_u$ .

Пусть начиная с точки дренирования тока на трубопроводе равномерно расположены дефекты круглой формы и одинаковых размеров.



Пусть площадь каждого дефекта составляет  $6,25 \text{ см}^2$ , т. е. равняется площади датчика потенциала при измерениях поляризационного потенциала, проводимых в соответствии с рекомендациями ГОСТ 9.602 – 2005 [1].

Основываясь на этих исходных положениях, рассчитаем основные параметры катодной защиты.

**Определение зависимости защитного поляризационного потенциала от удельного электрического сопротивления грунта в зонах трубопровода с минимальным защитным потенциалом**

Выше была рассчитана протяженность защитной зоны трубопровода, равная 89,443 километров. Очевидно, что при отсутствии дефектов общее сопротивление изоляции диэлектрического покрытия трубопровода в этом случае будет выражаться следующей формулой:

$$R_{и} = \rho_{и} \frac{l}{2\pi dL}, \quad (9)$$

где  $l$  – толщина диэлектрического (полиэтиленового) покрытия трубопровода;  $2\pi dL$  – его площадь. Подставим в нее численные значения соответствующих величин, рассчитанные нами ранее, и проведем вычисления; тогда получим, что  $R_{и} = 5,59 \cdot 10^9 \text{ Ом}$ .

Поляризационное сопротивление дефекта  $R_p$  будет определять в зависимости от удельного сопротивления грунта по формуле (3). Подставив в неё указанные нами ранее численные значения соответствующих величин, получим, что поляризационное сопротивление не зависит от сопротивления грунта, т. е. остается постоянным при изменении данного параметра (его значение в соответствии с расчетом составит для одного дефекта выбранных размеров величину  $R_p = 1600 \text{ Ом}$ ). Полученные данные внесем в табл. 1.

Омическое сопротивление  $R_F$  грунта в дефекте в зависимости от удельного электрического сопротивления грунта будем рассчитывать по формуле (5), а сопротивление растекания  $R_S$  дефекта по формуле (6), подставив в эти формулы численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее. Полученные данные внесем в табл. 1.

Омическое падение потенциала в дефекте ( $R_G$ ) будем определять по формуле (8), но учтя,

что по принятым нами условиям сопротивление покрывного слоя, возникающего при длительной работе установки катодной защиты, равно нулю ( $R_D = 0$ ), то есть будет

$$R_G = R_F + R_S. \quad (10)$$

Подставив в формулу (10) численные значения соответствующих величин, проведем вычисления и полученные данные поместим в табл. 1.

Расчет общего сопротивления дефекта  $R$ , включающего как поляризационное сопротивление дефекта, так и его омическую составляющую, будем производить по формуле (7) с учетом численных значений соответствующих величин, полученных нами ранее. Данные также поместим в табл. 1.

**Расчет изменения поляризационного защитного потенциала как функции удельного сопротивления грунта в конце защитной зоны трубопровода** (поляризационный защитный потенциал в этом случае равен  $-0,85 \text{ В}$  при измерениях относительно медно-сульфатного электрода сравнения) произведем при выбранных нами параметрах дефекта. Кроме того, будем считать, что изначально удельное электрическое сопротивление грунта в районе расположения всей защитной зоны трубопровода стремится к нулю. В то же время примем, что в конце зоны защиты оно пошагово меняется от нуля до  $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Величина «шага» составляет  $10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ . Рассчитаем изменение поляризационного потенциала катодной защиты, обусловленное данным обстоятельством, для конца зоны защиты. Как известно [10], для обеспечения поляризационного потенциала требуется защитный ток с плотностью на металлической поверхности  $j_m = 0,3 \text{ А}/\text{м}^2$ , что в соответствии с критерием NACE [6] обеспечивает одинаковое падение потенциала на поляризационном и омическом сопротивлениях, равное  $-0,3 \text{ В}$ . Следовательно, общее падение потенциала на дефекте в этом случае составит  $-0,6 \text{ В}$ . Однако, поскольку мы приняли, что удельное сопротивление грунта стремится к нулю, необходимо также принять, что в этом случае и омическое сопротивление дефекта будет стремиться к нулю, а это повлечет за собой равенство общего и поляризационного потенциалов на дефекте. В свою очередь, рост сопротивления грунта для выбранной формы и размеров дефекта приведет к перераспределению общего падения потенциала на дефекте, который равен

–0,3 В между поляризационными и омическими составляющими данного сопротивления. Таким образом, с ростом сопротивления грунта на дефекте будет наблюдаться повышение поляризационного потенциала (снижение его абсолютной величины), что обусловлено последовательным включением поляризационного и омического сопротивлений в дефекте при постоянстве общего потенциала сооружения относительно грунта (электролит). Следовательно, поляризационный потенциал  $U_p$  в этом случае будет определяться следующим соотношением:

$$U_p = \frac{U_p^0 R_p}{R_p + R_G}, \quad (11)$$

где  $U_p^0$  – исходный поляризационный потенциал, равный в нашем случае –0,3 В.

Подставим в формулу (11) указанные нами ранее численные значения соответствующих величин и проведем вычисления. Результат поместим в табл. 1.

Произведем также расчет изменения поляризационного защитного потенциала, но для случая, когда удельное сопротивление грунта в районе расположения трубопровода имеет некоторое постоянное значение, отличное от нуля (изменения удельного сопротивления грунта происходят только в конце защитной зоны трубопровода). Для иллюстрации возможного по-

вышения или снижения защитного потенциала и воспроизведения более реалистичного сценария катодной защиты воспользуемся критерием NACE [6], в соответствии с которым общее падение потенциала на дефекте равномерно распределяется на поляризационном и омическом сопротивлениях. Учитывая, что в этом случае плотность поляризационного тока через дефект  $j_m = 0,3 \text{ А/м}^2$ , рассчитаем соответствующий ему общий ток, протекающий через дефект при выбранных его геометрических параметрах. Очевидно, что согласно с законом Ома падение потенциала на омическом сопротивлении  $R_G$  определяемое в соответствии с формулой (10), составит

$$R_G^0 = \frac{U_G^0}{I_G^0}, \quad (12)$$

где  $U_G^0$  – исходное падение напряжения на омическом сопротивлении дефекта, равное в нашем случае 0,3 В, а  $I_G^0$  – исходная величина тока, текущего через дефект, при его защитной плотности на голой поверхности металла  $j_m = 0,3 \text{ А/м}^2$ . Очевидно, что  $I_G^0$  можно рассчитать по следующей формуле:

$$I_G^0 = A j_m. \quad (13)$$

Подстановка приведенных нами ранее значений площади  $A$  дефекта и плотности тока  $j_m$  приводит к величине  $I_G^0 = 1,875 \cdot 10^{-4} \text{ А}$ , что, в

Таблица 1

**Технические параметры катодной защиты трубопровода, определяемые при различных величинах удельного электрического сопротивления грунта в зоне расположения ПМС**

$\rho$ , Ом·м	$R_p$ , кОм	$R_f$ , кОм	$R_s$ , кОм	$R_G$ , кОм	$R$ , кОм	$U_{p,0}$ , В	$U_{p,62}$ , В
0	1,60	0	0	0	1,600	-0,3	-0,6
10	1,60	0,08	0,177	0,257	1,857	-0,26	-0,52
20	1,60	0,160	0,355	0,515	2,115	-0,23	-0,45
30	1,60	0,240	0,532	0,772	2,372	-0,20	-0,40
40	1,60	0,320	0,709	1,029	2,629	-0,18	-0,37
50	1,60	0,400	0,887	1,287	2,887	-0,17	-0,33
60	1,60	0,480	1,063	1,544	3,144	-0,15	-0,31
70	1,60	0,560	1,240	1,801	3,401	-0,14	-0,28
80	1,60	0,640	1,418	2,038	3,638	-0,13	-0,26
90	1,60	0,720	1,596	2,316	3,916	-0,12	-0,25
100	1,60	0,800	1,773	2,573	4,173	-0,11	-0,23

Таблица 2

**Изменение поляризационного потенциала катодной защиты трубопровода, определяемое при различных величинах диаметра дефекта изоляции**

$a \cdot 10^{-2}$ , м	$R_p$ , кОм	$R_s$ , кОм	$R_s$ , кОм	$R_G$ , кОм	$R$ , кОм	$U_{p,a}$ , В
$2,82 \cdot 10^{-4}$	16000	4981	110	5091	21091	-0,45
$2,82 \cdot 10^{-3}$	160,0	49,8	11,2	61,0	221,0	-0,43
$2,82 \cdot 10^{-2}$	1,6	0,498	1,102	1,6	3,2	-0,30
$2,82 \cdot 10^{-1}$	0,016	0,005	0,110	0,115	0,131	-0,07

свою очередь, позволяет установить значение величины  $R_G^0 = 1600$  Ом. Основываясь на формулах (5), (6) и (10), можно записать для конкретного значения  $\rho_G^0$  удельного сопротивления грунта в зоне дефекта, которое соответствует  $R_G = R_G^0$ , и выбранной нами геометрии дефекта следующее выражение:

$$\rho_G^0 = \frac{R_G^0}{\frac{l}{A} + \frac{1}{2a}}. \quad (14)$$

Подстановка в уравнение (14) численных значений величин, входящих в него, позволят определить, что  $\rho_G^0 = 62,26$  Ом·м. Примем, что рассматриваемый трубопровод окружен грунтом с данным значением удельного сопротивления, и проследим за изменением поляризационного потенциала  $U_{p,62}$  при пошаговом изменении удельного сопротивления грунта в конце защитной зоны трубопровода. Расчет будем вести по модернизированной формуле (11) с учетом внешних изменений:

$$U_{p,62} = \frac{U_{\text{cin}} R_p}{R_p + R_G}, \quad (11, a)$$

где  $U_{\text{cin}}$  – потенциал трубопровода, включающий как омическую, так и поляризационную составляющие. В нашем случае по условиям задачи его величина равна  $-0,6$  В.

Подставим в формулу (11, a) численные значения соответствующих величин, указанные нами ранее, проведем вычисления и результат поместим в табл. 1.

**Определение зависимости защитного поляризационного потенциала от размеров дефектов покрытия в зонах трубопровода с минимальным защитным потенциалом.** Расчет изменения поляризационного защитного потенциала в

конце защитной зоны как функции размеров дефекта (поляризационный защитный потенциал в этом случае равен  $-0,85$  В при измерениях относительно медно-сульфатного электрода сравнения) будем производить при некотором среднем значении удельного сопротивления грунта. Примем, как и ранее, что удельное сопротивление грунта в районе дефекта  $\rho = 62,26$  Ом·м. и проследим за изменением поляризационного потенциала трубопровода при изменении диаметра  $a$  дефекта круглой формы. Для этого воспользуемся соотношениями (3), (5), (6), (10) и (11, a). Подставим в соотношение (11, a) численные значения входящих в него величин, учитывая изменение диаметра дефекта, а полученные результаты, в том числе и поляризационный потенциал  $U_{p,a}$ , представим в табличной форме (табл. 2).

**Обсуждение результатов и выводы**

Анализ двух нижних строк табл. 1 показывает устойчивую тенденцию к уменьшению по абсолютной величине поляризационного потенциала при защите подземных (подводных) трубопроводов с ростом удельного сопротивления грунта (электролита) относительно его средних значений в зоне расположения трубопровода. Более того, сопоставление двух последних строк показывает, что данная тенденция наиболее ярко выражена при малых значениях среднего удельного электрического сопротивления грунта в зоне защиты трубопровода. Очевидно, что наибольшую опасность данное явление представляет в зонах с минимальным значением защитного потенциала ПМС.

В то же время данные нижней строки табл. 2 демонстрируют устойчивую тенденцию уменьшения по абсолютной величине поляризационно-

го потенциала при защите подземных (подводных) трубопроводов при росте размеров дефекта, что может привести к недопустимо низким величинам потенциала.

Очевидно, что совпадение этих двух факторов угрожает существенными нарушениями функционирования катодной защиты. Это требует разработки комплекса мероприятий по предотвращению данных негативных явлений. Среди этих мероприятий можно выделить следующие:

постоянный мониторинг состояния изоляции ПМС как в процессе строительства, так и в процессе их эксплуатации с уделением особого внимания зонам с повышенным удельным электрическим сопротивлением грунта и проведение незамедлительных ремонтных работ в случае обнаружения дефектов изоляции;

выбор расположения точки дренирования защитного тока в трубопровод (при наличии таковой возможности) в зонах с повышенным удельным сопротивлением грунта и пониженным качеством изоляции;

сокращение защитной зоны трубопровода (при надлежащем экономическом обосновании) с целью повышения по абсолютной величине поляризационного защитного потенциала в зонах с его минимальным расчетным значением.

### Выводы

Рассмотрено влияние удельного сопротивления грунта и размеров дефекта в зоне минимальных значений защитного потенциала трубопровода на защищенность его от коррозии в соответствии с требованиями ГОСТ 9.602 – 2005.

Показано, что с ростом удельного электрического сопротивления грунта и размеров дефектов наблюдается устойчивая тенденция к снижению поляризационного защитного потенциала ПМС.

Отмечено, что наибольшую опасность это явление имеет в зонах с минимальным значением защитного поляризационного потенциала.

Предложен комплекс мероприятий, снижающий потенциальные риски ненадлежащей катодной защиты ПМС.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 9.602 – 2005.** Единая система защиты от коррозии и старения; Сооружения подземные; Общие требования к защите от коррозии. М.: Стандартинформ, 2006.
2. **ГОСТ Р 51164 – 98.** Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. М.: Госстандарт России, 1998.
3. **Bette U., Vesper W.** Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. – Essen: Vulkan-Verl, 2005. 367 s.
4. **DIN 30 676.** Planung und Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes für den Außenschütz.
5. **Киселёв В.Г.** Основные принципы проектирования катодной защиты подземных металлических сооружений // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2011. № 4 (135). С. 111–116.
6. **Von Baeckmann W.** Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz. Vulkan-Verlag Essen, 1996. 339 s.
7. **Киселёв В. Г.** Основные принципы проектирования протекторной защиты подземных металлических сооружений // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2011. № 3 (130). С. 75–80.
8. **РД 153-39.4-091-01** Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии. СПб.: Издательство ДЕАН, 2002.
9. **Baekmann W., Schwenk W.** Handbuch des katodischen Korrosionsschutzes. Verlag Chemie. 1980. 465 S.
10. **Киселёв В. Г.** Современные тенденции развития техники измерения потенциалов подземных металлических сооружений // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. 2012. № 2(147). Т. 2. С. 265–273.

### REFERENCES

1. **GOST 9.602 – 2005** Yedinaya sistema zashchity ot korrozii i stareniya; Sooruzheniya podzemnyye; Obshchiye trebovaniya k zashchite ot korrozii. [ALL-UNION STATE STAN. United system for corrosion protection and aging; Construction are underground; General requirements for the corrosion protection. 9.602 – 2005]. М.: Standartinform, 2006. (rus.)
2. **GOST R 51164 – 98.** Truboprovody stalnyye magistralnyye. Obshchiye trebovaniya k zashchite ot korrozii [ALL-UNION STATE STAN. R 51164 – 98. Conduits are steel main. General requirements for the corrosion protection. Moscow, the RF State Committee on Standardization, Metrology, and Certification]. М.: Gosstandart Rossii, 1998. (rus.)



3. **Bette U, Vesper W.** Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz Paperback for the cathodic corrosion protection. Essen: Vulkan-Verl, 2005. 367 s.

4. **DIN 30 676.** Planung und Anwendung des kathodischen Korrosionsschutzes für den Außenschutz [DIN 30,676. Planning and application of the cathodic corrosion protection for the external contactor].

5. **Kiselev V.G.** Osnovnyye printsipy proyektirovaniya katodnoy zashchity podzemnykh metallicheskih sooruzheniy [Basic principles of the design of the cathode protection of the underground metallic construction]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPb GPU.* 2011. № 4 (135) S. 111–116. (rus)

6. **Von Baeckmann W.** Taschenbuch für den kathodischen Korrosionsschutz [Paperback for the cathodic corrosion protection]. Vulkan-Verlag Essen. 1996. 339 s.

7. **Kiselev V.G.** Osnovnyye printsipy proyektirovaniya protektornoy zashchity podzemnykh metallicheskih

sooruzheniy [Basic principles of the design of the protector protection of the underground metallic construction]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPbGPU.* 2011. № 3 (130). S. 75–80. (rus.)

8. **RD 153-39.4-091-01** Instruksiya po zashchite gorodskikh podzemnykh truboprovodov ot korrozii [Rd 153-39.4-091-01 instruction on the protection of urban underground conduits from the corrosion.]. Sankt-Peterburg; Izdatelstvo DEAN, 2002. (rus)

9. **Von Baeckmann W., Schwenk W.** Handbuch des kathodischen Korrosionsschutzes [Manual of the cathodic corrosion protection]. Verlag Chemie. 1980. 465 s.

10. **Kiselev V.G.** Sovremennyye tendentsii razvitiya tekhniki izmereniya potentsialov podzemnykh metallicheskih sooruzheniy [Contemporary tendencies of the development of technology of potential measurement of underground metallic construction the text]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti SPb GPU.* 2012. № 2 (147). S. 265–273. (rus)

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

**КИСЕЛЕВ Владимир Геннадьевич** – доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: kis\_vg@mail.ru

**KISELEV Vladimir G.** – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: kis\_vg@mail.ru