

РАСТЕКАНИЕ ТОКА С ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ В УСЛОВИЯХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТОВ

В. П. ЧУМАНОВ, Н. Н. МАКСИМЕНКО

Представлено профессором И. Д. Кутявиным

Анализ электрофизических характеристик многолетнемерзлых грунтов показывает, что в районах Крайнего Севера неравномерность распределения удельного сопротивления грунта по глубине явно выражена. В связи с этим необходимы исследования особенностей растекания тока с заземлителей, заложенных в многолетнемерзлых грунтах, с целью изучения распределения потенциала на поверхности грунта в пределах открытых распределительных устройств.

В однородных грунтах, как известно, абсолютная величина потенциала в точках, расположенных на поверхности земли при прочих равных условиях, пропорциональна величине удельного сопротивления грунта и для вертикального заземлителя равна:

$$\varphi_x = \frac{I \cdot \rho_0}{2\pi l} \cdot \ln \frac{\sqrt{e^2 + r_x^2} + e}{r_x} \quad (1)$$

Для одного и того же заземлителя при увеличении удельного сопротивления грунта от ρ_0 до ρ_1 величина потенциала в точке увеличится в $\Delta \varphi \frac{\rho_1}{\rho_0}$ раз.

Для районов Крайнего Севера представляют интерес исследования растекания тока с заземлителей при следующих видах неоднородности грунта:

1. Заземлитель расположен в верхнем слое, удельное сопротивление которого $\rho_1 < \rho_2$ (или $\rho_1 > \rho_2$).

2. Заземлитель проходит через поверхность раздела слоев. К первой группе относятся обычные поверхностные и вертикальные заземлители, укладываемые в верхней части деятельного слоя, ко второй — скважинные заземлители, основная длина которых находится в слоях высоких отрицательных температур, где $\rho_2 < \rho_1$.

Рассмотрим влияние неоднородности грунта на величину потенциала поверхности на примере сосредоточенного заземлителя.

1. РАСТЕКАНИЕ ТОКА ОТ СОСРЕДОТОЧЕННОГО ЗАЗЕМЛИТЕЛЯ ПРИ УСЛОВИИ $\rho_1 \ll \rho_2$

В практике такие случаи встречаются при укладке заземлителей в грунт, ниже которого находятся скальные (нерудные породы), или мерзлый песчаный грунт. При указанном условии можно считать, что весь ток от заземлителя растекает только в верхнем слое и в любой цилиндрической поверхности грунта от оси заземлителя равен полному току:

$$I = 2\pi x h j, \quad (2)$$

где

h — глубина слоя;

x — расстояние сечения слоя ρ_1 от сосредоточенного заземлителя;

j — плотность тока.

Напряженность электрического поля в любой точке на поверхности грунта определится:

$$E = \rho_1 j = \frac{\rho_1 I}{2\pi h x}.$$

Полученное выражение показывает, что в двухслойном грунте при $\rho_1 \ll \rho_2$ напряженность поля от оси заземлителя убывает значительно медленнее, чем в однородных грунтах, где, как известно, для сосредоточенного заземлителя, расположенного у поверхности земли,

$$E = \frac{\rho_1 I}{2\pi x^2}.$$

Если рассматривать растекание тока с заземлителя, эквивалентный радиус которого равен r_0 , то напряжение на заземлителе относительно любой точки грунта:

$$U_x = \int_{r_0}^x e dx = \frac{\rho_1 I}{2\pi h} \int_{r_0}^x \frac{dx}{x} = \frac{\rho_1 I}{2\pi h} \cdot \ln \frac{x}{r_0}. \quad (3)$$

Соответственно, при однородной структуре

$$U_x = \int_{\frac{d_0}{2}}^x e dx = \frac{\rho_1 I}{\pi} \int_{\frac{d_0}{2}}^x \frac{dx}{x^2} = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_0} - \frac{1}{x} \right). \quad (4)$$

Из сравнения формул (3, 4) видно, что в неоднородных грунтах, где $\rho_1 \ll \rho_2$, напряжение при удалении от заземлителя затухает более медленно, чем в однородных грунтах, что можно объяснить ограниченностью поверхности растекания тока.

2. УЧЕТ ПРОВОДИМОСТИ НИЖНЕГО СЛОЯ

В соответствии с теорией электрического поля в неоднородных грунтах, данной проф. В. В. Бургсдорфом, потенциал в любой точке первого слоя от точечного источника, расположенного в этом слое (при расположении начала координат на поверхности грунта), определится:

$$\varphi_n = \frac{i\rho_1}{4\pi} \left\{ \frac{1}{\sqrt{r^2 + (y - \eta)^2}} + \frac{1}{\sqrt{r^2 + (y + \eta)^2}} + \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{k^n}{\sqrt{r^2 + (y - 2nh - \eta)^2}} + \frac{k^n}{\sqrt{r^2 + (y - 2nh + \eta)^2}} + \frac{k^n}{\sqrt{r^2 + (y + 2nh - \eta)^2}} + \frac{k^n}{\sqrt{r^2 + (y + 2nh + \eta)^2}} \right] \right\}, \quad (5)$$

где

$k = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$ — коэффициент неоднородности грунта;
 η — глубина точечного источника от поверхности;
 y, r — координаты интересующей точки;
 h — мощность верхнего слоя грунта.

При расположении точечного источника во втором слое для потенциала в любой точке первого слоя соответственно будем иметь:

$$\varphi_{12} = \frac{i_2 \rho_2}{4\pi} (1+k) \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{k^n}{\sqrt{r^2 + (y - 2nh - \eta)^2}} + \frac{k^n}{\sqrt{r^2 + (y + 2nh + \eta)^2}} \right]. \quad (6)$$

При наличии точечных источников тока одновременно в первом и втором слое потенциал первого слоя

$$\varphi_1 = \varphi_{11} + \varphi_{12}.$$

Для точек, расположенных на поверхности грунта, где $y=0$, а $r = \sqrt{x^2 + z^2} = x$ (при $z = \text{const}$), потенциал от источника первого слоя

$$\varphi'_{11} = \frac{i_1 \rho_1}{4\pi} \left\{ \frac{2}{\sqrt{x^2 + \eta^2}} + \sum_{n=0}^{\infty} 2k^n \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + (2nh - \eta)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + (2nh + \eta)^2}} \right] \right\}. \quad (7)$$

Первое слагаемое полученного выражения $\varphi'_{11} = \frac{i_1 \rho_1}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + \eta^2}}$ определяет потенциал на поверхности грунта от точечного источника i , расположенного в однородном грунте на глубине η .

Второе слагаемое

$$\Delta\varphi_{11} = \frac{i_1 \rho_1}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} 2k^n \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + (2nh - \eta)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + (2nh + \eta)^2}} \right)$$

учитывает влияние неоднородности грунта на потенциал поверхности. Количественно это влияние зависит от коэффициента неоднородности и положения источника тока. Наибольшее влияние неоднородности проявляется при $\eta=0$, то есть, когда источник тока находится на поверхности грунта. В этом случае

$$\Delta\varphi_{11} = \frac{i_1 \rho_1}{4\pi} \sum_{n=0}^{\infty} 4k^n \frac{1}{\sqrt{x^2 + (2nh)^2}}. \quad (8)$$

Для неоднородности, где $\rho_1 < \rho_2$, $k > 0$, величина $\Delta\varphi_{11}$ стремится к конечному положительному числу, что сказывается на замедлении затухания потенциала поверхности грунта по мере удаления от источ-

ника. Соответственно, для $\rho_1 > \rho_2$, $\Delta \varphi_{11}$ стремится к конечному отрицательному числу, что сказывается на ускорении затухания потенциала поверхности.

Из формулы (7) можно найти потенциал на поверхности грунта от источника i_2 , расположенного в нижнем слое:

$$\varphi_{12} = \frac{i_2 \rho_2}{4\pi} (1+k) \sum_{n=1}^{n=\infty} 2k^n \frac{1}{\sqrt{x^2 + (2nh + \gamma_2)^2}}, \quad (9)$$

где γ_2 — глубина расположения источника i_2 от поверхности. Анализ формул (8) и (9) показывает, что в неоднородных грунтах распределение потенциала на поверхности земли зависит не только от степени неоднородности и расположения источника тока, но и от соотношения токов i_1 и i_2 , стекающих с заземлителей.

Определим относительное изменение потенциала на поверхности неоднородного грунта по отношению к потенциалу однородного грунта при наличии одного точечного источника i_1 .

Из формулы (7) найдем:

$$m = \frac{\varphi_{11}}{\varphi'_{11}} = 1 + \sqrt{x^2 + \gamma_1^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} k^n \left[\frac{1}{\sqrt{x^2 + (2nh - \gamma_1)^2}} + \frac{1}{\sqrt{x^2 + (2nh + \gamma_1)^2}} \right].$$

Если учесть, что поле заземлителя любой формы в безгранично пространенной среде с увеличением расстояния от заземлителя приближается к полю, создаваемому точечным источником тока, то полученным выражением можно приблизительно оценивать степень искажения потенциальной кривой для любой конструкции заземлителя.

В районах Крайнего Севера в летнее время, вследствие оттаивания деятельного слоя, $\rho_1 < \rho_2$. Это вызывает в соответствии с формулами (8) и (9) замедление спада потенциальной кривой при растекании тока с заземлителей, расположенных как в верхнем, так и нижнем слое. В зимнее время, когда $\rho_1 \gg \rho_2$; $|k| < 0$, неоднородность грунта способствует затуханию потенциальной кривой, однако, вследствие высоких значений ρ_1 результирующая кривая спада потенциала будет по-прежнему пологой.

Увеличение зоны растекания тока по поверхности грунта предъявляет особые требования к выбору метода измерения сопротивления растеканию заземлителей в районах Крайнего Севера.

Имеющийся опыт измерения сопротивлений заземления, основанный на применении измерителя заземлений МС-08 и метода $\Delta-V$, показывает, что при выносе потенциального зонда от измеряемого заземлителя на расстоянии 20 м (или на расстоянии $5d$ для контурных заземляющих устройств) погрешности измерения, обусловленные медленным затуханием потенциальной кривой, достигают 50% и более. Сказанное выше позволяет сделать вывод, что необходимая точность измерения сопротивления заземляющих устройств в районах Крайнего Севера может быть достигнута только путем снятия потенциальных кривых. При этом необходима установка ряда потенциальных зондов, забитых в грунт на глубину 0,5 — 0,6 м. Первый зонд целесообразно размещать на расстоянии не менее 20 — 30 м от измеряемого заземлителя. Соответственно последующие на расстоянии 10 — 20 м друг от друга. Для снятия полной потенциальной кривой

при этом требуется установка 8—11 зондов. Токовый зонд необходимо устанавливать на расстоянии 150—200 м от измеряемого заземлителя. Действительная величина сопротивления заземлителя определяется установившимися значениями сопротивления из потенциальной кривой.

Рекомендуемая методика измерения сопротивлений заземляющих устройств при производстве измерений в летнее время не вызывает затруднений, так как вследствие высокой проводимости поверхностных слоев грунта максимально допустимые сопротивления потенциальных и токовых зондов легко достигаются. Зимой сопротивления зондов, забитых в грунт на глубину 0,5—0,8 м, достигают 3000—5000 ом, что ограничивает возможности использования измерителя МС-08. Необходимая чувствительность последнего в ряде случаев может быть достигнута обработкой грунта в месте установки зондов крепким соляным раствором и использованием в качестве токового зонда одного из действующих заземлителей системы. Более универсальным методом при производстве измерений в зимнее время явля-

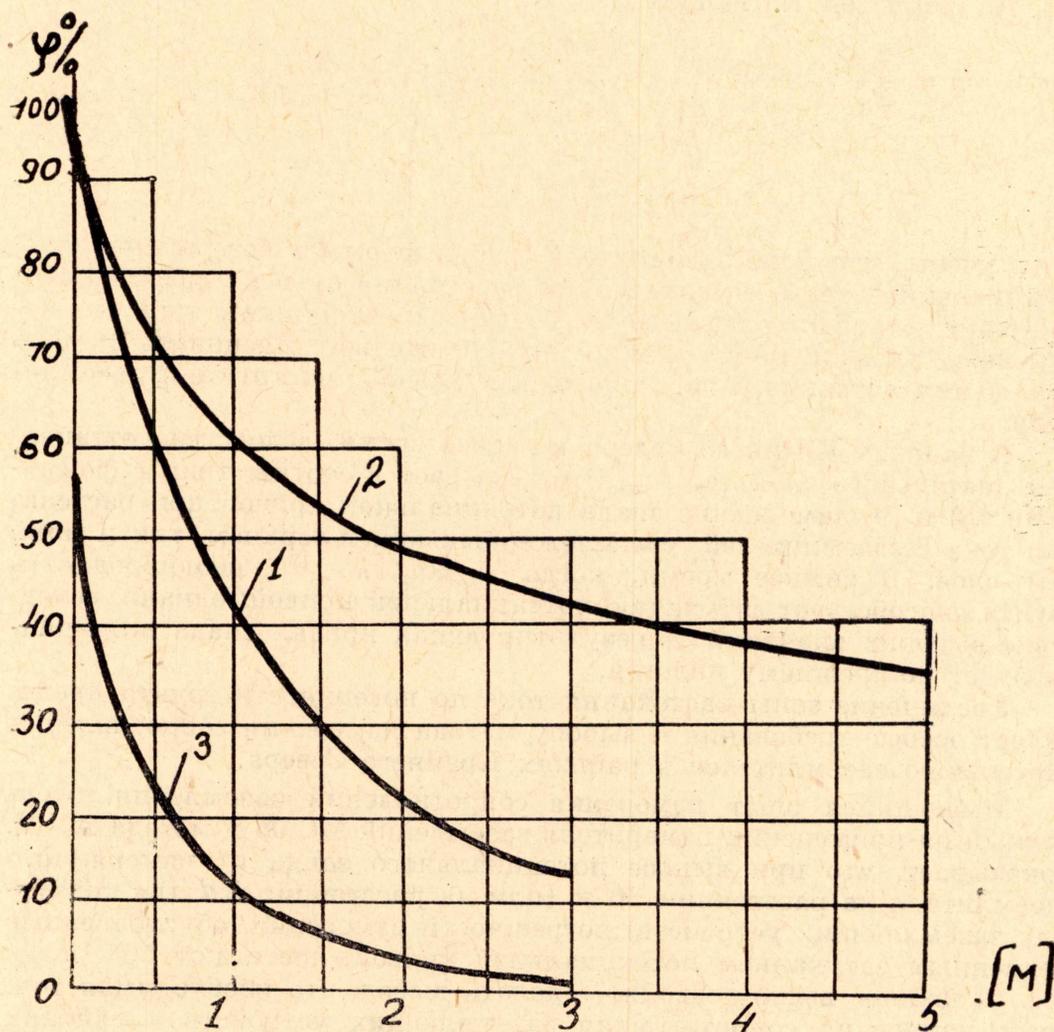


Рис. 1. Расчетные потенциальные кривые точечных заземлителей:

1 — $\rho_1 = 0,5 \cdot 10^2$ ом.м, $\rho_2 = 10 \cdot 10^2$ ом.м; $\alpha_{\text{пр}} = 0,55$.

2 — $\rho_1 = 0,5 \cdot 10^2$ ом.м, $\rho_2 = \infty$, $\alpha_{\text{пр}} = 0,25$

3 — $\rho_1 = \rho_2$, $\alpha_{\text{пр}} = 0,86$

ется метод А—V. Повышение рабочего напряжения на заземлителе и токовом зонде до 2000—3000 в. позволяет при указанных выше значениях сопротивлений зондов с помощью А—V выполнять измерения с необходимой точностью. При этом необходимо применять электростатический или ламповый вольтметр и экранированные провода, используемые в схеме измерения.

Неравномерность распределения удельного сопротивления по глубине сказывается не только на выборе методов измерения сопротивления растеканию заземлителей, но также в значительной мере влияет на условия безопасности персонала, обслуживающего открытые распределительные устройства.

Как известно, величина напряжения прикосновения и шага определяется интенсивностью спада потенциальной кривой. В условиях многолетнемерзлых грунтов вследствие ограниченности пространства растеканию тока, зона нулевого потенциала от единичного заземлителя удалена на расстояние, много превышающее 20 м. При этом также соответственно повышается потенциальная кривая на расстоянии 0—1,0 м. Благодаря повышению потенциальной кривой напряжение прикосновения и шага существенно снижается.

На рис. 1 показаны расчетные кривые изменения потенциала единичного точечного заземлителя при различной степени неоднородности грунта, анализ которых показывает, что роль неоднородности многолетнемерзлых грунтов в распределении потенциала на поверхности грунта значительна. Последнее обстоятельство указывает на

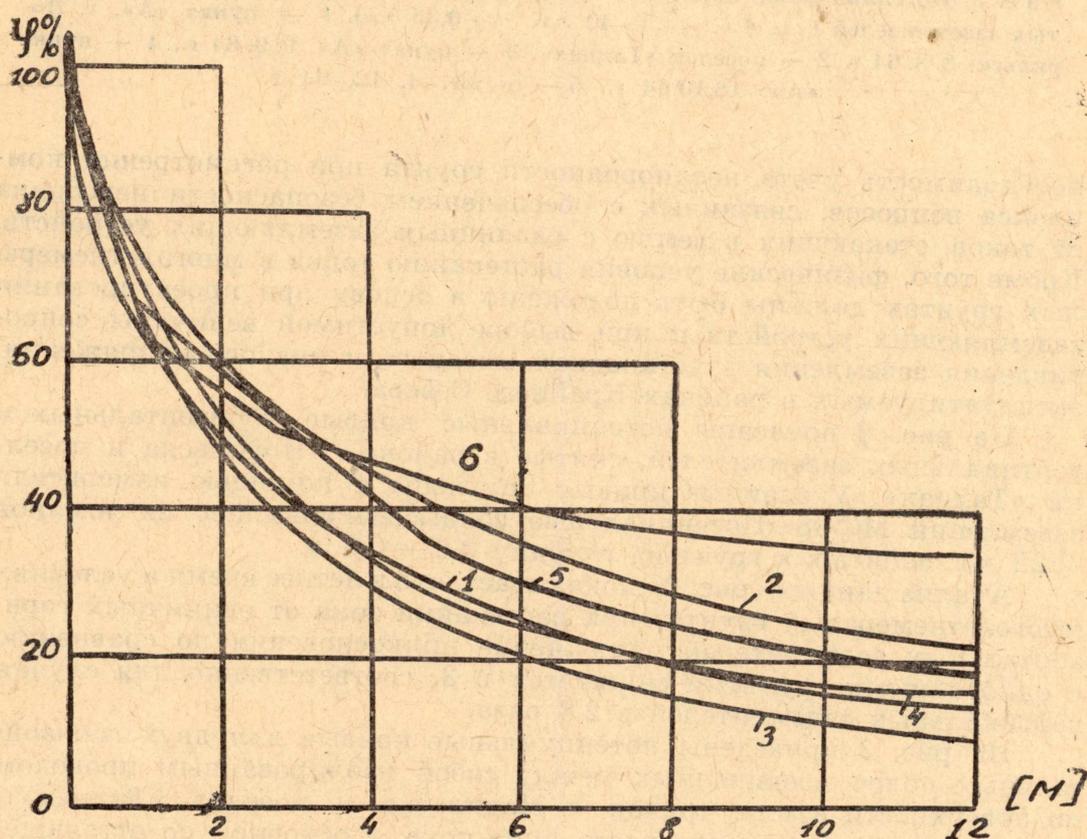
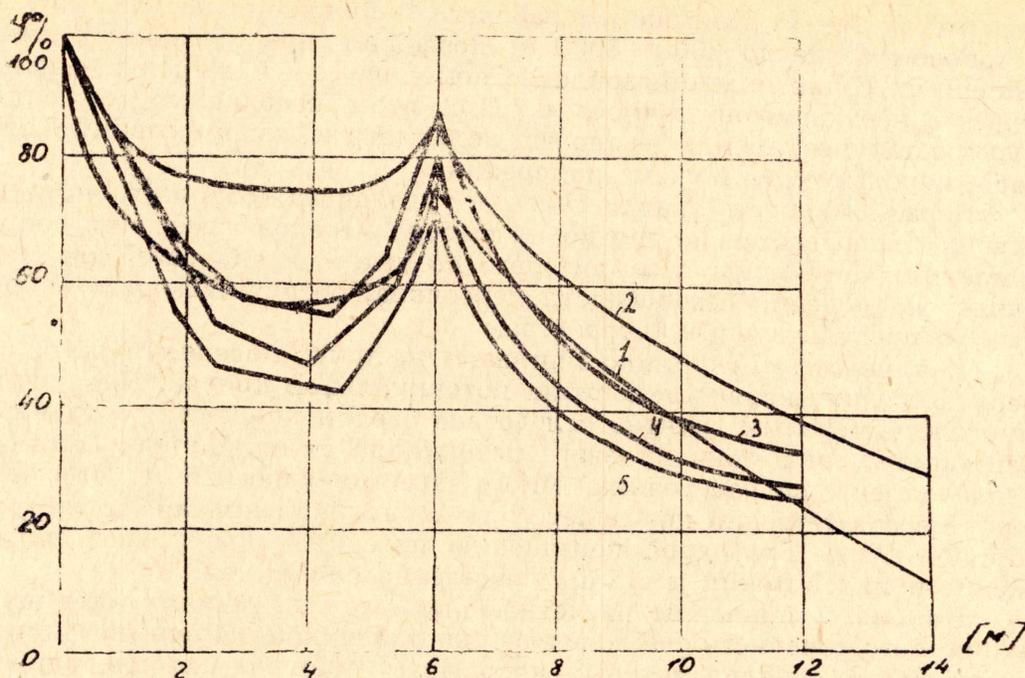


Рис. 2. Потенциальные кривые поверхностных заземлителей ($l=4$ м, $\varnothing=40$ мм, $h=0,35$), 1, 2 — в районе поселка «Талнах», 3, 4 — в районе пункта «А» г. Норильск, 5 — для трубы, уложенной по поверхности грунта, 6 — для вертикальной трубы ($l=3,5$ м, $\varnothing=100$ мм).



Р и с. 3. Потенциальные кривые для двух параллельных поверхностных трубчатых заземлителей ($l = 4 \text{ м}$, $\varnothing = 40 \text{ мм}$, $h = 0,35 \text{ мм}$). 1 — пункт «А», г. Норильск, 8.8.64 г. 2 — поселок «Талнах», 3 — пункт «А», 9.9.64 г., 4 — пункт «А», 18.10.64 г., 5 — то же, 4.12.64 г.

необходимость учета неоднородности грунта при рассмотрении комплекса вопросов, связанных с обеспечением безопасности персонала от токов, стекающих в землю с различных заземляющих устройств. Кроме того, физические условия растеканию токов в многолетнемерзлых грунтах должны быть положены в основу при проектировании заземляющих устройств и при выборе допустимой величины сопротивления заземления в установках высокого и низкого напряжения, эксплуатируемых в районах Крайнего Севера.

На рис. 2 показаны потенциальные кривые горизонтальных и вертикальных заземлителей, снятые в районе г. Норильска и поселка «Талнах». Указанные кривые получены с помощью измерителя заземлений МС-08. Потенциальные зонды выполнялись из ломиков $\varnothing 22 \text{ мм}$, забитых в грунт на глубину $0,6 - 0,8 \text{ м}$.

Анализ данных (рис. 2) показывает, что в летнее время в условиях многолетнемерзлых грунтов при растекании тока от единичных горизонтальных заземлителей напряжение прикосновения по сравнению с однородными грунтами снижается в 3, соответственно для случая вертикальных заземлителей в 2,8 раза.

На рис. 3 приведены потенциальные кривые для двух горизонтальных полос, соединенных между собой изолированным проводом по поверхности земли (район г. Норильска и поселка «Талнах»). В летнее время вследствие растекания тока, в основном по оттаявшему деятельному слою, результирующая потенциальная кривая между горизонтальными заземлителями, уложенными друг от друга на расстоянии $6,0 \text{ м}$, значительно выравнивается, что соответственно приводит к снижению напряжения прикосновения и шага $\alpha_{\text{ш}} = 0,07$; $\alpha_{\text{пр}} = 0,17$.



Рис. 4. Литологический разрез грунта по пункту «А», г. Норильск.

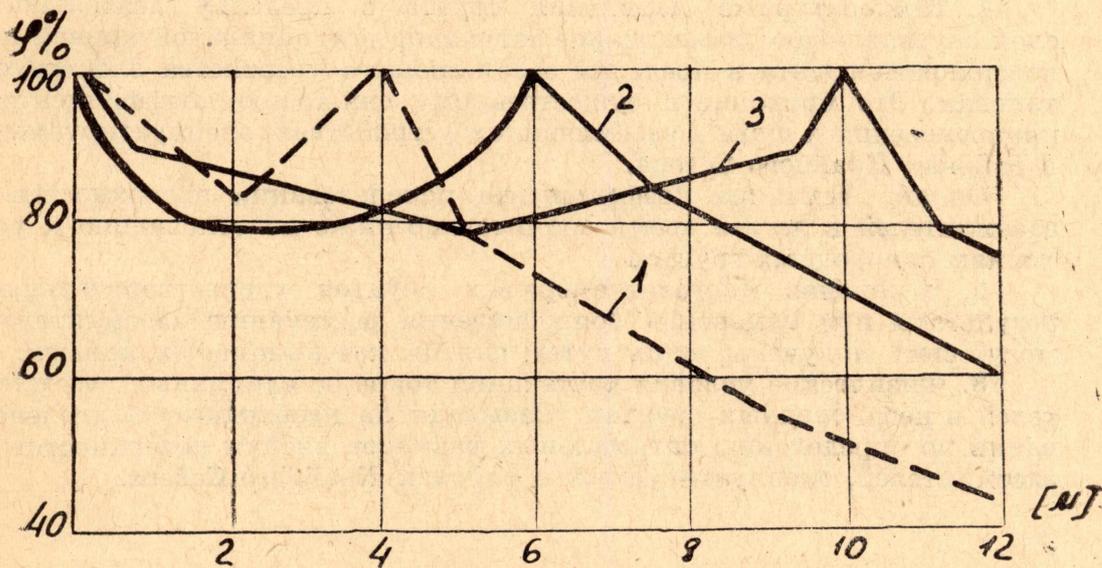


Рис. 5. Потенциальные кривые поверхностных ячеек:
1 — 4×4 м, 2 — 6×6 м, 3 — 10×10 м.

Нами также исследовано влияние промерзания деятельного и аккумуляционного слоев грунта на изменение распределения потенциала на поверхности грунта. Результаты этих исследований показывают, что в зимнее время характер потенциальных кривых на поверхности грунта практически не изменяется (см. рис. 3).

Выявленные особенности изменения потенциальных кривых указывают на необходимость исследований растекания токов с системы поверхностного заземлителя с целью обоснования выбора наиболее экономичной ячейки поверхностного заземлителя из условия выравнивания потенциала внутри ячейки и оптимальной величины коэффициента использования заземлителей.

Качественный анализ поставленных выше вопросов показывает, что в условиях Крайнего Севера потенциальная кривая в зоне заземлителя будет выпрямлена значительно лучше, чем в условиях однородных грунтов.

Нами выполнено измерение распределения потенциала в пределах ячейки поверхностных заземлителей следующих размеров: 4×4 ; 6×6 ; 10×10 м. Ячейки выполнялись из труб $\varnothing 4$ см, уложенных в грунт на глубину 0,3 м. Литологический разрез грунта в месте исследования показан на рис. 4. Испытание проводилось 10.9.64 г., то есть в период максимального оттаивания деятельного слоя. Потенциальные кривые для указанных заземлителей показаны на рис. 5, анализ которых показывает, что увеличение ячейки поверхностных заземлителей от 4 до 10 м не приводит к существенному изменению степени выравнивания потенциальной кривой внутри ячейки заземлителя.

ВЫВОДЫ

1. Температурные изменения грунта в пределах деятельного слоя обуславливают замедленное затухание потенциальной кривой по поверхности грунта в пределах заземляющего устройства электроустановки. Это приводит к существенному снижению коэффициентов прикосновения и шага в заземляющих устройствах, эксплуатируемых в районах Крайнего Севера.

Однако величина коэффициента использования поверхностных заземлителей в летнее время значительно ниже по отношению к условиям однородных грунтов.

2. В районах многолетнемерзлых грунтов удовлетворительные результаты при измерении сопротивления растеканию заземлителей могут быть получены лишь путем снятия потенциальных кривых.

3. Физические условия растекания токов от единичных заземлителей в неоднородных грунтах указывают на необходимость исследований по определению оптимальных размеров ячейки поверхностных заземлителей, эксплуатируемых в районах Крайнего Севера.