

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-475-487>

УДК 621.316.99

Способ внесения смесей для оптимизации заземления при монтаже вертикальных составных заземлителей

И. А. Павлович¹⁾, С. М. Барайшук¹⁾, М. Муродов²⁾, М. Набиев²⁾

¹⁾УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»
(Минск, Республика Беларусь),

²⁾Наманганский инженерно-строительный институт (Наманган, Республика Узбекистан)

Реферат. В статье рассмотрен способ применения смесей для оптимизации электрофизических параметров заземляющих устройств совместно с вертикальными составными заземлителями. Установлено, что колебания удельного сопротивления грунта, вызванные изменениями погодных-климатических условий, могут привести к нестабильности сопротивления контура заземления. Исследование показывает, что без соответствующих мер сопротивление контура в результате сезонных изменений свойств грунтов может превысить допустимые значения. Это чревато отклонениями сопротивления растеканию тока заземляющих устройств вне пределов допустимых параметров. Для компенсации этих колебаний предлагается способ уменьшения коэффициента сезонности. Снижение сезонности играет важную роль при обеспечении безопасности обслуживающего персонала и сельскохозяйственных животных путем поддержания сопротивления заземляющего устройства в пределах нормативно установленных значений. Обсуждаются методы искусственного уменьшения сопротивления контура заземления, включая увеличение его размеров и использование глубоких заземлителей. Приведены результаты вертикального электродного зондирования грунта в местах заложения заземлителей, показано влияние влажности на удельное сопротивление грунта, рассмотрено влияние слоистости грунта и наличия влагонасыщенных слоев грунта. Предложены способ, позволяющий вносить смесь совместно с вертикальным составным заземлителем, конструкции муфты, наконечника и вспомогательного устройства, проведены экспериментальные исследования предложенных конструкций и представлены результаты измерения сопротивления растеканию тока такого заземлителя как со стандартными, так и с предложенными муфтами. Проведено сравнение с заземлителем без применения смесей. Результаты измерений демонстрируют, что с увеличением длины заземлителя, его диаметра и объема вводимой смеси сопротивление снижается. Показано, что предложенное решение позволяет снизить сезонность в 1,64–2,1 раза в зависимости от применяемых муфт и получить заземлитель с эквивалентным диаметром в десятки раз большим, чем диаметр составного заземлителя. Авторы предлагают использование грунтозамещающих смесей для снижения удельного сопротивления грунта и обеспечения стабильности контура заземления в течение всего срока эксплуатации. Предложенный метод внесения смесей без

Адрес для переписки

Барайшук Сергей Михайлович
УО «Белорусский государственный аграрный
технический университет»
просп. Независимости, 99,
223023, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 29 775-76-37
bear_s@rambler.ru

Address for correspondence

Baraishuk Siarhei M.
Belarusian State Agrarian
Technical University
99, Nezavisimosty Ave.,
223023, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 29 775-76-37
bear_s@rambler.ru

предварительного бурения позволяет снизить затраты на строительство заземляющих устройств.

Ключевые слова: безопасность персонала, сопротивление заземления, нормативные значения, удельное сопротивление грунта, климатические условия, коэффициент сезонности, заземляющие электроды, глубинные заземлители, влажность грунта, температурные изменения, многослойность грунта, подземные воды, грунтозамещающие смеси, гидрогель, графит, глина, эксплуатационная стабильность, снижение затрат, бурение скважин, электропроводность грунта, вертикальное электродное зондирование

Для цитирования: Способ внесения смесей для оптимизации заземления при монтаже вертикальных составных заземлителей / И. А. Павлович [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2024. Т. 67, № 6. С. 475–487. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-475-487>

A Method of Applying Mixtures to Optimize Grounding during Installation of Vertical Composite Grounding Devices

I. A. Pavlovich¹⁾, S. M. Baraishuk¹⁾, M. Murodov²⁾, M. Nabiev²⁾

¹⁾Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Namangan Engineering-Construction Institute (Namangan, Republic of Uzbekistan)

Abstract. The article considers the method of using mixtures to optimize the electrophysical parameters of grounding devices in conjunction with vertical composite grounding conductors. It has been found that fluctuations in soil resistivity caused by changes in weather and climatic conditions can lead to instability of the ground loop resistance. The study shown that without appropriate measures, the resistance of the loop as a result of seasonal changes in soil properties may exceed acceptable values. This is fraught with deviations in the resistance to current spreading of grounding devices beyond the limits of acceptable parameters. To compensate for these fluctuations, a method is proposed to reduce the seasonality factor. Reducing seasonality plays an important role in ensuring the safety of service personnel and farm animals by maintaining the resistance of the grounding device within the limits of regulatory values. The authors discuss methods for artificially reducing the resistance of the ground loop, including increasing its size and using deep ground electrodes. The results of vertical electrode probing of the soil at the sites of grounding conductors are presented, the effect of humidity on the resistivity of the soil is shown, the influence of soil layering and the presence of moisture-saturated soil layers is considered. A method is proposed that allows the mixture to be introduced together with a vertical composite grounding device, the design of the coupling, tip and auxiliary device, experimental studies of the proposed designs are carried out and the results of measuring the current spreading resistance of such a grounding device with both standard and proposed couplings are presented. A comparison was made with a grounding device without the use of mixtures. The measurement results demonstrate that with an increase in the length of the grounding device, its diameter and the volume of the injected mixture, the resistance decreases. It is shown that the proposed solution makes it possible to reduce seasonality by 1.64–2.1 times, depending on the couplings used, and to obtain a grounding conductor with an equivalent diameter dozens of times larger than the diameter of a composite grounding conductor. The authors propose the use of soil-replacing mixtures to reduce soil resistivity and ensure the stability of the grounding loop throughout the entire service life. The proposed method of applying mixtures without pre-drilling makes it possible to reduce the cost of constructing grounding devices.

Keywords: personnel safety, grounding resistance, standard values, soil resistivity, climatic conditions, seasonality factor, grounding electrodes, deep grounding devices, soil moisture, temperature changes, multilayered soil, groundwater, soil-substituting mixtures, hydrogel, graphite, clay, operational stability, cost reduction, well drilling, soil electrical conductivity, vertical electrode probing

For citation: Pavlovich I. A., Baraishuk S. M., Murodov M., Nabiev M. (2024) A Method of Applying Mixtures to Optimize Grounding during Installation of Vertical Composite Grounding Devices. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 67 (6), 475–487. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-6-475-487> (in Russian)

Введение

Для обеспечения безопасности обслуживающего персонала, а также сельскохозяйственных животных необходимо, чтобы сопротивление заземляющего устройства было в пределах нормы, установленной в действующей нормативно-правовой документации. Из-за изменений погодноклиматических условий происходят колебания удельного сопротивления грунта, что в свою очередь ведет к нестабильности значений сопротивления контура заземления. Эти колебания должны быть компенсированы использованием при расчете так называемого коэффициента сезонности K_c , который фактически показывает диапазон изменений сопротивления одного и того же контура заземления в зависимости от состояния грунта (влажность, температура, изменение уровня грунтовых вод и т. п.). Существует вероятность того, что сопротивление контура заземления на конкретном объекте в какой-то промежуток времени будет выше, чем допустимое расчетное значение, что может привести к необратимым последствиям, таким как поражение электрическим током людей и животных [1], а также возможному повреждению дорогостоящего оборудования [2, 3]. Чтобы этого избежать, приходится искусственно уменьшать сопротивление контура, увеличивая его размеры так, чтобы влияние изменения климатических режимов на сопротивление грунта непосредственно в околоэлектродном пространстве контура заземления не вызвало увеличения сопротивления выше нормируемых значений.

Удельное сопротивление грунта зависит от многих факторов, таких как содержание влаги в почве, тип почвы, плотность и количество слоев [4]. Из них необходимо выделить температуру и содержание влаги, так как они непосредственно зависят от климатических условий в данной местности. Из исследований, проведенных ранее, видно, что удельное сопротивление грунта на глубине 0,3 м при температуре от 0 до -10 °C увеличивается в 10 раз, а на глубине 0,5 м – в 3 раза [5]. Для того чтобы снизить влияние температуры, обычно используются вертикальные глубинные заземлители длиной более 10 м. Похожим решением является использование электродов, опущенных в скважины на большую глубину и заполненных проводящим грунтом (коксовая мелочь, бетон и пр.). Глубинные заземления являются предпочтительными в тех случаях, когда грунт на значительной глубине обладает хорошей проводимостью, например, если они достигают водонапитанного слоя. Наиболее простое и распространенное решение – выполнить такой заземлитель в виде однородных длинных стержней, соединенных муфтами. Заглубление производится, применяя различные методы, такие как ввинчивание, забивка, бурение и т. д. Такое решение в целом обеспечивает более надежное заземление и улучшает защиту от перенапряжений и токов утечки.

В работе [6] рассматриваются вопросы о том, что, возрастание глубины в арифметической прогрессии приводит к уменьшению амплитуды температуры в геометрической прогрессии.

При проектировании заземляющего устройства часто не берут в расчет структуру грунта, считая, что он однослойный, а также не учитывают влияние подземных вод. В [5] авторами проведены измерения сопротивления заземлителя в зависимости от его длины. Авторы делают вывод о том, что с ростом длины сопротивление снижается.

Особенность строения почвы, в которой содержатся грунтовые воды, обусловлена ее пористостью, влагоемкостью и капиллярными свойствами. В работе [4] сказано, что «при изменении объема твердой части грунта меняется доля порового объема, заполненного водой, а сам объем грунта не меняется». Глубины залегания грунтовых вод различаются в зависимости от конкретного местоположения, типа грунта и других факторов. Это означает, что даже при использовании глубинных электродов для заземления не всегда возможно обеспечить одинаковый уровень влажности на всей протяженности электрода. Таким образом, при обустройстве заземляющего устройства необходимо учитывать особенности местности и грунта для обеспечения наилучшего контакта электрода с землей.

Как показано ранее [6–9], для того чтобы снизить удельное сопротивление грунта в месте залегания заземляющих электродов, можно использовать различные грунтозамещающие смеси, которые позволяют более надежно удерживать влагу в околоэлектродном пространстве при помощи гидрогеля, а также, имея в своем составе графит и глину, снизить общее сопротивление грунта.

Такие смеси совместно с глубинными одиночными заземлителями, как правило, применяются с предварительным бурением лунки под заземлитель и смесь [10, 11]. При таком способе получается распределить данную композиционную смесь по всей длине глубинного заземлителя, что позволит снизить общее сопротивление контура заземления и поддерживать его стабильное значение в течение всего срока эксплуатации. Однако это ведет к удорожанию работ по строительству. Для того чтобы снизить эти затраты, нами предложен способ внесения данных смесей без предварительного бурения лунки под электрод.

Экспериментальная часть

Для проведения эксперимента по определению возможности монтажа глубинных заземлителей без предварительного бурения нами разработаны наконечники и соединительная муфта, имеющие специальную форму и большой диаметр, для того чтобы равномерно распределить грунтозамещающую смесь во всем приэлектродном пространстве без использования бура.

Монтаж осуществляется следующим способом. В соответствии с рекомендациями [7] вынимается грунт до уровня минус 0,5–0,7 м, после чего устанавливается монтажная воронка узким концом к грунту, как показано на рис. 1. Собирается стартовый стержень глубинного заземлителя, на который устанавливается наконечник (рис. 2), аналогичный применяемым для систем горизонтального прокола грунта [12, 13].

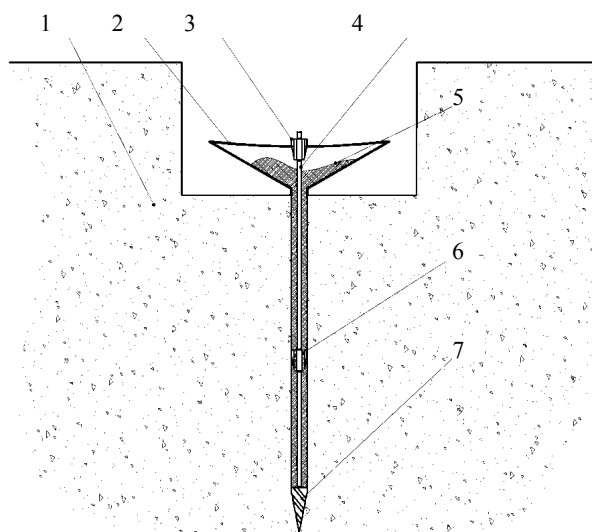


Рис. 1. Способ монтажа глубинного заземлителя с использованием грунтозамещающей смеси: 1 – грунт; 2 – воронка; 3 – соединительная муфта; 4 – составной электрод; 5 – грунтозамещающая смесь; 6 – проточки на муфте; 7 – наконечник

Fig. 1. Method of installing a deep ground device using a soil-substituting mixture: 1 – soil; 2 – funnel; 3 – coupling; 4 – composite electrode; 5 – soil-substituting mixture; 6 – grooves on the coupling; 7 – tip

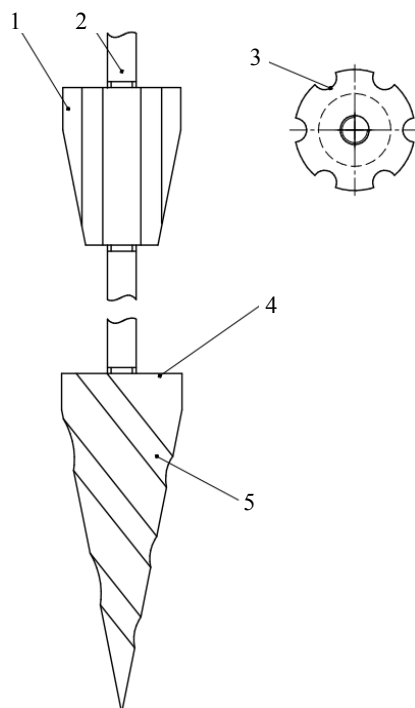


Рис. 2. Внешний вид наконечника и муфты: 1 – муфта; 2 – составной заземлитель; 3 – проточки на муфте; 4 – наконечник; 5 – проточки на наконечнике

Fig. 2. Appearance of the tip and coupling: 1 – coupling; 2 – composite ground device; 3 – grooves on the coupling; 4 – tip; 5 – grooves on the tip

Диаметр такого наконечника соответствует диаметру нижней части воронки. После этого воронка заполняется переувлажненной смесью [7, 8] и начинается монтаж электродов в грунт при помощи обратного молотка либо другого ударного инструмента. После погружения первого электрода в грунт устанавливается муфта, имеющая или продольные пазы, или отверстия, позволяющие продавить через них смесь, и сверху монтируется следующий электрод. При применении такой схемы несколько увеличивается механическое сопротивление грунта и требуемые усилия на забивку составного заземлителя, однако это позволяет сформировать вокруг тела заземлителя значительный объем смеси, которая имеет намного меньшее удельное электрическое сопротивление, чем основной грунт. Кроме того, смесь содержит гидрогели, которые в рабочем состоянии позволяют выравнивать влажность грунта вдоль тела электрода, обладая транспортными функциями для влаги [14]. При достижении таким заземлителем водонасыщенных слоев грунта влага адсорбируется гидрогелем и за счет транспортной функции распределяется вдоль тела электрода, а из-за наличия специальных проточек на муфте происходит перенос влаги и через муфту, что позволяет распределить ее вдоль всего тела заземлителя.

Перед монтажом глубинных заземлителей были проведены измерения удельного электрического сопротивления грунта в местах их установки, используя метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) (рис. 3). ВЭЗ представляет собой метод исследования строения и свойств грунтовых и горных пород путем определения электрической проводимости грунта в вертикальном направлении, позволяющий определить кажущееся сопротивление. Принцип ВЭЗ заключается во взаимодействии переменного электрического поля, создаваемого между электродами, с грунтом, который обладает разной электрической проводимостью в зависимости от своих физических и химических свойств [15]. Такой метод позволяет определить сопротивление не только в точке измерений, но и в некоторой воображаемой точке. Вблизи такой точки в грунт забивают два измерительных электрода (их называют приемными).

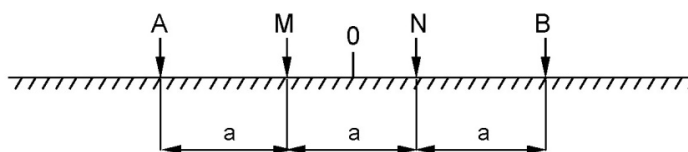


Рис. 3. Метод вертикального электрического зондирования

Fig. 3. Vertical electrical probing method

Для измерения разности потенциалов между двумя точками в грунте использовалась установка, состоящая из:

- измерителя сопротивления заземления BelMRU-1;
- двух измерительных электродов (М и N);
- двух питающих (А и В).

Электрический ток, протекающий через питающие электроды, претерпевает потери в породе из-за ее сопротивления, и эта величина влияет на потенциал, измеряемый между электродами М и N. После проведения исследований с использованием оборудования, отвечающего известным требованиям [16], проводится математическая интерпретация результатов, которая позволяет оценить наличие слоев с разными свойствами, структуру и электрическое сопротивление грунта на разных глубинах и соответственно определить оптимальную глубину заложения вертикального составного глубинного заземлителя. Кроме того, данный метод позволяет косвенно предположить глубину залегания и засоленность подземных вод [16]. Результаты проведения ВЭЗ представлены на рис. 4.

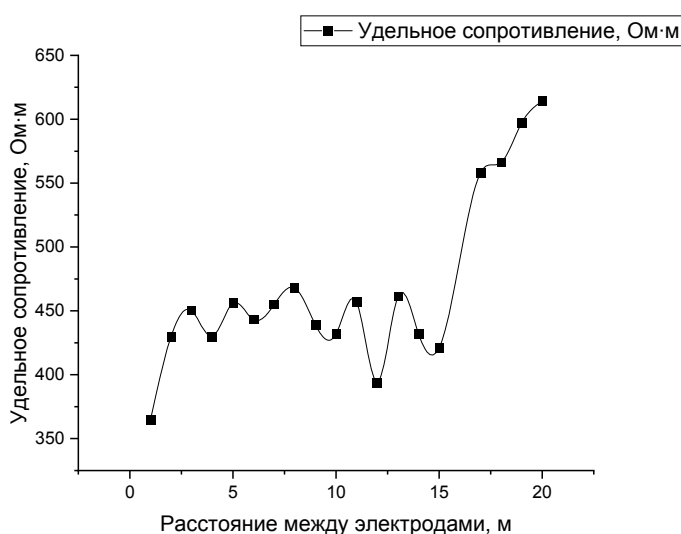


Рис. 4. Результаты вертикального электрического зондирования

Fig. 4. Results of vertical electrical probing

Из графика видно, что с увеличением расстояния между измерительными электродами, а следовательно, и глубины зондирования сопротивление повышается, что подтверждает разнородность почвы в местах монтажа. Полученные данные ВЭЗ позволяют предположить, что оптимальная длина глубинного заземлителя должна быть 11 м.

При проведении натурного эксперимента были смонтированы: контрольный глубинный заземлитель, изготовленный из стандартных составных стержневых заземлителей и муфт заводского исполнения, поставляемых в комплекте; аналогичный по конструкции заземлитель, при монтаже которого была использована смесь; экспериментальный заземлитель, при монтаже которого были использованы разработанные нами муфты и накопник, представленные на рис. 2, и также использовалась смесь для оптимизации электрофизических параметров заземляющих устройств [8-10].

После монтажа данных контуров каждые несколько недель в течение года проводились измерения сопротивления. Графики представлены на рис. 5.

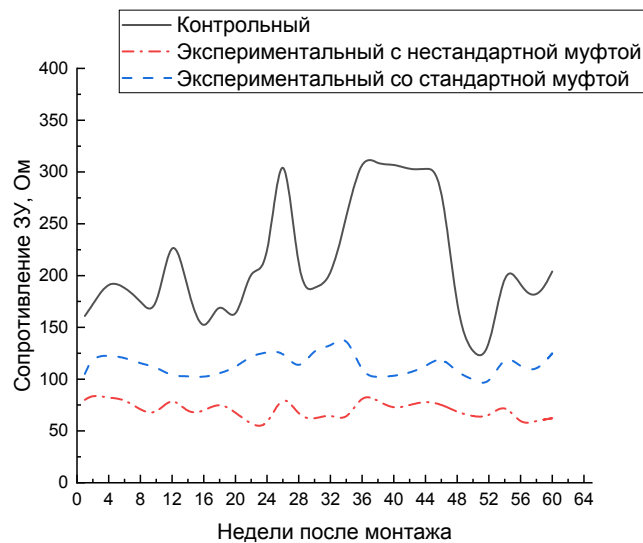


Рис. 5. Годовые изменения сопротивления контрольного, экспериментального с нестандартной муфтой и экспериментального со стандартной муфтой глубинного электродов

Fig. 5. Annual changes in the resistance of the control deep electrode, experimental deep electrode with a non-standard coupling, and experimental deep electrode with a standard coupling

Интерпретация результатов

Из полученных зависимостей видно, что сопротивление экспериментальных заземляющих устройств значительно ниже, чем контрольного заземлителя. Причем для разработанных муфт это сопротивление заметно ниже, чем со стандартными муфтами, что обусловлено большим объемом смеси вокруг тела электрода. Кроме того, по графику видно, что для стандартных муфт сезонность снижается примерно в 1,64 раза, а для разработанных – в 2,1. Это можно объяснить намного лучшим распределением состава смеси вдоль всего заземлителя. Такое распределение вызывает не только снижение сопротивления, но и за счет капиллярного эффекта гидрогеля (транспортных функций) [18] поднимает влагу, подтягивая ее с глубины и распределяя по всей длине заземлителя.

Для подтверждения экспериментальных данных проведено математическое моделирование сопротивлений данных контуров с использованием методики, предложенной в [19].

Расчет сопротивления растеканию тока глубинного заземлителя проведен без учета смеси, с использованием рекомендованного в нормативной документации [20] коэффициента сезонности для Минской области. Согласно выражению, представленному в [17], получим

$$R_B = \frac{\rho r}{2\pi l_B} \cdot \left(\ln \frac{2l_B}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4t + l_B}{4t - l_B} \right) (\text{Ом}), \quad (1)$$

где t – глубина заложения вертикального электрода (считается расстояние от поверхности земли до середины электрода, м; l_B – длина вертикального глубинного заземлителя, м; d – диаметр заземлителя, мм; ρ – удельное

сопротивление грунта в месте монтажа, Ом·м; φ – коэффициент сезонности [19].

Согласно измерениям, удельное сопротивление грунта составляет 526 Ом·м, подставив в выражение величины получим

$$R_B = \frac{2,4 \cdot 526}{2\pi \cdot 11} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 11}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 6 + 11}{4 \cdot 6 - 11} \right) = 146,4 \text{ (Ом)}.$$

Это значение близко к реальной величине (156,4 Ом) сопротивления контура заземления, полученной экспериментальным путем.

Используя выражения из [19–21], произведем расчет сопротивления глубинного заземлителя при использовании грунтозамещающей смеси для оптимизации электрофизических параметров заземляющего устройства

$$R_B = \varphi \cdot \rho_{\text{экв}} \frac{1}{2\pi l_B} \left(\ln \frac{2l_B}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t + l_B}{4t - l_B} \right),$$

где φ – экспериментальный коэффициент сезонности для смеси; $\rho_{\text{экв}}$ – удельное сопротивление грунта в месте заложения, рассчитанное по формуле, Ом·м,

$$\rho_{\text{экв}} = \rho_3 \cdot 0,98^{\frac{d_{\text{смеси}}}{d_3}} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{смеси}}}{\rho_3} \right)^{\frac{1}{3\pi}}, \quad (3)$$

ρ_3 – удельное сопротивление земли (грунта), Ом·м; $d_{\text{смеси}}$ – эквивалентный диаметр заземлителя и смеси, м; d_3 – диаметр заземлителя, м; $\rho_{\text{смеси}}$ – удельное сопротивление смеси, Ом·м,

$$\left(d_{\text{смеси}} = \sqrt{\frac{V_{\text{смеси}}}{l}} \right), \quad (4)$$

$V_{\text{смеси}}$ – объем вносимой смеси, м³; l – длина заземлителя (электрода),

$$d_{\text{смеси}} = \sqrt{\frac{0,02}{3}} + 0,012 = 0,082 + 0,012 = 0,094 \text{ м};$$

$$\rho_{\text{экв}} = 526 \cdot 0,98^{\frac{0,1}{0,012}} \cdot \left(\frac{50}{526} \right)^{\left(\frac{1}{3\pi} \right)} = 349,75 \text{ (Ом·м)};$$

$$R_B = 1,64 \cdot 349,75 \frac{1}{2\pi \cdot 11} \left(\ln \frac{2 \cdot 11}{0,012} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 6 + 11}{4 \cdot 6 - 11} \right) = 66,5 \text{ (Ом)}.$$

Полученное значение близко к экспериментальным данным, равным 70,7 Ом.

Методом обратного моделирования проведен расчет «мнимого» диаметра заземлителя при использовании грунтозамещающей смеси. Расчет показывает эффективность применения данной смеси совместно с заземлителем. Для этого из формулы (1) выразим значение d

$$d = \frac{2l_B}{e^{\left(\frac{R_B - \frac{\varphi p}{2\pi l_B} \ln \frac{4t+l_B}{4t-l_B}}{\frac{\varphi p}{2\pi l_B}} \right)}}.$$

Подставим в это выражение значение R_B , полученное при расчете формулы (2):

– для стандартной муфты

$$d = 0,07 \text{ м};$$

– для предлагаемой муфты

$$d = 0,94 \text{ м}.$$

Проведенный обратный расчет мнимого диаметра заземлителя показал, что при использовании данной смеси совместно с глубинным заземлителем увеличился мнимый диаметр электрода. Для стандартных муфт он составляет 0,07 м, для внедряемой 0,94 м.

Такой результат показывает, что гидрогель позволяет аккумулировать влагу вокруг электрода и повышает эффективность применения смесей для оптимизации заземления, в состав которых он входит. Подтверждение данной теории можно найти в работах [18, 22, 23], где показано что, применение гидрогеля способно увеличивать в 1,5–2 раза равновесный запас доступной влаги в почве. Кроме того, полученные результаты указывают на возможность эффективного использования вертикальных составных электродов совместно со смесями, что позволяет значительно улучшить электрофизические параметры заземляющих устройств.

ВЫВОДЫ

1. Полученные результаты показывают перспективность использования смесей для оптимизации электрофизических параметров заземляющих устройств. Гидрогель, входящий в состав смеси, благодаря своим транспортным и капиллярным свойствам распределяет влагу из более глубоких слоев почвы и удерживает ее вокруг всего тела заземлителя.

2. Применение специальной муфты позволяет обеспечить переток влаги между отдельными сегментами заземлителя и добиться более низких значений сопротивления контура, чем при использовании стандартных муфт, а также еще больше снизить сезонные изменения сопротивления растеканию тока вертикальных составных заземлителей.

3. Полученные результаты расчетов свидетельствуют о том, что использование смеси на основе гидрогеля позволило в десятки раз увеличить мнимый диаметр электрода заземления, что положительно сказывается на сопротивлении заземляющего устройства и стабильности его свойств, а также делает предложенный способ перспективным для широкого применения при строительстве систем заземления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Способ снижения сезонных изменений сопротивления заземляющих устройств / С. М. Барайшук [и др.] // Агропанорама. 2023. № 6 (160). С. 19–25.

2. Глушко, В.И. Определение уровня перенапряжений во вторичных цепях подстанций при распространении по высоковольтным шинам грозового импульса напряжения / В. И. Глушко, Е. А. Дерюгина // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2017. Т. 60, № 3. С. 211–227. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-211-227>.
3. Струцкий, Н. В. Организация электрохимической защиты стальных подземных трубопроводов от коррозии в газораспределительной отрасли Республики Беларусь / Н. В. Струцкий, В. Н. Романюк // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 67, № 3. С. 257–267. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267>.
4. Веденева, Л. М. Исследование влияния основных свойств грунта на сопротивление заземляющих устройств / Л. М. Веденева, А. В. Чудинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16, № 1. С. 89–100.
5. Зайцева, Н. М. Определение температуры грунта на глубине заземлителей / Н. М. Зайцева, Б. Б. Исабекова, М. Я. Клецель // Электричество. 2011. № 7. С. 19–24.
6. Барайшук, С. М. Снижение сопротивления заземляющих устройств применением обработки грунта неагрессивными к материалу заземлителя стабилизирующими влажностью добавками / С. М. Барайшук [и др.] // Агропанорама. 2021. № 5 (147). С. 28–33.
7. Драко, М. А. О разработке смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила для уменьшения удельного электрического сопротивления грунта / М. А. Драко, С. М. Барайшук, И. А. Павлович // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2021. Т. 23, № 1. С. 80–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92>.
8. Павлович, И. А. Снижение электрического сопротивления заземляющих устройств применением грунтозамещающей смеси на основе графита и гидрогеля для стабилизации электрофизических параметров грунта / И. А. Павлович, С. М. Барайшук // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. Т. 66, № 4. С. 322–332. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-322-332>.
9. Drako, M. (2020) Tendencies in the Design of the Grounding Devices for the Electrical Installations of the Belarusian Energy System / M. Drako, S. Baraishuk // Rudenko International Conference “Methodological Problems in Reliability Study of Large Energy Systems” (RSES 2020). E3S Web of Conferences. 2020. Vol. 2016. Art. 01067. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601067>.
10. Смесь для снижения переходного сопротивления электрод – грунт: пат. BY 24181 / С. М. Барайшук, И. А. Павлович. Оpubл. 28.02.2024.
11. Заземляющие устройства. Системы уравнивания потенциалов. Заземлители. Заземляющие проводники. Технические требования: ГОСТ Р 58882–2020. Введ. 16.06.2020. М.: Стандартинформ, 2020. 45 с.
12. Нескоромных, В. В. Анализ сопротивлений и разработка технических средств для бурения в горизонтальном стволе скважины / В. В. Нескоромных, Б. Лиу, П. Г. Петенев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2020. № 3 (327). С. 10–14.
13. Kuriachii, A. E. Applying modern technologies when drilling directional wells with long horizontal boreholes / A. E. Kuriachii, S. M. Kaliagin // Изв. высш. учеб. заведений. Горный журнал. 2020. № 5. С. 13–18. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-13-18>.
14. Ширинов, Ш. Д. Исследование кинетики набухания синтезированных гидрогелей на основе гидролизованного полиакрилонитрила [Электронный ресурс] / Ш. Д. Ширинов, А. Т. Джалилов // Universum: химия и биология. 2018. № 3 (45). Режим доступа: <https://7universum.com/ru/nature/archive/item/5601>.
15. Федорова, О. И. Математическое моделирование электрических зондирований над вертикальным пластом с комбинированной и симметричной установками / О. И. Федорова // Уральский геофизический вестник. 2020. № 3 (41). С. 37–43. <https://doi.org/10.25698/ugv.2020.3.5.37>.
16. Руденко, С. С. Требования к приборам для проведения вертикального электрического зондирования грунта при диагностике состояния заземляющих устройств / С. С. Руденко // Електротехніка і Електромеханіка. 2016. № 5. С. 68–73. <https://doi.org/10.20998/2074-272x.2016.5.12>.
17. Результаты электрометрии при поиске участков засоления подземных вод в зоне активного водообмена / Ю. И. Степанов [и др.] // Геология и полезные ископаемые Западного Урала. 2019. № 2 (39). С. 284–292.

18. Капиллярные эффекты в полидисперсных системах и их использование в почвенном конструировании / А. В. Смагин [и др.] // Почвоведение. 2021. Т. 55, № 9. С. 1150–1164. <https://doi.org/10.31857/s0032180x21090100>.
 19. Павлович, И. А. Методики расчета сопротивления заземляющего устройства, выполненного с применением грунтозамещающей смеси, для оптимизации электрофизических параметров грунта / И. А. Павлович, С. М. Барайшук, В. В. Богданович // Вестник Фонда фундаментальных исследований. 2023. № 4 (106). С. 146–157.
 20. Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний: ТКП 339–2022 (33240). Минск: Министерство энергетики Республики Беларусь, 2011. 593 с.
 21. Молниезащита зданий, сооружений и инженерных коммуникаций: СН 4.04.03–2020. Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2020. 161 с.
 22. Агафонов, О. М. Возможности полимерного гидрогеля как накопителя почвенной влаги в зоне неустойчивого увлажнения Краснодарского края / О. М. Агафонов, В. Ю. Ревенко // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. 2017. № 10. С. 35–38.
 23. Годунова, Е. И. Эффективность гидрогеля на четвертый год после внесения в условиях Центрального Предкавказья / Е. И. Годунова, В. Н. Гундырин, С. Н. Шкабарда // Достижения науки и техники АПК. 2017. Т. 31, № 5. С. 16–19.
- Поступила 12.07.2024 Подписана в печать 12.09.2024 Опубликовано онлайн 29.11.2024

REFERENCES

1. Baraishuk S. M., Pavlovich I. A., Murodov M. Kh., Bogdanovich V. V. (2023) Method for Reducing Seasonal Changes in Resistance of Grounding Devices. *Agropanorama*, (6), 19–25. <https://doi.org/10.56619/2078-7138-2023-160-6> (in Russian).
2. Glushko V. I., Deryugina E. A. (2017) Determination of the Level of Overvoltage in the Secondary Circuits of Substations when Lightning Impulse Voltage is Distributed in High-Voltage Buses. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 60 (3), 211–227. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2017-60-3-211-227> (in Russian).
3. Strutsky N. V., Romaniuk V. N. (2024) Organization of Electrochemical Protection of Steel Underground Pipelines Against Corrosion in the Gas Distribution Industry of the Republic of Belarus. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 67 (3), 257–267. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2024-67-3-257-267> (in Russian).
4. Vedeneeva L. M., Chudinov A. V. (2017) Investigation of the Influence of the Basic Properties of Soil on the Resistance of Grounding Devices. *Vestnik Permskogo Natsional'nogo Issledovatel'skogo Politekhnicheskogo Universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i Gornoe Delo = Bulletin of PNRPU. Geology. Oil and Gas Engineering and Mining*, 16 (1), 89–100 (in Russian).
5. Zaitseva N. M., Isabekova B. B., Kletsel' M. Ya. (2011) Determination of the Ground Temperature at the Depth of the Grounding Conductors Determination of the ground temperature at the depth of the grounding conductors. *Elektrichstvo*, (7), 19–24 (in Russian).
6. Barayishuk S. M., Pavlovich I. A., Murodov M. H., Abdullaev H., Skripko A. N. (2021) Reducing the Resistance of Grounding Devices by Using Soil Treatment with Moisture-Stabilizing Additives that Are Not Aggressive to the Grounding Material. *Agropanorama*, (5), 28–33 (in Russian).
7. Drako M. A., Baraishuk S. M., Pavlovich I. A. (2021) Compound Mixtures Based on Hydrolyzed Polyacrylonitrile Reducing Soil Electrical Resistivity. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Problemy Energetiki = Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 23 (1), 80–92. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92> (in Russian).
8. Pavlovich I. A., Baraishuk S. M. (2023) Reduction of the Electrical Resistance of Grounding Devices by the Use of a Soil Replacement Mixture Based on Graphite and Hydrogel to Stabilize the Electrophysical Parameters of the Soil. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh*

- Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 66 (4), 322–332. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-4-322-332> (in Russian).
9. Drako M., Baraishuk S. (2020) Tendencies in the Design of the Grounding Devices for the Electrical Installations of the Belarusian Energy System. *E3S Web of Conferences*, 216, 01067. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601067>.
 10. Baraishuk S. M., Pavlovich I. A. (2024) *A Mixture to Reduce the Electrode-Ground Transient Resistance*. Patent BY no. 24181 (in Russian).
 11. State Standart R 58882–2020. *Grounding Devices. Equation Potentials Systems. Grounders. Grounding Conductors. Technical Requirements*. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 45 (in Russian).
 12. Neskoromnyh V. V., Baochang L., Petenev P. G. (2020) Resistance Analysis and Development of Technical Tools for Drilling in a Horizontal Wellbore. *Stroitel'stvo Neftnykh i Gazovykh Skvazhin na Sushe i na More* [Construction of Oil and Gas Wells on Land and Sea], (3), 10–14 (in Russian).
 13. Kuriachii A. E., Kaliagin S. M. (2020) Applying Modern Technologies when Drilling Directional Wells with Long Horizontal Boreholes. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*, (5), 13–18. <https://doi.org/10.21440/0536-1028-2020-5-13-18>.
 14. Sgirinov Sh, Jalilov A. (2018) Research of Swelling Kinetics of Synthesized Hydrogels Based on the Hydrolyzed Polyacrylonitrile. *Universum: Khimiya i Biologiya* [Chemistry and Biology], (3). Available at: <http://7universum.com/ru/nature/archive/item/5601> (in Russian).
 15. Fedorova O. I. (2020) Mathematical Modeling of Electric Soundings above a Vertical Layer with the Combined and the Symmetrical Arrays. *Ural'skii Geofizicheskii Vestnik*, (3), 37–43. <https://doi.org/10.25698/ugv.2020.3.5.37> (in Russian).
 16. Rudenko S. S. (2016) Requirements for Devices for Vertical Electrical Sounding of Soil at Diagnostics of Grounding Devices. *Elektrotehnika i Elektromekhanika = Electrical and Electronic Engineering*, (5), 68–73 (in Russian).
 17. Stepanov Y. I., Kostarev S. M., Gorozhancev A. V., Taynitsky A. A. (2019) Electrometry Results for Searching of Salting Zones of the Underground Water in the Area of Active Water Exchange. *Geologiya i Poleznye Iskopaemye Zapadnogo Urala* [Geology and Minerals of the Western Urals], (2), 284–292 (in Russian).
 18. Smagin A. V., Sadovnikova N. B., Belyaeva E. A., Kirichenko A. V., Krivtsova V. N. (2021) Capillary Effects in Polydisperse Systems and Their Use in Soil Engineering. *Pochvovedenie = Eurasian Soil Science*, 55 (10), 1433–1446. <https://doi.org/10.31857/s0032180x21090100>.
 19. Pavlovich I. A., Baraishuk S. M., Bogdanovich V. V. (2023) Methods for Calculating the resistance of a Grounding Device Made Using a Soil Replacement Mixture to Optimize the Electrophysical Parameters of the Soil. *Vestnik Fonda Fundamental'nykh Issledovaniy = Bulletin of the Foundation for Fundamental Research*, (4), 146–157 (in Russian).
 20. TKP 339–2011(02230). *Electrical Installations for Voltage up to 750 kV. Power Transmission Lines, Overhead and Current Lines, Distribution and Transformer Substations, Electric Power and Battery Installations, Electrical Installations of Residential and Public Buildings. Rules and Protective Measures of Electrical Safety. Electricity Accounting. Norms of Acceptance Tests*. Minsk, Ministry of Energy of the Republic of Belarus, 2011. 593 (in Russian).
 21. SN 4.04.03–2020. *Lightning Protection of Buildings, Structures and Utilities*. Minsk, Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2020. 161 (in Russian).
 22. Agafonov O. M., Revenko V. Yu. (2017) The Possibilities of Polymer Hydrogel as a Storage of Soil Moisture in the Zone of Unstable Humidification of the Krasnodar Krai [Territory]. *Mezhdunarodnyi Zhurnal Gumanitarnykh i Estestvennykh Nauk = International Journal of Humanities and Natural Sciences*, (10), 35–38 (in Russian).
 23. Godunova E. I., Gundryin V. N., Shkabarda S. N. (2017) Efficiency of Hydrogel for the Fourth Year after Introduction under Conditions of the Central Pre-Caucasus. *Dostizheniya Nauki i Tekhniki APK = Achievements of Science and Technology of AICis*, 31 (5), 16–19 (in Russian).