

**Д. Л. Рахманкулов, М. В. Кузнецов,
Н. А. Гафаров, В. Н. Зенцов, А. М. Кузнецов**

**СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ
ОТ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ
ПОДЗЕМНЫХ КОММУНИКАЦИЙ**

Том II

**ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА
ОТ КОРРОЗИИ
В ПРИМЕРАХ И РАСЧЕТАХ**

**Под общей редакцией академика АН РБ
Д. Л. Рахманкулова**

**Государственное издательство
научно-технической литературы «Реактив»**

Уфа 2003

УДК 620.197.5

ББК 34.661

Э46

Авторы:

Рахманкулов Д. Л., Кузнецов М. В.,
Гафаров Н. А., Зенцов В. Н., Кузнецов А. М.

Рецензенты:

В. И. Агапчев

Член-корреспондент Российской технологической академии,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой прикладной математики и механики
Уфимского государственного
нефтяного технического университета

Т. Ф. Хилязева

Заведующая отделом электрохимзащиты и изоляционных
покрытий Института проблем транспорта энергоресурсов АН РБ

Рахманкулов Д. Л., Кузнецов М. В. Гафаров Н. А. и др.

Электрохимическая защита от коррозии в примерах и расчетах.

Э46 Том 2. – Уфа: Реактив, 2003. – 160 с.

ISBN 5-88333-097-5

Во втором томе (том 1 «Современные системы защиты от электрохимической коррозии подземных коммуникаций» вышел в 1999 г.) кратко рассматриваются теоретические вопросы защиты от электрохимической коррозии подземных трубопроводов.

Приводятся критерии защиты, примеры расчетов катодной, протекторной и электродренажной защиты, дается пример проекта защиты от электрохимической коррозии водовода.

В приложениях приводятся необходимые справочные данные для проведения расчетов.

Рассчитана на широкий круг инженерно-технических работников промышленных предприятий и сотрудников научно-исследовательских и проектных институтов различных отраслей промышленности, занимающихся вопросами борьбы с коррозией подземных трубопроводов, а также может быть использована в качестве учебного пособия студентами вузов и техникумов.

УДК 620.197.5

ББК 34.661

ISBN 5-88333-097-5

© Д. Л. Рахманкулов,
М. В. Кузнецов,
Н. А. Гафаров,
В. Н. Зенцов,
А. М. Кузнецов, 2003 г.

Содержание

	стр.
Введение.....	5
1. Электрохимическая коррозия и защита подземных трубопроводов.....	7
1.1. Защита от электрохимической коррозии.....	8
1.2. Электрохимическая защита.....	9
1.3. Катодная защита внешним током.....	11
1.4. Критерии защиты.....	13
1.4.1. Определение минимального защитного потенциала.....	13
1.4.2. Сдвиг потенциала как критерий защиты.....	16
1.4.3. Максимальный защитный потенциал.....	16
1.4.4. Контрольные пластины.....	17
1.4.5. Измерение поляризационных потенциалов.....	19
1.5. Проектирование защиты трубопровода.....	21
1.5.1. Расчет станций катодной защиты.....	22
1.5.2. Расчет СКЗ бесконечной длины.....	25
1.5.3. Расчет СКЗ конечной длины.....	26
2. Анодное заземление.....	30
2.1. Материал анодного заземления.....	30
2.2. Влияние глубины заложения на сопротивление растеканию тока вертикальных заземлителей.....	32
2.3. Влияние «подсаливания» грунта на переходное сопротивление заземлителя.....	33
2.4. Глубинные анодные заземления.....	33
2.5. Расчет анодного заземления.....	34
2.6. Конструкция поверхностного анодного заземления.....	36
2.7. Определение массы анодного заземления.....	37
2.8. Расчет СКЗ на стадии рабочей документации.....	39
3. Методы увеличения зоны защитного действия катодных установок.....	46
3.1. Катодные установки с экранными заземлениями.....	47
3.2. Катодные установки с противопотенциалом.....	51
3.3. Совместная катодная защита подземных металлических сооружений.....	58
3.3.1. Параллельно уложенные трубопроводы.....	58
3.3.2. Разветвленные коммуникации в жилых районах.....	62

3.3.2.1. Методика расчета совместной катодной защиты существующих и проектируемых газопроводов и водоводов.....	62
3.3.3. Разветвленные коммуникации перекачивающих станций и нефтебаз.....	69
3.4. Защита от электрохимической коррозии обсадных колонн скважин и промысловых трубопроводов.....	73
4. Протекторная защита трубопроводов и резервуаров.....	78
4.1. Принцип действия протекторной защиты.....	78
4.2. Материалы протекторов.....	79
4.3. Назначение и состав активаторов.....	80
4.4. Конструкция магниевых протекторов.....	81
4.5. Расчет протекторной защиты трубопроводов.....	83
4.6. Расчет протекторной защиты днища стальных резервуаров от грунтовой коррозии.....	86
4.7. Расчет протекторной защиты внутренней поверхности днища и первого пояса стальных резервуаров.....	89
4.7.1. Конструкция протекторов типа ПМР.....	91
4.7.2. Монтаж протекторов в резервуаре.....	92
4.8. Контроль протекторной защиты.....	93
4.9. Примеры расчетов протекторной защиты.....	94
5. Электродренажная защита подземных трубопроводов.....	106
5.1. Источники блуждающих токов.....	106
5.2. Методы борьбы с блуждающими токами.....	108
5.3. Предупреждение утечек токов.....	108
5.4. Электродренажная защита.....	110
5.5. Проектирование электродренажной защиты.....	112
5.6. Расчет поляризованного дренажа.....	113
5.7. Расчет усиленного дренажа.....	117
5.8. Примеры расчетов электродренажной защиты.....	119
6. Проектирование защиты от электрохимической коррозии подземных коммуникаций.....	126
Литература.....	128
Приложения.....	130

Введение

Развитое общество обслуживается различными видами транспорта – железнодорожным, автомобильным, водным, воздушным и трубопроводным, последний из которых получил наибольшее распространение.

Однако, каждый вид транспорта влияет на эксплуатацию друг друга, и в экстремальных ситуациях это может привести к аварийным ситуациям. В этом плане в настоящее время некоторые трубопроводы требуют особо пристального внимания, поскольку они исчерпали свой плановый ресурс и требуют замены.

Предлагаемая вниманию читателей книга представляет собой второй том монографии «Современные системы защиты от электрохимической коррозии подземных коммуникаций»*. Она посвящена расчетам систем катодной, протекторной и электродренажной защиты от коррозии, которые применяются в промышленности для повышения надежности работы трубопроводного транспорта. В книге наряду с собственными, приведены методики, описанные, в основном, известными российскими учеными, внесшими большой вклад в создание теории и практики катодной защиты – П. И. Тугуновым, Н. П. Жуком, Н. П. Глазовым, И. В. Стрижевским и др.

В отличие от ранее принятых в практике проектирования расчетов системы катодной защиты подземных трубопроводов, в книге впервые описано последовательное проектирование со стадиями «Проект» и «Рабочая документация». Другое отличие книги – нами предлагаются методики расчета, в которых учитывается значительно большее количество факторов, влияющих на эффективность катодных установок. В результате, как показывает опыт, расчетные и реальные параметры катодных установок практически не отличаются.

Для осмысленного применения различных расчетных формул в книге перед примерами расчетов приводятся основные теоретические положения по защите металлов.

* Первый том был опубликован в Государственном издательстве научно-технической литературы «Реактив» в 1999 г.

Для удобства работы проектировщиков, эксплуатационников, студентов и т. д. в книге приведены примеры расчетов, выполненных с использованием результатов опубликованных работ и справочной литературы. Они охватывают практические вопросы защиты от коррозии отдельных магистральных трубопроводов и трубопроводов, расположенных в условиях густоразветвленной сети.

Книга знакомит проектировщиков, специалистов, студентов ВУЗов и учащихся средних специальных учебных заведений как с аналитическими, так и графическими приемами расчетов. В приложении приводятся все необходимые справочные данные. В таблицах даются сведения о заводах-изготовителях и выпускаемой номенклатуре изделий, используемых в системах защиты от коррозии.

В завершающей части книги в краткой форме приводится порядок проектирования защиты от коррозии подземных сооружений в соответствии с действующими нормативными документами.

1. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Впервые примеры расчета катодной защиты были опубликованы около 50 лет назад. Представление о механизме электрохимической коррозии с того времени мало изменилось. Нижеприводимое описание процесса коррозии полностью соответствует воззрениям Жука Н. П. [1].

Электрохимическая коррозия представляет собой разрушение металла, сопровождающееся образованием электрического тока. Этот вид коррозии наиболее распространен в трубопроводном транспорте.

Корродирующая поверхность металла является короткозамкнутым многоэлектродным гальваническим элементом. Материальный эффект электрохимического разрушения (растворения) сосредоточен на анодных участках корродирующего металла. Анодное растворение металла возможно при одновременном протекании катодного процесса – ассимиляции освободившихся электронов на катодных участках металла. Согласно классической теории электрохимической коррозии, участки анодной и катодной реакции пространственно разделены, и для протекания процесса коррозии необходим переток электронов в металле и ионов в электролите. Однако пространственное разделение анодной и катодной реакции оказывается энергетически более выгодным, так как анодные и катодные реакции могут локализоваться на тех участках, где их протекание более облегчено. Поэтому в большинстве практических случаев протекание электрохимической коррозии обычно характеризуется локализацией анодного и катодного процессов на различных участках корродирующей поверхности металла.

Электрохимическое растворение металла является, таким образом, сложным процессом, состоящим из трех основных процессов:

– анодного процесса – возникновения некомпенсированных электронов около анодных участков металла и гидратированных ионов металла в электролите: $Me + mH_2O \rightarrow Me^{n+} mH_2O + ne$;

– процесса протекания электронов по металлу от анодных участков к катодным и соответствующего перемещения катионов и анионов

в растворе;

– катодного процесса – ассимиляции электронов какими-либо ионами или молекулами раствора (деполяризаторами), способными к восстановлению на катодных участках: $D + ne \rightarrow [D \cdot ne]$.

При замыкании в электролите двух электродов с разными потенциалами происходит перетекание электронов от более отрицательного электрода к менее отрицательному электроду. Это перетекание электронов выравнивает значения потенциалов замкнутых электродов. Если бы при этом электродные процессы (анодный на аноде и катодный на катоде) не протекали, потенциалы электродов сравнялись бы, и наступила бы полная поляризация. В действительности анодный и катодный электродные процессы не прекращаются, а продолжают протекать, препятствуя наступлению полной поляризации, т. е. действуют деполяризующе. Отсюда, в частности, происходит и название ионов или молекул раствора, обеспечивающих протекание катодного процесса, – «деполяризаторы» [1].

На практике преобладающее большинство металлических конструкций подвергается разрушению вследствие электрохимической коррозии: разрушение металлических изделий в пресной и морской воде, в атмосфере и почве, разрушение машин и аппаратов в химической промышленности, потери металлов при удалении с них окислы в травильных растворах и др.

При соприкосновении двух электропроводящих фаз между ними возникает разность электрических потенциалов, что тесно связано с образованием двойного электрического слоя, т. е. несимметричного распределения заряженных частиц у границы раздела фаз. Избыток положительных зарядов у этой границы со стороны одной фазы сообщает положительный потенциал; избыток отрицательных зарядов у границы со стороны второй фазы сообщает последней отрицательный потенциал.

1.1. Защита от электрохимической коррозии

В ряде случаев необходимая коррозионная стойкость металлической конструкции достигается подбором и применением стойкого в данной коррозионной среде (и при данных условиях коррозии) металла (или сплава). Выбор материала может быть сделан на

основании данных, приводимых в справочниках по коррозионной стойкости металлов.

В тех случаях, когда не удастся подобрать достаточно стойкий металл, применяются следующие основные методы защиты: обработка реагентами для снижения коррозионной активности среды, нанесение защитных покрытий, электрохимическая защита, которая подразделяется на катодную, протекторную и электродренажную. В настоящей книге подробно рассматривается лишь электрохимическая защита.

1.2. Электрохимическая защита

Электрохимическая защита – уменьшение скорости электрохимической коррозии металлических конструкций при их поляризации. Это уменьшение скорости коррозии может быть достигнуто как катодной, так и анодной поляризацией металлической конструкции. При анодной поляризации защищаемый металл или присоединяется к положительному полюсу источника тока (т. е. в качестве анода), или контактируется с металлом, имеющим более положительный потенциал. Уменьшение скорости коррозии при анодной поляризации металла конструкции имеет место только в случае перевода его в пассивное состояние. Поэтому анодная электрохимическая защита может быть эффективна для легко пассивирующихся металлов и сплавов в окислительных средах при отсутствии активных депассивирующих ионов.

Более широкое практическое применение нашла катодная защита металлических конструкций. Защищаемый металл при этом или присоединяется к отрицательному полюсу источника постоянного тока, или контактируется с металлом, имеющим более отрицательный потенциал (протекторная защита).

Рассматривая систему как короткозамкнутый многоэлектродный элемент, можно на основании коррозионной поляризационной диаграммы произвести количественный расчет защитного эффекта, т. е. уменьшение структурной коррозии под влиянием катодной поляризации.

Корродирующий металл можно рассматривать как бинарный короткозамкнутый гальванический элемент А – К (рис. 1а), к кото-

рому присоединяется третий электрод, являющийся эффективным анодом (протектором). Зная поляризационные кривые для катодной и анодной составляющих корродирующего металла и соотношение их поверхностей, можно построить поляризационную коррозионную диаграмму для данной системы (рис. 1б).

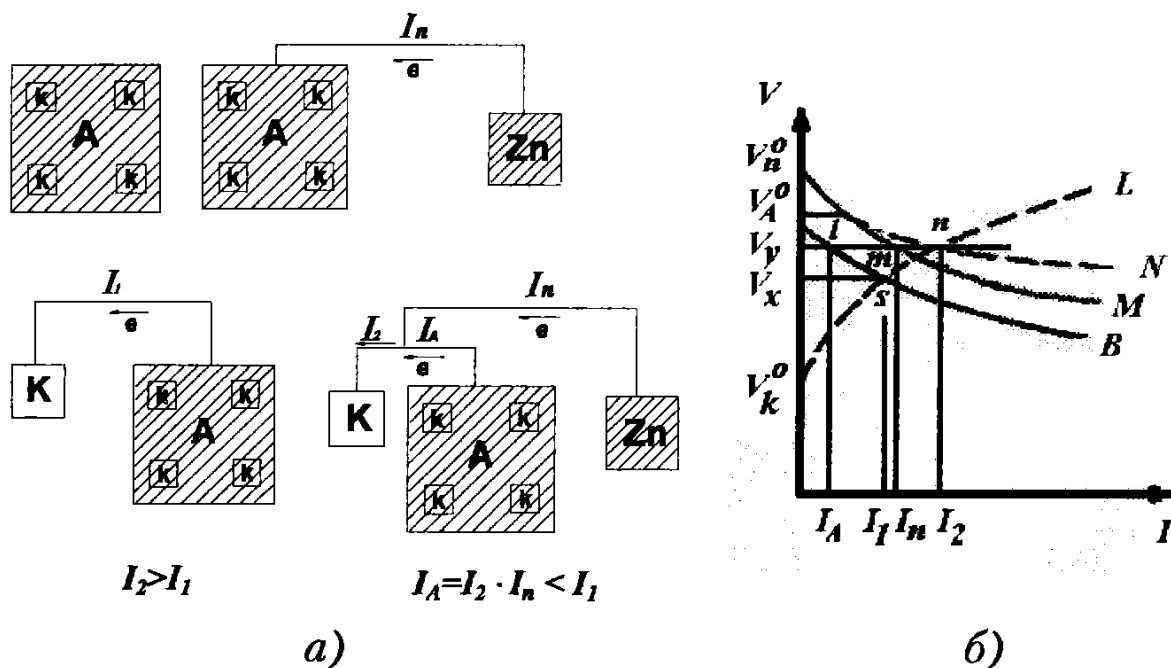


Рис. 1. Коррозия металла при внешней катодной поляризации путем присоединения нового анода (протектора):

а – графическая интерпретация; б – графический расчет защитного эффекта;

$V_A^0 B$ – кривая анодной поляризации анодных участков;

$V_k^0 L$ – кривая катодной поляризации катодных участков;

V_x – общий потенциал бинарной системы;

$V_x S = I_1$ – величина тока коррозии металла до его катодной поляризации

При катодной поляризации растворяющегося металла присоединением нового, например цинкового, анода (анодная поляризационная кривая которого $V_n^0 M$), суммарная анодная кривая новой трех-электродной системы будет представлена кривой $V_n^0 n N$, а общий потенциал системы будет соответствовать более отрицательному значению V_y . Коррозия сложного электрода (гетерогенного металла) после присоединения уменьшается, несмотря на возрастание общего тока системы ($I_1 \rightarrow I_2$). Отрезок $V_y I$ (или

равный ему отрезок mn) соответствует величине локального коррозионного тока I_A данного металла (ток его микропар) после присоединения протектора. Разность отрезков $V_x S - V_y l = I_l - I_A$ характеризует уменьшение работы микропар металла при присоединении к нему нового анода, т. е. при его катодной поляризации внешним током, величина которого соответствует отрезку $V_y m = I_n$.

Коэффициент защитного действия катодной поляризации может быть рассчитан по уравнению, приведенному в работе [1]:

$$k_3 = \frac{I_l - I_A}{i_K}, \quad (1)$$

где

$$i_K = \frac{I_n}{S_A - S_K}, \quad (2)$$

Здесь S_a и S_k – поверхность анодной и катодной составляющих корродирующего гетерогенного металла.

При достаточном смещении потенциала системы V_y в отрицательную сторону (до потенциала V_A^0) ток коррозии может стать равным нулю, т. е. наступит полная защита. Таким образом, для полного прекращения коррозии нужно заполяризовать защищаемую металлическую конструкцию до значения потенциала наиболее отрицательной анодной составляющей ее поверхности.

1.3. Катодная защита внешним током

Катодная защита внешним током – защита металла, производимая с помощью постоянного тока от внешнего источника, при которой защищаемый металл присоединяется к отрицательному полюсу (т. е. в качестве катода), а к положительному полюсу – дополнительный электрод (заземление), поляризуемый при этом анодно. Катодная защита внешним током в настоящее время широко применяется как дополнительное средство (к изолирующему покрытию) защиты от коррозии подземных металлических сооружений – трубопроводов и резервуаров [2, 3, 4, 5].

Таким образом, поверхность металлического подземного сооружения поляризуется катодно и предохраняется от коррозионного

разрушения. Активному разрушению подвергается анодное заземление, которое обычно выполняется из металлического лома: старых труб, рельсов и специально созданных конструкций.

Как видно из электрической схемы катодной защиты внешним током (рис. 2), источник постоянного тока I дает на зажимах напряжение E , необходимое для защиты определенного участка трубопровода. Ток (отрицательные заряды) от отрицательного полюса по проводу с сопротивлением R_1 попадает в точке дренажа на защищаемую трубу, сопротивление которой R_2 . Затем следует сопротивление R_3 , являющееся переходным сопротивлением между трубопроводом и грунтом, которое тем больше, чем в лучшем состоянии находится изоляция трубопровода. Сопротивление грунта R_4 на пути между трубопроводом и анодным заземлением в большинстве случаев не принимается во внимание вследствие незначительной его величины.

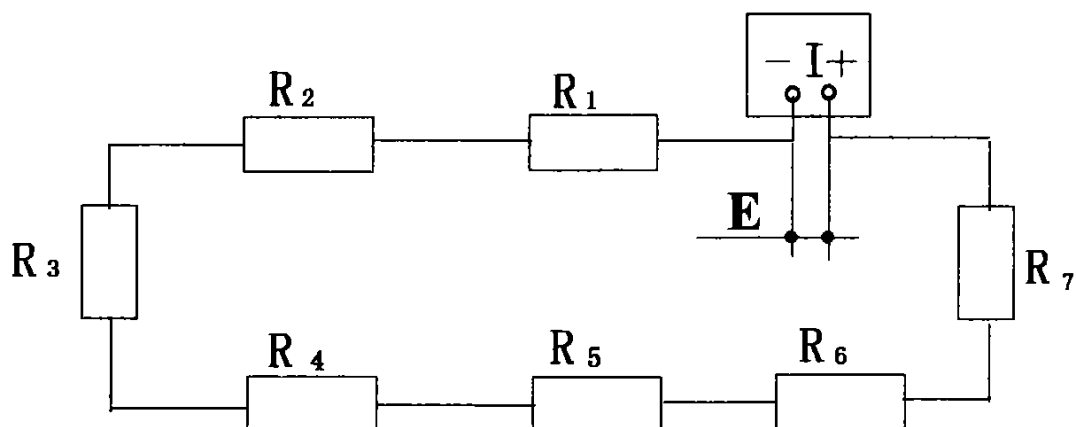


Рис. 2. Электрическая схема катодной защиты внешним током:

I – источник постоянного тока; R_1 – сопротивление соединительного провода; R_2 – сопротивление трубопровода до точки дренажа; R_3 – переходное сопротивление между трубопроводом и грунтом; R_4 – сопротивление грунта между анодным заземлителем и защищаемым объектом (обычно не учитывается); R_5 – сопротивление растеканию тока с заземлителя в окружающий грунт; R_6 – сопротивление анодного заземления; R_7 – сопротивление соединительного провода

Ток (положительные ионы) от положительного полюса источника тока по проводу с сопротивлением R_7 попадает на анодное заземление, сопротивление которого R_6 обычно мало и им пренебрегают. Далее следует сопротивление растеканию тока с заземлителя в окружающий грунт R_5 , которое тем меньше, чем больше поверхность заземлителя.

Полное сопротивление цепи равно:

$$R_0 = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7.$$

Часто это выражение записывается так [6]:

$$R_0 = R_n + R_a + R_k,$$

где R_n – сопротивление соединительных проводов; R_a – сопротивление растеканию тока с анодного заземлителя; R_k – входное сопротивление защищаемого объекта.

1.4. Критерии защиты

Для достижения максимальной защиты от коррозии необходимо непрерывно контролировать защищаемую конструкцию: определять потери массы защищаемого объекта. Для многих сооружений получить эти данные не представляется возможным. В этом случае определяют потери массы контрольных образцов, включенных в общую защиту сооружения. Однако этот метод трудоемок и не эффективен. На практике контролируют величину защитного потенциала "трубопровод-грунт".

Катодная поляризация конструкции часто сопровождается выпадением на ее поверхности осадка труднорастворимых гидроокисей, а также дополнительным смещением потенциала конструкции в отрицательную сторону за счет увеличения концентрационной поляризации по кислороду, что приводит к увеличению эффективности катодной защиты.

1.4.1. Определение минимального защитного потенциала

Металл, помещенный в электролит, всегда имеет естественный электродный потенциал, величина которого зависит от рода металла, состояния его поверхности, природы, концентрации и температуры электролита и т. д. На основании экспериментальных данных было установлено, что естественный потенциал многих стальных подземных трубопроводов лежит в пределах -0.45 до -0.72 В [3] по медно-сульфатному электроду сравнения (МЭС).

Потенциал защищаемой конструкции, при котором ток корро-

зии практически равен нулю, то есть прекращается коррозионный процесс, называют минимальным защитным потенциалом.

Теоретические значения минимального защитного потенциала могут быть рассчитаны из современной теории многоэлектродных систем. Из этой теории следует, что для прекращения коррозии конструкцию необходимо поляризовать до потенциала наиболее отрицательной анодной составляющей ее поверхности [3], т. е. полная защита конструкции возможна при выполнении условия:

$$V_x = (V_A)_{обр.}$$

Для прекращения коррозии стальной конструкции ее необходимо поляризовать до обратимого (или равновесного) потенциала железа в данном электролите. Обратимый потенциал железа в электролитах может быть рассчитан по уравнению:

$$V_{защ} = (V_{Fe})_{обр} = V_{Fe}^0 + \frac{RT}{nF} 2,3 \lg a_{Fe^{2+}}, \quad (3)$$

где V_{Fe}^0 – стандартный потенциал железа; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура; n – валентность; F – число Фарадея; $a_{Fe^{2+}}$ – активность ионов железа в приэлектродном слое электролита.

Так как при $pH > 5.5$ взаимодействие ионов железа с гидроксильными ионами приводит к образованию труднорастворимого гидрата закиси железа, то для определения активности ионов железа в (3) можно воспользоваться значением произведения растворимости $Fe(OH)_2$. В этом случае уравнение (3) примет вид:

$$\begin{aligned} V_{защ.} &= (V_{Fe})_{обр} = V_{Fe}^0 + \frac{RT}{nF} 2,3 \lg \frac{L_{Fe(OH)_2}}{\alpha_{OH^-}^2} = \\ &= V_{Fe}^0 + \frac{RT}{2F} 2,3 \lg \frac{L_{Fe(OH)_2} \cdot \alpha_{H^+}^2}{K_s^2} = \\ &= V_{Fe}^0 + \frac{RT}{2F} 2,3 \left(\lg \frac{L_{Fe(OH)_2}}{K_s^2} - 2pH \right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_s = \alpha_{H^+} \cdot \alpha_{OH^-}$ – ионное произведение воды ($K_s = 1.008 \cdot 10^{-14}$, приложение 1);

$L_{Fe(OH)_2} = \alpha_{Fe^{2+}} \cdot \alpha_{OH^-}^2$ — произведение растворимости гидрата закиси железа ($a = 1.65 \cdot 10^{-15}$, приложение 2);

$pH = -\lg \alpha_{H^+}$ — водородный показатель в приэлектродном слое электролита;

α_{H^+} и α_{OH^-} — активность гидроксильных и водородных ионов в приэлектродном слое электролита.

Подставляя в (4) численные значения входящих в него величин, можно получить значение защитного потенциала:

$$V_{обр} = (V_{Fe})_{обр} = -0,44 + 0,0296 \left(\lg \frac{1,65 \cdot 10^{-15}}{(1,008 \cdot 10^{-14})^2} - 2pH \right) = -(0,050 + 0,0592pH)$$

Так как грунт является стабильным перемешиваемым электролитом, а pH в приэлектродном слое электролита при коррозии железа находится в пределах 8.3–9.6, то теоретическое значение защитного потенциала стали в грунте колеблется в пределах от –0.54 до –0.61 В, составляя в среднем –0.58 В по отношению к стандартному водородному электроду (НВЭ).

В СССР по ведомственным инструкциям минимальный защитный потенциал сталей рекомендовалось принимать равным –0.87 В по МЭС, тогда как в мировой практике его принимали равным –0.85 В по МЭС. Лишь в 1970 г. в СССР стали использовать значение минимального потенциала –0.85 В по МЭС.

Значения минимальных поляризационных (защитных) потенциалов для других металлов приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Величины минимальных поляризационных (защитных) потенциалов

Металл сооружения	Значения минимальных поляризационных (защитных) потенциалов, В по отношению к неполяризуемому электроду		Среда
	водородному	медно-сульфатному	
Сталь	–0.55	–0.85	Любая
Свинец	–0.20	–0.50	Кислая
Алюминий	–0.42	–0.72	Щелочная
	–0.55	–0.85	Любая

1.4.2. Сдвиг потенциала как критерий защиты

В ряде стран практикуется дополнительный критерий защиты – сдвиг потенциала. В основу положена разность потенциалов между минимальным защитным потенциалом и естественным потенциалом «труба-грунт», равная -0.3 В по МЭС.

Приведенная величина минимального защитного потенциала является суммарным значением естественного потенциала «труба-грунт» и наложенного потенциала защиты. Таким образом, для расчета станций катодной защиты величина расчетного потенциала должна определяться как разность

$$E_{расч} = E_{min} - E_{ест}$$

Для стальных трубопроводов величина расчетного потенциала будет равна

$$E_{расч} = -0,85 + 0,55 = -0,3В$$

1.4.3. Максимальный защитный потенциал

При осуществлении электрохимической защиты трубопровода на всем его протяжении не удастся создать одинаковые значения защитного потенциала, поэтому он изменяется по длине. Так как в наиболее удаленных точках должен быть минимальный защитный потенциал, то в точке подсоединения к трубопроводу он значительно больше. Большая величина защитного потенциала может ускорить разрушение и отслаивание покрытия от металла. Однако отслаивание битумных покрытий в условиях водных электролитов наблюдается и при минимальном защитном потенциале, равном -0.85 В по МЭС, когда не созданы условия для выделения газообразного водорода в результате реакции водородной деполяризации. Такое явление можно объяснить тем, что адгезия битумного покрытия к металлу оказывается недостаточной, чтобы противостоять силе, действующей на границе раздела металл-покрытие в результате скопления миграционной воды (электроосмотические явления). ГОСТ 9.602-89 предусматривает ограничение максимальных защитных

поляризационных потенциалов для подземных металлических сооружений [7], численные значения которых приведены в табл. 2. При этом поляризационные потенциалы измеряются лишь в специально оборудованных контрольно-измерительных пунктах.

Таблица 2

Значения максимальных (поляризационных) потенциалов по отношению к неполяризующемуся электроду, В

Металл сооружения	Защитное покрытие	НВЭ	МЭС
Сталь	С покрытием	-0.85	-1.15
Сталь	Без покрытия	Не ограничивается	
Свинец	С покрытием и без него	-1.00	-1.30
Алюминий	С частично поврежденным покрытием	-1.10	-1.40

Примечания:

1. Потенциал неполяризующегося насыщенного медно-сульфатного электрода по отношению к стандартному водородному электроду принят равным 0.3 В;
2. Среда – любая.

ВНИИСТом проведены исследования грунтовых условий, в которых эксплуатируются трубопроводы. В частности, изучено влияние влажности грунтов и давления их на покрытие, а также поведение новых видов изоляционных материалов, таких как полимерные материалы и стеклоэмали в условиях катодной поляризации. На действующих стальных изолированных трубопроводах, не оборудованных специальными контрольно-измерительными пунктами для измерения поляризационных потенциалов, допускается осуществлять катодную поляризацию таким образом, чтобы среднее значение разности потенциалов находилось в следующих пределах: для битумной изоляции от -0.9 до -2.5 В, для полимерной пленочной изоляции от -0.9 до -3.5 В по медно-сульфатному электроду сравнения [3].

1.4.4. Контрольные пластины

Для определения эффективности катодной защиты трубопроводов в дополнение к электрическим измерениям используют контрольные пластины (рис. 3).

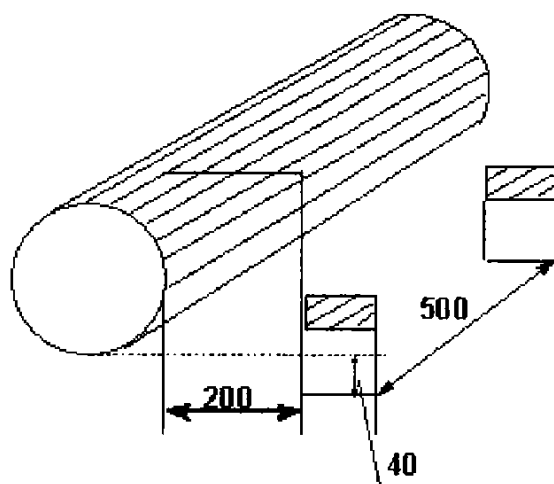


Рис. 3. Схема установки контрольных пластин

Пластины изготавливают из того же металла, что и трубы на данном участке. Устанавливают пластины на участках наименьшего потенциала или где ожидается наибольшая коррозия. Пластины предварительно очищают и взвешивают с точностью до 0.1 мг на лабораторных весах. Масса пластины выбирается в зависимости от срока контроля. Если пластины закладываются на срок до 2-х лет, то предельная масса пластин 200 г. При многолетних испытаниях и в случае, если ожидаемые потери металла существенны, масса пластины выбирается до 1000 г и ее взвешивают на технических весах. Взвешенные контрольные пластины устанавливают в грунте на расстоянии 200 мм от трубы. Одна из пластин соединяется с трубопроводом соединительным проводом. На месте установки другой пластины на трассе устанавливается опознавательный знак, и это место фиксируется в специальном журнале. По истечении срока испытания пластины вынимают, очищают от продуктов коррозии и взвешивают. Защитный эффект или степень защиты определяют по формуле:

$$P = \frac{W_0 - W_3}{W_0} \cdot 100\%,$$

где W_0 – потеря массы пластины без защиты;
 W_3 – потеря массы пластины с защитой.

1.4.5. Измерение поляризационных потенциалов

Электродный потенциал, представляющий собой скачок потенциала на фазовой границе «металл–электролит», определяет характер и скорость электрохимических процессов. Этот скачок пространственно локализован в области двойного электрического слоя на границе «металл–электролит».

В практических условиях электрод сравнения не может быть подведен к границе двойного электрического слоя, он располагается на значительном расстоянии от нее. Поэтому в измеряемую величину включается омическая составляющая разности потенциалов, которая возникает за пределом двойного электрического слоя и электродом сравнения. Это падение напряжения не является перенапряжением, оно не определяет ни характер, ни скорость электродных реакций на металле. Поэтому при измерениях, связанных с контролем минимальных или максимальных поляризационных потенциалов, падение потенциала за пределами двойного электрического слоя нужно исключать. Присутствие омической составляющей приводит во многих случаях к ошибочным заключениям относительно защищенности трубопровода.

Поляризационный потенциал стальных трубопроводов измеряют на специально оборудованном контрольно-измерительном пункте (рис. 4). Датчик электрохимического потенциала 2 представляет собой стальную пластину размером 25 x 25 мм, изолированную с одной стороны и укрепленную этой стороной на электроде сравнения 3. Электрод сравнения с датчиком устанавливают на уровне оси трубопровода 1 на расстоянии 10–15 см от его поверхности. Контрольные проводники 4 от электрода, датчика и трубопровода выводят на поверхность земли под ковер. Последний, в жилых районах устанавливается заподлицо с асфальтом, а в нежилых районах поднимается на 50 см над поверхностью грунта.

Поляризационный потенциал стальных трубопроводов в контрольных пунктах измеряют по схеме, данной на рис. 5а. В отсутствие поля блуждающих токов допускается измерять поляризационный потенциал по схеме, приведенной на рис. 5б. В том и другом случае вольтметр должен иметь внутренне сопротивление не менее 1 Мом на 1 В шкалы и пределы измерения 1–0–1, 3–0–3 или другие, близкие к указанным.

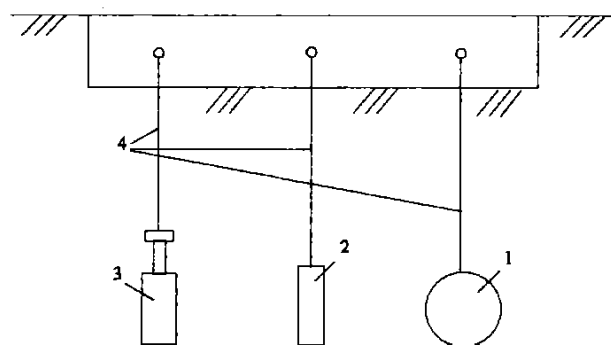


Рис. 4. Схема контрольно-измерительного пункта

В схеме с прерывателем тока (см. рис. 5а) в цепи трубопровод-датчик целесообразно использовать электромагнитное реле с одной группой контактов "на переключение", управляемое электронным времязадающим устройством, которое должно обеспечивать плавную регулировку интервалов между срабатываниями реле в пределах 0.5–5 с. Продолжительность разрыва цепи трубопровод-датчик должна быть не более 0.02–0.03 с. Емкость накопительного конденсатора 8–10 мФ.

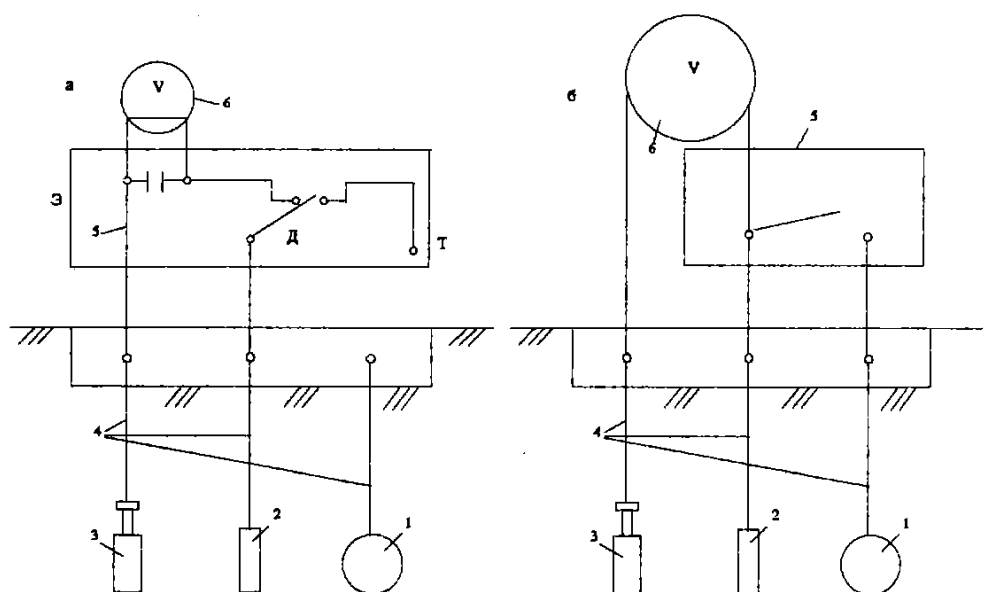


Рис. 5. Схема измерений с накопительным конденсатором (а) и с выключателем тока (б)

Рекомендуемая последовательность операции для проведения измерений при использовании схемы с накопительным конденсатором следующая. Контрольные проводники 4 от трубопровода 1, датчика электрохимического потенциала 2 и электрода сравнения 3

присоединяют соответственно к клеммам Т, Д и Э прерывателя тока 5. К клеммам Э и "минус" прерывателя тока присоединяют вольтметр 6. Через 10 мин после подключения вольтметра включают прерыватель тока. Устанавливают интервал между срабатываниями реле прерывателя тока в пределах 0.5–2 с. Через 6–8 срабатываний прерывателя снимают показания вольтметра, последующие показания снимают через 2...3 срабатывания прерывателя.

В схеме с выключением тока (см. рис. 5б) в цепи трубопровод-датчик может быть использован тумблер. Измерения проводят следующим образом. Выключатель 5 присоединяют к контрольным проводникам от трубопровода 1 и датчика 2 (контакты выключателя замкнуты), вольтметр 6 – к контрольным проводникам от электрода сравнения 3 и датчика 2. При этом вольтметр фиксирует разность потенциалов "трубопровод-земля", представляющую собой сумму поляризационного потенциала и омического падения напряжения.

Для измерения поляризационного потенциала выключают тумблер, при этом стрелка (или перо) прибора перемещаются. Показания прибора, соответствующие значению поляризационного потенциала, снимают в первый момент после остановки стрелки (пера). Рекомендуется продолжительность разрыва цепи "трубопровод-датчик" не более 2–3 с. Следующие показания вольтметра снимают через 10–15 с после включения тумблера.

Продолжительность измерений поляризационных потенциалов устанавливается нормативно-технической документацией [7].

Среднее значение поляризационного потенциала U_{cp} определяют как среднее арифметическое измеренных мгновенных значений потенциала во весь период измерений

$$U_{cp} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m U_i,$$

где $\sum_{i=1}^m U_i$ – сумма мгновенных значений потенциала за весь период измерений, В.

1.5. Проектирование защиты трубопровода

При проектировании необходимо иметь следующие исходные данные: параметры трубопровода; удельное сопротивление грунтов

вдоль трассы на глубину до 2 метров с интервалами изменения удельного сопротивления грунтов, приведенными в первом томе нашей книги «Современные системы защиты от электрохимической коррозии подземных коммуникаций» [9]; профиль трассы; расстояния до ближайших сооружений вдоль трассы (по 5 км по обе стороны от трубы); сведения о наличии блуждающих токов вдоль трассы трубопровода и перспективы их возникновения; данные о наличии защитной изоляции на трубопроводе (сопротивление и проводимость изоляции).

Имея все исходные данные для проектирования катодной защиты (после их анализа), выполняют следующие действия:

- выбирают участки для защиты;
- рассчитывают мощность СКЗ и выбирают источник тока;
- рассчитывают анодное заземление;
- рассчитывают соединительные кабели;
- рассчитывают экономику и смету затрат.

При защите трубопроводов от электрохимической коррозии на стадии проектирования используются расчеты по пунктам 1.5.1, 1.5.2, 1.5.3.

Проектирование защиты от коррозии сложных объектов осуществляется по СНИП 11-01-95 [10]. Он предусматривает осуществление проектных работ в две стадии: первая – "Проект", вторая – "Рабочая документация".

Для проектирования не сложных объектов в соответствии с вышеуказанным СНиП допускается проектирование в одну стадию – "Рабочий проект".

При проектировании защиты подземных трубопроводов от электрохимической коррозии на стадии "Проект" разрешается проводить расчеты сметной стоимости по укрупненным показателям. В случае расчета лишь катодной защиты используется стоимость одной катодной установки, что позволяет значительно упростить расчеты. Методика упрощенного расчета, впервые предложенная нами, приводится ниже.

1.5.1. Расчет станций катодной защиты

Все расчетные формулы выведены из предположения, что грунт является однородным, изоляция равномерная и без дефектов.

Наибольшее влияние на точность расчетов оказывают величина удельного сопротивления грунта и величина сопротивления (проводимость) изоляции. Чем более точно и тщательно проведено определение ρ и $R_{из}$, тем точнее и ближе к истине расчет. Все расчеты дают приблизительные данные, которые уточняются на месте специальными измерениями.

Чтобы рассчитать мощность станции катодной защиты, необходимо знать величину E_{max} на линии и ток I в цепи. Определение потенциала усложняется тем, что он падает от точки дренажа к концам защищаемого участка, то есть $E = F(x)$.

Если на трубопроводе установлена только одна станция, то потенциал, постепенно понижаясь, стремится к нулю и достигает этого значения при $x \rightarrow \infty$. Такие СКЗ называют станциями бесконечной длины (рис. 6).

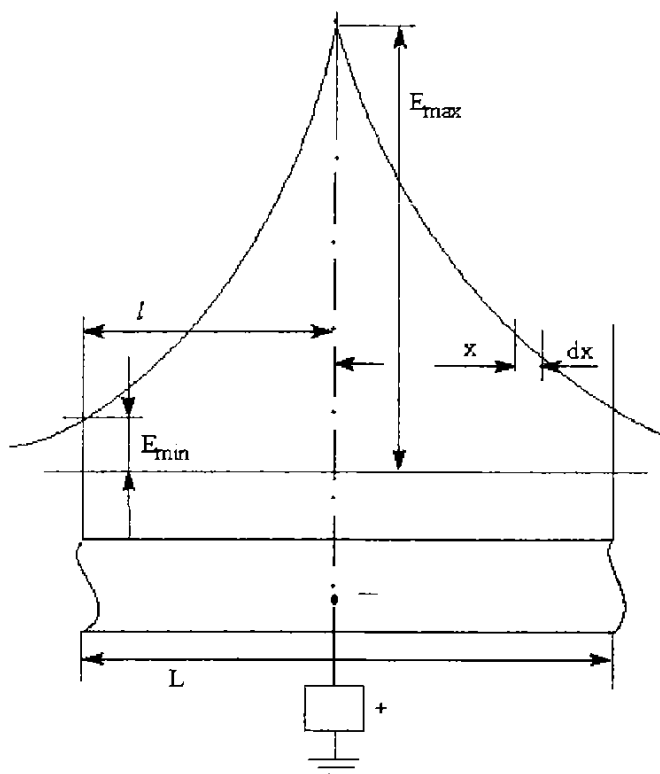


Рис. 6. СКЗ бесконечной длины

Когда на трассе рядом установлено несколько станций, и они влияют друг на друга (происходит наложение потенциалов), то такие станции называют станциями конечной длины. В этом случае мощность станций несколько ниже, чем в первом случае и поэтому они более предпочтительны (рис. 7).

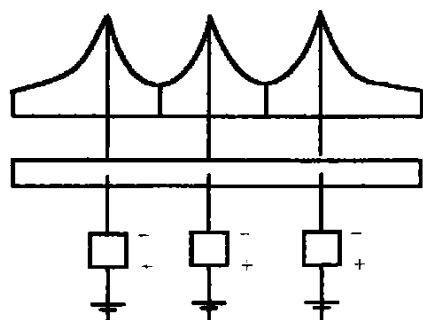


Рис. 7. СКЗ конечной длины

На основе закона Ома для элементарного участка трубопровода длиной dx , расположенного на расстоянии x от точки дренажа, получены нижеприводимые исходные уравнения 5 и 6.

Вследствие утечки тока через покрытие по трубопроводу в обе стороны от точки дренажа потечет ток; этот ток создает на бесконечно малом участке трубопровода dx падение напряжения dE , зависящее от удельного продольного сопротивления трубопровода R :

$$dE = -R I dx. \quad (5)$$

Под влиянием потенциала и с элемента трубы dx будет стекать в землю ток, величина которого будет зависеть от сопротивления покрытия на единицу длины:

$$dI = -\frac{1}{R_{из}} E dx, \quad (6)$$

где I – ток в точке x на линии трубы; E – потенциал в точке x ; $R_{из}$ – сопротивление изоляции трубы на единицу длины; R – сопротивление трубы на единицу длины; x – расстояние от точки дренажа.

Путем дифференцирования уравнений 5 и 6 получают следующие зависимости:

$$\frac{d^2 I}{dx^2} = -\frac{1}{R_{из}} \frac{dE}{dx} = \frac{R}{R_{из}} I, \quad (7)$$

$$\frac{d^2 E}{dx^2} = \frac{R}{R_{из}} E. \quad (8)$$

Общее решение каждого из этих уравнений второго порядка будет выглядеть следующим образом:

$$I = A_1 e^{ax} + B_1 e^{-ax}, \quad (9)$$

$$E = A_2 e^{ax} + B_2 e^{-ax}, \quad (10)$$

где A_1, A_2, B_1, B_2 – некоторые постоянные коэффициенты.

$a = \sqrt{\frac{R}{R_{\text{из}}}}$ всегда положительна, ее называют постоянной распределения потенциала и тока вдоль трубопровода.

1.5.2. Расчет СКЗ бесконечной длины

Для определения параметров катодной защиты трубопровода пользуются решениями уравнений 7, 8. Введем граничные условия:

- при $x = 0, I = I_{\partial p}, E = E_{\partial p}$
- при $x = l, I = I_l, E = E_{\min}$
- при $x = \infty, I = 0, E = 0$

Для того чтобы решения уравнений (9, 10) не искажали характер изменения потенциала и тока, так как при $x \rightarrow \infty e^{ax} \rightarrow \infty$ необходимо, чтобы $A_1 = A_2 = 0$. Следовательно,

$$I = B_1 e^{-ax}, \quad (11)$$

$$E = B_2 e^{-ax}. \quad (12)$$

Используя граничные условия, при $x = 0$ (то есть в точке дренажа) $I = I_{\partial p}$ и $E = E_{\partial p}$, получается $B_1 = I_{\partial p}$; $B_2 = E_{\partial p}$, и окончательный результат:

$$I = I_{\partial p} e^{-ax}, \quad (13)$$

$$E = E_{\partial p} e^{-ax}. \quad (14)$$

Если задать $x = l$, где потенциал должен быть минимальным, которому соответствует какая-то сила тока I_l , то из (13) и (14) следует:

$$E_{\partial p} = E_{\min} e^{al}, \quad (15)$$

$$I_{\partial p} = I_l e^{al}. \quad (16)$$

Так как оба участка трубопровода подключены к источнику тока параллельно, то необходимый ток одной станции катодной защиты равен

$$I_{\text{заш}} = 2I_{\text{др}}.$$

Для расчета зоны защитного действия источника с определенными параметрами используют уравнение

$$L = \frac{2}{a} \ln \frac{E_{\text{др}}}{E_{\text{min}}}. \quad (17)$$

Формулы 15, 16, 17 являются расчетными для участка бесконечной длины.

1.5.3. Расчет СКЗ конечной длины

Для определения параметров катодной защиты трубопровода также пользуются решениями уравнений 7 и 8. Граничные условия, $x = 0, I = I_{\text{др}}, E = E_{\text{др}}$, при $x = l, I = 0$ и $\frac{dE}{dx} = 0$. Используя эти граничные условия, получается

$$\begin{aligned} I_{\text{др}} &= A_1 + B_1, \\ 0 &= A_1 e^{al} + B_1 e^{-al}, \\ A_1 e^{al} + (I_{\text{др}} - A_1) e^{-al} &= 0, \end{aligned} \quad (18)$$

или

$$A_1 (e^{al} - e^{-al}) + I_{\text{др}} e^{-al} = 0, \quad (19)$$

$$B_1 = I_{\text{др}} - A_1,$$

$$A_1 = -\frac{I_{\text{др}} e^{-al}}{e^{al} - e^{-al}}, \quad B_1 = \frac{I_{\text{др}} e^{al}}{e^{al} - e^{-al}}. \quad (20)$$

Подставляя найденные значения коэффициентов в формулу (9), приходят к

$$I = -\frac{I_{\text{др}} e^{-al}}{e^{al} - e^{-al}} e^{ax} + \frac{I_{\text{др}} e^{al}}{e^{al} - e^{-al}} e^{-ax}. \quad (21)$$

Имея в виду, что

$$\frac{e^m - e^{-m}}{2} = sh(m) \quad \text{и} \quad \frac{e^m + e^{-m}}{2} = ch(m), \quad (22)$$

где shm и chm – гиперболические синус и косинус аргумента m , можно записать

$$I = I \frac{sh[a(l-x)]}{sh(al)}. \quad (23)$$

Затем определяются коэффициенты A_2 и B_2 :

$$\frac{dE}{dx} = A_2 a e^{ax} - B_2 a e^{-ax}$$

Подставив граничные условия, можно получить уравнения:

$$\begin{aligned} E_{\partial p} &= A_2 + B_2, \\ 0 &= A_2 a e^{al} - B_2 a e^{-al}. \end{aligned} \quad (24)$$

Решая их, находят:

$$\begin{aligned} A_2 &= \frac{E_{\partial p} e^{-al}}{e^{al} + e^{-al}}, \\ B_2 &= \frac{E_{\partial p} e^{al}}{e^{al} + e^{-al}}. \end{aligned} \quad (25)$$

Подставляя значения постоянных, приходят к выражению

$$E = E_{\partial p} \frac{ch[a(l-x)]}{ch(al)}. \quad (26)$$

На границе, то есть при $x = l$, защитный потенциал должен иметь минимальное значение E_{min} , тогда

$$E_{\partial p} = E_{min} ch(al), \quad (27)$$

так как $ch(0) = 1, L = 2l$

$$L = \frac{2}{a} arch \frac{E_{\partial p}}{E_{min}}. \quad (28)$$

Имея эти формулы, можно рассчитать станцию катодной защиты или определить длину защищаемого участка.

Потенциал трубопровода в данной точке трубопровода формируется под воздействием всех станций катодной защиты, расположенных вдоль защищаемого трубопровода. Однако на практике влиянием удаленных станций на потенциал трубопровода в данной точке пренебрегают и учитывают влияние только соседних станций, пользуясь для расчета L выражением

$$L = \frac{2}{a} \ln \frac{E_{\text{оп}}}{E_{\text{мин}} \cdot k_g},$$

где k_g – коэффициент взаимного влияния, для практических расчетов принимаемый равным 0.5–0.6.

Значения функций $e^x, e^{-x}, ch(x), sh(x)$ приведены в приложениях 3 и 4. Определение функции $Archx$ приводится в приложении 3.

Пример расчета катодной защиты на стадии «Проект» приводится ниже.

Пример 1. Определить количество катодных установок на стадии "Проект", необходимых для защиты магистрального нефтепровода диаметром 1020 мм, длиной 300 км, имеющего толщину стенки 10 мм. Переходное сопротивление "трубопровод-грунт" равно 6000 Ом·м². Естественный потенциал "труба-грунт" равен –0.55 В по МЭС.

Решение:

1. Сопротивление изоляции на единицу длины.

$$R_{\text{из}} = \frac{R_n}{\pi D} = \frac{6000}{3,14 \cdot 1,02} = 1873,4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$$

2. Продольное сопротивление единицы длины трубопровода (по приложению 5).

$$R_T = 7,72 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} / \text{м}$$

3. Постоянная распределения токов и потенциалов вдоль трубопровода.

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_T}{R_{\text{из}}}} = \sqrt{\frac{7,72 \cdot 10^{-6}}{1873,4}} = 0,0644 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м}.$$

$$E_{\max} = E_{\text{защ}(\max)} - E_{\text{ест}} = -1,15 - (-0,55) = -0,6B$$

4. $E_{\min} = E_{\text{защ}(\min)} - E_{\text{ест}} = -0,85 - (-0,55) = -0,3B$

5. Длина защитной зоны

$$L = \frac{2}{a} \operatorname{arch} \frac{E_{\max}}{E_{\min}} = \frac{2}{0,0644 \cdot 10^{-3}} \operatorname{arch} \frac{0,6}{0,3} = 40372 \text{ м}$$

6. Количество катодных установок

$$n = \frac{300000}{40372} = 7,4 \text{ шт.}$$

К установке принимаются 8 установок.

2. АНОДНОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ

Анодное заземление служит для подачи тока в грунт при защите подземного сооружения. К анодному заземлению предъявляются следующие требования:

- минимальное переходное сопротивление растеканию тока;
- наименьшие габаритные размеры;
- наиболее долговечный и недефицитный материал;
- простота установки;
- наименьшая стоимость.

2.1. Материал анодного заземления

Принципиально заземлитель может быть изготовлен из любого токопроводящего материала: металла, графита, угля и т. п. Но наибольшее распространение получили заземлители из черных металлов, особенно из стали. Это объясняется тем, что в практических условиях почти всегда можно найти бросовый черный металл – в виде старых труб, рельсов, уголков, двутаврового проката – и использовать их для анодных заземлений. Недостаток заземлителей из черного металла заключается в сравнительно быстром разрушении их проходящим током за счет высокого электрохимического эквивалента (9–10 кг/А·год). Но в то же время форма и механическая прочность изделий из бросового железа обычно позволяет легко устанавливать их в грунт.

Для снижения потерь металла анодные заземления устанавливают в неагрессивные электропроводящие засыпки из измельченной и утрамбованной коксовой и угольной крошки. В некоторых случаях применяют отходы электродного производства – графитовую крошку и шлак.

Применение коксовой засыпки изменяет электрохимический механизм работы анодного заземлителя. Одновременно с ионной проводимостью на границе "стальной заземлитель-грунт" (рис. 8а), связанной с растворением металла, возникает электронная проводимость на границе "стальной заземлитель-засыпка".

Стекание электрического тока в грунт с пресованной коксовой засыпки (рис. 8б) не вызывает растворения поверхности засыпки.

Характер электрохимических процессов, протекающих на поверхности анодного заземлителя, зависит от количества влаги в приэлектродном слое заземлителя, определяемого влажностью грунтов.

В засыпке не должно быть свободного грунтового электролита. В противном случае на поверхности заземлителя появляется ток ионной проводимости, и стальной электрод начинает разрушаться (рис. 8в, г).

По этой причине в грунтах насыщенной влажности (для коренных песков – 20%, супесей – 25%, и суглинков – 30%), где с поверхностью стального электрода контактирует грунтовой электролит, применение коксовой засыпки неэффективно. Стальные электроды разрушаются с той же скоростью, что и без засыпки.

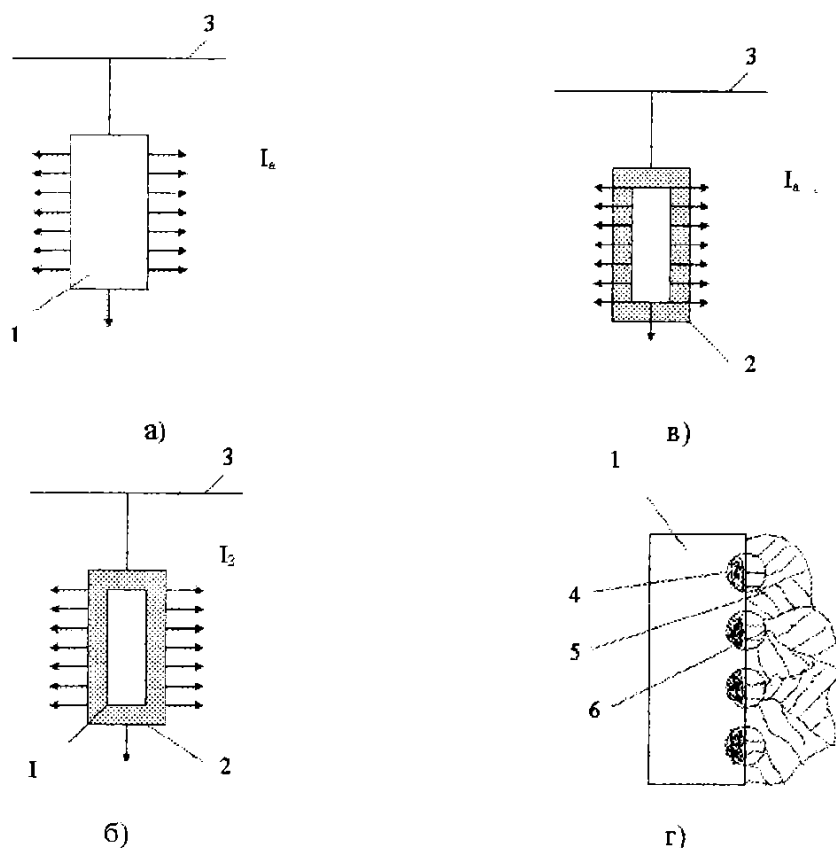


Рис. 8. Схема растекания тока на единичном вертикальном анодном заземлителе, установленном непосредственно в грунт (а), в засыпку в маловлажном грунте (б), в грунте насыщенной влажности (в) и образование очагов коррозии заземлителя (г): 1 – заземлитель; 2 – засыпка; 3 – соединительный провод; 4 – очаги разрушения заземлителя; 5 – частицы засыпки; 6 – грунтовой электролит

Для влажных и маловлажных грунтов интенсивность разрушения стальных электродов в коксовой засыпке определяется электрохимическим эквивалентом для стали в коксе, который в 1.5–2.0 раза ниже, чем для стали в грунте в зависимости от плотности анодного тока.

Для обеспечения одинаковой плотности тока и равномерного износа по всей поверхности анодного заземлителя необходимо создать равномерную толщину и степень утрамбовки засыпки. Ручным способом в траншее этого достичь практически не удастся.

При комбинированном заземлении, состоящем из вертикальных и соединенных с ними горизонтальных заземлителей, удастся обычно получить наименьшее сопротивление растеканию тока при наименьших размерах площади. Комбинированное заземление обычно выполняется из вертикальных заземлителей, забитых в ряд или по контуру, соединяемых по верху одной или несколькими горизонталями. При этом стремятся расположить вертикальные заземлители на достаточном расстоянии друг от друга, чтобы снизить до минимума экранирование, то есть взаимное влияние, что увеличивает сопротивление растеканию.

2.2. Влияние глубины заложения на сопротивление растеканию тока вертикальных заземлителей

С увеличением длины вертикального заземлителя он начинает работать во все более стабильных условиях влажности, вследствие чего понижается его переходное сопротивление и на единицу длины. Для вертикального заземлителя очень важно, чтобы значительная его часть работала в условиях постоянной влажности, что обычно наблюдается на глубине 2–3 метров. На этой глубине влажность грунтов относительно стабильна в течение всего года и, кроме того, на эту глубину не распространяется в обычных условиях промерзание. Как показывают эксперименты по измерению переходного сопротивления трубчатого вертикального заземлителя, в зависимости от глубины заложения наиболее целесообразной можно принять глубину заложения 3–4 метра.

2.3. Влияние «подсаливания» грунта на переходное сопротивление заземлителя

Для заземления стремятся найти вблизи трассы защищаемого сооружения площадки с наименьшим удельным сопротивлением (не выше 10 Ом·м). Но поскольку грунты с таким сопротивлением не всегда удается найти, то часто искусственно снижают сопротивление грунта. Наиболее распространенным способом искусственного снижения сопротивления заземлителя является "подсаливание", которое, кроме того, понижает температуру замерзания окружающей влаги. Обычные способы "подсаливания" заключаются в следующем.

При первом способе вырывают шурф глубиной, равной одной третьей длины заземлителя и диаметром 500 мм. В дно шурфа на требуемую глубину забивают заземлитель, а вокруг него насыпают попеременно слой соли и грунта (1–2 см). Каждый слой поливают водой из расчета 1–2 литра на 1 кг поваренной соли. При втором способе "подсаливания" в заземлителе-трубе сверлят отверстия диаметром 10 мм, располагаемые в шахматном порядке по 6 отверстий на каждые 20 см длины заземлителя. После забивки заземлителя на нужную глубину внутрь трубы заливают раствор поваренной соли, составленной из расчета 1 кг соли на 1–2 литра воды. Раствор просачивается через отверстия в грунт и, "подсаливая" его, снижает сопротивление растеканию тока с заземлителя.

Можно считать, что при "подсаливании" таким способом супесей сопротивление заземлителя снижается в 1.5 раза, супесей – в 2 раза и песков – в 2.5 раза.

2.4. Глубинные анодные заземления

В настоящее время наряду с анодными заземлениями поверхностного типа получили широкое применение глубинные анодные заземления, применение которых во многих случаях позволяет свести до минимума взаимное влияние защищенного от коррозии сооружения на незащищенное. Проблема взаимного влияния возникает в густонаселенных городских районах с большим подземным хозяйством, на территориях перекачивающих станций и нефтебаз, где осуществление катодной защиты с этой точки зрения представляет большие трудности. Конструкции глубинных анодных зазем-

лителей и их расчет подробно рассмотрены в первом томе монографии [9]. В настоящей книге рассматривается лишь расчет поверхностных анодных заземлителей.

2.5. Расчет анодного заземления

Сопротивление растекания комбинированного анодного заземления определяют по формуле

$$R_a = \frac{R_g R_z}{R_g + R_z},$$

где R_a – общее сопротивление растекания вертикальных электродов с учетом экранирования, Ом;

R_z – то же для горизонтальной шины, Ом;

$$R_g = \frac{R'_g}{n\eta_g},$$

где R'_g – сопротивление растекания одиночного вертикального электрода, Ом;

n – количество вертикальных электродов;

η_g – коэффициент экранирования вертикальных электродов (выбирается по таблицам в зависимости от числа электродов и отношения расстояния между электродами к их длине);

$$R_z = \frac{R'_z}{\eta_z},$$

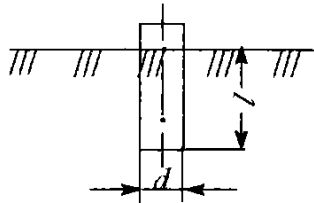
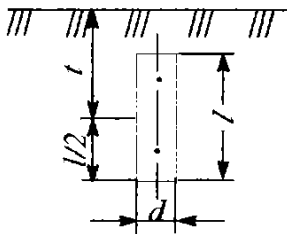
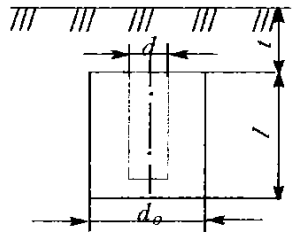
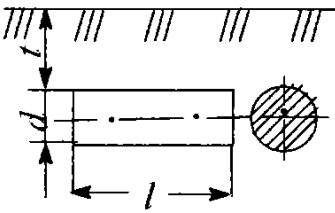
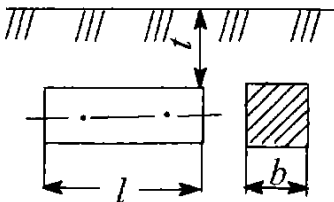
где R'_z – сопротивление растекания горизонтальной шины без учета экранирования, Ом;

η_z – коэффициент экранирования горизонтальной шины (выбирается по таблицам).

Сопротивление растекания одиночных вертикальных электродов и горизонтальных шин определяется по расчетным формулам, представленным в табл. 3.

Таблица 3

Формулы для расчета сопротивления растекания простых (поверхностных) заземлителей

Форма заземляющего электрода	Схема расположения электрода в грунте	Расчетная формула, Ом
1. Одиночный стержень (труба), верхний конец которого находится выше поверхности грунта		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d}$ $l \gg \frac{d}{2}$
2. Одиночный стержень (труба), верхний конец которого находится ниже поверхности грунта		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right)$ $l \gg \frac{d}{2}; t \gg \frac{l}{4}$
3. Одиночный стержень (труба), установленный в активатор		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left[\ln \frac{2l}{d_a} + \frac{1}{2} \ln \frac{4t+3l}{4t+l} + \right.$ $\left. + \frac{\rho_a}{\rho_z} \ln \frac{d_a}{d} \right], l \gg \frac{d}{2}$
4. Горизонтальная труба, уложенная в грунте		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \cdot \ln \frac{l^2}{dt}$ $l \gg d; t \gg \frac{l}{4}$
5. Горизонтальная полоса (шина), уложенная в грунте		$R = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{4l}{b} + \ln \frac{l}{2t} \right)$ $l \gg b; t \gg \frac{l}{4}$

Здесь ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

ρ_a – удельное сопротивление засыпки (активатора), Ом·м

На основании закона Фарадея срок службы стального анодного заземления, установленного в грунт, определяется по формуле

$$T = 0,11 \frac{m}{I}, \quad (29)$$

где m – общий вес рабочих электродов заземления, кг;
 I – ток в цепи СКЗ, А.

Практика эксплуатации установок катодной защиты, а также специальные исследования показали, что срок службы анодных заземлений, установленных непосредственно в грунт, мало зависит от плотности тока, растекающегося с заземления. Однако при плотности тока выше 1.0 ма/см² возможно образование на поверхности электродов слоя продуктов коррозии с высокой величиной сопротивления, что потребует увеличения напряжения, а следовательно, и потребляемой мощности СКЗ.

Для стальных электродов, установленных в коксовую мелочь, такого явления не наблюдается, то есть такие анодные заземлители работают стабильно и не требуют заметного изменения напряжения СКЗ (в пределах плотности тока 0.1–1.4 ма/см²). Кроме того, установлено, что при применении коксовой засыпки анодное разрушение заземлителей заметно снижается. Коэффициент снижения разрушения анодов изменяется от 1.5 до 2.

Для анодного заземлителя, смонтированного из стальных электродов и установленного с применением коксовой засыпки, срок службы можно определить по формуле:

$$T = 0,11 \frac{m \cdot K_p}{I},$$

где K_p – коэффициент снижения разрушения анодов. Находится в пределах от 1.5 до 2.

2.6. Конструкция поверхностного анодного заземления

Поверхностное анодное заземление сооружается из отдельных

заземлителей в трех основных положениях: горизонтальном, вертикальном и комбинированном.

Горизонтальное заземление выполняется из одной или нескольких труб, рельс, полос, закладываемых на некоторую глубину в грунт в горизонтальном положении.

Достоинством горизонтального заземления являются:

- легкая доступность всех частей заземления для осмотра;
- сравнительно одинаковые условия работы для всех частей заземления;
- сравнительная простота выполнения необходимых земляных работ.

Вертикальное заземление выполняется в виде одного или нескольких вертикальных заземлителей, расположенных в ряд на определенных интервалах.

Достоинствами вертикальных заземлителей являются:

- меньшая зависимость сопротивления от атмосферных осадков;

- заметно меньшие размеры площадки под заземление.

К недостаткам вертикального заземления относятся:

- большие трудности выполнения заземления ввиду необходимости забивки труб на глубину нескольких метров;
- выход из строя всего заземления в случае разрушения верхней его части.

2.7. Определение массы анодного заземления

Выбрав конструкцию анодного заземлителя и материал, необходимо рассчитать его массу (по закону Фарадея):

$$m = KIT = \frac{A}{nF} IT, \quad (30)$$

где m – масса выделившегося или растворившегося вещества;

K – электрохимический эквивалент данного металла или другого вещества, выражаемый в миллиграммах, деленных на кулон; граммах, деленных на ампер-час; килограммах на ампер-год, в зависимости от принятых величин единиц силы тока и времени;

I – ток; T – продолжительность электролиза; A – атомный вес; n – валентность; F – константа Фарадея.

В табл. 4 приведены электрохимические эквиваленты для важнейших металлов.

С помощью закона Фарадея можно рассчитать длительность процесса электроосаждения заданного металла или, наоборот, количества вещества, растворившегося на аноде за определенный промежуток времени.

Таблица 4

Электрохимические эквиваленты важнейших металлов и газов

Элемент	Валентность	Атомная масса	Электрохимический эквивалент	
			мг/к	г/а·ч
Алюминий	3	26.97	0.0932	0.3356
Водород	1	1.008	0.0104	0.0376
Железо	2	55.85	0.2824	1.0424
То же	3	55.85	0.1929	0.6949
Кислород	2	16.00	0.0829	0.2986
Магний	2	24.32	0.1260	0.4539
Медь	1	63.57	0.6588	2.3729
То же	2	63.57	0.3294	1.1864
Никель	2	58.69	0.3041	1.0954
Свинец	2	207.21	1.0376	3.8673
Серебро	1	107.88	1.1179	4.0269
Хлор	1	35.46	0.3675	1.3236
Цинк	2	65.38	0.3388	1.2202
Натрий	1	23.00	0.2383	0.8585

Ниже приводятся примеры расчета потери массы анодного заземлителя и количества выделяющихся газов.

Пример 2. Определим, на сколько уменьшится масса анодного заземления при пропускании через него тока силой 1 А в течение года?

Расчет:

Растворение железа на аноде происходит с образованием двухвалентных ионов железа ($Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$), поэтому электрохимический эквивалент железа принимаем равным 1.0424 г/А·ч:

$$m_{Fe} = KIT = 1,0424 \cdot 1 \cdot 365 \cdot 24 = 9120 \text{ г.}$$

Пример 3. Определить потерю массы свинцовой оболочки кабеля, проложенного в анодной зоне, образованной ЭЖД на постоянном токе в течение года. Средний ток равен 1 А.

Электрохимический эквивалент свинца принимаем равным 3.867 г/А·ч.

$$m_{pb} = KIT = 3,867 \cdot 1 \cdot 365 \cdot 24 = 33800 \text{ г.}$$

Пример 4. Определить количество выделившегося водорода и его объем при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 0 °С на катоднозащищенном трубопроводе в течение года. Плотность защитного тока равна 1 А/м². Одна грамм-молекула газа занимает объем 0.0224 м³.

$$m_{H_2} = KIT = 0,037 \cdot 365 \cdot 24 = 330 \text{ г/м}^2,$$

$$V_{H_2} = \frac{m_{H_2}}{M} \cdot 22,4 = \frac{330}{2,016} \cdot 0,0224 = 3,67 \text{ м}^3.$$

2.8. Расчет СКЗ на стадии рабочей документации

После разработки проектной документации на стадии "Проект" и ее утверждения разрабатывается вторая стадия проектирования "Рабочая документация". При выполнении несложных проектов их проектирование ведется в одну стадию "Рабочий проект".

В этом случае методика расчета станции катодной защиты учитывает большее количество факторов, что приводит к уточненным расчетам параметров катодной защиты.

Методика расчета станции катодной защиты на стадии "Рабочий проект" или "Рабочая документация" приводится ниже. В этой методике учитывается удельное сопротивление грунта по трассе трубопровода и расстояние до анодного заземления. Значение *min* и *max* защитных потенциалов взяты по критерию сдвига потенциалов.

Порядок определения удельного сопротивления грунта подробно рассмотрен в первом томе книги [9].

Расчет ведется в следующей последовательности:

1. Определяется сопротивление изоляции на единицу длины.

$$R_{из} = \frac{R_n}{\pi D}, \text{ Ом,} \quad (31)$$

где R_n – переходное сопротивление "трубопровод-грунт".

2. Определяется продольное сопротивление единицы длины трубопровода по формуле (или по приложению 5):

$$R_T = \frac{\rho_m}{\pi(D - \delta)\delta}, \text{ Ом}, \quad (32)$$

где ρ_m – удельное электрическое сопротивление трубной стали, Ом·мм²/м;

δ – толщина стенки трубопровода, мм.

3. Определяется входное сопротивление трубопровода:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{R_T \cdot R_{\text{из}}}}{2}. \quad (33)$$

4. Определяется постоянная распределения потенциалов и токов вдоль трубопроводов:

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_T}{R_{\text{из}}}}. \quad (34)$$

5. В последующем определяется расстояние до анодного заземления следующим образом.

С увеличением расстояния между анодным заземлением и трубопроводом U увеличивается длина зоны защиты одной катодной станции, а следовательно, уменьшается их число и стоимость катодной защиты. Однако, с удалением анодного заземления от трубопровода при той же разности потенциалов "труба-грунт" в точке дренажа увеличивается потребная сила тока катодной установки, потребляемая ею мощность, сечение проводов линии постоянного тока, число заземлений и стоимость анодного заземления.

Выбор оптимального удаления анодного заземления можно проинтерпретировать из графика, приведенного на рис. 9.

С учетом зарубежного опыта и трудностями, связанными с отводом земельного участка, расстояние его от защищаемого трубопровода не превышает 200–300 м.

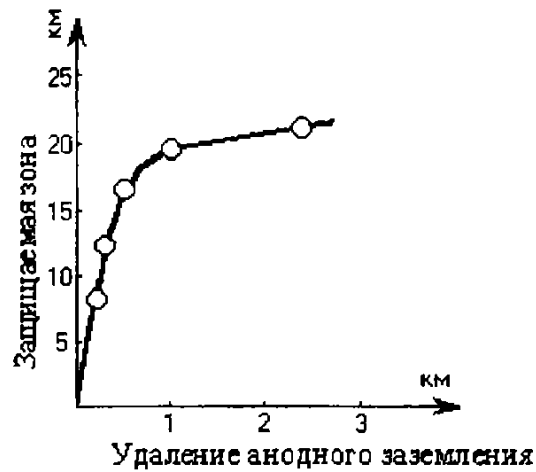


Рис. 9. Удаление анодного заземления

6. Определяется коэффициент, учитывающий влияние смежной СКЗ:

$$K_e = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{\min}}{E_{\max}} \right)^2 \frac{2\pi zy + \rho_r}{2\pi zy}}} \quad (35)$$

7. Определяется протяженность зоны защиты трубопровода одной СКЗ.

$$L = \frac{2}{\alpha} 2,31g \left[\frac{2\pi zy}{K_e \frac{E_{\min}}{E_{\max}} (2\pi zy + \rho_r)} \right] \quad (36)$$

8. Определяется значение силы тока СКЗ:

$$I = \frac{E_{\max}}{z_{ex} \left[1 + 2 \exp^{(-2L)} \right] + \frac{\rho_r}{2\pi y}} \quad (37)$$

9. Выбирают материал и конструкцию анодного заземления. По закону Фарадея определяется масса анодного заземления (m):

$$m = q \cdot K \cdot I \cdot T, \text{ кг}, \quad (38)$$

где $q = (1.1-1.3)$ – коэффициент запаса;

K – электрохимический эквивалент материала анодного заземления, кг/А·год;

T – срок службы анодного заземления.

По таблице (Приложение 6) определяют сопротивление растеканию тока с анодного заземления $R_{\text{аз}}$. Оно должно находиться в пределах 0.5–1.0 Ом. В том случае, когда оно выходит за пределы 1 Ом, необходимо увеличить количество электродов в анодном заземлении.

10. Осуществляется выбор сечения дренажного кабеля катодной установки.

Полезная энергия, идущая на защиту трубопровода, расходует-ся на входном сопротивлении трубопровода. Она составляет в среднем 10–15 % от общего электропотребления на катодную защиту. Другие виды потерь электроэнергии не имеют прямого отношения к защите, однако, без них невозможно ее обеспечить. Так, потери электроэнергии в дренажной линии составляют практически от 10 до 20 % от общего расхода на защиту трубопровода.

При уменьшении сопротивления дренажной линии за счет увеличения сечения кабеля S_x может значительно сократиться расход бесполезно теряемой электроэнергии. Однако при увеличении S_x возрастает стоимость дренажной линии.

Дренажный кабель может быть проложен либо по опорам воздушной линии, либо в траншее. Прокладка кабеля в траншее, как правило, обходится дороже.

Решение технико-экономической задачи для выбора оптимального сечения кабеля не дает хороших результатов из-за нестабильности цен кабельной продукции и электроэнергии.

На основании усредненных цен и многолетнего опыта эксплуатации систем катодной защиты нами проведены расчеты, и результаты по выбору сечений кабеля, в зависимости от тока катодной установки, приведены в табл. 5.

Таблица 5

Определение сечения дренажного провода или кабеля

S сечения, мм ²	2	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120	150
I, А	1	2	3	5	8	12.5	17.5	25	35	47.5	60	75

Определяется сопротивление дренажного кабеля.

$$R_K = \rho \frac{l}{S} \text{ Ом},$$

где ρ – удельное сопротивление материала кабеля Ом·мм²/м;
 l – длина кабеля, м.

Определяется мощность катодной установки:

$$P = qUI = qI^2 (Z_{\text{вх}} + R_{\text{аз}} + R_K), \text{ Вт},$$

где $q = 1.5$ – коэффициент запаса.

Ниже приводятся примеры расчета катодной защиты трубопровода на стадии "Рабочая документация".

Пример 5. Определить параметры катодной защиты магистрального нефтепровода $D = 720$ мм с толщиной стенки $\delta = 9$ мм, протяженностью 100 км. Нефтепровод прокладывается по местности со средним удельным сопротивлением 20 Ом·м. Переходное сопротивление "трубопровод-грунт" равно 5970 Ом·м².

Анодные заземлители катодных установок проектируются в виде горизонтальных заземлителей из чугунных труб длиной 3 м и диаметром 150 мм, массой 105 кг.

Дренажную линию выполнить кабелем ААШ_в. Электрохимический эквивалент чугуна – 5 кг/А год.

Решение:

1. Определяется сопротивление изоляции на единицу длины

$$R_{\text{из}} = \frac{R_n}{\pi D} = \frac{5970}{3,14 \cdot 0,72} = 2640 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

2. Определяется продольное сопротивление единицы длины трубопровода (по таблице Приложения 5):

$$R_T = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м.}$$

3. Определяется входное сопротивление трубопровода:

$$Z_{\text{вх}} = \frac{\sqrt{R_T \cdot R_{\text{из}}}}{2} = \frac{\sqrt{12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 2640}}{2} = 0,09 \text{ Ом.}$$

4. Определяется постоянная распределения потенциалов и токов вдоль трубопровода:

$$\alpha = \sqrt{\frac{R_T}{R_{\text{из}}}} = \sqrt{\frac{12,2 \cdot 10^{-6}}{2640}} = 0,68 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м.}$$

5. Принимается величина удаления анодного заземления – Y от магистрального трубопровода равной 300 м.

6. Коэффициент, учитывающий влияние смежной СКЗ:

$$K_s = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{\min}}{E_{\max}}\right)^2 \frac{2\pi ZY + \rho_r}{2\pi ZY}}} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{0,3}{0,6}\right)^2 \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 300 + 20}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 300}}} = 0,54.$$

7. Протяженность зоны защиты трубопровода одной СКЗ

$$L = \frac{2}{\alpha} 2,3 \lg \left[\frac{2\pi ZY}{K_s \frac{E_{\min}}{E_{\max}} (2\pi ZY + \rho_r)} \right] = \frac{2 \cdot 10^4}{0,68} 2,3 \lg \left[\frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 300}{0,54 \cdot \frac{0,3}{0,6} (2 \cdot 3,14 \cdot 0,09 \cdot 300 + 20)} \right] = 35400.$$

8. Значение силы тока СКЗ

$$I = \frac{E_{\max}}{Z \left[1 + 2e^{(-\alpha L)} \right] + \frac{\rho_r}{2\pi Y}} = \frac{0,6}{0,09 \left[1 + 2e^{(-0,68 \cdot 10^{-4} \cdot 35400)} + \frac{20}{2\pi \cdot 300} \right]} = 2,82 \text{ А.}$$

9. Анодное заземление выполняется из чугунных труб длиной 3 м и устанавливается горизонтально. По закону Фарадея определяется масса анодного заземлителя:

$$m = qKIT = 1,3 \cdot 5 \cdot 2,82 \cdot 15 = 275.$$

Количество электродов $n = \frac{m}{m_1} = \frac{275}{105} = 2,6 \text{ шт.}$

Принимается $n = 3$.

По таблице Приложения 6 $R_{аз} = 2,18 \text{ Ом.}$

Поскольку $R_{аз}$ больше одного Ома, то увеличивается количество электродов до 9 штук. По таблице приложения 6 $R_{аз} = 0,98 \text{ Ом.}$

10. Определяется сопротивление дренажного кабеля. По полученному току в соответствии с табл. 5 выбираем $S = 6 \text{ мм}^2$. Исходя из условий механической прочности при строительстве к установке, принимается кабель ААШ_в 3 × 6 (приложение 7):

$$R = \rho \frac{l}{S} = 0,029 \frac{300}{16} = 0,6 \text{ Ом.}$$

Мощность катодной установки:

$$P = qI^2(Z_{ак} + R_{аз} + R_K) = 1,5 \cdot 2,82^2(0,09 + 0,98 + 0,6) = 20 \text{ Вт.}$$

По приложению 8 к установке принимается катодная станция типа КСЭР-02-03.

3. МЕТОДЫ УВЕЛИЧЕНИЯ ЗОНЫ ЗАЩИТЫ КАТОДНЫХ УСТАНОВОК

В условиях, когда электроснабжение установок катодной защиты трубопровода затруднено, необходимо использовать все возможности для увеличения зоны защиты СКЗ. Это можно достичь, повышая наложенную разность потенциалов в точке дренажа. Однако максимальная величина наложенной разности потенциалов регламентирована. Поэтому в практике катодной защиты нашли применение катодные установки с противопотенциалом и с экранными заземлениями [3, 11]. Целесообразность их использования в каждом конкретном случае обосновывается технико-экономическим расчетом.

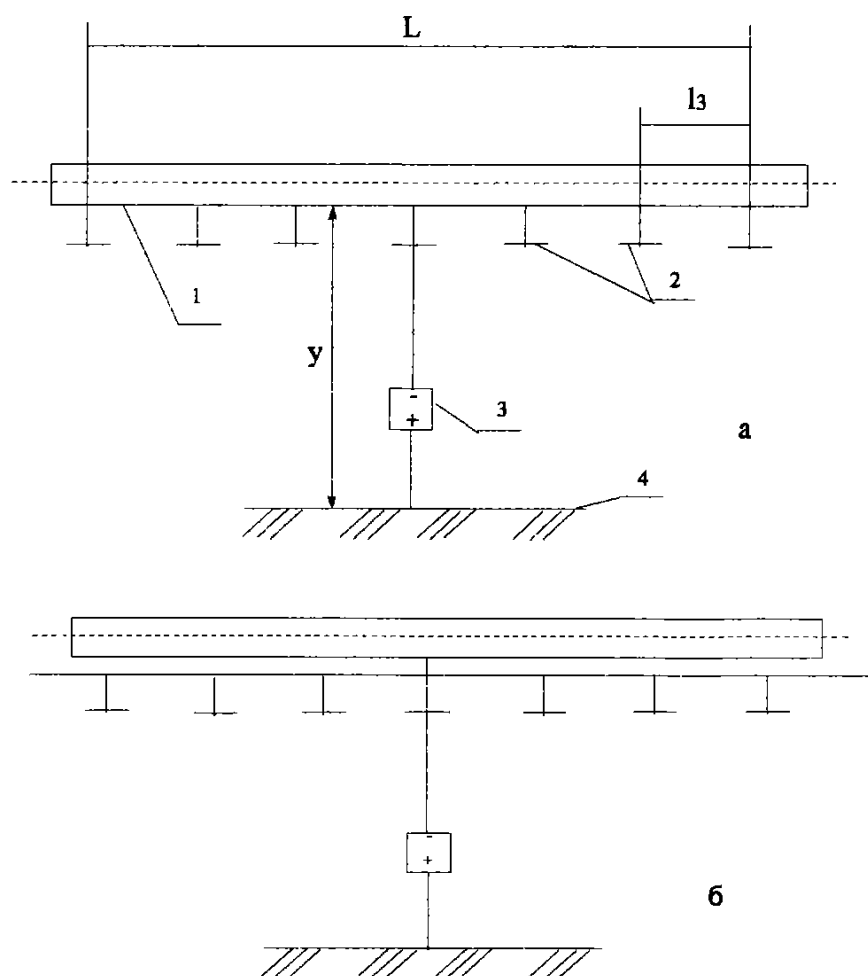


Рис. 10. Схема катодной защиты с экранными заземлителями
а – экраны подключены к трубопроводу; *б* – экраны подключены к минусу и катодной станции. 1 – трубопровод; 2 – экранные заземления; 3 – катодная станция; 4 – анодное заземление

3.1. Катодные установки с экранными заземлениями

Экранные заземления подключаются либо непосредственно к минусу катодной станции, либо к трубопроводу (рис. 10).

При подключении экранных заземлений в районе участка, где имеется превышение наложенной разности потенциалов сверх допустимой, поступление тока анодного заземления в трубопровод ограничивается, и тем самым снижается потенциал на этом участке.

Экранные заземления можно располагать по обе стороны от трубопровода, а выполнять их рекомендуется в виде горизонтальных электродов.

Наложённая разность потенциалов в точке дренажа $E'_{\max}$, необходимая для обеспечения защиты повышенной протяжённости l , определяется по формуле

$$E'_{\max} = \frac{0,5E_{\min} e^{a''}}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1-k}{\theta}} \cdot \left[\frac{2y}{l'} e^{\frac{a''}{2}} - \frac{k}{\theta} - 1 \right]}, \quad (39)$$

где k – коэффициент, равный отношению суммарного тока экранов I_{Σ} к току катодной установки $I_{\text{оп}}$ (ориентировочно $k = 0.05 \div 0.2$),

$$\theta = \frac{\rho_2}{2\pi ZY}.$$

Для определения длины участка, на котором необходимо устанавливать экранные заземления, пользуются формулой

$$L_{\Sigma} = \frac{2}{\alpha} \ln \left[\frac{1-2k}{\frac{E_{\max}}{E'_{\max}} (1-k+\theta) - \frac{2\rho_2 y}{\sqrt{L_{\Sigma}^2 + 4y^2}}} \right]. \quad (40)$$

Расстановку экранных заземлений рекомендуется выполнять в соответствии с рекомендациями табл. 6.

Таблица 6

Рекомендуемые расстояния между экранами $\Delta l_{\text{э}}$ и $y_{\text{э}}$
между экранами и трубопроводом

D , мм	377	529	720	820	1020	1220	1420
$\Delta l_{\text{э}}$, м	16	21	28	32	40	46	55
$y_{\text{э}}$, м	4,5	6	8	9	11	13	15

Необходимое число экранных заземлений

$$n_{\text{э}} = 1 + \frac{L_{\text{э}}}{\Delta l_{\text{э}}} \quad (41)$$

Эффективность работы катодных установок с экранными заземлениями существенно зависит от сопротивления растеканию с экранных заземлений. При чрезмерном увеличении сопротивления цепи экрана не достигается нужного снижения разности потенциалов "труба-грунт", чрезмерное уменьшение сопротивления приводит к повышенному расходу электроэнергии, а иногда и к уменьшению длины защитной зоны.

Необходимая величина сопротивления цепи "экран-трубопровод" определяется по формуле

$$R_{\text{цэ}} = \frac{\rho_z}{2\pi L_{\text{э}} (E'_{\text{max}} - E_{\text{max}} - kzI_{\text{оп}})} \left[\frac{L_{\text{э}} E'_{\text{max}}}{y_{\text{э}}} + \frac{2L_{\text{э}} (E'_{\text{max}} - E_{\text{max}})}{\Delta l_{\text{э}}} \cdot \left(0,557 + \ln \frac{n_{\text{э}} - 1}{2} + \frac{1}{n_{\text{э}} - 1} \right) - 2(n_{\text{э}} - 1)(E'_{\text{max}} - E_{\text{max}}) \right] \quad (42)$$

Зная величину $R_{\text{цэ}}$, проектируют обеспечивающую его конструкцию экранного заземления с учетом сопротивления одиночного электрода, его размеров и эффекта экранирования.

Сила тока катодной установки с экранными заземлениями определяется по формуле

$$I_{\text{оп}} = \frac{E'_{\text{max}}}{z(1 - k + \theta)} \quad (43)$$

Суммарная сила тока экранных заземлений определяется по выражению

$$I_{\text{э}} = \frac{1}{R_{\text{цэ}}} \left[E_{\text{max}} (n_{\text{э}} - 1) + n_{\text{э}} E'_{\text{max}} - \frac{\Delta l_{\text{э}} (E'_{\text{max}} - E_{\text{max}}) (n_{\text{э}}^2 - 1)}{2L_{\text{э}}} \right] \quad (44)$$

Зная величины, $I_{\text{оп}}$ и $I_{\text{э}}$, уточняют значение коэффициента $k = \frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{оп}}}$.

Если расхождение ранее принятого и расчетного значений превышает 20 %, то расчет параметров катодной установки с экранными заземлениями необходимо повторить, задав вторую величину коэффициента k .

Ниже приводится пример расчета катодной защиты с экраным заземлением.

Пример 6. При работе СКЗ, обслуживающей трубопровод $D = 377$ с входным сопротивлением $z = 0.08$ Ом и постоянной распределения $a = 1.86 \times 10^{-4}$ 1/м, обеспечивается зона защиты длиной 12.1 км. По местным условиям необходимо обеспечить защиту участка трубопровода длиной $l' = 15$ км. Определить параметры катодной установки с экраными заземлениями, если $\rho_z = 20$ Ом·м, $y = 500$ м, $E_{\text{max}} = 0.55$ В, $E_{\text{min}} = 0.3$ В.

Решение:

1. Определяется величина θ :

$$\theta = \frac{\rho_z}{2\pi ZY} = \frac{20}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.08 \cdot 500} = 0.08.$$

2. Полагая $K = 0.25$, по формуле (39) находят

$$E'_{\text{max}} = \frac{0.5 \cdot 0.3 \cdot \exp\left(\frac{1.86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}\right)}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1 - 0.25}{0.08} \left[\frac{2 \cdot 500}{15 \cdot 10^3} \cdot \exp\left(\frac{1.86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}\right) - \frac{0.25}{0.08} - 1 \right]}} = 0.96 \text{ В.}$$

3. Сила тока катодной установки по формуле (43)

$$I_{\partial p} = \frac{0,96}{0,08(1 - 0,25 + 0,08)} = 14,46 \text{ A}.$$

4. По табл. 6 находят удаление экрана от трубопровода и расстояние между экранными заземлениями

$$Y_3 = 4,5 \text{ м}; D l_3 = 16 \text{ м}.$$

5. Протяженность участка трубопровода, на котором необходимо установить экранные заземления, определяется из уравнения (40) методом последовательных приближений.

Принимается $L_3 = 1600$ м и по формуле (40):

$$L_3 = \frac{2}{1,86 \cdot 10^{-4}} \ln \frac{1 - 2 \cdot 0,25}{\frac{0,55}{0,96} (1 - 0,25 + 0,08) - \frac{2 \cdot 20 \cdot 500}{\sqrt{1600^2 + 4 \cdot 500^2}}} = 1480 \text{ м}.$$

Принимается $L_3 = 1500$ м. Тогда

$$L_3 = \frac{2}{1,86 \cdot 10^{-4}} \ln \frac{1 - 2 \cdot 0,25}{\frac{0,55}{0,96} (1 - 0,25 + 0,08) - \frac{2 \cdot 20 \cdot 500}{\sqrt{1500^2 + 4 \cdot 500^2}}} = 1560 \text{ м}.$$

Поскольку расчетная величина L_3 практически равна заданной, в дальнейшем будем считать $L_3 = 1560$ м.

6. Число экранных заземлений по формуле (41)

$$n_3 = 1 + \frac{1560}{16} = 97.$$

7. Необходимая величина сопротивления цепи экранного заземления по формуле (42)

$$R_{цз} = \frac{20}{2 \cdot 3,14 \cdot 1560(0,96 - 0,55 - 0,25 \cdot 0,08 \cdot 14,4)} \left[\frac{1560 \cdot 0,96}{4,5} + \frac{2 \cdot 1560 \cdot 1,51}{16} \cdot \left(0,557 + \ln \frac{97-1}{2} + \frac{1}{97-1} \right) - 2(97-1)(0,96 - 0,55) \right] = 29,3 \text{ Ом}.$$

8. Суммарная сила тока экранных заземлителей по формуле (44)

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{29,3} \left[0,55(97-1) + 97 \cdot 0,96 - \frac{16(0,96 - 0,55)(97^2 - 1)}{2 \cdot 1560} \right] = 4,25 \text{ А}.$$

9. Расчетная величина коэффициента K составляет

$$K = \frac{4,25}{14,4} = 0,295.$$

10. Расхождение расчетной и принятой в расчете величины составляет

$$\frac{0,295 - 0,25}{0,25} 100 = 18\% < 20\%,$$

поэтому повторный расчет производить не следует. Остальные параметры установки определяются как и для обычной СКЗ.

3.2. Катодные установки с противопотенциалом

В отличие от обычной СКЗ катодная установка с противопотенциалом содержит дополнительные катодные заземления с автономным источником постоянного тока (рис. 11).

Эффект применения катодных заземлений такой же, как и экранных заземлений. Их устанавливают в районе точки дренажа на расстоянии 20...40 м от трубопровода с любой стороны. При этом минус дополнительного источника подключается к катодному заземлению, плюс к трубопроводу.

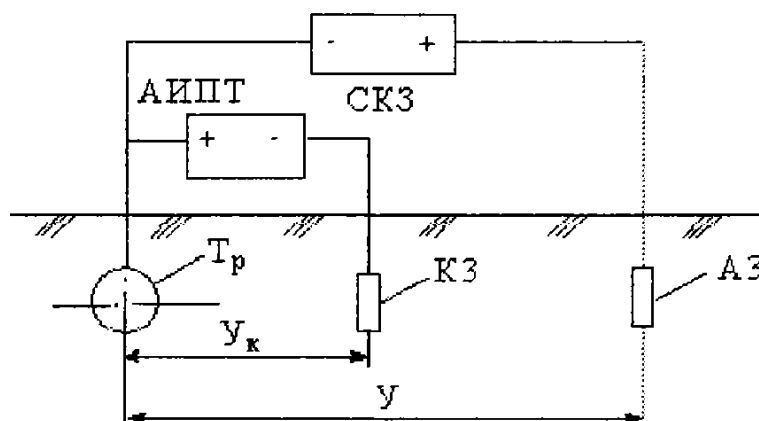


Рис. 11. Схема катодной установки с противопотенциалом

Тр – трубопровод; *КЗ* – катодное заземление; *АЗ* – анодное заземление; *АИПТ* – автономный источник постоянного тока; *СКЗ* – станция катодной защиты; Y_k – удаление катодного заземления от трубопровода; Y – удаление катодного заземления от анодного

Распределение наложенной разности потенциалов вдоль трубопровода при работе СКЗ с противопотенциалом описывается выражением

$$E(x) = a \cdot e^{-ax} + \frac{b}{\sqrt{x^2 + y^2}} - \frac{c}{\sqrt{x^2 + y_k^2}}, \quad (45)$$

a, b, c – коэффициенты, равные

$$\begin{aligned} a &= E_{\max_a} \left(\frac{1}{\theta_a} - \frac{1}{\theta_k} \right) + \frac{E_{\min}}{\theta}; \\ b &= y E_{\max_a} \cdot \frac{\theta}{\theta_a}; \\ c &= y \frac{\theta}{\theta_k} (E_{\max_a} - E_{\min}). \end{aligned} \quad (46)$$

$E_{\max_a}$ – величина наложенной разности потенциалов в точке дренажа, при которой обеспечивается защита участка трубопровода длиной l' .

$$E_{\max_a} = E_{\min} \frac{\theta_k e^{al'} - 1}{\frac{\theta_k}{\theta_a \cdot k_3} - 1}, \quad (47)$$

где θ_a, θ_k – коэффициенты, равные

$$\begin{aligned}\theta_a &= 1 + \theta, \\ \theta_k &= 1 + \frac{y}{y_k} \theta.\end{aligned}\tag{48}$$

Кривая распределения суммарной разницы наложенных потенциалов «трубопровод-грунт» вдоль трубопровода имеет явно выраженный максимум вблизи точки дренажа. Этот максимум не должен превышать значение $E_{\max}$, регламентируемое ГОСТ Р 51164-98. Выполнение условия $E(x) \leq E_{\max}$ добиваются варьированием величины y_k .

Расстояние X от точки дренажа до сечения, в котором суммарная наложенная разность потенциалов достигает максимума, определяется методом последовательных приближений из уравнения $\alpha = f(x)$,

$$\text{где } f(x) = \frac{1}{x} \ln \frac{\alpha \cdot a}{x \left[c(x^2 + y^2)^{-1,5} - e(x^2 + y^2)^{-1,5} \right]}.\tag{49}$$

Сила тока катодной установки вычисляется по зависимости

$$I_{\partial p_a} = \frac{E_{\max} a}{z(1 + \theta)}.\tag{50}$$

Напряжение на контактах СКЗ

$$\Delta E_a = I_{\partial p_a} (R_{np} + R_a) + |E_{\max_a} - E_a(l')|,\tag{51}$$

где $E_a(l')$ – наложенная разность потенциалов на расстоянии l' , от точки дренажа, где поддерживается потенциал $E_{\max_a}$, в случае, когда противопотенциал не создается.

Противопотенциал, создаваемый в точке дренажа автономным источником постоянного тока, вычисляют по формуле

$$E_{\min_k} = \frac{E_{\max_2} - E_{\min}}{\theta_k} \cdot e^{-\frac{\alpha l'}{2}}. \quad (52)$$

Сила тока автономного источника

$$I_{\partial p_k} = \frac{E_{\max_a} - E_{\min}}{z(1 + \theta_l)}. \quad (53)$$

Напряжение на его контактах

$$\Delta E_k = I_{\partial p_k} (R_{np_k} + R_k) + |E_{\min_k} - E_k(l')|, \quad (54)$$

где R_{np_k}, R_k – сопротивление, соответственно, проводов катодной установки и растеканию тока с катодного заземления;

$E_k(l')$ – наложенная разность потенциалов, которую создавал бы автономный источник постоянного тока на расстоянии l' , если бы был включен только он.

Зная величины $I_{\partial p_a}, I_{\partial p_k}, \Delta E_a, \Delta E_k$, можно вычислить мощность, необходимую для питания СКЗ и автономного источника постоянного тока по формуле. Ниже приводится пример расчета катодной защиты с противопотенциалом.

Пример 7. Для условий примера 6 определить параметры катодной установки с противопотенциалом.

Решение:

1. Принимается $y_k = 25$ м.

2. Определяют коэффициенты θ_a и θ_k по формуле (48):

$$\theta_a = 1 + 0,08 = 1,08;$$

$$\theta_k = 1 + \frac{500}{25} 0,08 = 2,6.$$

3. Коэффициент, учитывающий влияние смежной СКЗ по формуле:

$$K_s = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{E_{\min}}{E_{\max}} \right) (1 + \theta)}} = \frac{1}{1 + \sqrt{1 - \left(\frac{0,3}{0,55} \right)^2 (1 + 0,08)}} = 0,55.$$

4. Наложенная разность потенциалов в точке дренажа для защиты участка трубопровода длиной 15 км по формуле (47):

$$E_{\max_a} = 0,3 \frac{2,6 e^{\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}} - 1}{\frac{2,6}{1,08 \cdot 0,55} - 1} = 0,84B.$$

5. Наложенная разность потенциалов автономного источника питания в точке дренажа по формуле (52):

$$E_{\min_k} = \frac{0,84 - 0,3}{2,6} \cdot e^{\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}} = 0,051B.$$

6. Коэффициенты, входящие в уравнение (45) по формуле (46):

$$\alpha = 0,84 \left(\frac{1}{1,08} - \frac{1}{2,6} \right) + \frac{0,3}{2,6} = 0,57;$$

$$\sigma = 500 \cdot 0,84 \cdot \frac{0,08}{1,08} = 31,11;$$

$$c = 500 \frac{0,08}{2,6} (0,84 - 0,3) = 8,31.$$

7. Задавая $X = 200$ м, вычисляется величина правой части уравнения (49):

$$f(x) = \frac{1}{200} \ln \frac{0,57 \cdot 1,86 \cdot 10^{-4}}{200 \left[8,31(200^2 + 2,5^2)^{-1,5} - 31,11(200^2 + 500^2)^{-1,5} \right]} = 2,2 \cdot 10^{-3}.$$

Данный расчет повторяется еще для нескольких величин X . Результаты расчетов сведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты расчетов

Х, м	200	210	220	230	240
Правая часть	$-2,2 \cdot 10^{-3}$	$-1,4 \cdot 10^{-3}$	$-0,8 \cdot 10^{-3}$	$-0,2 \cdot 10^{-3}$	$0,2 \cdot 10^{-3}$

По результатам расчетов строится график зависимости $f(x)$ от X и определяется абсцисса точки пересечения этой кривой с прямой $f(x) = \alpha = 1,86 \cdot 10^{-4}$.

Ей соответствует сечение $X = 237,5$ от точки дренажа.

8. Максимальная величина суммарной наложенной разности потенциалов "трубопровод-грунт" при $X = 237,5$ м по формуле (45) составит

$$E(x)_{x=237,5} = 0,57 \cdot e^{-1,86 \cdot 10^{-4}} + \frac{31,11}{\sqrt{500^2 + 237,5^2}} - \frac{8,31c}{\sqrt{25^2 + 237,5^2}} = 0,57 В.$$

Вычисленное значение несколько превосходит максимально допустимое значение $E_{max} = 0,55 В$. Поэтому удаление катодного заземления необходимо увеличить.

Принимается $y_k = 30$ м, и расчет производится вновь.

$$1. \theta_a = 1 + 0,08 = 1,08;$$

$$2. \theta_k = 1 + \frac{500}{30} 0,08 = 2,33;$$

$$3. K_g = 0,55 ;$$

$$4. E_{\max_g} = 0,3 \frac{2,33 \cdot e^{\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}} - 1}{2,33 - \frac{1}{1,08 \cdot 0,55}} = 0,86B ;$$

$$5. E_{\min_k} = \frac{0,86 - 0,3}{2,33} e^{\frac{1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 15 \cdot 10^3}{2}} = 0,06B ;$$

$$6. a = 0,86 \left(\frac{1}{1,08} + \frac{1}{2,33} \right) + \frac{0,3}{2,33} = 0,56 ;$$

$$b = 500 \cdot 0,86 \cdot \frac{0,08}{1,08} = 31,85 ;$$

$$c = 500 \frac{0,08}{2,33} (0,86 - 0,3) = 9,61 .$$

7. Результаты расчетов сведены в табл. 8.

Таблица 8

Результаты расчетов

X, м	200	210	220	230	240	250	260
F(x)	$-3,05 \cdot 10^{-3}$	$-2,3 \cdot 10^{-3}$	$-1,66 \cdot 10^{-3}$	$-1,07 \cdot 10^{-3}$	$-0,53 \cdot 10^{-3}$	$-0,03 \cdot 10^{-3}$	$0,43 \cdot 10^{-3}$

По результатам расчетов строится график зависимости $f(x)$ от X и определяется абсцисса точки пересечения этой кривой с прямой $f(x) = \alpha = 1.86104$ (рис. 12) Ей соответствует сечение $X = 251.5$.

$$8. E(x)_{x=251,5} = 0,56 \cdot e^{-1,86 \cdot 10^{-4} \cdot 251,5} + \frac{31,85}{\sqrt{500^2 + 251,5^2}} - \frac{9,61}{\sqrt{30^2 + 251,5^2}} = 0,553B ;$$

9. Сила тока СКЗ

$$I_{op_a} = \frac{0,86}{0,08(1 + 0,08)} = 9,96A ;$$

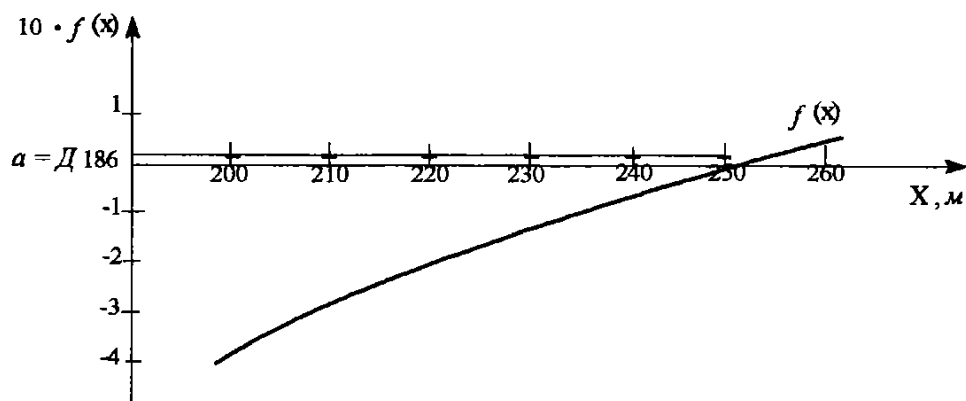


Рис. 12.

10. Сила тока автономного источника для создания противопотенциала

$$I = \frac{0,86 - 0,3}{0,08 \cdot (1 + 2,33)} = 3,01 \text{ A.}$$

3.3. Совместная катодная защита подземных металлических сооружений

3.3.1. Параллельно уложенные трубопроводы

В случае параллельной укладки нескольких трубопроводов на небольшом расстоянии друг от друга целесообразно осуществлять их совместную защиту, т. е. защиту всех параллельно уложенных трубопроводов на данном участке одной СКЗ.

При совместной защите уложенных трубопроводов их условно заменяют одним трубопроводом с эквивалентными параметрами, что позволяет выполнять все расчеты по вышеприведенным формулам.

Эквивалентные параметры вычисляются по следующим зависимостям

$$R_{мэ} = \frac{\prod_{i=1}^2 R_{mi}}{\sum_{i=1}^2 R_{mi}}, \quad (55)$$

где $R_{mэ}$ – продольное сопротивление.

$$R_{uэ} = \frac{\prod_{i=1}^2 R_{uэi} - R_{B_{1-2}}^2}{\sum R_{uэi} - 2R_{B_{1-2}}}, \quad (56)$$

где $R_{uэ}$ – сопротивление изоляционного покрытия на единицу длины трубопровода

$$\alpha_э = \sqrt{\frac{R_{mэ}}{R_{uэ}}},$$

где $\alpha_э$ – постоянная распределения тока и потенциала;

R_{mi} , $R_{uэi}$ – продольное сопротивление и сопротивление изоляционного покрытия i -трубопровода

$$R_{Bi} = \frac{\rho_r}{\pi} \ln \frac{1}{B \sqrt{\prod_{i=1}^2 \alpha_i}}, \quad (58)$$

где R_{Bi} – взаимное сопротивление между двумя рассматриваемыми трубопроводами:

α_i – постоянная распределения i -трубопровода;

B – расстояние между трубопроводами.

Если число параллельно уложенных трубопроводов больше двух, то расчет эквивалентных параметров необходимо выполнять по формулам (55)–(56), заменив сначала два трубопровода одним, а затем эквивалентный и третий трубопровод снова заменив эквивалентным и т. д.

Для уравнивания длины защитных зон на трубопроводах, объединенных совместной катодной защитой, кроме перемычки, устанавливаемой в точке дренажа, оборудуют дополнительные перемычки на границах общей защитной зоны.

Сечение перемычек выбирают из условия, что падение напряжения на каждой из них не должно превышать 0.02 В. Однако по

условиям механической прочности площадь сечения перемычек должна быть не менее 25 мм^2 . Ниже приводится пример определения параметров защиты параллельно уложенных трубопроводов.

Пример 8. Рассчитать входное сопротивление и постоянную распределения токов и потенциалов вдоль системы параллельно уложенных трубопроводов, имеющих одинаковое состояние изоляционного покрытия ($R_n = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$) и следующие диаметр D и толщину стенки δ :

1-й трубопровод:	$D_1 = 1020 \text{ м}$	$\delta_1 = 10 \text{ мм}$
2-й трубопровод:	$D_2 = 720 \text{ м}$	$\delta_2 = 9 \text{ мм}$
3-й трубопровод:	$D_3 = 529 \text{ м}$	$\delta_3 = 8 \text{ мм}$

Трубопроводы уложены в грунт со средним удельным электросопротивлением $\rho_r = 20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ на расстоянии $B = 10 \text{ м}$ друг от друга.

Решение

1. По формуле (32) находят продольное сопротивление единицы длины первого трубопровода

$$R_{T1} = \frac{0,245}{3,14 \cdot (1020 - 10) \cdot 10} = 9,63 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}.$$

Аналогично находят $R_{T2} = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$ и $R_{T3} = 18,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}$

2. Эквивалентное продольное сопротивление 1-го и 2-го трубопроводов по формуле (55)

$$R_{TЭ1-2} = \frac{9,63 \cdot 10^{-6} \cdot 12,2 \cdot 10^{-6}}{9,63 \cdot 10^{-6} + 12,2 \cdot 10^{-6}} = 5,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}.$$

3. Эквивалентное продольное сопротивление всех трубопроводов

$$R_{TЭ1-2-3} = \frac{5,3 \cdot 10^{-6} \cdot 18,7 \cdot 10^{-6}}{5,3 \cdot 10^{-6} + 18,7 \cdot 10^{-6}} = 4,13 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м}.$$

4. Сопротивление изоляции на единице длины для каждого трубопровода по формуле (31):

$$R_{из_1} = \frac{1000}{3,14 \cdot 1,02} = 313 \text{ Ом}.$$

Аналогично находят $R_{из_2} = 442 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ и $R_{из_3} = 600 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

5. Постоянная распределения токов и потенциалов для каждого трубопровода по формуле (34):

$$\alpha_1 = \sqrt{\frac{9,63 \cdot 10^{-6}}{313}} = 1,75 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}.$$

Аналогично находят $\alpha_2 = 1,66 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}$ и $\alpha_3 = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}$.

6. Взаимное сопротивление между 1-м и 2-м трубопроводами по формуле (58):

$$R_{B_{1-2}} = \frac{20}{3,14} \ln \frac{1}{10 \sqrt{1,75 \cdot 10^{-4} \cdot 1,66 \cdot 10^{-4}}} = 40 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

7. Эквивалентное сопротивление изоляционного покрытия на единице длины 1-го и 2-го трубопроводов по формуле (56):

$$R_{из_{1-2}} = \frac{313 \cdot 442 - 40^2}{313 + 442 - 2 \cdot 40} = 181 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

8. Постоянная распределения токов и потенциалов трубопровода, эквивалентного 1-му и 2-му трубопроводам, по формуле (57):

$$\alpha_{1-2} = \sqrt{\frac{5,3 \cdot 10^{-6}}{181}} = 1,71 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}.$$

9. Взаимное сопротивление между эквивалентным трубопроводом (заменяющим 1-й и 2-й) и третьим трубопроводом

$$R_{a_{1-2-3}} = \frac{20}{3,14} \cdot \ln \frac{1}{10 \cdot \sqrt{1,71 \cdot 10^{-4} \cdot 1,77 \cdot 10^{-4}}} = 40,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

10. Эквивалентное сопротивление изоляционного покрытия на единице длины всех трубопроводов

$$R_{из_{1-2-3}} = \frac{181 \cdot 600 - 40,1^2}{181 + 600 - 2 \cdot 40,1} = 129 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

11. Постоянная распределения токов и потенциалов (общая для системы трубопроводов)

$$\alpha_{a_{1-2-3}} = \sqrt{\frac{4,13 \cdot 10^{-6}}{129}} = 1,79 \cdot 10^{-4} \text{ 1/м}.$$

12. Входное сопротивление системы нефтепроводов по формуле (33):

$$Z_{a_{1-2-3}} = 0,5 \sqrt{4,13 \cdot 10^{-6} \cdot 129} = 1,15 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$$

3.3.2. Разветвленные коммуникации в жилых районах

В жилых районах прокладывается подземная сеть водоводов и газопроводов. Теплоснабжение осуществляется не только централизованно, но часто от местных водонагревателей. В этом случае для защиты от электрохимической коррозии применяется совместная защита, расчет которой выполняется по нижеприводимой методике [12].

3.3.2.1. Методика расчета совместной катодной защиты существующих и проектируемых газопроводов и водоводов

1. Основным расчетным параметром является средняя плотность защитного тока j_{cp} – отношение силы тока катодной станции I

к суммарной наружной поверхности трубопроводов, защищаемых данной станцией.

2. Если проектируемые трубопроводы будут иметь соединения с действующими сооружениями, оборудованными установками ЭХЗ, необходимо расчетным путем проверить возможность защиты проектируемых трубопроводов действующими установками ЭХЗ.

3. Исходными данными для расчета катодной защиты проектируемых трубопроводов являются их параметры и среднее удельное сопротивление грунта на территории вдоль трасс проектируемых трубопроводов.

4. Площадь поверхности S_r (м^2) всех газопроводов, которые электрически контактируют между собой за счет технологических соединений или специальных перемычек, определяют по формуле:

$$S_r = \pi \sum_{i=1}^n d_{ir} I_{ir} \cdot 10^{-3}, \quad (59)$$

где: d_{ir} – диаметр (мм);

I_{ir} – длина (м) участка газопровода, имеющего диаметр d_{ir} ;

n – общее число соответствующих участков газопровода.

5. Площадь поверхности всех водоводов, которые электрически контактируют между собой за счет технологических соединений или специальных перемычек, определяют по формуле:

$$S_e = \pi \sum_{i=1}^m d_{iB} I_{iB} \cdot 10^{-3}, \quad (60)$$

где: d_{iB} – диаметр (мм);

I_{iB} – длина (м) участка водовода, имеющего диаметр d_{iB} ;

m – общее число соответствующих участков водовода.

Суммарная площадь поверхности S (м^2) всех электрически связанных газопроводов и водоводов равна:

$$S = S_r + S_e. \quad (61)$$

6. Среднее удельное сопротивление грунта ρ (Ом · м) вдоль трасс проектируемых трубопроводов определяется по формуле:

$$\rho = \left(\sum_{i=1}^n \rho_{ir} l_{ir} + \sum_{i=1}^m \rho_{ie} l_{ie} \right) / (L_r + L_e), \quad (62)$$

где ρ_{ir} и ρ_{ie} – среднее удельное сопротивление грунта (Ом · м) вдоль длины соответственно l_{ir} – каждого i -го участка газопровода и l_{ie} – каждого i -го участка водовода;

L_r и L_e – суммарные длины газопроводов и водоводов на данной территории.

7. Вычисляется доля (%) площади поверхности газопроводов a_r и водопроводов a_e в суммарной площади их поверхностей

$$a_r = (S_r / S) \cdot 100; \quad (63)$$

$$a_e = (S_e / S) \cdot 100. \quad (64)$$

8. Вычисляется площадь поверхности ($\text{м}^2/\text{га}$) газопроводов b_r и водоводов b_e , приходящаяся на единицу площади территории $S_{\text{тер}}$ (га), где размещены проектируемые трубопроводы:

$$b_r = (S_r / S_{\text{тер}}), \quad (65)$$

$$b_e = (S_e / S_{\text{тер}}). \quad (66)$$

9. Средняя плотность защитного тока для всех трубопроводов j ($\text{мА}/\text{м}^2$) вычисляется по уравнению:

$$j = 30 - 10^{-3}(100 a_e + 3,0 b_e + 34 b_r + 5\rho). \quad (67)$$

10. При отсутствии водоводов средняя защитная плотность тока газопроводов вычисляется по уравнению:

$$j_r = 20 + 10^{-3}(100 a_r - 34 b_r - 5\rho). \quad (68)$$

11. Если расчетное значение j или j_r меньше 6 мА/м^2 , принимается $j = 6 \text{ мА/м}^2$.

12. Суммарная сила тока (А), необходимого для катодной защиты проектируемых газо- и водопроводов, определяется по формуле:

$$J = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot jS, \quad (69)$$

а для защиты только сети газопроводов – по формуле:

$$J_r = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot j_r S_r. \quad (70)$$

13. Число катодных станций определяют из условий оптимального размещения анодных заземлителей (наличие площадок, удобных для их размещения, наличие источников питания и т. д.). При этом значение тока одной катодной станции можно ориентировочно принять равным 25 А . Поэтому число катодных станций приближенно равно $n = J/25$, где $J = J$ или J_r .

14. После размещения катодных станций на совмещенном плане необходимо рассчитать зону действия каждой из них. Для этой цели определяют радиус действия каждой катодной станции

$$R_i = 60 \sqrt{J / jK}, \quad (71)$$

где j – катодная плотность тока (А/м^2), определенная по формуле (67) или (68),

$K (\text{м}^2/\text{га})$ – площадь поверхности всех трубопроводов на единицу площади поверхности территории:

$$K = S(\text{м}^2) / S_{\text{тер}}(\text{га}) \quad (72)$$

15. Если площади кругов, радиусы действия каждого из которых равны R_i , а центры находятся в точках размещения анодных заземлителей, не охватывают всей территории $S_{\text{тер}}$, необходимо изменить или места расположения катодных станций, или их токи и вновь

выполнить проверку по (71).

16. Тип преобразователя катодной станции выбирается так, чтобы допустимое напряжение было на 30 % выше расчетного с учетом старения изоляционных покрытий и анодных заземлителей, а также возможного развития сети трубопроводов.

Ниже приводится пример расчета совместной защиты сети газо- и водоводов.

Пример 9

1. Пусть на территории площадью 10 га после завершения строительства будут размещены газопроводы (ГП) и водоводы (ВП) диаметрами и длинами $d_{гр}$, $l_{гр}$ и $d_{ва}$, $l_{ва}$ соответственно по табл. 9:

Параметры трубопроводов

Таблица 9

ГП		ВП	
$D_{гр}$, мм	$l_{гр}$, мм	$d_{ва}$, мм	$l_{ва}$, м
200	750	200	450
150	640	100	520
100	400	300	80
89	150	150	170

2. Определяется по формуле (59) суммарная поверхность всех газопроводов:

$$S_T = 3,14 \cdot 10^{-3} (200 \cdot 750 + 150 \cdot 640 + 100 \cdot 400 + 89 \cdot 150) = 940 \text{ м}^2,$$

по формуле (60) – суммарная поверхность всех водоводов:

$$S_в = 3,14 \cdot 10^{-3} (200 \cdot 450 + 100 \cdot 520 + 300 \cdot 80 + 150 \cdot 170) = 601 \text{ м}^2.$$

3. Суммарная поверхность всех трубопроводов:

$$S = S_T + S_в = 940 + 601 = 1541 \text{ м}^2.$$

4. Определяют среднее удельное сопротивление грунта у тру-

бопроводов, исходя из опытных данных (табл. 10), где представлены результаты измерений ρ_{ir} и ρ_{is} вдоль каждого из участков трубопроводов, где эти величины можно считать постоянными (эти участки необязательно совпадают с участками по табл. 9).

Предварительно определяют длины газопроводов и водоводов.

Таблица 10

Результаты измерения удельного сопротивления грунта

ГП		ВП	
$l_{ir}, \text{мм}$	$\rho_{ir}, \text{Ом} \cdot \text{м}$	$l_{is}, \text{м}$	$\rho_{is}, \text{Ом} \cdot \text{м}$
400	60	350	60
40	10	30	10
450	70	500	75
210	35	300	50
400	50	40	45
440	40		

5. Суммарная длина газопроводов (по любой из табл. 9 или 10)

$$L_r = \sum_i^n l_{ir} = 750 + 640 + 400 + 150 = 1940 \text{ м.}$$

6. Суммарная длина водопроводов

$$L_s = \sum_{i=1}^m l_{is} = 450 + 520 + 80 + 170 = 1220 \text{ м.}$$

7. По формуле (62) определяем среднее удельное сопротивление грунта у трубопроводов, используя данные табл. 10:

$$\rho = [1/(1940 + 1220)] \cdot [(60 \cdot 400 + 10 \cdot 40 + 70 \cdot 450 + 35 \cdot 210 + 50 \cdot 400 + 40 \cdot 440) + (60 \cdot 350 + 10 \cdot 30 + 75 \cdot 500 + 50 \cdot 300 + 45 \cdot 40)] = 56 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

8. По формулам (63) и (64) вычисляется доля площади поверхности трубопроводов:

$$a_r = (940/1541)100 = 61\%;$$

$$a_B = (601/1541)100 = 39\%.$$

9. Вычисляют коэффициенты по формулам (65) и (66):

$$b_r = 940/10 = 94 \text{ м}^2 / \text{га};$$

$$b_B = 601/10 = 60,1 \text{ м}^2 / \text{га}.$$

10. По формуле (67) вычисляют среднюю плотность защитного тока для всех трубопроводов:

$$j = 30 \cdot 10^{-3} \cdot (100 \cdot 39 + 3,0 \cdot 60,1 + 34 \cdot 94 + 5 \cdot 56) = 22,6 \text{ мА} / \text{м}^2.$$

11. По формуле (69) вычисляют суммарную силу защитного тока

$$j = 1,3 \cdot 10^{-3} \cdot 22,6 \cdot 1541 = 45,3 \text{ А}.$$

12. Принимается ток катодной станции 25 А, а число катодных станций равным 2 (см. п. 13 раздела 3.3.2.1).

13. Вычисляется коэффициент K по формуле (72):

$$K = (1541/10) = 154,1 \text{ м}^2 / \text{га}$$

и по формуле (71) радиус действия каждой катодной станции

$$R_1 = R_2 = 60 \sqrt{25 / 22,6 \cdot 10^{-3} \cdot 154,1} = 161 \text{ м}.$$

По совмещенному плану круги с центрами в местах расположения анодных заземлений и радиусами по 161 м охватывают всю территорию размещения проектируемых трубопроводов (при этом каж-

дая станция охватывает по 8.14 га из 10 га). Следовательно, изменить число катодных станций и их расположение не нужно.

3.3.3. Разветвленные коммуникации перекачивающих станций и нефтебаз

Опыт эксплуатации катодных установок в условиях густоразветвленных сетей подземных трубопроводов показал, что зоны защиты их снижаются в 15–30 раз по сравнению с защитной магистральных трубопроводов.

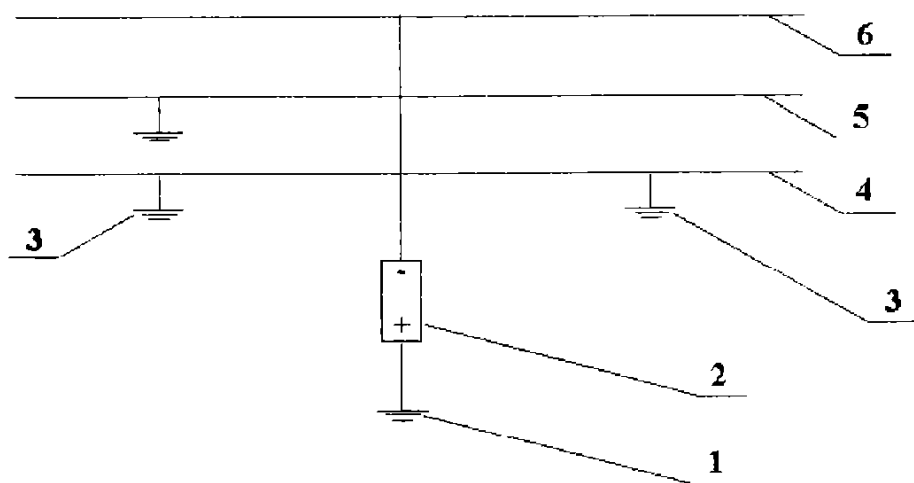
В городах и на промышленных площадках всегда имеется множество "экранных" заземлителей. Это контуры молниезащит высоких зданий, труб котельных, емкостей, резервуаров, а также защитных и рабочих заземлителей. Все эти заземлители в большинстве случаев электрически соединены с подземными трубопроводами (рис. 13а). Из рисунка видно, что токи станции 2 от анодного заземления 1 устремляются в мощные контуры заземлений 3 и только незначительная их часть попадает непосредственно в трубопроводы 4, 5 и 6.

Естественно, в таких районах основная часть энергии станции теряется в этих контурах защитных заземлений, что подтверждается работами [13, 14].

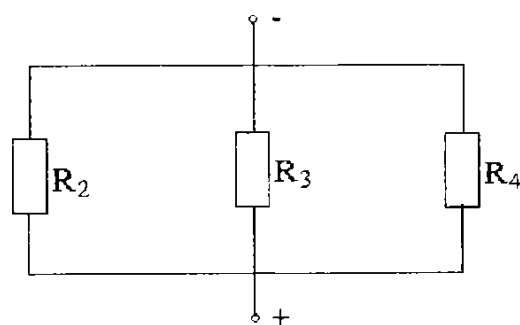
Рабочее сопротивление в цепи катодной защиты (рис. 13б), как это видно из схемы замещения, образуют переходные сопротивления анодного заземления R_1 и трубопроводов R_2, R_3, R_4 . Активные сопротивления линии, анода и трубопроводов настолько малы, что ими можно пренебречь.

Практические измерения показывают, что переходное сопротивление трубопроводов в городах с густоразветвленной сетью тоже мало и бывает меньше чем 1 Ом. Поэтому для продуктивной работы установки необходимо выбирать анодные заземлители с очень малым переходным сопротивлением.

Добиться столь малого анодного сопротивления заземления анода зачастую невозможно, и на практике стремятся как можно лучше изолировать трубопроводы от окружающей среды. Однако при этом трудно увеличить переходное сопротивление трубопроводов, если они имеют электрическую связь с землей. Поэтому зона защиты СКЗ в таких районах резко уменьшается, так как она работает



а)



б)

Рис. 13. Схема катодной защиты

а) существующая схема катодной защиты;

б) схема замещения 1 – анодное заземление; 2 – катодная станция; 3 – контур защитного заземления; 4, 5, 6 – трубопроводы

в режиме короткого замыкания, причем, чем ближе контур заземления к аноду, тем меньше зона защиты.

Проведенные нами опытные включения по катодной защите подземных трубопроводов позволили разработать эмпирические зависимости, позволяющие определять электрические параметры катодных установок с учетом качества защитных покрытий и наличия контуров защитного заземления. Расчет параметров следует проводить по следующим формулам:

$$I = K_1 \cdot K_2 \frac{l \cdot U_{\min}}{\rho}, \quad (73)$$

$$U = \frac{l \cdot I \cdot (R_3 + R_k)}{0,5 \cdot K_1}, \quad (74)$$

где: I, U – сила тока и напряжение СКЗ (А, В);

K_1, K_2 – коэффициенты, зависящие от количества контуров заземлений и изоляции труб (определяются по рис. 14);

l – радиус защитной зоны, м;

$U_{\min}$ – минимальный защитный потенциал по МЭС, В;

ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м;

R_3, R_k – переходное сопротивление анода и активное сопротивление кабеля, Ом.

Практическое использование формул рассматривается на нижеприводимых примерах.

Пример 10

Определить ток СКЗ для защиты подземных сооружений от коррозии микрорайона $l = 200$ м, $\rho = 20$ Ом·м, изоляция усиленная, 6 контуров заземления.

По рис. 14 находят коэффициенты K_1 и K_2 (как это показано пунктиром) и по формуле (73) определяют ток:

$$I = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{l \cdot U_{\min}}{\rho} = 4 \cdot 1 \cdot \frac{200 \cdot 1,85}{20} = 34,8 \text{ А}.$$

Пример 11

Определить параметры СКЗ для защиты подземных трубопроводов нефтебазы в радиусе $R_3 = 300$ м. Количество присоединенных к ним контуров заземления 2. Изоляция усиленная. Другие данные: $R_3 = 1$ Ом; $R_k = 0,5$ Ом; $\rho_r = 25$ Ом·м.

Решение:

1. По рис. 14 находят значения коэффициентов K_1 и K_2 :

$$K_1 = 1,5, K_2 = 1,0.$$

2. Вычисляют силу дренажного тока по формуле (73):

$$I = K_1 \cdot K_2 \cdot \frac{l \cdot U_{\min}}{\rho} = 1,5 \cdot 1,0 \cdot \frac{300 \cdot 0,85}{25} = 153 \text{ А}.$$

3. Определяют напряжение СКЗ по формуле (74):

$$U = \frac{1}{0,5 \cdot K_1} I(R_3 + R_k) = \frac{1}{0,5 \cdot 1,5} 12,7(1 + 0,5) = 25,4 В.$$

4. Требуемая мощность СКЗ равна:

$$P = U \cdot I = 25,4 \cdot 15,3 = 389 Вт.$$

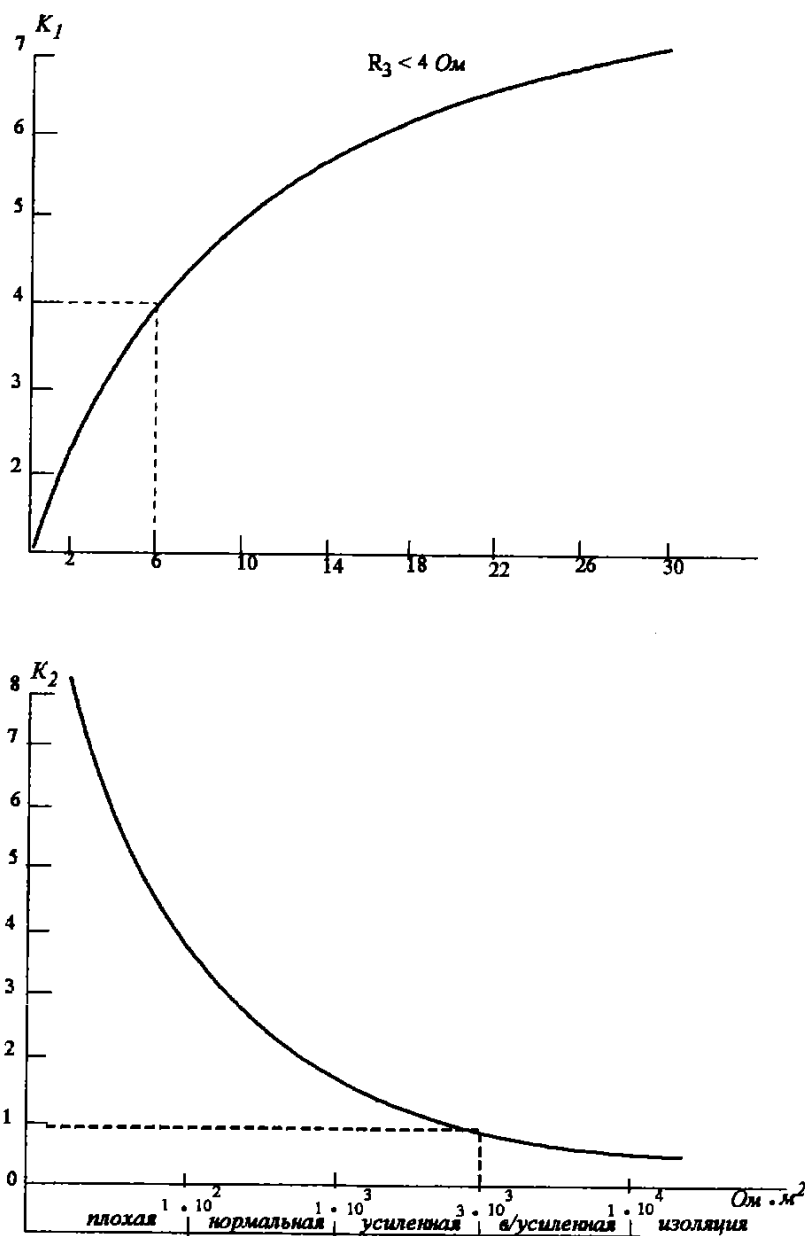


Рис. 14. Графики для определения коэффициентов K_1 и K_2

а) график для определения K_1 ;

б) график для определения K_2

3.4. Защита от электрохимической коррозии обсадных колонн скважин и промысловых трубопроводов

Эксплуатация нефтяных и газовых месторождений показала, что промысловые трубопроводы подвергаются коррозионному воздействию со стороны окружающей и перекачиваемой среды.

Последствия коррозионных разрушений весьма разнообразны. Нарушение герметичности обсадных колонн скважин приводит к загазованности пластов или снижению качества добываемой нефти.

Общие затраты на ремонт во много раз превышают затраты, связанные с защитой от электрохимической коррозии. Поэтому нормативные документы предусматривают строительство противокоррозионных мероприятий одновременно с разработкой месторождений. Разнообразие подземных коммуникаций, расположенных на промыслах, предусматривает совместную защиту их.

Электрохимическая защита обсадных колонн скважин, подключенных к групповому газо- или нефтесборному пункту, обеспечивается одной (кустовой) катодной установкой. Током этой установки достигается катодная поляризация таких подземных металлических сооружений куста, как коммуникации куста (подземное оборудование низкотемпературной сепарации, резервуары и другие), шлейфы, водопровод и обсадные колонны скважин.

Для достижения защитного уровня потенциалов на скважинах, удаленных от группового газосборного пункта, рекомендуется также применять катодные станции.

При проектировании электрохимической защиты промысловых сооружений рассчитываются параметры защитных установок магистральных трубопроводов и коллекторов, куста скважин и отдельных скважин.

При проектировании электрохимической защиты сооружений подземного хранилища газа рассчитываются параметры магистрального трубопровода, коммуникаций компрессорных станций, протяженных участков параллельной прокладки нескольких шлейфов, группы скважин и отдельных скважин [5].

В расчет катодной защиты группы скважин в контур включаются групповые колонны, шлейфы, подземные коммуникации группового пункта, резервуары, трубопроводы от группового пункта к сборным трубопроводам.

Схематично конструкция скважины приведена на рис. 15.

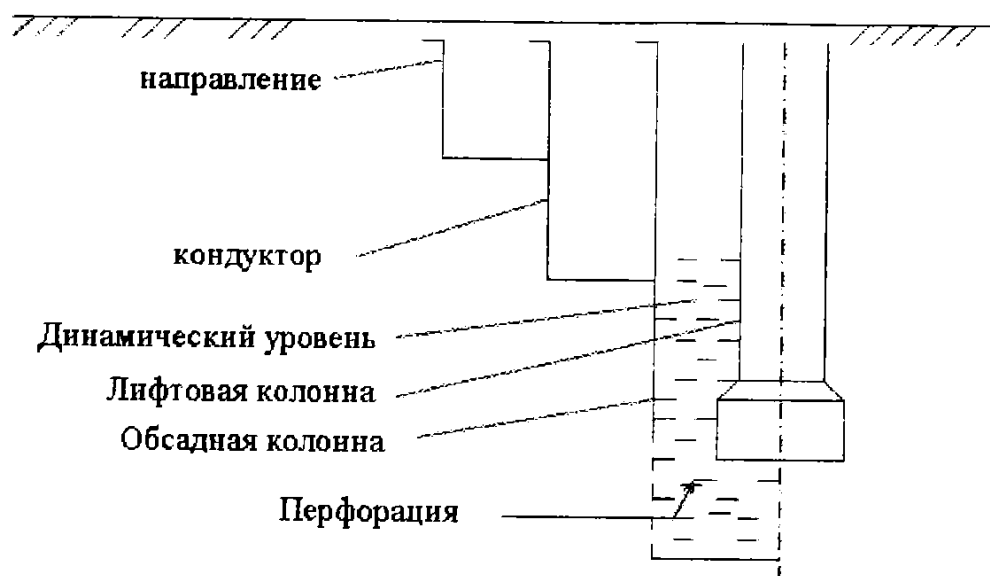


Рис. 15. Конструкция скважины

Особенностью защиты обсадных колонн скважин и промышленных коммуникаций является то, что защитные покрытия этих сооружений имеют значительное расхождение по удельному электрическому сопротивлению.

Максимальное переходное сопротивление «скважина–грунт» находится в пределах $100\text{--}200\text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, а промышленных трубопроводов – $10^4\text{ Ом}\cdot\text{м}^2$. Поэтому анодное заземление необходимо располагать на расстоянии от 30 до 50 м от устья скважины в зависимости от количества скважин в кусте.

Расчет тока катодной защиты предлагается вести отдельно для скважин и промышленных трубопроводов:

$$I_{\text{общ}} = \sum_{i=1}^n I_i + I_{\text{сп}}, \quad (75)$$

где n – количество защищаемых скважин в кусте;

I_i – сила тока, необходимая для защиты обсадной колонны скважины;

$I_{\text{сп}}$ – сила тока, необходимая для защиты трубопроводов, примыкающих к скважине.

Ток для защиты промысловых трубопроводов определяется по защитной плотности тока, которая на основании опыта эксплуатации и литературных данных принимается равной 6 мА/м^2 .

Исходными данными для расчета являются параметры проектируемых сооружений. Поверхность каждого из трубопроводов, имеющих между собой технологические соединения, обеспечивающие электрический контакт, определяется по формуле (59):

$$S = \pi \sum_{i=1}^n d_i l_i \cdot 10^3,$$

где d_i – диаметр трубопровода, мм;

l_i – длина трубопровода, имеющего диаметр d_i .

Длина трубопровода при расчетах не должна превышать глубину скважины.

Таким образом, определяется поверхность защищаемых трубопроводов.

Суммарный защитный ток определяется по формуле:

$$I_{\text{зп}} = iS. \quad (76)$$

Сила тока, требуемая для защиты обсадкой колонны скважины, определяется по формуле:

$$I = \frac{1}{Z_c} \sqrt{U_0^2 - U_{\min}^2 + \beta(U_0 - U_{\min})}, \quad (77)$$

где $Z_c = \sqrt{R_r \cdot R_{\text{из}}}$.

Наложенная разность потенциалов на устье скважины определяется по формуле:

$$U_0 = \frac{1}{2}(U_{\min} + \beta_c)e^{\alpha_c l_c} - \beta_c, \quad (78)$$

где U_{min} – минимальная (по абсолютной величине) наложенная защитная разность потенциалов труба-грунт, В;

β_c – постоянная нелинейности катодной поляризации

($\beta_c = -0,05 \div -0,075$ В);

α_c – постоянная распределения тока вдоль скважины, 1/м;

l_c – глубина скважины, м.

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{R_T}{R_{из}}}, \quad (79)$$

где R_T – продольное сопротивление трубопровода;

$R_{из}$ – сопротивление изоляции трубопровода на единицу длины;

R_T можно рассчитать по формуле (32) или определить по таблице приложения 5.

$$R_T = \frac{\rho_T}{\pi(D - \delta)\delta} \text{ Ом/м},$$

где ρ_T – удельное сопротивление материала трубы, Ом мм²/м;

D – диаметр трубопровода, мм;

δ – толщина стенки трубопровода, мм.

$R_{из}$ определяется из выражения:

$$R_{из} = \frac{R_n}{\pi D} \text{ Ом} \cdot \text{м},$$

где R_n – переходное сопротивление труба-грунт, Ом·м².

По полученному защитному току принимается сечение дренажного кабеля (табл. 5). Выбирается и рассчитывается анодное заземление. Определяется напряжение катодной станции.

Тип катодной станции выбирается так, чтобы допустимое напряжение было на 30 % выше расчетного с учетом старения изоляционных покрытий и анодных заземлителей, а также возможного развития сети трубопроводов.

Ниже приводится пример защиты от коррозии скважины.

Пример 12. Определить ток для защиты от электрохимической коррозии скважины диаметром 146 мм, толщина стенки трубопровода – 8 мм, глубина скважины – 2000 м. Переходное сопротивление обсадной колонны скважины 100 Ом·м².

Решение:

1. Выбирается продольное сопротивление трубопровода Ø 146 мм на единицу длины (по приложению 5)

$$R_T = 70,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ом/м.}$$

2. Рассчитывается сопротивление изоляции на единицу длины трубопровода:

$$R_{из} = \frac{R_n}{\pi D} = \frac{100}{3,14 \cdot 0,146} = 218 \text{ Ом} \cdot \text{м.}$$

3. Вычисляется постоянная распространения токов и потенциалов вдоль скважины:

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{R_T}{R_{из}}} = \sqrt{\frac{70,7 \cdot 10^{-6}}{218}} = 0,57 \cdot 10^{-3} \text{ 1/м.}$$

4. Рассчитывается входное сопротивление скважины:

$$Z_c = \sqrt{R_T \cdot R_{из}} = \sqrt{70,7 \cdot 10^{-6} \cdot 218} = 0,125 \text{ Ом.}$$

5. Определяется наложенная разность потенциалов на устье скважины:

$$U_o = \frac{1}{2}(U_{\min} + \beta_c) e^{\alpha_c l_c} - \beta_c = \frac{1}{2}[-0,3 + (-0,05)] e^{0,57 \cdot 10^{-3} \cdot 210^3} - (-0,05) = -0,5 \text{ В.}$$

6. Рассчитывается сила тока для защиты обсадной колонны скважины:

$$I = \frac{1}{Z_c} \sqrt{U_o^2 - U_{\min}^2 + \beta(U_o - U_{\min})} = \frac{1}{0,125} \sqrt{(-0,5)^2 - (-0,3)^2 + (-0,05)(-0,5 - (-0,3))} = 3,2 \text{ А.}$$

4. ПРОТЕКТОРНАЯ ЗАЩИТА ТРУБОПРОВОДОВ

В промышленной практике для защиты резервуаров от коррозии часто, из-за отсутствия катодных станций малой мощности, применяют протекторную защиту внутренней поверхности этих сооружений. Между тем, протекторная защита резервуаров не лишена ряда недостатков, главным из которых является разрушение протекторов во время чистки днищ резервуаров.

Тем не менее, порядка 50% ныне действующих резервуаров имеют протекторную защиту. В соответствии с ГОСТ Р 51164-98 и отраслевыми инструкциями в случае отсутствия источников электропитания, все вновь вводимые резервуары и трубопроводы должны обеспечиваться протекторной защитой.

В выше упомянутых документах не приводится конкретная методика расчета протекторной защиты, что в первую очередь связано с отсутствием научно-обоснованного определения зоны защитного действия протекторов.

Базируясь на электрических зависимостях и опыте эксплуатации резервуарного парка, рядом известных ученых и специалистов предложены различные расчетные варианты. Нами в расчетах защиты от коррозии резервуаров и трубопроводов использованы зависимости и методики, опубликованные в книге "Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров" [3].

4.1. Принцип действия протекторной защиты

При прокладке магистральных трубопроводов в труднодоступных районах часто отсутствуют линии электропередачи, так как сооружение для питания установок катодной защиты связано с большими затратами. В этом случае применяют протекторную защиту (рис. 16). Принцип действия ее заключается в том, что разрушению подвергается специально установленный анод (протектор), имеющий более электроотрицательный потенциал, чем защищаемое стальное сооружение, которое служит катодом в образовавшейся гальванической паре. Электролитом в этом случае является грунт, в котором укладывают трубопроводы и протекторы. Протекторы рекомендуется устанавливать в грунтах с удельным сопротивлением до $50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Так как мощность одного протектора невелика, в проектах защиты от коррозии подземных сооружений рекомендуется размещать их группами.

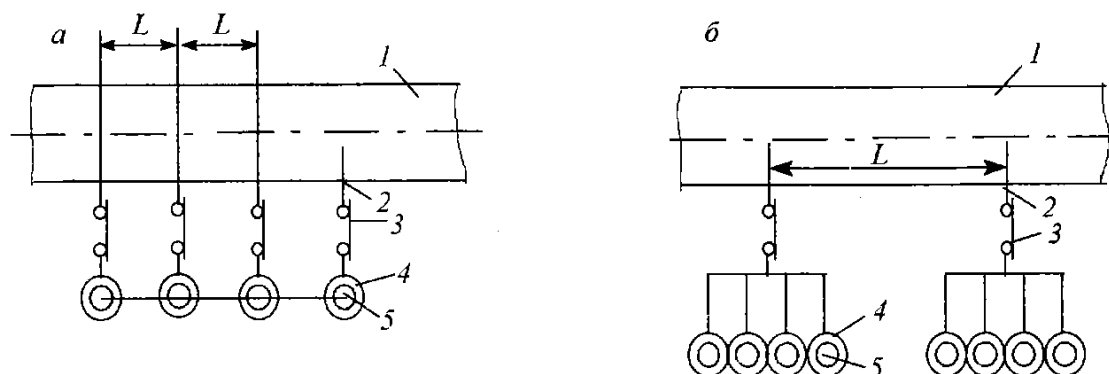


Рис. 16. Схема протекторной защиты подземного трубопровода
 а – защита протяженными протекторами; б – защита групповыми протекторными установками; 1 – трубопровод; 2 – соединительный провод; 3 – контрольно-измерительная колонка; 4 – активатор; 5 – протектор

При выполнении протекторной защиты с помощью протяженных лент (рис. 16а), они укладываются в одной траншее с трубопроводом. В этом случае, согласно исследованиям ВНИИСТа, протяженные протекторы можно устанавливать в грунтах с удельным сопротивлением до $500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [15].

4.2. Материал протекторов

Для протекторов, применяемых при защите стальных сооружений, могут использоваться все металлы, имеющие более электроотрицательный потенциал, чем железо. Наибольшее распространение получили магний, цинк и алюминий. Физико-химические характеристики их приведены в табл. 11.

Для протекторов при защите подземных сооружений часто используют магний. Чистые металлы – магний, алюминий, цинк, – не получили практического применения для изготовления протекторов, так как магний имеет сравнительно низкую токоотдачу, а алюминий и цинк склонны к пассивации. Введение добавок позволяет получить сплавы с более отрицательными, чем у основного металла,

потенциалами, которые могут оставаться активными, равномерно разрушаться. В магниевые сплавы для протекторов вводят добавки алюминия, цинка и марганца. Алюминий улучшает литейные свойства сплава и повышает механические характеристики, но при этом немного снижается потенциал. Цинк облагораживает сплав и уменьшает вредное влияние таких примесей, как медь и никель, позволяя повышать их критическое содержание в сплаве. Марганец вводят в сплав для осаждения примесей железа. Кроме того, он повышает токоотдачу и делает более отрицательным потенциал протектора. Основные загрязняющие примеси в сплаве – железо, медь, никель, кремний – увеличивают самокоррозию протекторов и снижают срок их службы.

Таблица 11

Физико-химические характеристики металлов

Характеристика	Магний	Цинк	Алюминий
Относительная молекулярная масса	24.32	65.328	26.97
Валентность	2	2	3
Электрохимический эквивалент, кг/(А · год)	3.97	10.7	2.94
Токоотдача, (А · ч)/кг	2200	820	2980
Равновесный электродный потенциал по нормальному водородному электроду, В	-2.34	-0.76	-1.67

4.3. Назначение и состав активатора

Эффективность работы протектора увеличивается при установке его в специальные смеси-заполнители, называемые активаторами. Активаторы служат для снижения самокоррозии протектора, уменьшения анодной поляризуемости, уменьшения сопротивления растеканию тока с протектора, предотвращения образования плотных окисных пленок на поверхности протектора. Применение активатора повышает к. п. д. протектора, т. е. срок его службы, и стабилизирует ток в цепи протекторной установки.

Основными компонентами активаторов к магниевым сплавам являются глина, гипс, эпсомит и мирабилит* .

* Эпсомит – $MgSO_4 \cdot 7H_2O$

Мирабилит – $Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$

Для приготовления активатора используют смеси сухих солей и глины, составы которых приведены в табл. 12.

Таблица 12

Активатор к магниевым сплавам

Наименование активатора	Массовая доля компонента, %	
	I состав	II состав
Эпсомит	30	20
Гипс	10	20
Глина	40	40
Вода	20	20

Примечание

I состав применяют в сухих грунтах с удельным электрическим сопротивлением более 20 Ом · м, II состав — во влажных грунтах с удельным электрическим сопротивлением менее 20 Ом · м.

Активатор доводят до вязкой консистенции, добавляя воду перед установкой протектора. На один протектор используют 10–40 кг активатора.

Мирабилит снижает к. п. д. магниевых протекторов и применяется только при отсутствии эпсомита.

Для предотвращения вымывания солей в процессе работы протекторной установки в активатор вводят глину и гипс. Стабильная работа протекторной установки обеспечивается при установке протекторов ниже глубины промерзания или высыхания грунта.

4.4. Конструкция магниевых протекторов

Технология изготовления протекторов разработана ВНИИСТом совместно с Березниковским титаномагниевым комбинатом и Всесоюзным институтом сплавов (ВИПС). Комплектные протекторы изготовляют с электродами из магниевых сплавов повышенной и высокой чистоты Мл-16, Мл-16пч, Мл-16вч, Мл-4вч и сплава МПУ.

К электроду подсоединен изолированный соединительный проводник.

Комплектный протектор представляет собой электрод с соединительным проводником и порошкообразным активатором, находящимся в полиэтиленовом мешке. При транспортировке и хранении комплектный протектор находится в мешке из крафт-бумаги.

Магнийевый электрод типа ПМ (табл. 13) представляет собой удлиненный профиль D-образного сечения, в который при отливке вставляется стальной сердечник. Вокруг сердечника в магнийевом электроде имеется углубление в виде воронки. После соединения контактов воронка заполняется битумной мастикой с целью предотвращения контактной коррозии. Потенциал протектор-грунт для этих сплавов равен -1.6 В по медно-сульфатному электроду сравнения (при разомкнутой цепи протекторной установки). При анодной плотности тока 10 мА/м^2 к. п. д. протекторов находится в пределах от $0.52-0.66$.

Таблица 13

Техническая характеристика магнийевых протекторов

Тип протектора	Размеры протектора, мм				Масса, G_n , кг
	l_n	d_n	l_a	d_a	
ПМ 5	500	95	—	—	5
ПМ 5У	500	95	580	165	16
ПМ 10	600	125	—	—	10
ПМ 10У	600	125	700	200	30
ПМ 20	800	181	—	—	20
ПМ 20У	900	181	900	240	60

Масса протекторов ПМ 5У, ПМ 10У, ПМ 20У включает массу активатора.

Изготовленные из сплава магния Мг 95-1 пи протяженные протекторы, отличающиеся малой массой на единицу поверхности, резко расширяют область применения протекторов, которая раньше ограничивалась удельным сопротивлением грунта до $50 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Протяженные протекторы типа ПМП 35 x 10, ПМП 20 x 10 представляют собой полосу, намотанную на барабан. Протяженные протекторы, сматываемые с барабана, можно укладывать в одну траншею вместе с трубопроводом или на некотором расстоянии от него [16].

ВНИИСТом разработаны конструкции кольцевых протекторов, которые изготавливают из двух литых анодов-полуколец, соединенных болтами, либо сваркой стальной арматуры или отдельных сегментов (4, 6 и более). Каждый сегмент имеет контактный стержень, привариваемый к стальным ободам, охватывающим трубопровод.

В качестве материалов для анодных сегментов могут использоваться вышеназванные сплавы.

4.5. Расчет протекторной защиты трубопроводов

Для протекторной установки длину зоны действия (защиты) на изолированном трубопроводе можно определить по расчетной зависимости для СКЗ конечной длины (м):

$$L = \frac{2}{\alpha} \operatorname{arch} \frac{E_0 - E_{ест}}{E_{защ(\min)} - E_{ест}}, \quad (80)$$

где: α – постоянная распределения токов и потенциалов по длине трубопровода, 1/м;

$E_{ест}$ – естественный потенциал трубопровода до включения защиты, В;

$E_{защ(\min)}$ – минимальный защитный потенциал, В;

E_0 – потенциал протектора после подключения его к трубопроводу, В.

$$E_0 = E_n \frac{R_{mp}}{R_{mp} + R_n}, \quad (81)$$

где E_n – потенциал протектора до подключения его к трубопроводу, В;

R_{mp} – сопротивление растеканию тока защищаемого участка трубопровода, Ом;

R_n – сопротивление растеканию тока протекторной установки, Ом.

$$R_{TP} = \frac{\sqrt{R_{mp} R_{us}}}{2th \frac{\alpha L}{2}}. \quad (82)$$

Из формул (80)–(82) получается уравнение

$$ch \frac{aL}{2} + \frac{2R_n}{\sqrt{R_m R_{uz}}} Sh \frac{aL}{2} = \frac{E_n}{E_{защ(\min)}}, \quad (83)$$

решением которого с достаточной для инженерных расчетов точностью можно считать выражение

$$L = \frac{R_{uz}}{R_n} \left(\frac{E_n}{E_{защ(\min)}} - 1 \right). \quad (84)$$

Сила тока (А) в цепи протекторной установки при подключении ее к трубопроводу определяется зависимостью

$$I_n = \frac{E_0 - E_{ест}}{R_{mp} + R_n}. \quad (85)$$

С учетом выражений (82) и (83) и некоторых упрощений последнее выражение можно преобразовать следующим образом:

$$I_n = \frac{E_{защ(\min)} - E_{ест}}{R_n} \left(1 - \frac{E_{защ(\min)}}{E_n} \right). \quad (86)$$

Сопротивление растеканию тока групповой протекторной установки при $h \gg l_a/4$ и $l_a \gg d_a/2$ рассчитывают по формуле

$$R_n = \frac{0,366\rho}{Nl_a\eta_e} \left(\lg \frac{2l_a}{d_a} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h+l_a}{4h-l_a} + \frac{\rho_a}{\rho} \lg \frac{d_a}{d_n} \right), \quad (87)$$

где: ρ, ρ_a – удельное сопротивление соответственно грунта, окружающего протектор, и активатора, Ом · м; d_a, l_a – соответственно диаметр и высота столба активатора, окружающего протектор, м; N – число протекторов в группе; d_n – диаметр протектора, м; h – глубина установки протектора (от поверхности земли до середины протектора), м; η_e – коэффициент, учитывающий взаимное экранирование вертикальных протекторов в группе (рис. 17).

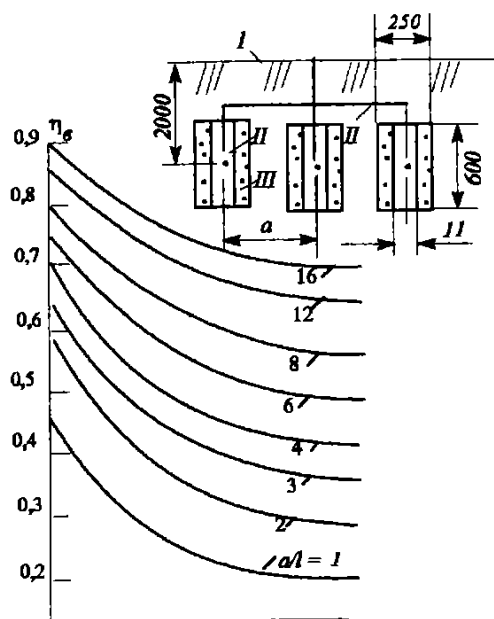


Рис. 17. Зависимость коэффициента экранирования η в для вертикальных упакованных протекторов от их числа при различных значениях a/l_n (a – расстояние между протекторами, l_n – высота протектора)

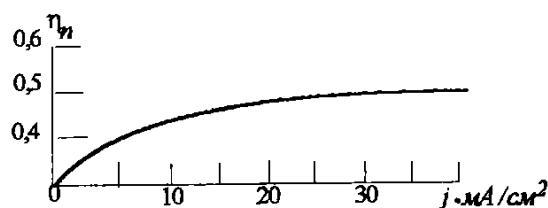


Рис. 18. Зависимость к. п. д. магниевых протекторов от анодной плотности тока j

Срок службы протектора (в годах)

$$T = \frac{\sigma_n \eta_n \eta_u}{q I_n}, \quad (88)$$

где: σ_n – масса протектора, кг; η_n – к. п. д. протектора (определяется в зависимости от анодной плотности тока по графику на рис. 18); $\eta_u = 0.95$ – коэффициент использования протектора; q – теоретический электрохимический эквивалент материала протектора, кг/(А · год); I_n – сила тока в цепи протекторной установки, А.

Протекторные установки разрешается использовать в качестве защитного заземления. В этом случае необходимо увеличить сечение соединительного провода.

4.6. Расчет протекторной защиты днища стальных резервуаров от грунтовой коррозии

При противокоррозионной защите днищ вертикальных стальных резервуаров одиночными протекторными установками, заглубленными в грунт (рис. 19), основной задачей является определение числа протекторов и срока их службы.

В основу расчета положено достижение плотностью тока в цепи протектор-резервуар защитного значения, которое выбирается в зависимости от переходного сопротивления изоляции днища и удельного электрического сопротивления грунтов (табл. 14).

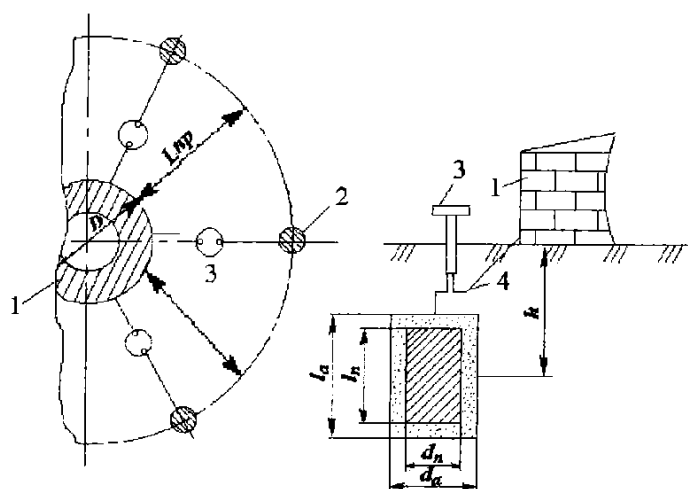


Рис. 19. Схема установки протекторов для защиты днища резервуара от грунтовой коррозии: 1 – резервуар; 2 – протектор; 3 – контрольно-измерительная колонка; 4 – соединительный провод

Таблица 14
Защитная плотность тока для изолированного стального сооружения, мА/м^2

Переходное сопротивление изоляции, Ом · м	Удельное электрическое сопротивление грунта, Ом · м		
	10	20	50
> 1000	< 1	< 0,4	< 0,2
1000–10000	1–2	0,4–1	0,2–0,5
100–1000	2–5	1–2	0,5–1
10–100	5–10	2–5	1–2
< 10	> 5	> 5	> 2

При использовании табл. 14 необходимо руководствоваться тем, что большему значению переходного сопротивления соответствует меньшее значение защитной плотности тока.

Оценку переходного сопротивления изоляции днища производят по результатам измерения сопротивления растеканию тока с днища резервуара с помощью измерителей заземления Ф416, Ф4103-М1 и других. При этом переходное сопротивление изоляции определяют по формуле

$$R_o = R_{p-r} F, \quad (89)$$

где: R_{p-r} – переходное сопротивление резервуар-грунт по показанию прибора, Ом;

F – площадь днища резервуара, m^2 .

Для ориентировочных расчетов можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$R_{p-r} = \frac{3\rho}{D(D+b)}, \quad (90)$$

где: D – диаметр резервуара, м;

b – расстояние между протектором и резервуаром, м (выбирается исходя из местных условий в пределах 6–10 м).

Сила тока (А), требующаяся для защиты днища резервуара

$$I = jF. \quad (91)$$

Ориентировочное число протекторов

$$N_o = \frac{I(R_n + R_{np})}{E_n - E_{есл} - IR_{p-r}}, \quad (92)$$

где R_n – сопротивление растеканию тока с протектора, Ом (опреде-

ляется измерениями или расчетом по формуле (87) при $N = 1$ и $\eta = 1$);

R_{np} – сопротивление соединительного провода, Ом;

E_n – абсолютное значение потенциала протектора по МСЭ до подключения его к резервуару, В;

$E_{ест}$ – абсолютное значение потенциала резервуара по МСЭ до подключения протектора, В.

Окончательное число протекторов уточняют по формуле

$$N = N_0 / \eta_B, \quad (93)$$

где η_B – коэффициент экранирования (выбирается в зависимости от числа протекторов типа резервуара по табл. 15, составленной для магнелевых протекторов типа ПМ-10У, установленных в грунт на расстоянии 5 м от стенки резервуара).

Таблица 15

Зависимость коэффициента экранирования вертикальных упакованных протекторов от числа анодов

Тип резервуара	Число протекторов, шт				
	10	15	20	25	30
PBC-5000	0,82	0,70	0,64	0,57	0,50
PBC-10000	0,87	0,78	0,71	0,65	0,59
PBC-20000	0,90	0,83	0,76	0,70	0,65

Срок службы протекторов определяют по формуле (88), в которую значение силы тока протектора подставляют из выражения

$$I_n = \frac{E_n - E_{ест}}{R_{p-r} + R_{np} + R_n}. \quad (94)$$

Как следует из выражения (92), возможность защиты резервуаров протекторами определяется неравенством

$$IR_{p-r} < E_n - E_{ест}. \quad (95)$$

Если $IR_{p-r} > 1B$, то полная защита резервуара магниевыми протекторами не может быть осуществлена.

4.7. Расчет протекторной защиты внутренней поверхности днища и первого пояса стальных резервуаров

Нефти содержат значительное количество воды в виде стойкой эмульсии, в которой присутствуют хлориды магния, натрия, кальция и железа. При отстаивании нефти и разрушении эмульсии вода вместе с растворенными в ней солями собирается на дне резервуара и вызывает усиленную электрохимическую коррозию днища и нижнего пояса.

Применение электрохимического метода защиты с использованием внешнего источника (катодная защита) для резервуаров с нефтью и нефтепродуктами опасно в пожарном отношении. При использовании протекторных установок возможность образования искры при разрыве электрической цепи исключается, так как разность потенциалов между протектором и защищаемой конструкцией не превышает допустимого значения.

При расчете протекторной защиты необходимо определить число протекторов, располагаемых на днище резервуара, и срок их службы. Число протекторов для защиты резервуаров ориентировочно можно определить по формуле

$$N = \frac{3,6r(r+2h)}{S_3}, \quad (96)$$

где: r – радиус резервуара, м;

h – уровень подтоварной воды, м;

S_3 – зона действия одного протектора, м².

Зона действия одного протектора зависит от удельного электрического сопротивления и уровня подтоварной воды в резервуаре. При кольцевом расположении протекторов при расчете можно использовать данные табл. 16.

Срок службы (в годах) магниевых протекторов

$$T = 0,1 \frac{G_n}{I_n} K_T, \quad (97)$$

где K_T – технологический коэффициент, характеризующий условия работы резервуаров (для резервуаров промыслов и нефтеперекачивающих станций $K_T = 1.3$);

I_n – сила тока протектора, А.

Таблица 16

Зона действия одного протектора в резервуаре

Суммарная концентрация солей в подтоварной воде		Удельное электрическое сопротивление, Ом · м	Зона действия одного протектора, м ²	
г/л	%		при h = 0.15 м	при h = 0.25 м
1.2	0.3	2.0	30	45
2.0	0.5	1.0	26	35
4.8	1.2	0.5	22	30
8.0	2.0	0.3	19	26
14.0	3.5	0.2	17	23
32.0	8.0	0.1	14	20
72.0	18.0	0.05	11	15

Таблица 17

Зависимость поправочного коэффициента K_y для протекторов от уровня подтоварной воды

Уровень подтоварной воды, м	Марка протектора		
	ПМР-5	ПМР-10	ПМР-20
0.25	1.22	1.45	1.43
0.15	1.56	1.92	1.79
0.10	1.89	2.38	2.56
0.05	2.86	5.71	6.68

$$I_n = \frac{E_{\text{П-Д}}}{\frac{\rho_{\text{э}}(d_{\text{э}} - d_n)}{4\pi h d_n} + \frac{R_{\text{пол}}}{S_n} K_y}, \quad (98)$$

где $E_{\text{П-Д}}$ – разность потенциалов протектор-днище при разомкнутой цепи (для магниевых протекторов $E_{\text{П-Д}}$ обычно принимается равным 1 В);

$d_n, d_{\text{э}}$ – диаметр соответственно протектора, электролита, м;

K_y – поправочный коэффициент, зависящий от уровня подто-варной воды (табл. 17);

$\rho_{\text{э}}$ – сопротивление электролита, Ом · м;

$R_{\text{пол}}$ – поляризационное сопротивление протектора, Ом · м².

Таблица 18

Зависимость поляризационного сопротивления от $\rho_{\text{э}}$

$\rho_{\text{э}}, \text{Ом} \cdot \text{м}$	2	1	0.6	0.4	0.23	0.15	0.08	0.06
$R_{\text{пол}}, \text{Ом} \cdot \text{м}^2$	0.94	0.87	0.77	0.68	0.50	0.40	0.27	0.20

4.7.1. Конструкция протекторов типа ПМР

Для защиты от коррозии внутренней поверхности резервуаров используют протекторы типа ПМР, изготовленные из сплава Мл-4 (табл. 19).

Таблица 19

Технические характеристики протекторов ПМР

Показатели	Марка протектора		
	ПМР-5	ПМР-10	ПМР-20
Диаметр, мм	280	400	400
Высота, мм			
по краю	60	70	140
в средней части	40	40	80
Масса (округленно), кг	5	10	20
Площадь рабочей поверхности, м ²	0.14	0.285	0.33
Стационарный потенциал по МСЭ, В	1.6	1.6	1.6
Практическая токоотдача	6800	13500	27000

Они разработаны ВНИИСТом совместно с Березниковским титаномагниевым комбинатом и представляют собой короткий цилиндр (отношение высоты к диаметру 0.2–0.4), верхняя часть которого представляет собой опрокинутый усеченный конус. В центре протектора запрессована стальная втулка для обеспечения крепления с днищем резервуара. Размеры протектора позволяют устанавливать его в резервуаре через люк–лаз.

Выбор типа протектора определяется общей концентрацией солей в подтоварной воде: при $C = 0.3–1.5 \%$ оптимальные параметры будут получены с протекторами ПМР-5, при $C = 1.5–3.5 \%$ – ПМР-10, при $C > 3.5\%$ – ПМР-20.

4.7.2. Монтаж протекторов в резервуаре

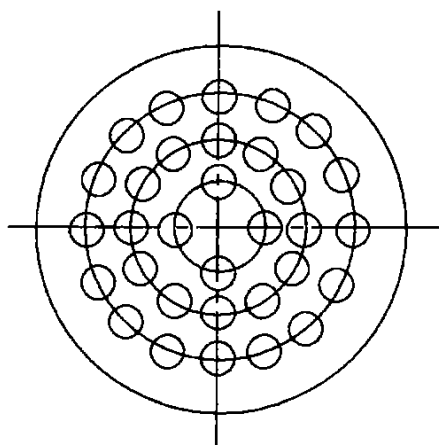


Рис. 20. Пример размещения протекторов в днище резервуара типа РВС-5000 при сроке службы протекторов 5 лет ($r = 2,5$ м; $a = 2,35$ м)

Протекторы на днище резервуара рекомендуется располагать по концентрическим окружностям (рис. 20). Расстояние между первым рядом протекторов и стенкой резервуара ориентировочно должно быть равно $a = r_3 - h$, а расстояние между концентрическими окружностями протекторов $2r_3$, где $r_3 = \sqrt{S_3 / \pi}$ – радиус защитного действия протектора; h – уровень подтоварной воды.

Место в форме круга диаметром 1.4–1.5 м, где должен устанавливаться протектор, подвергают механической или пескоструйной очистке от следов окалины и коррозии. В центре круга перпендикулярно к днищу приваривают стальной стержень диаметром 8 мм и высотой 60 мм для протектора ПМР-20 и 35 мм – для протекторов

ПМР-5 и ПМР-10. На очищенное и промытое бензином место пульверизатором или кистью наносят покрытие на основе эпоксидной смолы в несколько слоев общей толщины 0.3–0.5 мм. Протектор устанавливают на еще не затвердевшее покрытие, чтобы он приклеился к днищу. Контактную втулку протектора приваривают к монтажному стержню, а зазор между контактной втулкой и стержнем заливают эпоксидной смолой.

4.8. Контроль протекторной защиты

Работу протекторных установок при защите от электрохимической коррозии подземных сооружений контролируют при помощи электрических измерений. Измеряют потенциалы "труба-грунт", силу тока в цепи протекторной установки, сопротивление растеканию тока протекторной установки.

При установке протекторов внутри резервуаров контроль за их работой осуществляют измерением разности потенциалов резервуар-электролит и силы тока в цепи протектор-резервуар.

Разность потенциалов резервуар-электролит измеряют с помощью специального медно-сульфатного электрода сравнения, опускаемого на днище резервуара через верхние смотровые люки с помощью проводника.

Протекторная защита внутренней поверхности резервуара работает эффективно, если выполняется условие

$$\frac{0,3I_{\text{сум}}}{D(D + 4h)} \leq \frac{10I_K}{S_K}. \quad (99)$$

К недостаткам протекторной защиты внутренней поверхности резервуаров относятся:

- срок службы протекторной защиты не всегда совпадает со сроками чистки резервуаров. Когда чистка резервуаров производится раньше, то протекторы представляют помеху и их удаляют вместе с осадком, что ведет к удорожанию эксплуатации;

- когда протектор срабатывается и не заменен на новый, то в этом месте усиливается коррозия металла и может привести к сквозному разрушению днища резервуара.

4.9. Примеры расчетов протекторной защиты

Пример 13. Определить протяженность защитной зоны и срок службы одной протекторной установки, состоящей из пяти вертикально установленных протекторов марки ПМ 5У. Глубина установки протекторов $h = 2$ м, расстояние между ними в группе $a = 5$ м.

Другие данные, необходимые для расчета: $\rho = 20$ Ом · м; $R_{из\text{ ср}} = 500$ Ом · м², удельное электросопротивление активатора $\rho_a = 0.2$ Ом · м.

Решение:

1. Для протекторов марки ПМ 5У $l_n = 0.5$ м, $d_n = 0.095$ м, $l_a = 0.58$ м, $d_a = 0.165$ м, $\sigma_n = 5$ кг без активатора (см. табл. 13).

2. Вычисляется сопротивление растеканию тока групповой протекторной установки по формуле (87)

$$R_n = \frac{0,366\rho}{Nl_a\eta_B} \left(\lg \frac{2l_a}{d_a} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h + i_a}{4h - i_a} + \frac{\rho_a}{\rho} \lg \frac{d_a}{d_n} \right) =$$
$$= \frac{0,366 \cdot 20}{0,58 \cdot 5 \cdot 0,82} \left(\lg \frac{2 \cdot 0,58}{0,165} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2 + 0,58}{4 \cdot 2 - 0,58} + \frac{0,2}{20} \lg \frac{0,165}{0,095} \right) = 2,71 \text{ Ом}.$$

Здесь $\eta_B = 0.82$ – коэффициент экранирования групповой протекторной установки, определенный по рис. 17 для $a/l_n = 10$ и $N = 5$.

3. Определяется протяженность защитной зоны протекторной установки по формуле (84):

$$L = \frac{R_{из}}{R_n} \left(\frac{E_n}{E_{защ(\min)}} - 1 \right) = \frac{500}{2,71} \left(\frac{1,6}{0,85} - 1 \right) = 162,8 \text{ м}.$$

Здесь $E_n = 1.6$ В – потенциал магниевого протектора до подключения его к трубопроводу (по медно-сульфатному электроду);

$E_{защ(\min)} = 0.85$ В – минимальный защитный потенциал.

4. Сила тока протекторной установки по формуле (86):

$$I_n = \frac{E_{\text{защ}(\min)} - E_{\text{ест}}}{R_n} \left(1 - \frac{E_{\text{защ}(\min)}}{E_n} \right) = \frac{0,85 - 0,55}{2,71} \left(1 - \frac{0,85}{1,6} \right) = 0,052 \text{ A}.$$

Здесь $E_{\text{ест}} = -0.55 \text{ В}$.

5. Анодная плотность тока по формуле:

$$j = \frac{I_n}{S_a} = \frac{I_n}{N \left(\pi d_n \ln + 2 \frac{\pi d_n^2}{4} \right)} = \frac{I_n}{N d_n \pi \left(\ln + \frac{d_n}{2} \right)} = \frac{0,052100}{5 \cdot 0,95 \cdot 3,14 \left(0,5 + \frac{0,95}{2} \right)} = 6,37 \text{ mA} / \text{m}^2,$$

где S_a – суммарная поверхность групповой протекторной установки, m^2 .

По рис. 18 определяется, что коэффициент полезного действия протекторной установки $\eta = 0.53$.

6. Срок службы протекторной установки по формуле (88):

$$T = \frac{\sigma_n \eta_n \eta_n}{q I_n} = \frac{5 \cdot 5 \cdot 0,53 \cdot 0,95}{0,052 \cdot 3,97} = 61 \text{ год}.$$

Здесь $q = 3.97 \text{ кг}/(\text{A} \cdot \text{год})$ – теоретический электрохимический эквивалент для магниевых протекторов. Расчетный срок службы протектора умножают на коэффициент 0.45–0.5, учитывающий образование продуктов коррозии, отложение солей и т. п. на протекторах, вследствие чего снижается эффективность протекторной защиты.

Таким образом, ожидаемый срок службы протекторов $0.45 \times 67 = 27.5$ года.

Пример 14. Определить, какое число магниевых протекторов марки ПМ 10У потребуется для обеспечения защиты участка трубопровода длиной 10 км, если известно, что $R_{\text{из ср}} = 1000 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, $\rho = 10 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Решение:

1. По формуле (84) определяют суммарное сопротивление растеканию тока протекторов

$$R_n = \frac{R_{из}}{L} \left(\frac{E_n}{E_{защ(\min)}} - 1 \right) = \frac{1000}{10000} \left(\frac{1,6}{0,85} - 1 \right) = 0,09 \text{ Ом.}$$

2. По формуле (87) находят необходимое число протекторов

$$N = \frac{0,366 \rho}{l_a \cdot \eta_B \cdot R_n} \left(\lg \frac{2l_a}{d_a} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h + l_f}{4h - l_a} + \frac{\rho_a}{\rho} \lg \frac{d_a}{d_n} \right) =$$
$$= \frac{0,366 \cdot 10}{0,7 \cdot 1 \cdot 0,09} \left(\lg \frac{2 \cdot 0,7}{0,2} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 2,5 + 0,7}{4 \cdot 2,5 - 0,7} + \frac{0,2}{10} \lg \frac{0,2}{0,123} \right) = 51,3.$$

Принимается $N = 52$ шт. Здесь протекторы приняты по табл. 13; коэффициент экранирования протекторов принят равным единице ($\eta_B = 1$) в предположении, что протекторы рассредоточены по трассе на значительном удалении друг от друга.

3. Среднее расстояние между протекторами $10000 : 52 = 192,3 \text{ м.}$

4. Сила тока в цепи протекторной установки по формуле (86) равна

$$I_n = \frac{E_{защ(\min)} - E_{есл}}{R_n} \left(1 - \frac{E_{защ(\min)}}{E_n} \right) = \frac{0,85 - 0,55}{0,09} \left(1 - \frac{0,85}{1,6} \right) = 1,56 \text{ А.}$$

По этому значению тока необходимо подобрать сечение соединительного провода. Однако, комплектные протектора идут с соединительным проводом длиной 5 м и сечением $1,2 \text{ мм}^2$.

Пример 15. Определить число одиночных протекторов типа ПМ 10У, необходимых для обеспечения защиты резервуара РВС-2000 ($D_p = 15,0$ м), установленного на площадке с увлажненным песком ($c = 20$ Ом · м). Расстояние от резервуара до протектора 10 м.

Решение:

1. Площадь днища резервуара

$$F = \frac{\pi D_p^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 15^2}{4} = 176,6 \text{ м}^2.$$

2. Определяют переходное сопротивление резервуар-грунт по формуле (90):

$$R_{p-r} = \frac{3\rho}{D(D+c)} = \frac{3 \cdot 20}{15(15+10)} = 0,16 \text{ Ом}.$$

3. По формуле (89) оценивают переходное сопротивление изоляции днища резервуара

$$R_o = R_{p-r} \cdot F = 0,16 \times 176,6 = 28,26 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2.$$

4. По табл. 14 принимают защитную плотность тока, соответствующую $\rho = 20$ Ом · м и $R_o = 28,26$ Ом · м², $j_n = 0,002$ А/м².

5. Сила тока, необходимая для защиты днища резервуара от коррозии, по формуле (91):

$$I = j \cdot F = 0,002 \cdot 176,6 = 0,53 \text{ А}.$$

6. Делается проверка условия (95):

$$IR_{p-r} < E_n - E_{есг}; IR_{p-r} = 0,53 \cdot 0,16 = 0,085 < 1.$$

Следовательно, возможна полная защита резервуара магниевыми протекторами.

7. Из табл. 14 для протектора типа ПМ 10У находят $l_n = 0.6$ м, $d_n = 0.125$ м, $l_a = 0.7$ м, $d_a = 0.2$ м. Масса одного протектора без активатора $\sigma_a = 10$ кг.

8. Сопротивление растеканию тока с одиночного протектора определяют по формуле (87) при $N = 1$ и $\eta = 1$.

$$R_{n1} = \frac{0,366\rho}{Nl_a\eta_s} \left(\lg \frac{2l_a}{d_a} + \frac{1}{2} \lg \frac{4h + l_a}{4h - l_a} + \frac{\rho_a}{\rho} \lg \frac{d_a}{d_n} \right) =$$

$$= \frac{0,366 \cdot 20}{0,7} \left(\lg \frac{2 \cdot 0,7}{0,2} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 5 + 0,7}{4 \cdot 5 - 0,7} + \frac{0,2}{20} \lg \frac{0,2}{0,125} \right) = 90,2 \text{ Ом.}$$

Здесь принято $h = 5$ м — глубина заложения протектора от поверхности земли до середины протектора; $\rho_a = 0.2$ Ом · м — удельное электросопротивление активатора.

9. В качестве соединительного примем алюминиевый провод марки А-16 с площадью сечения $S_{np} = 15.89$ мм², удельным электросопротивлением $\rho_{np} = 0.029$ Ом · мм²/м.

10. Сопротивление соединительного провода

$$R_{np} = \frac{\rho_{np} l_{np}}{S_{np}} = \frac{0,029 \cdot 10}{15,89} = 0,02 \text{ Ом.}$$

11. По формуле (92) определяют ориентировочное число протекторов

$$N_o = \frac{I(R_n + R_{np})}{E_n - E_{есм} - IR_{p-r}} = \frac{0,53(9,02 + 0,2)}{1,6 - 0,55 - 0,16 \cdot 0,53} = 4,96.$$

Принимается $N_o = 5$.

12. По табл. 15 находят коэффициент экранирования $\eta = 0.82$.

13. Тогда окончательное число протекторов по формуле (93):

$$N = \frac{N_o}{\eta_s} = \frac{5}{0,82} = 6,1.$$

Принимается 7 протекторов.

14. Определяют анодную плотность тока

$$j = \frac{I_n}{S_n} = \frac{0,53 \cdot 100}{7 \cdot 0,125(3,14 \cdot 0,6 + 1,57 \cdot 0,125)} = 29,12 \text{ мА} / \text{дм}^2.$$

По рис. 18 находят, что коэффициент полезного действия протекторной установки $\eta_n = 0.57$.

15. По формуле (94) рассчитывается сила тока протектора

$$I_n = \frac{E_n - E_{есм}}{R_{p-r} + R_{np} + R_n} = \frac{1,6 - 0,55}{0,16 + 9,02 + 0,02} = 0,114 \text{ А}.$$

16. По формуле (88) определяется срок службы протекторов

$$T = \frac{G_n \eta_n \cdot \eta_u}{q I_n} = \frac{10 \cdot 0,57 \cdot 0,95}{3,97 \cdot 0,114} = 11,96 \text{ года}.$$

Здесь q - электрохимический эквивалент магниевых протекторов, равный 3.97 кг/(А год).

Ожидаемый срок службы протектора (с учетом отложения солей и образования продуктов коррозии)

$$0,45 \cdot 11,96 = 5,4 \text{ года}.$$

Пример 16. Определить параметры протекторной защиты резервуара РВС-2000 с помощью групповых протекторов. Исходные данные и промежуточные результаты взяты из предыдущего примера.

Решение

1. Определяют общее ориентировочное число протекторов, необходимое для защиты:

$$N_o = 1,4 \frac{I}{I_n} = 1,4 \frac{0,53}{0,114} = 6,51.$$

2. Сопротивление растеканию тока с групповой протекторной установки по формуле:

$$R_n = \frac{R_{n1}}{r \eta_s} = \frac{9,02}{4 \cdot 0,82} = 2,75 \text{ Ом}.$$

3. Сила тока групповой протекторной установки по формуле (94)

$$I_{n2} = \frac{E_n - E_{есм}}{R_{p-r} + R_{np} + R_r} = \frac{1,6 - 0,55}{2,75 + 0,16 + 0,02} = 0,36 \text{ А}.$$

Значением $R_{np} = 0.02$ Ом можно пренебречь вследствие малой величины.

4. Уточненное число протекторов в группе рассчитывают следующим образом:

$$N = \frac{N_1 I}{n I_{n2}} = \frac{4 \cdot 0,53}{2 \cdot 0,36} = 2,94.$$

5. Отклонение составляет

$$\frac{4 - 2,94}{4} \cdot 100 = 26,5\%.$$

Допустимым считается отклонение не более 15%. Поэтому принимается две групповых установки по три протектора в каждой ($n = 2, N_f = 3$).

6. По приведенным выше формулам находят новые значения параметров

$$R_{nz} = \frac{9,02}{3 \cdot 0,82} = 3,67 \text{ Ом};$$

$$I_{nz} = \frac{1,6 - 0,55}{3,67 + 0,16 + 0,02} = 0,273 \text{ А};$$

$$N = \frac{3 \cdot 0,53}{2 \cdot 0,273} = 2,91.$$

Отклонение при этом составит

$$\frac{3 - 2,91}{3} \cdot 100 = 3\%.$$

Этот результат вполне приемлем.

7. Срок службы протекторной установки по формуле (88)

$$T = \frac{G_n \eta_n \cdot \eta_u}{qI_1} = \frac{3 \cdot 10 \cdot 0,57 \cdot 0,95}{3,97 \cdot 0,273} = 15 \text{ лет}.$$

Ожидаемый срок службы $0,45 \cdot 10 = 6,75$ года.

Во избежание повреждения изоляционного покрытия солями растворяющегося протектора групповые установки (так же как и одиночные протекторы) располагают не ближе 3 м от резервуара.

В двух последних примерах это расстояние принято 10 м ($l_{np} = 10$ м).

Пример 17. Рассчитать протекторную защиту внутренней поверхности резервуара РВС-5000 от коррозии подтоварной воды с концентрацией солей 10%. Уровень подтоварной воды $h = 0,25$ м.

Решение:

1. Используя правило интерполяции, по табл. 16 определяют удельное электросопротивление среды

$$\rho_s = 0,1 - \frac{0,1 - 0,05}{18 - 8} (10 - 8) = 0,09 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

2. По этой же таблице аналогичным образом определяют зону действия одного протектора

$$S_3 = 20 - \frac{20 - 15}{18 - 8} (10 - 8) = 19 \text{ м}^2.$$

3. По табл. 19 выбирают протектор типа ПМР-20 с параметрами: $\sigma = 20$ кг, диаметр $d_n = 0,4$, высота $l_n = 0,14$ м.

4. Резервуар РВС-5000 имеет диаметр $Dp = 22,8$ м, т. е. $r = 11,4$ м. При уровне подтоварной воды $h = 0,25$ м площадь защищаемой поверхности резервуара равна

$$S_p = \pi r^2 + 2\pi r h = \pi(r + 2h) = 3,14 \cdot 11,4(11,4 + 2 \cdot 0,25) = 426 \text{ м}^2.$$

5. По формуле (96) находят необходимое число протекторов

$$N = \frac{3,6r(r + 2h)}{S_3} = \frac{1,15\pi r(r + 2h)}{S_3} = 1,15 \frac{S_p}{S_3} = 1,15 \frac{426}{19} = 25,78.$$

Здесь 1.15 – коэффициент, учитывающий возможность перекрытия круговых зон защиты отдельных протекторов, для того чтобы защитить всю площадь днища резервуара.

6. Размещают протекторы на днище резервуара. Для этого определяют радиус защиты (влияния) одного протектора

$$r_3 = \sqrt{\frac{S_3}{\pi}} = \sqrt{\frac{19}{3,14}} = 2,46.$$

Протекторы будут располагаться по концентрическим окружностям.

7. Определяют необходимое число рядов (концентрических окружностей) для размещения протекторов. Сначала находят, сколько раз r_3 укладывается в радиусе резервуара:

$$n = \frac{r}{r_3} = \frac{11,4}{2,46} = 4,63.$$

Округляют до 5 и, имея в виду, что ширина одного ряда равна $2r_3$, получается два ряда и один протектор в центре резервуара. Так как $5 > 4.63$, то зоны влияния между рядами будут перекрываться (рис. 21).

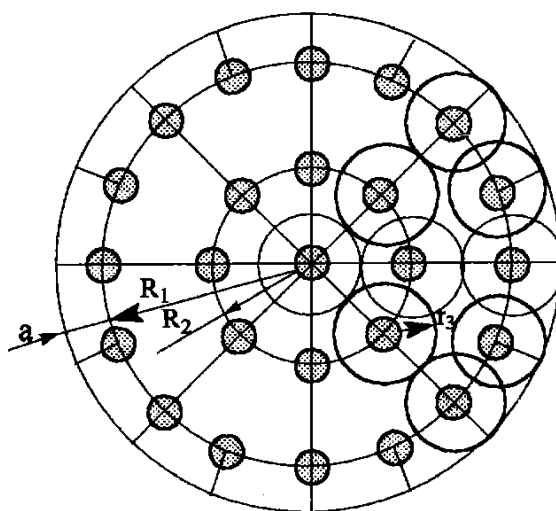


Рис. 21. Пример размещения 25 протекторов на днище резервуара РВС-5000 ($r = 11.4$ м, $R_1 = 9.2$ м, $R_2 = 4.6$ м, $r_3 = 2.46$ м, $a \approx 2.2$ м)

8. Определяются радиусы концентрических окружностей, по которым необходимо расположить протекторы. Из рис. 21 имеем: $r = a + R_p$, где $a = r_3 - h$, или $a = 2.46 - 0.25 = 2.2$ м.

Отсюда $R_1 = r - a = 11.4 - 2.2 = 9.2$ м.

Радиус второй окружности принимается равным половине R_1 , т. е. $R_2 = 0.5 \cdot R_1 = 0.5 \cdot 9.2 = 4.6$ м.

9. Исходя из одинаковой плотности размещения протекторов, получают соотношение:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{R_1}{R_2} = \frac{9.2}{4.6} = 2;$$

$$N_1 = 2N_2.$$

Следовательно,

$$N = 1 + N_2 + N_1 \text{ или } 25.78 = 1 + N_2 + 2N_2 = 1 + 3N_2,$$

откуда

$$N_2 = \frac{25.78 - 1}{3} = 8.26.$$

Если сделать округление в меньшую сторону, то получается $N_1 = 16$, $N_2 = 8$. Всего 25 протекторов ($N = 25$).

Если же округление сделать в большую сторону, то $N_1 = 18$, $N_2 = 9$, $N = 25$. На рис. 21 показано размещение 25 протекторов.

10. Используя правило интерполяции, определяют поляризационное сопротивление протектора

$$R_{\text{пол}} = 0.27 + \frac{0.40 - 0.27}{0.15 - 0.08} (0.09 - 0.01) = 0.29 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2.$$

11. Вычисляется площадь рабочей поверхности протектора

$$S_n = \pi d_n \left(\frac{d_n}{4} + l_n \right) = 3,14 \cdot 0,4 \left(\frac{0,4}{4} + 0,14 \right) = 0,3 \text{ м}^2.$$

12. По табл. 17 находят поправочный коэффициент, зависящий от уровня подтоварной воды, $K_y = 1,43$.

13. По формуле (98) определяют силу тока протектора

$$I_n = \frac{E_{n-3}}{\frac{\rho_3 (d_3 - d_n)}{4\pi h d n} + \frac{R_{\text{пол}}}{S_n} K_y} = \frac{1}{\frac{0,09(22,46 - 0,4)}{4 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 0,4} + \frac{0,29 \cdot 1,43}{0,3}} = 0,586 \text{ А}.$$

14. Срок службы протекторов по формуле (97):

$$T = 0,1 \frac{\sigma_n}{I_n} K_m = 0,1 \frac{20}{0,586} 1,3 = 4,44 \text{ года}.$$

5. ЭЛЕКТРОДРЕНАЖНАЯ ЗАЩИТА ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

5.1. Источники блуждающих токов

Источниками блуждающих токов являются линии железных дорог постоянного и переменного тока, трамвая, метрополитена, линии электропередачи постоянного тока, работающие по системе "провод-земля", линии электропередачи 220 кВ и выше, установок катодной защиты подземных металлических сооружений и ряд других установок. Напряжение питающих сетей обычно составляет для трамвая – 600 В, электрифицированных железных дорог на постоянном токе – 3300 В, на переменном токе – 25000 В.

Схема возникновения блуждающих токов приведена на рис. 22.

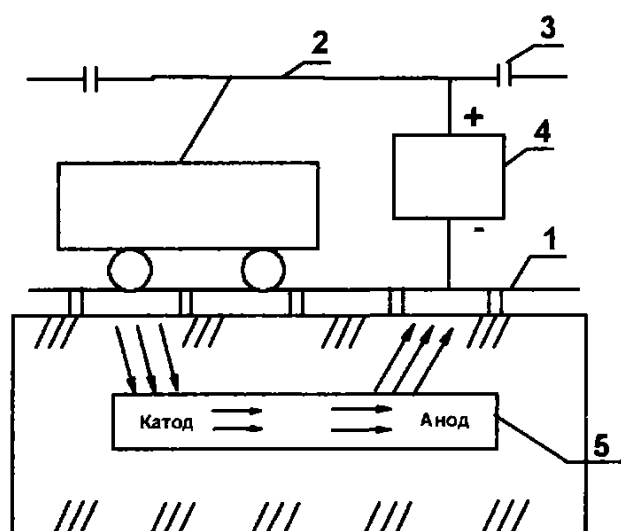


Рис. 22. Схема возникновения блуждающих токов

1 – рельс, 2 – контактный провод, 3 – разъединители контактной сети, 4 – тяговая подстанция, 5 – трубопровод

Устройство электроснабжения электрифицированного транспорта заключается в том, что положительный плюс источника питания подключается к контактному проводу, а отрицательный - к рельсам. При такой схеме электроснабжения тяговый ток от положительной шины подстанции по питающим фидерам (линиям) поступает в контактную сеть, оттуда через токоприемник к двигателю электро-

привода и далее через рельсы в отсасывающую линию к отрицательной шине тяговой подстанции. Вследствие контакта рельсов с землей наблюдается утечка токов. Ток распространяется по массиву земли, отыскивая пути наименьшего сопротивления (трубопроводы, кабели и т. д.). В местах входа тока на металлическое сооружение образуются катодные зоны. В анодных зонах, где ток выходит из металла, происходит его интенсивное разрушение, причем скорость коррозии подчиняется закону Фарадея.

Величина блуждающего тока весьма непостоянна во времени. Она зависит от числа составов и вагонов, курсирующих на линии, их взаимного расположения, моментов включения электродвигателей, состояния рельсового пути, сети подземных сооружений и т. д.

Замер величины блуждающих токов необходимо производить в течение некоторого времени (3–15 минут) три раза в сутки: утром, днем и вечером – наиболее характерные периоды нагрузки транспорта. Обычно для оценки величины блуждающего тока измеряют разность потенциала "труба-грунт" на подземном сооружении. В некоторых случаях определяют разность потенциалов между рельсом и подземным трубопроводом или между двумя подземными сооружениями. Величина разности потенциалов лишь косвенным образом отражает степень опасности блуждающего тока. Для точной оценки влияния блуждающих токов необходимо знать плотность тока на металле подземного сооружения.

Зная средние значения потенциалов "труба-грунт", на схеме подземного сооружения строят диаграмму потенциалов (рис. 23), с помощью которой определяют анодные и катодные зоны трубопровода и места максимальных утечек тока с рельсового пути. Имея такую диаграмму, можно установить вероятное направление движения тока в общем поле блуждающего тока, что может быть использовано для правильного выбора и осуществления защитных мер.

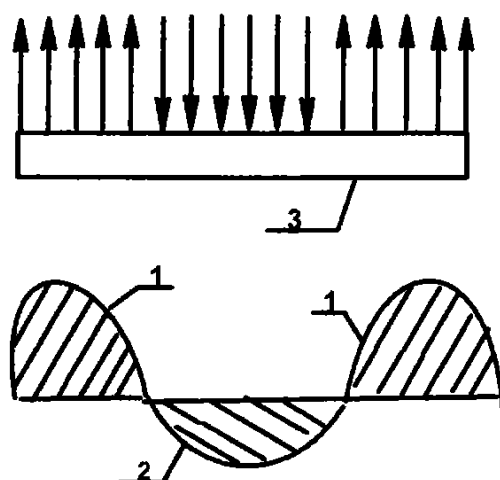


Рис. 23. Диаграмма потенциалов рельсовой сети
1 – анодная зона, 2 – катодная зона, 3 – трубопровод

5.2. Меры борьбы с блуждающими токами

Наличие блуждающего тока на трубопроводе устанавливают на основании замеров потенциалов и тока. Опасными величинами являются такие, которые дают сдвиг потенциала от естественного в положительную сторону, причем, чем больше этого сдвиг, тем больше вероятность коррозии вследствие возникновения блуждающих токов. При обнаружении на трубопроводе блуждающих токов возникает необходимость принятия защитных мер для предупреждения разрушений. Борьба с блуждающими токами проводится в двух направлениях:

- предупреждение их возникновения в опасных размерах;
- организация различных мероприятий по защите подземных трубопроводов.

Первый путь является наиболее эффективным, но также широко применяется и второй метод.

5.3. Предупреждение утечек токов

Для предотвращения больших утечек тока необходимо обес-

печить нужное состояние рельсового пути.

Основные требования к трамвайным путям:

- разность потенциалов между отсасывающими пунктами сети при отсутствии дренажных защитных устройств не должна превышать 1 вольт, при наличии дренажных устройств не должна превышать 2 вольт (приведенная к среднегодовой-среднесуточной нагрузке);
- сопротивление каждого рельсового стыка с приваренным электрическим соединителем не должно превосходить сопротивления рельса длиной 2.5 метра;

- электрические соединители должны быть установлены на каждом сборном стыке; на сборных стрелках, крестовинах, компенсаторах и т. д. – обходные; междурельсовые соединители через каждые 150 метров одного пути, междупутные через каждые 300...600 метров между рельсами двух соседних линий.

Основные требования к железнодорожным путям:

- расстояние между тяговыми подстанциями не должно превышать для однопутных 35 км и для двухпутных – 25 км;

- сопротивление стыков рельсов не должно превышать сопротивления рельса длиной 3 м;

- железнодорожный путь должен иметь междупутные соединители через каждые 300...600 метров.

Все эти мероприятия направлены на уменьшение сопротивления основного пути тока по рельсам.

Для уменьшения действия блуждающих токов рекомендуется: укладывать рельсы на шпалы, пропитанные диэлектриком, на бетонные шпалы для увеличения переходного сопротивления от рельсов к земле; укладывать пути на щебень; очищать пути от грязи.

Особое внимание следует уделять местам наибольшего сближения рельсов с трубопроводами (в основном, переходы).

Места перехода должны быть очень хорошо изолированы. Для этого трубопровод укладывают в кожухи, которые не имеют битумной изоляции. Трубопровод надежно изолируется от кожуха с помощью изоляторов или заливки битумом.

Действие блуждающего тока можно уменьшить применением секционирования, которое заключается в том, что по длине трубопровода устанавливается несколько изолирующих фланцев (рис. 24). Но при этом методе возможно появление новых анодных участков, поэтому он на практике применяется редко.

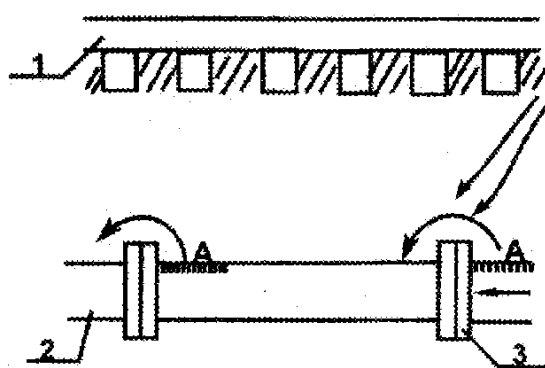


Рис. 24. Секционирование трубопровода

1 – железнодорожный путь, 2 – трубопровод, 3 – изолирующий фланец

Изолирующие фланцы (рис. 24) предназначены для электрического разъединения защищаемых участков трубопровода и незащищаемого, магистральной трубы от базовых трубопроводов, от газораспределительных станций (ГРС), от отводов и т. д. Изолирующие фланцы устанавливают в отдельных колодцах.

5.4. Электродренажная защита

Влияние блуждающих токов можно предупредить или совсем устранить применением установок электродренажной защиты, принцип работы которой заключается в устранении анодных зон на подземных трубопроводах при сохранении катодных зон. Это достигается отводом (дренажом) блуждающих токов с участков анодных зон в рельсовую цепь электротяги или на сборную шину отсасывающих кабелей тяговой подстанции. В зависимости от условий применения дренажные установки можно разделить на 4 группы – прямые, поляризованные, усиленные электродренажные установки и поляризованные протекторные установки (рис. 25).

Наиболее проста по конструкции установка прямого дренажа (рис. 25а). Она позволяет регулировать реостатом и контролировать по амперметру величину дренажного тока. Прямой дренаж обладает двусторонней проводимостью, применяется в зонах, где потенциал сооружения по отношению к рельсам электрифицированного транспорта всегда положителен. Однако во время аварийных или ремонтных отключений тяговой подстанции возможно перераспределение

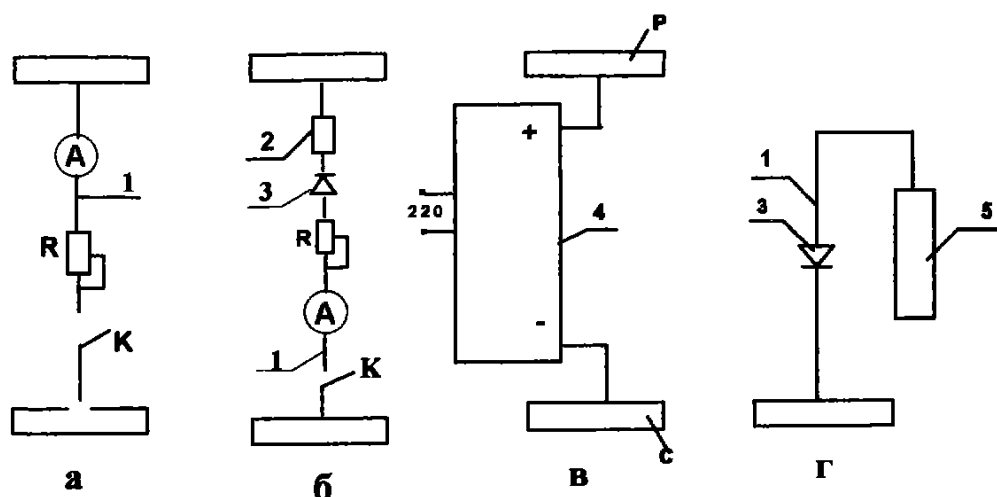


Рис. 25. Схема электродренажных установок, применяемых для борьбы с блуждающими токами

а – прямой дренаж; б – поляризованный дренаж; в – усиленный дренаж; г – поляризованный протектор; С – сооружение, Р – рельс; 1 – дренажные кабели; 2 – плавкий предохранитель; 3 – полупроводниковый вентиль; 4 – усиленная дренажная установка; 5 – протектор

участков нагрузки между сопряженными тяговыми подстанциями. Это может явиться причиной возникновения в прямом дренаже обратных токов и усугубить коррозионную опасность для трубопровода. Поэтому прямой дренаж применяется только при проведении опытных защит.

При устойчивой катодной зоне на трубопроводе, то есть отрицательной разности потенциалов "труба-грунт" (направление тока с рельса на трубы), электрический дренаж не применяется.

Поляризованный электродренаж (рис. 25б) применяется, когда потенциал защищаемого сооружения по отношению к грунту положительный или знакопеременный, а разность потенциалов "сооружение-рельс" больше разности потенциалов "сооружение-грунт". Благодаря введению в схему вентильного элемента поляризованный дренаж обладает односторонней проводимостью, что исключает попадание блуждающих токов в сооружение по дренажному кабелю при изменении режима работы тяговых подстанций.

Усиленный электродренаж (рис. 25в) применяют тогда, когда сооружение имеет положительный или знакопеременный потенциал по отношению к грунту, обусловленный действием источников блуждающих токов. Усиленный электродренаж представляет собой катодную установку, в которой отрицательный полюс присоединен

к защищаемому сооружению, а положительный к рельсам электрифицированного транспорта. Такой дренаж кроме отвода блуждающих токов от сооружения к рельсам обеспечивает дополнительную катодную защиту подземного сооружения.

Все электродренажные установки целесообразно подключать к средней точке путевого дросселя.

Поляризованные протекторные установки (рис. 25г) представляют собой обычную систему протекторов, присоединяемых к защищаемому подземному сооружению через полупроводниковые вентильные элементы. Поляризованные протекторные установки наиболее рационально использовать для защиты подземных сооружений от влияния блуждающих переменных токов. Они дают возможность через протектор снять с корродирующих металлических конструкций анодный полупериод переменного тока и оставить на них, благодаря наличию в цепи вентильного элемента, катодный полупериод, который обеспечивает их автоматическую катодную защиту.

5.5. Проектирование электродренажной защиты

При проектировании защиты подземных трубопроводов от коррозии блуждающими токами электрифицированных на постоянном токе железных дорог возникает необходимость в расчете основных параметров и элементов электродренажных установок:

- общего сопротивления дренажа, включая сопротивление соединительных кабелей и сопротивление реостата дренажа,
- сечение дренажного кабеля и тока в цепи дренажа, обеспечивающего защиту подземного сооружения на длине всей анодной зоны.

На основании данных эксплуатации и опыта проектирования электродренажной защиты нами выработаны следующие рекомендации:

1. При значениях потенциала "рельс-земля" в пределах от (-5) В и выше по МЭС в точке подключения рекомендуется устанавливать поляризованный электродренаж.
2. При значениях потенциала "рельс-земля" в пределах от (-5) В по МЭС и менее в точке подключения рекомендуется уста-

навливать усиленный электродренаж.

5.6. Расчет поляризованного дренажа

Ток поляризованного электродренажа определяется по известной формуле Тевенина [6]:

$$I_{\partial p} = \frac{V_{c-p}}{R_p + R_c + R_{\partial p}}, \quad (100)$$

где: $I_{\partial p}$ – ток дренажа, А;

V_{c-p} – разность потенциалов "сооружение-рельс", В;

R_p, R_c – входные сопротивления соответствующего рельса и сооружения, Ом;

$R_{\partial p}$ – сопротивление дренажной цепи (дренажных кабелей и дренажной установки), Ом.

В тех случаях, когда определение V_{c-p} представляет определенные трудности, ток электродренажа ориентировочно определяется из расчета по формуле

$$I_{\partial} = 0,2 \cdot I_{m.n.} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5, \quad (101)$$

где I_{∂} – сила тока в дренажной линии, А;

$I_{m.n.}$ – ток нагрузки тяговой подстанции, А;

K_1 – коэффициент, учитывающий расстояние до электрифицированной железной дороги;

K_2 – коэффициент, учитывающий расстояние до тяговой подстанции;

K_3 – коэффициент, учитывающий состояние изоляционного покрытия;

K_4 – коэффициент, учитывающий возраст подземного сооружения;

K_5 – коэффициент, учитывающий число параллельно уложенных трубопроводов.

Значения коэффициентов определяются по табл. 20–24.

Проверка правильности сечения дренажного кабеля произво-

дится по допустимой плотности тока $j_{\text{доп}}$, которая для медного кабеля равна 1 А/мм², а для алюминиевого равна 0.8 А/мм²

$$j = \frac{I_{\partial}}{S_k} \leq j_{\text{доп}}. \quad (102)$$

Таблица 20

Значение коэффициента K_1

Расстояние до электрифицированной железной дороги (не более), м	K_1
100	1
200	0.95
300	0.9
500	0.75
800	0.65
1000	0.55
1500	0.35
2000	0.25
3000	0.15

Таблица 21

Значение коэффициентов K_2

Расстояние до тяговой подстанции (не более), м	K_2
100	1
500	0.75
1000	0.4
2000	0.25
3000	0.15
6000	0.1

Таблица 22

Значение коэффициентов K_3

Состояние изоляционного покрытия	K_3
Нормальное	1
Усиленное	0.9
Весьма усиленное	0.6

Таблица 23

Значение коэффициентов K_4

Возраст трубопровода	K_4
Более пяти лет	1
Через три года	0.9
Через шесть месяцев	0.75

Таблица 24

Значение коэффициентов K_5

Число параллельных трубопроводов	K_5
1	0.8
2	0.9
3	0.95
4 и более	1

Необходимое при рассчитанном токе $I_{др}$ сечение дренажного кабеля определяется по уравнению

$$S = \frac{I_{др}}{\Delta V_{др}} \rho L, \quad (103)$$

где S – сечение дренажного кабеля, мм^2 ;

$\Delta V_{др}$ – допускаемое падение напряжения в дренажном кабеле, Ом, определяется по табл. 25, 26;

ρ – удельное сопротивление кабеля, $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$;

L – длина дренажного кабеля, м.

Допустимое падение напряжения в дренажном кабеле при подключении его к минусовой шине тяговой подстанции определяется по табл. 25.

Таблица 25

**Подключение дренажного кабеля к минусовой
шине тяговой подстанции**

Расстояние между отсасывающим пунктом и трубопроводом, км	0.2	0.5	1.0	2.0	3.0
$\Delta V_{др}$, В	10	11	12	13	15

Допустимое падение напряжения в дренажном кабеле при подключении его к рельсам через среднюю точку путевых дросселей определяется по табл. 26.

Таблица 26

**Подключение дренажного кабеля к средней точке
путевых дросселей**

Расстояние между трубопроводом и электрифицированной железной дорогой, км	0,5	1,0	2,0	3,0
$\Delta V_{др}$, В	3	5	6	7

При подключении дренажного кабеля к отсасывающим фидерам, рассчитывая площадь сечения дренажного кабеля, надо учитывать падение напряжения в фидере, то есть

$$\Delta V_{др} = \Delta V_k + \Delta V_{\phi}, \quad (104)$$

... ΔV_{ϕ} – падение напряжения в отсасывающем фидере, В.

По рассчитанному сечению выбирают дренажный кабель.

По полученному току выбирают тип электродренажной установки, основные конструктивные и электрические характеристики которых приведены в табл. 27, 28.

Таблица 27

**Технические характеристики устройств поляризованной
электродренажной защиты**

Тип электродренажного устройства	Номинальный ток, А	Допустимое обратное напряжение, В	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
ПД-3А	500	100	782х380х313	30
ПГД-60	60	150	550х365х255	25
ПГД-200	200	50	550х365х255	25
ПД-50 У1	50		750х458х1100	141
ПД-125 У1	125			180
ПД-200 У1	200		850х508х1500	240
ПД-300 У1	300			270
ПД-600 У1	500		1000х600х1800	320

Из формулы (100) видно, что даже при $R_{op} = 0$ существует предельное значение дренируемого тока, которого может оказаться недостаточно, чтобы обеспечить требуемые защитные потенциалы катодной поляризации на сооружении или более протяженную зону защиты.

Таблица 28

Технические характеристики усиленных электродренажей

Тип устройства	Номинальная выходная мощность, КВт	Номинальное выходное напряжение, В	Номинальный выходной ток, А	Ток непрерывной работы, А	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
УД	1.8	6/12	125/250			
УД-2400	2.4	3-48	200		1070х570х380	128
САУД-300	1.8	6	300	120	520х900х990	130
САУД-500	3.0	6	500	200	520х900х990	180

5.7. Расчет усиленного дренажа

Изначально, по-видимому, следует рассмотреть, что же представляет собой схема усиленного электродренажа с электротехнической точки зрения.

Дальнейшее увеличение тока электродренажа может быть достигнуто только за счет увеличения V_{c-p} введением в дренажную цепь дополнительной э. д. с., что и осуществляется при переходе к схеме

усиленного электродренажа.

$$I_{y.\partial p} = \frac{V_{c-p} + E}{R_p + R_c + R_{\partial p}}, \quad (105)$$

... E – э. д. с. выпрямителя, включенного последовательно в схему дренажа, В;

$$R'_{\partial p} = R_{\partial p} + r_0, \quad (106)$$

где r_0 – внутреннее сопротивление выпрямителя, Ом.

Из формулы (105):

$$I_{y.\partial p} = \frac{V_{c-p}}{R_p + R_c + R_{\partial p}} + \frac{E}{R_p + R_c + R_{\partial p}}, \quad (107)$$

или

$$I_{y.\partial p} = I_{\partial p} + I_{кз}. \quad (108)$$

Иначе говоря, ток усиленного дренажа можно представить состоящим из 2-х частей:

$I_{\partial p}$ – дренажная составляющая тока, обусловленная полем блуждающих токов в земле, А;

$I_{кз}$ – катодная составляющая тока, создаваемая источником э. д. с. и распределяемая в земле как ток катодной защиты с использованием тяговых рельсов в качестве анодного заземления. При отсутствии блуждающих токов (ночное время на пригородных участках, перерывы в движении поездов и т. д.) $I_{др} = 0$, формула (108) приобретает вид

$$I_{у.др} = I_{кз}, \quad (109)$$

то есть усиленный дренаж работает как катодная защита.

Из формулы (105) видно, что одной и той же величины тока дренажа можно достичь, увеличивая $R_{др}$ (принимая дренажные кабели меньшего сечения), но одновременно повышая E . В действительности же при увеличении $R_{др}$ происходит уменьшение $I_{др}$, но вместе с тем, с увеличением E увеличивается $I_{кз}$, а сумма токов остается неизменной, то есть происходит изменение процентного соотношения дренажной и катодной составляющих тока усиленного электродренажа.

Применение схемы усиленного электродренажа возможно в трех характерных зонах потенциалов рельсовой сети: в катодной, нулевой и анодной. Если в первом случае имеются обе составляющие тока дренажа, то во втором и третьем – только катодная составляющая. Наличие катодной составляющей дренажного тока предполагает использование ходовых рельсов железной дороги в качестве разъедаемого анода. В этом скрыта первая серьезная опасность для железнодорожных конструкций.

Министерством путей сообщения не рекомендуется токи усиленных электродренажей применять более 15 А. При использовании трамвайной рельсовой сети в качестве разъедаемого анода, нормативными документами, токи усиленных электродренажей не регламентируются.

5.8. Примеры расчетов электродренажной защиты

Пример 18. Определить параметры электродренажной защиты магистрального газопровода диаметром 720 мм, проходящего вдоль электрифицированной на постоянном токе железной дороги на расстоянии 200 м. Газопровод имеет защитное покрытие усиленного типа и эксплуатируется в течение трех лет. Ток тяговой подстанции равен 1000 А.

Исходные данные для расчета:

1. План газопровода с нанесенной электрифицированной железной дорогой М 1 : 1000.

2. Результаты электрометрических измерений с интервалом 1 км приведены в табл. 29.

Таблица 29

Результаты электрометрических измерений

Номер точки	т.1	т.2	т.3	т.4	т.5	т.6	т.7
$U_{p-з}$ по стальному электроду сравнения В	-11.6	-8.3	-8.2	-7.1	-7.0	-5.1	-5.0
$U_{т-з}$ по медно-сульфатному электроду сравнения, В	+2.0	+1.6	+1.6	+1.2	+1.2	+1.0	+1.0

Решение:

1. Строится совмещенная потенциальная диаграмма на рельсовой сети и подземном газопроводе (рис. 26).

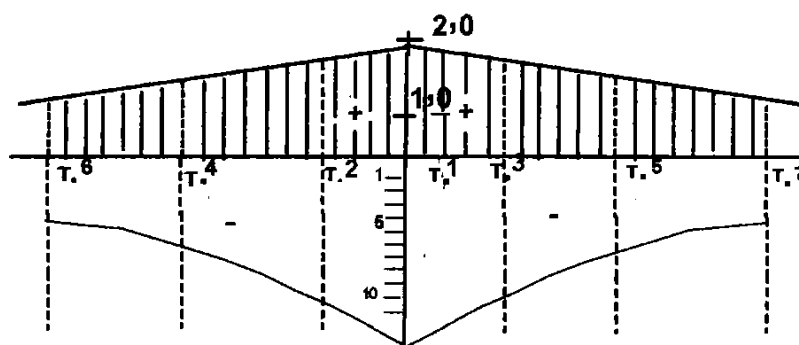


Рис. 26. Потенциальная диаграмма на подземных сооружениях

2. Выбирается тип электродренажа.

Т. к. в точке дренажа потенциал $U_{p-з} = -11.6$ В по с. э, т. е. больше (-5) В, то выбирается поляризованный электродренаж.

3. Определяется максимальный дренажный ток по формуле (101). Согласно условию задачи по табл. 20–24 выбирают значения коэффициентов:

$$K_1 = 0.95; K_2 = 1.0; K_3 = 0.9; K_4 = 0.9; K_5 = 0.8.$$

$$I_{оп} = 0,2 \cdot I_{м.н.} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 = 0,2 \cdot 1000 \cdot 0,95 \cdot 1,0 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,8 = 124 А$$

4. Определяют сечение дренажного кабеля по формуле (103)

$$S_k = \frac{j_{\partial p}}{\Delta U_{\partial p}} \rho_{np} l_k = \frac{124}{3} \cdot 0,029 \cdot 200 = 239,5 \text{ мм}^2.$$

Для сооружения электродренажной линии выбран алюминиевый кабель ААШВ с удельным сопротивлением $\rho = 0,029 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. Выбирается кабель марки ААШВ 3 х 95 (Приложение 7).

5. Проверяется правильность подбора кабеля по формуле (102):

$$j = \frac{j_{\partial p}}{S_k} = \frac{124}{240} = 0,52 \text{ А / мм}^2 < 0,8 \text{ А / мм}^2.$$

Пример 19. Подобрать кабель электродренажной установки для двух параллельных нефтепроводов, проложенных на расстоянии 1 км от электрифицированной железной дороги. Электродренажная установка расположена на расстоянии 500 м от тяговой подстанции. Максимальные токи тяговой подстанции $I_{т.п} = 600 \text{ А}$. Трубопровод введен в эксплуатацию 9 лет назад, изоляция усиленного типа в хорошем состоянии.

Решение:

1. Для сооружения электродренажной линии выбирается алюминиевый провод с удельным электросопротивлением

$$\rho = 0,029 \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

2. При подключении дренажного кабеля к рельсовой сети через среднюю точку путевых дросселей допустимое падение напряжения в дренажной цепи:

$$\Delta U = \Delta U_{\phi} + \Delta U_k = 11 + 3 = 14 \text{ В}.$$

3. Согласно условию задачи выбираются значения коэффициентов

$$k_1 = 0,55; k_2 = 0,75; k_3 = 0,9; k_4 = 1; k_5 = 0,9.$$

4. По формуле (101) определяют максимальную силу тока в дренажной цепи

$$I_{\text{др}} = 0,2 \cdot I_{\text{м.н.}} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 = 0,2 \cdot 600 \cdot 0,55 \cdot 0,75 \cdot 0,9 \cdot 1,0 \cdot 0,9 = 40,1 \text{ А.}$$

5. Находят по формуле (103) необходимую площадь дренажного кабеля.

6. Выбирается провод марки А-95, состоящий из семи проводов диаметром 4.15 мм каждый (7 х 4.15), с суммарной площадью поперечного сечения 94.9 мм².

7. Проверяют правильность выбранной площади сечения кабеля, имея в виду, что допустимая плотность тока для алюминия равна 0.8 А/мм²:

$$j = I_{\text{др}} / S_{\text{д.к}} = 40.1 / 94.9 = 0.423 \text{ А/мм}^2 < 0.8 \text{ А/мм}^2.$$

Пример 20. Определить параметры электродренажной защиты подземных коммуникаций на территории микрорайона площадью 5 га. Микрорайон примыкает к трамвайной рельсовой сети.

Исходные данные:

1. Сводный план подземных коммуникаций территории микрорайона в М 1 : 500.

2. Результаты электрометрических измерений.

На территории микрорайона расположены газопроводы, водопроводы и тепловоды. Параметры подземных трубопроводов приведены в табл. 30.

Таблица 30

Параметры подземных трубопроводов

газопроводы		водопроводы		тепловоды	
Д, мм	l, м	Д, мм	l, м	Д, мм	l, м
89	126	100	150	2 125	162
100	592	150	108	2 200	130
		200	120	2 100	122

Результаты электрометрических измерений потенциалов "рельс-грунт" и "труба-грунт" с интервалом 200 м приведены в табл. 31.

Таблица 31

Результаты электрометрических измерений

Номер точки	1	2	3	4	5	6	7
$U_{p-з}$ по стальному электроду сравнения	-0,5	-0,8	-1,0	-1,1			
$U_{m-з}$ по медно-сульфатному электроду сравнения	-0,42	-0,38	-0,30	-0,32	-0,42	-0,45	-0,5

Естественный потенциал равен (-0.55) В по МЭС.

Коррозионная активность грунта на площади микрорайона находится в пределах 16–24 Ом · м. Принимается среднее значение $\rho = 20$ Ом · м.

Решение

1. Выбирают тип электродренажа. Так как потенциал в точке дренажа $U_{p-з} = -0.8$ В по МЭС, т. е. меньше (-5) В, то выбирается усиленный электродренаж.

2. Рассчитывается дренажный ток по методике, рассмотренной в [2]. Определяют поверхность трубопроводов, расположенных на территории микрорайона. Поверхность всех газопроводов:

$$S_r = \pi \sum_{i=1}^n dl 10^{-3} = 3,14(89 \cdot 126 + 100 \cdot 592) \times 10^{-3} = 221,1 \text{ м}^2.$$

Аналогично определяется поверхность всех водопроводов: $S_b = 173.3 \text{ м}^2$; теплопроводов: $S_{мен} = 367.1 \text{ м}^2$.

Суммарная поверхность всех трубопроводов:

$$\sum S = S_r + S_b + S_{мен} = 761,5 \text{ м}^2.$$

Величина средней защитной плотности тока определяется по формуле:

$$j = 30 - (99a + 128c + 33,9d + 3,33e + 0,61f + 4,96\rho) \cdot 10^{-3} =$$

$$= 30 - (99 \cdot 22,7 + 128 \cdot 48,2 + 33,9 \cdot 44,2 + 3,33 \cdot 34,6 + 0,61 \cdot 73,4 + 4,96 \cdot 20) \cdot 10^{-3} = 19,8 \text{ мА} / \text{м}^2.$$

Определяют коэффициенты b, c, d, e, f :

$$b = (S_a / \sum S) 10^2 = (173,3 / 761,5) 10^2 = 22,7\%;$$

$$c = (S_{мен} / \sum S) 10^2 = (367,1 / 761,5) 10^2 = 48,2\%;$$

$$d = (S_r / S_{мер}) = 221,1 / 5 = 44,2 \text{ м}^2 / \text{га};$$

$$e = (S_a / S_{мер}) = 173,3 / 5 = 34,6 \text{ м}^2 / \text{га};$$

$$f = (S_{мен} / S_{мер}) = 367,1 / 5 = 73,4 \text{ м}^2 / \text{га}.$$

3. Величина суммарного защитного тока, необходимого для обеспечения катодной поляризации подземных трубопроводов, расположенных в микрорайоне, равна:

$$I = 1,3j \sum S = 1,3 \cdot 0,0198 \cdot 761,5 = 19,6 \text{ А}.$$

Принимая величину суммарного тока катодной защиты 20 А, устанавливают один усиленный электродренаж.

4. По плану района находят место расположения электродренажной станции. Зона действия электродренажной станции определяется по формуле:

$$R = 60 \sqrt{I_{к.с.} / (jk)} = 60 \sqrt{20 / (0,0198 \cdot 152,3)} = 154,5 \text{ м}.$$

Определяют удельную плотность сооружения:

$$k = \sum S / S_{мер} = 761,5 = 152,3.$$

Полученный радиус действия электродренажной станции

охватывает всю территорию района защиты.

5. По величине защитного тока, используя табл. 5, выбирают сечение кабеля 50 мм^2 . К прокладке принимаем кабель ААШВ 3 х 16 длиной 100 м

$$R_{\text{каб}} = 0.058 \text{ Ом.}$$

6. Входное сопротивление защищаемого трубопровода

$$R_{\text{вх}} = 0.02 \text{ Ом.}$$

7. Определяется выходное напряжение

$$U_{\text{вых}} = I(R_{\text{каб}} + R_{\text{вх}}) = 20(0.058 + 0.02) = 1.56 \text{ В.}$$

С учетом 30% запаса на развитие сети выбирают электродренажную станцию САУД-300 с параметрами $U = 6 \text{ В}$, $I = 125 \text{ А}$.

6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ ПОДЗЕМНЫХ КОММУНИКАЦИЙ

Проектирование защиты от электрохимической коррозии подземных коммуникаций любых объектов ведется в соответствии со СНИП-11-01-95. В проектной документации на объект в пояснительной записке имеется раздел по защите от коррозии коммуникаций и к нему прилагается графическое сопровождение с соответствующими согласованиями.

Иногда в проектной организации отсутствуют специалисты по защите от коррозии подземных коммуникаций, и она вынуждена приглашать для проектирования субподрядную организацию. В этом случае проектирование усложняется.

Субподрядная организация в этом случае выдает отдельный проект по защите от электрохимической коррозии подземных коммуникаций.

Ниже в качестве примера приводится ход проектирования защиты от электрохимической коррозии водовода от водозабора до города.

1. После получения письма с просьбой о выполнении проекта от Заказчика, проектная организация составляет задание на проектирование и договор на проектно-изыскательские работы. В особых условиях к договору указывается, что Заказчик выдает проектной организации план трассы водовода в М 1 : 500 или М 1 : 1000 и план Водовода в М 1 : 5000 или М 1 : 25000.

2. После подписания договора и перечисления аванса проектная организация приступает к выполнению изыскательских работ. Они включают измерение удельного сопротивления грунта, измерение потенциала "труба-грунт", записи потенциалов "труба-грунт" регистрирующими приборами и потенциалов "рельс-грунт" по медно-сульфатному или стальному электродам сравнения, если есть необходимость. Если по трассе проектируемого водовода имеются существующие установки активной защиты, то определяется эффективность их работы.

После завершения изыскательских работ результаты их наносятся на план трассы водовода и составляется заключение по результатам электрометрических изысканий.

В заключении указываются:

1. Значение коррозионной активности грунта.
2. Наличие блуждающих токов и их источники.
3. Тип рекомендуемого защитного покрытия.
4. Необходимость наложения катодной поляризации или ее необходимость.

В проектной части производятся необходимые расчеты, в соответствии с вышеприводимыми методиками, выбираются места размещения катодных установок и анодных заземлителей, а при необходимости производится дополнительная топографическая съемка участков. Результаты проектно-изыскательских работ наносятся на планы района М1 : 5000. Катодные установки размещаются на планах трассы М1 : 500 или М1 : 1000.

Выполняются необходимые согласования, сметные расчеты, составляются заказные спецификации оборудования и материалов.

Заказчику выдается необходимое количество экземпляров выполненного проекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жук Н. П. Коррозия и защита металлов. Расчеты. – М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1957. – 332 с.
2. Стрижевский И. В., Зиневич А. М., Никольский К. К. и др. Защита металлических сооружений от подземной коррозии. – М.: Недра, 1981. – 294 с.
3. Кузнецов М. В., Новоселов В. Ф., Тугунов П. И., Котов В. Ф. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. – М.: Недра, 1992. – 240 с.
4. Красноярский В. В., Цикерман Л. Я. Коррозия и защита подземных металлических сооружений. – М.: Высшая школа, 1968. – 296 с.
5. Зиневич А. М., Глазков В. И., Котик В. Г. Защита трубопроводов и резервуаров от коррозии. – М.: Недра, 1975. – 287 с.
6. Кузнецов М. В. Коррозия и защита нефтегазового и нефтегазового промышленного оборудования. – Уфа: Уфимский нефтяной институт, 1988. – 62 с.
7. ГОСТ 9.602-89. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Госкомитет СССР по стандартам, 1989. – 51 с.
8. ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. – М.: Госстандарт России, 1998. – 42 с.
9. Рахманкулов Д. Л., Кузнецов М. В., Габитов А. И., Зенцов В. Н., Кузнецов А. М. Современные системы защиты от электрохимической коррозии подземных коммуникаций. Т. 1. Катодная защита густоразветвленной сети подземных трубопроводов. – Уфа: ГНТИ "Реактив", 1999. – 232 с.
10. СНиП 11-01-95. Инструкция о порядке разработки, согласования, утверждения и составе проектной документации на строительство предприятий, зданий и сооружений. – М.: Минстрой России, 1995. – 52 с.
11. Новоселов В. Ф., Коршак А. А., Димитров В. Н. Типовые расчеты противокоррозионной защиты металлических сооружений нефтегазопроводов и нефтебаз. – Уфа: Уфимский нефтяной институт, 1985. – 101 с.
12. РД 153-39.4-09-01. Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии. – М.: 4-й филиал Воениздата, 2002. – 202 с.
13. Бутырский А. П., Кузнецов М. В., Тугунев П. И. Защита от коррозии заглубленных в грунт емкостей // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – М.: ЦНИИТЭ нефтехимии, 1972. – № 6. – С. 16.

14. Муниц М. М. Влияние контуров заземления на электробезопасность при защите силовых кабелей от коррозии. // РНТС. Коррозия и защита в нефтегазовой промышленности. – М.: ВНИИОЭНГ, 1973. – № 1. – С. 11.
15. Глазов Н. П., Иванов В. Т., Спиридонов А. В., Кирина Л. Ф., Никитенко Е. А. Исследование токораспределения на трубопроводе при защите его протяженными протекторами в неоднородной среде. // Методы и средства электрохимической защиты магистральных трубопроводов от подземной коррозии: Сборник научных трудов. – М.: ВНИИСТ. 1980. – 144 с.
16. Никитенко Е. А., Эдельман Я. М. Монтер по защите подземных трубопроводов от коррозии. – М.: Недра, 1981. – 254 с.

Приложение 1

Таблица 32

Ионное произведение воды при различных температурах
и $p = 0,1$ Мпа

$$K = a_{H^+} \cdot a_{OH^-};$$

$$\lg K_B = -\frac{6013,79}{T} - 23,6521 \lg T + 64,7013$$

t в $^{\circ}\text{C}$	$K_B \cdot 10^{14}$	t в $^{\circ}\text{C}$	$K_B \cdot 10^{14}$	t в $^{\circ}\text{C}$	$K_B \cdot 10^{14}$
0	0.144	25	1.008	55	7.297
5	0.185	30	1.469	60	9.614
10	0.292	35	2.089	70	17
15	0.451	40	2.919	80	26
18	0.570	45	4.018	90	39
20	0.681	50	5.474	100	59

Приложение 2

Таблица 33

Произведение растворимости труднорастворимых в воде
электролитов при $p=0,1$ Мпа

Произведение растворимости электролита $K_m A_n$, распадающегося в воде на ионы по уравнению

$$K_m A_n = mK^{n+} + nA^{m-}, \text{ равно}$$

$$L_{K_m A_n} = (a_{K^{n+}})^m (a_{A^{m-}})^n,$$

где $a_{K^{n+}}$ – активность катиона K^{n+} , $a_{A^{m-}}$ – активность аниона A^{m-} .

По произведению растворимости можно найти растворимость электролита в воде в г-моль/л и концентрации катиона и аниона в насыщенном водном растворе в г-ион/л.

Электролит	t в °C	L	Электролит	t в °C	L
Ag_3AsO_8	25	$4,5 \times 10^{-19}$	Au_2O_3	25	$8,5 \times 10^{-46}$
Ag_3AsO_4	25	$1,0 \times 10^{-19}$	$\text{Ba}(\text{BrO}_3)_2$	25	$3,3 \times 10^{-5}$
AgBO_2	25	$3,6 \times 10^{-3}$	BaCO_3	25	$4,93 \times 10^{-9}$
AgBr	18	$4,0 \times 10^{-13}$	$\text{Ba}(\text{COO})_2$	25	$1,7 \times 10^{-7}$
	25	$6,3 \times 10^{-13}$	BaCrO_4	18	$1,6 \times 10^{-10}$
AgBrO_3	20	$3,97 \times 10^{-5}$		25	$2,3 \times 10^{-10}$
	25	$5,77 \times 10^{-5}$	BaF_2	9,5	$1,6 \times 10^{-6}$
$\text{Ag}(\text{CH}_3\text{COO})$	25	$4,4 \times 10^{-3}$		18	$1,7 \times 10^{-6}$
$\text{Ag}(\text{C}_4\text{H}_9\text{COO})$	20	8×10^{-5}		26	$1,73 \times 10^{-6}$
$\text{Ag}(\text{C}_8\text{H}_4\text{OHCOO})$	20	$1,4 \times 10^{-5}$	BaJO_3	10	$8,4 \times 10^{-11}$
$\text{Ag}(\text{C}_6\text{H}_5\text{COO})$	20	$9,3 \times 10^{-5}$		25	$1,25 \times 10^{-9}$
AgCN	18	$2,2 \times 10^{-13}$	BaMnO_4	25	$2,5 \times 10^{-10}$
AgCNO	18-20	$2,3 \times 10^{-7}$	BaSO_4	25	$9,9 \times 10^{-11}$
AgCNS	18	$0,49 \times 10^{-12}$	$\text{Be}(\text{OH})_2$ H_2BeO_2 $\text{Be}_2\text{O}(\text{OH})_2$	25	$2,7 \times 10^{-19}$
	25	$1,16 \times 10^{-12}$		25	2×10^{-30}
AgCNSe	18-20	$4,0 \times 10^{-16}$		25	4×10^{-19}
Ag_2CO_3	25	$8,15 \times 10^{-12}$	BiOCl $\text{Bi}(\text{OH})_3$ $\text{BiO}(\text{OH})$ Bi_2S_3	25	7×10^{-9}
$\text{Ag}_2(\text{COO})_2$	25	$1,1 \times 10^{-11}$		18	$4,3 \times 10^{-31}$
AgCl	4,7	$0,21 \times 10^{-10}$		25	1×10^{-12}
	9,7	$0,37 \times 10^{-10}$		25	$7,1 \times 10^{-61}$
	25	$1,7 \times 10^{-10}$	CaCO_3	15	$0,99 \times 10^{-8}$
	50	$13,2 \times 10^{-10}$		25	$4,82 \times 10^{-9}$
	100	$21,5 \times 10^{-10}$	$\text{Ca}(\text{COO})_2$	18	$1,78 \times 10^{-9}$
Ag_2CrO_4	15	$1,2 \times 10^{-12}$		25	$3,8 \times 10^{-9}$
	25	9×10^{-12}	$\text{Ca}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6)$	18	$7,7 \times 10^{-7}$
$\text{Ag}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$	25	2×10^{-7}	CaCrO_4	18	$2,3 \times 10^{-2}$
$\text{Ag}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$	25	$9,8 \times 10^{-26}$	CaF_2	18	$3,4 \times 10^{-11}$
$\text{Ag}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$	25	$1,5 \times 10^{-41}$		26	$3,95 \times 10^{-11}$
$\text{Ag}_2[\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}]$	25	$7,8 \times 10^{-13}$	$\text{Ca}(\text{JO}_3)_2$	10	$2,2 \times 10^{-7}$
AgJ	13	$0,32 \times 10^{-16}$		18	$7,4 \times 10^{-7}$
	25	$8,5 \times 10^{-17}$		25	$1,9 \times 10^{-6}$
AgJO_3	9,4	$0,92 \times 10^{-8}$		30	$3,9 \times 10^{-6}$
	25	$3,2 \times 10^{-8}$	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	18	$5,5 \times 10^{-6}$
AgMnO_4	25	$3,1 \times 10^{-11}$		25	$3,1 \times 10^{-5}$

Продолжение таблицы 33

Ag_2MoO_4	18	$3,1 \times 10^{-11}$	CaHPO_4	25	5×10^{-6}
AgNO_2	25	$7,2 \times 10^{-4}$	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	25	1×10^{-25}
Ag_2O	25	20×10^{-8}	CaSO_4	10	$6,1 \times 10^{-5}$
				25	$6,26 \times 10^{-5}$
AgOH	18	$1,5 \times 10^{-8}$	CdCO_3	25	$1,82 \times 10^{-14}$
Ag_3PO_4	20	$1,8 \times 10^{-18}$	$\text{Cd}(\text{COO})_2$	25	$1,53 \times 10^{-8}$
Ag_2S	25	$5,9 \times 10^{-52}$	$\text{Cd}(\text{OH})_2$	18	$2,62 \times 10^{-15}$
Ag_2SO_4	25	6×10^{-6}	CdS	25	$1,2 \times 10^{-28}$
Ag_3VO_4	20	5×10^{-7}	$\text{Ce}[(\text{COO})_2]_2$	20	$2,6 \times 10^{-29}$
Ag_2WO_4	18	$5,2 \times 10^{-10}$	$\text{Ce}(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6)_2$	20	$9,7 \times 10^{-20}$
$\text{Al}(\text{OH})_3$ кислота свежеосажденная	18	6×10^{-13}	$\text{Ce}(\text{JO}_3)_4$	20	$3,5 \times 10^{-10}$
после старения	18	$1,5 \times 10^{-15}$	Hg_2CrO_4	25	2×10^{-9}
	25	$3,7 \times 10^{-15}$	Hg_2J_2	25	$4,95 \times 10^{-29}$
$\text{Al}(\text{OH})_3$ основание	18	$2,0 \times 10^{-32}$	$\text{Hg}_2(\text{JO}_3)_2$	25	$3,0 \times 10^{-20}$
	25	$1,9 \times 10^{-33}$	Hg_2O	25	$1,8 \times 10^{-24}$
$\text{AsO}(\text{HO})$	25	6×10^{-10}	HgO	25	$1,4 \times 10^{-26}$
As_2S_3	18	4×10^{-29}	$\text{Hg}_2(\text{OH})_2$	18	$7,8 \times 10^{-24}$
CoCO_3	25	$1,45 \times 10^{-13}$	$\text{Hg}(\text{OH})_2$	18	$1,1 \times 10^{-26}$
$\text{Co}(\text{OH})_2$	25	$1,6 \times 10^{-18}$	Hg_2S	18	$1,0 \times 10^{-47}$
$\text{Co}(\text{OH})_3$	25	$2,5 \times 10^{-43}$	HgS	25	1×10^{-45}
$\text{CoS-}\alpha$	25	$3,1 \times 10^{-23}$	Hg_2SO_4	25	$4,7 \times 10^{-7}$
$\text{CoS-}\beta$	18	$1,9 \times 10^{-27}$	Hg_2WO_4	18	$1,1 \times 10^{-17}$
$\text{CoS-}\gamma$	25	$3,0 \times 10^{-26}$	Ir_2O_3	25	10^{-45}
$\text{NaK}_2\text{Co}(\text{NO}_2)_6$	25	$2,2 \times 10^{-11}$	KClO_4	25	$1,07 \times 10^{-2}$
$\text{Cr}(\text{OH})_2$	18	$2,0 \times 10^{-20}$	$\text{KH}(\text{C}_4\text{H}_5\text{O}_6)$	18	$3,8 \times 10^{-4}$
$\text{Cr}(\text{OH})_3$	17	$5,4 \times 10^{-31}$	K_2PtCl_6	18	$1,1 \times 10^{-5}$
	25	$6,7 \times 10^{-31}$	K_2PdCl_6	25	$5,97 \times 10^{-6}$
Cu_2Br_2	25	$5,3 \times 10^{-9}$	$\text{La}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$	18	2×10^{-28}
$\text{Cu}_2(\text{CNS})_2$	25	4×10^{-14}	$\text{La}_2(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6)_3$	18	2×10^{-19}
CuCo_3	25	$2,36 \times 10^{-10}$	$\text{La}(\text{JO}_3)_3$	18	$5,9 \times 10^{-10}$
$\text{Cu}(\text{COO})_2$	25	$2,87 \times 10^{-8}$	$\text{La}(\text{OH})_3$	25	10^{-20}
Cu_2Cl_2	25	$1,8 \times 10^{-7}$	Li_2Co_3	25	$1,66 \times 10^{-3}$
CuCl_2	25	$2,9 \times 10^{-6}$	LiF	25	$5,2 \times 10^{-3}$
Cu_2J_2	25	$1,1 \times 10^{-12}$	$\text{Lu}(\text{OH})_3$	25	10^{-26}
$\text{Cu}(\text{JO}_3)_2$	25	$1,4 \times 10^{-7}$	MgCO_3	25	$1,0 \times 10^{-5}$
$\text{Cu}(\text{OH})_2$	18	$1,31 \times 10^{-20}$			
	25	$5,6 \times 10^{-20}$			
Cu_2O	25	$1,2 \times 10^{-15}$			
CuS	25	$3,2 \times 10^{-38}$			
Cu_2S	25	$2,6 \times 10^{-49}$			

FeCO_3	20	$2,5 \times 10^{-11}$	$\text{Mg}(\text{COO})_2$	18	$8,6 \times 10^{-5}$
	25	$2,11 \times 10^{-11}$	MgF_2	18	$7,1 \times 10^{-9}$
$\text{Fe}(\text{COO})_2$	25	$2,1 \times 10^{-7}$		27	$6,4 \times 10^{-9}$
$\text{Fe}(\text{OH})_2$	18	$0,95 \times 10^{-15}$	MgNH_4PO_4	25	$2,5 \times 10^{-13}$
	25	$1,65 \times 10^{-15}$	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	25	$5,5 \times 10^{-12}$
$\text{Fe}(\text{OH})_3$	18	$3,16 \times 10^{-38}$	MgS	25	$2,0 \times 10^{-15}$
	25	4×10^{-38}	MnCO_3	25	$5,05 \times 10^{-10}$
FeS	25	$3,8 \times 10^{-20}$	$\text{Mn}(\text{OH})_2$	18	4×10^{-14}
Fe_2S_3	22	$1,0 \times 10^{-68}$	MnS	25	$1,1 \times 10^{-15}$
$\text{Ga}(\text{OH})_3$	25	5×10^{-37}	$\text{Nd}_2(\text{C}_2\text{O}_4)_3$	25	$5,87 \times 10^{-29}$
GeO_2	25	$1,1 \times 10^{-10}$	NiCO_3	25	$1,35 \times 10^{-7}$
$\text{HfO}(\text{OH})_2$	25	1×10^{-25}	$\text{Ni}(\text{OH})_2$	18	$1,35 \times 10^{-15}$
Hg_2Br_2	25	$4,6 \times 10^{-23}$		25	$1,6 \times 10^{-14}$
$\text{Hg}_2(\text{CH}_3\text{COO})_2$	25	2×10^{-15}	Nis- α	18	$3,0 \times 10^{-21}$
$\text{Hg}_2(\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6)$	18	2×10^{-10}	Nis- β	18	1×10^{-26}
$\text{Hg}_2(\text{CN})_2$	25	5×10^{-40}	Nis- γ	18	$1,4 \times 10^{-24}$
$\text{Hg}_2(\text{CNS})_2$	25	$3,0 \times 10^{-20}$	SrCo_3	25	$9,42 \times 10^{-10}$
Hg_2CO_3	25	$9,0 \times 10^{-17}$	$\text{Sr}(\text{COO})_2$	18	$5,6 \times 10^{-8}$
$\text{Hg}_2(\text{COO})_2$	18	2×10^{-13}	SrCrO_4	15	$3,5 \times 10^{-5}$
Hg_2Cl_2	25	$1,15 \times 10^{-18}$	SrF_2	27	$3,4 \times 10^{-9}$
PbBr_2	25	$6,3 \times 10^{-6}$	$\text{Sr}(\text{HCO}_3)_2$	25	$1,83 \times 10^{-6}$
$\text{Pb}(\text{BrO}_3)_2$	25	$1,6 \times 10^{-4}$	SrSO_4	3	$2,77 \times 10^{-7}$
PbCO_3	25	$7,24 \times 10^{-14}$		25	$2,8 \times 10^{-7}$
$\text{Pb}(\text{COO})_2$	18	$3,2 \times 10^{-11}$	$\text{TeO}(\text{OH})_2$	25	1×10^{-11}
PbCl_2	25	$1,7 \times 10^{-5}$	$\text{Te}(\text{OH})_4$	18	7×10^{-53}
PbClF	25	$2,8 \times 10^{-9}$	$\text{Th}(\text{OH})_4$	25	1×10^{-50}
PbCrO_4	25	$1,8 \times 10^{-14}$	Ti_2O_3	25	1×10^{-40}
PbF_2	9	$2,7 \times 10^{-8}$	$\text{TiO}(\text{OH})_4$	25	1×10^{-30}
	18	$3,2 \times 10^{-8}$	TlBr	25	$4,2 \times 10^{-6}$
	27	$3,7 \times 10^{-8}$	TlBrO_3	25	$3,9 \times 10^{-4}$
PbHPO_4	25	$1,2 \times 10^{-10}$	TlCNS	25	$2,2 \times 10^{-4}$
PbJ_2	15	$7,47 \times 10^{-9}$	TlCl	25	$2,6 \times 10^{-4}$
	25	$8,7 \times 10^{-9}$	TlJ	25	$5,8 \times 10^{-8}$
$\text{Pb}(\text{JO}_3)_2$	9,2	$5,3 \times 10^{-14}$	TlJO_3	25	$3,4 \times 10^{-6}$
	18	$1,2 \times 10^{-13}$	TlOH	25	$7,2 \times 10^{-1}$
	26	$2,6 \times 10^{-13}$	$\text{Ti}(\text{OH})_3$	25	$1,4 \times 10^{-53}$
PbO	25	$5,5 \times 10^{-16}$	Ti_2S	18	$4,5 \times 10^{-23}$

Продолжение таблицы 33

PbO_2	25	1×10^{-64}	$\text{UO}_2(\text{OH})_2$	25	2×10^{-15}
$\text{Pb}(\text{OH})_2$	18	$5,3 \times 10^{-51}$			
Pb_3O_4	25	$6,8 \times 10^{-13}$	$\text{Y}(\text{OH})_3$	25	1×10^{-24}
$\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$	25	$1,5 \times 10^{-32}$	$\text{Yb}(\text{COO})_2$	25	$4,45 \times 10^{-25}$
PbS	25	$6,8 \times 10^{-29}$	ZnCO_3	25	$9,98 \times 10^{-11}$
PbSO_4	25	$1,8 \times 10^{-8}$	$\text{Zn}(\text{COO})_2$	25	$7,5 \times 10^{-9}$
$\text{Pd}(\text{OH})_2$	25	1×10^{-24}	$\text{Zn}(\text{OH})_2$	18	$1,97 \times 10^{-17}$
$\text{Pt}(\text{OH})_2$	25	1×10^{-35}		25	$4,5 \times 10^{-17}$
PtS	25	1×10^{-68}			
RaSO_4	20	$4,25 \times 10^{-11}$	$\text{ZnS-}\alpha$	25	$7,4 \times 10^{-27}$
RbClO_4	25	$2,5 \times 10^{-3}$	$\text{ZnS-}\beta$	25	$1,1 \times 10^{-24}$
$\text{Sb}(\text{OH})_3$	20	4×10^{-42}	$\text{ZnSO}_4 \times 3\text{Zn}(\text{OH})_2$	20	3×10^{-54}
$\text{SbO}(\text{OH})$	25	10^{-11}	$\text{ZrO}(\text{OH})_2$	25	1×10^{-26}
Sb_2O_3	25	10^{-17}			
Sb_2S_3	25	$2,9 \times 10^{-59}$			
$\text{Sc}(\text{OH})_3$	25	10^{-28}			
H_2SiO_3	25	1×10^{-10}			
$\text{Sn}(\text{OH})_2$	20	$1,4 \times 10^{-28}$			
$\text{Sn}(\text{OH})_4$	20	1×10^{-56}			
SnS	25	$1,0 \times 10^{-27}$			

Показательные и гиперболические функции

Таблица 34

x	e^x	e^{-x}	sh(x)	ch(x)	th(x)
1	2	3	4	5	6
0,00	1,0000	1,00	0,0000	1,0000	0,0000
01	1,0101	0,9900	0,0100	1,0001	0,0100
02	1,0202	0,9802	0,0200	1,0002	0,0200
03	1,0305	0,9704	0,0300	1,0005	0,0300
04	1,0408	0,9608	0,0400	1,0008	0,0400
0,05	1,0513	0,9512	0,0500	1,0013	0,0500
06	1,0618	0,9418	0,0600	1,0018	0,0599
07	1,0725	0,9324	0,0701	1,0025	0,0699
08	1,0833	0,9231	0,0801	1,0032	0,0798
09	1,0942	0,9139	0,0901	1,0041	0,0898
0,10	1,1052	0,9048	0,1002	1,0050	0,0997
11	1,1163	0,8958	0,1102	1,0061	0,1096
12	1,1275	0,8869	0,1203	1,0072	0,1194
13	1,1388	0,8781	0,1304	1,0085	0,1293
14	1,1503	0,8694	0,1405	1,0098	0,1391
0,15	1,1618	0,8607	0,1506	1,0113	0,1489
16	1,1735	0,8521	0,1607	1,0128	0,1586
17	1,1853	0,8437	0,1708	1,0145	0,1684
18	1,1972	0,8353	0,1810	1,0161	0,1781
19	1,2092	0,8270	0,1911	1,0181	0,1877
0,20	1,2214	0,8187	0,2013	1,0201	0,1974
21	1,2337	0,8106	0,2115	1,0221	0,2070
22	1,2461	0,8025	0,2218	1,0243	0,2165
23	1,2586	0,7945	0,2320	1,0266	0,2260
24	1,2712	0,7866	0,2423	1,0289	0,2355
0,25	1,2840	0,7788	0,2526	1,0314	0,2249
26	1,2969	0,7711	0,2629	1,0340	0,2543
27	1,3200	0,7634	0,2733	1,0367	0,2636
28	1,3232	0,7558	0,2837	1,0395	0,2729
29	1,3364	0,7483	0,2941	1,0423	0,2821
0,30	1,3499	0,7408	0,3045	1,0453	0,2913
31	1,3634	0,7334	0,3150	1,0484	0,3004
32	1,3771	0,7261	0,3255	1,0516	0,3095
33	1,3910	0,7189	0,3360	1,0549	0,3185
34	1,4049	0,7118	0,3466	1,0584	0,3275
0,35	1,4191	0,7047	0,3572	1,0619	0,3364
36	1,4333	0,6977	0,3678	1,0655	0,3452
37	1,4477	0,6907	0,3785	1,0692	0,3540

Продолжение таблицы 34

1	2	3	4	5	6
38	1,4623	0,6839	0,3892	1,0731	0,3627
39	1,4770	0,6771	0,4000	1,0770	0,3514
0,40	1,4918	0,6703	0,4108	1,0811	0,3799
41	1,5068	0,6637	0,4216	1,0852	0,3885
42	1,5220	0,6570	0,4325	1,0895	0,3869
43	1,5373	0,6505	0,4434	1,0939	0,4053
44	1,5527	0,6440	0,4543	1,0984	0,4136
0,45	1,5683	0,6376	0,4553	1,1020	0,4219
46	1,5811	0,6313	0,4764	1,1077	0,4301
47	1,6000	0,6250	0,4875	1,1125	0,4382
48	1,6161	0,6188	0,4986	1,1174	0,4462
49	1,6323	0,6126	0,5098	1,1225	0,4542
0,50	1,6487	0,6065	0,5211	1,1276	0,4621
51	1,6653	0,6005	0,5324	1,1329	0,4699
52	1,6820	0,5945	0,5438	1,1383	0,4777
53	1,6989	0,5886	0,5552	1,1438	0,4854
54	1,7160	0,5827	0,5566	1,1494	0,4930
0,55	1,7333	0,5769	0,5782	1,1551	0,5005
56	1,7607	0,5712	0,5897	1,1609	0,5080
57	1,7683	0,5655	0,6014	1,0692	0,5154
58	1,7860	0,5599	0,6131	1,1730	0,5227
59	1,8040	0,5543	0,6248	1,1792	0,5299
0,60	1,8221	0,5488	0,6367	1,1855	0,5370
61	1,8404	0,5434	0,6485	1,1919	0,5441
62	1,8589	0,5379	0,6605	1,1984	0,5511
63	1,8776	0,5326	0,6725	1,2051	0,5581
64	1,8965	0,5273	0,6846	1,2119	0,5649
0,65	1,9155	0,5220	0,6967	1,2258	0,5717
66	1,9348	0,5169	0,7090	1,2258	0,5784
67	1,9542	0,5117	0,7213	1,2330	0,5850
68	1,9739	0,5066	0,7336	1,2402	0,5915
69	1,9937	0,5016	0,7461	1,2476	0,5980
0,70	2,0138	0,4966	0,7586	1,2552	0,6044
71	2,0340	0,4916	0,7712	1,2628	0,6107
72	2,0544	0,4868	0,7838	1,2706	0,6169
73	2,0751	0,4819	0,7966	1,2785	0,6231
74	2,0959	0,4771	0,8094	1,2865	0,6291
0,75	2,1170	0,4624	0,8223	1,2947	0,6351
76	2,1383	0,4677	0,8353	1,3030	0,6411
77	2,1598	0,4630	0,8484	1,3114	0,6469
78	2,1815	0,4584	0,8615	1,3199	0,6527
79	2,2034	0,4538	0,8748	1,3286	0,6584

1	2	3	4	5	6
0,80	2,2255	0,4493	0,8881	1,3374	0,6640
81	2,2479	0,4449	0,9015	1,3464	0,6696
82	2,2705	0,4404	0,9150	1,3555	0,6751
83	2,2933	0,4360	0,9286	1,3647	0,6805
84	2,3164	0,4317	0,9223	1,3740	0,6858
0,85	2,3396	0,4274	0,9561	1,3835	0,6911
86	2,3632	0,4232	0,9700	1,3932	0,6963
87	2,3869	0,4190	0,9840	1,4029	0,7014
88	2,4109	0,4148	0,9981	1,4128	0,7064
89	2,4351	0,4107	1,0122	1,4229	0,7114
0,90	2,4596	0,4066	1,0265	1,4331	0,7163
91	2,4843	0,4025	1,0409	1,4434	0,7211
92	2,5093	0,3985	1,0554	1,4539	0,7259
93	2,5345	0,3946	1,0700	1,4645	0,7306
94	2,5600	0,3906	1,0847	1,4753	0,7352
0,95	2,5857	0,3867	1,0995	1,4862	0,7398
96	2,6117	0,3829	1,1144	1,4973	0,7443
97	2,6379	0,3791	1,1294	1,5085	0,7487
98	2,6645	0,3753	1,1446	1,5199	0,7531
99	2,6912	0,3716	1,1598	1,5314	0,7574
0,100	2,7183	0,3679	1,1752	1,5431	0,7616
01	2,7456	0,3642	1,1907	1,5549	0,7658
02	2,7732	0,3606	1,2063	1,5669	0,7699
03	2,8011	0,3570	1,2220	1,5790	0,7739
04	2,8292	0,3535	1,2379	1,5913	0,7779
1,05	2,8577	0,3499	1,2539	1,6038	0,7818
06	2,8864	0,3465	1,2700	1,6164	0,7857
07	2,9154	0,3430	1,2862	1,6292	0,7895
08	2,9447	0,3396	1,3025	1,6421	0,7932
09	2,9743	0,3362	1,3190	1,6552	0,7969
1,10	3,0042	0,3329	1,3356	1,6685	0,8005
11	3,0344	0,3296	1,3524	1,6820	0,8041
12	3,0649	0,3263	1,3693	1,6956	0,8076
13	3,0957	0,3230	1,3863	1,7093	0,8110
14	3,1268	0,3198	1,4035	1,7233	0,8144
1,15	3,1582	0,3166	1,4208	1,7374	0,8173
16	3,1899	0,3135	1,4382	1,7517	0,8210
17	3,2220	0,3104	1,4558	1,7662	0,8243
18	3,2544	0,3073	1,4735	1,7808	0,8275
19	3,2871	0,3042	1,4914	1,7957	0,8306
1,20	3,3201	0,3012	1,5095	1,8107	0,8337

Продолжение таблицы 34

1	2	3	4	5	6
17	3,2220	0,3104	1,4558	1,766	0,8243
18	3,2544	0,3073	1,4735	1,7808	0,8275
19	3,2871	0,3042	1,4914	1,7957	0,8306
1,20	3,3201	0,3012	1,5095	1,8107	0,8337
21	3,3535	0,2982	1,5276	1,8258	0,8367
22	3,3872	0,2952	1,5460	1,8412	0,8397
23	3,4212	0,2923	1,5645	1,8568	0,8426
24	3,4556	0,2894	1,5831	1,8725	0,8455
1,25	3,4903	0,2865	1,6019	1,9994	0,8483
26	3,5254	0,2837	1,6209	1,9045	0,8511
27	3,5609	0,2808	1,6400	1,9208	0,8508
28	3,5966	0,2780	1,6593	1,9373	0,8565
29	3,6328	0,2753	1,6788	1,9540	0,8591
1,30	3,6693	0,2725	1,6984	1,9709	0,8617
31	3,7062	0,2698	1,7182	1,9880	0,8643
32	3,7434	0,2671	1,7381	2,0053	0,8668
33	3,7810	0,2645	1,7583	2,0228	0,8692
34	3,8190	0,2618	1,7786	2,0404	0,8717
1,35	3,8574	0,2592	1,7991	2,0583	0,8741
36	3,8962	0,2567	1,8198	2,0764	0,8764
37	3,9354	0,2541	1,8406	2,0947	0,8787
38	3,9749	0,2516	1,8617	2,1132	0,8810
39	4,0149	0,2491	1,8829	2,1320	0,8832
1,40	4,0552	0,2466	1,9043	2,1509	0,8854
41	4,0960	0,2441	1,9259	2,1700	0,8875
42	4,1371	0,2417	1,9477	2,1894	0,8896
43	4,1787	0,2393	1,9697	2,2090	0,8917
44	4,2207	0,2369	1,9919	2,2288	0,8937
1,45	4,2631	0,2346	2,0143	2,2438	0,8957
46	4,3060	0,2322	2,0369	2,2691	0,8977
47	4,3492	0,2299	2,0597	2,2896	0,8996
48	4,3929	0,2276	2,0827	2,3103	0,9015
49	4,4371	0,2254	2,1059	2,3312	0,9033
1,50	4,4817	0,2331	2,1293	2,3524	0,9051
51	4,5267	0,2209	2,1529	2,3738	0,9069
52	4,5722	0,2187	2,1768	2,3955	0,9087
53	4,6182	0,2165	2,2008	2,4174	0,9104
54	4,6646	0,2144	2,2251	2,4395	0,9121
1,55	4,7115	0,2122	2,2496	2,4619	0,9138
56	4,7588	0,2101	2,2743	2,4845	0,9154
57	4,8006	0,2080	2,2993	2,5073	0,9170

1	2	3	4	5	6
58	4,8550	0,2060	2,3245	2,5305	0,9186
59	4,9037	0,2039	2,3499	2,5538	0,9201
1,60	4,9530	0,2019	2,3756	2,5775	0,9217

Примечание

Основным разделом приложения 3 можно пользоваться также для отыскания значений функций $\operatorname{Arsh} x$, $\operatorname{Arch} x$, $\operatorname{Artg} x$. Если задано какое-либо значение X из промежутка, в котором одна из этих обратных функций определена, то для нахождения соответствующего значения этой функции мы ищем заданное значение X в столбце соответствующей прямой функции; искомое значение обратной функции находится против этого значения в крайнем левом столбце.

Пример

Требуется найти $\operatorname{Arch} 1,8258$. Число 1,8258 ищем в столбце $\operatorname{ch}(x)$. При $\operatorname{ch} 1,8258 X = 1,21$, поэтому $\operatorname{Arch} 1,8258 = 1,21$.

Приложение 4

Таблица 35

Показательные функции (для X от 1,6 до 10,0)

X	e^x	e^{-x}
1	2	3
1,60	4,9530	0,2019
1,61	5,0028	0,1999
1,62	5,0531	0,1979
1,63	5,1039	0,1959
1,64	5,1552	0,1940
1,65	5,2070	0,1920
1,66	5,2593	0,1901
1,67	5,3122	0,1882
1,68	5,3656	0,1864
1,69	5,4195	0,1845
1,70	5,4739	0,1827
1,71	5,5290	0,1809
1,72	5,5845	0,1791
1,73	5,6407	0,1773
1,74	5,6973	0,1755
1,75	5,7546	0,1738
1,76	5,8124	0,1720
1,77	5,8709	0,1703
1,78	5,9299	0,1686
1,79	5,9895	0,1670
1,80	6,0496	0,1653
1,81	6,1104	0,1637
1,82	6,1719	0,1620
1,83	6,2339	0,1604
1,84	6,2965	0,1588
1,85	6,3598	0,1572
1,86	6,4237	0,1557
1,87	6,4883	0,1541
1,88	6,5635	0,1526
1,89	6,6194	0,1511
1,90	6,6859	0,1496
1,91	6,7531	0,1481
1,92	6,8210	0,1466
1,93	6,8895	0,1451
1,94	6,9588	0,1437
1,95	7,0287	0,1423
1,96	7,0993	0,1409
1,97	7,1707	0,1395

1	2	3
1,98	7,2427	0,1381
1,99	7,3155	0,1367
2,00	7,3891	0,1353
2,01	7,4633	0,1340
2,02	7,5383	0,1327
2,03	7,6141	0,1313
2,04	7,6906	0,1300
2,05	7,7679	0,1287
2,06	7,8460	0,1275
2,07	7,9248	0,1262
2,08	8,0045	0,1249
2,09	8,0849	0,1237
2,10	8,1662	0,1225
2,11	8,2482	0,1212
2,12	8,3311	0,1200
2,13	8,4149	0,1188
2,14	8,4994	0,1177
2,15	8,5849	0,1165
2,16	8,6711	0,1153
2,17	8,7583	0,1142
2,18	8,8463	0,1130
2,19	8,9352	0,1119
2,20	9,0250	0,1108
2,21	9,1157	0,1097
2,22	9,0273	0,1086
2,23	9,2999	0,1075
2,24	9,3933	0,1065
2,25	9,4877	0,1054
2,26	9,5831	0,1044
2,27	9,6794	0,1033
2,28	9,7767	0,1023
2,29	9,8749	0,1013
2,30	9,9742	0,10026
2,31	10,074	0,09926
2,32	10,176	0,09827
2,33	10,276	0,09730
2,34	10,381	0,09633
2,35	10,486	0,09537
2,36	10,591	0,09442
2,37	10,697	0,09348
2,38	10,805	0,09255

Продолжение таблицы 35

1	2	3
2,39	10,913	0,09163
2,40	11,023	0,09072
2,41	11,134	0,08982
2,42	11,246	0,08892
2,43	11,359	0,08804
2,44	11,473	0,08716
2,45	11,588	0,08629
2,46	11,705	0,08543
2,47	11,822	0,08458
2,48	11,941	0,08374
2,49	12,061	0,08291
2,50	12,182	0,08209
2,51	12,305	0,08127
2,52	12,429	0,08046
2,53	12,554	0,07966
2,54	12,680	0,07887
2,55	12,807	0,07808
2,56	12,936	0,07730
2,57	13,066	0,07654
2,58	13,197	0,07677
2,59	13,330	0,07502
2,60	13,464	0,07427
2,61	13,599	0,07353
2,62	13,736	0,07280
2,63	13,874	0,07208
2,64	14,013	0,07136
2,65	14,154	0,07065
2,66	14,296	0,06995
2,67	14,440	0,06925
2,68	14,585	0,06856
2,69	14,732	0,06788
2,70	14,880	0,06721
2,71	15,029	0,06654
2,72	15,180	0,06587
2,73	15,333	0,06522
2,74	15,487	0,06457
2,75	15,643	0,06393
2,76	15,800	0,06329
2,77	15,959	0,06266
2,78	16,119	0,06204
2,79	19,281	0,06142

1	2	3
2,80	16,445	0,06081
2,81	16,610	0,06020
2,82	16,777	0,05961
2,83	16,945	0,05901
2,84	17,116	0,05843
2,85	17,288	0,05784
2,86	17,462	0,05727
2,87	17,637	0,05670
2,88	17,814	0,05613
2,89	17,993	0,05558
2,90	18,174	0,05502
2,91	18,357	0,05448
2,92	18,541	0,05393
2,93	18,728	0,05340
2,94	18,916	0,05287
2,95	19,106	0,05234
2,96	19,298	0,05182
2,97	19,492	0,05130
2,98	19,688	0,05079
2,99	19,886	0,05029
3,00	20,086	0,04979
3,01	20,287	0,04929
3,02	20,491	0,04880
3,03	20,697	0,04832
3,04	20,905	0,04783
3,05	21,115	0,04736
3,06	21,328	0,04689
3,07	21,542	0,04642
3,08	21,758	0,04596
3,09	21,977	0,04550
3,10	22,198	0,04505
3,11	22,421	0,04460
3,12	22,646	0,04416
3,13	22,874	0,04372
3,14	23,104	0,04328
3,15	23,336	0,04285
3,16	23,571	0,04243
3,17	23,807	0,04200
3,18	24,047	0,04159
3,19	24,288	0,04113
3,20	24,533	0,04076

Продолжение таблицы 35

1	2	3
3,21	24,779	0,04036
3,22	25,028	0,03996
3,23	25,280	0,03956
3,24	25,534	0,03916
3,25	25,790	0,03877
3,26	26,050	0,03839
3,27	26,311	0,03801
3,28	26,576	0,03763
3,29	26,843	0,03725
3,30	27,113	0,03688
3,31	27,385	0,03652
3,32	27,660	0,03615
3,33	27,938	0,03579
3,34	28,219	0,03544
3,35	28,503	0,03508
3,36	28,789	0,03474
3,37	29,079	0,03439
3,38	29,371	0,03405
3,39	29,666	0,03371
3,40	29,954	0,03337
3,41	30,265	0,03304
3,42	30,569	0,03271
3,43	30,877	0,03239
3,44	31,187	0,03206
3,45	31,500	0,03175
3,46	31,817	0,03143
3,47	32,187	0,03112
3,48	32,460	0,03081
3,49	32,786	0,03050
3,50	33,115	0,03020
3,51	33,448	0,02990
3,52	33,784	0,02960
3,53	34,124	0,02990
3,54	34,467	0,02901
3,55	34,813	0,02872
3,56	35,163	0,02844
3,57	35,517	0,02816
3,58	35,874	0,02788
3,59	36,234	0,02760
	36,598	0,02732
3,60		
3,61	36,966	0,02705

1	2	3
3,62	37,338	0,0678
3,63	37,713	0,03652
3,64	38,092	0,02625
3,65	38,475	0,02599
3,66	38,861	0,02573
3,67	39,252	0,02548
3,68	39,646	0,02522
3,69	40,045	0,02497
3,70	40,447	0,02472
3,71	40,854	0,02448
3,72	41,264	0,02423
3,73	41,679	0,02399
3,74	42,098	0,02375
3,75	42,521	0,02352
3,76	43,330	0,02328
3,77	43,816	0,02305
3,78	44,256	0,02282
3,79	44,701	0,02260
3,80	45,604	0,02237
3,81	45,150	0,02215
3,82	45,604	0,02193
3,83	46,063	0,02171
3,84	46,525	0,02149
3,85	46,9937	0,02128
3,86	47,465	0,02107
3,87	47,942	0,02086
3,88	48,424	0,02065
3,89	48,911	0,02045
3,90	49,402	0,02024
3,91	49,899	0,02004
3,92	50,400	0,01984
3,93	50,907	0,01964
3,94	51,419	0,01945
3,95	51,935	0,01925
3,96	52,457	0,01906
3,97	52,985	0,01887
3,98	53,513	0,01869
3,99	54,055	0,01850
4,0	54,598	0,01832
4,1	60,340	0,01157
4,2	66,686	0,01500

Продолжение таблицы 35

1	2	3
4,3	73,700	0,01357
4,4	81,451	0,01228
4,5	90,017	0,01111
4,6	99,484	0,01005
4,7	109,95	0,00910
4,8	121,51	0,00823
4,9	134,29	0,00745
5,0	148,41	0,00674
5,1	164,02	0,00610
5,2	181,27	0,00552
5,3	200,34	0,00499
5,4	221,41	0,00452
5,5	244,69	0,00409
5,6	270,43	0,00370
5,7	298,87	0,00335
5,8	330,30	0,00308
5,9	365,04	0,00274
6,0	403,43	0,002479
6,1	445,86	0,002243
6,2	492,75	0,002029
6,3	544,57	0,001836
6,4	601,85	0,001662
6,5	665,14	0,001503
6,6	795,10	0,001360
6,7	812,41	0,001231
6,8	897,85	0,001114
6,9	992,27	0,001008
7,0	1096,6	0,000912
7,1	1212,0	0,000825
7,2	1339,4	0,000747
7,3	1480,3	0,000678
7,4	1636,0	0,000612
7,5	1808,0	0,000553
7,6	1998,2	0,000500
7,7	2208,3	0,000453
7,8	2440,6	0,000410
7,9	2697,3	0,000371
8,0	2981,0	0,000325
8,1	3294,5	0,000304
8,2	3641,0	0,000275
8,3	4023,9	0,000249
8,4	4447,1	0,000225

1	2	3
8,5	4914,8	0,000203
8,6	5431,7	0,000184
8,7	6002,9	0,000167
8,8	6634,2	0,000151
8,9	7332,0	0,000136
9,0	8103,1	0,000123
9,1	8955,3	0,000112
9,2	9897,1	0,000101
9,3	10938	0,000083
9,4	12088	0,000091
9,5	13360	0,000075
9,6	14765	0,000068
9,7	16318	0,000061
9,8	18034	0,000055
9,9	19930	0,000050
10,0	22026	0,000045

Приложение 5

Продольное сопротивление R_T $10^6 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ магистральных трубопроводов диаметром 146-1420 мм (удельное сопротивление трубной стали принималось равным $0,245 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ при температуре 20°C)

Таблица 36

Диаметр трубопровода, мм	Толщина стенки, мм									
	4	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
146	137	111	101	92,9	86,1	80,2	75,1	70,7		
152	132	106	96,8	89,1	82,5	76,9	72,0	67,7		
159	126	101	92,4	85,0	78,7	73,3	68,7	64,6		
168	119	95,7	87,3	80,3	74,6	69,2	64,8	61,0		
180	111	98,2	81,3	74,7	69,2	64,4	60,3	56,7		
194	103	82,6	75,3	69,2	64,0	59,6	55,8	52,4		
219	90,7	73,2	66,5	61,1	56,5	52,6	49,2	46,2		
245	80,9	65,0	59,2	54,4	50,3	46,8	43,8	41,1		
273	72,5	58,2	53,0	48,7	45,0	41,9	39,2	36,8		
299	66,1	53,1	48,3	44,4	41,0	38,2	35,7	33,5		
325	60,8	48,8	44,4	40,8	37,7	35,1	32,8	30,8		
377	52,3	41,9	38,2	35,0	32,4	30,1	28,2	26,4	24,9	
426	46,2	37,3	38,7	31,0	28,6	24,6	24,9	23,3	22,0	20,83
530		29,7	27,1	24,8	22,9	21,3	19,9	18,7	17,6	16,6
720					16,8	15,6	14,6	13,7	12,6	12,2

Таблица 37

Диаметр трубопровода, мм	Толщина стенки, мм							
	8	8,5	9,0	9,5	10	10,5	11	11,5
1	2	3	4	5	6	7	8	9
820							8,77	8,39
1020	12,0	11,3	10,7	10,1	9,63	9,18	7,03	6,73
1220			8,58	8,13	7,72	7,36	5,87	5,61

Таблица 38

Диаметр трубопровода, мм	Толщина стенки, мм						
	12	12,5	14	15	16	17	20
1	2	3	4	5	6	7	8
1020			5,54	5,18	4,86		
1220	6,45	6,20	4,62	4,32	4,05	3,82	3,25
1420	5,38	5,17	3,96	3,70	3,47	3,27	2,79

Приложение 6

Таблица 39

Сопротивление растеканию с вертикального заземления из заземлителей АК-1 и АК-3

Число заземлителей	Удельное сопротивление грунтов, Ом · м									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
5	0,77	1,54	2,31	3,08	3,85	4,62	5,39	6,16	6,93	7,30
6	0,65	1,30	1,95	2,60	3,25	3,90	4,55	5,20	5,83	6,50
7	0,56	1,12	1,68	2,24	2,80	3,35	3,92	4,48	5,04	5,60
8	0,50	1,0	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,08
9	0,45	0,9	1,35	1,80	2,25	2,70	3,15	3,60	4,05	4,03
10	0,41	0,82	1,23	1,64	2,05	2,46	2,87	2,38	3,69	4,00
11	0,37	0,74	1,11	1,48	1,85	2,22	2,59	2,95	3,33	3,70
12	0,35	0,69	1,04	1,38	1,73	2,07	2,41	2,76	3,11	3,45
13	0,32	0,64	0,96	1,28	1,60	1,92	2,24	2,56	2,88	3,20
14	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
15	0,28	0,56	0,84	1,12	1,40	1,68	1,96	2,24	2,52	2,80
16	0,27	0,53	0,80	1,06	1,33	1,59	1,85	2,12	2,38	2,65
17	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50
18	0,24	0,48	0,72	0,96	1,20	1,44	1,68	1,92	2,16	2,40
19	0,23	0,45	0,58	0,90	1,13	1,35	1,58	1,80	2,03	2,25
20	0,22	0,43	0,65	0,88	1,08	1,29	1,57	1,72	1,94	2,18
21	0,21	0,41	0,62	0,84	1,05	1,23	1,44	1,64	1,85	2,05
22	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
23	0,19	0,38	0,57	0,76	0,95	1,14	1,33	1,52	1,71	1,90
24	0,19	0,37	0,56	0,74	0,93	1,11	1,30	1,49	1,67	1,85
25	0,18	0,35	0,53	0,70	0,85	1,05	1,23	1,40	1,58	1,76

Таблица 40

Двухрядное заземление из заземлителей АК-1 и АК-3

Число заземлителей	Удельное сопротивление грунтов, Ом · м									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2 x 10	0.25	0.49	0.74	0.98	1.23	1.47	1.72	1.96	2.21	2.45
2 x 11	0.22	0.44	0.66	0.88	1.10	1.32	1.54	1.76	1.98	2.20
2 x 12	0.21	0.41	0.62	0.82	1.03	1.23	1.44	1.64	1.85	2.05
2 x 13	0.20	0.39	0.59	0.78	0.98	1.17	1.37	1.55	1.76	1.95
2 x 14	0.19	0.37	0.55	0.74	0.93	1.11	1.30	1.48	1.67	1.85
2 x 15	0.18	0.35	0.53	0.70	0.88	1.05	1.23	1.40	1.58	1.75
2 x 16	0.17	0.33	0.50	0.66	0.83	0.90	1.13	1.32	1.40	1.65
2 x 17	0.16	0.31	0.47	0.62	0.78	0.93	1.09	1.24	1.40	1.55
2 x 18	0.15	0.30	0.45	0.60	0.75	0.90	1.05	1.20	1.35	1.50
2 x 19	0.14	0.28	0.43	0.56	0.70	0.84	0.98	1.12	1.26	1.40
2 x 20	0.14	0.27	0.41	0.54	0.68	0.81	0.95	1.08	1.22	1.35
2 x 21	0.13	0.26	0.40	0.53	0.66	0.79	0.92	1.06	1.19	1.32
2 x 22	0.13	0.26	0.39	0.52	0.65	0.78	0.91	1.04	1.17	1.30
2 x 23	0.13	0.25	0.38	0.50	0.63	0.75	0.88	1.00	1.13	1.25
2 x 24	0.12	0.24	0.36	0.48	0.60	0.72	0.84	0.96	1.08	1.20
2 x 25	0.12	0.23	0.35	0.46	0.58	0.69	0.81	0.92	1.04	1.15

Таблица 41

Сопротивление растеканию горизонтального
заземления из чугунных труб $D_y = 150$ мм
Длина труб = 3 м

Число заземлителей	Удельное сопротивление грунтов, Ом · м									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	1,09	2,18	3,27	4,35	5,44	6,53	7,62	8,71	9,80	10,9
4	0,89	1,79	2,68	3,57	4,46	5,36	6,25	7,14	8,03	08,9
5	0,76	1,52	2,28	3,05	3,81	4,57	5,33	6,09	6,85	37,6
6	0,67	1,33	2,00	2,67	3,33	4,00	4,67	5,34	6,00	26,6
7	0,59	1,19	1,78	2,38	2,97	3,57	4,16	4,76	5,35	75,9
8	0,54	1,08	1,61	2,15	2,69	3,23	3,77	4,30	4,43	65,3
9	0,49	0,98	1,48	1,97	2,46	2,95	3,45	3,94	4,09	84,9
10	0,45	0,91	1,36	1,82	2,27	2,73	3,18	3,63	4,04	24,5
11	0,41	0,83	1,24	1,66	2,07	2,49	2,90	3,32	3,73	44,1
12	0,40	0,80	1,20	1,60	2,00	2,40	2,80	3,20	3,60	54,0
13	0,37	0,74	1,11	1,48	1,85	2,22	2,59	2,97	3,34	03,7
14	0,35	0,70	1,05	1,40	1,75	2,10	2,45	2,80	3,15	13,4
15	0,33	0,66	0,99	1,33	1,66	1,99	2,32	2,65	2,98	93,3
16	0,32	0,66	0,94	1,26	1,57	1,89	2,20	2,52	2,83	23,1
17	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	53,0
18	0,29	0,57	0,86	1,15	1,43	1,72	2,01	2,30	2,58	02,8
19	0,27	0,55	0,82	1,10	1,37	1,65	1,92	2,20	2,47	72,7
20	0,26	0,53	0,79	1,05	1,32	1,58	1,85	2,11	2,37	52,64

Таблица 42

Длина труб = 6 м

Число заземлителей	Удельное сопротивление грунтов, Ом · м									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	0,67	1,33	2,00	2,67	3,33	4,00	4,67	5,34	6,00	6,67
4	0,54	1,08	1,61	2,15	2,69	3,23	3,77	4,30	4,84	5,38
5	0,45	0,91	1,36	1,82	2,27	2,73	3,18	3,63	4,09	4,54
6	0,40	0,80	1,20	1,60	2,00	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00
7	0,35	0,70	1,05	1,40	1,75	2,10	2,45	2,80	3,15	3,49
8	0,32	0,63	0,94	1,26	1,57	1,89	2,20	2,52	2,83	3,14
9	0,29	0,57	0,86	1,15	1,43	1,72	2,01	2,30	2,58	2,96
10	0,26	0,53	0,79	1,05	1,32	1,58	1,85	2,11	2,37	2,64
11	0,24	0,49	0,73	0,98	1,22	1,47	1,71	1,86	2,20	2,44
12	0,22	0,46	0,67	0,89	1,11	1,34	1,56	1,76	2,00	2,27
13	0,21	0,43	0,64	0,85	1,07	1,28	1,49	1,71	1,92	2,13
14	0,20	0,40	0,60	0,80	1,01	1,21	1,41	1,61	1,81	2,01
15	0,19	0,38	0,57	0,76	0,95	1,14	1,33	1,52	1,71	1,90
16	0,18	0,36	0,54	0,72	0,90	1,08	1,26	1,44	1,62	1,80
17	0,17	0,34	0,51	0,69	0,86	1,03	1,20	1,37	1,52	1,71
18	0,16	0,33	0,49	0,65	0,81	0,96	1,14	1,31	1,47	1,63
19	0,16	0,31	0,47	0,63	0,78	0,94	1,10	1,25	1,41	1,57
20	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50

Таблица 43

Сопротивление растеканию вертикального анодного
заземления из чугунных труб $D_y = 150$ мм
Длина труб $L = 6$ м

Число заземлителей	Удельное сопротивление грунтов, Ом · м									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	0,43	0,86	1,29	1,72	2,15	2,58	3,01	3,44	3,87	4,30
5	0,36	0,73	1,09	1,45	1,82	2,18	2,55	2,91	3,28	3,64
6	0,31	0,63	0,94	1,26	1,57	1,80	2,20	2,52	2,33	3,15
7	0,28	0,58	0,84	1,12	1,40	1,62	1,96	2,24	2,52	2,80
8	0,25	0,51	0,76	1,02	1,28	1,53	1,79	2,04	2,30	2,55
9	0,23	0,46	0,70	0,98	1,16	1,39	1,63	1,86	2,09	2,32
10	0,21	0,43	0,64	0,86	1,07	1,29	1,50	1,72	1,93	2,14
11	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
12	0,18	0,37	0,56	0,75	0,93	1,12	1,31	1,49	1,68	1,87
13	0,17	0,35	0,53	0,70	0,88	1,05	1,23	1,40	1,58	1,75
14	0,16	0,33	0,50	0,66	0,83	1,00	1,16	1,33	1,49	1,66
15	0,15	0,31	0,47	0,63	0,79	0,95	1,10	1,26	1,42	1,58
16	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,21	1,36	1,50
17	0,14	0,29	0,44	0,58	0,73	0,87	1,02	1,16	1,31	1,45
18	0,14	0,28	0,42	0,56	0,70	0,83	0,97	1,11	1,25	1,39
19	0,13	0,27	0,40	0,54	0,67	0,81	0,94	1,08	1,21	1,34
20	0,13	0,26	0,39	0,53	0,66	0,79	0,92	1,05	1,19	1,32

Таблица 44

Длина труб $L = 12$ (2 x 6) м

Число заземлителей	Удельное сопротивление грунтов, Ом · м									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	0,43	0,86	1,29	1,72	2,15	2,68	3,00	3,43	3,86	4,29
3	0,31	0,63	0,94	1,25	1,57	1,88	2,20	2,51	2,82	3,14
4	0,25	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	1,75	2,00	2,25	2,50
5	0,21	0,42	0,63	0,85	1,06	1,27	1,48	1,69	1,90	2,11
6	0,18	0,37	0,55	0,73	0,91	1,10	1,28	1,46	1,64	1,83
7	0,16	0,33	0,49	0,65	0,81	0,96	1,14	1,30	1,46	1,63
8	0,15	0,30	0,44	0,59	0,74	0,89	1,04	1,18	1,33	1,48
9	0,13	0,29	0,40	0,54	0,67	0,81	0,94	1,08	1,21	1,35
10	0,12	0,28	0,37	0,50	0,62	0,75	0,87	1,00	1,12	1,24
11	0,11	0,23	0,35	0,46	0,58	0,70	0,81	0,93	1,04	1,16
12	0,10	0,22	0,32	0,43	0,54	0,65	0,76	0,87	0,98	1,08
13	0,10	0,20	0,31	0,41	0,51	0,61	0,71	0,81	0,92	1,02
14	0,10	0,19	0,29	0,38	0,48	0,58	0,67	0,77	0,87	0,96
15	0,09	0,18	0,27	0,37	0,46	0,55	0,64	0,73	0,82	0,92

Таблица 45

Сопротивление растеканию горизонтального анодного
заземления из графитопластовых труб
 $L = 3$ м и $d = 144$ мм

Число заземлителей	Удельное сопротивление грунтов, Ом · м									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	1,16	2,32	3,48	4,64	5,80	6,96	8,12	9,28	10,44	11,60
4	0,95	1,89	2,84	3,78	4,73	5,68	6,62	7,57	8,51	9,46
5	0,80	1,51	2,47	3,22	4,02	4,82	5,63	6,43	7,24	8,04
6	0,71	1,42	2,13	2,84	3,56	4,27	4,98	5,60	6,40	7,11
7	0,62	1,25	1,88	2,50	3,13	3,75	4,38	5,00	5,63	6,25
8	0,58	1,13	1,70	2,26	2,83	3,39	3,96	4,52	5,09	5,65
9	0,52	1,03	1,56	2,06	2,58	3,10	3,61	4,13	4,64	5,16
10	0,48	0,95	1,43	1,90	2,38	2,85	3,33	3,80	4,28	4,75
11	0,44	0,88	1,32	1,76	2,21	2,65	3,09	3,53	3,97	4,41
12	0,41	0,82	1,24	1,65	2,06	2,47	3,88	3,30	3,71	4,12
13	0,39	0,77	1,16	1,55	1,94	2,32	3,71	3,10	3,48	3,87
14	0,37	0,73	1,09	1,46	1,83	2,19	3,56	2,92	3,29	3,65
15	0,35	0,69	1,04	1,38	1,73	2,08	2,42	2,77	3,11	3,46
16	0,33	0,65	0,99	1,31	1,64	1,97	2,30	2,62	2,95	3,28
17	0,31	0,63	0,90	1,25	1,57	1,88	2,19	2,50	2,82	3,13
18	0,30	0,60	0,86	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	2,99
19	0,29	0,57	0,84	1,14	1,43	1,72	2,00	2,29	2,57	2,86
20	0,27	0,55	0,82	1,10	1,37	1,64	1,92	2,19	2,47	2,74

Таблица 46

**Сопротивление растеканию вертикального анодного
заземления из графитопластовых труб
L = 6 (2 x 3) м и d = 144 мм**

Число заземлителей	Удельное сопротивление грунтов, Ом · м									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	0,80	1,60	2,39	3,18	3,98	4,78	5,57	6,37	7,16	7,96
3	0,59	1,17	1,76	2,35	2,94	3,52	4,11	4,97	5,28	5,87
4	0,47	0,94	1,41	1,88	2,36	2,83	3,30	3,77	4,24	4,71
5	0,40	0,80	1,20	1,60	2,00	2,40	2,80	3,20	3,60	4,00
6	0,35	0,70	1,04	1,39	1,74	2,09	2,44	2,78	3,13	3,48
7	0,31	0,62	0,92	1,23	1,54	1,85	2,16	2,46	2,77	3,08
8	0,28	0,56	0,84	1,12	1,40	1,67	1,95	2,23	2,51	2,79
9	0,26	0,51	0,77	1,02	1,28	1,54	1,79	2,05	2,30	2,56
10	0,24	0,48	0,72	0,96	1,20	1,43	1,67	1,91	2,15	2,39
11	0,22	0,44	0,66	0,88	1,11	1,33	1,55	1,77	1,99	2,31
12	0,21	0,41	0,62	0,82	1,03	1,24	1,44	1,65	1,85	2,06
13	0,19	0,39	0,58	0,78	0,97	1,16	1,36	1,55	1,75	1,94
14	0,18	0,37	0,55	0,74	0,92	1,10	1,29	1,47	1,66	1,84
15	0,18	0,35	0,53	0,70	0,88	1,05	1,23	1,40	1,58	1,75
16	0,17	0,33	0,50	0,67	0,84	1,00	1,17	1,34	1,50	1,67
17	0,16	0,31	0,47	0,62	0,78	0,98	1,09	1,24	1,40	1,55
18	0,15	0,30	0,44	0,59	0,74	0,93	1,04	1,18	1,33	1,48
19	0,14	0,28	0,43	0,57	0,71	0,85	0,99	1,14	1,28	1,42

Таблица 47

Длина труб L = 9 (3 x 3) м

Число заземлителей	Удельное сопротивление грунтов, Ом · м									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	0,58	1,13	1,73	2,31	2,99	3,46	4,04	4,62	5,19	5,77
3	0,43	0,85	1,28	1,70	2,13	2,50	2,98	3,40	3,83	4,25
4	0,34	0,68	1,02	1,36	1,71	2,06	2,39	2,73	3,07	3,41
5	0,29	0,58	0,87	1,16	1,45	1,73	2,02	2,31	2,60	2,89
6	0,25	0,50	0,76	1,01	1,26	1,51	1,76	2,02	2,27	2,52
7	0,22	0,45	0,70	0,89	1,12	1,34	1,56	1,78	2,01	2,23
8	0,20	0,40	0,61	0,81	1,01	1,21	1,47	1,62	1,82	2,02
9	0,19	0,37	0,56	0,74	0,93	1,12	1,30	1,49	1,67	1,86
10	0,17	0,35	0,52	0,69	0,87	1,04	1,21	1,38	1,56	1,73
11	0,16	0,32	0,48	0,64	0,80	0,96	1,12	1,28	1,44	1,60
12	0,15	0,30	0,45	0,60	0,75	0,90	1,05	1,20	1,35	1,50
13	0,14	0,28	0,42	0,56	0,74	0,83	0,99	1,13	1,27	1,41
14	0,13	0,27	0,40	0,53	0,66	0,80	0,93	1,06	1,20	1,33
15	0,13	0,25	0,38	0,51	0,64	0,76	0,89	1,02	1,14	1,27
16	0,12	0,24	0,36	0,48	0,61	0,73	0,85	0,99	1,09	1,21
17	0,12	0,23	0,35	0,46	0,58	0,70	0,81	0,93	1,04	1,16
18	0,11	0,22	0,34	0,45	0,56	0,67	0,78	0,90	1,01	1,12
19	0,10	0,21	0,32	0,43	0,54	0,64	0,75	0,86	0,96	1,07
20	0,10	0,18	0,31	0,41	0,52	0,62	0,72	0,82	0,93	1,03

Длина труб $L = 12 (4 \times 3) \text{ м}$

Число заземлителей	Удельное сопротивление грунтов, Ом · м									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	0,46	0,92	1,37	1,83	2,29	2,75	3,21	3,66	4,12	4,56
3	0,34	0,67	1,01	1,35	1,69	2,02	2,36	2,70	3,03	3,37
4	0,27	0,54	0,81	1,08	1,36	1,63	1,90	2,17	2,44	2,71
5	0,23	0,46	0,69	0,92	1,15	1,38	1,61	1,84	2,07	2,30
6	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
7	0,18	0,35	0,53	0,71	0,89	1,06	1,24	1,42	1,59	1,77
8	0,16	0,32	0,48	0,64	0,80	0,96	1,12	1,28	1,44	1,60
9	0,15	0,29	0,44	0,59	0,74	0,88	1,03	1,18	1,32	1,47
10	0,14	0,27	0,41	0,55	0,69	0,82	0,96	1,10	1,23	1,37
11	0,13	0,25	0,38	0,51	0,64	0,76	0,89	1,02	1,14	1,27
12	0,12	0,24	0,36	0,48	0,60	0,70	0,84	0,96	1,07	1,19
13	0,11	0,22	0,33	0,45	0,56	0,67	0,78	0,90	1,01	1,12
14	0,11	0,21	0,32	0,42	0,53	0,64	0,74	0,85	0,95	1,06
15	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,82	0,90	1,00
16	0,10	0,19	0,29	0,38	0,48	0,58	0,67	0,77	0,86	0,96
17	0,09	0,18	0,28	0,37	0,46	0,55	0,64	0,74	0,83	0,92
18	0,09	0,18	0,27	0,36	0,45	0,54	0,63	0,72	0,81	0,89
19	0,08	0,17	0,26	0,34	0,43	0,51	0,60	0,68	0,77	0,85
20	0,08	0,16	0,25	0,33	0,41	0,49	0,57	0,66	0,74	0,82

Таблица 49

Характеристика кабелей и проводов линии электропередачи

Марка проводов	Число и диаметр проводов, мм	Фактическое сечение, мм ²
Медные провода		
М-4	1 х 2,2	3,8
М-6	1 х 2,7	5,72
М-10	1 х 3,5	9,6
М-16	1 х 4,7	15,89
М-25	7 х 2,1	24,25
М-35	7 х 2,5	34,36
М-50	7 х 8,0	49,48
М-60	12 х 2,5	59,0
М-70	19 х 2,12	67,0
Алюминиевые провода		
А-15	7 х 1,70	15,89
А-25	7 х 2,10	24,25
А-35	7 х 2,50	34,36
А-50	7 х 3,00	49,48
А-70	7 х 3,54	68,90
А-95	7 х 4,15	94,90
А-120	19 х 2,80	117,0
Стальные провода		
а) одножильные		
Х-4	1 х 4	12,5
Х-5	1 х 5	19,6
Х-6	1 х 6	28,3
б) многожильные		
ПС	5 х 2,5	24,6
ПС	7 х 2,6	37,2
ПС	12 х 2,8	49,5
ПС	19 х 2,8	78,8
ПС	37 х 1,8	94,0

**Силовые кабели, рекомендуемые для использования
при монтаже систем электрохимической защиты от коррозии**

Марка кабеля	Расшифровка марки кабеля	Назначение
ААБ	Кабель с алюминиевыми жилами в алюминиевой оболочке, бронированный с защитным наружным покровом	Прокладка в траншеях, в земле
ВРГ	Кабель с медными жилами в полихлорвиниловой оболочке, голый	Присоединение токовводов к заземляющим электродам и протекторам
АВРГ	То же, с алюминиевыми жилами	То же
АВВБ	Кабель с полихлорвиниловой изоляцией, бронированный двумя стальными лентами, с наружным покровом	Прокладка в траншеях, в земле
ААШ _в	С бумажной пропитанной изоляцией в алюминиевой оболочке	— / —

Стандартные сечения, мм²: 2, 4, 6, 10, 16, 25, 35, 50, 70, 95, 120, 150, 185, 240, 300, 400, 500.

Таблица 51

**Технические характеристики преобразователей
ПАСК - М и ПСК - М**

Тип преобразователя	Номинальная мощность, кВт	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Масса, кг
1	2	3	4	5
ПАСК-М-0,6-48/24 У1	0,6	48/24	12,5/25	115
ПАСК-М-1,2-48/24 У1	1,2	48/24	25/50	128
ПАСК-М-2,0-96/48 У1	2,0	96/48	21/42	140
ПАСК-М-3,0-96/48 У1	3,0	96/48	31/62	160
ПАСК-М-5,0-96/48 У1	5,0	96/48	52/104	215
ПСК-М-0,6-48/24 У1	0,6	48/24	12,5/25	110
ПСК-М-1,2-48/24 У1	1,2	48/24	25/50	112
ПСК-М-2,0-96/48 У1	2,0	96/48	21/42	135
ПСК-М-3,0-96/48 У1	3,0	96/48	31/62	155
ПСК-М-5,0-96/48 У1	5,0	96/48	52/104	210

Таблица 52

Технические характеристики преобразователей типа ОПС

Тип преобразователя	Номинальная мощность, кВт	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Масса, кг
ОПС-25-24-У1	0,6	24	25	95
ОПС-25-24-У1	1,2	24	50	115
ОПС-25-24-У1	3,0	48	63	115
ОПС-25-24-У1	4,8	48	100	205

Таблица 53

Техническая характеристика катодных станций типа КСЭР

Тип катодной станции	Номинальная мощность, кВт	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Масса, кг
КСЭР-0,2-0,15	0,15	24/48	6/3	33
КСЭР-0,2-0,3	0,3	24/48	12/6	38
КСЭР-0,2-0,6	0,6	24/48	25/12,5	65
КСЭР-0,2-1,2	1,2	24/48	50/25	85
КСЭР-0,2-2,0	2,0	48/96	42/21	105
КСЭР-0,2-3,0	3,0	48/96	62/31	115
КСЭР-0,2-5,0	5,0	50/100	100/50	150

Таблица 54

**Технические характеристики
автоматических регуляторов типа АРТЗ**

Тип регулятора	Номинальная мощность, кВт	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Масса, кг
АРТЗ-0,6-48/24-У1	0,6	48/24	12,5/25	140
АРТЗ-1,2-48/24-У1	1,2	48/24	25/50	150
АРТЗ-1,2-48/24-У1	2,0	96/48	21/42	160
АРТЗ-1,2-48/24-У1	3,0	96/48	31/62	180
АРТЗ-1,2-48/24-У1	5,0	96/48	52/104	250

Таблица 55

**Технические характеристики
автоматических регуляторов типа АРТЗ**

Тип регулятора	Номинальная мощность, кВт	Номинальное выпрямленное напряжение, В	Номинальный выпрямленный ток, А	Масса, кг
ТДЕ-9-25-24-НХЛ1	0,6	48/24	12,5/25	90
ТДЕ-9-50-24-НХЛ1	1,2	48/24	25/50	110
ТДЕ-9-40-48-НХЛ1	2,0	96/48	21/42	120
ТДЕ-9-62-48-НХЛ1	3,0	96/48	31/62	150
ТДЕ-9-100-48-НХЛ1	5,0	96/48	52/104	185

50р.

Научное издание

**Д. Л. Рахманкулов, М. В. Кузнецов,
Н. А. Гафаров, В. Н. Зенцов, А. М. Кузнецов**

**Современные системы защиты
от электрохимической коррозии
подземных коммуникаций**

Том II

**Электрохимическая защита
от коррозии в примерах и расчетах**

Зав. редакцией: Т. Е. Бочарова

Редактор: И. Р. Клейнос

Компьютерная верстка: Э. М. Мусина

Техническое редактирование, корректура, верстка выполнены в
Государственном издательстве научно-технической литературы «Реактив»
Изд. лиц. № 0239 от 14.01.98
450029, г. Уфа, ул. Ульяновых, 75; тел.: (3472) 79-84-43

Подписано в печать 17.09.2003. Формат 60/84 1/16. Бумага офсетная.
Гарнитура «Петербург». Усл. печ. л. 9,3. Уч. изд. л. 10,67.
Тираж 500 экз. Заказ № 224.

Отпечатано методом ризографии с помощью компьютерного
интерфейса на оборудовании ООО «ДизайнПолиграфСервис»
450005, г. Уфа, ул. Кирова, 65, оф. 102; тел.: (3472) 52-70-88