

УДК 621.316.9(470.53)

Л.М. Веденеева, А.В. ЧудиновПермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, Россия**УЧЕТ НЕОДНОРОДНОСТИ ГРУНТА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ
ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ В РАЗЛИЧНЫХ РЕГИОНАХ
ПЕРМСКОГО КРАЯ**

Представлены результаты исследования влияния слоистости грунтов на сопротивления заземляющих устройств на примере северной и южной части Пермского края. Обоснована мысль о том, что учет слоистости земли является очень важным этапом при проектировании заземляющих устройств для обеспечения существующих норм сопротивлений заземления, регламентированных нормативными документами. Выявлена и обоснована необходимость использования эквивалентного сопротивления верхнего и нижнего слоев грунта с учетом климатического коэффициента сезонности при проектировании заземляющих устройств. На основании приведенных результатов расчета показана эффективность метода расчета заземлителей по верхнему и нижнему слоям грунта для северного и южного регионов Пермского края. Даны рекомендации по расчету заземляющих устройств на восточной и западной частях Пермского края, исходя из строения рельефа и структуры грунта. Как показывает анализ, удельное сопротивление грунта зависит от многих факторов, основные из которых: структура и состав грунта, климатические и погодные условия местности (температура, влажность), время года, присутствие солей, щелочных и кислотных остатков, глубина залегания грунтовых вод. Установлено, что удельное сопротивление в горизонтальном направлении практически постоянное и изменяется незначительно. При этом верхний слой подвержен интенсивным сезонным изменениям, вызванным температурными колебаниями, а также количеством и интенсивностью попадающей в грунт влаги. Приведен расчет сопротивления заземлителей с учетом климатических условий на севере Пермского края на примере города Соликамск, на юге – города Чернушка. Как показывают результаты исследования, для повышения электробезопасности при проектировании заземляющих устройств следует ориентироваться на наибольшее возможное значение удельного электрического сопротивления грунта в течение года, которое приходится на зиму, когда грунт промерзает, и на лето, когда происходят максимальное испарение влаги и высыхание грунта.

Ключевые слова: удельное электрическое сопротивление грунта, эквивалентное сопротивление грунта, вертикальный заземлитель, климатический коэффициент сезонности, проектирование заземляющих устройств, сопротивление заземляющего устройства, структура грунта, электробезопасность.

L.M. Vedeneyeva, A.V. Chudinov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

**ACCOUNTING FOR GROUND INHOMOGENEITIES
IN DESIGNING OF GROUNDING DEVICES
IN DIFFERENT REGIONS OF PERM REGION**

The article presents the the results of research on the influence of stratification of the soil resistance of grounding devices on the example of the northern and southern parts of the Perm region. Substantiates the the idea that the inclusion of the stratification of the ground is a very important stage in the design of grounding devices for existing standards earthing resistances, regulated by normative documents. And was revealed the necessity of the use of the equivalent of the upper and lower layers of soil resistance given the climatic seasonality factor in the design of grounding devices. On the basis of the above calculation results shows the effectiveness of the method of calculation earthing on the upper and lower layers of soil to the north and south regions of Perm Krai. The recommendations for calculation of grounding devices on the eastern and western parts of the Perm region based on structure of the terrain and soil structure. Analysis shows that the resistivity of the soil depends on many factors, the main of which are: the structure and composition of the of soil, climatic and weather conditions of the terrain (temperature, humidity), time of year, the presence of salts, alkaline and acidic residues, the depth of the groundwater. It was established that the resistivity in the horizontal direction is almost constant and does not change significantly. The upper layer is subject to intense seasonal changes caused by the temperature fluctuations, as well as the quantity and intensity of falling into the ground water. Presents the calculation of earthing resistance in view of the climatic conditions in the north of the Perm region on the example of the city of Solikamsk, the south - the city of Chernushka. As the results of research, for increase the electrical safety of grounding devices should be guided by the highest possible value of the electrical resistance of soil during the year, which accounts for the winter, when the ground is frozen, and in the summer, when there is a maximum of soil moisture evaporation and drying.

Keywords: The electrical resistivity of ground, the equivalent resistance of of ground, a vertical earthing, the climatic of seasonality coefficient, designing of grounding devices, the resistance of the grounding device, ground structure, electrical safety. Analysis shows that the resistivity of the soil depends on many factors, the main of which are: the structure and composition of the of ground, climatic and weather conditions of the terrain (temperature, humidity), time of year, the presence of salts, alkaline and acidic residues, depth of groundwater occurrence.

Введение. Как показывает практика, зачастую при выполнении работ по проектированию заземляющих устройств учитывают 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), что вызывает значительное увеличение стоимости проекта и чаще всего это невозможно. Зачастую при определении структуры грунта не выполняют буровые работы и 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. Только при проектировании глубинных заземлителей применяется метод вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), позволяющий определить удельное сопротивление глубинных слоев земли. При большой площади электроустановки выполнение ВЭЗ является очень дорогим мероприятием. Гораздо проще и дешевле определить структуру грунта по карте геологических разрезов [1, 2, 6].

В действительности земля имеет слоистое строение, и 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.

Исследования влияния слоистости грунтов на точность расчетов параметров заземляющих устройств представлены в работах [3, 4, 5, 6].

Слои земли чаще всего расположены горизонтально и представляют собой грунты различного рода с разным минеральным составом, пористостью, плотностью, влажностью и температурой, концентрацией растворимых химических веществ (солей, кислотных и щелочных остатков) и т.д. Поэтому удельные электрические сопротивления различных слоев земли могут существенно отличаться. Обычно верхние слои земли имеют большее удельное сопротивление, чем нижележащие. В редких случаях бывает наоборот, когда под поверхностью земли находятся горные породы, обладающие большим удельным сопротивлением: кварц, базальт, известняки и т.д. На практике более чем в 70 % случаев грунт на глубине более 5 м имеет в разы меньшее удельное электрическое сопротивление, чем у поверхности, за счет большей влажности и плотности. Часто встречаются грунтовые воды, которые обеспечивают грунту низкое сопротивление, в результате чего заземление получается очень надежным [4, 6].

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 [4, 14].

В данной 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 [5].

Конфигурация заземлителя выбирается инженером на основании его опыта и возможности ее применения на конкретном объекте. Особенно при строительстве чаще всего применяются 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, приводящее к большому увеличению его удельного электрического сопротивления. Гораздо эффективнее в качестве заземлителя применять глубокий электрод (чаще всего одиночный) в виде 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 [6].

Изначально было рассчитано сопротивление заземлителя по упрощенной системе (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 табл. 1.7.4 ПУЭ «Наименьшие размеры заземлителей и заземляющих проводников, проложенных в земле», $d > 12$ мм), $d = 0,02$ м; t – расстояние от поверхности земли до середины стержня, $t = t_0 + 0,5l$; t_0 – заглубление заземлителя [4].

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 $\rho_{h, \text{расч}}$ имеет малые значения. При этом расчетные удельные сопротивления верхнего и нижнего слоев двухслойной земли $\rho_{1, \text{расч}}$ и $\rho_{2, \text{расч}}$, Ом·м, определяются по уравнению:

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

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

Здесь индексы от 1 до k обозначают номера слоев, вошедших в верхний слой двухслойной земли, от $(k + 1)$ до n – слоев, вошедших в нижний слой; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_k, \rho_{k+1}, \rho_n$ – расчетные значения удельных сопротивлений соответствующих слоев земли [4].

При приведении двухслойной земли к однослойной земле используется формула

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

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 [4, 13, 15].

1. Характеристика грунтов севера и юга Пермского края. Основная особенность географического положения Пермского края заключается в том, что он находится на стыке Русской равнины с Уральскими горами. Западная и центральная части региона представляют собой холмистую равнину, которая плавно повышается в восточном и южном направлениях [7, 9].

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 [7, 10].

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. Характерными признаками ледниковых отложений являются их высокая плотность и неоднородность состава. Мощность пород составляет 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 варьируют 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 прослойки погребенных древних почв и (или) щебня. Мощность отложений – до 15 м. [7, 8, 9].

Для расчета сопротивления одиночного заземлителя сделан выбор структуры грунта для северной и южной части Пермского края, который представлен в табл. 1, 2.

Таблица 1

Структура грунта северной части Пермского края

Наименование	Состав слоя	$h, м$	$\rho, Ом \cdot м$
Верхний слой	Песок	1	600
	Супесь	2	300
Нижний слой	Суглинок	1	100
	Глина	3	40
	Песчаники	10	1000

Значения удельных электрических сопротивлений выбраны согласно рекомендуемым значениям удельных электрических сопротивлений верхнего слоя земли (глубиной до 50 м) [5, табл. 3.7]

Результаты расчета сопротивления одиночного вертикального заземлителя по упрощенной методике и с учетом эквивалентного сопротивления слоев грунта (сложной методике) приведены в табл. 3.

Таблица 2

Структура грунта южной части Пермского края

Наименование	Состав слоя	$h, м$	$\rho, Ом \cdot м$
Верхний слой	Суглинок	2	100
	Песок	1	300
	Глина	1	40
	Песок	1	200
	Глина	1	40
Нижний слой	Известняк рыхлый	10	300

Таблица 3

Результаты расчета сопротивления одиночного вертикального заземлителя по упрощенной и сложной методике

$l, м$	Север края				Юг края			
	$R_{упр}, Ом$	$\rho_{экв} (сложн), Ом \cdot м$	$R_{сложн}, Ом$	Отклонение $R, \%$	$R_{упр}, Ом$	$\rho_{экв} (сложн), Ом \cdot м$	$R_{сложн}, Ом$	Отклонение $R, \%$
3	192,4	360,0	115,5	40,0	32,1	128,6	41,2	-28,6
3,5	169,7	262,5	74,2	56,3	28,3	97,7	27,6	2,3
4	152,0	218,2	55,3	63,6	25,3	82,8	21,0	17,2
4,5	137,9	145,9	33,5	75,7	23,0	88,5	20,3	11,5
5	126,4	115,4	24,3	80,8	21,1	93,8	19,7	6,3
5,5	116,7	98,5	19,2	83,6	19,5	83,5	16,3	16,5
6	108,5	87,8	15,9	85,4	18,1	76,6	13,9	23,4
6,5	101,5	80,4	13,6	86,6	16,9	81,3	13,7	18,8
7	95,3	75,0	11,9	87,5	15,9	85,7	13,6	14,3
10	70,4	103,8	12,2	82,7	11,7	109,1	12,8	-9,1

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

Отклонение сопротивления одиночного вертикального заземлителя вычисляется по формуле

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

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

На рис. 1 представлен график зависимости сопротивления вертикального заземлителя от его длины, рассчитанный для северной части Пермского края по упрощенной (по верхнему слою) и сложной методике (по верхнему и нижнему слою грунтов).

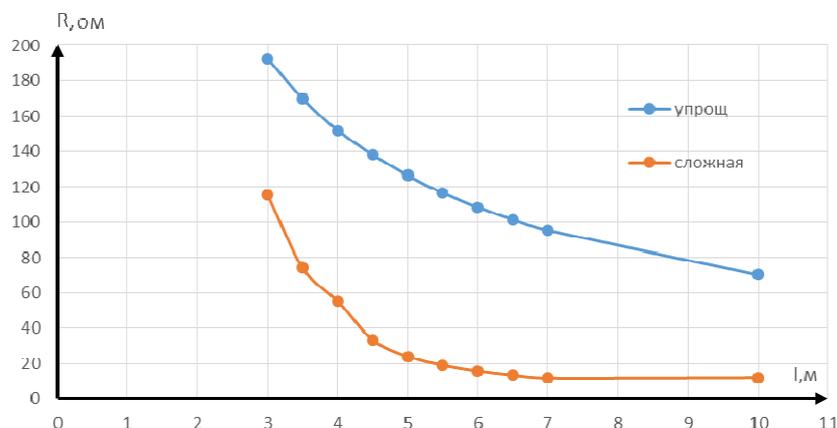


Рис. 1. График зависимости сопротивления заземлителя от его длины, рассчитанный для северной части Пермского края

На рис. 2 представлен график зависимости сопротивления вертикального заземлителя от его длины, рассчитанный для южной части Пермского края по упрощенной (по верхнему слою) и сложной методике (по верхнему и нижнему слою грунтов).

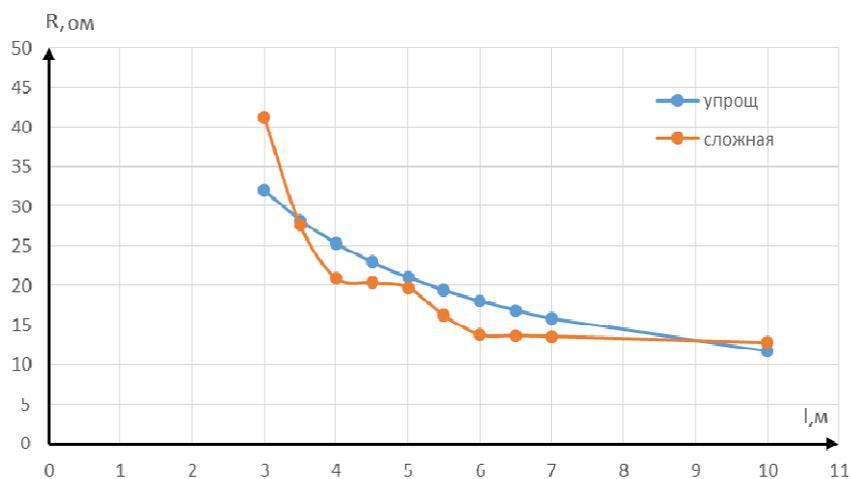


Рис. 2. График зависимости сопротивления заземлителя от его длины, рассчитанный для южной части Пермского края

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

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 отложений 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 участия Урала в формировании восточной окраины Русской платформы является «уральское» происхождение рыхлого материала, слагающего толщи осадочного чехла [7].

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 [7].

2. 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, т.д. Толщина слоя земли, подверженного сезонным изменениям, называется слоем сезонных изменений и обозначает-

ся h_c . Как правило, мощность слоя сезонных изменений меньше или равна толщине верхнего слоя грунта $h_c \leq h_1$. Таким образом, очевидно, что верхний слой подвержен воздействию погодных условий, и его ρ_1 имеет значительные сезонные колебания, которые необходимо учитывать при проектировании заземляющих устройств [4].

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. Наибольшему влиянию погодных условий подвержены верхние слои грунта, которые зимой промерзают, весной и осенью насыщаются влагой, а летом лучше всех прогреваются и высыхают. Для обеспечения условий электробезопасности при проектировании заземляющего устройства необходимо брать наибольшее возможное удельное сопротивление в течение года.

Формула для расчетного значения удельного сопротивления для однородной земли имеет вид:

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

где $\rho_{\text{грунта}}$ – удельное сопротивление грунта, полученное из справочной литературы, Ψ – климатический коэффициент сезонности для данной местности, зависящий от средней многолетней низшей температуры (январь) и средней многолетней высшей 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 $\rho_{\text{расч}}$) [4].

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 $3 - 4,5$ 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 Чернушка 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 Чернушка можно отнести

ко второй климатической зоне. Для электродов длиной 3–4,5 м: $\psi = 1,45$; для 5 м – 1,25 толщина слоя сезонных изменений $h_c = 2,0$ м [11, 12].

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.

Таблица 4

Результаты расчета сопротивления одиночного вертикального заземлителя с учетом климатического коэффициента сезонности данного региона

l, м	Север края				Юг края			
	$R_{\text{упр}}$, Ом	$\rho_{\text{эkv}}(\text{сложн})$, Ом·м	$R_{\text{сложн}}$, Ом	Отклонение R, %	$R_{\text{упр}}$, Ом	$\rho_{\text{эkv}}(\text{сложн})$, Ом·м	$R_{\text{сложн}}$, Ом	Отклонение R, %
3	317,5	594,0	190,5	40,0	46,5	175,2	56,2	-20,8
3,5	280,0	326,9	92,4	67,0	41,0	118,1	33,4	18,5
4	250,9	265,8	67,3	73,2	36,7	95,0	24,1	34,5
4,5	227,6	163,3	37,5	83,5	33,3	100,8	23,2	30,5
5	170,6	121,4	25,6	85,0	26,3	101,4	21,3	18,9
5,5	157,6	102,5	19,9	87,3	24,3	88,9	17,3	28,8
6	146,5	90,7	16,4	88,8	22,6	80,7	14,6	35,4
6,5	137,0	82,6	14,0	89,8	21,1	85,5	14,5	31,6
7	128,7	76,8	12,2	90,5	19,9	90,1	14,3	27,9
10	95,0	106,19	12,5	86,9	14,7	114,07	13,4	8,7

В упрощенной методике сопротивление заземлителя (табл. 4) рассчитывается по верхнему слою: для севера при длине заземлителя до 5 м $\rho_{\text{эkv}} = 990$ Ом·м, при длине заземлителя более 5 м $\rho_{\text{эkv}} = 810$ Ом·м. Для юга при длине заземлителя до 5 м $\rho_{\text{эkv}} = 145$ Ом·м, при длине заземлителя более 5 м – $\rho_{\text{эkv}} = 125$ Ом·м. Отклонение сопротивления одиночного вертикального заземлителя вычисляется по формуле (5).

На рис. 3 представлен график зависимости сопротивления вертикального заземлителя от его длины, рассчитанный для северной части Пермского края по сложной методике (по верхнему и нижнему слою грунтов) без учета и с учетом климатического коэффициента.

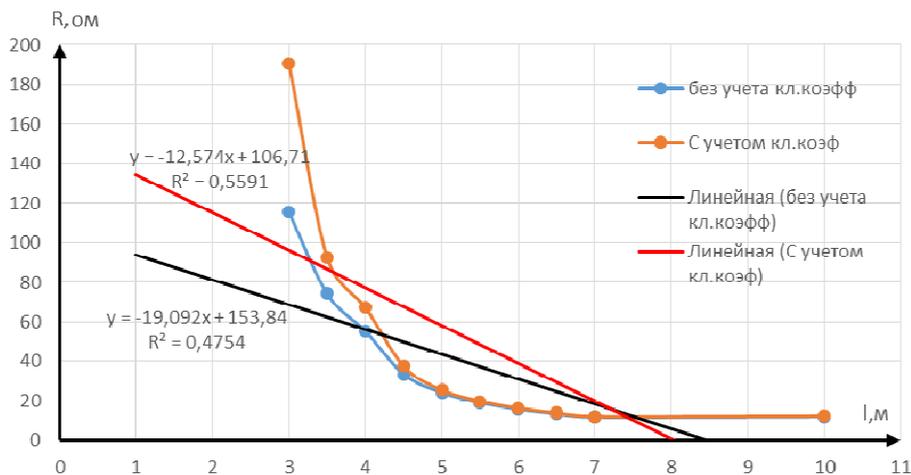


Рис. 3. График зависимости сопротивления заземлителя от его длины, рассчитанный для северной части Пермского края с учетом климатического коэффициента

На рис. 4 представлен график зависимости сопротивления вертикального заземлителя от его длины, рассчитанный для южной части Пермского края по сложной методике (по верхнему и нижнему слою грунтов) без учета и с учетом климатического коэффициента.

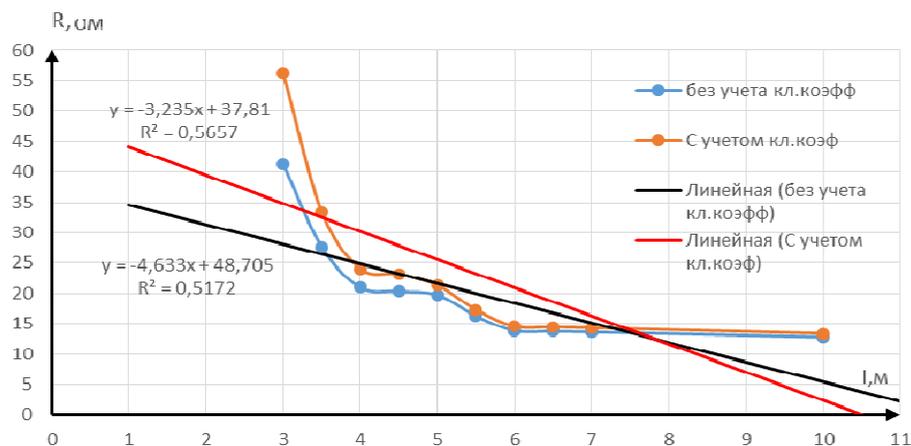


Рис. 4. График зависимости сопротивления заземлителя от его длины, рассчитанный для южной части Пермского края с учетом климатического коэффициента

Таблица 5

Отклонение сопротивления заземлителя без учета и с учетом климатического коэффициента сезонности, %

l, м	Север края		Юг края	
	Отклонение r, % (упр)	Отклонение r, % (сложн)	Отклонение r, % (упр)	Отклонение r, % (сложн)
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

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

$$\theta = \frac{R_{(\psi)} - R_0}{R_{(\psi)}} 100 \%, \quad (7)$$

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 коэффициента сезонности в среднем для севера на 21 % и для юга на 17,3 % (табл. 5). С увеличением длины вертикального заземлителя климатический коэффициент все меньше влияет на эквивалентное сопротивление заземлителя, так как подвержен сезонным изменениям только верхний слой грунта.

Выводы. Известно, что зачастую при проектировании заземляющих устройств не учитывается слоистость грунтов и расчет ведется только по верхнему слою грунта. Это приводит к существенным отклонениям данных от действительных значений, особенно для север-

ной части Пермского края, где при расчете сопротивлений заземляющих устройств по упрощенной (по верхнему слою) методике получаем завышенные их значения. При этом точность расчетов обычно невысока. На юге края при расчете сопротивлений заземляющих устройств по упрощенной методике получаем слегка завышенные их значения, что видно (см. рис. 1, 2).

Установлено, что наиболее эффективным является расчет сопротивления заземлителей с учетом многослойности грунта и изменений погодных условий. 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.

На основании выполненного анализа показана лучшая эффективность вертикальных заземлителей по сравнению с горизонтальными в слоистых грунтах. Для северной и южной части края используем заземлители длиной до 5 м, так как в этой части наиболее сказывается влияние слоистости грунтов.

Таким образом, обоснованное использование заземлителей длиной до 5 м обеспечивает необходимые условия электробезопасности и уменьшает стоимость монтажных работ при проектировании глубинных заземлителей.

Библиографический список

1. Устройство для вертикального электрического зондирования земли: пат. 2208804 Рос. Федерация / Халин Е.В., Коструба С.И. Оpubл. 07.05.2002.
2. Агеева Л.А. Определение электрических характеристик двухслойных грунтов при проектировании заземляющих устройств // Электроэнергетика глазами молодежи: сб. тр. конф. – Новосибирск, 2015. – С. 400–403.
3. Колечицкий Е.С. Приближенные оценки сопротивления заземляющих устройств // Вестник МЭИ. – 2006. – № 4. – С. 56–62.
4. Долин П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

5. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок: справочник. – 2-е изд., – М.: Энергосервис, 2006. – 373 с.
6. Рожанков А.В. Заземление. Что это такое и как его сделать. Ч. 1. Раздел В: Заземление (общая информация, термины и определения). – URL: <http://www.pvsm.ru/e-nergiya-i-e-lementy-pitaniya/8190> (дата обращения: 04.03.2016).
7. Назаров Н.Н. География Пермского края. Ч. 1: Природная (физическая география): учеб. пособие. – Пермь, 2006. – 139 с.
8. Власов М.Н. Учебная практика по почвоведению: учеб.-метод. пособие / Пермская ГСХА. – Пермь, 2013. – 122 с.
9. Карта почв Пермского края. – URL: <http://gnilomedova.59313s016.edusite.ru/p7aa1.html> (дата обращения: 04.03.2016).
10. Плеханов М.С. Гидрогеология Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Безопасность и управление рисками. – 2015. – № 2. – С. 105–127.
11. Климатический график Соликамска и Чернушки. – URL: <http://ru.climate-data.org/> (дата обращения: 04.03.2016).
12. Погода в Соликамске и в Чернушке. – URL: <http://russia.pogoda360.ru/> (дата обращения: 04.03.2016).
13. Nixon K.J. The lightning transient behaviour of a driven rod earth electrode in multi-layer soil. – Johannesburg: Witwatersrand, 2006.
14. Горшков А.В. Оценка сопротивления заземлителя подстанции в многослойном грунте // Электричество. – 2014. – № 2. – С. 25–31.
15. Takahashi T., Kawase T. Calculation of earth resistance for deep-driven rod in multi-layer earth structure // IEEE Trans. Power Del. – 1990. – Vol. 6. – № 1. – P. 608–614.

References

1. Khalin E.V., Kostruba S.I. Ustroistvo dlia vertikal'nogo elektricheskogo zondirovaniia zemli [The device for the Earth vertical electric sounding]. *Patent RF No 2208804*, 2002.
2. Ageeva L.A. Opredelenie elektricheskikh kharakteristik dvukhsloinykh gruntov pri proektirovanii zazemliaiushchikh ustroystv [The power performance measurement of the double layer ground while earthing]. *Sbornik trudov konferentsii "Elektroenergetika glazami molodezhi"*. Novosibirsk, 2015, pp. 400-403.

3. Kolechitskii E.S. Priblizhennye otsenki soprotivleniia zazemliaiushchikh ustroystv [Approximate assessment of the earthing device resistance]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta*, 2006, no. 4, pp. 56-62.
4. Dolin P.A. Osnovy tekhniki bezopasnosti v elektroustanovkakh [The base of the safety technique in power units]. Moscow: Energoatomizdat, 1984. 448 p.
5. Kariakin R.N. Zazemliaiushchie ustroystva elektroustanovok [The earthing of the power supply units]. Moscow: Energoservis, 2006. 373 p.
6. Rozhankov A.V. Zazemlenie. Chto eto takoe i kak ego sdelat'. Ch. 1. Razdel V: Zazemlenie (obshchaia informatsiia, terminy i opredeleniia) [What is it? And how it can be made? Part 1. Section B: Earthing (general information, terms and definitions)], available at: <http://www.pvsm.ru/e-nergiya-i-e-lementy-pitaniya/8190> (accessed 04 March 2016).
7. Nazarov N.N. Geografiia Permskogo kraia. Ch. 1: Prirodnaia (fizicheskaiia geografiia) [The Perm Krai geography. Part 1 (physical geography)]. Perm', 2006. 139 p.
8. Vlasov M.N. Uchebnaia praktika po pochvovedeniiu [Education internship in soil science]. Permskaia gosudarstvennaia sel'skokhoziaistvennaia akademiia, 2013. 122 p.
9. Karta pochv Permskogo kraia [Soil map of the Perm Krai], available at: <http://gnilomedova.59313s016.edusite.ru/p7aa1.html> (accessed 04 March 2016).
10. Plekhanov M.S. Hidrogeologiiia Permskogo kraia [Hydrogeology of the Perm Krai]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Bezopasnost' i upravlenie riskami*, 2015, no. 2, pp. 105-127.
11. Klimaticheskii grafik Solikamska i Chernushki [Climate graphic of Solikamsk and Chernushka cities], available at: <http://ru.climate-data.org/> (accessed 04 March 2016).
12. Pogoda v Solikamske i v Chernushke [The weather in Solikamsk and Chernushka cities], available at: <http://russia.pogoda360.ru/> (accessed 04 March 2016).
13. Nixon K.J. The lightning transient behaviour of a driven rod earth electrode in multi-layer soil. Johannesburg: Witwatersrand, 2006.
14. Gorshkov A.V. Otsenka soprotivleniia zazemlitelia podstantsii v mnogosloinnoy grunte [The assessment of the earthing substation resistance in multilayer soil]. *Elektrichestvo*, 2014, no. 2, pp. 25-31.

15. Takahashi T., Kawase T. Calculation of earth resistance for deep-driven rod in multi-layer earth structure. *IEEE Trans. Power Del.*, 1990, vol. 6, no. 1, pp. 608-614.

Сведения об авторах

Веденеева Людмила Михайловна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: bg@pstu.ru).

Чудинов Александр Валерьевич (Пермь, Россия) – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: aleksander.tchudinov@yandex.ru).

About the authors

Vedeneeva Liudmila Mihajlovna (Perm, Russian Federation) is a Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor of the department of life safety Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, 29, Komsomolsky pr., e-mail: bg@pstu.ru).

Chudinov Alexander Valeryevich (Perm, Russian Federation) is a Student Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky pr., Perm, e-mail: aleksander.tchudinov@yandex.ru).

Получено 20.04.2016