

УДК 620.197

НОВЫЕ ПРОГРАММЫ КОМПЬЮТЕРНОГО РАСЧЕТА АНОДНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ СИСТЕМ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

© 2000 г. Л. И. Фрейман, М. Э. Касаткина

Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова, Москва

Поступила в редакцию 06.02.99 г.

Описаны программы компьютерного расчета однорядных анодных заземлений из вертикальных анодов в однородном и двухслойном грунтах и одиночных вертикальных заземлителей в многослойных грунтах. Приведены примеры соответствующих расчетов.

Ранее разработаны программы технико-экономического расчета круговых [1] и однорядных анодных заземлений (ОАЗ) [2], образуемых идентичными анодами в однородных грунтах, а также основанные на уравнениях Бургсдорфа [3] программы технического расчета одиночных вертикальных [4], вертикальных и горизонтальных заземлителей [5] в двухслойных грунтах (включавшие как частный случай однородные грунты).

Полученное в [6] путем обработки численных данных [7] уравнение коэффициента взаимовлияния (экранирования) вертикальных заземлителей в двухслойных грунтах позволило разработать алгоритм соответствующего расчета ОАЗ в таких грунтах, но с рядом существенных ограничений, определявшихся недостаточной полнотой данных [7]. С использованием этого уравнения разработана описанная ниже обобщенная программа ORVG-1 для ОАЗ в однородном и двухслойном грунтах. На основе метода уточненного расчета вертикальных заземлителей в многослойных грунтах [8] разработана также охарактеризованная ниже соответствующая программа MLG.

Программа ORVG-1. Программа охватывает все практически возможные варианты расположения анода относительно поверхности земли в однородном грунте и относительно поверхности земли и границы раздела слоев в двухслойном грунте. По номеру схемы выбирается нужный вариант. Расчет во всех случаях выполняется для цилиндрических анодов – сплошных или трубчатых, без обсыпки или с коксовой обсыпкой. Для заземлителя в виде полосы шириной b или равнобокого уголка $b \times b$ можно использовать эквивалентные диаметры, равные соответственно $0.5b$ и $0.95b$ [9], но только при расчете R_0 и R_g (см. ниже).

Для единичного анода ($n = 1$) по заданным исходным данным – включая нормативный срок службы T , коэффициенты запаса ϵ и расхода ма-

териала по току $B_{кэ}^1$ – вычисляются сопротивление анода растеканию тока R_0 и допустимая сила тока на анод J . При этом соответственно заложены в программу уравнения из [3, 10] для длины анода L и его внешнего диаметра d принято ограничение $L > 10d$.

При $n \neq 1$ вычисляемые характеристики ОАЗ определяются заданными значениями n и сопротивления растеканию тока ОАЗ (R_g), причем возможны три варианта. При задании $n \geq 2$ (условно) $R_g = 0$ вычисляются R_g и приведенные годовые затраты C (на сооружение и эксплуатацию ОАЗ), определяемые числом n , необходимым защитным током J_p и стоимостью анода k_a и электроэнергии k_e . При задании (условно) $n = 0$ и $R_g = 0$ вычисляется число анодов n_{opt} , отвечающее минимальным $C = C_{min}$, т.е. экономически оптимальному ОАЗ, и соответствующее значение $R_g = R_{g, opt}$. При задании $n = 0$ и определенного $R_g > 0$ вычисляется целое число анодов в ОАЗ, обеспечивающее наибольшую близость R_g к заданному значению (например, $R_g = 0.943$ Ом при заданном $R_g = 1.0$ Ом). Во всех этих вариантах вычисляются также R_0 , J и минимальное, необходимое при заданной J_p , число анодов (n_{min}) в ОАЗ, причем пользователь должен учитывать, что принимаемое значение n или n_{opt} должно быть не меньше, чем n_{min} .

Во всех вариантах с $n \geq 2$ ограниченная применимость использованных расчетных уравнений учтена в программе рядом очевидных “запретов” и ограничений. Так, в однородном грунте при заглублении анода $t > 0$ и определенных соотношениях L и t расчет (как и в [2]) возможен только для четных n . В двухслойном грунте с толщиной верхнего слоя h при заглублении $t > 0.1h$ или $t > h$ (в зависимости от схемы) возможен только приближенный расчет при $n \geq 2$, но на расчет R_0

¹ В обеих программах часть параметров для удобства компьютерной записи обозначается иначе, чем в тексте.

Данные расчета ОАЗ

Грунт	Анод	L, м	n_{\min}	n_{opt}	$n_{\text{пр}}$	C, долл./год	R_g , Ом	$l_{\text{ОАЗ}}$, м	
а	ЧТ	6	9	8	9	514	0.660	48	
		9	5	5	5	493	0.707	36	
		12	4	4	4	481	0.645	36	
		15	3	3	3	472	0.657	30	
б	ФС	7	7	7	7	671	0.945	42	
		ЧТ	6	9	9	9	607	0.885	48
			9	7	6	7	624	0.830	54
			12	5	5	5	630	0.877	48
	15		4	4	4	634	0.887	45	
	ФС	7	8	8	8	805	1.17	49	

Примечание. $n_{\text{пр}}$ – принятое число анодов; ЧТ – чугунная (стальная) труба; ФС – ферросилидовый стержень.

($n = 1$) эти ограничения не распространяются. Для ряда схем межанодные расстояния S должны находиться в практически принятом диапазоне $0.8 \leq (S/L) \leq 3$. Также в двухслойном грунте существенны ограничения $0.25 \leq (L/h) \leq 5$. Наконец, ввиду возрастания в двухслойном грунте ошибки расчета с ростом n ([6]) программа “безоговорочно” проводит вычисления при заданных или получаемых $n \leq 15$, но при $n \geq 16$ требует специальной команды для продолжения или начала расчета.

Несмотря на эти ограничения, программа ORVG-1 позволяет и для двухслойного грунта выполнить и сравнить (за время, необходимое фактически только для ввода и варьирования исходных данных) проектные расчеты большого числа практически важных вариантов ОАЗ. В качестве примера приводим результаты иллюстративного расчета экономически оптимальных ОАЗ из чугунных (стальных) труб различной длины ($L = 6, 9, 12$ и 15 м) и ферросилидовых стержней ($L = 7$ м) в двухслойном грунте с толщиной верхнего слоя $h = 3.1$ м при одинаковом заглублении анодов $t = 0.1$ м и межанодных расстояниях $S = L$ для двух вариантов соотношения удельных сопротивлений верхнего ρ_1 и нижнего ρ_2 слоев:

а) $\rho_1 = 50, \rho_2 = 25$ Ом м;

б) $\rho_1 = 25, \rho_2 = 50$ Ом м.

Наружный d_n и внутренний d_b диаметры труб принимали равными 0.25 и 0.22 м, диаметр стержня – 0.05 м, нормативный срок службы 10 лет, коэффициент запаса $\epsilon = 0.72$, КПД ОАЗ $w = 0.6$, число часов работы в году 8760 , плотность материала анодов $\gamma = 7800$ кг/м³, значения $B_{\text{кз}}$, исходя из данных [10], для чугуна (стали) и ферросилида принимали равными соответственно 10 и 0.25 кг/(А год). Стоимость чугунного (стального) анода с $L = 6$ м и ферросилидового анода, а также стоимость электроэнергии брали близкими к реальным (см. [2]) – соответственно $k_a = 100$ и

150 долл./шт² и $k_s = 0.05$ долл./(кВт ч). Для чугунных (стальных) анодов большей длины, ввиду отсутствия нужной информации, принимали k_a пропорциональной длине анода, т.е. при $L = 9, 12$ и 15 м соответственно $150, 200$ и 250 долл./шт. Во всех случаях дополнительно вычисляли длину ОАЗ – расстояние между крайними анодами $l_{\text{ОАЗ}} = (n - 1)S$, от которой зависит размер участка земли для ОАЗ и необходимая длина силового кабеля.

Как видно из таблицы, в обоих вариантах расчета сопротивление растеканию тока ОАЗ (R_g) из труб сравнительно слабо зависит от длины трубы L ; необходимое число анодов $n_{\text{пр}}$, естественно, убывает с увеличением L и в варианте а) при $L \geq 9$ м меньше, чем в варианте б) (поскольку большая часть длины анода находится в более электропроводном слое грунта). В варианте а) приведенные годовые затраты (при $L \geq 9$ м $C = C_{\min}$) наименьшие при $L = 15$ м, этой же длине соответствует и наименьшая протяженность ОАЗ ($l_{\text{ОАЗ}}$). В варианте б) наименьшее значение C отвечает длине анода 6 м, а наименьшая протяженность ОАЗ – анодам длиной по 15 м, так что выбор должен делаться с учетом обоих этих факторов. В обоих вариантах ОАЗ из ферросилидовых стержней и по C , и по R_g проигрывает всем просчитанным ОАЗ из чугунных (стальных) труб, а оптимальным вариантам таких ОАЗ – и по протяженности.

Очевидно, что даже при широкой возможности выбора типоразмеров анодов проектировщик, используя программу ORVG-1, может практически за несколько минут выбрать оптимальный вариант ОАЗ для тех или иных условий строительства системы катодной защиты подземного трубопровода. Подчеркнем, что и для однородного грунта (в отличие от ранее разработанных программ [2]), и для двухслойного программа ORVG-1

² Везде доллары США.

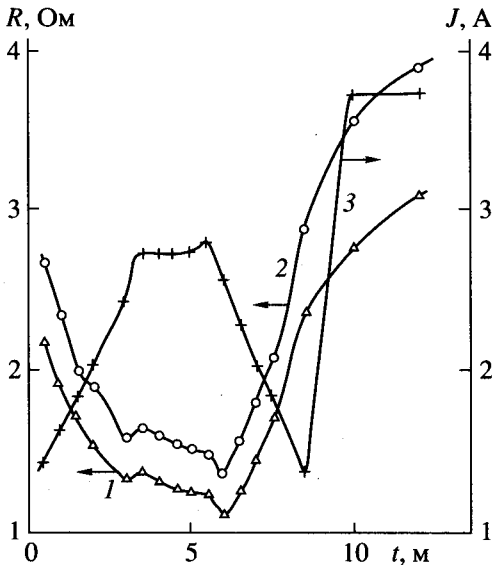


Рис. 1. Расчетные зависимости R анода без обсыпки (1) и с обсыпкой (2) и допустимого тока J (3) от заглубления анода t при постоянной L в 5-слойном грунте. Условия расчета в тексте.

автоматически решает часто встречающуюся задачу определения минимального числа анодов, необходимого для обеспечения того или иного принятого сопротивления растеканию тока ОАЗ.

В программе ORVG-1 предусмотрена возможность перехода от описанного выше основного на факультативный вариант расчета, который при тех же схемах расположения анода в грунте может использоваться в опытным порядке. Вместо использованного в основном варианте простейшего (грубого, но наиболее жесткого) допущения при расчете J (и соответственно n_{\min}) об обратной пропорциональности между линейной плотностью тока, стекающего с анода в каждом слое, и удельным сопротивлением этого слоя в факультативном варианте принято ее плавное функциональное изменение по длине анода [5, 11]. На существенно более слабое, чем в обычных расчетах, влияние различий удельных сопротивлений слоев грунта указывает и ряд других теоретических расчетов [12, 13], не приводящих к плавному распределению тока по аноду.

В обоих вариантах программы при расчете C и C_{\min} для ОАЗ с $n \geq 2$ используются не предполагаемые "усредненные", а вычисляемые для каждого n значения коэффициента взаимовлияния (экранирования) анодов, как и в [2], что повышает точность вычислений.

Программа MLG позволяет проводить уточненные расчеты одиночных вертикальных цилиндрических заземлителей (сплошных, трубчатых, без обсыпки или с коксовой обсыпкой, а также полосовых и из уголка — см. выше) в

горизонтально-слоистом грунте с числом слоев $3 \leq n \leq 12$. При задании удельного сопротивления ρ_i (в программе Roi) каждого слоя и расстояния u_i его нижней границы от поверхности земли, заглубления t и длины анода L , а также (как и в программе ORVG-1) значений d_n , d_b , d и T , γ , ϵ и $B_{кз}$ вычисляется сопротивление растеканию тока анода R и допустимая сила тока на анод J .

Для вычисления среднего удельного сопротивления ρ_{cp} нижних (поданодных) слоев необходимо [8] задаваться такой их суммарной толщиной Z_s , при которой ρ_{cp} получалось бы практически таким же, как при $Z_s \rightarrow \infty$. Если имеется s таких слоев, и толщина каждого, кроме наиболее глубокого, известна и равна z_i , то с учетом предварительных [8] и дополнительных расчетов для Z_s оказывается возможным принять уравнение

$$Z_s = \sum_{i=1}^{s-1} (z_i + 15L),$$

которое обеспечивает более чем достаточную точность вычисления ρ_{cp} . Последнее вычисляли по более простой и точной, чем в [8], формуле

$$\rho_{cp} = 4\pi L S_s \ln[3(4Z_s + L)/(4Z_s + 3L)].$$

Еще до основного расчета программа вычисляет некоторые полезные данные: числа расчетных слоев в верхней (наданодной), средней (анодной) и нижней (поданодной) зонах, длину участка анода в слое с наименьшим удельным сопротивлением и др., а по специальной команде выводит на дисплей схему расположения анода в грунте принятого строения при заданных L и t .

Основной расчет — вычисление R и J — проводится по обычной команде "run". Программа MLG может использоваться как для расчета этих параметров при всех заранее известных и заданных исходных данных, так и для выбора, например, оптимального расположения в грунте анода заданной длины L (что сводится к подбору оптимального заглубления t) или длины анода при постоянном t для получения нужного значения R .

Для иллюстрации на рис. 1 приведены зависимости от t сопротивления растеканию тока трубчатого стального анода ($L = 6$, $d_n = 0.25$, $d_b = 0.22$ м) без обсыпки (кривая 1) и с коксовой обсыпкой внешним диаметром $d_0 = 0.5$ м (кривая 2) в 5-слойном грунте (с нижними границами у первого, второго, третьего и четвертого слоев соответственно 3, 5.5, 9.5 и 18.5 м и удельным сопротивлением указанных четырех и пятого, наиболее глубокого слоя ($y_5 \rightarrow \infty$) соответственно 20, 40, 7, 50 и 80 Ом м). Кривая 3 — зависимость от t допустимой силы тока на анод без обсыпки при $B_{кз} = 10$ кг/(А год) и $\epsilon = 0.72$. Для анода с обсыпкой ($B_{кз} = 5$ (кг/А год)) значения J просто удваиваются.

Как видно, значение R минимально и близко к 1 Ом при $t = 6$ м; обсыпка снижает R на $\approx 20\%$, уве-

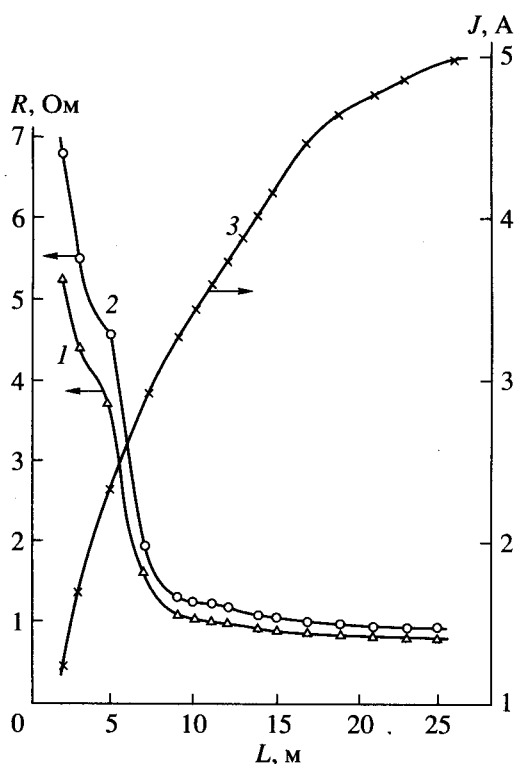


Рис. 2. Расчетные зависимости R анода без обсыпки (1) и с обсыпкой (2) и допустимого тока J (3) от длины анода L при постоянном заглублении $t = 0.5$ м в том же 5-слойном грунте, как для рис. 1. Условия расчета в тексте.

личивая J при $t = 6$ м от 2.57 до 5.14 А. Большие значения J могут быть получены лишь при неоправданно больших заглублениях анода. На рис. 2 для того же грунта и тех же характеристик анода кроме варьируемого значения L представлены зависимости от L значений R для анода без обсыпки (1) и с обсыпкой (2), а также J (без обсыпки) – кривая 3. Требуемое значение $R \approx 1$ Ом в обоих случаях достигается при $L \sim 10$ м. Дальнейшее удлинение анода дает уже небольшое снижение R . Например, при $L = 10$ и 21 м значения R (без об-

сыпки) составляют 1.28 и 0.99 Ом, с обсыпкой – 1.08 и 0.89 Ом. Допустимый ток значительно возрастает с L и в области слабого влияния L на R . Заметим, что обычный метод расчета [14], наиболее простой и в ряде случаев эффективный [8], для просчитанных условий при $L = 6$, $t = 6$ м занижает R на 18%, а при $L = 10$, $t = 0.5$ м – на 30.8%.

Работа выполнена по заказу ОАО “Росгазификация”, у которого могут быть приобретены обе программы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрейман Л.И. // Защита металлов. 1996. Т. 32. № 1. С. 83.
2. Фрейман Л.И. // Защита металлов. 1995. Т. 31. № 6. С. 626.
3. Бургсдорф В.В. // Электричество. 1954. № 1. С. 15
4. Фрейман Л.И. // Защита металлов. 1996. Т. 32. № 2. С. 174.
5. Фрейман Л.И., Касаткина М.Э. // Защита металлов. 1997. Т. 33. № 5. С. 555.
6. Касаткин Э.В., Фрейман Л.И. // Защита металлов. 1998. Т. 34. № 6. С. 669.
7. Бургсдорф В.В., Волкова О.В. // Электричество. 1964. № 5. С. 7.
8. Фрейман Л.И. // Защита металлов. 1999. Т. 35. № 2. С. 209.
9. Коструба С.И. Измерение электрических параметров земли и заземляющих устройств. М.: Энергоатомиздат, 1983. 104 с.
10. Бэкман В., Швенк В. Катодная защита от коррозии: Справочник/ Пер. с нем. М.: Металлургия, 1984. 495 с.
11. Фрейман Л.И., Левин В.М. // Защита металлов. 1997. Т. 33. № 5. С. 548.
12. Остапенко В.Н. // Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии. Киев: Наук. думка, 1988. 190 с.
13. Фрейман Л.И. // Защита металлов. 1996. Т. 32. № 3. С. 293.
14. Рекомендации по методике расчета и выбору конструкции глубинных анодных заземлителей для катодной защиты. М.: ОНТИ АКХ, 1982. 55 с.