

УДК 624.131.437.311

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ СВОЙСТВ ГРУНТА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ

Л.М. Веденева, А.В. Чудинов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29)

STUDY OF INFLUENCE OF THE MAIN GROUND PROPERTIES ON GROUNDING DEVICE RESISTIVITY

L.M. Vedeneva, A.V. Chudinov

Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskii av., Perm, 614990, Russian Federation)

Получена / Received: 27.06.2016. Принята / Accepted: 12.02.2017. Опубликовано / Published: 31.03.2017

Ключевые слова:

удельное электрическое сопротивление грунта, эквивалентное сопротивление грунта, вертикальный заземлитель, многослойный грунт, климатический коэффициент сезонности, проектирование заземляющих устройств, сопротивление заземляющего устройства, пористость грунта, геология.

Key words:

specific electrical resistance of ground, equivalent resistivity of ground, vertical grounding device, multilayer ground, seasonal climate coefficient, design of grounding devices, resistivity of grounding devices, ground porosity, geology.

Величина сопротивления заземляющего устройства зависит от удельного электрического сопротивления грунта, поэтому при проектировании заземляющих устройств необходимо учитывать слоистое строение грунта. В статье представлены результаты исследования влияния основных свойств грунтов: его структуры и состава; температуры и влажности, зависящих от климатических и погодных условий местности, времени года; пористости грунта; присутствия солей, щелочных и кислотных остатков; глубины залегания грунтовых вод – на величину их удельных электрических сопротивлений. На примере структуры грунтов северного и южного регионов Пермского края показана эффективность метода расчета заземлителей по верхнему и нижнему слоям грунта. Приведены результаты расчета в виде графических зависимостей сопротивления вертикального заземлителя от его длины в многослойном грунте. Для северных районов Пермского края использование упрощенных методик при расчете заземляющих устройств только по верхнему слою грунта приводит к существенным отклонениям расчетных значений от фактических. Выполнен анализ влияния климатических условий на удельное электрическое сопротивление грунта. Представлены результаты исследования влияния пористости горной породы на удельное электрическое сопротивление грунта на примере таких горных пород, как песок, песчаник и известняк. Показано, что удельное электрическое сопротивление в зависимости от разных значений пористости грунтов меняется в широких диапазонах: при больших значениях пористости грунта его удельное электрическое сопротивление резко снижается, так как поры могут заполняться жидкостью, при этом увеличивая проводимость грунта. Таким образом, в данной статье обоснован тезис о необходимости учета основных свойств грунта: слоистости, климатического коэффициента сезонности и пористости – при проектировании заземляющих устройств электроустановок для обеспечения условий электробезопасности. Кроме того, показано, что учет неоднородности земли значительно повышает точность расчета заземлителей и удешевляет их проектирование.

The value of resistivity of a grounding device depends on specific electrical resistance of ground, therefore, when designing grounding devices it is necessary to take into account layered structure of ground. The paper presents results of a study of influence of the main ground properties such as ground structure and composition, temperature and humidity, that depend on climatic and weather conditions of terrain and season, ground porosity, presence of salts, alkaline and acid residues, depth of occurrence of groundwater by the value of their specific electrical resistances. On example of ground structure of northern and southern areas of Perm region, effectiveness of a method for calculating grounders over the upper and lower layers of ground is shown. The results of calculations in a form of graphical functions of resistance of a vertical grounding device versus its length in a multilayered ground are given. For northern areas of Perm region the use of simplified techniques in calculation of grounding devices only over the upper layer of ground leads to significant deviations in calculated values from the actual ones. The effect of climatic conditions on specific electrical resistance of ground is analyzed. The results of study of influence of rock porosity on specific electrical resistance of ground are presented in example of such rocks as sand, sandstone and limestone. It is shown that specific electrical resistance varies depending on different values of ground porosity in wide ranges: at high values of ground porosity its specific electrical resistance decreases sharply due to the fact that pores can be filled with liquid while increasing conductivity of ground. Thus, this paper substantiates a thesis about the need to take into account basic properties of ground such as stratification, seasonal climate coefficient and porosity, when designing grounding devices of electrical units to ensure safe electrical conditions. In addition, it is shown that considering heterogeneity of the earth greatly improves accuracy of calculation of grounding devices and reduces cost of their design.

Веденева Людмила Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности (моб. тел.: +007 919 705 04 79, e-mail: bg@pstu.ru).
Чудинов Александр Валерьевич – студент (моб. тел.: +007 919 480 89 59, e-mail: aleksander.tchudinov@yandex.ru).

Liudmila M. Vedeneva – PhD in technical sciences, Associate Professor at the Department of Life Safety (mob. tel.: +007 919 705 04 79, e-mail: bg@pstu.ru).
Aleksandr V. Chudinov – student (mob. tel.: +007 919 480 89 59, e-mail: aleksander.tchudinov@yandex.ru).

Введение

Величина сопротивления заземляющего устройства зависит от удельного сопротивления грунта. Она определяет свойства грунта с точки зрения его электрической проводимости, и чем она меньше, тем меньше сопротивление растеканию, следовательно, благоприятнее условия для устройства заземления. В зависимости от состава (глина, известняк, песок), размеров и плотности прилегания друг к другу частиц, влажности и температуры, наличия растворимых химических веществ (кислот, щелочей, продуктов гниения и т.д.) удельное сопротивление грунтов изменяется в очень широких пределах. Наиболее важными факторами, влияющими на величину удельного сопротивления грунта, являются влажность и температура. В течение года в связи с изменением атмосферных и климатических условий содержание влаги в грунте изменяется, следовательно, изменяется и удельное сопротивление. Наиболее резкие колебания удельного сопротивления наблюдаются в верхних слоях земли, которые зимой промерзают, а летом высыхают. Из данных измерений следует, что при понижении температуры воздуха от 0 до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ удельное сопротивление грунта на глубине 0,3 м увеличивается в 10 раз, а на глубине 0,5 м – в 3 раза.

Зачастую при выполнении работ по проектированию заземляющих устройств учитывают удельное сопротивление только верхнего слоя грунта, поскольку оно оказывает основное влияние на величину сопротивления заземлителей. Для создания точной карты грунта необходимо провести большой объем геологических работ (буровые работы) и определить уровень залегания грунтовых вод, а также их общий уровень минерализации, показывающий количество содержащихся в воде растворенных веществ (неорганические соли, органические вещества), которые приводят к значительному увеличению проводимости грунтов. Во многих случаях при определении структуры грунта не выполняют буровые работы и не учитывают влияние грунтовых вод на его глубинные слои. При этом считают, что земля во всем объеме однородна и в любой точке обладает одинаковым удельным сопротивлением, в результате чего расчеты значительно упрощаются, что приводит к неоправданному завышению числа проектируемых заземлителей на объекте. В действительности грунт представляет собой неоднородную структуру из

чередующихся более или менее водопроницаемых слоев с различной пористостью, и вода довольно быстро дренируется вниз, до водоупорных слоев, что в значительной степени влияет на удельное сопротивление этих слоев грунта. Наименьший уровень подземных вод приходится на зимний период, когда из-за промерзания почвы грунт становится водонепроницаемым, а осадки выпадают в виде замерзших кристаллов воды, которые не растают до наступления тепла. Самый высокий уровень грунтовых вод отмечается весной, когда происходит таяние выпавших за зиму осадков. Верхний слой почвы становится пористым, из-за чего вся влага, образовавшаяся на поверхности, просачивается в нижние породы до водонепроницаемого слоя, что влечет за собой повышение уровня залегающих грунтовых вод. К водопроницаемым относятся песчаные грунты (супеси), а к водоупорным – глиняные (суглинки).

В действительности на объекте может оказаться несколько различных слоев грунта, имеющих не только разные уровни плотности, но и разные удельные электрические сопротивления, что, конечно, нельзя не учитывать при подборе и проектировании заземляющих устройств. Поэтому перед тем как проектировать заземляющее устройство, важно изучить карту геологического разреза грунтов данной местности.

Факторы, влияющие на величину сопротивления заземляющих устройств, ранее рассматривались в работах [1–9].

В работе [1] показаны методики расчета удельного электрического сопротивления водных растворов солей и горных пород, из которых видно, что удельное сопротивление грунта снижается при увеличении концентрации ионов растворов и химического состава растворенных солей. Горные породы проводят электрический ток в основном за счет наличия в их поровом пространстве водных растворов солей. Для неглинистых горных пород задается коэффициент пористости, который учитывает количество и характер распределения воды в породе. Для глинистых пород электропроводность определяется не только проводимостью воды, но и поверхностной проводимостью глинистых частиц, точнее, гидратационной пленки, покрывающей их поверхность. Учет влияния поверхностной проводимости глин на относительное сопротивление осуществляется

при помощи коэффициента поверхностной проводимости.

В статье [2] рассмотрены проблемы, возникающие при эксплуатации заземлений установок связи, связанных как с изменениями температуры и влажности среды, окружающей заземлителя, так и с амплитудой, частотой и формой тока, протекающего через заземление. При изменении температуры и влажности грунта и при применении веществ, вносимых в окружающий грунт для снижения сопротивления, возникают проблемы, связанные с концентрацией ионов в растворе и с необходимостью их периодического возобновления, а также с коррозией заземлителя.

В работе [3] приведено описание устройства для вертикального электрического зондирования земли с целью повышения точности измерения в местах с местными поверхностными включениями с удельным электрическим сопротивлением, отличным от удельного электрического сопротивления земли.

В статье [4] проведен анализ погрешностей расчета сопротивления заземляющих устройств, вызванных несовершенством существующих вычислительных алгоритмов. Для заземлителей, расположенных в многослойной земле, представлены эмпирические формулы приведения многослойной земли к однородной. Формулы являются обобщением результатов расчетов, проведенных с помощью специальных программ.

В статье [5] осуществлено определение глубины зондирования в двухслойном грунте. Получено оптимальное значение глубины зондирования, равное двум диагоналям заземляющего устройства. Глубина зондирования может быть и большей, но при этом точность расчетов увеличивается лишь на несколько процентов.

Учет неоднородности земли значительно повышает точность расчета заземлителей и удешевляет их проектирование. В последнее время применяется метод расчета заземлителей, при котором условно земля имеет два слоя – верхний и нижний, обладающих каждый своим удельным сопротивлением ρ_1 и ρ_2 и толщиной h_1 и h_2 [5, 10–13].

В настоящей работе при расчете сопротивления заземлителя было принято допущение: земля, в которой расположен заземлитель, является бесконечным полупространством, состоящим из произвольного числа n слоев. Толщина каждого слоя конечна.

В пределах каждого i -го слоя удельное сопротивление земли постоянно и равно ρ_i . Поверхность земли и границы раздела между слоями горизонтальны [10].

Конфигурация заземлителя выбирается на основании возможности ее применения на конкретном объекте. Особенно при строительстве чаще всего используются вертикальные заземляющие электроды. Это связано с тем, что горизонтальные электроды трудно заглубить на большую глубину, а при малой глубине таких электродов значительно увеличивается сопротивление заземления в зимний период из-за замерзания верхнего слоя грунта. Гораздо эффективнее в качестве заземлителя применять глубокий электрод (чаще всего одиночный) в виде стержня или стальной трубы, размещенный в пробуриваемом в грунте отверстии. При увеличении длины электрода достигается большая площадь контакта заземлителя с грунтом (создаются благоприятные условия для перехода тока в грунт), а также при значительном заглублении заземлителя достигаются глубинные слои, насыщенные водой, с более низким удельным электрическим сопротивлением [10, 11, 13, 14].

Изначально было рассчитано сопротивление одиночного заземлителя по упрощенной методике (однородный грунт, по верхнему слою) по формуле для вертикального заземлителя

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right), \quad (1)$$

где ρ – удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м; l – длина заземлителя, м; d – диаметр вертикального заземлителя (в соответствии с таблицей 1.7.4 ПУЭ «Наименьшие размеры заземлителей и заземляющих проводников, проложенных в земле», $d > 12$ мм), $d = 0,02$ м; $t = t_0 + 0,5l$, где t – расстояние от поверхности земли до середины стержня, t_0 – заглубление заземлителя [10].

Приведение многослойной земли к двухслойной производится путем отнесения к верхнему слою тех слоев, у которых $\rho_{h,расч}$ имеет большие значения, а к нижнему слою – тех, у которых $\rho_{h,расч}$ имеет малые значения. При этом расчетные удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев двухслойной земли $\rho_{1,расч}$ и $\rho_{2,расч}$, Ом·м, определяются уравнением

$$\rho_{1\text{расч}} = \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_k}{h_1 / \rho_1 + h_2 / \rho_2 + \dots + h_k / \rho_k}. \quad (2)$$

$$\rho_{2\text{расч}} = \frac{h_{k+1} + h_{k+2} + \dots + h_n}{h_{k+1} / \rho_{k+1} + h_{k+2} / \rho_{k+2} + \dots + h_n / \rho_n}. \quad (3)$$

Здесь индексы от 1 до k обозначают номера слоев, вошедших в верхний слой двухслойной земли, от $(k+1)$ до n – вошедшие в нижний слой.

При приведении двухслойной земли к однослойной используем формулу

$$\rho_3 = \frac{l}{\Delta l_1 / \rho_1 + \Delta l_2 / \rho_2}, \quad (4)$$

где $\Delta l_1, \Delta l_2$ – длины частей электрода в верхнем и нижнем слое соответственно, ρ_1, ρ_2 – эквивалентные удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев [10].

Характеристика грунтов севера и юга Пермского края

В геоструктурном отношении край делится на две неравные по площади части: большую западную – Предуралье, характеризующуюся платформенным залеганием палеозойских и мезозойских отложений различного генезиса и мощности, и меньшую – Урал, представленную интенсивно дислоцированными породами палеозоя и протерозоя. Кайнозойские образования представлены преимущественно рыхлыми породами четвертичной системы континентального происхождения и очень небольшими по площади «островками» отложений неогенового возраста [15–17].

В северной части Пермского края распространены ледниковые отложения среднеплейстоценового возраста фрагментарно (бассейны рек Косы, Уролки, Кондаса). Представлены они суглинками, глинами, супесями, слагавшими в свое время днепровскую морену. В составе валунно-галечникового материала встречаются песчаники, кварциты, кремни, сланцы, известняки, доломиты, иногда даже метаморфические и изверженные породы уральского и кольского происхождения. Характерным признаком ледниковых отложений является их высокая плотность и неоднородность состава. Мощность пород – 3–5 м.

В центральной и южной части равнинного Прикамья распространены делювиальные и делювиально-солифлюкционные отложения, представляющие шлейфы рыхлых пород. Обязанные своим происхождением подстилающим их коренным породам, делювиальные

отложения по составу варьируются от песков и галечников – продуктов разрушения соответственно песчаников и конгломератов, до глин и суглинков – продуктов разрушения аргиллитов, алевролитов, доломитов и др. В средней и верхней частях разреза в суглинках довольно часто наблюдаются прослои погребенных древних почв и (или) щебня. Мощность отложений – до 15 м [15, 16, 18].

Для расчета сопротивления одиночного заземлителя сделан выбор структуры грунта для северной и южной частей Пермского края, который представлен в табл. 1.

Таблица 1

Структура грунта Пермского края

Слой	Состав слоя	h , м	ρ , Ом·м
<i>Северная часть</i>			
Верхний	Песок	1	600
	Супесь	2	300
Нижний	Суглинок	1	100
	Глина	3	40
	Песчаники	10	1000
<i>Южная часть</i>			
Верхний	Суглинок	2	100
	Песок	1	300
	Глина	1	40
	Песок	1	200
	Глина	1	40
Нижний	Известняк рыхлый	10	300

Значения удельных электрических сопротивлений выбраны согласно рекомендуемым значениям удельных электрических сопротивлений верхнего слоя земли (глубиной до 50 м) [11, табл. 3.7].

В упрощенной методике сопротивление заземлителя рассчитывается по верхнему слою: для севера $\rho_{\text{эkv}} = 600$ Ом·м, для юга – 100 Ом·м.

Отклонение сопротивления одиночного вертикального заземлителя вычисляется по формуле

$$\theta = \frac{R_{\text{упр}} - R_{\text{слож}}}{R_{\text{упр}}} 100\%, \quad (5)$$

где $R_{\text{слож}}$ – сопротивление заземлителя, рассчитанное по удельным сопротивлениям верхнего и нижнего слоев, Ом; $R_{\text{упр}}$ – сопротивление заземлителя, рассчитанное по верхнему слою грунта, Ом.

На рис. 1 представлены графики зависимости сопротивления вертикального заземлителя от его длины, рассчитанные для северной и южной частей Пермского края по упрощенной (по верхнему слою) и сложной методике (по верхнему и нижнему слою грунтов).

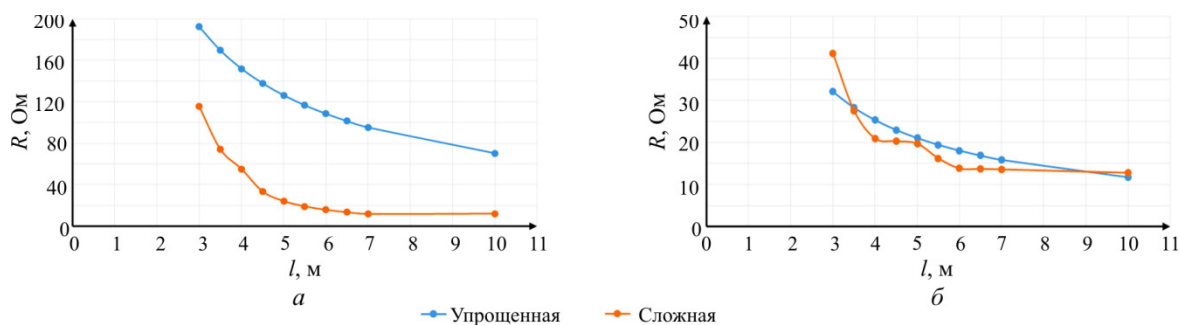


Рис. 1. График зависимости сопротивления заземлителя от его длины, рассчитанный для северной (а) и южной (б) частей Пермского края

Как видно из представленных графиков, пренебрежение учетом слоистости и характеристик грунтов при расчете сопротивлений заземляющих устройств и использование упрощенных методик ведет к существенным отклонениям (40–87 %) этих сопротивлений от фактических значений для северной части Пермского края и значительно меньшим отклонениям (6–20 %) для южной. Поэтому для южной части региона могут использоваться с достаточной степенью достоверности упрощенные методики расчета сопротивления заземлителя по верхнему слою грунта, что недопустимо для северной части региона.

В восточной части региона находится горный массив – Уральские горы, к нему с запада прилегает Русская платформа. Погружение кристаллического фундамента происходит на глубину до 6–8 км (в центре и на западной периферии региона – 2–3 км). Урал отличается от Предуралья выходом дислоцированных, смятых в складки горных пород, возрастом – начиная от верхнего протерозоя до нижнепермских включительно. Нижний протерозой представлен кварцитами, сланцами, кварцевыми порфирами, глинистыми сланцами, песчаниками, известняками, доломитами, гематитовыми сланцами. Мощность отложений – свыше 6000 м. Вторым не менее важным моментом влияния Урала на формирование восточной окраины Русской платформы – «уральское» происхождение рыхлого материала, слагающего толщи осадочного чехла [15].

Таким образом, в восточной части региона в земле находятся горные породы, обладающие высоким удельным сопротивлением. Нижние слои грунта (каменистые грунты) имеют более высокое удельное сопротивление, которое необходимо учитывать.

Западная часть Пермского края (80 % территории) расположена на окраине Восточно-

Европейской равнины, где преобладает низменный и равнинный рельеф. Как таковой слоистости нет, поэтому пригодны упрощенные методики расчета сопротивления заземлителя по верхнему слою грунта [15].

Удельное сопротивление грунта с учетом климатического коэффициента сезонности

Удельное сопротивление верхних слоев земли колеблется в течение года в связи с изменением погодных условий, влекущих за собой изменение температуры грунта, содержания влаги и солей в нем и т.д. Толщина слоя земли, подверженного сезонным изменениям, называется слоем сезонных изменений и обозначается h_c . Как правило, верхний слой подвержен воздействию погодных условий и его удельное сопротивление ρ_1 имеет значительные сезонные колебания, которые необходимо учитывать при проектировании заземляющих устройств. Обычно снижение сопротивления грунта происходит в весенние и осенние месяцы, когда увеличивается содержание влаги в почве. Увеличение сопротивления грунта происходит зимой и летом вследствие замерзания и испарения влаги. Установлено, что для обеспечения условий электробезопасности при проектировании заземляющего устройства необходимо брать наибольшее возможное удельное сопротивление в течение года [5].

Формула для расчетного значения удельного сопротивления для однородной земли

$$\rho_{\text{расч}} = \rho_{\text{грунта}} \cdot \psi, \quad (6)$$

где $\rho_{\text{грунта}}$ – удельное сопротивление грунта, полученное из справочной литературы; ψ – климатический коэффициент сезонности для данной местности, зависящий от средней многолетней нижней температуры (январь) и средней многолетней верхней температуры (июль).

Для неоднородной земли влиянию погодных условий подвергаются те слои, которые лежат в пределах толщины слоя сезонных изменений h_c , м (только в этой зоне меняется $\rho_{расч}$).

Был определен климатический коэффициент сезонности для города Соликамска на севере Пермского края. Средняя многолетняя низшая температура января равна $-19,7$ °С. Средняя многолетняя высшая температура июля составляет $17,8$ °С. Таким образом, Соликамск можно отнести к первой климатической зоне. Для электродов длиной 3,0–4,5 м $\psi = 1,65$; для 5 м – 1,35. Толщина слоя сезонных изменений $h_c = 2,2$ м.

Был определен климатический коэффициент сезонности для города Чернушки на юге Пермского края. Средняя многолетняя низшая температура января равна $-19,1$ °С. Средняя многолетняя высшая температура июля составляет $24,4$ °С. Таким образом, город Чернушку можно отнести ко второй климатической зоне. Для электродов длиной 3,0–4,5 м $\psi = 1,45$; для 5 м – 1,25. Толщина слоя сезонных изменений $h_c = 2,0$ м [19, 20].

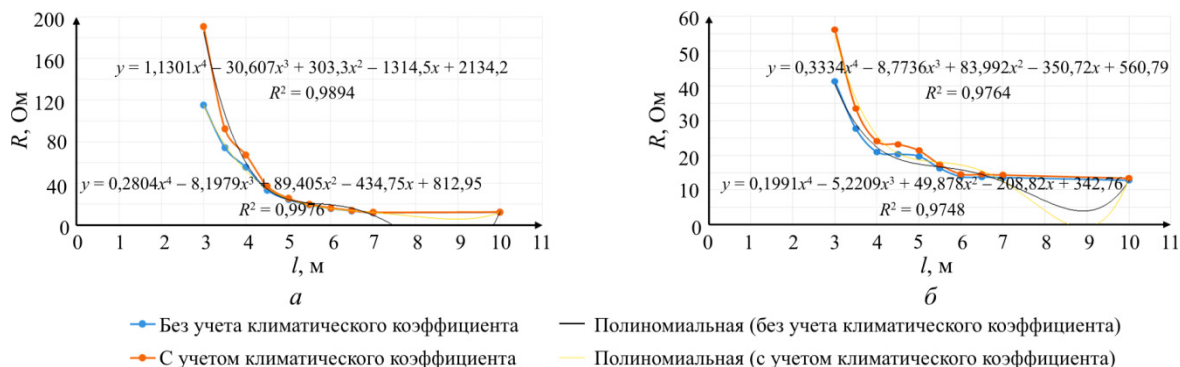


Рис. 2. График зависимости сопротивления заземлителя от его длины, рассчитанный для северной (а) и южной (б) частей Пермского края с учетом климатического коэффициента

Отклонение сопротивления одиночного вертикального заземлителя с учетом климатического коэффициента сезонности вычисляется по формуле

$$\theta = \frac{R_{(\psi)} - R_0}{R_{(\psi)}} 100\%, \quad (8)$$

где R_0 – рассчитанное значение сопротивления заземлителя без учета климатического коэффициента; $R_{(\psi)}$ – рассчитанное значение сопротивления заземлителя с учетом климатического коэффициента.

Таким образом, сопротивление заземлителя увеличивается при учете климатического

При приведении двухслойной земли учитываем ψ :

$$\rho_3 = \frac{l}{\frac{\Delta l_1}{\rho_1 \cdot \psi} + \frac{\Delta l_2}{\rho_2}}, \quad (7)$$

где ψ влияет только на эквивалентное удельное сопротивление верхнего слоя.

В упрощенной методике сопротивление заземлителя рассчитывается по верхнему слою: для севера при длине заземлителя до 5 м $\rho_{экр} = 990$ Ом·м, при длине заземлителя более 5 м $\rho_{экр} = 810$ Ом·м. Для юга при длине заземлителя до 5 м $\rho_{экр} = 145$ Ом·м, при длине заземлителя более 5 м $\rho_{экр} = 125$ Ом·м. Отклонение сопротивления одиночного вертикального заземлителя вычисляется по формуле (5). Длина заземлителя изменялась от 3 до 10 м.

На рис. 2 представлены графики зависимости сопротивления вертикального заземлителя от его длины, рассчитанные для северной и южной частей Пермского края по сложной методике (по верхнему и нижнему слою грунтов) без учета и с учетом климатического коэффициента.

коэффициента сезонности в среднем для севера на 21 % и для юга на 17,3 % (табл. 2). С увеличением длины вертикального заземлителя климатический коэффициент все меньше влияет на эквивалентное сопротивление заземлителя, так как подвержен сезонным изменениям только верхний слой грунта.

Учет влияния грунтовых вод на удельное сопротивление грунта и сопротивление заземлителя

Недра Пермского края весьма богаты подземными водами, чему способствует геологическое строение региона – переслаивание

водоносных и водоупорных горизонтов, а также значительная расчлененность рельефа, обеспечивающая пополнение запасов подземных вод. Подземные воды – единственный источник питания рек зимой и в засушливые летние периоды. В годовом стоке рек их доля составляет 20–25 %, а в карстовых районах возрастает до 30–40 %. Следовательно, учет подземных вод является очень важным при проектировании заземлителей в Пермском крае [15].

Таблица 2

Отклонение сопротивления R заземлителя без учета и с учетом климатического коэффициента сезонности, %, рассчитанные по упрощенной и сложной методикам

$l, \text{ м}$	Север края		Юг края	
	Упрощенная	Сложная	Упрощенная	Сложная
3	39,4	39,4	31,0	26,6
3,5	39,4	19,7	31,0	17,3
4	39,4	17,9	31,0	12,8
4,5	39,4	10,6	31,0	12,2
5	25,9	5,0	20,0	7,5
5,5	25,9	3,9	20,0	6,1
6	25,9	3,2	20,0	5,1
6,5	25,9	2,7	20,0	5,0
7	25,9	2,3	20,0	4,9
10	25,9	2,2	20,0	4,4
Среднее значение	31,3	10,7	24,4	10,2

Западная и центральная части региона представляют собой всхолмленную равнину, которая плавно повышается в восточном и южном направлениях. Равнинная часть Пермского края имеет высоту главным образом от 200 до 400 м над уровнем моря. Здесь горные породы, слагающие водоносные горизонты и комплексы, содержат трещинно-карстовые и трещинно-грунтовые воды и характеризуются в целом сравнительно низкой водообильностью. Исключение составляют карбонатные комплексы иренской и соликамской свит, широко распространенные в пределах Уфимского вала и Соликамской впадины.

На севере среди трещиноватых нижнепермских пород наиболее водоносными являются песчаники и известняки, воды которых вскрываются в долинах рек и оврагов большим количеством нисходящих и восходящих источников. Глубина залегания вод от поверхности составляет 5–10 м.

На самом юге края – на водоразделах рек Камы и Буя, а также в долине реки Пизь,

получил распространение комплекс отложений верхнего плиоцена и плейстоцена, представленный глинистыми и песчано-галечными осадками озерного и аллювиального генезиса. Водовмещающими породами служат галечники, пески, супеси. Глубина залегания грунтовых вод от поверхности земли составляет от 0,5 до 5,0 м [15, 18].

Особенные условия существования грунтовых вод в толщах рыхлых пород заставляют нас прежде всего остановиться на некоторых физических свойствах этих грунтов, влияющих на их удельное электрическое сопротивление. Среди этих свойств особенное значение имеют: пористость пород, их влагоемкость, капиллярные свойства и водопроницаемость. Большинство слоев грунтов имеет пористую структуру. Под пористостью горной породы понимают наличие в ней пор (пустот – пор, каверн, трещин). Пористость характеризует способность горной породы вмещать жидкости и газы.

Удельное электрическое сопротивление водосодержащих пород можно сопоставить с содержанием воды, используя эмпирическую формулу

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot \Phi^{-m} \cdot S^{-n},$$

где ρ_w – удельное электрическое сопротивление содержащейся в породе воды; Φ – значение пористости горной породы; S – доля порогового объема, заполненного водой; n – пористость (эмпирический коэффициент, который меняется); a, m – эмпирические параметры, принятые по табл. 3.4 [11]. Параметр m принимает значения от 1,3 для рыхлого песка до 2,5 для плотно сцементированной зернистой породы. Пористость грунта не является постоянной величиной и зависит от плотности его укладки. Пористость отдельной горной породы изменяет значение в диапазоне от 6 до 52 % для песка, от 3,5 до 29 % для песчаника, от 5 до 33 % для известняка, от 6 до 50 % для глины [21].

Было проведено исследование влияния пористости горной породы на удельное электрическое сопротивление грунта для различных регионов Пермского края на примере таких горных пород, как песок, песчаник и известняк. В табл. 3 представлены значения пористости грунтов Φ и коэффициентов a, m для водонасыщенных пород [11, табл. 3.4].

Таблица 3

Значение пористости Φ и коэффициентов a, m для водонасыщенных пород

Горная порода	Φ	a	m
Песок	0,25	0,62	2,15
Песчаник	0,14	0,62	2,1
Известняк	0,13	2,2	1,65

Удельное электрическое сопротивление воды в зависимости от степени минерализации изменяется от 30 до 100 Ом·м, в расчетах принято среднее значение 50 Ом·м.

Для определения доли порогового объема, заполненного водой, необходимо воспользоваться методикой, представленной в [22].

Задавшись пористостью и объемом грунта $V_{гр} = 200 \text{ м}^3$ (например, при проектировании заземляющего устройства, заземлители которого расположены по периметру здания), производим необходимые расчеты для анализа влияния пористости горных пород на удельное электрическое сопротивление грунтов.

ρ_s – отношение массы сухого грунта (исключая массу воды в его порах) к объему твердой части этого грунта; принимается по таблице 1.2 [22] для песка $\rho_s = 2660 \text{ кг/м}^3$, для песчаника $\rho_s = 2320 \text{ кг/м}^3$, для известняка $\rho_s = 2600 \text{ кг/м}^3$.

ρ_w – отношение массы влажного грунта (исключая массу воды в его порах) к объему грунта; для песка $\rho_w = 1920 \text{ кг/м}^3$, для песчаника $\rho_w = 1450 \text{ кг/м}^3$, для известняка $\rho_w = 1400 \text{ кг/м}^3$.

Плотность сухого грунта (отношение массы сухого грунта (исключая массу воды в его порах) к занимаемому этим грунтом объему (включая имеющиеся в этом грунте поры)) определяется по формуле

$$\rho_d = (1 - n)\rho_s.$$

Объем твердой части грунта находим по формуле

$$V_{ТВ} = (1 - n)V_{гр}.$$

Объем влажной части грунта рассчитываем по формуле:

$$V_{ВЛ} = V_{гр} - V_{ТВ}.$$

Масса сухой части грунта составляет

$$m_{сух.гр} = \rho_d \cdot V_{ТВ},$$

масса влажной части грунта

$$m_{ВЛ.гр} = \rho_w \cdot V_{ВЛ}.$$

Масса грунта равна

$$m = m_{сух.гр} + m_{ВЛ.гр}.$$

Эквивалентное сопротивление грунта

$$\rho_{эКВ} = \frac{V_{ТВ}}{m}.$$

Влажность грунта определяется как

$$w = \frac{\rho_{эКВ} - \rho_d}{\rho_d}.$$

Пористость не дает исчерпывающей характеристики состояния грунта, поэтому при расчетах пользуются показателем плотности грунта – коэффициентом пористости: отношение объема пор в образце к объему, занимаемому его твердыми частицами – скелетом: $e = \frac{n}{100 - n}$.

Коэффициентом водонасыщенности, или степенью влажности грунта, называется отношение природной влажности грунта w к влажности, соответствующей полному заполнению пор водой,

$$S_r = \frac{w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w}.$$

Полная влагоемкость грунта определяется по формуле

$$w_0 = \frac{e \cdot \rho_w}{\rho_s}.$$

Величины пористости и дополнительный коэффициент пористости определяют структуру грунта. Характеристикой влажности грунта является его весовая пористость, т.е. состояние когда поры полностью заполнены водой. Пористость, не будучи расчетной величиной, используется как важная вспомогательная величина при расчетах [11].

При изменении объема твердой части грунта меняется доля порогового объема, заполненного водой, а сам объем грунта не меняется. Расчет удельного электрического сопротивления песка с учетом влияния пористости горной породы представлен в табл. 4.

Таблица 4

Расчет удельного электрического сопротивления песка с учетом влияния пористости

n	ρ_d , кг/м ³	$V_{тв}$, м ³	$m_{сух.гр}$, кг	m , кг	$\rho_{эКВ}$	w	e	S_r	ρ , Ом·м
0,06	2500,4	188	470075,2	493115,2	2623,0	0,05	0,0006	113,1	459,8
0,08	2447,2	184	450284,8	481004,8	2614,2	0,07	0,0008	118,1	416,9
0,1	2394	180	430920	469320	2607,3	0,09	0,0010	123,3	377,3
0,12	2340,8	176	411980,8	458060,8	2602,6	0,11	0,0012	129,0	340,8
0,14	2287,6	172	393467,2	447227,2	2600,2	0,14	0,0014	135,0	307,3
0,16	2234,4	168	375379,2	436819,2	2600,1	0,16	0,0016	141,5	276,5
0,18	2181,2	164	357716,8	426836,8	2602,7	0,19	0,0018	148,5	248,3
0,2	2128	160	340480	417280	2608,0	0,23	0,0020	155,9	222,4
0,22	2074,8	156	323668,8	408148,8	2616,3	0,26	0,0022	164,0	198,8
0,24	2021,6	152	307283,2	399443,2	2627,9	0,30	0,0024	172,7	177,4
0,26	1968,4	148	291323,2	391163,2	2643,0	0,34	0,0026	182,1	157,8
0,28	1915,2	144	275788,8	383308,8	2661,9	0,39	0,0028	192,4	140,0
0,3	1862	140	260680	375880	2684,9	0,44	0,0030	203,5	123,9
0,32	1808,8	136	245996,8	368876,8	2712,3	0,50	0,0032	215,6	109,4
0,34	1755,6	132	231739,2	362299,2	2744,7	0,56	0,0034	228,8	96,3
0,36	1702,4	128	217907,2	356147,2	2782,4	0,63	0,0036	243,3	84,5
0,38	1649,2	124	204500,8	350420,8	2826,0	0,71	0,0038	259,2	73,9
0,4	1596	120	191520	345120	2876,0	0,80	0,0040	276,7	64,4
0,42	1542,8	116	178964,8	340244,8	2933,1	0,90	0,0042	296,0	56,0
0,44	1489,6	112	166835,2	335795,2	2998,2	1,01	0,0044	317,5	48,4
0,46	1436,4	108	155131,2	331771,2	3072,0	1,14	0,0046	341,4	41,7
0,48	1383,2	104	143852,8	328172,8	3155,5	1,28	0,0048	368,0	35,8
0,5	1330	100	133000	325000	3250,0	1,44	0,0050	398,0	30,6
0,52	1276,8	96	122572,8	322252,8	3356,8	1,63	0,0052	431,8	26,0

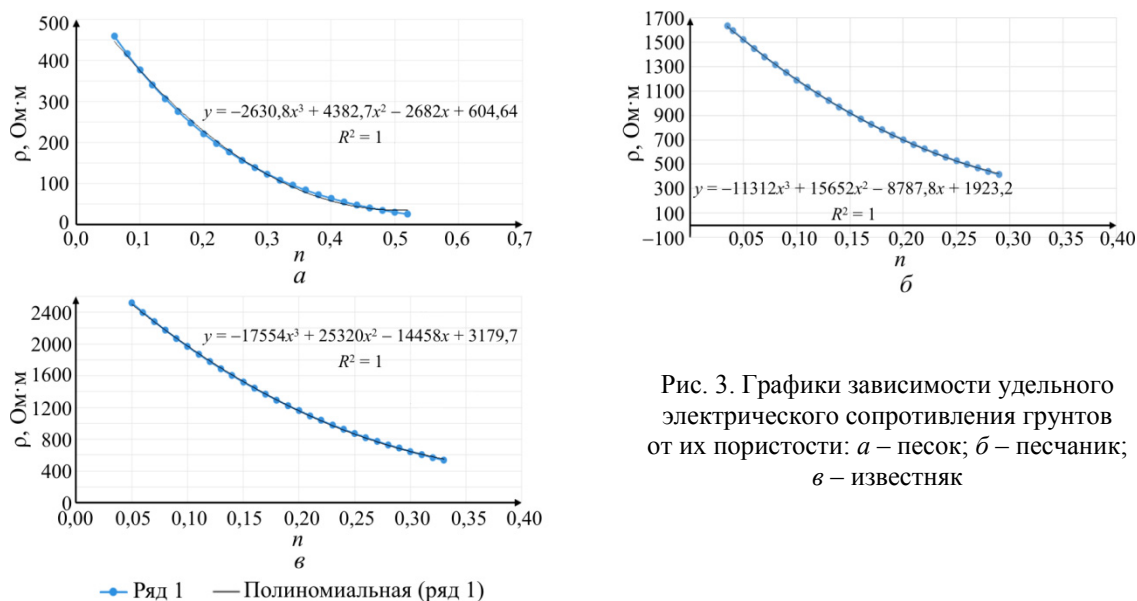


Рис. 3. Графики зависимости удельного электрического сопротивления грунтов от их пористости: а – песок; б – песчаник; в – известняк

Аналогично выполнены расчеты для песчаника и известняка в диапазоне изменения их пористости.

На рис. 3 приведены зависимости удельных электрических сопротивлений грунтов (песка, известняка и песчаника) от его пористости.

Таким образом, согласно графикам на рис. 3, удельное электрическое сопротивление в зависимости от разных значений пористости меняется в широких диапазонах (табл. 5).

Данными графиками удобно пользоваться при проектировании заземляющих устройств: при больших значениях пористости грунта его удельное электрическое сопротивление резко снижается, так как поры могут заполняться водой, при этом увеличивается их проводимость.

При изменении значений пористости от минимального до максимального в наибольшее число раз уменьшилось удельное электрическое сопротивление песка (в 17,68 раза), а по

Таблица 5
Пределы изменения удельного
электрического сопротивления грунта
в зависимости от его пористости

Горная порода	n_{\min} , %	n_{\max} , %	ρ_{\max} , Ом·м	ρ_{\min} , Ом·м	Отклонение по величине, Ом·м	Отклонение, число раз
Песок	6	52	459,8	26,0	433,8	17,68
Песчаник	3,5	29	1634,6	415,5	1219,1	3,93
Известняк	5	33	2518,7	535,9	1982,8	4,69

величине – известняка (на 1982,8 Ом·м). При заполнении пор горной породы нефтью существенно снижается ее проводимость, увеличивается ее удельное сопротивление, что приводит к значительному увеличению сопротивлений заземляющих устройств при высоких уровнях пористости.

Выводы

На основании проведенных исследований показано, что при проектировании заземляющих устройств необходимо учитывать основные свойства грунтов: их слоистость, пористость и климатическую зону, в которой проектируется заземляющее устройство. Использование упрощенных методик для расчета заземляющих устройств приводит к существенным отклонениям расчетных значений сопротивлений от фактических.

Библиографический список

1. Нестеров С.В. Применение интегральных уравнений для расчета заземлителя произвольной конфигурации в неоднородном грунте // Вторая рос. конф. по заземляющим устройствам: сб. докл. – Новосибирск: СЭА, 2005. – С. 51–58.
2. Шишкин С.А. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств // Сб. докл. третьей рос. конф. по заземляющим устройствам. – Новосибирск, 2008. – С. 29–38.
3. Халин Е.В., Коструба С.И. Устройство для вертикального электрического зондирования земли: пат. Рос. Федерация № 2208804; зарег. 07.05.2002.
4. Колечицкий Е.С. Оценки сопротивления заземляющих устройств в двухслойном грунте // Известия Акад. электротехн. наук РФ. – 2010. – № 2. – С. 25–32.
5. Агеева Л.А. Определение электрических характеристик двухслойных грунтов при проектировании заземляющих устройств // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. тр. конф. – Новосибирск, 2015. – С. 400–403.
6. Electrical and thermal behavior of unsaturated soils: experimental results / M. Nouveau, G. Grandjean, P. Leroy, M. Philippe, E. Hedri, H. Boukcim // Journal of

Выявлено, что наиболее эффективным является расчет сопротивления заземлителей с учетом многослойности грунта, изменений погодных условий и уровня залегания грунтовых вод. Показано, что при проектировании заземляющих устройств необходимо учитывать климатический коэффициент сезонности для того, чтобы сопротивление заземляющего устройства при худших условиях не превышало допустимых значений, регламентированных нормативными документами, и обеспечивались условия электробезопасности: значения напряжения прикосновения и напряжения шага находились в пределах допустимых значений.

В работе показано существенное влияние пористости грунтов на величину удельного электрического сопротивления горной породы. При высокой степени минерализации увеличивается проводимость горных пород за счет увеличения концентрации ионов растворов и химического состава растворенных солей. Пределы изменения электрических сопротивлений горных пород в зависимости от их пористости могут изменяться более чем в 17 раз (песок). Поэтому перед проектированием заземляющих устройств необходимо знать климатические условия района и структуру грунтов данной местности с уровнем залегания грунтовых вод.

Applied Geophysics. – 2016. – 128. – P. 115–122. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.03.019

7. The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems / V.L. Coelho, A. Piantini, H.A.D. Almaguer, R.A. Coelho, Boaventura Wallace do C., J.O.S. Paulino // The Lightning Flash and Lightning Protection (SIPDA 2013), Electric Power Systems Research. – 2015. – 118. – P. 76–82. DOI: 10.1109/SIPDA.2013.6729191

8. Mohamad Nor N., Rajab R., Othman Z. Validation of the earth resistance formulae using computational and experimental methods for gas insulated sub-station (GIS) // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. – 2012. – 43 (1). – P. 290–294. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.04.056

9. Vujevic S., Sarajcev P., Lovric D. Time-harmonic analysis of grounding system in horizontally stratified multilayer medium // Electric Power Systems Research. – 2012. – 83 (1). – P. 28–34. DOI: 10.1016/j.epsr.2011.09.008

10. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

11. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок: справочник. – М.: Энергосервис, 2006. – 523 с.

12. Mohamad N., Rajab R., Ramar K. Validation of the calculation and measurement techniques of earth resistance values // *American Journal of Applied Sciences*. – 2008. – Vol. 5, iss. 10. – pp. 1313-1317. DOI: 10.3844/ajassp.2008.1313.1317

13. Рожанков А.В. Заземление. Что это такое и как его сделать. Ч. 1. Раздел В: заземление (общая информация, термины и определения) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.pvsm.ru/e-nergiya-i-elementy-pitaniya/8190> (дата обращения: 04.03.2016).

14. Горшков А.В. Оценка сопротивления заземлителя подстанции в многослойном грунте // *Электричество*. – 2014. – № 2. – С. 25–31.

15. Назаров Н.Н. География Пермского края. Ч. 1. Природная (физическая география): учеб. пособие. – Пермь, 2006. – 139 с.

16. Карта почв Пермского края [Электронный ресурс]. – URL: <http://gnilomedova.59313s016.edusite.ru/p7aa1.html> (дата обращения: 04.03.2016).

17. Плеханов М.С. Гидрогеология Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками. – 2015. – № 2. – С. 105–127.

18. Власов М.Н. Учебная практика по почвоведению: учеб.-метод. пособие / Перм. гос. сельхоз. акад. – Пермь, 2013. – 122 с.

19. Климатический график Соликамска и Чернушки [Электронный ресурс]. – URL: <http://ru.climate-data.org/> (дата обращения: 04.03.2016).

20. Погода в Соликамске и Чернушке [Электронный ресурс]. – URL: <http://russia.pogoda360.ru/> (дата обращения: 04.03.2016).

21. Консультации по геологии. Пористость грунтов [Электронный ресурс]. – URL: <http://sprosigologa.ru/opredelenie-svoystv-gruntov/poristost-grunta/> (дата обращения: 25.04.2016).

22. Сорочан Е.А., Трофименков Ю.Г. Основания, фундаменты и подземные сооружения. Справочник проектировщика. – М.: Стройиздат, 1985. – 480 с.

References

1. Nesterov S.V. Primenenie integral'nykh uravnenii dlia rascheta zazemlitel'ia proizvol'noi konfiguratsii v neodnorodnom grunte [Application of integral equations for the calculation of a ground plane of arbitrary configuration in an inhomogeneous soil]. *Sbornik dokladov vtoroi rossiiskoi konferentsii po zazemliushchim ustroistvam*. Novosibirsk, SEA, 2005, pp.51-58.

2. Shishkin S.A. Matematicheskie modeli i metody rascheta zazemliushchikh ustroistv [Mathematical models and methods for calculating grounding devices]. *Sbornik dokladov tret'ei rossiiskoi konferentsii po zazemliushchim ustroistvam*. Novosibirsk, 2008, pp.29-38.

3. Khalin E.V., Kostruba S.I. Ustroistvo dlia vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniia zemli [Device for vertical electric earth sounding]. Pat. Rossiiskaia Federatsiia no.2208804, 2002.

4. Kolechitskii E.S. Otsenki soprotivleniia zazemliushchikh ustroistv v dvukhsloinnoy grunte [Estimates of the resistance of grounding devices in a two-layer soil]. *Izvestiia Akademii elektrotekhnicheskikh nauk Rossiiskoi Federatsii*, 2010, no.2, pp.25-32.

5. Ageeva L.A. Opredelenie elektricheskikh kharakteristik dvukhsloinnykh gruntov pri proektirovaniia zazemliushchikh ustroistv [Determination of electrical characteristics of two-layer soils when designing earthing devices]. *Elektroenergetika glazami molodezhi. Sbornik trudov konferentsii*, Novosibirsk, 2015, pp.400-403.

6. Nouveau M., Grandjean G., Leroy P., Philippe M., Hedri E., Boukcim H. Electrical and thermal behavior of unsaturated soils: experimental results. *Journal of Applied Geophysics*, 2016, 128, pp.115-122. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2016.03.019

7. Coelho V.L., Piantini A., Almaguer H.A.D., Coelho R.A., Boaventura Wallace do C., Paulino J.O.S. The

influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems. *The Lightning Flash and Lightning Protection (SIPDA 2013), Electric Power Systems Research*, 2015, 118, pp. 76-82. DOI: 10.1109/SIPDA.2013.6729191

8. Mohamad Nor N., Rajab R., Othman Z. Validation of the earth resistance formulae using computational and experimental methods for gas insulated sub-station (GIS). *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2012, 43(1), pp.290-294. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.04.056

9. Vujevic S., Sarajcevic P., Lovric D. Time-harmonic analysis of grounding system in horizontally stratified multilayer medium. *Electric Power Systems Research*, 2012, 83(1), pp.28-34. DOI: 10.1016/j.epsr.2011.09.008

10. Dolin P.A. Osnovy tekhniki bezopasnosti v elektroustanovkakh [Basics of safety in electrical installations]. Moscow, Energoatomizdat, 1984, 448 p.

11. Kariakin R.N. Zazemliushchie ustroistva elektroustanovok: spravochnik [Grounding devices for electrical installations: reference book]. Moscow, Energoservis, 2006, 523 p.

12. Mohamad N., Rajab R., Ramar K. Validation of the calculation and measurement techniques of earth resistance values. *American Journal of Applied Sciences*, 2008, vol. 5, iss. 10, pp. 1313, 5 p. DOI: 10.3844/ajassp.2008.1313.1317

13. Rozhankov A.V. Zazemlenie. Chto eto takoe i kak ego sdelat'. Part 1. Razdel V: zazemlenie (obshchaia informatsiia, terminy i opredeleniia) [Grounding. What is it and how to do it. Part 1. Section B: grounding (general information, terms and definitions)], available at: <http://www.pvsm.ru/e-nergiya-i-elementy-pitaniya/8190> (accessed 04 March 2016).

14. Gorshkov A.V. Otsenka soprotivleniia zazemlitel'ia podstantsii v mnogoslainnoy grunte [Estimation of the

resistance of the substation grounding switch in a multilayer soil]. *Elektrichestvo*, 2014, no.2, pp.25-31.

15. Nazarov N.N. Geografiia Permskogo kraia. Part 1. Prirodnaia (fiziche-skaia geografiia) [Geography of Perm region. Part 1. Natural (physical geography)]. Perm', 2006, 139 p.

16. Karta pochv Permskogo kraia, available at: <http://gnilomedova.59313s016.edusite.ru/p7aa1.html> (accessed 04 March 2016).

17. Plekhanov M.S. Hidrogeologiiia Permskogo kraia [Hydrogeology of Perm Region]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Bezopasnost' i upravlenie riskami*, 2015, no.2, pp.105-127.

18. Vlasov M.N. Uchebnaia praktika po pochvovedeniiu [Pedagogical practice on soil science].

Perm', Permskaia gosudarstvennaia sel'skokhoziaistvennaia akademiia, 2013, 122 p.

19. Klimaticheskii grafik Solikamska i Chernushki [The climatic schedule of Solikamsk and Chernushka], available at: <http://ru.climate-data.org/> (accessed 04 March 2016).

20. Pogoda v Solikamske i v Chernushke [Weather in Solikamsk and Chernushka], available at: <http://russia.pogoda360.ru/> (accessed 04 March 2016).

21. Konsul'tatsii po geologii. Poristost' gruntov [Consultations on geology. Soil porosity], available at: <http://sprosigologa.ru/opredelenie-svoystv-gruntov/poristost-grunta/> (accessed 25 March 2016).

22. Sorochan E.A., Trofimenkov Iu.G. Osnovaniia, fundamente i podzemnye sooruzheniia. Spravochnik proektirovshchika [Grounds, foundations and underground structures. Reference Designer]. Moscow, Stroizdat, 1985, 480 p.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Веденева 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. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.1.10

Please cite this article in English as:

Vedeneva L.M., Chudinov A.V. Study of influence of the main ground properties on grounding device resistivity. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2017, vol.16, no.1, pp.89–100. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.1.10