



## О РАЗРАБОТКЕ СМЕСИ НА ОСНОВЕ ГИДРОЛИЗОВАННОГО ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ УДЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ГРУНТА

М.А. Драко<sup>1</sup>, С.М. Барайшук<sup>2</sup>, И.А. Павлович<sup>2</sup>

<sup>1</sup>РУП "Белэнергосетьпроект", г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск,  
Республика Беларусь

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5267-9110>, drako.mikhail@mail.ru

**Резюме:** *ЦЕЛЬ.* Обосновать целесообразность совершенствования методологии выполнения заземляющих устройств. Исследовать влияние минеральной проводящей смеси на коэффициент сезонности. Проанализировать результаты экспериментальных исследований. Оценить снижение сопротивления тестового заземляющего устройства по отношению к контрольному. Предложить эффективные технические решения для снижения значения сопротивления заземляющих устройств. *МЕТОДЫ.* При решении поставленной задачи проведен ряд натурных экспериментов по измерению значений сопротивлений заземляющих устройств экспериментальных заземлителей, после обработки смесью околоэлектродного объема грунта для оптимизации сопротивления заземлителя. *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Разработан состав смеси для нормализации (уменьшения) удельного электрического сопротивления грунта, содержащей гидростабилизирующие добавки и низкодиспергированные проводящие вещества. Предложены аналитические выражения для оценки эквивалентного удельного электрического сопротивление грунта с учетом замещения части грунта минеральной проводящей смесью. *ЗАКЛЮЧЕНИЕ.* Применение смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила наиболее эффективно при использовании совместно с заземлителями, глубина заложения которых меньше глубины промерзания грунта, то есть находящимися в слоях грунта с наибольшими сезонными колебаниями, и будет расти при увеличении площади контакта таких заземлителей с грунтом, обработанным гидролизированным полиакрилонитрилом. Дополнительное уменьшения коэффициента сезонности для вертикальных составных заземлителей, по-видимому, обусловлено влиянием смеси на их части, смонтированные вблизи поверхности грунта. Применение комплексных смесей, содержащих, помимо гидростабилизирующих добавок, также и низко диспергированные проводящие вещества, позволяет до трех раз уменьшить сопротивление заземляющих устройств в сравнении с контрольными, сгладить сезонные колебания сопротивления ЗУ и капитальные затраты на монтаж заземляющих устройств путем уменьшения количества электродов и размеров территории, на которой они располагаются.

**Ключевые слова:** электрические станции и электроэнергетические системы, заземляющее устройство, удельное электрическое сопротивление грунта, заземлитель, околоэлектродное пространство, гидростабилизирующие вещества, коэффициент сезонности.

**Для цитирования:** Драко М.А., Барайшук С.М., Павлович И.А. О разработке смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила для уменьшения удельного электрического сопротивления грунт // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021. Т. 23. № 1. С. 80-92. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92.

## COMPOUND MIXTURES BASED ON HYDROLYZED POLYACRYLONITRILEREUCING SOIL ELECTRICAL RESISCTIVITY

MA. Drako<sup>1</sup>, SM. Baraishuk<sup>2</sup>, IA. Pavlovich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>RUE Belenergoseprojekt, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk,  
Republic of Belarus

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5267-9110>, drako.mikhail@mail.ru

**Abstract: THE PURPOSE.** The purpose of the article is to define the reasons to improve the system of grounding devices design. Author studies technical decisions that reduce grounding resistance values. Results are given researches how a mineral conductive mixture, that normalizes grounding, influences a seasonal coefficient. Analysed the results of the experimental surveys. Also evaluates a test grounding device's resistance decrease compared to the resistance decrease of a control grounding device. **METHODS.** While solving the above problem, a number of field experiments were carried out to measure the resistance values of experimental circuit grounding devices after their near-electrode soil space had been treated with the mixture that improves the resistance of a grounding wire. **RESULTS.** The composition of the mixture that normalizes (reduces) soil electrical resistivity has been developed, it has contained hydro-stabilizing and low-dispersed conducting additives. There has been proposed the analytical expressions to evaluate equivalent soil electrical resistivity values after a portion of soil had been submitted by the mineral conducting mixture. **CONCLUSION.** The use of the mixtures based on hydrolyzed polyacrylonitrile is most effective together with the grounding wires buried in soil no deeper than the soil freezing depth that is located in the soil layers with maximum seasonal fluctuations, and will increase with the increase of the contact area of such grounding wires with the soil treated with hydrolyzed polyacrylonitrile. Additional decrease of a seasonal coefficient for the vertical compound grounding wires apparently is due to the mixture influencing their parts mounded near the ground surface. The use of complex mixtures containing both hydro-stabilizing additives and low-dispersed conducting substances allows up to three times decrease of the resistance values of a grounding device compared to a control grounding device, it allows to even seasonal fluctuation of resistance of a grounding device, and to decrease mounting capital investment for a grounding device by means of the decrease of the number of the electrodes and the territory on which they are located.

**Key words:** electrical stations, electrical energy systems, grounding device, soil electrical resistivity, grounding wire, near-electrode soil space, hydro-stabilizing substances, seasonal coefficient.

**For citation:** Drako MA, Baraishuk SM, Pavlovich IA. Compound mixtures based on hydrolyzed Polyacrylonitrile reducing soil electrical resistivity. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2021;23(1):80-92. doi:10.30724/1998-9903-2021-23-1-80-92.

### **Введение и литературный обзор**

Заземлением называется преднамеренное электрическое соединение какой-либо точки сети, электроустановки или оборудования с заземляющим устройством [1]. В энергетике заземление используется для защиты от опасного действия электрического тока (защитное заземление), а также для обеспечения нормальной работы электроустановки (функциональное заземление) [2]. Защитные заземления снижают до безопасной величины напряжение относительно земли на металлических частях электроустановки, которые не находятся под напряжением, но могут оказаться под ним вследствие повреждения изоляции электрического оборудования. Защитному заземлению подлежат все металлические наружные части и каркасы электротехнического оборудования.

Наибольшее число заземляющих устройств энергетических систем выполняется в виде соединенных различным образом неизолированных стальных элементов, находящихся в контакте с землей и предназначенных для стекания тока в землю. Их совокупность называется заземляющим устройством. Характерной особенностью таких заземляющих устройств является то, что поперечные размеры отдельных элементов, как правило, существенно меньше их длины. Это позволяет при расчете основных электрических параметров (сопротивление растеканию, распределение потенциала и напряженности поля в среде) пренебречь неравномерностью распределения плотности тока по образующей поперечного сечения элементов [3].

При проектировании заземляющих устройств определяющую роль играют нормированное значение сопротивления заземления, а также электропроводность грунтов на площадке размещения заземляющих устройств. Электрические свойства грунтов, в свою очередь, находятся в прямой зависимости от количества в них хорошо проводящих минералов, пористости, влажности грунта (уровня залегания грунтовых вод), сезонности (климатических условий места расположения заземляющих устройств) [4].

Академиком П.П. Роговым были проведены исследования и составлена схематическая карта территориального расположения грунтов Республики Беларусь, на основании которой можно сделать следующие выводы:

– водопроницаемость в суглинистых местах очень мала, а в супесчаных и особенно в песчаных сильно возрастает;

– водоудерживающая способность грунтов различна – суглинистые грунты удерживают до 91,5% воды, а песчаные только 42,7% (супесчаные грунты занимают промежуточные значения – 66,5%).

На основании результатов указанных исследований предварительно можно аналитически оценить необходимый объем геофизических изысканий при проектировании заземляющего устройства электроустановки, которое при минимальных затратах на ее сооружение в любое время года должно удовлетворять требованиям обеспечения безопасности людей и животных, защиты высоковольтных и слаботочных электроустановок, а также надежности обеспечения их эксплуатационных режимов работы и грозозащиты и обеспечивать нормируемые значения электрических параметров заземляющих устройств в течение нормативного срока службы электроустановки.

Проблема сопоставления разных, а по сути уникальных геофизических условий в местах размещения электроустановок, по показателям свойств и характеристик постоянно возникает при решении практических задач обеспечения нормируемых показателей заземляющих устройств, причины и физического и морального износа которых выделены в [5].

Интерес представляет влияние специальных минеральных проводящих смесей и других технических решений на параметры заземляющего устройства [6–10]. Однако, ранее не рассматривался способ стабилизации влажности заземлителя в местах заложения заземляющих устройств с применением гидрогелей. В работе предложен состав смеси для уменьшения удельного электрического сопротивления грунта, содержащей гидростабилизирующие добавки и низкодиспергированные проводящие вещества. Проведена оценка эквивалентного удельного электрического сопротивления грунта с учетом замещения части грунта минеральной проводящей смесью. Показана возможность применения комплексных смесей, которая позволяет до трех раз уменьшить сопротивление заземляющих устройств, сгладить сезонные колебания сопротивления заземляющих устройств, за счет уменьшения коэффициента сезонности, и капитальные затраты на монтаж заземляющих устройств путем уменьшения количества электродов и размеров территории, на которой они располагаются.

#### **Литературный обзор**

Согласно зарубежной практике, удельное сопротивление почвы может быть уменьшено введением в около электродное пространство хлорида натрия, сульфата магния, сульфата меди и хлорида кальция или аналогичных веществ [6–7]. Чаще всего используются поваренная соль и сульфат магния. Химические вещества обычно наносят, помещая их в круглую канавку вокруг электрода таким образом, чтобы предотвратить прямой контакт с электродом. Такая обработка должна периодически обновляться из-за вымывания в зависимости от способа химической обработки и характеристик почвы, однако данный способ отрицательно сказывается на защите заземляющих электродов от коррозии [8].

Также, широко распространено использование заземляющих электродов в бетонной оболочке. Бетон ниже уровня земли представляет собой полупроводниковую среду с удельным сопротивлением около 30 Ом·м при 20 °С или несколько ниже, чем у среднего суглинка [4]. Использование для анодного заземлителя токопроводящей бетонной оболочки, содержащей песок, препарат коллоидно-графитовый, цемент, шунгитовую крошку, нитрофоску в указанных количествах позволяет обеспечить достаточную электрическую проводимость и срок действия устройства [9]. В Российской Федерации получило распространение использование минерального активатора грунта, представляющего собой полусухой электролит или электропроводящий гидрогель, увеличивающий площадь токоотдачи, имеющий низкое сопротивление растеканию тока электрод – грунт, использование которого возможно и достаточно эффективно лишь совместно с полами, перфорированными заземляющими электродами устойчивыми к коррозии [10].

При комбинированной защите от коррозии и как самостоятельное антикоррозионное мероприятие часто используют однослойные или многослойные покрытия, изготовленные из различных искусственных материалов, среди которых в [11] выделены терморезистивные и термопластичные полимеры или их комбинации как между собой, так и с другими

покрытиями. Однако такие покрытия могут применяться для систем заземления только в случае, если они будут обладать достаточной проводимостью.

При взаимодействии с грунтом наполнение электродов диффундирует в грунт через перфорацию в стенках электрода, также образуя электролит. Эффективным способом оценки коррозионного состояния оборудования является коррозионный мониторинг – система наблюдений и прогнозирования коррозионного состояния объекта с целью получения своевременной информации о возможных коррозионных отказах, а также для обоснования необходимости и выбора методов защиты металлов от коррозии [12].

Для Республики Беларусь нехарактерны грунты с высокой и повышенной коррозионной активностью. Значения удельного электрического сопротивления грунтов идентичных типов во всех областях республики отличаются незначительно и могут быть приняты усредненными. В других грунтах, за исключением песка, ожидаемое удельное электрическое сопротивление не превышает  $600 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  [8].

Сечение вертикальных электродов заземляющих устройств выбирается только по их механической прочности и коррозионной стойкости, вопросы коррозии заземлителей электроустановок Белорусской энергосистемы детально рассмотрены в [8]. Опыт обследования металлических конструкций воздушных линий электропередачи и подстанций, изложенный в [13], свидетельствуют о том, что в климатических условиях Беларуси наибольшие коррозионные поражения элементов наблюдаются в уровне земли, а также на участке 0,2 м выше и ниже уровня земли. В целях сохранения работоспособности и долговечности заземляющих проводников электрооборудования необходимо своевременное выполнение мероприятий по их антикоррозийной защите [14].

С учетом максимальной глубины промерзания грунта в Беларуси (порядка 1,8 м) при длине вертикального электрода равной, 5 м, его активная часть по отводу в землю тока составляет только 3,2 м. Однако анализ приведенных в [15] результатов расчетов различными методами глубины промерзания для одной и той же местности, для одного и того же типа грунта показывает, что разность между максимальным и минимальным значениями глубины промерзания составляет более 50%, что не учитывается в практике проектирования заземляющих устройств при выборе длины вертикальных электродов. Для условий Беларуси средняя скорость промерзания грунтов составляет 1,3–2,1 см/сут, а оттаивания – 2,3–4 см/сут и зависит от типа грунта и степени его уплотнения. Если снежный покров образуется до промерзания, то скорость промерзания уменьшается в 2 раза по сравнению с промерзанием грунта при отсутствии снежного покрова.

Анализ результатов геоэлектрического разреза верхних слоёв земли на энергетических объектах Белорусской энергосистемы показал, что грунты с повышенной электропроводимостью и удельным электрическим сопротивлением до  $100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$  в большинстве случаев располагаются на глубине более 5 м. Поэтому в некоторых случаях для достижения нормированных величин электрических параметров заземляющих устройств требуется большое количество вертикальных электродов и связанная с этим значительная дополнительная площадь под искусственный заземлитель.

Нерациональное использование стали при традиционном выполнении системы заземления, как правило, ведет к излишним капитальным затратам. При этом электробезопасность и защищенность электрооборудования от грозových и внутренних перенапряжений не увеличиваются.

Указанную проблему, связанную с вертикальными электродами, можно решить путем применения глубинных вертикальных заземлителей (составных или из цельных труб). Целесообразность применения таких заземлителей в электросетевом строительстве обосновывается двумя основными факторами:

- заземлители могут достигать нижележащих слоев земли с низким удельным сопротивлением, что способствует снижению их сопротивления;
- сезонный коэффициент таких заземлителей при их длине 10 м и выше приблизительно равен 1.

При проектировании, монтаже и обслуживании заземляющих устройств в грунтах, имеющих высокое электрическое сопротивление, для снижения значения сопротивления заземления рекомендуется использовать ряд технических решений, одним из которых является применение обработки грунта веществами и смесями, неагрессивными к материалу заземлителя, для снижения сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве [16]. Для обеспечения необходимого контакта составных глубинных заземлителей с землей по всей его длине в белорусских технических нормативных правовых актах рекомендовано проводить заливку в процессе погружения электрода,

например глинистым или другим проводящим раствором, не подлежащим вымыванию в процессе эксплуатации.

Одним из перспективных методов уменьшения электрического сопротивления грунта на площадке монтажа ЗУ, а значит и сопротивления самого искусственного заземлителя в целом, является обработка грунта путем введения специальных составов с низким удельным сопротивлением, неагрессивных к материалу заземлителя, стабилизирующих влажность [16, 17] непосредственно в околоэлектродный объем грунта. В таком случае обеспечивается как уменьшение температуры замерзания воды, находящейся в грунте в несвязанном виде, за счет ее связывания, так и снижение его удельного сопротивления, за счет формирования связанных электролитических растворов.

Анализ, ранее исследованных зависимостей сопротивления почвы от влажности, описанных в частности в [18], и экспериментальные исследования свойств гидросорбирующих агентов, проведенные в [16, 19–20], показывают, что стабилизация влажности грунта по величине 12–16 % в массовом соотношении является оптимальной, дальнейшее увеличение влажности уже не приводит, к сколь либо значительному снижению сопротивления. Исследование динамики транспортных свойств гидрогелей проведенное в [18, 21–22], также показало принципиальную возможность использовать гидролизированный полиакрилонитрил в качестве гелеобразного (полусухого) электролита, вследствие процессов транспортировки и перераспределения ионных оснований, адсорбированных с водным раствором, внутри состава [22–23], что также подтвердило возможность использовать гидролизированный полиакрилонитрил в качестве гелеобразного (полусухого) электролита, вследствие процессов транспортировки и перераспределения ионных оснований, адсорбированных с водным раствором, внутри состава. На основании этих данных авторы исследовали спектр составов смеси, содержащей гидростабилизирующие добавки, бентонит, проводящие добавки, и зольные добавки. Разработан состав смеси, содержащей гидростабилизирующие добавки, также и низко диспергированные, углеродсодержащие проводящие вещества.

Введение проводящих смесей с углеродсодержащими порошками эффективно при снижении высоких удельных электрических сопротивлений грунта (порядка 400–600 Ом·м) и малоэффективно при величинах сопротивлений менее 100 Ом·м, в таком случае он может давать сколь либо заметный эффект только в сочетании с гидростабилизирующими веществами, например гидролизированным полиакрилонитрилом.

#### **Материалы и методы**

При проведении натурных экспериментов на супесчаном грунте были смонтированы заземляющие устройства (заземлители), представляющие собой вертикальный составной электрод из оцинкованной стали диаметром 16 мм длиной 3 м и горизонтальный фрагмент соединительной полосы 4х50 мм той же длины. Контрольные заземлители были смонтированы без применения каких-либо добавок. В околоэлектродном объеме грунта экспериментальных заземлителей проведена обработка смесью для оптимизации сопротивления заземлителя, или отдельными ее компонентами, стабилизирующими влажность или улучшающими проводимость.

Систематические измерения значений сопротивления заземляющих устройств выполнялись более трех лет четырех проводным методом при помощи измерителя ИС-10 при разных значениях температуры и влажности окружающей среды и грунта. Кроме того, методом вертикального электрического зондирования проведен цикл измерений удельного электрического сопротивления грунта в месте заложения экспериментальных и контрольных заземлителей.

Измерения удельного сопротивления грунта в зависимости от количества введенного гидрогеля проводились по методике аналогичной описанной в [24] и в соответствии с методикой определения  $\rho$  грунта, изложенной в ГОСТ 9.602.89 Единой системы защиты от коррозии и старения. Установка изготовлена из полипропиленовых труб. Измерительные электроды выполнены из пластин нержавеющей стали размером 50х75 мм, длина проводящего слоя грунта составляет 2,1 м. Общий объем размещаемого в установке грунта равен 0,08 м<sup>3</sup>. Гидрогель на основе гидролизованного полиакрилонитрила помещали в емкость с водой до полного набухания, после чего смешивали с грунтом и заполняли экспериментальную установку, где протекал переменный ток частотой 50 Гц. Результаты измерений усреднялись, причем величина значений напряжения подбиралась таким образом, чтобы можно было измерить ток с погрешностью не более 10 %. Погрешность измерительных приборов при измерении тока и напряжения составляла не более 1 %.

### Результаты и обсуждение

На рисунке 1 приведены результаты измерений удельного сопротивления смеси грунта с гидролизированным полиакрилонитрилом в различных пропорциях.

Как видно из графика, представленного на рисунке 1, при внесении гидрогелей полученных набуханием гидролизованного полиакрилонитрила сухой массой более 1,3–1,5 % от массы грунта происходит стабилизация влажности, и дальнейшее увеличение концентрации не приводит к уменьшению удельного сопротивления грунта, что косвенно указывает на получение оптимальной влажности грунта, что хорошо согласовывается с результатами, представленными в [18].

Результаты экспериментальных исследований сопротивления контрольного заземлителя (красная кривая), а также заземлителя с разрабатываемым составом смеси (зеленая кривая) приведены на рис. 2. Также проанализирована динамика измерения сопротивления заземлителя, обработанного единственным компонентом: гидролизированным полиакрилонитрилом [16, 20] (черная кривая), являющимся нетоксичным, незагрязняющим окружающую среду и применяемым даже в сельскохозяйственном производстве веществом.

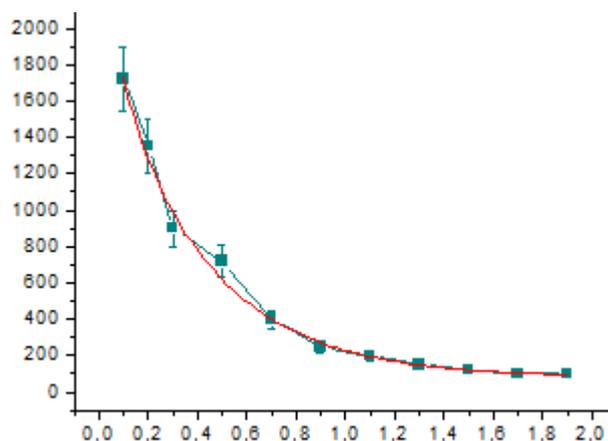


Рис.1. Зависимость удельного сопротивления грунта от процента введения геля на основе гидролизованного полиакрилонитрила

Fig.1. The dependence of the soil resistivity on the percentage of gel introduction based on hydrolyzed polyacrylonitrile

Отметим, что гидролизированный полиакрилонитрил – основной стабилизирующий влажность компонент смеси.

Из полученных результатов измерений можно сделать вывод, что наименьшее значение сопротивления имеет заземляющее устройство, околоэлектродное пространство которого обработано экспериментальной смесью для снижения сопротивления растеканию заземляющих устройств. Применение смесей позволяет не только уменьшить колебания сопротивления растеканию заземлителя, но и уменьшить его сопротивление в сравнении с контрольным заземлителем.

Комплексное применение смеси снижает температуру замерзания грунта на 4 °С, что дает возможность использовать более высокие средние многолетние низшие температуры при определении климатической зоны площадки месторасположения проектируемого электрооборудования.

Исследования [16] показали, что влияние на снижение электрического сопротивления можно разделить на два фактора: изменение коэффициента сезонности и уменьшение удельного сопротивления грунта в околоэлектродном пространстве, что позволяет внести корректировки в расчеты сопротивления заземлителя при применении смесей при монтаже заземляющих устройств на основе алгоритмов расчета сопротивления для двухслойной земли.

На основании работ [25, 26] и с учетом экспериментальных данных авторами были получены нижеприведенные эмпирические выражения. Эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта с учетом замещения части грунта смесью можно определить, используя аналитическое выражение, полученное на основе экспериментальных данных для однослойного (1) и двухслойного грунта (2):

$$\rho_{\text{экв}} = \Psi \cdot (\rho_{\text{грунта}} \cdot e^{-1,3/P} + 20 / e^{4/P}), \quad (1)$$

$$\rho_{\text{экв}} = \Psi \left( \frac{\rho_{1\text{грунта}} \cdot \rho_{2\text{грунта}} \cdot l}{\left( \rho_{1\text{грунта}} (1 - H + t_{\text{тр}}) + \rho_{2\text{грунта}} (H - t_{\text{тр}}) \right)} e^{-1,3/P} + 20 / e^{4/P} \right), \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{экв}}$  – искомое эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м;  $\rho_{\text{грунта}}$  – полученное в результате натуральных измерений удельное сопротивление грунта, Ом·м;  $\Psi$  – коэффициент сезонности;  $H$  – глубина верхнего слоя грунта, м;  $t_{\text{тр}}$  – глубина траншеи, м;  $l$  – длина вертикального заземлителя, м;  $P$  – периметр сечения замещающей смеси, м.

Экспериментально проверялась адекватность разработанных эмпирических выражений (1) и (2) для периметров замещения до 10 м.

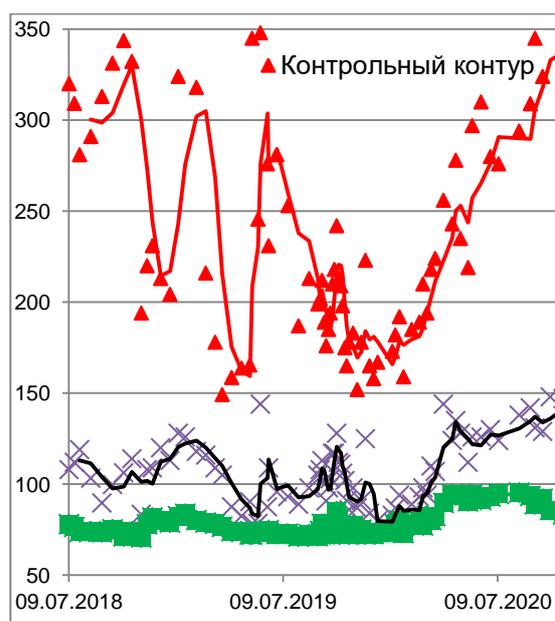


Рис. 2 График сопротивления контрольного заземляющего устройства (красная кривая), заземлителя, обработанного гидролизированным полиакрилонитрилом (синяя кривая) и заземлителя, обработанного смесью (зеленая кривая)

Fig.2. Graph of the resistance of the control earthing device (red curve), the earthing device treated with hydrolyzed polyacrylonitrile (blue curve), and the earthing device treated with a mixture (green curve)

Необходимо отметить, что развитие теории и методов расчета заземляющих устройств в зависимости от принятой модели электрической структуры земли еще в 1981 году Якобс А.И. условно разбил на три этапа:

1. До 1954 г. землю представляли в виде однородного проводящего полупространства (“однородная земля”).

2. После опубликования исследований Бургсдорфа В.В. в 1954 г. был произведен переход к представлению новой модели земли в виде двухслойного проводящего полупространства (“двухслойная земля”) и изложен метод расчета простых (одиночных) заземлителей: вертикального и горизонтального прямолинейных и в виде кольца.

Дальнейшее развитие теории привело к созданию строгого метода расчета сложных (многоэлементных) заземлителей в двухслойной земле. Данное исследование осуществлялось методом физического моделирования для некоторых видов неоднородности, а также на основании обобщения аналитических расчетов на ЭВМ. Ворониной А.А. в 1969 г. были получены соотношения для расчета сопротивления сеток с вертикальными электродами и расчета напряжения прикосновения в центре угловой ячейки сеток с с вертикальными электродами.

3. Однако расхождения между расчетными и экспериментальными значениями сопротивления сложных заземлителей и напряжения прикосновения на территории трансформаторных подстанций и открытых распределительных устройств хотя и значительно уменьшились, но продолжали оставаться заметными (до 30 %, а в отдельных

случаях и до 50 %). Проведенный Якобсом А.И. анализ подтвердил, что причина заключается в весьма грубом приближении двухслойной модели земли к действительной электрической структуре ее верхнего слоя. В связи с чем, учеными после 1970 г. рассматривались три различных пути дальнейшего повышения точности расчета сложных заземлителей:

- поиски метода эквивалентной замены многослойной электрической структуры земли двухслойной моделью;
- непосредственное использование для расчета кривых вертикального электрического зондирования) без их предварительной интерпретации
- разработка метода расчета заземлителей в многослойной земле.

В случае использования вертикального составного заземлителя круглого сечения, заглубленного в грунт (рис. 3) в условиях обработки смесью околоэлектродного пространства, уравнение для расчета сопротивления заземлителя примет вид:

$$R_B = \frac{\rho_{\text{экв}}}{2\pi l} \left( \ln \frac{2l}{d_{\text{экв}}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+1}{4t-1} \right), \quad (3)$$

где  $d_{\text{экв}}$  – эквивалентный диаметр заземлителя, м, определяемый по (4).

$t$  – расстояние до середины длины вертикального стержня от поверхности грунта, м.

Данная поправка корректирует вклад изменения удельного электрического сопротивления грунта в околоэлектродном слое (объема возникающего при прохождении соединительных муфт в грунте) при замещении грунта смесью с более низким удельным сопротивлением.

$$d_{\text{экв}} = d_{\text{зазем}} \left( 1 + \frac{(d_{\text{муфты}} - d_{\text{зазем}})}{d_{\text{зазем}}} \cdot \frac{\rho_{\text{экв}}}{\rho_{\text{грунта\_изм}}} \right), \quad (4)$$

где  $d_{\text{зазем}}$  – диаметр стержня составного заземлителя диаметр заземлителя, м;  $d_{\text{муфты}}$  – диаметр соединительной муфты, м;  $\rho_{\text{грунта\_изм}}$  – измеренное удельное сопротивление грунта, Ом·м.

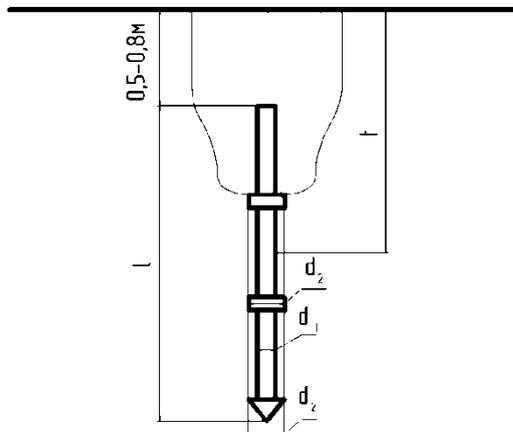


Рис. 3 Схема размещения в грунте вертикального составного заземлителя  
 Fig.3. Layout of the vertical composite earthing device in the ground

Предложенные выражения для оценки эквивалентного удельного электрического сопротивление грунта с учетом замещения части грунта минеральной проводящей смесью. Формулы являются обобщением результатов расчетов, и измерений сопротивления экспериментальных заземляющих устройств. Сходимость параметров заземляющего устройства полученных при расчетах и реально полученных зависит от точности исходных данных по электрическим характеристикам грунта, которые определяются методом вертикального электрического зондирования. Погрешности между расчетными значениями сопротивления заземляющих устройств, полученными в нашей работе, и экспериментально измеренными сопротивлениями заземляющих устройств при проведении натурных экспериментов, позволяют использовать приведенные эмпирические выражения при проектировании заземляющих устройств.

При исследовании влияния смеси на коэффициент сезонности установлено, что при засыпке смесью горизонтальной полосы коэффициент сезонности снижается до 20 % по сравнению с контрольным заземлителем. А в случае, если при монтаже вертикальных

электродов смесью обработано и их околоэлектродное пространство, коэффициент сезонности снижается до 25 % по сравнению с контрольными значениями для необработанного заземлителя. При этом использование в составе смесей проводящих добавок позволяет до 3 раз уменьшить сопротивление растеканию тока при той же конфигурации заземляющих устройств.

Для дальнейшего изучения влияния разработанного состава смеси на эксплуатационные характеристики заземляющих устройств, смонтированных на разных типах грунта и при разной глубине залегания грунтовых вод, а также перспективы использования ее совместно с пластинчатыми и решетчатыми заземлителями необходимо внедрение ее в опытную эксплуатацию. Отдельное внимание необходимо уделить возможности изменения состава с целью подавления коррозионной активности почвы в местах монтажа заземляющих устройств. При размещении заземлителей в суглинках, суглинках с агрессивными водами, супесях, супесях мокрых, песке всех видов ожидается низкая коррозионная активность (характерно для всех областей Республики Беларусь) [8]. В сухих грунтах (влажностью до 5 %) коррозия не ожидается из-за отсутствия электролита.

Строительство заземляющих устройств электрических подстанций напряжением 35 кВ и выше, расположенных в грунтах с плохой проводимостью, сопряжено со значительными финансовыми и трудовыми затратами, применение смесей может снизить как стоимость материалов самого заземлителя, так и затраты на его строительство. При проведении дальнейших исследований и опытной эксплуатации актуальна задача проведения экономического сравнения традиционно выполненного заземления и заземления, содержащего разработанный состав смеси.

В Республике Беларусь с вводом в действие ТКП-427 нормируемое значение наведенного напряжения снизилось с 42 В до 25 В. Ужесточение данного критерия, в свою очередь, повлекло за собой необходимость пересмотра перечня линий, при отключении и заземлении которых по концам (в распределительных устройствах подстанций и станций) значение наведенного напряжения на заземленных проводах, пересчитанное к наибольшему длительно допустимому току влияющей воздушной линии электропередачи (ВЛ), превышает допустимое значение.

Разработка мероприятий по защите от наведенного напряжения основывается на оценке условий электробезопасности на ВЛ под наведенным напряжением при определенной схеме заземления ВЛ, линейного оборудования, рабочих участков и рабочих мест. При этом критерием эффективности защитных мероприятий является снижение наведенного напряжения на заземленном рабочем месте до уровня, не превышающего безопасной величины 25 В. В Белорусской энергосистеме ранее разработана схема заземления, смысл которой заключается в установке на ВЛ стационарного специального низкоомного заземляющего устройства (СЗУ) в определенных (расчетных) местах, что позволяет снижать уровень наведенного напряжения до безопасных величин по всей длине или на отдельных участках ВЛ.

Особые трудности возникают при монтаже СЗУ в высокоомных грунтах, так как нормируемое сопротивление заземления опор находится в прямой зависимости от удельного электрического сопротивления земли. Величина сопротивления СЗУ определяется при расчете наведенного напряжения по критерию обеспечения электробезопасности при работах на проводах ВЛ, а нормируемое сопротивление заземления опор выбирается по критерию обеспечения грозоупорности изоляции ВЛ. Поэтому величина сопротивления СЗУ может быть значительно меньше величины нормируемого сопротивления заземления опор и составлять менее 1 Ом.

В таблице приведены расчетные объемы металла на выполнение конструкций СЗУ с учетом предоставленных одним из электросетевых филиалов максимальных токов по влияющим ВЛ.

Объемы металла на выполнение конструкций СЗУ

Код опоры	Требуемое сопротивление СЗУ, Ом	Наименьшее удельное эквивалентное сопротивление грунта, Ом·м	Объемы металла		
			длина вертикальных электродов, м	количество вертикальных электродов, шт.	Общая протяженность, м
1	1,6	3691	30	152	4560
2	1,6	2620	5	272	1360
3	2,7	593	15	10	150
4	1,25	233	15	16	240
5	1,9	371	15	18	270
6	1,3	157	5	28	140
7	0,6	3691	30	292	8700
8	0,6	757	15	200	3000
9	1,4	1357	15	140	2100

После монтажа указанных в таблице СЗУ и измерения их сопротивления растеканию сделан вывод, что проектные и реальные значения сопротивления СЗУ практически совпадают, что свидетельствует о корректности проведенных геофизических изысканий и аналитических расчетов.

Применение смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила для уменьшения удельного электрического сопротивления грунта, возможно, позволило бы значительно уменьшить объемы металла на выполнение конструкций СЗУ, что, в свою очередь, повлекло бы и уменьшение стоимости строительно-монтажных работ. Необходимы дальнейшие экспериментальные исследования смонтированных с применением смеси заземляющих устройств при размещении их в грунтах с различным удельным электрическим сопротивлением. После верификации разработанной смеси на основе гидролизованного полиакрилонитрила результаты исследований будут оформлены в виде методических указаний по ее применению в зависимости от геофизических условий месторасположения заземляющего устройства электроустановки.

#### **Выводы**

1. Применение смесей на основе гидролизованного полиакрилонитрила наиболее эффективно при использовании совместно с заземлителями, глубина заложения которых меньше глубины промерзания грунта, то есть находящимися в слоях грунта с наибольшими сезонными колебаниями, и будет расти при увеличении площади контакта таких заземлителей с грунтом, обработанным гидролизованным полиакрилонитрилом.

2. Дополнительное уменьшения коэффициента сезонности для вертикальных составных заземлителей, по-видимому, обусловлено влиянием смеси на их части смонтированные вблизи поверхности грунта.

3. Применение комплексных смесей, содержащих, помимо гидростабилизирующих добавок, также и низкодиспергированные проводящие вещества, позволяет до трех раз уменьшить сопротивление заземляющих устройств в сравнении с контрольными заземляющими устройствами, сгладить сезонные колебания сопротивления заземляющих устройств и капитальные затраты на монтаж заземляющих устройств путем уменьшения количества электродов и размеров территории, на которой они располагаются.

#### **Литература**

1. Найденов А.И., Дмитриев Е.А. Параметры заземляющих устройств для защиты персонала и оборудования // Вестник ИРГТУ. 2011. №11 (58). С. 109-112.
2. Соснин В.В. Функциональное заземление // Главный энергетик. 2020. № 7. С. 15-22.
3. Ивлиев Е.А. К расчету электрических параметров стержневых заземлителей // Электричество. 1992. № 7. С. 41-44.
4. Веденеева Л.М., Чудинов А.В. Исследование влияния основных свойств грунта на сопротивление заземляющих устройств // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2017. Т. 16. № 1. С. 89-100.
5. Криксин П.В., Бохан Н.В. Заземляющее устройство подстанций - основа обеспечения электромагнитной совместимости технических средств. Опыт Белорусской энергосистемы // Энергия и менеджмент. 2011. №6 (63). С.18-20.
6. Zhuang Chi-jie, Zeng Rong, Zhang Bo, et al. Grounding system design method in high soil resistivity regions [J]. High Voltage Engineering. 2008. V. 34(5). pp.893-897.
7. Coelho Vilson, L. Piantini A, Almaguer Hugo A.D., et al. The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems // In The Lightning Flash and Lightning Protection (SIPDA 2013). Electric Power Systems Research. 2015. January. V. 118. pp. 76-82.
8. Драко М.А. Коррозия заземлителей электроустановок // Энергетическая стратегия. 2019. № 6 (69). С. 44-48.
9. Tung C.C., Lim S.C. Performance of electrical grounding system in soil at low moisture content condition at various compression levels // Journal of Engineering Science and Technology. 2017. V. 12, Special Issue 1. pp. 27-47.
10. Грибанов А.Н. Бипрон – заземление электроустановок // Экспозиция Нефть Газ. 2016. С. 72-75.
11. Киселев В.Г., Рузич Е.Н. Диэлектрические покрытия и их влияние на защиту от коррозии наружной поверхности подземных трубопроводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т.20(1-2). С.80-89.

12. Дремичева Е.С., Зверева Э.Р. Изучение коррозионных процессов нефтяного оборудования // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018;20 (1-2):138-143.
13. Осипенко О.В., Драко М.А., Мойсеенко О.А. Анализ дефектов строительных конструкций высоковольтных подстанций и линий электропередачи и меры по недопущению их дальнейшего развития // Энергия и менеджмент. 2015. № 1 (82). С. 5-9.
14. Колик В.Р., Драко М.А., Мойсеенко О.А. Актуальность обследования заземляющего устройства и устройств молниезащиты подстанций 35 кВ и выше // Энергетическая стратегия. 2014. № 2. С. 23–25.
15. Леонович И.И., Вырко Н.П. Глубина промерзания грунтов - важнейший фактор водно-теплового режима земляного полотна Depth of soil freezing - a determining factor of the water-heat regime of the roadbed // Строительная наука и техника. 2011. №5. С. 27–35.
16. Барайшук С.М., Павлович И.А. Снижение сопротивления заземляющих устройств применением обработки грунта неагрессивными к материалу заземлителя стабилизирующими влажностью добавками // Агропанорама. 2020. № 1 (137). С. 20-23.
17. Shi L., Yang N., Zhang H., et al. Anovel poly (glutamic acid) /silk-sericinhydrogel for wound dressing: Synthesis, characterization and biological evaluation // Materials Science and Engineering: C. 2009. V. 48 (1). pp. 533-540.
18. Ferre P.A., Redman J.D., Rudolph D.L. and R.G. Kachanosk. «The dependence of the electrical conductivity measured by time domain reflectometry on the water content of a sand», Water Resour. Res., 1998.
19. Lai, Yang & Hu, Yuhang. (2018). Probing the swelling-dependent mechanical and transport properties of polyacrylamide hydrogels through AFM-based dynamic nanoindentation. Soft Matter. 14. 10.1039/C7SM02351K.
20. Ширинов Ш.Д., Джалилов А.Т. Исследование кинетики набухания синтезированных гидросорбентов на основе гидролизованного полиакрилонитрила // Universum: Химия и биология : электрон. научн. журн. 2018. № 3 (45).
21. M. Russo, H. Warren, G. Spinks, D. MacFarlane, J. Pringle Hydrogels containing the ferri/ferrocyanide redox couple and ionic Liquids for thermocells. Australian Journal of Chemistry. 201, 72. 10.1071/CH18395.
22. Lai Y., Hu Y. Probing the swelling-dependent mechanical and transport properties of polyacrylamide hydrogels through afm-based dynamic nanoindentation Soft Matter. 2018. № 14 10.1039/C7SM02351K
23. H. Dehne, F. Hecht, A. Bausch The mechanical properties of polymer-colloid hybrid hydrogels. Soft Matter 2017. №13. 10.1039/C7SM00628D.
24. Зайцева, Н.М. Экспериментальное определение удельного электрического сопротивления / Н.М. Зайцева, Б.Б. Исабекова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2011. №1. С. 351–354.
25. M. Hannig. Calculation of the assembled grounding resistance from complex grounding systems by using analytical considerations only. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). doi: 10.1109/ICHVE.2018.8641921.
26. Unde M.G., Kushare B.E. Grounding grid performance of substation in two layer soil - a parametric analysis // International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies. 2012. V.1. № 2. P. 69-76. doi: 10.7323/ijeset/v1\_i2\_8.
27. Koliushko D.G., Rudenko S.S. Mathematical model of grounding connection of a power plant with under layer // Electronic modeling, 2014. V.36, №2. pp. 89–97.
28. Jovanovic D, Cvetkovic N., Raicevic N., Hederic Z. (2016). Comparative analysis of plate and grid ground electrode characteristics as a part of grounding system. 2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST) Published 2016 Engineering pp.35-40. 10.1109/SST.2016.7765628.
29. Chung seog Choi, Hyang Kon Kim, Hyoung Jun Gil, et al. The Potential Gradient of Ground Surface according to Shapes of Mesh Grid Grounding Electrode Using Reduced Scale Model. IEEEJ Trans. on Power and Energy. 2005. V. 125, N. 12. pp. 1170- 1176.
30. Myint, Su Mon; Hla Khin ,Thidar TunTheint. International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration; Bhopal. 2020.V.7. Iss.63. pp. 28-35.

#### **Авторы публикации**

**Драко Михаил Александрович** – магистр техн. наук, исследователь, заведующий электротехнической лабораторией отдела учета и качества электроэнергии РУП «Белэнергосетьпроект».

**Барайшук Сергей Михайлович** – канд. физ.-мат. наук, доцент, заведующий кафедрой практической подготовки студентов, Белорусский государственный аграрно-технический университет.

**Павлович Иван Александрович** – ассистент кафедры практической подготовки студентов, Белорусский государственный аграрно-технический университет.

### References

1. Naydenov AI, Dmitriev EA. Parameters of grounding devices for the protection of personnel and equipment. *Vestnik ISTU*. 2011;11 (58):109–112.
2. Sosnin VV. Functional grounding. *Chief Power Engineer*. 2020;7:15-22.
3. Ivliev EA. *Electricity*. 1992;7:41-44.
4. Vedeneva LM, Chudinov AV. Investigation of the influence of basic soil properties on the resistance of grounding device. *Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining*. 2017;16(1):89-100.
5. Kriksin PV, Bohan NV. *Energy and management*. 2011;6 (63):18-20.
6. Zhuang Chi-jie, Zeng Rong, Zhang Bo, et al. Grounding system design method in high soil resistivity regions [J]. *High Voltage Engineering*. 2008;34(5):893-897.
7. Coelho Wilson L, Piantini A, Almaguer Hugo AD, et al. *The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems*. In *The Lightning Flash and Lightning Protection (SIPDA 2013)*. Electric Power Systems Research. 2015;118:76-82.
8. Drako M.A. *Energy strategy*. 2019;6 (69):44-48.
9. Tung CC, Lim SC. Performance of electrical grounding system in soil at low moisture content condition at various compression levels. *Journal of Engineering Science and Technology*. 2017;12(1):27–47.
10. Gribanov, Bipron AN. - grounding of electrical installations. *Exposition Oil Gas*. 2016. P. 72–75.
11. Kiselev VG, Ruzich EN. Dielectric coatings and their effect on corrosion protection of the outer surface of underground pipelines. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(1-2):80-89.
12. Dremicheva ES, Zvereva ER. Study corrosion processes of oil equipment. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2018;20(1-2):138-143.
13. Osipenko OV, Drako MA, Moiseenko OA. *Energy and management*. 2015;1 (82):5-9.
14. Kolik VR, Drako MA, Moiseenko OA. *Energy Strategy*. 2014;2:23–25.
15. Leonovich II, Virko NP. *Construction science and technology*, 2011;5:27–35.
16. Baraishuk SM, Pavlovich IA. *Agropanorama*. 2020;1 (137):20-23.
17. Shi L, Yang N, Zhang H, et al. *Anovel poly (glutamic acid) /silk-sericinhydrogel for wound dressing: Synthesis, characterization and biological evaluation*. *Materials Science and Engineering: C*. 2009;48 (1):533-540.
18. Ferre PA, Redman JD, Rudolph DL, et al. *The dependence of the electrical conductivity measured by time domain reflectometry on the water content of a sand*, *Water Resour. Res.*, 1998.
19. Lai, Yang & Hu, Yuhang. (2018). Probing the swelling-dependent mechanical and transport properties of polyacrylamide hydrogels through AFM-based dynamic nanoindentation. *Soft Matter*. 14. 10.1039/C7SM02351K.
20. Shirinov ShD, Jalilov AT. *Universum: Chemistry and biology: electron. scientific. zhurn*. 2018;3 (45).
21. Russo Matthew & Warren Holly & Spinks, et al. (2018). Hydrogels Containing the Ferri/Ferrocyanide Redox Couple and Ionic Liquids for Thermocells. *Australian Journal of Chemistry*. 72. 10.1071/CH18395.
22. Lai Y, Hu Y. Probing the swelling-dependent mechanical and transport properties of polyacrylamide hydrogels through afm-based dynamic nanoindentation *Soft Matter*. 2018;14 10.1039/C7SM02351K.
23. Dehne H, Hecht F, Bausch A. The mechanical properties of polymer-colloid hybrid hydrogels. *Soft Matter* 2017;13:10.1039/C7SM00628D.
24. Zaitseva NM. Experimental determination of electrical resistivity. *Scientific problems of transport in Siberia and the Far East*. 2011;1:351–354.
25. Hannig M. *Calculation of the assembled grounding resistance from complex grounding systems by using analytical considerations onlty*. 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2018, doi: 10.1109/ICHVE.2018.8641921.

26. Unde MG, Kushare BE. Grounding grid performance of substation in two layer soil - a parametric analysis. *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies*. 2012;1(2):69-76. doi: 10.7323/ijeset/v1\_i2\_8.

27. Koliushko DG, Rudenko SS. Mathematical model of grounding connection of a power plant with under layer. *Electronic modeling*. 2014;36(2):89-97.

28 Jovanovic D, Cvetkovic N, Raicevic N, et al. (2016). Comparative analysis of plate and grid ground electrode characteristics as a part of grounding system. 2016 International Conference on Smart Systems and Technologies (SST) Published 2016 Engineering pp.35-40. 10.1109/SST.2016.7765628.

29. Chung seog Choi, Hyang Kon Kim, Hyoung Jun Gil, et al. The Potential Gradient of Ground Surface according to Shapes of Mesh Grid Grounding Electrode Using Reduced Scale Model”, *IEEJ Trans. on Power and Energy*. 2005;125(12):1170-1176.

30. Myint Su, Mon Hla, Khin Thidar; et al. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. Bhopal.2020;7:63.:28-35.

### **Authors of the publication**

**Mikhail A. Drako** – Scientific-Research Project Republican Unitary Enterprise, Minsk, Republic of Belarus.

**Siarhei M. Baraishuk** – Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus.

**Ivan A. Pavlovich** – Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus.

**Получено**

**10 февраля 2021г.**

**Отредактировано**

**26 февраля 2021г.**

**Принято**

**05 марта 2021г.**