

Сравнительный анализ методик расчёта сопротивления электролитических заземлителей

В техническом бюллетене TNP020 06.12.2016 г. «[Применение электролитических заземлителей в грунтах с высоким удельным электрическим сопротивлением](#)» были рассмотрены назначение, принцип работы, особенности конструкции и монтажа электролитических заземлителей АО «Хакель Рос». Был также проанализирован опыт применения электролитических заземлителей.



Рисунок 1. Монтаж горизонтального электролитического заземлителя АО «Хакель Рос»

В настоящем бюллетене будут приведены и рассмотрены основные методики расчёта ЗУ на основе электролитических заземлителей применяемые в настоящее время.

Основным этапом проектирования заземляющих устройств является расчёт сопротивления растеканию тока с его заземлителей. От того, насколько корректно будет произведён расчёт, зависит эффективность ЗУ, а именно его способность отвести электрический ток в землю, обеспечив при этом безопасность персонала и оборудования. Требование к сопротивлению растеканию ЗУ различного назначения (защитное,

молниезащитное, функциональное, от статического напряжения и пр.) приведены как в федеральных НПД, таких как ПУЭ, ПТЭЭП и пр., так и в ведомственных НПД, таких как РД-91.020.00-КТН-259-10 «Нормы и правила проектирования ЗУ объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов организаций системы ОАО «АК «Транснефть», СТО Газпром 2-1.11-170-2017 «Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и коммуникаций ОАО «Газпром» и пр.



Рисунок 2. Монтаж вертикального электролитического заземлителя АО «Хакель Рос»

Методик расчётов сопротивления растеканию существует большое множество. Они приведены во всех основных справочниках по электробезопасности. Выбор той или иной методики расчёта определяется конфигурацией ЗУ (сетка, контур, ряд и пр.), применением вертикальных/горизонтальных заземлителей или их комбинацией, типом ЗУ (глубинное,

протяжённое, поверхностное и пр.) и других факторов. В основе большинства методик лежит расчёт сопротивления растеканию одиночного горизонтального и/или вертикального заземлителя с последующим расчётом общего сопротивления ЗУ состоящего из необходимого количества горизонтальных и/или вертикальных заземлителей с учётом их экранирования, т.е. так называемого коэффициента использования. Коэффициент использования, в свою очередь, зависит от количества, конфигурации ЗУ и расстояния между заземлителями. Если второй этап расчётов (расчёт общего сопротивления ЗУ) при расчёте ЗУ на основе электролитических заземлителей не должен вызывать сложностей, то на расчёте сопротивления одиночного вертикального и горизонтального электролитического заземлителя стоит остановиться подробнее.

Методики расчёта электролитических заземлителей

Поскольку массовое применение электролитических заземлителей на территории РФ началось сравнительно недавно (5-10 лет), на настоящий момент не существует официально рекомендованной методики их расчёта. По этой причине производители электролитических заземлителей для своих расчётов адаптируют принятые методики для традиционных заземлителей. Как правило, адаптация сводится к введению в формулу расчета, так называемого коэффициента солевой обработки грунта C . Коэффициент C может изменяться в пределах от 1 (солевая обработка отсутствует) до 0,1 (грунт очень насыщен электролитом). В большинстве случаев рекомендовано применять коэффициент $C = 0,2$, хотя некоторые производители его уменьшают до $C=0,125$, тем самым «повышая» эффективность заземлителя.

Помимо использования в расчётах коэффициента C , в формулах должна учитываться частичная замена грунта вокруг электрода. Это логично, ведь на растекание тока в земле в первую очередь оказывает влияние удельное электрическое сопротивление грунта в месте установки заземлителя. Технология применения электролитических заземлителей как раз и предусматривает частичное замещение высокоомного грунта на низкоомный наполнитель, так называемый материал оптимизации заземления. Объём замещённого грунта напрямую будет влиять на сопротивление растеканию тока заземлителя. Для вертикальных электродов, как правило, объём замещаемого грунта определяется цилиндром диаметром от 0,15 до 0,60 метра и длиной равной длине электрода L . Для горизонтальных электродов объём замещаемого грунта такой же как и для вертикальных электродов соответствующей

длины. Только располагается он в траншее с шириной $\approx 0,3$ метра и длиной равной длине электрода L.

В таблице 1 представлена нормативная база наиболее часто встречающихся методик применяемых для расчёта сопротивления электролитических заземлителей (без привязки к конкретным производителям). Методики пронумерованы и далее по тексту будут приводиться только ссылки на номер методики.

Таблица 1. Нормативная база применяемых методик.

№ п/п	Нормативный документ
1	РД 153-39.4-039-99 Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и площадок МН (формула 6.13)
2	РД 153-39.4-039-99 Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и площадок МН (формула 6.5)
3	РД 153-39.4-039-99 Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и площадок МН (формула 6.4)
4	Г.А.Дулицкий, А.П.Комаревцев. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок напряжением до 1000 В: Справочник. (таблица 3.2.)
5	Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации заземлений в установках проводной связи и радиотрансляционных узлов (формула 2.18)
6	Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации заземлений в установках проводной связи и радиотрансляционных узлов (формула 2.19)
7	Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации заземлений в установках проводной связи и радиотрансляционных узлов (формула 2.32)
8	IEEE Std 80-2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (equation 60)
9	IEEE Std 80-2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (equation 59)
10	Нет данных ¹

В таблице 2 приведены формулы для расчетов, перечисленных в таблице 1 методик, а также условия их применения и допущения.

¹ Данная методика включена в рассмотрение, т.к. применяется производителем, не смотря на то, что не удалось найти источник её происхождения.

Таблица 2. Формулы, условия и допущения.

№ п/п	Формула	Условия и допущения
1 ²	$R = \frac{C\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{D} + \frac{\rho_{\text{МОЗ}}}{\rho} \cdot \ln \frac{D}{d} \right)$	Сопротивление растеканию вертикального глубинного заземлителя с выходом торца на поверхность земли в коксовой засыпке или другом наполнителе
2	$R = \frac{C\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{2L_a}{D} + \ln \frac{L_a + \sqrt{L_a^2 + 16T^2}}{4T} + \frac{\rho_{\text{МОЗ}}}{\rho} \cdot \ln \frac{D}{d} \right)$	Сопротивление растеканию горизонтального заземлителя при $L > T$ и $L_a \gg D$ в коксовой засыпке или другом наполнителе
3	$R = C \frac{P}{\pi L} \ln \frac{L}{\sqrt{dT}}$	Сопротивление растеканию протяжённого горизонтального заземлителя при $L > 12T$
4	$R = C \frac{P}{2\pi L} \ln \frac{4L}{d}$	Сопротивление растеканию вертикального заземлителя без наполнителя при $L \gg d$
5	$R = 0,37 \frac{C\rho}{L} \left(\ln \frac{2L}{d} + 0,5 \ln \frac{4t + 3L}{4t + l} + \frac{\rho_{\text{МОЗ}}}{\rho} \cdot \ln \frac{D}{d} \right)$	Сопротивление растеканию вертикального электрода в коксовой засыпке или другом наполнителе
6	$R = 0,37 \frac{C\rho}{L} \left(\log \frac{2L}{d} + \log \frac{L}{2T} + \frac{\rho_{\text{МОЗ}}}{\rho} \cdot \log \frac{D}{d} \right)$	Сопротивление растеканию горизонтального заземлителя в наполнителе при $L \gg d$ и $t \ll L/4$
7	$R = \frac{C}{2\pi L} \left(\rho_{\text{МОЗ}} \ln \frac{2L}{d/2} + 0,5(\rho - \rho_{\text{МОЗ}}) \ln \frac{\sqrt{L^2 + (D/2)^2} + L}{\sqrt{L^2 + (D/2)^2} - L} \right)$	Сопротивление растеканию вертикального электрода в коксовой засыпке или другом наполнителе
8	$R = \frac{C}{2\pi L} (\rho (\ln \frac{8L}{D} - 1) + \rho_{\text{МОЗ}} (\ln \frac{8L}{d} - 1) - \rho_{\text{МОЗ}} (\ln \frac{8L}{D} - 1))$	Сопротивление растеканию вертикального заземлителя в бетоне или другом наполнителе
9	$R = \frac{C\rho}{2\pi L} \left[\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right]$	Сопротивление растеканию вертикального заземлителя без наполнителя

² В отличие от формулы в первоисточнике в предлагаемой формуле опущено первое слагаемое, учитывающее удельное электрическое сопротивление материала заземлителя, его сечение и длину, из-за его мизерного влияния на конечный результат. Например, для заземлителя выполненного из стальной трубы длиной 3 метра диаметром 60 мм и толщиной стенки 2 мм:

$$\frac{l_3 \cdot \rho_3}{2S_3} = \frac{3 \cdot 1,46 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 4,6 \cdot 10^{-3}} = 4,761 \cdot 10^{-6}$$

10	$R = 0,01 \cdot (3,38 \cdot \rho - 5,89) \quad (1)$ $R = 0,01 \cdot (2,69 \cdot \rho + 1,15) \quad (2)$	Сопротивление растеканию вертикального заземлителя длиной 3 метра в наполнителе диаметром: (1) – 300 мм (2) – 600 мм
----	--	---

Напомним, что в рамках опытной эксплуатации электролитических заземлителей АО «Хакель Рос» в июле 2105 был проведён монтаж семи вертикальных 3-метровых электролитических заземлителей серии ЗЭН-ХР в грунт с эквивалентным удельным электрическим сопротивлением 6254 Ом·м. (см. параграф «Опыт применения» технического бюллетеня ТНР020 06.12.2016 г.). Сопротивление растеканию заземляющего устройства после его монтажа составило $R = 46$ Ом. При этом среднее сопротивление одного электрода колебалось в пределах $R_1 = 220 \div 260$ Ом.

Для сравнения представленных методик проведём расчёты сопротивления растеканию ЗУ на основе вертикальных 3-метровых электролитических заземлителей серии ЗЭН-ХР с нормируемым сопротивлением $R_{\text{норм}} = 50$ Ом и сопоставим расчётные данные с данными полученными в полевых условиях при проведении опытной эксплуатации.

Расчёт многоэлектродного ЗУ выполним по формуле:

$$n = \left\lceil \frac{R_1}{h \cdot R_{\text{норм}}} \right\rceil$$

где,

n – количество заземлителей, шт

R_1 – сопротивление растеканию одного заземлителя, Ом

h – коэффициент использования (табличные данные)

$R_{\text{норм}}$ – допустимое сопротивление ЗУ, Ом

] [– округление в большую сторону

Расчёт общего сопротивления ЗУ выполним по формуле:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_1}{n \cdot h}$$

Исходные данные для расчётов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Исходные данные для расчётов.

Переменная	Параметр	Значение	Примечание
C	Коэффициент солевой обработки	0,2	Для методик № 3 и № 4 производитель рекомендует применять коэффициент 0,125
π	Математическая константа	3,141592...	
ρ	Эквивалентное удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м	6254	
$\rho_{\text{моз}}$	Удельное электрическое сопротивление наполнителя, Ом·м	0,5	
L	Длина электрода, м	3	
L_a	Длина наполнителя в скважине/траншее, м	3	
D	Диаметр скважины замещаемого грунта, м	0,15 0,25 0,35 0,60	Разные производители используют различные диаметры скважин
d	Диаметр электрода, м	0,06	
T	Глубина заложения электрода, м	0,7	Для расчёта горизонтального заземлителя
t	Средняя глубина установки электрода, м	$L/2=1,5$	Параметр применяется только в методике № 5

На рисунках 3, 4 представлены схемы размещения электролитических заземлителей в грунте.

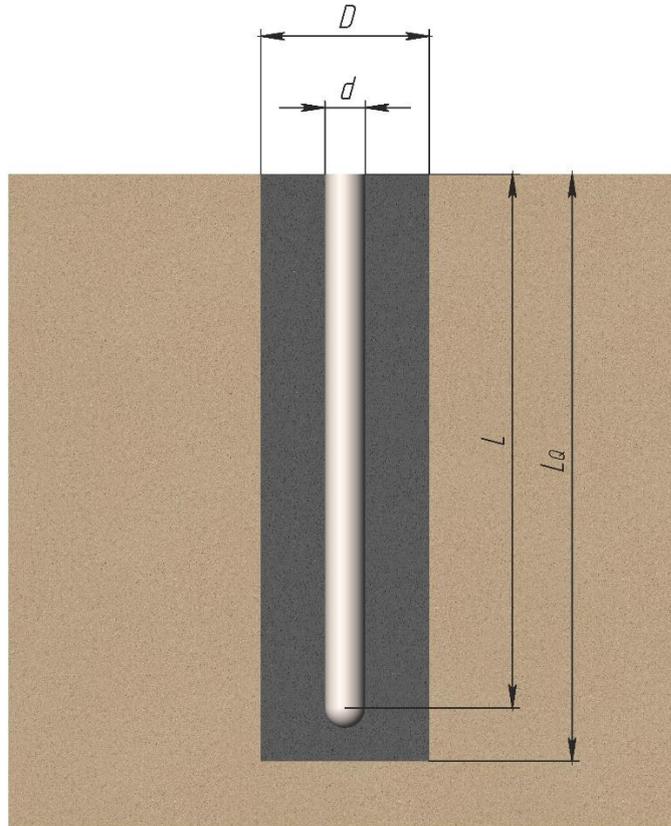


Рисунок 3. Схема размещения заземлителя по методикам № 1, 4, 5, 7, 8, 9, 10.

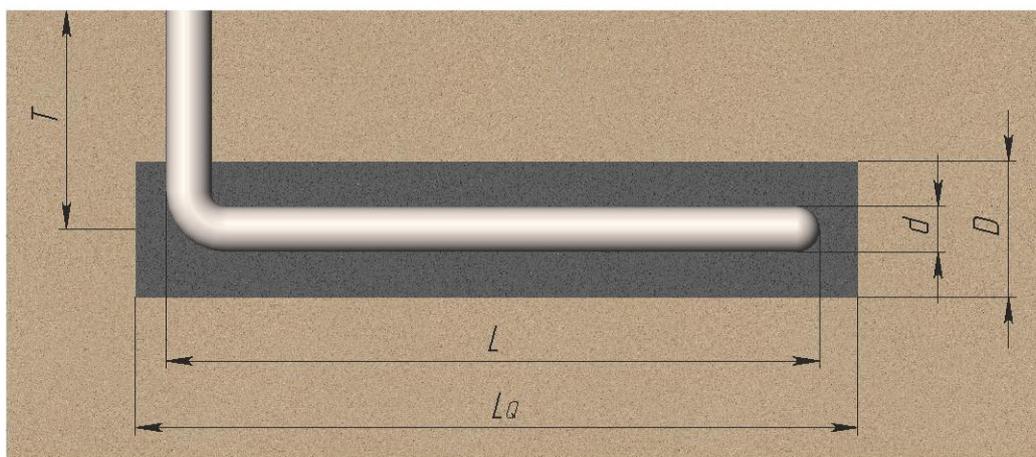


Рисунок 4. Схема размещения заземлителя по методикам № 2, 3, 6.

Сравнение результатов полученных по различным методикам

Результаты расчётов ЗУ по различным методикам для различных диаметров скважин представим в таблицах 4 и 5 для вертикальных и горизонтальных заземлителей соответственно.

Таблица 4. Результаты расчётов ЗУ на основе вертикальных заземлителей.

№ методики	Диаметр скважины, мм														
	150			250			300			350			600		
	R_I	n	$R_{общ}$	R_I	n	$R_{общ}$	R_I	n	$R_{общ}$	R_I	n	$R_{общ}$	R_I	n	$R_{общ}$
1	290,9	9	46,2	257,0	8	45,9	244,9	7	50,0	234,7	7	47,9	198,9	6	47,3
4	-	-	-	-	-	-	219,8	7	44,9	-	-	-	-	-	-
5	749,8	22	48,7	749,8	22	48,7	749,8	22	48,7	749,8	22	48,7	749,9	22	48,7
7	290,9	9	46,2	257,0	8	45,9	245,0	7	50,0	234,7	7	47,9	199,1	6	47,4
8	270,6	8	48,3	236,7	7	48,3	224,5	7	45,9	214,3	7	43,7	178,5	6	42,5
9	331,4	10	47,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	211,3	7	43,1	-	-	-	168,2	5	48,1

Прочерки в ячейках означают, что данная методика не позволяет произвести расчёт для указанного диаметра скважины, что справедливо можно отнести к минусам рассматриваемой методики.

Как видно из таблицы, результаты, полученные по методике № 5, в 3 раза превышают значения, полученные по другим методикам. Кроме того, расчётные значения сопротивлений заземлителя выполненные по данной методике при увеличении диаметра скважины с наполнителем (увеличение объёма низкоомного наполнителя вокруг заземлителя) не приводят к уменьшению их сопротивления, что противоречит теории заземляющих устройств. То же можно сказать о методике № 6 для расчёта горизонтальных заземлителей. Можно предположить, что применяемые в методиках формулы содержат ошибки (опечатки).

Таблица 5. Результаты расчётов ЗУ на основе горизонтальных заземлителей.

№ методики	Эквивалентный диаметр скважины, мм														
	150			250			300			350			600		
	R_I	n	$R_{общ}$	R_I	n	$R_{общ}$	R_I	n	$R_{общ}$	R_I	n	$R_{общ}$	R_I	n	$R_{общ}$
2	296,4	9	47,0	277,7	8	49,6	267,0	8	47,7	256,4	8	45,8	220,0	7	44,9
3	303,5	9	48,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	359,6	11	46,7	359,6	11	46,7	359,6	11	46,7	359,6	11	46,7	359,6	11	46,7

Результаты, полученные в ходе расчёта сопротивления по другим методикам, находятся в пределах допустимых отклонений ($\leq 10-15\%$ от фактически измеренного сопротивления). Следует также отметить, что методики № 1 и № 7 при очевидном существенном различии в применяемых формулах дают результаты, отличающиеся друг от друга на десятые доли во всём диапазоне диаметров скважин и соизмеримы с фактическими результатами замеров.

В таблице 6 отражена возможность учёта ключевых параметров в расчётах по используемым методикам.

Таблица 6. Сводная таблица сравнения методик.

Учитываемые параметры	Методики									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расчёт для вертикального (в) или горизонтального (г) размещения заземлителей	в	г	г	в	в	г	в	в	в	в
Учёт в расчётах частичного замещения грунта	да	да	нет	нет	да	да	да	да	нет	нет
Возможность расчёта для различных диаметров скважин (объёмов наполнителя)	да	да	нет	нет	да	да	да	да	нет	нет
Валидность (соизмеримость) результатов расчётов	да	да	да	да	нет	нет	да	да	да	да

Выводы

По результатам проведённого анализа можно сделать следующие выводы.

1. Для расчёта сопротивления растеканию вертикальных электролитических заземлителей целесообразно использовать методики № 1, 7, 8. Для расчёта сопротивления растеканию горизонтальных электролитических заземлителей целесообразно использовать методику № 2. Данные методики в полной мере учитывают особенности применения электролитических заземлителей (замещение грунта) и являются наиболее гибкими (учёт в расчётах любого количества наполнителя). Не смотря на то, что использовать методику № 1 рекомендуется для глубинных заземлителей ($L > 10\text{м}$), расчёты показывают, что она применима и для более коротких, поверхностных заземлителей.
2. Методики № 5, 6 показали результаты несоизмеримые с результатами расчётов по другим методикам и фактическим замерам сопротивления. Кроме того, расчётные значения сопротивлений, выполненные по данной методике, при увеличении диаметра скважины с наполнителем не приводят к уменьшению сопротивления, что не логично. Данные методики не рекомендуются к применению.
3. В методиках № 3, 4, 9 не учитывается применение наполнителя, следовательно, не учитывается изменение его объёма при изменении диаметра скважины. Вероятно, данный факт должен быть компенсирован занижением коэффициента солевой обработки $C=0,125$ вместо $C=0,2$. Кроме того методика № 3 рекомендована только для расчёта горизонтальных протяжённых заземлителей с длиной заземлителя $L > 12T$.
4. В методике № 10 формула не учитывает ничего кроме удельного электрического сопротивления грунта и двух возможных диаметров скважины $D=300$ мм или $D=600$ мм. Кроме того не установлен НПД на который может ссылаться эта методика.

Таким образом, для расчёта ЗУ на основе вертикальных электролитических заземлителей рекомендуется пользоваться методиками:

1. РД 153-39.4-039-99 «Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и площадок МН» (формула 6.13);
2. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации заземлений в установках проводной связи и радиотрансляционных узлов (формула 2.32);

3. IEEE Std 80-2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding (equation 60).

Для расчёта ЗУ на основе горизонтальных электролитических заземлителей рекомендуется пользоваться методикой РД 153-39.4-039-99 Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и площадок МН (формула 6.5).

Компания «Хакель Рос» для расчёта сопротивления электролитических вертикальных и горизонтальных заземлителей применяет формулы 6.13 и 6.5 соответственно из РД 153-39.4-039-99 «Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и площадок МН».

Для оформления заказа на расчёт устройства заземляющего комплектного УЗК на основе электролитических заземлителей необходимо выслать на электронный адрес info@hakerl.ru заполненный опросный лист на УЗК, который можно скачать в разделе «[Опросные листы на УЗК](#)» на сайте www.hakerl.ru.

Литература

1. Руководящий документ РД 153-39.4-039-99 «Нормы проектирования электрохимической защиты магистральных трубопроводов и площадок МН», М. – 1999. – 110 с.
2. Г.А. Дулицкий, А.П. Комаревцев. Электробезопасность при эксплуатации электроустановок напряжением до 1000 В. Справочник. – М.: Военное издательство, 1988. – 128 с.
3. Руководство по проектированию, строительству и эксплуатации заземлений в установках проводной связи и радиотрансляционных узлов, ЦНИИ связи, 1971. – 68 с.
4. IEEE Std 80-2000 IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.