

2. РАСЧЕТ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ГРУНТА

2.1. Основное влияние на величину сопротивления заземлителей оказывает верхний слой грунта на глубине до 20—25 м, поэтому при расчете и устройстве заземлений необходимо знать его удельное сопротивление.

2.2. В зависимости от состава (чернозем, песок, глина и т. п.), 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.

2.3. Наиболее важными факторами, влияющими на величину удельного сопротивления грунта, являются влажность и температура. На рис. 2.1 и 2.2 в качестве примера приведены кривые изменения удельного сопротивления красной глины в зависимости от влажности и температуры.

2.4. В течение года в связи с изменением атмосферных и климатических условий содержание влаги в грунте и его температура

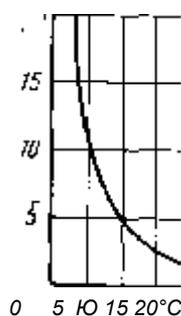


Рис. 2.1. Кривая изменения удельного сопротивления

красной глины в зависимости от ее влажности

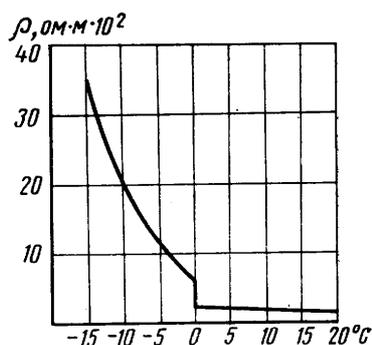


Рис. 2.2. Кривая изменения удельного сопротивления красной глины в зависимости от ее температуры

изменяются, а 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°C удельное сопротивление грунта на глубине 0,3 м увеличивается в 10 раз, а на глубине 0,5 м — в 3 раза.

Согласно наблюдениям в большинстве областей северной и средней части СССР при отрицательных температурах воздуха грунт имеет положительную температуру на глубине, начиная от 0,8 м. Влажность грунта на этой глубине и ниже при изменении температуры воздуха изменяется сравнительно мало.

В южных районах СССР глубина промерзания грунтов изменяется в пределах от 0,1 до 0,5 м.

2.5. При проектировании и строительстве заземляющих устройств необходимо знать максимальную величину удельного сопротивления слоя грунта на глубине, приблизительно в три раза превышающей глубину закладки заземлителя. Так, например, при забивке вертикального заземлителя длиной 2 м на глубину 3 м необходимо знать среднее удельное сопротивление слоя грунта толщиной до 9 м.

2.6. Величина удельного сопротивления грунта определяется путем измерений в месте устройства заземления с учетом коэффициентов влажности, которые приведены в табл. 2.1 и применяются в следующих случаях:

к1-1 — если измеренная величина сопротивления грунта соответствует минимальному значению (грунт влажный, перед измерением выпадало много осадков);

к1-2 — если измеренная величина удельного сопротивления грунта соответствует среднему значению (грунт средней влажности, перед измерением выпадало немного осадков);

к1-3 — если измеренная величина удельного сопротивления грунта соответствует наибольшему значению (грунт сухой, перед измерением выпадало совсем мало осадков).

Таблица 2.1

Заземлители	Глубина заложения, м	Поправочные коэффициенты		
		к1-1	к1-2	к1-3
Поверхностные (протяженные)	0,5	6,5	5	4,5
	0,8	3	2	1,6
Углубленные вертикальные (трубы, уголки, стержни)	0,8 (верхний конец заземлителя) 3 (нижний конец заземлителя)	2	1,5	1,4
	3 (нижний конец заземлителя)			

Расчётное значение удельного сопротивления определяется по формуле $R = R_{изм} \cdot K$, Ом*м, где $R_{изм}$ — измеренное удельное сопротивление грунта, Ом*м.

2.7. Коэффициенты промерзания грунта K_1 и K_2 , учитывающие сезонные колебания температуры для различных климатических зон, приведены в табл. 2.2. Коэффициент K_1 используется в расчет-

Таблица 2.2

Климатические зоны	Средняя многолетняя низшая температура (январь) °С	Средняя многолетняя высшая температура (июль) °С	Среднегодовое кол-во осадков, см	Продолжительность замёрзания воды, дни	Коэффициент промерзания	
					K_1	K_2
I	—20—15	+16—18	~40	190—170	1,9	5,6
II	—14—10	+18—22	~50	~150	1,7	4,0
III	10-0	+22—24	~50	~100	1,5	2,2
IV	0—+5	+24—26	30-50	0	1,3	1,8

Примечание. факторы, определяющие климатические зоны (температура, количество осадков и продолжительность замёрзания воды) запрашиваются при изысканиях у местных метеорологических станций.

7

ных формулах для стержневых электродов длиной 2—3 м, вершина (которых закладывается на глубину 0,5—0,8 м. Коэффициент K_2 применяется для протяженных электродов, закладываемых на глубину 0,8 м.

2.8. В исключительных случаях для оценки величины удельного сопротивления ρ при проектировании заземляющих устройств можно пользоваться средними величинами удельного сопротивлений

Т а б л и ц а 2.3

Грунт	Среднее удельное сопротивление,	Грунт	Среднее удельное сопротивление, Ом*м
Торф	25	Дно реки	200
Чернозем	50	Песок	500
Глина	60	Песчаник	1000
Суглинок	80	Супесок	300
Кокс	2,5		600
Лесс	250	Кварц	15000
Каменный уголь	130	Пористый известняк	180
Садовая земля	40	Плотный известняк	3000
Речная вода	1000	Гранит	1100

грунта, приведенными в табл. 2.3. Однако в последующем при строительстве заземлений необходимо пересчитать сопротивление заземления, предварительно уточнив ρ путем контрольных измерений. За расчетную величину удельного сопротивления в этом случае принимают

$$\rho_{расч} = 1,75 \rho_{ср}, \quad (2.2)$$

где $\rho_{ср}$ — среднее значение ρ , указанное в табл. 2.3;

1,75—поправочный коэффициент, принимаемый одинаковым для всей территории СССР.

РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

2.9. Сопротивление R трубчатого вертикального заземлителя, помещенного на глубине H от поверхности земли (рис. 2.3), определяется по формуле

$$R = K_1 \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L}{d} + 0,5 \ln \frac{4L + 7h}{L + 7h} \right), \text{ Ом}$$

где L —длина трубы, m ; d —внешний диаметр трубы, m ;

h —расстояние от поверхности земли до верхнего конца трубы, m

ρ —удельное сопротивление земли, Om^*m ;

Kl —коэффициент промерзания, учитывающий сезонные колебания температуры грунта.

2.10. Сопротивление вертикального заземлителя, выполненного из уголка, определяется также по ф-ле (2.3), но при этом эквивалентный диаметр определяется из выражения

$$d=0.95 *b , m$$

где b — ширина стороны уголка, m .

Наиболее целесообразно погружать трубу на такую глубину, чтобы верхний конец ее находился ниже глубины промерзания грунта и во всяком случае на глубине $0,7 m$ от поверхности земли, при этом значительно уменьшится колебание сопротивления заземления в зависимости от времени года.

2.11. В тех случаях, когда глубоко лежащие слои земли имеют меньшее удельное сопротивление, следует погружать трубы на большую глубину, вплоть до $20 m$.

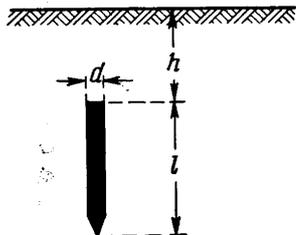
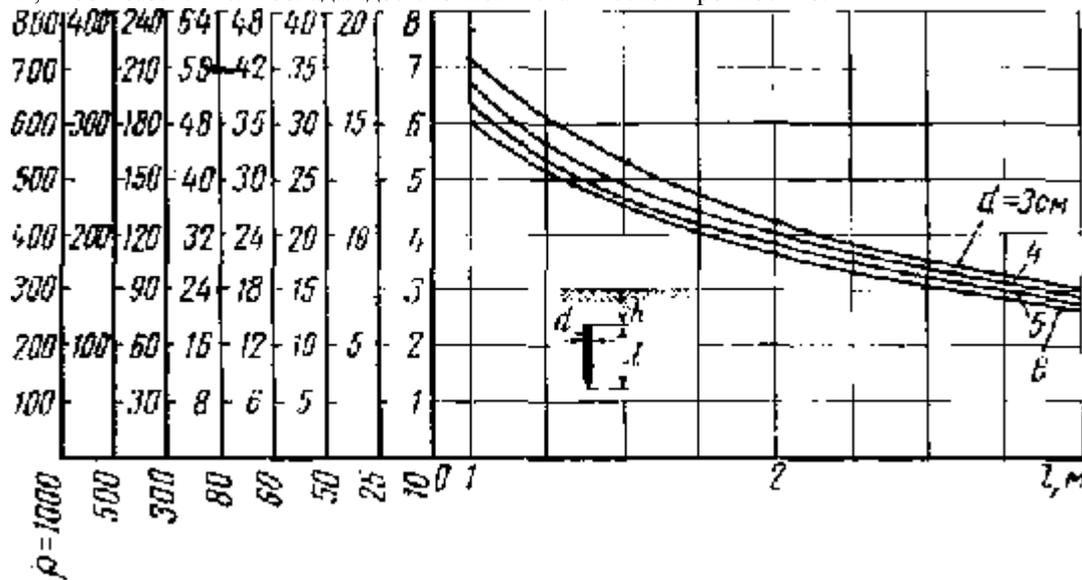


Рис. 2.3. Трубчатый заземлитель

2.12. При увеличении диаметра трубы свыше $5 cm$ сопротивление заземления уменьшается незначительно, поэтому добиваться его уменьшения путем увеличения диаметра трубы нецелесообразно.

Аналогичный вывод может быть сделан относительно ширины и толщины стороны уголка.

Диаметр трубы и толщина стенки (или ширина и толщина стороны уголка заземлителя из угловой стали) выбираются такими, чтобы заземлитель обладал достаточной механической прочностью.



К. он

Рис 2.4 Кривые изменения сопротивления R_z трубчатого заземлителя в зависимости от его длины L при различных диаметрах труб d и различных удельных сопротивлениях ρ грунта (при глубине закопки заземлителя, равной $0,7 m$)

9

В грунтах средней плотности диаметр трубы может быть $2,5—5 cm$, ширина стороны уголка заземлителя из угловой стали— $2,5—6 cm$. В твердых грунтах могут быть использованы либо сплошной стержень диаметром $2,5—5 cm$, либо труба диаметром $4—6 cm$, либо уголок с шириной стороны $4—6 cm$.

2.13. Изменение сопротивления вертикального заземлителя в зависимости от его длины при разных диаметрах труб и различных удельных сопротивлениях грунтов показано на рис. 2.4.

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

2.14. Сопротивление заземлителя в виде вытянутой металлической полосы, помещенной на глубине H , m (рис. 2.5), определяется по формуле

$$R = \frac{\rho}{\pi L} K_2 \cdot L \ln \frac{1,5L}{\sqrt{bh}}, \text{ Ом}$$

где L —длина заземлителя, м; b —ширина полосы, м; h —глубина прокладки полосы, м; ρ —удельное сопротивление грунта, Ом*м; K_2 —коэффициент промерзания грунта, учитывающий сезонные колебания температуры грунта.

Сопротивление заземлителя круглого сечения определяется по той же формуле с подстановкой вместо значения b величины $2d$:

$$R = \frac{\rho}{\pi L} K_2 \cdot L \ln \frac{L}{\sqrt{dh}} \text{ Ом}$$

Указанные формулы справедливы при $L \gg d$, $L \gg b$, $h \gg d$, $h \gg b$.



Рис. 25. Протяженные заземлители:
а) полосовые; б) цилиндрические

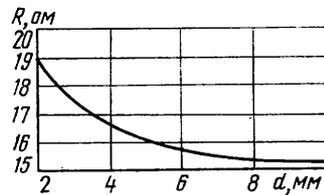


Рис. 26. Кривая изменения сопротивления протяженного проволочного заземлителя в зависимости от диаметра его проволочек

2.15. Диаметр провода проволочного заземлителя или ширина полосы полосового заземлителя мало влияет на величину сопротивления заземления, что видно из кривой на рис. 2.6.

10

2.16. Для снижения сопротивления вытянутого заземлителя более целесообразно увеличить его длину, а не диаметр. На рис. 2.7 показано изменение сопротивления заземления стального провода диаметром $d = 4 \text{ мм}$, уложенного в землю на глубину $0,7 \text{ м}$, в зависимости от длины его для различных удельных сопротивлений земли.

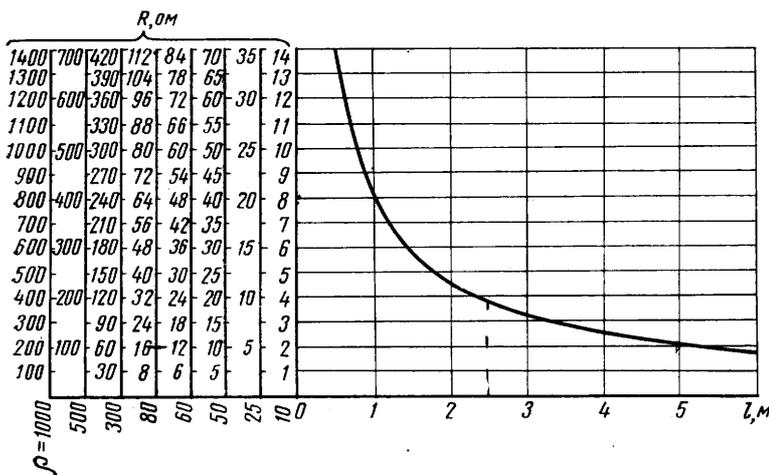


Рис. 27. Кривая изменения сопротивления протяженного проволочного заземлителя в зависимости от его длины при $d = 4 \text{ мм}$ и глубине заделки $H = 0,5 - 0,7 \text{ м}$ для различных значений удельного сопротивления грунта

Увеличение длины заземлителя более 10 м, как видно из кривой, дает относительно небольшое уменьшение сопротивления. Кроме того, при дальнейшем увеличении длины заземлителя начинают сказываться собственные сопротивления и индуктивность провода, в результате чего сопротивление заземления не уменьшается.

Приведенные на рис. 2.7 данные практически могут быть использованы для проволоки любого диаметра от 2 до 6 мм. Для устройства вытянутого заземлителя рекомендуется применять оцинкованную стальную проволоку диаметром 4 или 5 мм. Глубина заделки такого заземлителя (из круглой проволоки или полосового) должна быть не меньше 0,7 м в южных районах страны и 1 м в остальных областях СССР.

2.17. В целях экономии места при устройстве заземления ленточному или проволочному заземлителю можно придать форму замкнутого кольца.

Сопротивление кольцевого ленточного заземлителя, помещенного в грунт на глубину H , м, может быть приближенно определено по формуле

$$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} K_2 \operatorname{Ln} \frac{7D}{\sqrt{bh}}, \text{ Ом}, \quad (2.7)$$

11

где ρ —удельное сопротивление грунта, Ом*м; O —диаметр кольца заземлителя, м; b —ширина полосы, м; H —глубина заковки заземлителя, м.

Для проволочного кольцевого заземлителя сопротивление заземления определяется по той же формуле, но с заменой b на $2cl$.

$$R = \frac{\rho}{\pi^2 D} K_2 \operatorname{Ln} \frac{5D}{\sqrt{dh}} \text{ Ом} \quad (2.8).$$

При одной и той же длине провода, полосы или ленты сопротивление кольцевого заземлителя всегда больше, чем сопро-

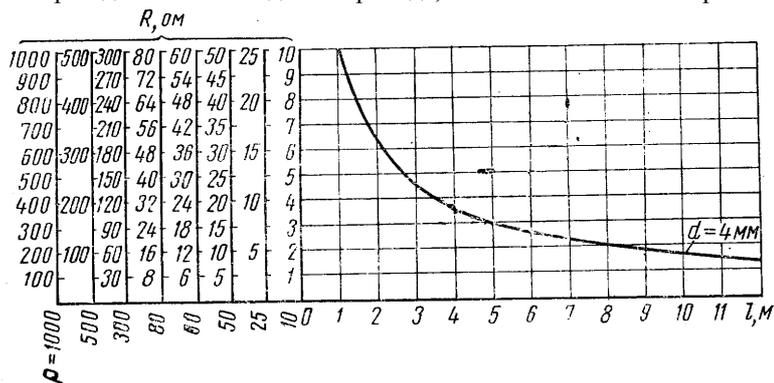


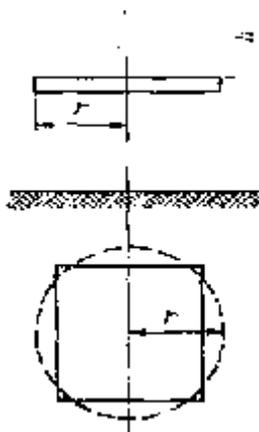
Рис. 2.8. Кривая изменения сопротивления кольцевого заземлителя

Рис 2.8 Кривая изменения сопротивления кольцевого заземлителя в зависимости от радиуса кольца при $d = 4$ мм, глубине заковки заземлителя $H = 0,5 — 0,7$ м для различных значений удельного сопротивления грунта

тивление вытянутого заземлителя (провод или лента, уложенные по прямой линии), и разница тем больше, чем меньше диаметр.

На рис. 2.8 показана зависимость сопротивления кольцевого проволочного заземлителя от радиуса кольца при различном удельном сопротивлении грунта. По этой кривой, не делая расчетов, можно определить сопротивление кольцевого заземлителя для любых значений удельного сопротивления грунтов в пределах от 10 до 1000 Ом*м.

Рис 2.9 Пластинчатый заземлитель



Глубина заковки кольцевого заземлителя должна выбираться на тех же основаниях, что и для вытянутого заземлителя.

2.18. Сопротивление заземления пластинчатого заземлителя, представляющего собой круглую или прямоугольную пластину, заложённую на глубину H (рис. 2.9), можно определить по формуле

$$R = \frac{\rho}{4\pi D} K_2 \left(1 - \frac{2}{\pi} \arcsin \frac{D}{3h} \right), \text{ Ом} \quad (2.9)$$

где D —диаметр пластины, м; ρ —удельное сопротивление грунта, Ом*м.

Для квадратной или прямоугольной пластины определяется эквивалентный диаметр по формуле

$$D = 2 \sqrt{\frac{S}{\pi}},$$

где S — площадь пластины, m^2 .

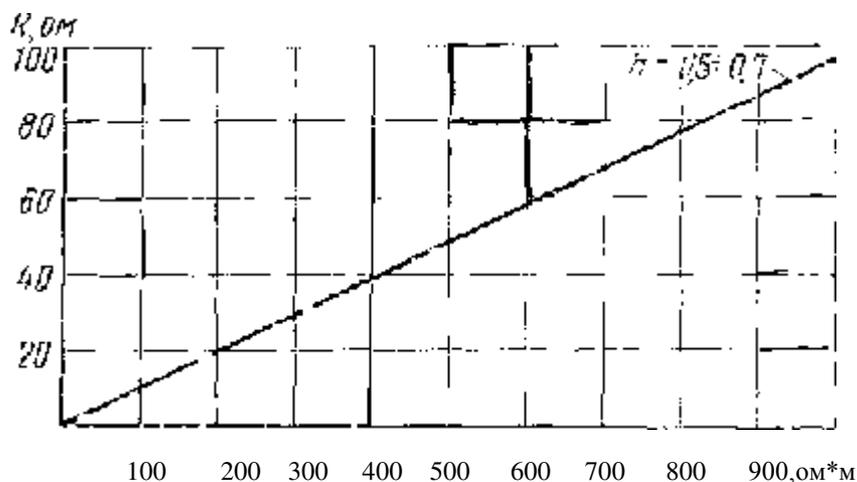


Рис 2.10. График изменения сопротивления пластинчатых заземлителей в зависимости от удельного сопротивления грунта для пластины с эквивалентным радиусом, равным 0,55 м, при $h=0,5-0,7$ м

Увеличение диаметра пластины свыше 125 см нецелесообразно, так как сопротивление заземления начинает уменьшаться медленно.

Для устройства заземления при помощи пластинчатых заземлителей рекомендуются оцинкованные листы железа размером 1,42X0,71 см, толщиной не менее 3,5 мм. Такие размеры листа эквивалентны круглой пластине диаметром около 1,13 м.

На рис. 2.10 приведен график изменения сопротивления пластинчатого заземлителя размером $D=1,1$ м в зависимости от удельного сопротивления грунта. Этот график позволяет, не делая расчетов, получить необходимые сведения при проектировании заземлений.

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

2.19. В грунтах с большим удельным сопротивлением один заземлитель (труба, стержень, полоса, кольцо, пластина и т. п.) имеет большое сопротивление и для получения требуемой меньшей величины сопротивления приходится устраивать заземление из нескольких единичных заземлителей, включенных параллельно. Заземляющее устройство при этом называется *многоэлектродным*.

2.20. При параллельном соединении единичных заземлителей необходимо принимать во внимание эффект взаимного экранирования заземлителей, который сказывается в том, что общее со-

13

противление заземления уменьшается не пропорционально числу заземлителей, соединенных параллельно, а несколько меньше. Экранирование сказывается тем больше, чем ближе друг к другу будут расположены единичные заземлители. Полное сопротивление $R_{об}$ параллельно соединенных заземлителей одинакового сопротивления определяется по формуле:

$$R_{об} = \frac{R}{n\eta}, \quad (2.11)$$

где R —сопротивление единичного заземлителя, $ом$; n —число заземлителей; η —коэффициент использования, зависящий от конфигурации и расположения заземлителей.

2.21. Полное сопротивление нескольких вертикальных заземлителей одинакового сопротивления, соединенных параллельно с по-

Таблица 2.4

Отношение расстояния между трубами	Число труб (уголков) n	η
1	2	0,84–0,87
	3	0,76–0,80
	5	0,67–0,72
	10	0,56–0,62
	15	0,51–0,56
20	0,47–0,52	
2	2	0,90–0,92
	3	0,85–0,88
	5	0,79–0,83
	10	0,72–0,77
	15	0,66–0,73
20	0,65–0,70	
	2	0,93–0,95
3	3	0,90–0,92
	5	0,85–0,88
	10	0,79–0,83
	15	0,76–0,80
20	0,74–0,79	

Таблица 2.5

Отношение расстояния между трубами (уголками) к их длине a/l	Число труб (уголков) n	η
1	4	0,66–0,72
	6	0,58–0,65
	10	0,52–0,58
	20	0,44–0,50
	40	0,38–0,44
	60	0,36–0,42
	100	0,33–0,39
	4	0,76–0,80
	6	0,71–0,75
2	10	0,66–0,71
	20	0,61–0,66
	40	0,55–0,61
	60	0,52–0,58
	100	0,49–0,55
3	4	0,84–0,86
	6	0,78–0,82
	10	0,74–0,78
	20	0,68–0,73
	40	0,64–0,69
	60	0,62–0,67
100	0,59–0,65	

мощью горизонтальных заземлителей (полос или провода), определяется по формуле

$$R_{\text{об}} = \frac{R_1 R_2}{\eta_1 R_2 + \eta_2 n R_1}, \quad (2.12)$$

де R_1 —сопротивление горизонтального заземлителя (соединительной полосы, шины), *ом*; R_2 —сопротивление вертикального заземлителя, *ом*; η_1 —коэффициент использования протяженных заземлителей, которыми являются соединительные полосы или шины; η_2 — коэффициент использования вертикальных заземлителей; n — количество вертикальных заземлителей.

Примечание. Формулы (2.14) и (2.15) действительны для случая одинаковых сопротивлений каждого из вертикальных заземлителей, что обычно и принимается в расчетах.

2.22. Коэффициенты использования η для многоэлектродных заземлителей (без учета влияния соединительной полосы), состоящих из вертикальных стержней (труб или уголков), размещенных в ряд, приведены в табл. 2.4, а для тех же заземлителей, размещенных по замкнутому контуру,—в табл. 2.5. Коэффициенты использования параллельно уложенных полосовых заземлителей (ширина полосы $b=20—40$ мм, глубина заложения $h=30—80$ см) приведены в табл. 2.6,

2.23. Коэффициенты использования соединительной полосы в ряду из вертикальных заземлителей приведены в табл. 2.7, в замкнутом контуре—в табл. 2.8.

Таблица 2.6

Длина каждой полосы, м	Число параллельных полос n	Коэффициенты использования при расстоянии между параллельными полосами, м				
		1	2,5	5,0	10,0	15,0
15	2	0,63 ¹⁾	0,75 ¹⁾	0,83 ¹⁾	0,92 ¹⁾	0,96 ¹⁾
	5	0,37	0,49	0,60	0,73	0,79
	10	0,25	0,37	0,49	0,64	0,72
	20	0,16	0,27	0,39	0,57	0,64
25	5	0,35	0,45	0,55	0,66	0,73
	10	0,25	0,31	0,43	0,57	0,66
	20	0,14	0,23	0,33	0,47	0,57
50	2	0,60 ¹⁾	0,69	0,78 ¹⁾	0,88 ¹⁾	0,93 ¹⁾
	5	0,33	0,40	0,48	0,58	0,65
	10	0,20	0,27	0,35	0,46	0,53
	20	0,12	0,19	0,25	0,36	0,44

Длина каждой полосы, м	Число параллельных полос n	Коэффициенты использования при расстоянии между параллельными полосами, м				
		1	2,5	5,0	10,0	15,0
75	5	0,31	0,38	0,45	0,53	0,58
	10	0,18	0,25	0,31	0,41	0,47
	20	0,11	0,16	0,22	0,31	0,38
100	5	0,30	0,36	0,43	0,51	0,57
	10	0,17	0,23	0,28	0,37	0,44
	20	0,10	0,15	0,20	0,28	0,345
200	5	0,28	0,32	0,37	0,44	0,50
	10	0,14	0,20	0,23	0,30	0,36
	20	0,088	0,12	0,15	0,215	0,265

*) Данные приближенные.

Таблица 2.7

Отношение расстояния между трубами (уголками) к их длине a/l	Коэффициенты использования соединительной полосы при числе труб (уголков) n в ряду							
	4	5	8	10	20	30	50	65
1	0,77	0,74	0,67	0,62	0,42	0,31	0,21	0,20
2	0,89	0,86	0,79	0,75	0,56	0,46	0,36	0,34
3	0,92	0,90	0,85	0,82	0,68	0,58	0,49	0,47

Таблица 2.8

Отношение расстояния между трубами (уголками) к их длине u/l	Коэффициенты использования соединительной полосы при числе труб (уголков) n в контуре заземления								
	4	5	8	10	20	30	50	70	100
1	0,45	0,40	0,36	0,34	0,27	0,24	0,21	0,20	0,19
2	0,55	0,48	0,43	0,40	0,32	0,30	0,28	0,26	0,24
3	0,70	0,64	0,60	0,56	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33

2.24. Коэффициенты использования для многолучевого заземления, состоящего из вытянутых протяженных одиночных заземлителей, расположенных в радиальном направлении, приведены в табл. 2.9.

36

Таблица 2.9

Длина луча, м	Коэффициенты использования при числе лучей n											
	3				4				6			
	и при диаметре проводника луча, см											
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
2,5	0,76	0,74	0,72	0,71	0,63	0,61	0,59	0,58	0,50	0,48	0,46	0,45
5,0	0,78	0,76	0,74	0,73	0,67	0,65	0,63	0,62	0,53	0,51	0,49	0,48
10,0	0,81	0,79	0,77	0,76	0,70	0,69	0,67	0,66	0,57	0,55	0,53	0,51
15,0	0,82	0,80	0,78	0,76	0,72	0,70	0,68	0,66	0,59	0,57	0,55	0,53
30,0	0,84	0,82	0,80	0,78	0,75	0,73	0,71	0,69	0,62	0,60	0,58	0,56

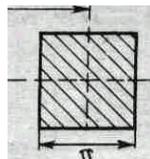
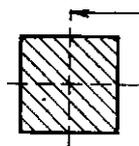
Примечания. 1. При применении для лучей полосовой стали эквивалентный диаметр принимается равным $b/2$, где b — ширина полосы.

2. Приведенные коэффициенты могут применяться для глубины заложения 0,3—0,8 м.

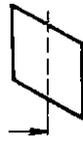
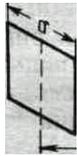
2.25. Коэффициенты использования для многоэлектродных заземлений, состоящих из полосно-листовых заземлителей, запараллеленных между собой, приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Вид заземления	Значение η при	
	$d = 4a$	$d = 2a$



2	0,66	0,62
4	0,52	0,38
6	0,43	0,3
8	0,4	0,27
10	0,39	0,25



2	0,75	0,67
4	0,6	0,46
6	0,55	0,38
8	0,54	0,35
10	0,52	0,32

Пример расчета многоэлектродного заземления. Определить общее сопротивление заземления, состоящего из 20 вертикальных заземлителей выполненных из угловой стали. Заземлители расположены прямоугольником и соединены между собой стальной шиной, расстояние между ними $a=21$. Сопротивление каждого уголка, определенное по ф-ле (2.1), $R_2=30$ Ом, сопротивление соединительной полосы $R_1=15$ Ом. Расчет ведется по ф-ле (2.12):

$$R_{\text{об}} = \frac{R_1 R_2}{\eta_1 R_2 + \eta_2 n R_1}$$

17

Соответствующие значения η_1 и η_2 приведены в табл. 2.5 и 2.8 $\eta_1 = 0,32$, $\eta_2 = 0,63$. Подставляя в формулу данные R_1 , R_2 , η_2 , η_1 получаем

$$R_{\text{об}} = \frac{15 * 30}{30 * 0,32 + 15 * 0,63 * 20} = \frac{450}{9,6 + 189} = 2,26 \text{ Ом}$$

При параллельном соединении уголков между собой изолированным проводом общее сопротивление заземления определяется по формуле

$$R_{\text{об}} = R_2 / (n * \eta_2) = 30 / 20 * 0,63 = 2,38 \text{ Ом}$$

2.26. Сопротивление заземлителя, выполненного в виде многолучевой звезды, расположенной у поверхности земли, рассчитывается по формуле

$$R = \frac{\rho}{\pi \ln} K_2 \left\{ \ln \frac{4l}{d} - 1 + N(n) \right\} \quad (2.13)$$

где l —длина луча, m ; ρ —удельное сопротивление земли, $\text{Ом} * m$, d —диаметр провода, из которого сделаны лучи, m ; n —число лучей;

$$N(n) = \sum_{k=1}^{n-1} \ln \frac{1 + \sin \frac{\pi k}{n}}{\sin \frac{\pi k}{n}} \quad (2.14)$$

В табл. 2.11 приведены значения функции $N(n)$ при некоторых значениях n .

Таблица 2.11

n	2	3	4	6	8	12	100
$N(n)$	0,7	1,53	2,45	4,42	6,5	11,0	116

При $n > 6$ функция

$$N(n) \approx (n - 1) \ln 3.414 - \ln n \quad (2.15)$$

ЗАЗЕМЛИТЕЛИ В ДВУХСЛОЙНЫХ ГРУНТАХ

2.27. Если грунт в месте установки заземления имеет ярко выраженную двухслойную структуру, то при расчете сопротивлений заземлений необходимо применять действующее удельное сопротивление грунта. Графики значений действующего удельного сопротивления грунта для трубчатых заземлителей приведены на рис. 2.11, а для горизонтальных заземлителей—на рис. 2.12 и 2.13 при различных значениях p_1/p_2 и $\kappa = (p_2 - p_1) / (p_1 + p_2)$.

2.28. В табл. 2.12 и 2.13 приведены сопротивления соответственно трубчатых и полосовых заземлителей в неоднородном грунте при весьма распространенных на практике значениях отношения сопротивления верхнего слоя к сопротивлению нижнего слоя --10 и 0,1 м. Глубина заложения полосы (верхнего конца трубы) --0,5 м.

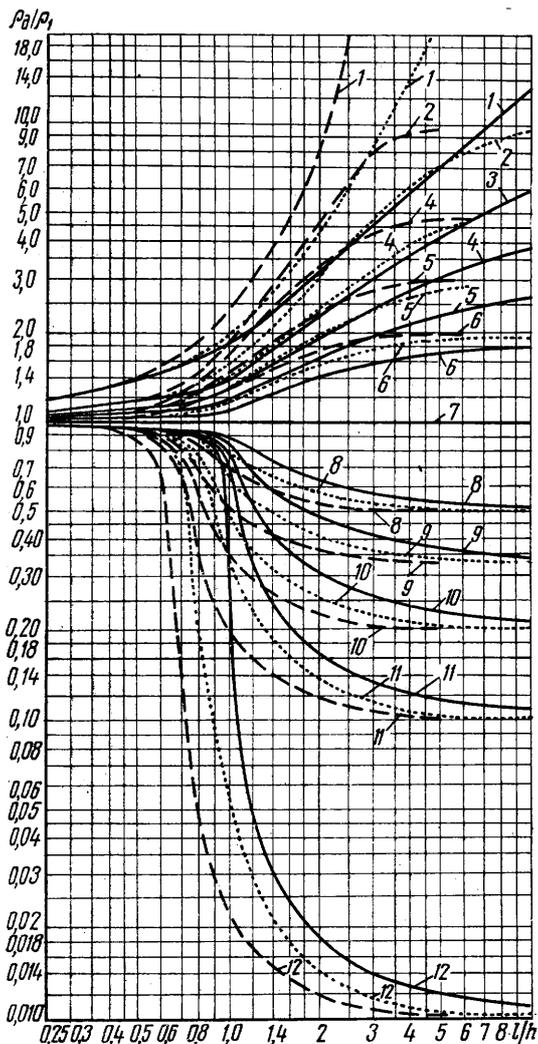


Рис. 2.11. Графики значений действующего удельного сопротивления грунта для трубчатых заземлителей:

- 1 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1}{100}$; $\kappa = 0,98$;
- 2 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1}{10}$, $\kappa = 0,818$;
- 3 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1}{10}$, $\kappa = 0,667$;
- 4 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1}{5}$, $\kappa = 0,667$;
- 5 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1}{3}$, $\kappa = 0,500$;
- 6 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{1}{2}$, $\kappa = 0,333$;
- 7 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 1$, $\kappa = 0$;
- 8 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 2$, $\kappa = -0,333$;
- 9 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 3$, $\kappa = -0,500$;
- 10 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 5$; $\kappa = -0,667$;
- 11 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 10$, $\kappa = -0,818$;
- 12 — $\frac{\rho_1}{\rho_2} = 100$, $\kappa = -0,98$

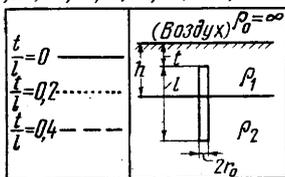
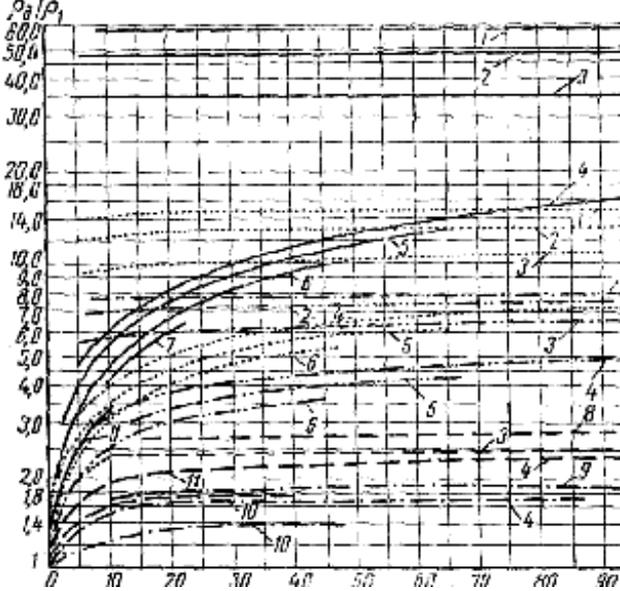


Таблица 2.12

Толщина верхнего слоя грунта, м	Длина электрода, м	Отношение действующего удельного сопротивления к сопротивлению верхнего слоя	Действующее удельное сопротивление $\Omega \cdot \text{м}$	Сопротивление заземлителя Ω
1	2	0,13/3,3	65/165	26/66
	3	0,4/4,5	55/225	16/65,3
2	2	0,3/1,65	150/82	60/33
	3	0,15/0,22	75/110	22/32
3	2	0,85/1,3	420/65	168/26
	3	0,36/1,5	180/75	52/22

Примечание. В числителе даны значения величин при удельном сопротивлении верхнего слоя грунта $\rho_1 = 500 \Omega \cdot \text{м}$ и отношении удельных сопротивлений слоев $\rho_1/\rho_2 = 10$, а в знаменателе — при $\rho_1 = 50 \Omega \cdot \text{м}$ и $\rho_1/\rho_2 = 0.1$.

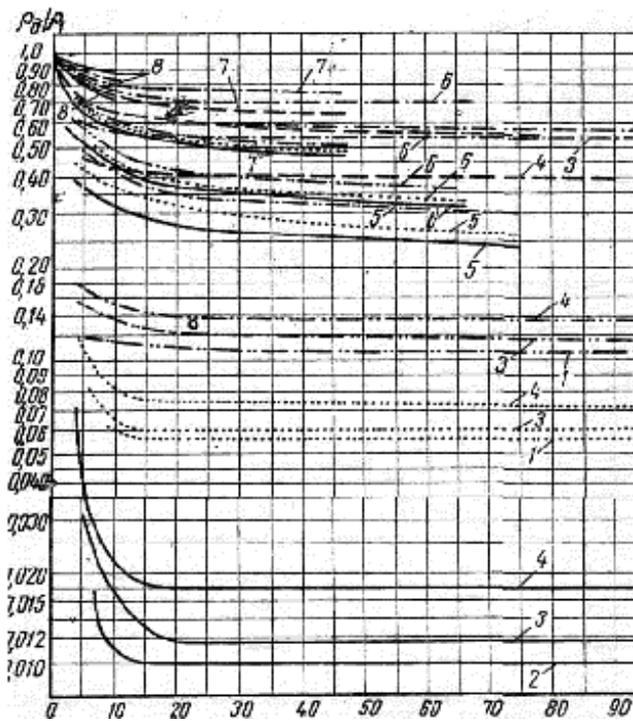


ρ_1/ρ_2	k	Обозначение
1/2	0,333	-----
1/3	0,5	-----
1/10	0,818	-----
1/20	0,905	-----
1/100	0,98	-----

$p = \infty$

Рис. 2.12. Графики значений действующего удельного сопротивления грунта для горизонтальных заземлителей при различных отношениях t/h и $k > 0$:

- 1 - $t/h = 2$; 2 - $t/h = 1.5$; 3 - $t/h = 1.1$; 4 - $t/h = 1$; 5 - $t/h = 0.8$; 6 - $t/h = 0.4$; 7 - $t/h = 0.2$; 8 - $t/h \geq 1.5$;
 9 - $t/h \geq 1.1$; 10 - $t/h \leq 0.4$; 11 - $t/h \leq 0.05$



ρ_1/ρ_2	k	Обозначение
2	-0.333	-----
3	-0,5	-----
10	-0.818	-----
20	-0.905
100	0,98	_____

$p = \infty$

Рис. 2.13. Графики действующего удельного сопротивления грунта для горизонтальных заземлителей при различных отношениях t/h $k < 0$
 1 - $t/h = 2$; 2- $t/h \geq 1.5$; 3 - $t/h = 1.1$; 4 - $t/h = 1$; 5 - $t/h = 0.9$; 6- $t/h = 0.8$; 7- $t/h = 0.4$; 8- $t/h = 0.05$;

Данные таблиц показывают, что заземлитель используется тем лучше, чем выше проводимость грунта, в котором он помещен. Эффективность заземлителя при правильном выборе его расположения может быть повышена в 3—5 и более раз. При проводимости нижнего слоя в 3—10 раз больше, чем верхнего, следует применять весьма длинные трубы, причем одна такая труба может оказаться эффективнее большого числа труб меньшей длины.

Для полосовых заземлителей решающее значение приобретает глубина заложения полосы. При соответствующей глубине заложения одна короткая полоса по своей проводимости может оказаться эквивалентной полосе, в 4 раза большей длины.

Таблица 2.13

Толщина верхнего слоя грунта, м.	Длина электрода м	Глубина заложения заземлителя от поверхности земли, м	Отношение действующего удельного сопротивления к сопротивлению верхнего слоя	Действующее удельное сопротивление Ом*м	Сопротивление заземлителя, ом
1	5	0,5	0.65/2,1	325/105	81/25
		0,9	0,47/2,6	235/130	59/32
		1	0.17/2,7	85/135	21/34
	10	0,5	0.58/2,6	290/130	41/ 182
		0,9	0,42/3	210/150	29/21
		1	0.155/3,2	775/160	11/22 ,
20	0,5	0,52/3,1	260/155	21/12	
3	5	0,5	0,93/1,3	465/65	116/16
	10		0,88/1,7	440/85	62/12
	20		0,78/1,9	390/95	31,8

Примечание. В числителе даны значения величин при удельном сопротивлении верхнего слоя грунта $\rho_1=500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и отношении удельных сопротивлений слоев $\rho_1/\rho_2=10$. а в знаменателе—при $\rho_1=50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и $\rho_1/\rho_2=0,1$.

ГЛУБИННЫЕ ЗАЕМЛИТЕЛИ

2.29. В реальных условиях земля имеет многослойное строение, однако для практических расчетов достаточно представляем землю в виде двухслойной структуры. Во многих случаях удельное сопротивление нижнего слоя ниже сопротивления верхнего слоя, поэтому целесообразно использование заглубленных (от 5 до 10 м) и глубинных (свыше 10 м) заземлителей, что приводит к существенной экономии средств, труда и материалов.

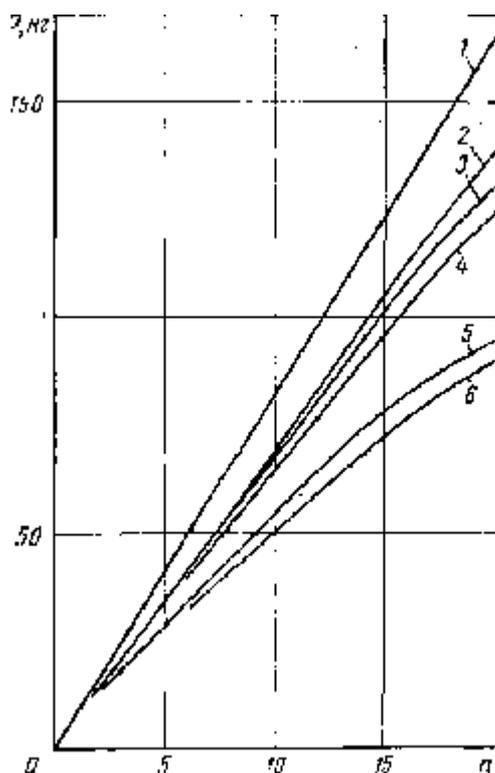
На рис. 2.14 приводятся графики веса металла многоэлектродного заземления в зависимости от числа электродов (кривая 7) и веса эквивалентного глубинного заземления при различном расположении электродов в контуре многоэлектродного заземления 1 однородном строении грунта (кривые 2, 4, 6 — заземление в виде контура с расстоянием между электродами 7,5; 5 и 2,5 м соответственно; кривые 3, 5 — заземление в виде ряда с расстоянием между электродами 5 и 2,5 м соответственно). Из графика видно, что существенная экономия материалов достигается при изменении глубинных и заглубленных заземлителей и в однородном грунте (с постоянным по глубине удельным сопротивлением за счет лучшего использования поверхности растекания токов.

22

2.30. Сопротивление растеканию токов с вертикального заземлителя, начинающегося от поверхности земли при двухслойном ее строении, определяется по формуле

$$R = \frac{\rho_1}{2\pi l} \frac{1+k}{1+k\left(\frac{2h}{l}-1\right)} \left(Ln \frac{4l}{d} + \sum_{n=1}^{\infty} k^n Ln \frac{l+2hn}{l+2h(n-1)} \right), \quad (2.16)$$

где $\kappa = (\rho_2 - \rho_1) / (\rho_2 + \rho_1)$ — коэффициент неоднородности; ρ_1 / ρ_2 — удельное сопротивление верхнего слоя, $\text{Ом}\cdot\text{м}$; ρ_2 — удельное сопротивление нижнего слоя, $\text{Ом}\cdot\text{м}$, H — глубина верхнего слоя, м; l — длина заземлителя, м; d — диаметр заземлителя, м.



L

Рис. 2.14. Вес многоэлектродного и глубинного заземлений при одинаковом сопротивлении в однородном грунте:

1 — вес многоэлектродного заземления в зависимости от количества электродов, 2 — вес эквивалентного глубинного заземления при выполнении многоэлектродного заземления в виде контура с расстоянием между электродами 7,5 м; 3 — вес эквивалентного глубинного заземлителя при выполнении многоэлектродного заземления 50 в виде ряда с расстоянием между электродами 5 м; 4 — вес эквивалентного глубинного заземлителя при выполнении многоэлектродного заземления в виде контура с расстоянием между электродами 5 м; 5 — вес эквивалентного глубинного заземлителя при выполнении многоэлектродного заземления в виде ряда с расстоянием между электродами 2,5 м; 6 — вес эквивалентного глубинного заземлителя при выполнении многоэлектродного заземления в виде многоэлектродного замкнутого контура с расстоянием между электродами 2,5 м

2.31. Формула (2.16) весьма сложна и при расчетах приходится производить вычисление рядов. При ориентировочных расчетах для вычисления сопротивления глубинного заземлителя можно пользоваться приближенной формулой:

$$R = \frac{1}{2\pi \left(\frac{h}{\rho_1} + (L-h) \frac{1}{\rho_2} \right)} \ln \frac{4L}{d}, \text{ Ом} \quad (2.17)$$

Формула справедлива для глубинного заземлителя выполненного в виде одного стержня. При $L/h > 6$ ошибка по сравнению с расчётами по формуле (2.16) не превышает 3%, а при $L/h = 1,5$, она достигает 15%

23

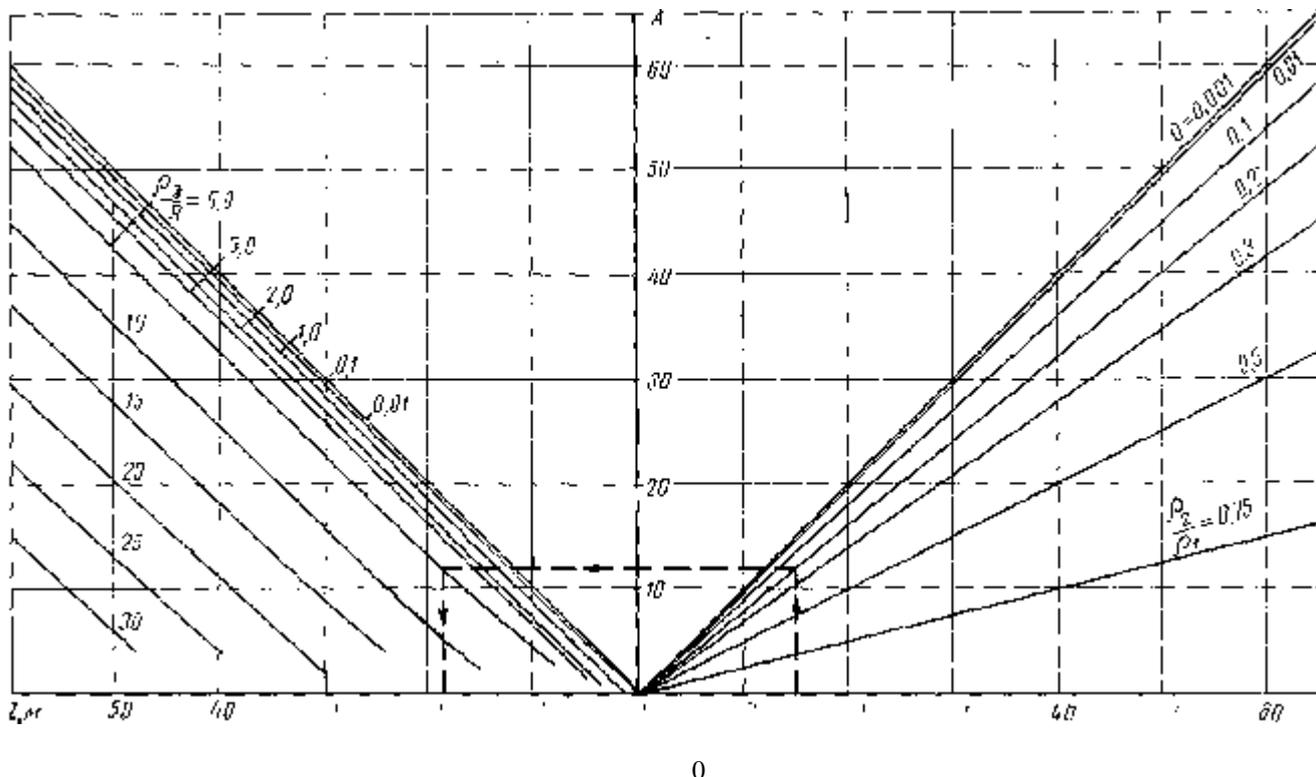


Рис 2.15 Номограммы для определения длины глубинного заземлителя

2.32. На рис. 2.15 построены номограммы для определения длины глубинного заземлителя по заданной величине R и известным величинам h , d , ρ_1 и ρ_2 . Порядок расчета следующий.

На правой ветви оси абсцисс отложены значения толщины верхнего слоя h . Восстанавливая перпендикуляр из точки, соответствующей известному значению h , до пересечения с соответствующей линией ρ_2/ρ_1 , найдем величину A , отложенную по оси ординат. Далее, зная отношение ρ_2/R и проведя из полученной точки на оси ординат прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с соответствующей линией ρ_2/R найдем на левой ветви оси абсцисс искомое значение длины глубинного заземлителя.

Таким образом, отыскание величины L сводится к проведению на графике трех линий, параллельных осям координат. Например, если $L=15$ м, $\rho_1=500$ Ом*м, $\rho_2=100$ Ом*м и необходимо получить сопротивление $R=20$ Ом, по графику на рис. 2.15 найдем, что $L=18,5$ м. Ход вычислений показан на рис. 2.15 пунктиром. При вычислении номограмм диаметр глубинного заземлителя принят равным 19 мм. Однако некоторое изменение диаметра не скажется на результатах расчетов.

2.33. Дополнительная экономия материала может быть получена при рациональном выборе диаметра прутка заземлителя. На рис. 2.16 приводится график веса прутка и его длины в зависимости от диаметра при неизменном сопротивлении заземлителя.

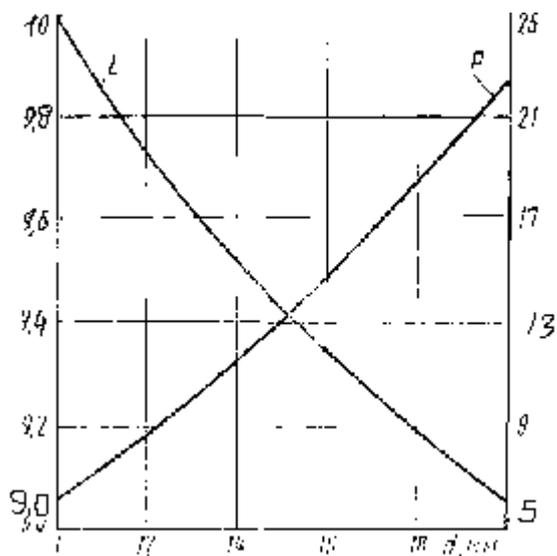


Рис. 2.16. Зависимости веса и длины глубинного заземлителя от диаметра стержня при постоянном сопротивлении заземления

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ, ПОМЕЩЕННЫХ В КОКСОВОЙ МЕЛОЧИ

2.34. Сопротивление растеканию одиночного вертикального электрода в коксовой мелочи (рис. 2.17) определяется по формуле

$$R_b = 0,37k_1 \frac{\rho}{L_b} \left[L_n \frac{2L_b}{d_{акт}} + 0,5L_n \frac{4t_b + 3L_b}{4t_b + L_b} + \frac{\rho_{акт}}{\rho} L_n \frac{d_{акт}}{d_b} \right] , \text{ Ом} \quad (2.18)$$

где k_1 — коэффициент промерзания, учитывающий сезонные колебания температуры грунта для вертикального заземления;

25

ρ — удельное сопротивление грунта, Ом*м; L_b —длина вертикального электрода, м; t_b —средняя глубина установки электрода, равная расстоянию от поверхности земли до середины электрода, м; d_b - наружный диаметр электрода, м (для электродов из угловой стали вместо диаметра d подставляется эквивалентная величина, равная ширине стороны b уголка с коэффициентом 0,95; $d_{экв} \approx 0,95 b$); $\rho_{акт}$ — удельное электрическое сопротивление коксовой мелочи, Ом*м; $d_{акт}$ — наружный диаметр коксовой засыпки, м.

2.35. Сопротивление растеканию одиночного горизонтального электрода или соединительной полосы в коксовой мелочи (рис, 2.18) при $L_r \gg d_r$ и $t_r \ll L_r/4$ определяется по формуле

$$R_r = 0.37k_2 \frac{\rho}{L_r} \left[L_g \frac{2L_r}{d_r} + L_g \frac{L_r}{d_r} + \frac{\rho_{акт}}{\rho} L_g \frac{d_{акт}}{d_r} \right] , \text{ Ом} \quad (2.19)$$

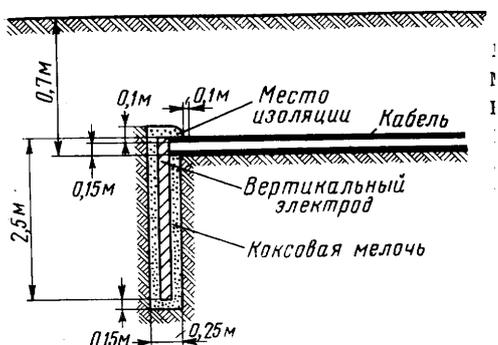


Рис. 2.17. Схема установки одиночного вертикального заземлителя в коксовой засыпке

где k_2 — коэффициент промерзания, учитывающий сезонные колебания температуры грунта для горизонтальных заземлителей; ρ — удельное сопротивление грунта, Ом*м; L_g —длина горизонтального заземлителя, м; d_g — наружный диаметр горизонтального электрода, м (для электродов из угловой или полосовой стали вместо диаметра a подставляется эквивалентная величина равная ширине стороны в уголка с коэффициентом 0,95); t_g — глубина прокладки электрода, м; $\rho_{акт}$ — удельное электрическое сопротивление коксовой мелочи Ом*м; $d_{акт}$ — наружный диаметр активатора, м.

Удельное сопротивление коксовой мелочи $\rho_{акт}$ зависит от тип угля, из которого получен кокс, и составляет величину порядка 0,22—2,5 Ом*м. Коксовая мелочь, используемая при устройстве

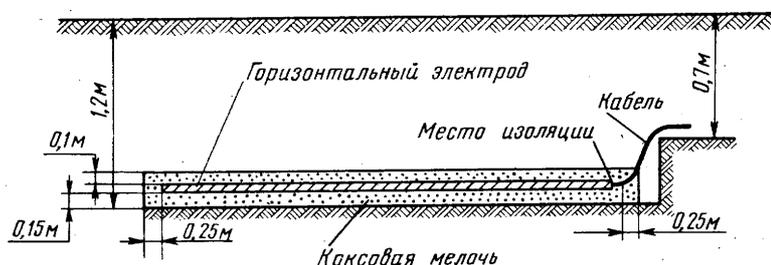


Рис. 2.18. Схема установки одиночного горизонтального зазем-

Рис. 2.18. Схема установки одиночного горизонтального заземлителя в коксовой засыпке

заземлений , представляет собой зерна диаметром 10—15 мм (согласно ГОСТ МГУ—2834 и ТУ—1020). При расчетах следует принимать величину $\rho_{акт} = 2,5 \text{ Ом*м}$.

На рис. 2.19 показана схема установки многоэлектродного заземления из вертикальных электродов, помещенных в коксовой мелочи.

2.36. Вместо засыпки коксовой мелочи на месте оборудования заземлений часто применяют заземлители с цементированной коксовой мелочью вокруг металлического стержня заводского изготовления (типа ЗКА-140). На рис. 2.20 показана схема установки многоэлектродного заземления из электродов типа ЗКА-140.

Применение прослойки в виде коксовой мелочи между металлическими электродами и основным грунтом уменьшает сопротивление, заземления и увеличивает срок службы заземлений .

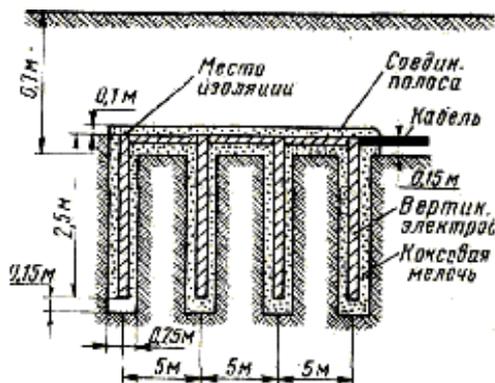


Рис. 2.19. Схема установки многоэлектродного заземления в коксовой засыпке

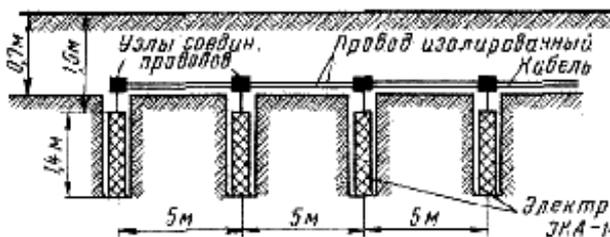


Рис. 2.20. Схема установки многоэлектродного заземления из электродов типа ЗКА-140

РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКАХ

2.37. В случае прохождения через заземлитель импульсных токов, возникающих при грозе, в формулы для расчета сопротивления заземлителя следует ввести дополнительно импульсный коэффициент.

2.38. При значительных по величине импульсах тока в грунте вблизи заземлителя возникают настолько большие напряженности электрического поля, что в отдельных участках земли происходит частичный искровой пробой. Согласно исследованиям

27

искровой пробой в средних по проводимости грунтах возникает при напряженности электрического поля $E=3$ кВ/см.

2.39. В случае возникновения искрового пробоя шунтируется переходное сопротивление прилегающих участков грунта и уменьшается общее сопротивление заземления. Это явление приводит как бы к увеличению размеров заземлителя по сечению и уменьшению удельного сопротивления грунта. Поэтому сопротивление единичного заземлителя для импульсных токов при грозе определяется по формуле

$$R_{\text{ими}} = \alpha R_3$$

где R_3 — сопротивление заземлителя при постоянном токе и токах низкой частоты; α — импульсный коэффициент, учитывающий снижение сопротивления заземления при импульсных токах.

2.40. Импульсные коэффициенты, которые необходимо учитывать при расчетах заземлений, предназначенных для защиты устройств связи от грозы, приведены в табл. 2.14.

Таблица 2.1

Тип заземлителя	Схема заземлителя	Длина заземлителя, м	Обозначение импульсного коэффициента	Величина импульсного коэффициента при удельном сопротивлении грунта ρ , Ом*м				
				до 50	51-100	101-300	301-500	501-1000
Трубчатый	Рис. 2.3	2-3	α_1	1	0,8	0,6	0,4	0,35
Протяженный проволочный или полосовой	Горизонтально расположенный заземлитель, закопанный в грунт	5-10	α_2	1	0,9	0,7	0,5	0,4
		10-20		1,05	0,95	0,78	0,65	0,5
		20-30		1,2	1,1	0,95	0,73	0,52

2.41. Импульсный коэффициент необходимо учитывать также и при определении сопротивления многоэлектродного заземлителя, употребляемого для защиты устройств связи от грозных разрядов. В этом случае для расчета сопротивления заземления и стержневых заземлителей, соединенных изолированными проводами, применяется формула

$$R_{об} = \frac{R_{мп} \alpha_1 \alpha_2}{n \eta_1}, \text{ Ом} \quad (2.21)$$

а для стержневых заземлителей, соединенных голыми проводами

$$R_{об} = \frac{R_{мп} R_{нп} \alpha_1 \alpha_2}{\alpha_1 R_{мп} \eta_2 + \alpha_2 R_{нп} \eta_1 n}, \text{ Ом} \quad (2.22)$$

где α_1, α_2 — берутся из табл. 2.14; η_1, η_2 — из табл. 2.4—2.9.

Для протяженных проволочных или полосовых заземлителей в том же случае применяется формула

$$R_{об} = \frac{R_{об} \alpha_2}{n \eta_2}, \text{ Ом} \quad (2.23)$$

СРОК СЛУЖБЫ РАБОЧИХ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ И СПОСОБЫ ПРОДЛЕНИЯ ЭТОГО СРОКА

2.42. Металлические заземлители, находясь в земле, подвергаются коррозии, причем в особо неблагоприятных условиях находятся заземлители рабочего заземления, через которые проходят рабочие токи постоянного направления.

2.43. К заземлениям, в которых заземлители подвергаются усиленной коррозии, относятся:

- заземления установок дистанционного питания усилительных пунктов на кабельных и воздушных линиях связи по системе «провод—земля»;
- заземления установок дистанционного питания постоянным током радиоузлов радиотрансляционной сети;
- заземления катодных установок на кабельных линиях связи для защиты оболочек кабелей от коррозии;
- заземления телеграфных станций, работающих по однопроводным цепям;
- заземления телефонных станций с центральной батареей.

2.44. В перечисленных в п. 2.43 установках подвергаются электрокоррозии те заземлители, которые соединены с положительным полюсом источника тока. Стальные трубы или другой формы заземлители постепенно разрушаются токами, стекающими с них в грунт. Со стальных труб 1а тока уносит в год практически от 9 до 10 кг металла.

2.45. Рассчитанная конструкция заземляющего устройства, исходя из нормы общего сопротивления, должна быть проверена на долговечность, т. е. на срок возможной эксплуатации этого устройства.

2.46. За предельный срок эксплуатации заземлителя можно принять такой срок, по истечении которого вес каждого заземлителя снизится до 0,25 первоначального веса. При этом условии срок службы T заземляющего устройства из стальных вертикальных электродов определяется по формуле

$$T = 4,7 \cdot 10^2 L / I \cdot n (d_1^2 - d_2^2), \text{ лет}, \quad (2.24)$$

где n — количество отдельных заземлителей (труб) в заземляющем устройстве; I — величина рабочего тока, стекающего в землю через заземление; L — длина трубчатого заземлителя; d_1 — внешний диаметр трубчатого заземлителя; d_2 — внутренний диаметр трубчатого заземлителя, m .

При заданном сроке службы заземлителя общее количество требуемых заземлителей определяется по формуле IT

$$\eta_{общ} = \frac{IT}{4,7 \cdot 10^2 (d_1^2 - d_2^2) L} \quad (2.25)$$

Срок службы можно определить также по более общей формуле

$$T = \kappa \frac{0,75Q}{I}, \text{ лет} \quad (2.26)$$

29

где Q — вес стальных электродов и соединительной полосы, кг; I — рабочий ток, стекающий с заземлителей в землю; κ — электрохимический коэффициент разрушения.

В расчетах κ принимается равным 0,04 для стальных электродов, помещенных в грунт без коксовой мелочи и 0,4 для тех же электродов в коксовой мелочи.

Учитывая неодинаковые условия эксплуатации для многоэлектродного заземлителя, расчет срока службы рекомендуется производить отдельно для вертикальных электродов и горизонтальной полосы.

Срок службы вертикальных электродов T_v определяется из выражения

$$T_v = 0,3Q_v / I_v, \text{ лет}, \quad (2.27)$$

где Q_v — вес вертикальных электродов, кг; I_v — ток, стекающий с вертикальных заземлителей, а.

Величина I_v определяется по формуле

$$I = \frac{IR_r^*}{R_r^* + R_v^*}, \text{ а} \quad (2.28)$$

где R_r^* — сопротивление горизонтальных электродов, ом; R_v^* — сопротивление вертикальных электродов, ом. Срок службы соединительной полосы определяется по формуле

$$T_r = 0,3 * Q_r / I_r \text{ , лет } \quad (2.29)$$

где Q_r — вес соединительной полосы, кг; I_r — ток, стекающий с соединительной полосы, а:

$$I_r = \frac{I R_g^*}{R_g^* + R_r^*} \text{ , } \quad (2.30)$$

2.47. Часто срок службы может оказаться очень малым (3-8 лет). Опыт показывает, что целесообразно строить заземляющее устройство так, чтобы заземление работало без замены электродов не менее 15 лет. Это может быть достигнуто с помощью установки дополнительных электродов к тем, которые были определены из условия соблюдения нормы заземления.

Значительного увеличения срока службы заземлителей можно достигнуть, если использовать в качестве прослойки между основным грунтом и металлом электрода - коксовую мелочь. Исследования показывают, что в этом случае при втекании электрического тока с электрода в грунт процесс разрушения электрода от электролитической коррозии резко замедляется.

Иными словами, срок службы заземлителя, состоящего и электродов, в коксовой мелочи увеличивается (при диаметре коксовой прослойки U каждого электрода 0,25 м) не менее чем в 5-10 раз

30

Пример 1. Определить срок работы заземления установки дистанционного питания усилителей кабельной магистрали, если заземляющее устройство имеет следующие данные количество труб $n=25$, длина каждой трубы $L=200$ см, внешний диаметр трубы $d_1=4$ см, внутренний диаметр $d_2=3,2$ см ток через заземление $I=2$ а

Тогда время (в годах) службы заземления определится по формуле

$$T = 4,7 * 10^{-4} L * n (d_1^2 - d_2^2) / I = 4,7 * 10^{-4} * 200 * 25 (4^2 - 3,2^2) / 2 = 6,7 \text{ лет}$$

Если задан срок службы заземляющего устройства, то можно определить необходимое количество трубчатых заземлителей, исходя из электрокоррозии. При тех же размерах единичных заземлителей количество их при $T=15$ лет, будет

$$n = \frac{2 * 15}{4,7 * 10^{-4} * 200 (4^2 - 3,2^2)} = 56 \text{ труб}$$

Таким образом, дополнительное количество электродов составляет $56 - 25 = 31$ шт.

Если, электроды рассматриваемого в данном примере заземления будут помещены в коксовую мелочь срок службы заземления будет уже не 6,7 года, а, по крайней мере, в 5 раз больше, т.е. $T=3,35$ года. При этом не потребуются дополнительные электроды, как это было показано у заземления с электродами, помещенными прямо в грунт

Пример 2. Определить срок работы заземления автоматической телефонной станции (АТС) с числом соединительных линий 400

Согласно табл. 4 ГОСТ 464—68 на заземление сопротивление рабочего заземления для такой станции должно быть равным 2,5 Ом. Удельное сопротивление грунта в местах устройства заземлений — $\rho=60$ Ом*м. Заземляющее устройство состоит из трубчатых заземлителей; длина каждой трубы 2 м, внешний диаметр 4 см (внутренний диаметр 3 см).

Для соблюдения нормы сопротивления заземления (2,5 Ом) заземляющее устройство содержит 10 труб (указанного размера), соединенных параллельно между собой. Средний уравнивающий рабочий ток через заземление принят 2,5 а, тогда время службы заземления АТС определяется по формуле

$$T = 4,7 * 10^{-4} L * n (d_1^2 - d_2^2) / I = 4,7 * 10^{-4} * 200 * 10 (4^2 - 3^2) / 2,5 = 2,6 \text{ года}$$

Этот срок не приемлем. При размещении электродов в коксовой мелочи срок службы значительно повышается.

Пример 3. Рассчитать заземление с использованием коксовой мелочи для НУП кабельной магистрали при следующих данных- тип кабеля — МКСБ 4Х4Х1,2, аппаратура уплотнения — К-60; расчетное значение удельного электрического сопротивления грунта — $\rho_{гр}=80$ Ом*м; удельное электрическое сопротивление коксовой мелочи — $\rho_{км}=2,5$ Ом*м. Заземление выполнено из вертикальных электродов из угловой стали 50х50х5 мм и соединительной полосы 40Х4 мм. Контор заземления будет эксплуатироваться в непромерзающих грунтах

Порядок расчета

1. Определим силу тока I , стекающего с рабочего заземления НУП.

$$I = K_c I_c \quad (2.31)$$

где K_c — количество систем в НУП, подлежащих дистанционному питанию;

I_c — ток, требуемый для одной системы и равный 0,28 а.

31

При полном использовании кабеля МКСБ 4Х4Х1,2 и последовательна питания систем К-60 $K_c=4$, $I_c=0,28$ а (ИТСЭ, ч. VI, табл. 18.2) и полный рабочий ток НУП $I = 4 * 0,28 = 1,12$ а.

2. Рассчитаем сопротивление растеканию токов с вертикального электрода длиной $L=2,5$ м в коксовой мелочи по ф-ле (2.18):

$$R_{в} = 0,37 \frac{80}{2,5} \left[Lg \frac{2 * 2,5}{0,25} + 0,5 Lg \frac{4 * 1,95 + 3 * 2,5}{4 * 1,95 + 2,5} + \frac{2,5}{80} Lg \frac{0,25}{0,05 * 0,95} \right] = 16,5 \text{ , Ом}$$

3. Определим количество вертикальных электродов, исходя из нормируемой величины сопротивления растеканию для грунтов с удельным электрическим сопротивлением $\rho < 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Для этих условий сопротивление растеканию электрода должно быть не выше 10 ом и удовлетворять допустимому падению напряжения $12 \text{ в, т. е. } R_z = 12/1,12 = 110,7 \text{ ом}$, $N_v = 110,7/10,7 = 1,55 \approx 2$ электрода.

4. Найдем длину L_g соединительной шины, если расстояние между электродами $a = 5 \text{ м}$: $L_g = (N-1) \cdot a = (2-1) \cdot 5 = 5 \text{ м}$.

5. Определим сопротивление растеканию горизонтального электрода ф-ле (2.19):

$$R = 0,37 \frac{80}{5} \left[L_g \frac{2 \cdot 5}{0,04 \cdot 0,95} + L_g \frac{5}{2 \cdot 0,7} + \frac{2,5}{80} L_g \frac{0,25}{0,04 \cdot 0,95} \right] = 17,7 \text{ , Ом}$$

6. Рассчитаем полное сопротивление растеканию контура заземления $R_{общ}$ по ф-ле (2.12)

$$R_{общ} = \frac{17,7 \cdot 16,5}{16,5 \cdot 0,9 + 17,7 \cdot 0,9 \cdot 2} = 6,3 \text{ , ом}$$

что удовлетворяет нормам сопротивления растеканию контура заземления НУП для грунтов с удельным сопротивлением меньшим чем $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$

7. Определим силу тока стекающего с вертикальных электродов по ф-ле (2.28)

$$I_{\epsilon} = \frac{1,12 \cdot 17,7}{\frac{17,7}{0,9} + \frac{16,5}{0,9 \cdot 2}} = 0,765 \text{ , а}$$

8. Найдем силу тока стекающего с горизонтального электрода по формуле (2.30):

$$I_r = \frac{1,12 \cdot \frac{16,5}{0,9 \cdot 2}}{\frac{16,5}{0,9 \cdot 20,9} + 17,7} = 0,355 \text{ , а}$$

9. Рассчитаем вес соединительной полосы: $Q_g = 5,1,256 = 6,28 \text{ кг}$.

10. Определим вес вертикальных электродов: $Q_v = 2 \cdot 9,4 = 18,8 \text{ кг}$.

11. Найдем срок службы вертикальных электродов по ф-ле (2.27): $T_v = 0,3 \cdot 18,8/0,765 = 7,37 \text{ лет}$.

12. Определим срок службы горизонтального заземлителя по ф-ле (2.29) $T_g = 0,3 \cdot 6,28/0,355 = 5,3$ года. Как видно, этот срок не удовлетворяет условию $T_g < T_v$

Для обеспечения условия $T_g > T_v$ необходимо увеличить сечение соединительной полосы. Вместо полосы $40 \times 4 \text{ мм}$ примем полосу $60 \times 5 \text{ мм}$, что незначительно изменит общее сопротивление контура. В этом случае получим $Q_r = 5 \cdot 2,36 = 11,8 \text{ кг}$ / Срок службы соединительной полосы будет равен

$$T_g^* = 0,3 \cdot 11,8/0,355 = 10,0 \text{ лет,}$$

32

что удовлетворяет условию $T_g > T_v$, т. е. $T_g^* = 1,36 T_v$. Расчет можно считать законченным.

Пример 4. Рассчитать заземление с использованием армированных электродов заводского изготовления типа ЗКА-140 для НУП кабельной магистрали при следующих данных: тип кабеля—МКСБ 4Х4Х1,2; аппаратура уплотнения — К-60; расчетное значение удельного электрического сопротивления грунта — $\rho_{гр} = 80 \text{ Ом} \cdot \text{м}$; удельное электрическое сопротивление коксовой мелочи — $\rho_{кт} = 2,05 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Контур заземления будет эксплуатироваться в первой климатической зоне СССР, где коэффициент промерзания равен $1,8-2,0$.

Порядок расчета

1. Определим силу тока I , стекающего с рабочего заземления НУП:

$$I = K_c I_c = 4 \cdot 0,28 = 1,12 \text{ а}$$

2. Рассчитаем сопротивление растеканию электрода ЗКА-140, устанавливаемого вертикально. Длина электрода $L_v = 1,4 \text{ м}$, глубина закладки электрода $1,5 \text{ м}$ от поверхности земли:

$$R_v = 2 \cdot 0,37 \frac{80}{1,4} \left[L_g \frac{2 \cdot 1,4}{0,18} + L_g \frac{2,3 \cdot 4 + 3 \cdot 1,4}{2,3 \cdot 4 + 1,4} + \frac{2,5}{80} L_g \frac{0,18}{0,022} \right] = 55,6 \text{ Ом}$$

3. Определим количество вертикальных электродов аналогично приведенному выше примеру. Для этих условий сопротивление растеканию электрода не должно превышать $10,7 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, т. е. $N_v = 55,6/10,7 = 5,2 = 6$ электродов.

4. Рассчитаем сопротивление растеканию многоэлектродного заземлителя:

$R_{\epsilon}^* = R_{общ} = R_v / N_v \eta_v = 55,6/0,87 \cdot 6 = 10,6 \text{ ом}$, что обеспечивает нормируемое ГОСТ 464—67 сопротивление растеканию контура заземления $10,7 \text{ ом}$.

5. Определим вес стальных электродов контура заземления, т. е. $Q_v = 6 \cdot 1,4 \cdot 2,98 = 25 \text{ кг}$.

6. Найдем срок службы контура заземления: $T_v = 0,3 \cdot 25/1,12 = 6,7$ года.

ИСКУССТВЕННОЕ УМЕНЬШЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ ЗАЗЕМЛЕНИЙ

2.48. Для устройства заземления малого сопротивления в плохопроводящих грунтах (песок, гравий, камень и т. п.) требуются десятки, а иногда и сотни стальных труб, длиной каждая $2-2,5 \text{ м}$, располагаемых на большой территории.

2.49. С целью удешевления заземляющих устройств в местах с высоким удельным сопротивлением земли применяют различные методы искусственного снижения удельного сопротивления грунта. При этом уменьшаются количество заземлителей и размеры территории, на которой должны располагаться заземлители.

2.50. Общее сопротивление заземления зависит, как указывалось выше, от сопротивления прилегающих к заземлителю слоев грунта. Поэтому можно добиться снижения сопротивления заземления понижением удельного сопротивления грунта лишь в небольшой области вокруг заземлителя.

33

51. Искусственное снижение удельного сопротивления грунта достигается либо химическим путем при помощи электролитов, либо путем укладки заземлителей в котлованы с насыпным углем, коксом, глиной.

Опыт показал, что максимальное уменьшение сопротивления заземления достигается при использовании электролитов, древесного угля и коксовой мелочи. Первый способ заключается в том, что вокруг заземлителей грунт пропитывается растворами хлористого натрия (обыкновенной поваренной соли), хлористого кальция, сернокислой меди (медного купороса) и т. д.

Следует отметить, что указанным способом можно добиться сравнительно большого снижения величины сопротивления заземления, однако на непродолжительный срок (2—4 года), после чего требуется вновь пропитывать грунт электролитом

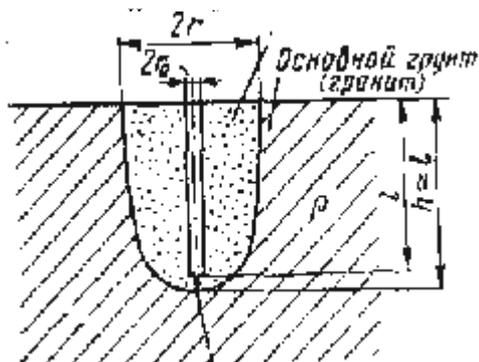


Рис 221. Создание вокруг заземлителя зоны с пониженным удельным сопротивлением

2.52. Практически можно рекомендовать следующие два способа искусственного снижения удельного сопротивления грунта:

создание вокруг заземлителя зоны с пониженным удельным сопротивлением и обработка грунта солью.

2 53. Для создания вокруг заземлителя зоны с пониженным удельным сопротивлением в грунте делается выемка (котлован) радиусом 1,5—2,0 м и глубиной, равной длине забиваемого стержня. После заполнения выемки грунтом (рис. 2.21) устанавливается заземлитель и грунт утрамбовывается.

В качестве грунта-заполнителя может быть применен любой грунт, имеющий удельное сопротивление в 5—10 раз меньше, чем удельное сопротивление основного грунта. Например, если заземление устраивается в песчаном или каменистом (гранит) грунте, то заполнителями могут быть, глина, торф, чернозем, суглинок, шлак и т. п. Таким способом достигается снижение сопротивления заземления в среднем в 2,5—3 раза.

Сопротивление растеканию тока K_3 в случае окружения заземлителя грунтом с другим удельным сопротивлением находится по формуле

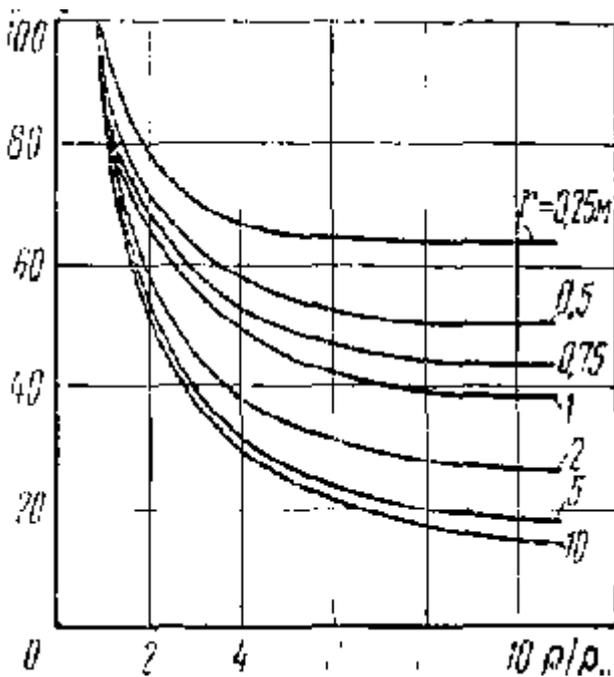
где ρ — удельное сопротивление основного грунта, Ом*м; ρ_n — удельное сопротивление грунта-заполнителя, Ом*м; G_0 — радиус

34

стержня заземлителя, м; r — радиус выемки котлована, м; l — глубина котлована, приблизительно равная длине заземлителя, м.

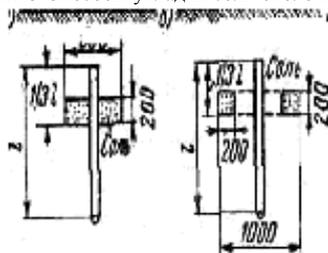
На рис. 2.22 приведены кривые изменения (в процентах) отношения сопротивления R_3 заземлителя, помещенного в котлован с насыпным грунтом, к сопротивлению R_3 заземлителя, помещенного в основной грунт, в зависимости от отношения удельного сопротивления основного грунта ρ к удельному сопротивлению насыпного грунта ρ_n . Эти кривые построены для котлованов с радиусом $r = 0,25—10$ м.

2.54. Эффективным и дешевым способом снижения сопротивления заземлений является обработка грунта поваренной солью. Действие последней сводится не только к понижению удельного сопротивления грунта, но и к понижению температуры его замерзания.



2.55. Существуют разные способы укладки соли близ заземлителя. В практике Министерства связи СССР распространена укладка около трубчатого заземлителя соли слоями так, как это показано на рис. 2.23а. Соль может также укладываться вся на глубине возле трубчатого заземлителя (рис. 2.23 б) или на небольшом расстоянии от него (рис. 2.23 в). Последний способ является более удобным в том отношении, что коррозия заземлителя в этом случае будет минимальной.

Рис. 2.23 Способы укладки соли около вертикального заземлителя



Количество соли, требующееся для обработки заземления, зависит от длины электрода: от 1,5 до 10 кг на 1 м заземлителя.

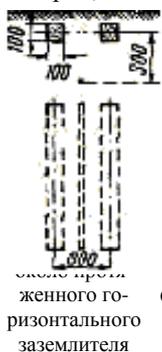
Иногда солью заполняется пространство внутри заземлителя, выполненного в виде полой трубы с отверстиями, через которые раствор соли выходит в окружающий грунт (рис. 2.23г)

На рис. 2.24 показан способ укладки соли около протяженного заземлителя.

2.56. Так как соль со временем вымывается, то срок действия обработки грунта ограничен и через 2—4 года ее приходится повторять. Эффективность обработки неодинакова и с течением времени меняется. В первый год, когда соль еще не успевает распространиться вокруг заземлителя, сопротивление снижается сравнительно мало. Оптимальные условия наступают на втором - третьем году и затем начинают идти на убыль.

Стойкость обработки зависит от строения грунта, влажности, количества осадков.

2.57. К недостаткам указанных способов обработки грунтов относятся: необходимость возобновления пропитки грунтов примерно через 2—4 года и возможность разрушения заземлителей от химического воздействия на них солей или соляных растворов, вследствие чего требуется замена их новыми заземлителями.



Делались попытки устранить эти недостатки. Так, в Германии, например, был предложен способ, по которому в грунт вокруг заземлителя вводятся металлы в тонкоизмельченном виде, как например, в коллоидных растворах, или в виде мелкой металлической стружки. Если при этом тонко намельченные металлы выбраны так, чтобы не могли возникать гальванические пары с самим заземлителем, то последний корродировать не будет.

Однако коллоиды не более устойчивы в грунте, чем соли и соляные растворы. Они постепенно вымываются из близлежащих к заземлителю слоев дождевой водой, вследствие чего достигнутое уменьшение сопротивления заземлителя с течением времени пропадает.

В США предложен способ задержания вымывания соляных растворов из грунта путем смешивания соляного раствора (например, медного купороса) с нерастворимой в воде пластмассовой смесью и

впрыскивания их в грунт под большим давлением. Этот способ является дорогим и продолжительность его действия не определяется.

Из других способов искусственного снижения сопротивления заземлителей, предложенных в различных странах, в первую очередь заслуживает внимания шведский способ — обработка грунта вокруг заземлителя при помощи электролитов, образующих гель.

В результате смешения концентрированного раствора сернокислой меди с эквивалентным количеством концентрированного раствора соли щелочного синеродистого железа получается нерастворимый в воде продукт реакции — железисто-синеродистая медь, которая при известных условиях образует однородный электропроводящий гидрогель.

Электрические и физические свойства гидрогеля не меняются сколь-либо существенно от длительного воздействия воды и являются устойчивыми при колебаниях температуры в пределах от -60 до $+60^{\circ}\text{C}$. Однако он эффективен при снижении очень высоких сопротивлений заземлений (порядка $400\text{--}600\text{ }\Omega$) и малоэффективен при величинах сопротивлений порядка $20\text{--}30\text{ }\Omega$.