

В.Н.Ткаченко

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЗАЩИТА

трубопроводных сетей



Стройиздат 2004

УДК 620.197.5(075.8)

Ткаченко В.Н. Электрохимическая защита трубопроводных сетей / Учебное пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 2004. - 320 с.

В популярной форме представлена процессы электрохимической коррозии и защиты (ЭХЗ) как проблема теории токов в земле для сложных трубопроводных сетей с неоднородными параметрами (сетевая задача).

Даны рекомендации по методам коррозионных изысканий, подготовке исходных данных для расчета сетевой задачи как сугубо практической, описаны комплексы компьютерных программ АРМ-ЭХЗ-6П и АРМ-ЭХЗ-7П с подробным теоретическим и методическим обоснованием.

Приведены многочисленные примеры инженерного решения сетевой задачи для ситуаций, ранее не поддававшихся численному анализу. Показаны возможности предлагаемого метода при расчете арматурных сетей железобетонных сооружений, сложных контуров заземлений и других стержневых конструкций, как частных случаев сетевой задачи.

Предназначена для студентов и инженерно-технических работников в области проектирования, наладки и эксплуатации ЭХЗ подземных трубопроводов и сооружений.

Таблиц - 43, иллюстраций - 78, библиография - 36.

Оглавление

Оглавление	3
Предисловие	8
Глава 1. Проблемы коррозии и защиты	10
1.1. Коррозионные потери	-
1.2. Классификация процессов коррозии	11
1.3. Классификация методов защиты	14
1.3.1. Коррозионностойкие материалы	-
1.3.2. Изолирующие покрытия	15
1.3.3. Электрохимическая защита	19
1.3.4. Прочие виды защиты	22
1.4. Нормы и правила	23
1.5. Развитие науки о коррозии и защите	25
Глава 2. Процессы электрохимической коррозии	28
2.1. Первопричины коррозии	-
2.2. Движущая сила токов коррозии	30
2.2.1. Гальванопара на поверхности металлического сооружения	-
2.2.2. Гальванические микронеоднородности	31
2.2.3. Коррозионные макропары	36
2.3. Факторы коррозии	39
2.4. Потенциал и ток коррозии	41
2.5. Показатели коррозионного разрушения	44
2.5.1. Скорость коррозии в соответствии с законом Фарадея	-
2.5.2. Экспериментальное определение скорости коррозии	45
Глава 3. Коррозионная диагностика	47
3.1. Задачи коррозионных исследований	-
3.2. Определение агрессивности грунта	48
3.2.1. Метод удельного электрического сопротивления грунта	50
3.2.2. Метод катодной поляризации.	52
3.3. Определение анодных зон в поле токов коррозии	53
3.3.1. Метод градиента потенциала	53
3.3.2. Метод выносного электрода	55
3.3.3. Трехэлектродный метод	56
3.4. Электроизмерительные приборы и оборудование	58
3.4.1. Электроды сравнения	-
3.4.2. Электроизмерительные приборы	59
3.4.3. Прерыватели тока	60
3.4.4. Трассоискатели и дефектоскопы	-
3.5. Компьютерный анализ поля токов коррозии	61
Глава 4. Блуждающие токи	65

4.1. Источники блуждающих токов	-
4.1.1. Линии рельсового электротранспорта	66
4.1.2. Линии электропередач постоянного тока	69
4.2. Компьютерный анализ поля блуждающих токов	70
4.3. Измерения в поле блуждающих токов	72
4.3.1. Разность потенциалов труба-земля	-
4.3.2. Градиент потенциала в земле	73
4.4. Мероприятия по ограничению блуждающих токов	76
Глава 5. Токи электрохимической защиты	80
5.1. Электрохимическая защита	-
5.2. Катодная поляризационная характеристика	81
5.3. Критерии электрохимической защиты	83
5.3.1. Минимальная защитная плотность тока	84
5.3.2. Минимальное защитное смещение потенциала	85
5.3.3. Минимальный защитный потенциал	87
5.3.4. Максимальный защитный потенциал	89
5.4. Измерение поляризационной составляющей защитного потенциала	91
5.5. Компьютерный оценка поляризационной составляющей	94
5.6. Вторичные явления при электрохимической защите	98
5.6.1. Катодные осадки	-
5.6.2. Последствие катодной поляризации	102
Глава 6. Решение сетевой задачи электрохимической защиты	104
6.1. Исходная система уравнений	-
6.1.1. Сетевая задача электрохимической защиты	-
6.1.2. Основные уравнения и формулы	105
6.1.3. Граничные условия для участка сети	109
6.1.4. Система уравнений для обособленной сети	112
6.2. Численный метод расчета сетевой задачи	113
6.2.1. Основные положения метода дискретизации	-
6.2.2. Система уравнений для сети с дискретными параметрами	115
6.2.3. Решение системы уравнений	116
6.3. Расчет трубопроводной сети произвольной сложности	118
6.4. Оптимизационные задачи электрохимической защиты	119
6.5. Нелинейная сетевая задача	122
Глава 7. Методическое обеспечение задач ЭХЗ	141
7.1. Содержание комплекса компьютерных программ	-
7.1.1. Назначение пакета программ АРМ ЭХЗ-5П	-
7.1.2. Структура пакета программ	144
7.2. Расчетные параметры трубопровода	146
7.2.1. Удельное продольное сопротивление	-
7.2.2. Удельное сопротивление изоляции	147

7.2.3. Удельное электрическое сопротивление грунта	149
7.2.4. Стационарный потенциал	151
7.3. Расчетная схема трубопроводной сети	154
7.3.1. Шаг дискретизации	155
7.3.2. Конфигурация расчетной схемы сети	158
7.3.3. Периферийная сеть	159
7.4. Расчетная схема системы ЭХЗ	163
7.4.1. Оптимизационная сетевая задача	164
7.4.2. Расчет при заданных токах	166
7.4.3. Расчет качества изоляции	-
7.4.4. Расчет токов коррозии	167
Глава 8. Устройство катодной станции	168
8.1. Схемы соединений катодной станции	-
8.2. Катодный преобразователь	169
8.3. Конструкции анодных заземлителей	172
8.4. Материал анодных заземлителей	176
8.4.1. Сталь и чугун	177
8.4.2. Графит	179
8.4.3. Ферросилид	182
8.4.4. Свинец	184
8.4.5. Магнетит	-
8.4.6. Платина	185
8.5. Расчет катодной защиты	186
8.5.1. Постановка задачи	186
8.5.2. Расчет влияния анодного заземлителя на пассивный трубопровод	188
8.5.3. Расчет влияния анодного заземлителя на активный трубопровод	192
8.5.4. Анодный заземлитель в трубопроводной сети	195
8.6. Расчет анодного заземлителя	196
8.6.1. Сопротивление растеканию электрода	-
8.6.2. Сопротивление растеканию группы электродов	199
8.6.3. Экономичное число стержней заземлителя	-
8.6.4. Срок службы анодного заземлителя	201
8.7. Вспомогательное оборудование	202
8.7.1. Дренажная и питающая линии	203
8.7.2. Изолирующее фланцевое соединение	207
8.7.3. Контактные устройства	210
8.7.4. Блоки совместной защиты	-
Глава 9. Протекторная защита	213
9.1. Общие сведения	-
9.2. Протекторные материалы	216
9.3. Протекторные установки	219

9.3.1. Конструкции протекторов	-
9.3.2. Активаторная засыпка	221
9.3.3. Размещение протекторов	222
9.4. Расчет протекторной защиты	223
9.4.1. Расчет при заданном токе протекторной установки	-
9.4.2. Расчет гальванической пары протектор-трубопровод	224
9.4.3. Оценочный расчет протекторной защиты	225
Глава 10. Электродренажная защита	230
10.1. Общие сведения	-
10.2. Схемы электродренажной защиты	232
10.2.1. Прямой электродренаж	233
10.2.1. Поляризованный электродренаж	234
10.2.3. Усиленный электродренаж	236
10.3. Расчет дренажной защиты	237
10.3.1. Общие требования к расчетной схеме	-
10.3.2. Шаг дискретизации рельсовой линии	239
10.3.3. Погрешность поля дискретного проводника	240
10.3.4. Конфигурация расчетной схемы рельсовой сети	241
10.3.5. Рельсовая линия как эквивалентный трубопровод	244
10.3.6. Дренажные цепи	245
Глава 11. Схемы электрохимической защиты	252
11.1. Катодные станции с несколькими заземлителями	252
11.1.1. Распределенные заземлители	-
11.1.2. Катодная станция с противопотенциалом	254
11.1.3. Катодная станция с заземлителем-токовводом	255
11.2. Совместная защита	257
11.2.1. Два параллельно уложенных трубопровода	-
11.2.2. Пучек параллельно уложенных трубопроводов	260
11.2.3. Близко расположенные трубопроводы	263
11.2.4. Пересекающиеся трубопроводы вблизи анодного заземлителя	266
11.3. Заземленные трубопроводы	268
11.3.1. Заземление как эквивалентный трубопровод	269
11.3.2. Влияние заземления на эффективность защиты	272
11.3.3. Многократно заземленная трубопроводная сеть	275
Глава 12. Заземленные железобетонные конструкции	279
12.1. Коррозия железобетона	-
12.2. Бетон как коррозионная среда	280
12.3. Электрохимические параметры арматуры	282
12.3.1. Электрохимический потенциал	-
12.3.2. Катодное поляризационное сопротивление	283
12.3.3. Анодное поляризационное сопротивление	284
12.4. Арматурная сетка как эквивалентная трубопроводная сеть	285

12.4.1. Пучек из стержней	-
12.4.2. Сетка участка конструкции	286
12.4.3. Эквивалентная сеть сооружения	290
12.5. Распределение токов коррозии по окружности стержня	297
12.5.1. Постановка задачи	298
12.5.2. Аналитическое решение	299
12.5.3. Численное решение	301
12.5.4. Анализ результатов расчета	303
Литература	306

Предисловие

В науке о коррозии и защите от нее сделано настолько много, что у практиков часто пропадает всякая надежда отыскать в этом море информации что-то срочно необходимое и которое, возможно, давно покоится на N-ой странице толстой монографии весьма уважаемого автора. Поэтому инженер часто не очень лестно отзывается о деятельности коллеги-ученого, который “не дает ничего нового”, порой скрывая за этим скепсисом свое незнание или неумение найти давно подготовленную для него отгадку нерешенной задачи. Если бы инженер-коррозионист старательно и, что весьма важно, своевременно реализовывал все, что ему рекомендуют ученые, то можно было бы избежать катастрофических коррозионных разрушений, которые время от времени будоражат мир.

Эта книга сделана для тех, кто хочет уложить свою трубу в землю на 100 лет, и чтобы о ее коррозионном состоянии не беспокоились ни его внуки, ни его правнуки. Книга написана языком, доступным для студента, инженера, фермера и грамотного слесаря, поскольку знания об электрохимической защите (ЭХЗ) возможно пригодятся им для антикоррозионной защиты своего личного автомобиля.

Инженер-проектировщик и студент-дипломник познакомятся в книге с уникальными компьютерными программами, которые позволяют решать так называемую сетевую задачу, когда ищется распределение тока и потенциала в сложных переплетениях подземных коммуникаций города или промышленного предприятия и анализируется при этом работа взаимосвязанной системы одновременно действующих установок ЭХЗ. Здесь же впервые в обобщенном виде дается теория поля токов для сетевой задачи.

Множество примеров расчета, приведенных в книге, вселяет уверенность, что компьютерные программы успешно решают практически все важные задачи антикоррозионной практики. К ним можно отнести такие, как определение коррозионно-опасных зон, вычисление скорости язвенной коррозии, выбор параметров электрозащитных установок с расчетом поля тока и потенциала на любом криволинейном трубопроводе с раз-

ветвлениями и неоднородностями различного рода, определение оптимального количества установок ЭХЗ и оптимальной схемы их размещения при условии минимума капитальных и эксплуатационных затрат. Причем могут быть найдены оптимизационные схемы совместной защиты ряда разнородных сетей общими средствами ЭХЗ.

Программы даже выполняют сметно-финансовый расчет в соответствии в действующими нормами и прейскурантами и распечатывают проектно-сметную документацию.

В процессе обучения персонала предприятий предлагаемые компьютерные программы можно использовать как тренажеры. Так, например, можно ввести в компьютер действующую в данном микрорайоне схему ЭХЗ и проигрывать на такой модели различные варианты ее работы, меняя токовую нагрузку установок, местоположение анодных заземлителей, их количество, устанавливая перемычки, исследуя вредные влияния токов защиты на соседние незащищенные сооружения и т.д.

В книге, разумеется, не обойдены вопросы схемного и конструктивного устройства, монтажа и эксплуатации защитных установок различного рода, а также современные методы полевых измерений. В частности, продемонстрирован новый расчетно-полевой метод, дающий возможность определять величину удельного электрического сопротивления изолирующего покрытия трубопровода, причем в заданной точке трубопроводной сети и, разумеется, без вскрытия трубопровода.

Расчетно-полевой метод пригоден даже для определения величины плотности тока коррозии и защиты в заданной точке трубопровода.

Сетевая задача для трубопроводов мало чем отличается от сетевой задачи для арматурной сетки железобетонной конструкции, например, свайного основания здания. Поэтому представленная теория и описанные компьютерные программы позволят пользователю рассчитать токи коррозии и защиты всевозможных свайных опор, заземлений, обсадных колонн скважин и других сооружений, которые можно моделировать эквивалентной трубопроводной сетью.

Книга подготовлена на основе материала лекций, читаемых в *Волгоградской государственной инженерно-строительной академии* автором, который занимается теорией и практикой защиты трубопроводных сетей и других металлических сооружений уже более 45 лет. Компьютерные программы в его разработке прошли надежную проверку не только в учебном процессе, но и на производстве в двух десятках проектных и эксплуатационных организаций страны.

Пакет АРМ-ЭХЗ-6П рекомендован для применения Руководящим документом РД 153-39.4-091-01 «Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии», подготовленным АКХ им. К.Д. Памфилова - головной организацией РФ по коррозии и защите трубопроводных сетей.

Первое издание книги разошлось чрезвычайно быстро. Автор не раз встречал свою книгу, перепечатанную на ксероксе. По просьбе своих читателей и имея ввиду информационный голод последних лет в этой области, автор посчитал своим долгом переиздать книгу, причем с существенной переработкой и дополнением.

Глава 1. Проблемы коррозии и защиты

1.1. Коррозионные потери

Коррозия настолько привычна, что мы готовы согласиться считать ее неизбежным злом нашего времени. И скорее всего, это действительно так. Разрушается все вокруг: крошится бетонный камень, стареет и ломается пластмасса, гниет и трескается дерево, “корродирует”, к сожалению, Ваш зуб, возможно, семья Вашего соседа, наше общество и, наконец, государство. Неизбежен ли процесс разрушения? Да, настолько же, насколько неизбежно возобновление новых форм жизни. Тогда стоит ли прилагать усилия для борьбы со злом? Если Ваш ответ утвердительный, то Вы наберетесь мужества прочитать эту книгу до конца, с надеждой, что она даст Вам силы для борьбы с одним из злейших врагов человечества - коррозией металлов.

Итак, коррозия - **corrodere** означает процесс разрушения. Между прочим, коррозионные последствия могут быть и положительными для общества. Разве плохо было бы положиться на коррозию, глядя на брошенные после пикника железные банки и пакеты? Однако нежелательных последствий от коррозии много больше.

Нарушение надежности конструкции.

Подземный трубопровод с одним единственным сквозным проржавлением уже непригоден для нормальной эксплуатации, хотя он еще на 99,99% цел и невредим.

Экологические последствия.

Но если трубопровод с отверстием в стенке - это газопровод высокого давления, то упомянутое разрушение (всего лишь 0,01% от целого) может дорого стоить обществу, случись авария со взрывом и огнем. Про целые озера нефти вблизи нефтепроводов, керосина вблизи керосинопроводов достаточно много мы слышали и читали.

Потери природных ресурсов.

В конечном счете на отданную в металлолом металлическую конструкцию в свое время много потрачено энергии и средств. Но ведь нельзя собрать *весь* металлолом с тем, чтобы снова переплавить его в металл.

Прямые затраты на коррозию.

Убытки от коррозии в мире настолько огромны, что общество вынуждено тратить ежегодно десятки, а может быть и *сотни миллиардов долларов* на борьбу с ней. Общая сумма прямых коррозионных потерь в США составляет около 70 млрд. долларов в год, т.е. более 4% валового национального продукта. Подсчитано, что около 15% этих потерь можно было бы избежать, своевременно используя современные средства защиты. Кстати, оставшиеся 85% - это неизбежное зло?

Косвенные потери от коррозии.

Они определяются далеко не всегда легко и просто, но, несомненно, очень велики. Достаточно только перечислить часть из них:

- простой производственных мощностей с недовыработкой продукции;
- потери готовой продукции;
- снижение мощности и производительности;
- излишние допуски на толщину стенки;
- загрязнение основной продукции продуктами коррозии.

Итак, коррозия - это не просто элементарное растворение металла, как можно сначала предположить, а, скорее, *порча* металлического сооружения как результат коррозионного растворения.

Но а ржавление - это коррозия железа и его сплавов. Цветные металлы не ржавеют, а корродируют.

1.2. Классификация процессов коррозии

Электрохимическая коррозия

Практически все многообразие коррозионных проявлений, с которыми мы повсеместно встречаемся в быту и на производстве, протекает по одному механизму - электрохимическому, т.е. вызвано электрохимической коррозией, наиболее просто определяемой следующим образом.

Электрохимическая коррозия - растворение металла в воде.

Если такая чрезвычайно сжатая формулировка электрохимической коррозии покажется слишком упрощенной, то можно удовлетвориться следующей.

Электрохимическая коррозия - это окисление металла, сопровождающееся химическими реакциями и переносом электрических зарядов между металлом и окружающей средой, при обязательном участии воды.

Химическая коррозия

Можно было бы для простоты отбросить определение “электрохимическая”, если бы не существовала еще и химическая коррозия.

Химическая коррозия - растворение металла без участия воды.

Примеры химической коррозии:

- растворение металла в концентрированных кислотах и щелочах;
- разрушение (выгорание) металла под действием топочных газов при температуре более 100 градусов.

Электрокоррозия

К ней относят коррозию, вызываемую блуждающими токами рельсового электротранспорта и прочими источниками тока в земле. Электрокоррозия это фактически электролиз металла под действием наложенного тока, т.е. тока *внешнего* источника, в то время как токи электрохимической коррозии рождаются за счет *собственной* гальванической неоднородности данного металлического сооружения.

Комплексное разрушение

Электрохимическая коррозия может участвовать в разрушении совместно с другими процессами. В этом случае тип коррозии может иметь другое имя.

Биокоррозия - процесс электрохимической коррозии, протекающий при участии микроорганизмов. Продукты их жизнедеятельности стимулируют ту или иную стадию электрохимического растворения.

Коррозионная эрозия - процесс, сочетающий эрозию (разрушение от механических воздействий, износ) и электрохимическую коррозию. Обычно вызывается быстротекущей жидкостью и зависит от степени турбулентности потока.

Кавитационная коррозия - процесс совместного воздействия кавитации и коррозии: взрываются пузырьки газа или пара, образовавшиеся при пониженном давлении, например, на гребных винтах судов.

Фреттинг-коррозия - процесс разрушения двух контактирующих и скользящих поверхностей.

Механохимическая коррозия - коррозия, ускоренная внутренними механическими напряжениями металла. При растягивающих усилиях может возникнуть *коррозионное растрескивание* по границам кристаллитов. При периодически изменяющейся нагрузке и неблагоприятных коррозионных условиях можно ожидать *коррозионную усталость*.

Виды коррозионных разрушений

Перечисленные типы коррозии вызывают разрушения следующих видов:

- равномерное, с образованием слоя окислов;
- язвенное, а также питтинговое (точечное);
- межкристаллитное, избирательное и пр.

Коррозионные среды

Коррозионный процесс под тонкой пленкой влаги идет не так, как в толще воды и не так, как в бетоне. Поэтому отдельно рассматривают процессы в следующих коррозионных средах:

- в речной, морской, озерной воде;
- в почве, грунте, в насыпных материалах, бетоне;
- под слоем атмосферных осадков, под пленкой воды, в тонких наслоениях и т.д.

1.3. Классификация методов защиты

В задачу защиты, как это не покажется странным, не входит *полное* прекращение процессов коррозии. К тому же, это и невозможно. Основная цель - *замедлить* скорость коррозионного разрушения до приемлемого уровня. Так, трубопровод, проложенный к некоторому объекту, может морально устареть уже через 20 лет. Поэтому есть ли смысл предусматривать для него срок службы - за счет средств антикоррозионной защиты - длительностью 40 лет? Некоторая деталь машины механически изнаши-

вается много быстрее, чем разрушается за счет электрохимических явлений. В данном случае проблемы коррозии скорее всего вообще нет. И, наконец, некоторый небольшой элемент атомного реактора разрушился и это вызвало радиоактивное заражение окружающего пространства. Такой элемент при проектировании антикоррозионной защиты безусловно должен иметь двойной-тройной запас надежности.

Защита от коррозии это комплекс мероприятий, выбираемых инженером-коррозионистом исходя из его опыта, который вероятнее всего основывается на мировых знаниях. Легко перечислить возможные способы защиты и антикоррозионные мероприятия, труднее принять наиболее правильное решение.

1.3.1. Коррозионностойкие материалы.

Безусловно, *пластмассовая* труба лучше стальной, если не отвлекаться такими “мелочами” как старение и растрескивание пластмассы, деструкция сварных швов с разгерметизацией стыков. Стык труб - чрезвычайно слабое место пластмассового трубопровода. Поэтому есть некоторая уверенность, что трубопроводы из *малоуглеродистой и низколегированной* стали, повсеместно применяющиеся сейчас, не скоро уступят свое место трубопроводам из пластмассы. Особенно это касается магистральных трубопроводов большого диаметра и высокого давления.

Керамические, стеклянные, железобетонные трубопроводы нашли свою область применения и с успехом заменяют стальные там, где это можно: безнапорные трубопроводы, химические производства, мелиорация и пр.

С малой скоростью корродируют *чугунные* трубопроводы, которые широко используются в водоснабжении.

Многочисленные марки *нержавеющей стали* с легирующими добавками хрома, никеля, молибдена и титана предназначены, казалось бы, для защиты во всех агрессивных средах. Но, к сожалению, именно *нержавеющие стали корродируют* по механизму межкристаллитной и питтинговой коррозии. Так, нержавеющие стали стойки в азотной, сернистой, во многих органических кислотах и щелочах и, разумеется, в атмосфере и нейтральных средах, но уже нестойки в разбавленных растворах соляной кислоты.

К тому же пока нет желающих строить дорогой подземный трубопровод из нержавеющей стали.

1.3.2. Изолирующие покрытия

Первое, на что интуитивно надеется простой обыватель, - покрасить и с этим снять коррозионную проблему. Но тогда пусть не удивляет такой факт: морской корабль при его периодическом ремонте покрывают четырьмя, и даже *шестью слоями краски*. Для маленького миноносца водоизмещением 1600 т тратится 1,5 т высококачественной краски *на один слой* покрытия. А простое однослойное покрытие - это не антикоррозионное, а декоративное.

Основное назначение любого вида покрытия - *уменьшить доступ* агрессивной среды к поверхности металла.

Применяют следующие виды покрытия:

- *металлическое;*
- *неорганическое;*
- *лакокрасочные и полимерные.*

К сожалению, *все виды покрытия - пористые* или имеют механические повреждения. Поэтому надеяться на эффективную защиту от коррозии только с помощью покрытий нельзя. Однако и без покрытия, как важнейшего звена *комплексной защиты*, обойтись нельзя. Поэтому коротко познакомимся с особенностями наиболее распространенных видов покрытия.

Металлические покрытия

Цинк на стали - жертва стального сооружения агрессивной среде. Действительно, цинк в паре с железом образуют гальванический элемент, в котором, как известно, одному из электродов - аноду - суждено растворяться, этим самым давая жизнь (энергию) другому электроду - катоду. В данном случае *цинк - анод, сталь - катод*. Пока на поверхности стали есть островки цинка, сталь может надеяться на защиту. В данной ситуации работает так называемая *протекторная защита*, о которой речь еще впереди.

Правда, эффективная протекторная защита распространяется на участки не очень далеко отстоящие от края островка цинкового покрытия.

Так, в морской воде эффективным катодом может служить поверхность, отстоящая от границы с цинком даже на десятки сантиметров, в то время как в низкоминерализованной воде, следовательно, в среде с низкой электропроводностью, уже на расстоянии несколько миллиметров от цинка плотность катодного тока незаметна и железо там начинает ржаветь.

В морской воде цинк расходуется со скоростью примерно 0,03 мм в год. Такой же толщины покрытие в атмосфере морских районов может простоять 8 лет, в то время как в промышленных районах срок их службы может составить только 4 года.

В процессе работы гальванической пары цинк-железо образуются продукты коррозии, например, ZnO , заполняющие трещины и поры. Поскольку ZnO - это проводник с электронной проводимостью со своим собственным электрохимическим потенциалом, то э.д.с. гальванической системы будет меняться. Опыт показывает, что ток пары цинк-железо со временем может упасть до нуля. Но еще опаснее ситуация, когда благодаря осадкам ZnO может произойти изменение полярности гальванической системы, т.е. железо чистое станет анодом, а железо под слоем ZnO - катодом. Возникнет язвенная коррозия, что и наблюдалось не раз в аэрированной горячей воде.

Однако несмотря на это часто единственным способом борьбы с внутренней коррозией трубопровода горячей воды является цинкование труб.

Никелевое покрытие на стали - катод. Поэтому коррозию стали в порах покрытия можно избежать лишь устранив эти поры. Покрытие должно быть достаточно толстым с порами заполненными или лаком, или расплавом легкоплавкого металла, например, олова.

Часто сверху на слой никеля электроосаждением наносят слой хрома или еще один тонкий слой никеля, который благодаря легирующим добавкам делают пористым и к тому же анодом относительно нижнего слоя.

Общая толщина слоя никелевого покрытия колеблется от 0,008 мм - внутри жилого помещения, до 0,2 мм - на производствах в химической промышленности.

Для защиты металлических элементов, погруженных в воду, применяют **алюминиевое покрытие**, изготовленное методом напыления - металлизацией. Покрытие (обычно толщиной 0,08...0,2 мм) затем пропитывают органическим лаком. В паре с железом алюминиевое покрытие может выступать как анодом, так и катодом в зависимости от химического

состава коррозионной среды. При этом определяющее воздействие на потенциал алюминия и железа оказывают ионы Cl^- и SO_4^- .

Неорганические покрытия

Силикатные эмали или стеклоэмали изготавливаются путем наплавления размолотого порошка силиката того или иного состава на защищаемую поверхность. Эмалированная посуда, емкости, детали трубопровода и даже целые трубопроводы - все это может быть изготовлено с эмалевыми покрытиями.

Покрытия практически непроницаемы для воды, но до тех пор, пока не появятся трещины, что при хрупкости такого рода покрытий вряд ли можно избежать.

Цементные покрытия обладают ощутимым преимуществом - они имеют низкую стоимость и удобны при применении. Цемент обычно наносят на металлическую сетку слоем 5...25 мм.

Несмотря на то, что обычное цементное покрытие водопроницаемо, коррозионные процессы практически не идут из-за высокой щелочности бетона ($\text{pH} > 11$). При большом числе трещин и выщелачивании бетона защитные свойства покрытия снижаются.

За счет высокой щелочности защищена арматура железобетонных сооружений, например, мостов, но до тех пор, пока щелочность не уменьшится за счет проникновения солей и атмосферного воздуха, изменяющих химический состав бетона. Часто арматуру перед закладкой покрывают слоем изоляции, например, эпоксидной смолой.

Сталь в бетоне имеет более положительный электрохимический потенциал, чем сталь в почве. Поэтому при контакте с арматурой железобетонного сооружения подземный трубопровод работает анодом и может активно разрушаться.

Оксидирование и анодирование - процессы химической и электрохимической обработки защищаемой металлической поверхности с образованием нерастворяющейся пленки окислов. Покрытия хорошо стоят в атмосфере, но для трубопроводов непригодны.

Лакокрасочные и полимерные покрытия

Весьма многообразный выбор различного рода красок не свидетельствует о том, что все проблемы антикоррозионной защиты уже решены. Мало того, что эти покрытия пористые, но еще и стоимость работ по их

нанесению - с подготовкой окрашиваемой поверхности - в несколько раз превышает стоимость краски. Однако без изолирующих покрытий в антикоррозионной борьбе обойтись нельзя.

Битумные эмали или мастики - широко распространенный вид покрытия подземных трубопроводов - изготавливают из смеси нефтяных битумов и различного рода наполнителей. Наносят в расплавленном при температуре 160-170 °С виде на очищенную и отгрунтованную поверхность. При этом поверх мастики еще в горячем состоянии накладывают армирующий слой стеклохолста.

Конструкция битумного покрытия подземного трубопровода определяется требованиями норм и правил в соответствии с агрессивностью грунта. Так, для некоторых сред применяют **усиленное покрытие**, состоящее из следующих слоев:

- битумная грунтовка;
- мастика битумно-резиновая или битумно-полимерная;
- стеклохолст;
- мастика битумно-резиновая или битумно-полимерная;
- стеклохолст;
- наружная обертка из крафт-бумаги.

В целом толщина усиленного покрытия около 6 мм.

Применяют и **весьма усиленное** покрытие толщиной 9 мм. Такое покрытие включает в себя дополнительно еще один слой мастики со стеклохолстом.

Аналогична конструкция покрытия на основе каменноугольной смолы.

Битумное и каменноугольное покрытия готовят в основном в заводских условиях, стыки труб вручную заделывают на трассе. Существуют также машины для нанесения покрытия в трассовых условиях.

Дешевизна и надежность битумных покрытий открыли им широкую дорогу примерно с 30-х годов, в то время как каменноугольные покрытия для изоляции чугунных трубопроводов известны уже более 100 лет. Но можно вспомнить, что еще при строительстве дворца царя Соломона в 980 г. до н.э. битум использовали для защиты от коррозии.

1.3.3. Электрохимическая защита

Согласившись с тем, что полностью изолировать металлическую поверхность от окружающей среды нельзя (даже, если натянуть на стальную

трубу некий беспористый шланг, то как решить проблему герметизации стыков между шлангами?), коррозионная наука выдвинула альтернативный способ защиты. Способ был предложен в начале прошлого века, но, как это часто бывает, оказался не очень нужным и получил распространение лишь через 100 лет. Это - электрохимическая защита (ЭХЗ) металлических сооружений от коррозии, чему с благоговением отдана жизнь автора этой книги.

Различают четыре вида электрохимической защиты:

- а) *протекторную*;
- б) *катодную*;
- в) *электродренажную*;
- г) *анодную*.

На рис.1.1 даны схемы различных видов электрохимической защиты.

Познакомимся с ними скорее в историческом плане, оставив фундаментальный анализ на последующие главы.

Протекторная защита

В 1824 г. Хемфри Деви предложил защитить медную обшивку корабля с помощью прикрепляемых к ней железных (или цинковых) блоков при соотношении поверхностей железа и меди 1:100. Как мы теперь понимаем, Х.Деви впервые предложил *протекторную защиту* - разновидность электрохимической. Действительно, скорость коррозии медных

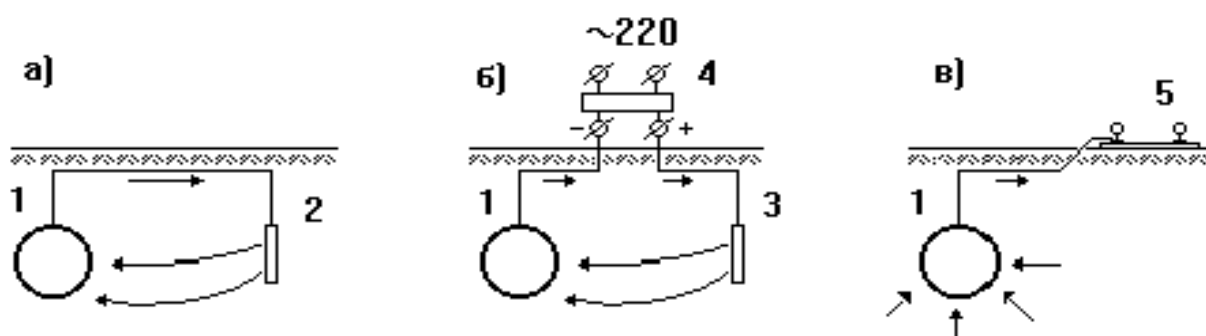


Рис.1.1. Схемы протекторной (а), катодной (б) и электродренажной (в) защиты трубопровода: 1 - трубопровод; 2 - протектор; 3 - анодный заземлитель; 4 - выпрямитель переменного тока; 5 - рельсы электро-транспорта.

листов и крепящих их гвоздей заметно упала, но защищенная медь стала обрастать морскими организмами, заметно снизившими скорость судна и Британское Адмиралтейство отвергло эту идею. Лишь после того, как деревянные корабли с медной обшивкой были заменены стальными судами, протекторная защита - к тому же с помощью цинковых пластин - стала традиционной.

Протекторная защита - электрохимическая защита с помощью тока гальванической пары.

Современные протекторные материалы - это сплавы на основе магния или алюминия, реже - цинка. Все они отличаются от стального защищаемого сооружения своим электрохимическим потенциалом, а именно, *их потенциал более электроотрицателен*. Благодаря разности потенциалов в гальванической паре возникает ток, стекающий с анода (более электроотрицательного электрода) и натекающий из электролита на катод. *Создание натекающего тока - цель электрохимической защиты.*

Катодная защита

Позже электрический ток, необходимый для ЭХЗ, решили получать с помощью внешнего источника. Так возникла идея *катодной защиты* - другой разновидности электрохимической защиты, которая была практически реализована в Англии и США в 1910-1912 гг.

При катодной защите, например, подземного стального трубопровода, в качестве жертвенного анода выступает электрод-заземлитель, заложенный в землю недалеко от него. Для того, чтобы этот заземлитель работал анодом, а труба - катодом, включают внешний источник постоянного тока, причем “плюсом” - к аноду, “минусом” - к катоду. При этом в принципе безразлично, из какого материала выполнен анод, важно лишь, чтобы образовался электрический ток и чтобы этот ток был направлен *из земли на трубу*. Действительно, ток идет от “+” источника на заземлитель, затем в землю, из земли - на трубу и возвращается на “-” источника.

Электродренажная защита

Третьей разновидностью ЭХЗ является *электродренажная защита*, использующая в качестве катодного (натекающего) тока *блуждающий ток* рельсового электротранспорта. Блуждающий ток есть часть тягового тока электропоезда или трамвая. Так как рельсы являются проводником

тягового тока и они не изолированы от земли, то часть тока протекает в земле недалеко от рельсов и может попасть на соседние трубопроводы. *Стекающий* затем с трубопровода, *блуждающий ток* вызывает электролитическое *растворение* металла. Если *весь* блуждающий ток отводить (дренировать) с трубопровода, то ток везде будет только *натекающим*, что и обеспечит эффект защиты.

Простейшая электродренажная установка - кабельная перемычка между трубопроводом и рельсами (рис.1.1,в). Величина тока в перемычке будет определяться разностью потенциалов труба-рельсы в точках их соединения. Блуждающий ток будет выполнять свои защитные функции, если *потенциал рельсов меньше потенциала трубопровода*. В этом случае ток по перемычке направлен из трубопровода в рельсы, а не в землю.

В 1895 г. в патенте No 538755, выданному Уоткинсу, описывается, вероятно, впервые, устройство, которое сейчас мы называем *электродренажом*. Первые неприятности с блуждающими токами на трубопроводе были зафиксированы в 1887 г. в Бруклине вблизи новейшей трамвайной линии. Этим ознаменовалось начало эры трамвая.

Анодная защита

Если при катодной защите требуется обеспечить *натекающий ток*, то при анодной - наоборот. *Анодная защита* применяется для металлов, которые могут переходить в так называемое *пассивное состояние*. Это, главным образом, нержавеющие и углеродистые стали в концентрированных кислотах, щелочах и солевых растворах. При ЭХЗ трубопроводов анодная защита не применима.

Комплексная защита

Практически во всех случаях применяют ЭХЗ *совместно с защитой изоляционными покрытиями*. Попытки использовать ЭХЗ для неизолированного сооружения приведут к неоправданным затратам электроэнергии и анодного материала. Действительно, при ЭХЗ изолированного сооружения *токи защиты будут распределяться лишь по трещинам и проколам в изоляции*, что резко снизит затраты на электроэнергию. Токи ЭХЗ, таким образом, “залечивают раны изоляции”, которые она получает в процессе строительства и эксплуатации сооружения. К тому же в порах и трещинах изоляции при электрохимической защите образуется солевой осадок, который “пломбирует” повреждения. Именно благодаря такой

дружественности повсеместно применяется *комплексная защита - изоляционные покрытия в сочетании с ЭХЗ.*

1.3.4. Прочие виды защиты

Ингибиторная защита

Ингибитор или замедлитель - это химическое вещество, искусственная добавка которого в агрессивную среду, причем в очень малом количестве, *уменьшает скорость коррозии.*

Считают, что защитное действие ингибитора связано с экранирующим эффектом адсорбированной пленки ингибирующего вещества на корродирующей поверхности. Этот барьер затрудняет ионный обмен и, следовательно, коррозионный процесс.

Ингибиторы широко применяются для защиты *внутренних поверхностей* трубопроводов при транспортировке агрессивных жидкостей, а также в химических производствах. В мире запатентованы тысячи химических соединений, пригодных в качестве ингибиторов в той или иной коррозионной среде.

Деаэрация воды

Этот способ защиты основан на факте, что при *уменьшении* содержания *кислорода* в воде ее *агрессивность падает.*

Кислород удаляется из воды либо химически, либо паровой или вакуумной деаэрацией. В *паровых* деаэраторах кислород выпаривают в тонких слоях воды или в брызгах на нагретых паром поверхностях. Полученная горячая вода далее используется в водяных котлах или в системе горячего водоснабжения, благоприятно действуя на коррозию внутренних поверхностей трубопроводов.

В *вакуумных* деаэраторах обескислороживается холодная вода путем понижения давления с помощью в пароструйных насосов. При этом удаляются и другие растворенные в воде газы.

Антикоррозионная защита стали в горячей воде имеет место при концентрации кислорода в ней не более 0,1 мг/л, что обеспечивается стандартным деаэраторам. Кстати, концентрация кислорода в воде в нормальных условиях может достигать 20 мг/л.

1.4. Нормы и правила

Отечественные государственные стандарты

Отечественная практика защиты от коррозии базируется на следующих основных государственных стандартах.

ГОСТ 9.101-78. Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Основные положения.

ГОСТ 9.602-89. ЕСЗКС. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии.

ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии.

Инструкции и отраслевые стандарты

Кроме перечисленных стандартов в технологии защиты от коррозии применяются различные отраслевые нормативно-технические документы. Ниже отмечены некоторые из них.

1) Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии / Руководящий документ, РД 153-39.4-091-01. АКХ им. К.Д. Памфилова. М.:Воениздат, 2002.

2) Инструкция по проектированию и расчету электрохимической защиты магистральных трубопроводов и промышленных объектов. ВСН-2-106-78. Миннефтегазстрой. 1980.

3) Руководство по эксплуатации средств противокоррозионной защиты подземных газопроводов. Т.1 и 2. - ВНИИГАЗ.1986.

4) Руководство по проектированию и защите от коррозии подземных металлических сооружений связи.- ЦНИИС.1984.

Учебная литература.

Министерством высшего и среднего специального образования допущены как учебные пособия лишь две книги: В.В.Красноярского и Л.Я.Цикермана [1] и Е.И. Дизенко с соавторами [2].

1.5. Развитие науки о коррозии и защите

Участие воздуха в окислении металла отметил еще М.В. Ломоносов в 1748 г. и доказал это в 1773г. француз А.Лавуазье, указав при этом на кислород. Но только в 1791г. Луиджи Гальвани - физик из Болоньи - опубликовал свои знаменитые электрохимические исследования. Лапка его лягушки, как первый электроизмерительный прибор, указала истинный путь к законам коррозии - от химии к электрохимии. Но тогда еще никто не догадывался, что именно *гальваническая пара есть движущая сила коррозии*.

Синьор Л.Гальвани, наверное, не знал, что в 1936 г. близ Багдада найдут несколько глиняных кувшинов высотой около 14 см, внутри которых находился *медный* цилиндр и проржавевший *железный* сердечник. Аналогичные сосуды были найдены в развалинах селения на берегу Тигра. Эти предметы были отнесены к периоду Римской империи 27 г.до н.э.- 395 г.н.э. Не являются ли найденные сосуды гальваническими элементами, которые, как предполагают, были использованы для электролитического золочения мелких предметов? Тогда как же быть с приоритетом Луиджи Гальвани ?

Выше уже упоминалось имя Хемфри Деви со своими достижениями по защите *медных* листов обшивки деревянных кораблей с помощью *железа*. Но античные строители судов об этом догадались много раньше. Для защиты от червей-древоточцев к деревянной доске с помощью медных гвоздей прикрепляли свинцовую пластину. Однако свинец вблизи гвоздя быстро разрушался, поскольку, как мы теперь понимаем, свинец по отношению к меди является анодом. И ими было найдено отличное решение: покрыть свинцом также и головки медных гвоздей. В результате этого гальваническая пара исчезла и ток коррозии прекратился.

Интуиция наших древних предков достойна уважения, но лишь систематические исследования позволяют формулировать фундаментальные законы. Именно Х.Деви в 1812 г. выдвинул гипотезу о связи между химическими превращениями и электрическим состоянием вещества: если веществу придать слабый отрицательный заряд, то химические изменения и, следовательно, коррозия будут предотвращены. О том, что металлы различаются электрическим потенциалом вдруг стало известно всем: в

1797 г. А.Вольта изобрел свой вольтов столб, в 1795 г. А.Гумбольдт обнаружил процесс электролиза, в 1798 г. Риттер заметил связь потенциала со склонностью металла к окислению. И это - сразу же после знаменитой публикации Л. Гальвани в 1791 г.

Х.Деви не только защитил ряд кораблей от морской коррозии, но и вырастил знаменитого Майкла Фарадея. Именно Фарадей в 1834 г. обнаружил количественную связь между массой растворившегося металла и величиной электрического тока. Вся современная теория электролиза пользуется *числом Фарадея*.

Затем в науке о коррозии наступил период затишья и лишь около 1890 г. знаменитый Томас Альва Эдисон попытался катодную защиту судов осуществить с помощью внешнего источника постоянного тока, однако в то время это было технически не рационально.

Начало эры катодной защиты можно довольно точно совместить с началом XX столетия. Действительно, в 1902 г. К.Коэн, затем в 1908 г. Х.Гепперт соорудили первые катодные станции для защиты трубопроводов. Но “отцом катодной защиты” американцы называли Роберта Дж.Куна, который в 1928 г. построил первую установку катодной защиты на магистральном трубопроводе в Новом Орлеане. Р.Кун дважды знаменит: от него идет число $-0,85$ В - так называемый, *минимальный защитный потенциал*, являющийся современным критерием электрохимической защиты.

Знаменитых имен в теории коррозии и защиты настолько много, что перечислить их - большой труд. Но пусть запомнятся имена физика Нернста с теорией электродных и диффузионных потенциалов, Ю.Эванса с поляризационными диаграммами, М.Пурбэ с диаграммами состояния *потенциал-рН*, Тафеля со своим знаменитым уравнением, и многих других известных ученых и инженеров: Г.Улиг, В.фон Бэкман, Х.Кэше, Х.Клас, Ф.Тодт, Ф.Веннер, Э.Зунде, Р.де Броувер, М.Паркер, В.Швертфегер, Дж.Скалли, В.Плудек и т.д.

Отечественная наука знаменита такими именами как Г.Акимов, А.Фрумкин, Н.Томашов, И.Розенфельд, Я.Колотыркин, Ю.Михайловский, В.Красноярский, Э.Гутман, внесших вклад в теорию коррозии; В.Притула, В.Негреев, А.Спирин, В.Кальман, И.Ершов, М.Трифель, И.Францевич, Д.Авербух, В.Высоцкий - первопроходчики в практике катодной защиты; И.Стрижевский, В.Левин, М.Сурис, А.Марченко, К.Никольский, Е.Никитенко, В.Глазков, Н.Глазов, В.Котик - создатели

норм и правил для практики электрохимической защиты; Б.Лорткипанидзе, Ю.Иоссель, В.Остапенко, В.Иванов, В. Лукович, В.Дмитриев, В.Ткаченко, Л.Разумов, О.Тозони - разработчики методов расчета электрохимической защиты, и много других известных имен с широким диапазоном деятельности, такие как Н.Жук, П.Акользин, Е.Люблинский, Л.Антропов, М.Фокин, Л. Цикерман, М.Тарнижевский, Л.Фрейман, А.Котельников, Д.Томлянович, Е.Дизенко, В.Новоселов, Н.Тесов, Б.Рейзин, Э.Финкельштейн, В.Притула, Г. Марквардт, Н. Сергеев, Г.Кленов, А.Гоник, М.Гетманский и т.д.

Итак, катодной защите - 100 лет. Во всех странах без исключения - это *признанный и обязательный метод защиты* трубопроводов от коррозии. По национальному стандарту США все вновь строящиеся стальные подземные трубопроводы должны обеспечиваться электрохимической защитой. Катодную защиту применяют для резервуаров, различного типа аппаратов с агрессивными жидкостями, морских свай, шельфовых нефтяных установок, морских и речных судов, шлюзовых ворот и т.д.

В нашей стране находятся в эксплуатации десятки тысяч установок ЭХЗ. В настоящее время только в г. Волгограде работают 750 катодных станций, которые защищают 1100 км городских газопроводных сетей низкого и среднего давления.

Задача науки и практики сегодняшнего дня - не ослаблять темп борьбы с коррозией.

Глава 2. Процессы электрохимической коррозии

2.1. Первопричины коррозии

Можно было бы начать с предположения, что основная причина электрохимической коррозии - гальваническая *неоднородность* с образованием на поверхности металлического сооружения множества микроанодов, например, за счет структурной неоднородности сплавов из-за наличия в них легирующих добавок и примесей. Но почему же тогда корродируют, как подтверждает опыт, электрохимически абсолютно *однородные*, чистые металлы?

Теоретики коррозии разделились на приверженцев *теории микрогальванических элементов* и *теории гомогенного растворения*. Последние могут обойтись без понятия “гальваническая гетерогенность”, хотя и не отрицают ее. Действительно, как бы ни была отполирована поверхность химически чистого металлического тела, на молекулярном уровне вы встретите такой набор неожиданностей и неоднородностей, что ни о какой гомогенности и эквипотенциальности двух соседних точек и речи не может быть. Так, две *разные грани* одного кристалла металлического тела имеют разные электрохимические потенциалы. Это и есть первая гальваническая пара на микроуровне.

Как вы увидите ниже, обе эти теории не антогонистичны. Поэтому забудем на время о гальванических парах, возникающих по каким-то причинам на металлической поверхности.

Пусть будет только **вода** и **кислород**.

Одна из удивительных особенностей молекулы воды - ее дипольные свойства. Несмотря на уравниловку зарядов H^+ и OH^- внутри молекулы, вода - полярно заряженная частица, способная притягиваться к положительно или отрицательно заряженным ионам окружающей среды, например, к ионам железа (рис.2.1).

Атомы металла образуют кристаллическую решетку, в пространстве которой свободно перемещаются электроны, покинувшие свои атомы, - так называемые, валентные электроны, что и показано на рис.2.1, как *первое событие* процесса коррозии. Неуравновешенный ионизированный атом металла Fe^+ - до тех пор пока он лишен электрона - является слабым местом решетки. Если этот ион доступен для атаки молекул воды, например, он находится на самой поверхности металла, а лучше - на вершине гребня или неровности поверхности, то вступают в действие *электростатические силы притяжения*. Окружая ион металла, молекулы воды - в силу своей *подвижности* - способны расшатать решетку и отделить ион.

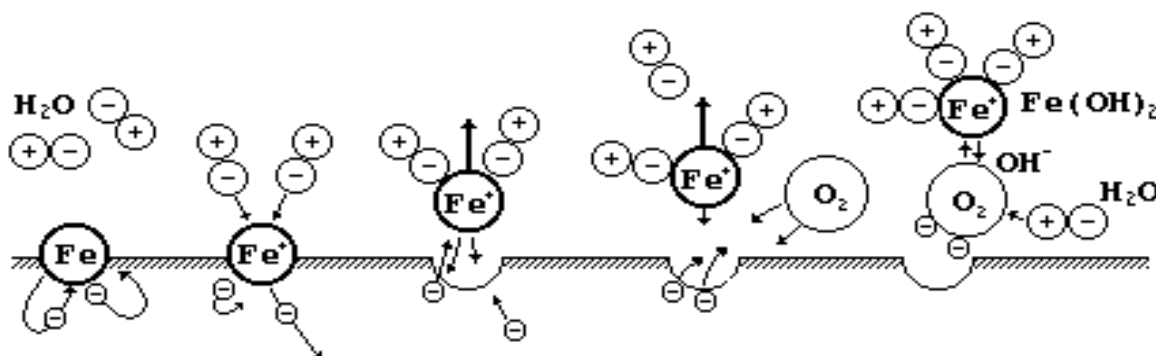


Рис.2.1. Этапы развития коррозионного процесса под действием воды и кислорода

Не будь противодействия такому началу, кристаллическая решетка быстро бы разрушилась. Противодействие процессу “растаскивания” организует фронт валентных электронов - облако свободно странствующих отрицательно заряженных частиц. Электроны, лишенные материнских сил поддержки со стороны своих атомов, ушедших в раствор, собираются вблизи границы металл-электролит, пытаясь вернуться к брошенным ими ранее частицам металла. Начинается перетягивание кто-кого: электроны - в одну сторону, вода - в другую. Если процесс возврата ионов металла идет с такой же скоростью, что и процесс их ухода “в воду”, то на границе устанавливается динамическое равновесие без каких либо материаль-

ных потерь. Возникает так называемый *ток обмена* и формируется *двойной электрический слой*: его внешней обкладкой являются *гидратированные* ионы металла, внутренней - электроны.

Однако равновесие может быть нарушено, если вмешается *третья сила*, способная благоприятствовать тому или противоположному фронту на двойном слое. Такая сила исходит от *молекулы кислорода*, которая подобно молекуле воды, являясь в целом нейтральной, но *способна*, что весьма удивительно при ее электронейтральности, *притягивать к себе электроны*. В данной ситуации агрессоры поделили сферу деятельности: *воде* - *положительно заряженная частица металла*, *кислороду* - *отрицательная*.

Кислород *ассимилирует электрон* и образует вне пределов металла некоторую отрицательно заряженную частицу.

Связывая электрон, кислород, таким образом, облегчает работу молекулам воды, которые теперь уже беспрепятственно отрывают, нейтрализуют и безвозвратно уносят ион металла. Разрушение - свершившийся факт.

Таким образом, для безостановочного протекания процесса разрушения достаточно воды и кислорода.

Заметьте, объяснить *первопричину* коррозии, как вы видите, можно и без привлечения понятия гальванической пары. Но дальше это делать уже трудно и даже нецелесообразно.

2.2. Движущая сила токов коррозии

2.2.1. Гальванопара на поверхности металлического сооружения

Пусть теперь за счет *диффузионных затруднений* для кислорода, - а кислород поступает в электролит из атмосферы, - его концентрация у корродирующей поверхности изменилась так, что в одном месте его избыток, а в другом - недостаток. Тогда линии тока, образуемые электронами, ищущими кислород, удлиняются в сторону области с избытком кислорода, как это показано на рис.2.2. В этом случае зоны действия воды и ки-

кислорода локализуются: в области избытка кислорода протекают в основном, катодные, т.е. **восстановительные** процессы с потреблением электронов, что не приводит к ощутимому уменьшению массы металла, а в другой части поверхности - **анодные, т.е. окислительные** процессы, сопровождающиеся **выносом металла**.

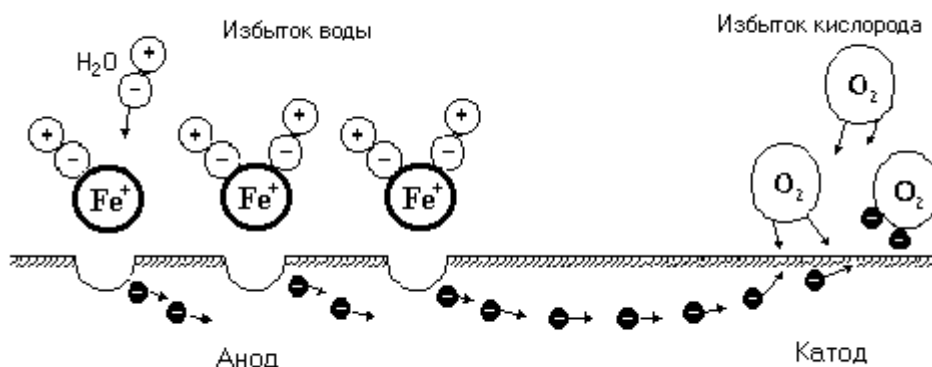


Рис.2.2. Образование гальванической пары в неоднородной среде

Теперь можно относиться к процессу коррозии как действию естественно образовавшейся *коррозионной гальванической пары*.

Между анодом и катодом расстояние может быть пренебрежимо малым, если речь идет о коррозии весьма чистого металла в очень однородной среде, но и достигает громадных размеров в десятки метров, если это - трубопровод с кусочно-неоднородной поверхностью в неоднородных грунтах.

Тем более можно ожидать локализации анодного и катодного процессов, если поток электронов стремится к перераспределению благодаря контакту *разнородных* металлов. Так, избыток электронов можно ожидать у металла, имеющего более *электроотрицательный* потенциал, если с ним контактирует другой металл, имеющий более *положительный* потенциал, т.е. если работает *контактная гальваническая пара*, например, железо-медь, где железо - более электроотрицательный электрод. Отток электронов от более электроотрицательного электрода этой пары к более положительному вызовет одновременный уход в раствор ионов с *этого же электрода*, т.е. анодную реакцию на нем.

В конечном итоге с *анода уходят и ионы, и электроны*.

Следует заметить, что контактная пара - это не только железо-медь, но и железо-железо, если одна из точек *структурно неоднородного* железного тела по электрохимическим признакам отличается от другой.

Таким образом, анодные и катодные зоны возникают из-за каких-либо неоднородностей в коррозионной среде и на металлической поверхности (рис.2.3). Причем одним из признаков *катода* является *избыток кислорода*.

Между анодом и катодом коррозионной пары возникает ток. Поскольку направление тока принимается противоположным направлению движения электронов (кто только это придумал!), то *ток в металле* корродирующего сооружения направлен *от катода к аноду*. Но линия тока всегда замкнута. Поэтому далее ток будет стекать с анода в коррозионную среду и затем натекает на катод. Т.е. **ток анодный** - это ток, **стекающий** с металлической поверхности в коррозионную среду, **ток катодный** - ток **натекающий** из коррозионной среды на нее.

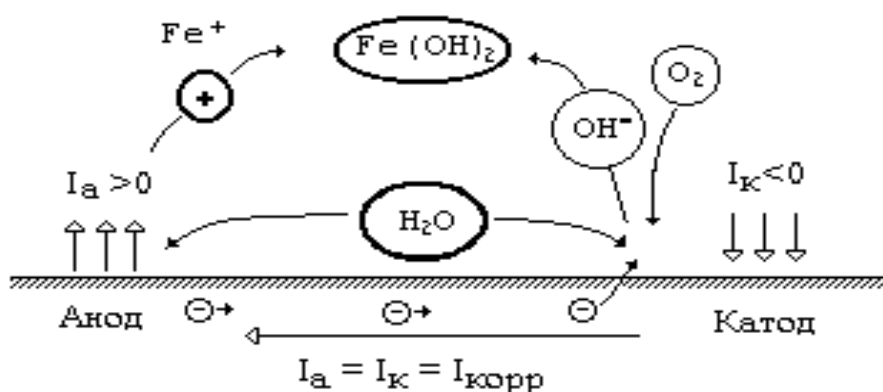
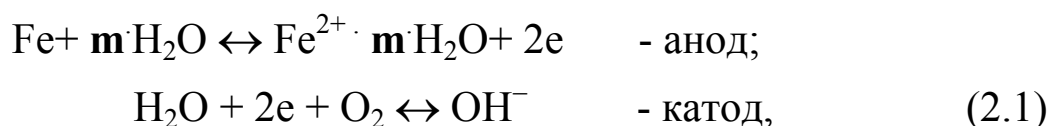


Рис.2.3.Коррозионный гальванический микроэлемент на поверхности металла, где $I_{\text{корр}}$ – ток коррозии .

Рассмотрим химическую кинетику двухэлектродного коррозионного гальванического элемента полагая, что на одном из электродов протекает только анодная реакция, а на другом - только катодная. Эти реакции наиболее вероятно описываются следующим образом:



т.е. на аноде под действием m молекул воды идет процесс *окисления*, на катоде - также не без участия воды - *процесс восстановления*. Вещество *окисляющееся отдает* электрон и, разумеется, ион, и затем превращается в *окисел*, а *восстанавливающееся вещество принимает* электрон, если он ему необходим и ничто этому не препятствует, образуя новое вещество.

Трудно осознать, что электронейтральной молекуле кислорода необходим электрон, в то время как положительно заряженные ионы, такие как Na^+ , Mg^+ и другие, во множестве окружающие любую корродирующую поверхность, остаются индифферентными по отношению к электрону. Лишь только ион водорода H^+ (заметьте, снова часть молекулы воды!) может участвовать в катодном коррозионном процессе, да и то лишь в довольно кислой среде, где его концентрация велика.

Реакция на катоде с участием O_2 ведет к подщелачиванию среды, т.е. к образованию иона гидроксила OH^- , что в свою очередь вызывает выпадение всевозможных осадков. Так, ион Fe^{++} , возникший на соседнем аноде, вступает в связь с ионом OH^- , образуя гидрат закиси железа $\text{Fe}(\text{OH})_2$, который затем переходит в более устойчивое соединение $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и далее превращается в набор окислов Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , представляющих собой конечный продукт совместной реакции - ржавчину.

2.2.2. Гальванические микронеоднородности

С помощью рис.2.4 проиллюстрированы наиболее вероятные причины возникновения гальванических элементов небольшого размера - *коррозионных микропар*.

1. При структурной неоднородности металлической поверхности (рис.2.4,1), а это, например, вкрапления и кристаллиты легирующих добавок и примесей, анодом будет служить металлическое включение, имеющее менее благородные свойства. Так, в паре с железом цинк работает анодом, а медь - катодом.

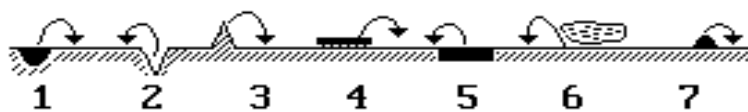


Рис.2.4. Причины возникновения коррозионных микропар на поверхности металлического сооружения: 1-структурная неоднородность металла; 2-царапины, щели; 3-риски; 4-наслоения, окислы, окалина; 5- деформация, наклеп; 6-неоднородность среды; 7- сварочный шов.

О “степени благородства” металла судят по его электродному потенциалу: *чем более положителен потенциал, тем более благороден металл*. Так, потенциалы упомянутых металлов в одном и том же электролите различаются следующим образом: $\varphi_{\text{Fe}} = -0,34 \text{ В}$, $\varphi_{\text{Cu}} = +0,05 \text{ В}$. Золото, в благородстве которого никто не сомневается, имеет потенциал $\varphi_{\text{Au}} = +1,42 \text{ В}$.

Структурная неоднородность металла может вызывать *межкристаллитную коррозию*, характерную для легированных металлов в высокоагрессивных средах. В этом случае разрушающееся металлическое изделие превращается в пористое тело, хотя внешне выглядит обыкновенно.

Некоторые сплавы подвержены *питтинговой коррозии*, последствия от которой имеют вид булавочных проколов глубиной 0,1...2 мм.

2. Дно царапины (рис.2.4, 2), как правило, работает анодом, особенно если царапина плотно забита грязью и продуктами коррозии, затрудняющими доставку кислорода, в то время как ближайшие участки сооружения более доступны для кислорода и поэтому выполняют роль катода. Можно ожидать, что в первое время наиболее интенсивным анодом выступают *острые кромки царапины* и только потом коррозия перемещается вглубь.

Неоднородность в виде глубокой щели, образованной двумя металлическими листами или деталями при их накладке и сопряжении, вызывает, как это широко отмечено в практике, явление *щелевой коррозии*, имеющей весьма опасные коррозионные последствия.

3. Заводские риски, появляющиеся при волочении труб, инициируют коррозию, которая, однажды начавшись, в общем случае может продол-

жаться бесконечно долго, меняя причины и факторы, затухая или возобновляясь.

4. Весьма опасна коррозия, связанная с заводской окалиной. Под слоем окалины протекают анодные процессы, если рядом имеются чистые участки металлической поверхности, не испытывающие недостатка в кислороде.

Аналогично влияние и любых других пористых слоев: окисных пленок и наслоений, солевых отложений, разрушенного изоляционного покрытия и пр. В любом случае *затруднение в доставке кислорода инициирует анодный процесс, если рядом есть поверхности, где кислорода избыток.*

5. Деформированный участок металлической поверхности - это, в сущности, уже другой металл со своими электрохимическими свойствами и прежде всего своим электрохимическим потенциалом. Так, образуют коррозионные пары отожженный и закаленный участки металлического сооружения (образующиеся, например, в процессе сварки), участок с наклепом (вы выравниваете кувалдой небрежно погнутую кромку трубы перед сваркой, надеясь на благодарность), гнутый участок трубы (этого, пожалуй, не избежать) и т.д. это - потенциально опасные места сооружения.

Как правило, деформированный участок работает анодом. Можно ожидать, что растянутые волокна будут разрушаться интенсивнее, чем ненапряженный металл. Коррозионные разрушения, инициированные механическим состоянием металла, относят к *механохимической коррозии*.

6. Разнообразны причины неоднородности окружающей среды и обусловленная этим скорость коррозии. Так, достаточно присутствия комка глины в хорошо аэрируемом песчаном грунте, чтобы возникла *пара дифференциальной аэрации* с анодом под глинистой шапкой.

Если среда в данной точке *отличается по химическому составу*, то потенциал металла здесь будет иной. Так, снижение показателя кислотности pH на одну единицу, т.е. незначительное подкисление среды, уже вызывает снижение потенциала железа примерно на $-0,06$ В, делая его более активным анодом. Если, например, к одной части металлической поверхности прилегает земля с $pH = 7$, а к другой с $pH = 6$, то возникнет гальванопара с электродвижущей силой равной $0,06$ В.

7. Сварочный шов может вызвать коррозию как непосредственно по шву, так и в околошовном пространстве в зависимости от электрохимических свойств материала сварочного электрода. Коррозионное начало может вызвать механическое продолжение разрушения, результатом чего является разрыв трубы по шву, причем часто с весьма серьезными последствиями.

Исключить неоднородность - вот основной метод борьбы с коррозией.

Если вы по-хозяйски относитесь к делу, то трубу при ее укладке в траншею уложите в мягкий грунт, причем желательно в песок. Не зря по стандарту это называется “уложить в постель”. Сверху трубу следует присыпать также однородным грунтом. И при разгрузке машины с трубами вы не позволите их сбрасывать навалом, бить, царапать. Инициировать коррозию - очень просто, а остановить ее без нашего участия уже невозможно. И это участие может проявиться слишком поздно или потребовать слишком больших средств и усилий.

2.2.3. Коррозионные макропары

Определенного деления коррозионных гальванопар на микро- и макропары по их размерам нет. Однако рассмотренные ниже примеры относятся явно к категории макропар.

Возникновение представленных на рис.2.5 коррозионных макропар обусловлено фактически одним общим фактором - *дифференциальной аэрацией*. Как было отмечено выше, в области повышенной концентрации кислорода металл приобретает свойства катода, если рядом есть зона с пониженной концентрацией O_2 .

1) На рис.2.5,1 представлен весьма распространенный случай из практики. Так как воздухосодержание песчаного грунта выше, чем глинистого, то на трубопроводе, пересекающем границу песок-глина, возникнет гальваническая пара, причем в песчаном грунте трубопровод будет работать катодом, а в глинистом - анодом.

2) Аналогична ситуация, представленная на рис.2.5,2. Так как воздухопроницаемость воды много меньше чем почвы, то трубопровод, уло-

женный в воде или в илистом грунте, будет работать *анодом*, в то время как береговой участок трубопровода - *катодом*. Этот пример также характерен для болотистых трасс с островками плотной или насыпной земли и трасс с резко переменной влажностью: на более влажных участках - *анодная зона*.

Было бы более рационально строить трубопровод не поперек реки, а вдоль нее (разумеется, с позиций коррозионниста).

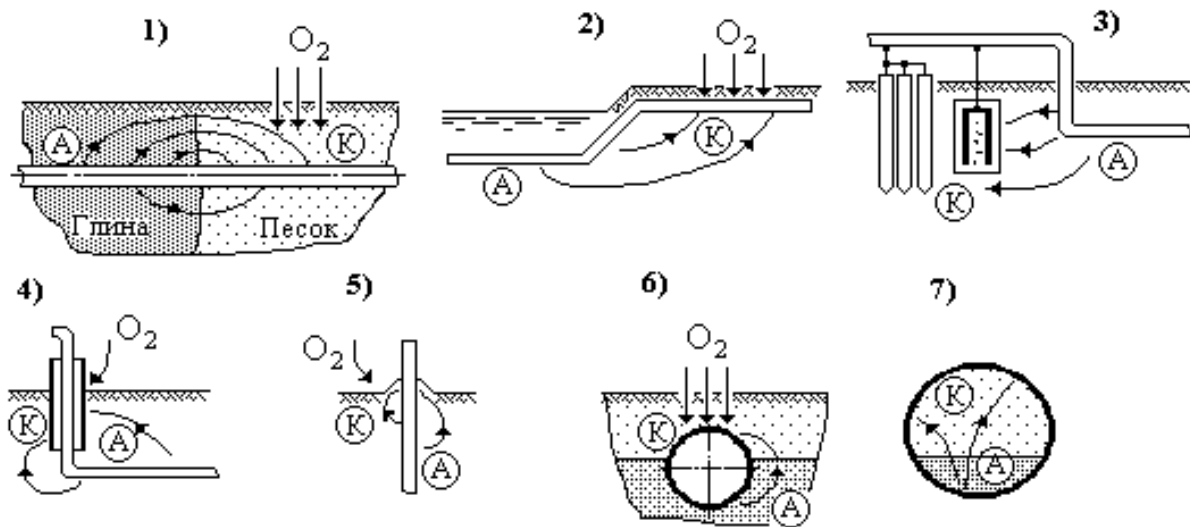


Рис.2.5. Примеры протяженных коррозионных гальванопар-макропар, возникающих в неоднородных средах.

3) На предприятиях устраивают заземления корпусов электроустановок, с которыми часто связывают *арматуру железобетонных опор* и различное металлическое оборудование цеха. К ним же автоматически подключаются подземные трубопроводы, поскольку последние на вводе в цех крепятся к металлическим частям стен. Возникает разветвленная гальваническая система “искусственные и естественные заземления - трубопровод” (рис.2.5,3). При этом *катодом* работает *заземлитель* - к нему доставка кислорода облегчена, особенно за счет различных мало заглубленных элементов, а *анодом* - подземный трубопровод, если к тому же он

покрыт слоем изоляции (разумеется, с дефектами) и уложен в мокрый грунт.

Известно, арматура железобетонных конструкций всегда имеет *более положительный потенциал*, чем открытая сталь, что обусловлено высокой степенью щелочности бетона. Поэтому арматура в тонких трещинах бетона всегда работает катодом, но та же арматура в местах полного разрушения бетонного камня - уже анод.

4) Макропара “труба изолированная - труба неизолированная” возникает по той же причине. На рис.2.5,4 неизолированной частью гальванической системы является предохраняющий футляр на вводе изолированного газопровода в здание. *Неизолированная труба* не испытывает затруднений в доставке кислорода и поэтому работает *катодом*. Проблемы удалось бы избежать при хорошей электрической изоляции футляра от газопровода. Так же следует поступить и в случае с заземленным трубопроводом, т.е. следует *отсечь его от заземления* на вводе в здание.

Сюда же относится пара “труба с новой изоляцией–труба с разрушенной изоляцией”, где старая труба будет играть роль катода. Вновь строящийся участок трубопровода, если он является развитием старой сети, желательно электрически отделить от сети. Для этой цели применяют *изолирующие фланцевые соединения*, рассекающие трубопровод на части.

Часто наблюдается коррозия газопровода в местах пересечения с трассой силового кабеля. Оболочка кабеля специально заземлена на трансформаторных пунктах и случайно связана с газопроводом на вводах в здания (например, через арматуру железобетонных элементов). Образуется разветвленная гальваническая система, в которую, между прочим, входит также еще и неизолированный водопровод, теплотрасса и прочие трубопроводы, входящие в здание. Они, как правило, работают катодами, а газопровод - анодом. Обязательно следует отделить газопровод от этой “компании” изолирующим фланцем, если есть желание избежать его коррозии и особенно утечки горючего газа в подвал здания.

5) Может возникнуть макропара на вертикально расположенном металлическом сооружении, например, на шпунтовой берегоукрепительной стенке, стальной опоре, трубе скважины и пр., когда верхняя часть сооружения (она богаче кислородом) работает катодом, а ближайший ниже

расположенный участок - анодом (рис.2.5,5). *Разрушение по ватерлинии* - распространенный вид коррозии в речной и морской воде.

6) При высокостоящей грунтовой воде возникает макропара “верх-низ” трубы, где нижняя часть, ввиду затруднений с доставкой кислорода, работает анодом (рис.2.5,6).

7) И, наконец, одна из причин внутренней коррозии трубопровода или резервуара, показанная на рис.2.5,7, связана с грязевыми осадками. Если верхняя часть стенки трубы свободно омывается и там нет кислородной проблемы, то внизу под плотным слоем грязи может возникнуть мощный анод. Коррозия вдоль трубопровода, как показала практика, имеет канавочный характер и поэтому коррозия была названа *канавочной*.

Таким образом, определяющими при разрушении металла являются кислород и вода, которые, будучи началами жизни, в данном случае хорошо демонстрируют единство жизни и смерти.

2.3. Факторы коррозии

Можно отметить ряд общих факторов, способствующих работе той или иной коррозионной гальванопары.

Движение электролита

Коррозионный процесс активизируется в движущейся коррозионной среде, особенно если часть металлического сооружения при этом находится в застойной зоне, где и образуется мощный анод. Здесь опять сказывается влияние кислорода: доставка кислорода к омываемой поверхности облегчается - вероятность возникновения катодного процесса увеличивается.

Солесодержание

Часто возникает вопрос о влиянии солесодержания окружающей среды на скорость коррозии. Если не задаваться задачами анализа влияния отдельных химических составляющих, то *с увеличением общего солесодержания скорость коррозии должна возрасти*, так как уменьшается

электрическое сопротивление цепи гальванической пары анод-катод и, следовательно, растет ток коррозии.

Однако следует заметить, что с увеличением солесодержания уменьшается растворимость кислорода в воде, что может тормозить катодный процесс. Так, если в пресной воде концентрация кислорода достигает 20 мг/л, то в высокоминерализованной воде, например, с плотностью 1,145 г/см³, она может снижаться до 0.7 мг/л. Поэтому по степени минерализации воды нельзя однозначно судить о скорости коррозии: *с увеличением солесодержания скорость коррозии может уменьшиться.*

Температура

К увеличению скорости коррозии ведет увеличение температуры окружающей среды, однако до тех пор, пока с ростом температуры не начнется заметное снижение содержания кислорода - обескислороживание среды (примерно от 80° С и выше).

Микроорганизмы

Анодный и катодный процессы активизируются при наличии в коррозионной среде определенного типа бактерий. Так, *сульфатовосстанавливающие бактерии*, размножающиеся при отсутствии кислорода, редуцируют в процессе своей жизнедеятельности сероводород H_2S , который, являясь весьма сильным окислителем, облегчает катодный процесс, и, следовательно, анодный, вызывая весьма опасную *сероводородную коррозию*.

Бактериями заражают нефтяные пласты нефтепромыслов при закачке в них сточных вод с целью выдавливания нефти. Активно размножаясь в глубине земли, бактерии редуцируют сероводород. Зараженная сероводородом вода выходит вместе с нефтью и вызывает разрушение нефтепромыслового оборудования, начиная от обсадных колонн скважин и насосов. К тому же в процессе сероводородной коррозии образуется - в виде отложения на корродирующей поверхности - *сернистое железо FeS* , которое является мощным катодом и служит причиной возникновения *коррозионных гальванопар*, например, по механизму рис.2.4, 4.

Механическое воздействие

В водных средах часто имеет место *коррозионная кавитация* - разрушение металла в результате одновременного коррозионного и ударного воздействия среды, и *коррозионная эрозия*, которая обусловлена совместным действием электрохимической коррозии и механического износа, а

также *фреттинг-коррозия* - коррозия трущихся поверхностей, о чем уже упоминалось.

Коррозионные микропары относительно небольших размеров и мощности вызывают так называемую *равномерную коррозию*, скорость которой невелика и не является определяющей для большинства металлических сооружений.

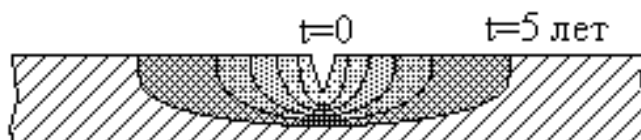


Рис.2.6. Этапы развития язвенной коррозии на стенке трубопровода

Основную опасность представляет *локальная или язвенная коррозия*, связанная с мощными коррозионными макропарами, генерирующими большой ток, а также с блуждающими токами, явление которых рассмотрено ниже.

На рис.2.6 показан процесс изменения формы коррозионной язвы в течение ряда лет. Обычно составляющие вектора скорости коррозионного проникновения вглубь и вдоль поверхности различны, как это и показано.

2.4. Потенциал и ток коррозии

Поток ионов железа несет положительные заряды, образующие электрический ток I_a , направленный из анода в коррозионную среду. Такой же по величине ток I_k создает поток электронов от анода к катоду, в конце концов покидающих металл на катоде. Этот ток $I = I_a = I_k$ можно представить как результат действия электродвижущей силы гальванического элемента, т.е.

$$I = (\varphi_{ок} - \varphi_{оа}) / R, \quad (2.2)$$

где I - ток гальванического элемента, $\varphi_{ок}$, $\varphi_{оа}$ - электрохимические потенциалы соответственно катода и анода, определенные при условии холостого хода гальванического элемента (при $I = 0$); R - сопротивление цепи анод-среда-катод.

Зависимость (2.2), несмотря на кажущуюся простоту, довольно сложна, поскольку сопротивление R является *нелинейной функцией* электродного тока. Так, электродный ток обычно подчиняется распространенной в природе закономерности

$$I = Ae^{\eta/B}, \quad (2.3)$$

где η - смещение потенциала относительно своего равновесного состояния и обычно называемое *перенапряжением* процесса; A , B - некоторые константы, зависящие от параметров окружающей среды и свойств металла.

Тогда сопротивление участка цепи между одним из электродов и средой следовало бы вычислять по формуле

$$R_{пол} = \eta / I. \quad (2.4)$$

Сопротивление $R_{пол}$, представляющее собой *сопротивление двойного электрического слоя* металл-электролит, поскольку η - падение напряжения на этом слое, называют *поляризационным*, так как его величина зависит от величины и направления тока поляризации.

Таким образом, э.д.с. элемента тратится на преодоление омического сопротивления коррозионной среды в цепи между анодом и катодом и двух поляризационных сопротивлений, так что для гальванического элемента

$$\varphi_{ок} - \varphi_{оа} = \eta_k + \eta_a + \Delta U_c; \quad (2.5)$$

$$I = (\eta_k + \eta_a + \Delta U_c) / (P_k / S_k + P_a / S_a + R_c), \quad (2.6)$$

где η_k , η_a - величина напряжения на поляризационном сопротивлении катода и анода соответственно; ΔU_c - падение напряжения в коррозионной среде; P_k , P_a - *удельные поляризационные сопротивления* катода и ано-

да, Ом·м²; S_k , S_a - площади катода и анода, м²; R_c - сопротивление среды между электродами, Ом.

При этом сопротивлением металла электродов пренебрегают.

На рис.2.7 представлена поляризационная диаграмма работающей пары, так называемая *диаграмма Эванса*, поясняющая соотношения (2.5) и (2.6).

По оси абсцисс откладывают абсолютные значения тока данного электрода, а по оси ординат - смещения потенциала с учетом их знаков, а именно $\eta_k < 0$, $\eta_a > 0$.

Несмотря на то, что диаграмма Эванса в таком виде - это лишь качественная иллюстрация процесса (ее практически можно снять, если взять два независимых электрода со своими потенциалами $\varphi_{ок}$ и $\varphi_{оа}$ и поляризовать один анодно, другой катодно с помощью внешнего источника тока), с ее помощью можно сделать ряд практических выводов.

1) Чем больше ток поляризации (I), тем сильнее *поляризуются - изменяют свой потенциал* - электроды. При этом *анод поляризуется положительно* ($\eta_a > 0$), т.е. его потенциал становится более положительным, а *катод - отрицательно*, так как $\eta_k < 0$.

Заметьте, по оси ординат вверх откладывают, хотя это и непривычно, *отрицательные* значения потенциала. Это - дань моде.

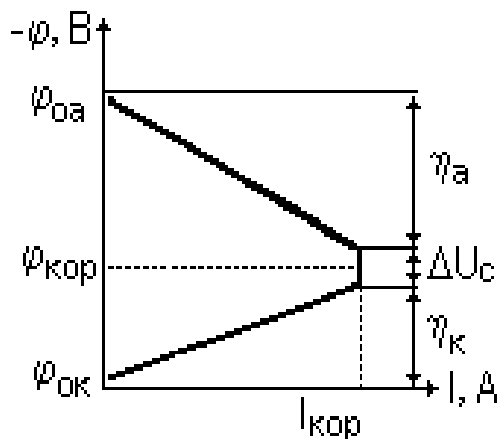


Рис.2.7. Коррозионная диаграмма Эванса, где $E = \varphi_{ок} - \varphi_{оа}$ - э.д.с. коррозионной гальванопары, η_a , η_k , ΔU_c - напряжения участков цепи соответственно на поляризационном сопротивлении анода, катода и в среде между ними.

2) В конечном счете электроды пары приобретают некоторый средний потенциал $\varphi_{\text{кор}}$, называемый *потенциалом коррозии*. Этот потенциал в точности определялся бы точкой пересечения анодной и катодной характеристик, если бы можно было пренебречь омической составляющей цепи - падением напряжения в среде (ΔU_c).

3) Ток коррозии $I_{\text{кор}}$ зависит от *разности* электродных потенциалов ($\varphi_{\text{оа}}$, $\varphi_{\text{ок}}$), которые, к сожалению, далеко не всегда известны, а не от потенциала коррозии $\varphi_{\text{кор}}$. Несмотря на свое имя, потенциал коррозии не определяет ток коррозии, а скорее наоборот: при токе коррозии $I_{\text{кор}}$ устанавливается некий компромиссный потенциал $\varphi_{\text{кор}}$.

4) Ток коррозии тем *выше*, чем *меньше* поляризационное сопротивление. Очевидно, что ток коррозии тем *выше*, чем *меньше* сопротивление среды.

2.5. Показатели коррозионного разрушения

2.5.1. Скорость коррозии в соответствии с законом Фарадея

Согласно *закону Фарадея*, количество электричества, стекающего с электрода, пропорционально потере массы этого электрода

$$G = qIT; \quad (2.7)$$

$$q = 3600 \cdot M / (nF),$$

где G - масса растворившегося металла, г; q - электрохимический эквивалент металла, $\text{г} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$; M - атомная масса, г/моль; $F = 96500$ - число Фарадея, Кл/г·Экв; n - валентность металла; I - величина электродного тока, А; T - время, ч.

Так, если при анодной реакции образуется двухвалентное железо ($n = 2$), то электрохимический эквивалент при $M = 56$ г/моль будет равен $q = 1,0424 \text{ г} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$ или $q = 9,12 \text{ кг}/(\text{А} \cdot \text{год})$.

Разделив правую и левую части на площадь поверхности растворяющегося электрода S , получим формулу, связывающую *плотность тока коррозии* с потерей массы

$$j = I / S = G / (SqT), \quad (2.8)$$

из которой следуют практические формулы для расчета *скорости коррозии*

$$j = \begin{cases} 0,95 v_1 \\ 0,85 v_2, \end{cases} \quad (2.9)$$

где j – плотность анодного тока коррозии, A/m^2 ; v_1 – скорость *весовой* коррозии, $г/(м^2ч)$; v_2 – скорость *проникающей* коррозии, $мм/год$.

Таким образом, ***величина плотности анодного тока есть мера скорости коррозии.***

2.5.2. Экспериментальное определение скорости коррозии

Экспериментальные методы определения скорости коррозии многообразны. Ниже приведены некоторые из них.

По величине поляризационного сопротивления

Широко распространенные в зарубежной практике коррозиметры общего применения контролируют величину поляризационного сопротивления двух электродов датчика, погружаемых в коррозионную среду и подключаемых к внешнему источнику постоянного тока малого напряжения ($U \approx 10$ мВ). При этом измеряют *наложенный ток пары* (I), определяют поляризационное сопротивление $R_{пол} = U / I$ и, вводя некоторый поправочный коэффициент, находят скорость коррозии.

К сожалению, при измерениях фиксируют воздействие коррозионной среды на электроды датчика, но не на самое металлическое сооружение, ради которого проводятся измерения. Так, этот метод не позволяет реги-

стрировать какие-либо коррозионные гальванопары, о влиянии которых много сказано выше.

Гравиметрия

Измеряют общую коррозию образца-свидетеля, который помещают в коррозионную среду, по возможности моделируя реальные условия эксплуатации сооружения. Метод широко применяется для лабораторных исследований, но мало пригоден для полевых.

Контроль электросопротивления

Измерительными датчиками в данном случае являются проволоочные или иные элементы, сопротивление которых увеличивается в процессе их коррозионного разрушения (за счет уменьшения поперечного сечения). Коррозиметры, построенные на этом принципе, - весьма точные электрические измерительные приборы, позволяющие наблюдать коррозию во времени, но как и прочие методы измерения, регистрируют лишь коррозию датчиков, а не реального металлического сооружения.

Прочие методы

Ультразвуковой контроль позволяет определять фактическую толщину стенки трубопровода или резервуара по изменению времени прохождения ультразвукового сигнала через стенку.

Радиографический контроль осуществляют с помощью рентгеновских лучей, “просвечивая” стенку резервуара или аппарата.

Поскольку измерение скорости коррозии реального металлического сооружения пока выполнить не удастся, то оценку коррозионной опасности ведут по косвенным показателям. Однако в следующей главе представлен новый расчетно-полевой метод определения плотности тока коррозии, который по мнению автора может иметь перспективу применения на действующих трубопроводах.

При критериальной оценке коррозионную стойкость металлов определяют по табл.2.1.

Таблица 2.1

Бал	Скорость коррозии, мм/год	Группа стойкости
1	Менее 0,001	Совершенно стойкие
2	0,001...0,005	Весьма стойкие
3	0,005...0,01	-''-
4	0,01...0,05	Стойкие
5	0,05...0,1	-''-
6	0,1...0,5	Пониженно стойкие
7	0,5...1,0	-''-
8	1,0...5,0	Малостойкие
9	5,0...10,0	-''-
10	Свыше 10,0	Нестойкие

Для спокойной почвенной коррозии характерны величины 0,01...0,1 мм/год, т.е. баллы 4-5. Язвенная коррозия, возникающая в процессе работы мощных коррозионных гальванопар, может характеризоваться балами 6-8 с максимальной скоростью, как правило, 2...3 мм/год, хотя практикой отмечалась коррозия и более высокого уровня вплоть до 20 мм/год.

Блуждающие токи могут вызвать коррозию силой до 10 баллов.

Глава 3. Коррозионная диагностика

3.1. Задачи коррозионной диагностики

Выявление очагов коррозии и оценка интенсивности коррозионных токов относится к предпроектным работам, которые должны обеспечить инженера-проектировщика исходными данными, определяющими объем и содержание проекта защиты, а также очередность выполнения антикоррозионных мероприятий.

Объем коррозионной диагностики планируют исходя из требований нормативной документации и особенностей объекта в зависимости от характера металлического сооружения и условий его эксплуатации.

Коррозионные исследования могут выполняться полевыми, лабораторными и численными методами.

На стадии коррозионных исследований *проектируемого* к укладке подземного трубопровода выполняют:

- измерения коррозионной агрессивности грунта;
- измерения разности потенциалов рельс-земля электрифицированного рельсового транспорта;
- измерения разности потенциалов труба-земля в смежных точках на соседних подземных сооружениях;
- расчет поля блуждающих токов с определением анодных зон на трубопроводах.

Для *существующего* трубопровода добавляют следующие работы:

- измерения разности потенциалов труба-земля при включенной электрохимической защите и без нее;
- измерения градиентов потенциала и определение поля токов в земле;
- определение вредных влияний токов электрохимической защиты на соседние подземные сооружения;

- определение наличия гальванических связей с соседними сооружениями и анализ работы гальванических коррозионных макропар;
- определение мест повреждения изоляционного покрытия трубопровода;
- расчет скорости коррозии по результатам полевых измерений;
- расчет удельного сопротивления изоляционного покрытия трубопровода по токам установок электрохимической защиты.

Фактический объем изыскательских работ определяет проектная организация.

3.2. Определение агрессивности грунта

В соответствии с действующим ГОСТ 9.602-89 “Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии” одним из *критериев коррозионной опасности* для стальных подземных металлических сооружений является *коррозионная агрессивность среды*, которую определяют два показателя:

- 1) удельное электрическое сопротивление грунта по трассе трубопровода (ρ);
- 2) удельное катодное поляризационное сопротивление (P_k), определяемое по плотности тока поляризации образца-свидетеля в условиях, близких к условиям трассы трубопровода.

Роль этих показателей как критериев коррозионной опасности станет очевидной, если рассмотреть формулы (2.5) и (2.6), которые в совокупности дают

$$I = E / R; \quad (3.1)$$

$$R = R_z + R_k + R_a,$$

где I - ток коррозии, E - э.д.с. коррозионной гальванопары, R - полное сопротивление току коррозии.

Составляющая R_z есть сопротивление “земляного” участка цепи гальванического элемента. Она однозначно определяется величиной удельного электрического сопротивления грунта (ρ) как обыкновенная омическая

составляющая электрической цепи. Здесь очевидно, что *чем меньше ρ и, следовательно, меньше R_z , тем больше ток коррозии.*

Второй участок цепи R образует катодное поляризационное сопротивление R_k . Этот участок контролируется удельным катодным поляризационным сопротивлением сооружения (P_k), поскольку $R_k = P_k / S_k$, где S_k - площадь катодных участков. Здесь справедливо аналогичное правило: *чем меньше P_k , тем больше ток коррозии.*

Третий участок - анодное поляризационное сопротивление R_a - подобен катодному (R_k), но техническими нормами как критерий коррозионной опасности не рассматривается, хотя этот параметр также управляет величиной тока коррозии.

Не учтена нормами также и величина э.д.с. (E) гальванопары в связи с отсутствием надежных экспериментальных способов ее контроля.

Во второй главе было отмечено множество и других факторов, в той или иной мере определяющих скорость коррозии. Но можно полагать, что все они воздействуют или на величину R с ее составляющими, или на величину E , меняя электрохимический потенциал электродов пары.

Таким образом, техническими нормами предусмотрены два показателя агрессивности среды - по ρ и по P_k . *Обобщающего критерия коррозионной агрессивности грунта нет.* Поэтому указанные выше требования ГОСТа при необходимости дополняются другими экспериментально проверенными способами оценки коррозионной опасности, назначаемыми при проектировании.

3.2.1. Измерения удельного электрического сопротивления грунта

Измерения удельного электрического сопротивления грунта в полевых условиях выполняют с помощью четырехэлектродной установки по схеме рис.3.1.

Метод построен на использовании известной формулы для потенциала в поле точечного источника тока в полупространстве, например, короткого стержня-заземлителя, расположенного у поверхности земли

$$\varphi = I\rho / (2\pi r) , \quad (3.2)$$

где φ - потенциал в исследуемой точке земли в поле точечного источника тока, В; I - ток точечного источника, А; r - расстояние от источника до исследуемой точки, м; ρ - удельное электрическое сопротивление грунта, Ом·м.

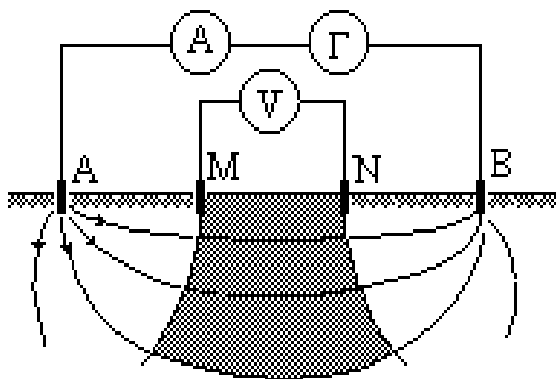


Рис.3.1. Схема четырехэлектродной установки для измерения удельного электрического сопротивления грунта и ее поле токов. A, B - токовые электроды, M, N - измерительные электроды, Γ - источник тока.

Стальные электроды небольшой длины A и B , как два точечных источника тока, устанавливают в исследуемом районе и подключают к генератору тока, в результате чего через оба электрода в любой момент протекает одинаковый по модулю и отличающийся лишь знаком ток I . Измеряют разность потенциалов, возникающую между двумя измерительными электродами M и N , установленными по одной линии с токовыми электродами A и B . В соответствии с формулой (3.2) для установки по рис.3.1 потенциалы в точках M и N определяются как разности

$$\begin{aligned}\varphi_M &= I\rho \left[1 / (2\pi a) - 1 / (4\pi a) \right]; \\ \varphi_N &= I\rho \left[1 / (4\pi a) - 1 / (2\pi a) \right],\end{aligned}\quad (3.3)$$

где a - шаг установки или расстояние между соседними электродами симметричной четырехэлектродной установки.

Тогда, имея в виду, что $U = \varphi_M - \varphi_N$, для вычисления ρ получим удобную формулу

$$\rho = 2\pi a R, \quad \text{где } R = U / I. \quad (3.4)$$

Обычно измеряют непосредственно величину R , для чего используют не амперметр и вольтметр, как условно показано на схеме, а логометр - прибор, измеряющий *отношение* двух электрических величин. Источником тока может служить батарея из сухих элементов или генератор переменного тока с ручным приводом.

Формула (3.2) справедлива для однородного грунта. Речь может идти лишь о некотором *среднем или «кажущемся» значении* ρ в районе измерительной установки. Полагают, что измеренное ρ характеризует *слой* земли между потенциальными электродами M и N *глубиной* равной примерно $AB/2$ (см.закрашенную область рис.3.1).

Коррозионными нормами предусмотрено шаг измерительной установки связывать с глубиной укладки трубопровода ($h_{\text{тр}}$) соотношением $a = h_{\text{тр}}$.

Последние теоретические исследования, проведенные нами для многослойных сред, показали, что предпочтительнее условие

$$a = 2h_{\text{тр}}, \quad (3.5)$$

В подтверждение этому на рис.3.2 показано, насколько зависимо «кажущееся» удельное электрическое сопротивление грунта (ρ_k) от произвольно принимаемого шага установки (a) для некоторых типичных многослойных структур, характерных для трасс подземных трубопроводов.

Задача для точечного источника в многослойных средах – это одна из задач метода зеркального отображения. Наиболее приемлемый алгоритм для решения таких задач современными способами заложен в методе оптической аналогии А.И.Якобса []. Процесс решения здесь сводится к отысканию координат и интенсивности эквивалентных, т.е. отраженных от границ раздела слоев, источников тока. Затем определяется суммарный потенциал в заданной точке среды, вызванный всеми отраженными источниками тока.

Результаты расчета, представленные ниже, получены с помощью новой программы «EZSLOY» комплекса АРМ-ЭХЗ-7. Эта программа предназначена также для исследования поля токов коррозии и защиты трубопроводов в многослойных средах.

Кривая A рис.3.2 относится к грунтам, у которых верхний слой относительно сухой, но с глубиной влажность слоев плавно увеличивается, и,

следовательно, удельное электрическое сопротивление уменьшается. Для этой структуры принят следующий ряд значений удельного электрического сопротивления слоев: $\rho_i = 120, 70, 40, 32, 27, 22, 21, 20, 18, 16, 15$. Кривые *Б* и *В* – тот же грунт, но с увлажненным в различной степени верхним слоем. Здесь для верхнего слоя вместо $\rho_1 = 120$ Ом.м принято $\rho_1 = 40$ Ом.м (для структуры *Б*) или $\rho_1 = 20$ Ом.м (для структуры *В*). Толщина каждого слоя принята равной 0,2 м.

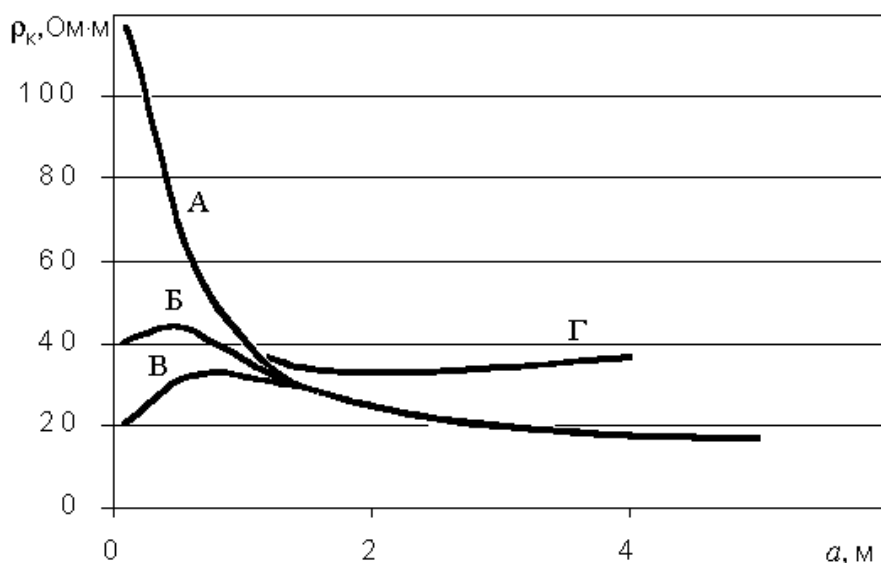


Рис. 3.2. «Кажущееся» удельное электрическое сопротивление земли ρ_k многослойных структур *А*, *Б* и *В*, вычисленное в зависимости от шага a четырехэлектродной измерительной установки.

Пусть ищется слой грунта на глубине $h_{\text{тр}} = 1,5$ м, т.е. седьмой слой с фактическим удельным электрическим сопротивлением $\rho_i = 20$ Ом.м. Это можно сделать с поверхности земли, приняв шаг установки равным $a = 3$ м, т.е. при условии при $a = 2h_{\text{тр}}$.

Но это плохо согласуется с принятой в практике нормой $a = h_{\text{тр}}$.

Сезонные изменения верхних слоев грунта (структуры *Б* и *В*, рис.3.2) практически не отражаются на результатах зондирования слоя $i = 7$, т.е. и в этом случае следовало бы принять $a = 2h_{\text{тр}}$.

Более непредсказуема неоднородность вида $\rho_i = 120, 70, 40, 32, 27, 22, 20, 22, 30, 40, 45$ Ом.м, когда в слоях ниже трубопровода ($h_{\text{тр}} = 1,5$ м) удельное электрическое сопротивление грунта вновь возрастает и там $\rho_i > 20$ Ом.м. В этом случае слой $\rho_i = 20$ Ом.м, лежащий на глубине 1,5 м, уже не обнаруживается вообще (рис.3.2, кривая Γ). Однако, как нам представляется, появление такой структуры грунта по трассе трубопровода маловероятно. Сезонные изменения или возникновение местных очагов загрязнения могут коснуться лишь верхних слоев.

Безусловно, более надежные результаты измерения можно получить, если погрузить измерительные электроды четырехэлектродной установки непосредственно в нужный слой - на глубину укладки трубопровода. Заглубляемые электроды – тонкие изолированные стержни с зачищенными концами.

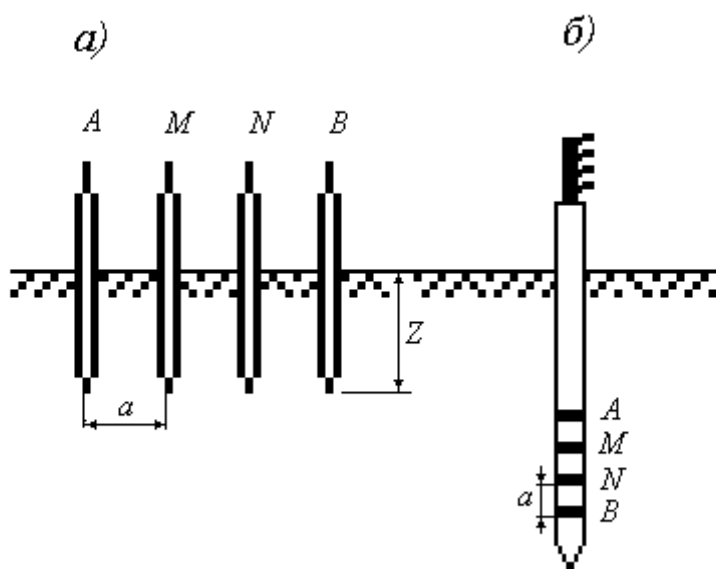


Рис.3.3. Варианты четырехэлектродных измерительных установок для зондирования земли в многослойных грунтах.

В табл.3.1 приведены результаты расчета ρ_k в многослойном грунте при малых значениях a и одновременном заглублении всех четырех электродов на глубину z .

Как следует из таблицы, заглубление электродов при $a < 0,5$ м обеспечивает высокую достоверность результатов зондирования слоя, в котором находятся измерительные электроды.

Таблица 3.1

Заглубление электродов, z, м	Удельное электрическое сопротивление грунта, ρ , Ом.м			
	заданное, ρ_i	рассчитанное, ρ_k		
		$a = 1$ м	$a = 0,5$ м	$a = 0,25$ м
0,1	120	37,780	63,952	90,612
0,3	70	33,649	49,207	62,339
0,5	40	30,708	39,742	42,779
0,7	32	28,111	32,392	32,695
0,9	27	25,377	26,914	26,820
1,1	22	23,139	23,370	22,832
1,3	20	21,247	20,684	20,140
1,5	18	19,698	18,859	18,370

В варианте с заглубленными электродами по схеме рис.3.3, a в расчетную формулу (3.4) должен быть введен легко рассчитываемый поправочный коэффициент k , учитывающий зеркальное отражение токовых электродов установки

$$\rho = 2\pi akU / I; \quad (3.6)$$

$$k = 1 / (1/(2a) + 1/\sqrt{(2z)^2 + a^2} - 1/\sqrt{(2z)^2 + (2a)^2}).$$

Так, при $a = 0,25$ м и заглублении электродов равном $z = 0,5$ м должно быть $k = 1,92$.

При использовании схемы по рис.3.3,б и $a \ll z$ должно быть $k = 2$.

При полевых работах выбирают интервал между точками измерений на исследуемой площадке. Этот интервал зависит от характера грунта в районе исследований: *чем более неоднороден грунт, тем чаще измерения*. Как было показано выше, одна из причин возникновения коррозионных макропар дифференциальной аэрации как раз и связана с неоднородностью грунта по трассе трубопровода.

При выборе площадки для измерительной установки, во избежание погрешностей измерения, стараются электроды устанавливать не ближе $2a$ от ближайшего трубопровода или кабеля.

Коррозионная агрессивность грунта по ГОСТ 9.602-89 определяется по графе 2 табл.3.2: **чем меньше удельное сопротивление грунта, тем он агрессивнее.**

3.2.2. Определение агрессивности грунта по плотности тока поляризации

Данный метод относится к лабораторным и является альтернативным методу оценки по величине ρ . При использовании этого метода фактически измеряется катодное поляризационное сопротивление $R_k = P_k / S$ стального образца площадью S в грунте, взятом с трассы трубопровода. Как отмечено выше, чем меньше удельное поляризационное сопротивление (P_k), тем больше ток коррозии гальванопары.

Таблица 3.2

Коррозионная агрессивность	Удельное электрическое сопротивление грунта, ρ , Ом·м	Плотность тока поляризации, $j_{\text{пол}}$, А/м ²
Низкая	Свыше 50	До 0,05
Средняя	От 20 до 50	От 0,05 до 0,2
Высокая	До 20	Свыше 0,2

Стальной образец помещают в ячейку с грунтом и *катодно* поляризуют в течение заданного интервала времени (10-40 мин.), поддерживая катодное смещение потенциала на уровне $\Delta U_k = 0,1 \text{ В} = \text{const}$, после чего фиксируют среднюю плотность тока катодной поляризации $j_{\text{пол}}$ и оценивают коррозионную агрессивность по графе 3 табл.3.3.

Удельное катодное поляризационное сопротивление при необходимости вычисляют по формуле

$$P_k = \Delta U_k / j_{\text{пол}} \quad (3.7)$$

Как следует из таблицы, имея ввиду, что $P_k = 0,1 / j_{\text{пол}}$, получим, что при $P_k \leq 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ грунт считается высокоагрессивным, а при $P_k \geq 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ - неагрессивным, т.е. **чем меньше P_k , тем агрессивнее грунт.**

Данный метод моделирует катодный процесс коррозии приближенно, поскольку реальная концентрация кислорода у поверхности трубопровода, а именно кислород контролирует величину удельного поляризационного сопротивления P_k , может существенно отличаться от модельной.

К тому же остается без внимания анодный процесс. Так, коррозионный анализ, выполненный этим методом в плотных грунтах типа глины, укажет на низкую агрессивность грунта для образца целиком помещенного в глину. И это действительно так, поскольку катодные процессы в данном случае резко заторможены доставкой кислорода, вследствие чего ограничены также и анодные процессы.

Но та же глина, имеющая границу с песком, очень агрессивна по отношению к протяженному металлическому телу - трубопроводу, пересекающему эту границу, поскольку в данном случае возникает коррозионная макропара дифференциальной аэрации и в глине протекают ничем не заторможенные анодные процессы.

Поэтому чрезвычайно полезно было бы отладить методику измерения поляризационного сопротивления P_k непосредственно на трассе трубопровода, что, по крайней мере, снизило бы зависимость от произвола с кислородом и влажностью в лабораторной установке.

На схеме рис.3.4 дается многократно опробованная в натурных условиях схема измерения P_k .

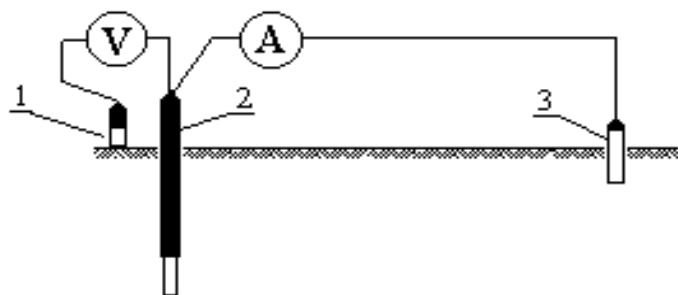


Рис.3.4. Электрическая схема установки для полевого метода катодной поляризации: 1- медно-сульфатный электрод сравнения; 2 - зонд; 3 - анод.

Измерительный зонд (2) в виде острой шпильки в изолирующей трубке заглубляют на нужную глубину и присоединяют к аноду (3), например, к бруску из протекторного сплава. Включая-выключая токовую цепь, измеряют смещение потенциала зонда и ток поляризации, после чего удельное поляризационное сопротивление вычисляют по формуле (3.5), где плотность тока определяют по площади рабочей поверхности зонда.

В табл.3.3 приводятся сравнительные данные полевых измерений на объектах АО «ВолгоградГОРГАЗ» в 1998-2000 гг.

Таблица 3.3

№№ пп	ρ , Ом.м	$j_{\text{пол}}$, А/м ²	№№ пп	ρ , Ом.м	$j_{\text{пол}}$, А/м ²
1	20,3	0,215	15	14,2	0,227
2	29,1	0,155	16	24,5	0,160
3	33,0	0,148	17	26,3	0,280
4	34,7	0,118	18	48,8	0,055
5	30,0	0,091	19	43,2	0,090
6	33,8	0,105	20	20,7	0,254
7	27,3	0,230	21	32,0	0,176
8	30,0	0,150	22	49,8	0,160
9	21,6	0,249	23	33,8	0,094
10	20,7	0,214	24	8,5	0,50
11	43,5	0,180	25	22,7	0,180
12	18,8	0,300	26	21,6	0,249
13	30,0	0,104	27	30,0	0,150
14	59,2	0,064	28	27,3	0,230

Измерения выполнялись стальным электродом-зондом диаметром 5 мм, общей длиной 600 мм, с рабочей (неизолированной) частью длиной 318 мм, что соответствовало площади $S = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$.

Разброс значений $j_{\text{пол}}$ неизбежен, поскольку величина поляризационного сопротивления определяется ионным составом вод грунта, а величина ρ - общим солесодержанием. Несмотря на это, корреляция с данными табл.3.2 очевидна.

3.3. Методы исследования работы коррозионных макропар

3.3.1. Метод градиента потенциала

Местоположение анодов протяженных коррозионных макропар на трубопроводах в ряде случаев легко обнаруживается с поверхности земли. На рис.3.5 продемонстрированы для этой цели возможности *метода градиента потенциала*.

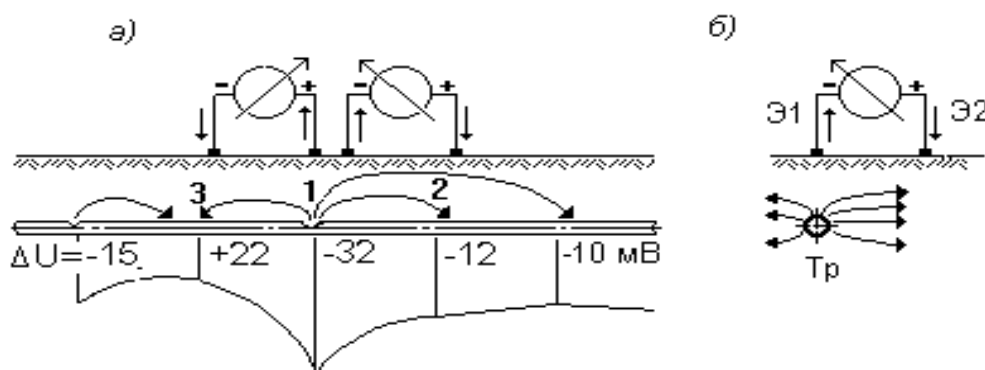


Рис.3.5. Определение местоположения анода коррозионной макропары методом градиента потенциала.

Два измерительных (медносульфатных) электрода перемещают по трассе трубопровода вдоль (а) или поперек ее (б) с некоторым постоянным шагом. При отсутствии каких-либо токов в земле и равенстве собственных потенциалов электродов (в худшем случае собственные потенциалы электродов различаются на несколько мВ, что можно учесть в результатах измерения как систематическую ошибку) милливольтметр покажет нуль градиента потенциала, т.е. $\Delta U = 0$.

Прежде чем заняться анализом представленной на рис.3.5 эпюры потенциалов, необходимо учесть следующее.

Для измерений берут милливольтметр, имеющий шкалу с нулем посередине или цифровой прибор. Обычно у стрелочного измерительного прибора “плюсовая” клемма расположена на корпусе *справа*. Поэтому отклонение стрелки измерительного прибора *вправо* от нуля, т.е. в сторону

зажима “+”, фиксирует *положительное* значение измеряемой величины ($\Delta U > 0$), означающее, что потенциал на зажиме “+” больше, чем на зажиме “–” и ток в измерительном приборе протекает, как и положено, от большего к меньшему, т.е. от “плюса” к “минусу”. Следовательно, и в земле направление такое же: от “плюсового” электрода к “минусовому”.

Пусть в результате измерений оказалось, что двухэлектродная установка слева по рис.3.4,*а* фиксирует $\Delta U > 0$, т.е. стрелка отклонилась вправо и, следовательно, электрод, подключенный к зажиму “+”, имеет более положительный потенциал, чем электрод, подключенный к зажиму “–”. Отсюда следует, что между электродами в земле существует ток, направленный *от точки 1 к точке 3*.

И, одновременно, пусть установка справа на рис.3.4,*а* фиксирует $\Delta U < 0$. Здесь ток в земле уже направлен слева направо, *от точки 1 к точке 2*.

Но изменение направления тока в земле, а это в нашем примере имеет место в точке 1, может быть зафиксировано в реальной ситуации только в том случае, если между левой и правой измерительными установками “фонтанирует” ток некоего источника. Если других предположений нет, то этим источником будет трубопровод, а центр “фонтана” (точка 1) есть центр анода гальванической макропары, как это и показано на рис.3.5,*а*.

Для подтверждения факта наличия анода делают измерения в поперечном направлении (рис.3.5,*б*). В этой ситуации стрелка отклонится влево от нуля, т.е. прибор покажет, что электрод Э1 отрицательнее электрода Э2.

При использовании цифрового милливольтметра измерения выполняются относительно зажима, помеченного знаком *. Если, например, электрод Э2 подключен к зажиму *, а электрод Э1 – к другому выходу прибора, то в ситуации по рис.3.5,*б* прибор зафиксирует отрицательное значение потенциала Э1 относительно Э2.

3.3.2. Метод выносного электрода.

Как известно из предыдущего, *анод - более электроотрицательный электрод*. Поэтому первым признаком присутствия анода гальванопары в данной точке трубопровода служит *более электроотрицательное значе-*

ние разности потенциалов труба-земля сравнительно с аналогичной разностью потенциалов в соседней точке.

Рассмотрим эту ситуацию несколько подробнее. Но прежде определимся с одним из часто используемых в практике терминов - стационарным потенциалом металлического сооружения. Будем называть *стационарным потенциалом трубопровода - разность потенциалов “труба-земля” при отсутствии токов электрохимической защиты.*

Стационарный потенциал реального металлического сооружения - не очень строгий термин из электрохимического лексикона. В общем случае это есть разность потенциалов

$$U_{\text{ст}} = \varphi_{\text{т}} - \varphi_{\text{з}} + U_{\text{э}}, \quad (3.8)$$

где $U_{\text{ст}}$ - стационарный потенциал *трубопровода*; $\varphi_{\text{т}}$ - потенциал тела трубопровода относительно бесконечно удаленной точки земли, т.е. относительно той точки, где полем токов коррозии можно пренебречь; $\varphi_{\text{з}}$ - потенциал земли вблизи трубопровода, также отсчитанный относительно “далекой” земли; $U_{\text{э}}$ - собственный потенциал измерительного (медносульфатного) электрода сравнения. При отсутствии каких либо токов в земле $\varphi_{\text{т}} = 0$ и $\varphi_{\text{з}} = 0$.

В электрохимии чаще говорят о *стационарном потенциале металла* $\varphi_{\text{ст}}$ как потенциале обособленного электрода малого размера.

При измерении стационарного потенциала трубопровода “плюс” вольтметра (или зажим *) подключают к трубе, “минус” - к измерительному электроду, который располагают возможно ближе к трубопроводу.

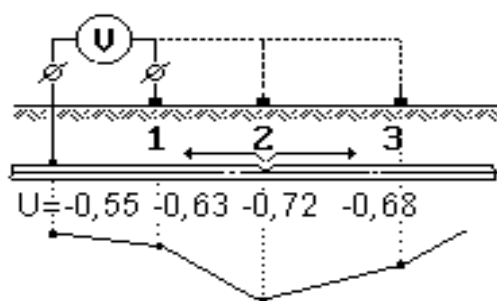


Рис.3.6. Эпюра разности потенциалов труба-земля, полученная при измерении методом выносного электрода.

Метод выносного электрода, представленный на рис.3.6, предполагает, что передвижной измерительный электрод находится на поверхности земли и его перемещают с небольшим шагом (10...20 м) вдоль трассы

трубопровода, соединив "+" прибора с ближайшей доступной точкой трубопровода. Докажем, что *наиболее отрицательному значению стационарного потенциала $U_{ст}$ соответствует центр анода.*

Пусть, например, в трех соседних точках трубопровода измерены стационарные потенциалы $U_{ст.1}$, $U_{ст.2}$, $U_{ст.3}$, причем оказалось, что

$$U_{ст.1} > U_{ст.2} < U_{ст.3}.$$

В соответствии с формулой (3.6), полагая $U_9 = \text{const}$, должно быть

$$\varphi_{т1} - \varphi_{з1} > \varphi_{т2} - \varphi_{з2} < \varphi_{т3} - \varphi_{з3}.$$

Поскольку эти точки расположены недалеко друг от друга, то можно допустить

$$\varphi_{м1} = \varphi_{м2} = \varphi_{м3},$$

т.е. можно пренебречь изменением потенциала в теле трубопровода (это допущение легко доказывается, если учесть, что удельное продольное сопротивление трубопровода чрезвычайно мало и составляет $10^{-4} \dots 10^{-6}$ Ом/м). Отсюда, сокращая все $\varphi_{т}$ и меняя знаки неравенства на противоположные, получим

$$\varphi_{з1} < \varphi_{з2} > \varphi_{з3}.$$

Это означает, что

- ток в земле направлен от точки 2 к точкам 1 и 3;
- *вблизи точки 2* находится "фонтан" тока, т.е. **анод**, а точки 1 и 3 размещены в катодной зоне.

Таким образом, **коррозионно опасными точками вдоль трубопровода являются точки с более электроотрицательной разностью потенциалов труба-земля, если рядом имеются точки с более положительным потенциалом.**

3.3.3. Расчет токов коррозионной макропары

По результатам измерения поперечного градиента потенциала может быть рассчитана плотность анодного тока. На рис.3.7 представлены количественно точно построенные эквипотенциальные линии поля токов коррозии в земле в поперечном сечении трубопровода. Можно полагать, что

эти линии – есть следы боковых поверхностей соосных полуцилиндров небольшой, например, метровой длины.

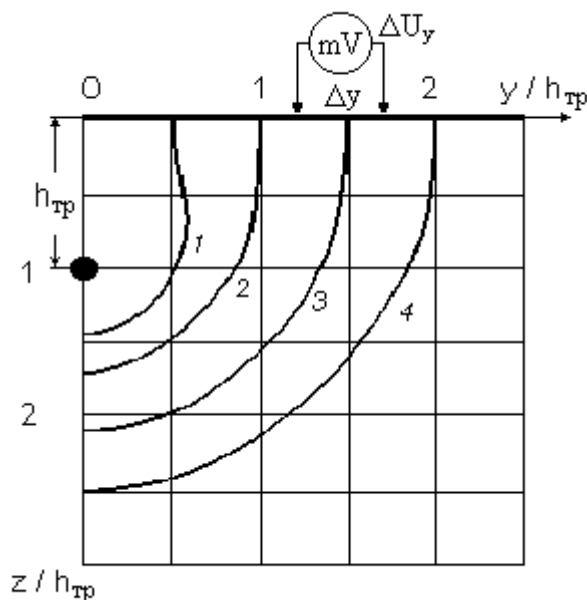


Рис.3.7. Изменение относительной напряженности поперечного поля токов трубопровода в земле, E_y/E_0 : 1 - 0,206; 2 - 0,197; 3 - 0,182; 4 - 0,163, где E_0 - напряженность поля в земле у поверхности трубопровода; x, y, z – координаты точки земли, где ось $0y$ – поперечная.

По закону Ома плотность тока в земле в направлении оси $0y$ определяется через напряженность поля токов, т.е.

$$j_y = E_y / \rho \quad (3.9)$$

где $E_y = -\Delta U_y / \Delta y$ - составляющая градиента потенциала вдоль оси $0y$; j_y – осевая составляющая плотности тока в земле; ΔU_y – напряжение между двумя близко расположенными измерительными электродами; Δy – расстояние между этими электродами.

Определив j_y и зная площадь боковой цилиндрической поверхности S_y , которую пронизывает этот ток, можно вычислить суммарный ток коррозии $I_{\text{корр}}$, а затем по диаметру трубопровода d найти и плотность тока коррозии, стекающего с единицы длины трубопровода $j_{\text{корр}}$.

Рассмотрим этот алгоритм на примере. Пусть точно известна форма и длина одной из эквипотенциальных линий поля токов (рис.3.7), например, та, которая начинается на поверхности земли в точке с координатой $y/h_{\text{тр}} = 2$. Эта кривая определяется с помощью компьютерной программы АРМ-ЭХЗ-7П, описание которой приведено ниже. Выбранная кривая задает площадь боковой поверхности полуцилиндра $S_y = 10,35 \text{ м}^2$, поскольку принимаем, что длина полуцилиндра - один погонный метр.

Пусть глубина укладки трубопровода $h_{\text{тр}} = 1,5 \text{ м}$, координаты измерительных электродов $y_1 = 2,5 \text{ м}$ и $y_2 = 3,5 \text{ м}$, градиент потенциала $\Delta U_y = 11,3 \text{ мВ}$ при $\Delta y = 1 \text{ м}$, удельное электрическое сопротивление грунта $\rho = 10 \text{ Ом.м}$.

По формуле (3.7) плотность тока в земле $j_y = 1,13 \text{ мА/м}^2$, суммарный ток коррозии $I_{\text{корр}} = j_y S_y = 11,7 \text{ мА}$.

Если диаметр трубопровода $d = 0,5 \text{ м}$, то ток, стекающий с трубопровода единичной длины ($\Delta x = 1 \text{ м}$), будет равен

$$j_{\text{корр}} = I_{\text{корр}} / (\pi d_{\text{тр}}) = 7,44 \text{ мА/м}^2.$$

Коррозионный ток такой величины не следует отбрасывать как несущественный. Именно такого порядка плотность тока электрохимической защиты, причем для трубопроводов с весьма плохой изоляцией. К тому же известно, что ток защиты, как правило, должен быть в 2-4 раза больше тока коррозии.

Оценим вычисленное значение коррозионного тока по величине скорости коррозионного проникновения. В соответствии с формулой (2.9) *средняя по поверхности* скорость коррозионного проникновения равна

$$v_2 = j_{\text{корр}} \cdot 10^{-3} / 0,85 = 8,77 \cdot 10^{-3} \text{ мм/год}.$$

Но при гальванической неоднородности, т.е. в рассматриваемом случае, трубопровод корродирует не равномерно, а язвами. Возможно, что в коррозии участвует лишь 0,01 часть поверхности или даже еще меньшая ее доля. Поскольку, к сожалению, мы пока это определить не сможем, но опыт подсказывает, что скорость язвенной коррозии может на 2-3 порядка превышать скорость равномерной коррозии, т.е. можно ожидать скорость *язвенной коррозии* порядка 0,8...1,0 мм/год.

3.4. Численный анализ работы коррозионной макропары

Ниже использован метод расчета, представленный в *главе 6*, и реализованный в одной из программ комплекса АРМ-ЭХЗ-7П, описанного в *главе 7*.

Пусть методом выносного электрода в точках $L_1, L_2, \dots, L_N$ измерены значения разности потенциалов U между телом трубы и точками, расположенными на поверхности земли вдоль оси трубопровода ($U = U_1, U_2, \dots, U_N$). Состояние $U \neq const$ вдоль трассы свидетельствует о наличии токов коррозии. Задача состоит в отыскании распределения плотности тока j (анодного и катодного) в этих точках.

Для расчета трубопровод разбивают на N отрезков, называемых *отрезками дискретизации* ($\Delta L_1, \Delta L_2, \dots, \Delta L_N$), которые в данном случае представляют собой расстояния между точками измерения, т.е. $\Delta L_i = L_i - L_{i-1}$, где $i = 1, 2, \dots, N$. Поскольку эти отрезки связаны между собой и токи взаимозависимы, то образуется система уравнений N -го порядка относительно неизвестной j . Эту систему удобно представить в виде двух матричных уравнений

$$\begin{aligned} (\mathbf{B}\mathbf{A} - \mathbf{E})\mathbf{j} &= -\mathbf{B}\boldsymbol{\varphi}_{\text{ст}}; \\ \mathbf{R}_{\text{из}}\mathbf{j} + \boldsymbol{\varphi}_{\text{ст}} &= \mathbf{U}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

где $\mathbf{j}$ - искомый вектор плотности тока трубопровода; $\mathbf{R}_{\text{из}}$ - вектор удельного сопротивления изоляции; $\mathbf{B}, \mathbf{A}$ - матрицы, определяющие параметры трубопровода, его конфигурацию, взаимовлияния участков и связи между N узлами дискретизации; $\mathbf{E}$ - единичная матрица; $\boldsymbol{\varphi}_{\text{ст}}$ - электродные (стационарные) потенциалы каждого из отрезков дискретизации; $\mathbf{U}$ - вектор измеренных значений разности потенциалов труба-земля.

Неизвестны электродные потенциалы $\boldsymbol{\varphi}_{\text{ст}}$ отрезков дискретизации, однако это не вызывает проблемы, поскольку в системе (3.10) два уравнения для двух неизвестных. Но поскольку, как правило, плохо определен еще и параметр $\mathbf{R}_{\text{из}}$, то решение системы становится плохо обусловленным. Поэтому решение удобнее вести итерационным методом, задаваясь прежде нулевым приближением $\mathbf{R}_{\text{из}} = \mathbf{R}_0$ и доверительным интервалом для $\varphi_{\text{ст}} = -0,5 \pm 0,2$ В.

Расчетное значение j есть плотность тока *на единице длины* трубопровода (А/м). Поэтому для отыскания действительной плотности тока *на единице площади*, т.е. плотности тока на оголенной части трубопровода, понадобилось ввести *коэффициент пористости изоляционного покрытия* $s_{\text{пор}}$ как *отношение суммарной площади пор на один квадратный метр общей площади поверхности трубопровода*.

Для удовлетворительной, плохой и очень плохой изоляции коэффициент пористости можно взять из интервала $s_{\text{пор}} = 0,02 \dots 0,2$.

После решения задачи (3.10) действительную плотность тока и скорость коррозии (на анодных участках) вычисляют по формулам

$$\begin{aligned} j_{\text{корр}} &= j / (\pi d s_{\text{пор}}) ; \\ v &= 1,18 j_{\text{корр}}, \end{aligned} \quad (3.11)$$

где $j_{\text{корр}}$ - действительная плотность тока коррозии в порах покрытия, А/м²; j - расчетная плотность тока на единице длины трубопровода, А/м; d - диаметр трубопровода, м; v - скорость коррозионного проникновения, мм/год (см. формулу (2.9)).

На рис.3.8 приведены искомые зависимости скорости коррозии (v) от удельного электрического сопротивления грунта (ρ) для достаточно мощных макропар различной протяженности. При этом за длину макропары (L) принята длина участка трубопровода между двумя катодами и одним анодом между ними, например, как это показано на рис.3.5, а величина U есть предельное (амплитудное) изменение стационарного потенциала, т.е.

$$U = U_{\text{max}} - U_{\text{min}},$$

где U_{max} , U_{min} - предельные значения измеренной разности потенциалов труба-земля на исследуемом участке.

Отметьте, что скорость коррозии весьма существенна в грунтах с низким значением $\rho < 20$ Ом.м. Не зря в нормативных документах граница между грунтами высокой и средней агрессивности проходит через точку $\rho = 20$ Ом.м.

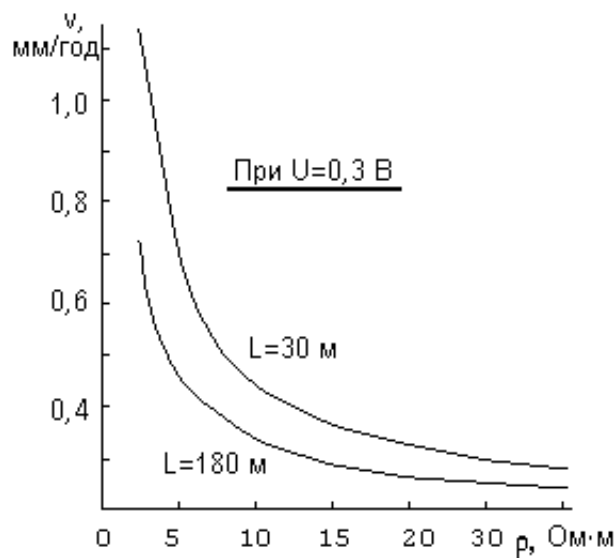


Рис.3.8. Зависимость скорости коррозии от удельного сопротивления грунта для трубопровода диаметром $d = 0,2$ м с макропарой длиной L и пористостью покрытия $s_{\text{пор}} = 0,12$.

Из графиков, представленных далее на рис.3.9, следует, что скорость коррозии, вызываемая токами гальванопары, практически линейно зависит от удельной электропроводимости грунта — величины обратной удельному сопротивлению ($1/\rho$), а также пропорциональна амплитуде изменения стационарного потенциала по трассе трубопровода (U). Такая особенность позволяет построить простейшие эмпирические формулы.

Прочие результаты расчета показали, что мощная макропара при $U > 0,3$ В может быть только при очень плохой изоляции, т.е. с $R_{\text{из}} < 10$ Ом·м. При $R_{\text{из}} > 150$ Ом·м. следует ожидать $U < 0,05$ В. Поэтому, как косвенный результат расчета, следует отметить: *чем больше амплитуда изменения потенциала по трассе U , тем хуже изоляция трубопровода.*

При $U < 0,05$ В коррозионной гальванопары практически нет.

Если для оценки скорости коррозии ориентироваться на значения $U = 0,2 \pm 0,05$ В и $L = 50 \pm 20$ м, встречаемые на практике, то можно ожидать при $\rho = 20$ Ом·м коррозию со скоростью $v = 0,15 \dots 0,2$ мм/год. Для сравнения отметим, что коррозия в однородной среде (при отсутствии макропар) имеет скорость на порядок ниже, а именно $v = 0,01 \dots 0,03$ мм/год, которую считают безопасной.

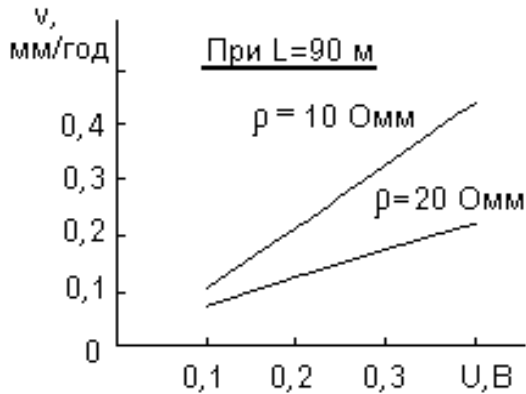


Рис.3.9. Скорость коррозии в зависимости от величины максимального смещения потенциала в пределах действия макропары длиной L при различных значениях удельного сопротивления грунта.

Использование компьютерных программ комплекса АРМ-ЭХЗ-7П сводится к диалогу при вводе данных, где требуется назвать все упомянутые выше параметры, а также такие как глубина заложения трубопровода, относительные координаты узлов дискретизации и ряд других, обычно известных для рассматриваемого участка сети. Значение удельного электрического сопротивления изоляции $R_{из}$ задается приближенно и затем автоматически уточняется в процессе итерационного счета.

3.5. Количественная оценка качества изоляции трубопровода

При расчетах токов коррозии, а также токов электрохимической защиты, возникает потребность в количественной оценке удельного электрического сопротивления изоляционного покрытия трубопровода ($R_{из}$). Часто возникает необходимость в диагностике физического состояния трубопровода с целью локализации мест повреждения изоляции и планирования ремонта по определенным количественным показателям.

Расчетная часть изложенной ниже методики базируется на программах комплекса АРМ-ЭХЗ-7П.

3.5.1. Расчет среднего значения удельного сопротивления изоляции в трубопроводной сети

Настоящую методику расчета используют при грубой количественной оценке общего состояния защитного покрытия трубопроводной сети в пределах *микрорайона* города с целью получения среднего значения удельного электрического сопротивления ($R_{из.ср}$).

Граничные точки микрорайона - это границы зоны действия всей системы ЭХЗ микрорайона. В граничных точках обычно защитный потенциал трубопровода минимален, а продольный градиент потенциала земли (разность потенциалов земля-земля, измеренная с малым шагом вдоль оси трубопровода) равен нулю.

Исходными данными для расчета $R_{из.ср}$ являются:

- суммарный ток катодных станций (КС) рассматриваемого микрорайона, $I_{сум}$, А;
- суммарная площадь поверхности защищаемых трубопроводов микрорайона, $S_{сум}$. м²;
- среднее по микрорайону смещение защитного потенциала трубопровода при включенных и выключенных КС, $\Delta U_{тр.ср}$, В.

Расчет ведут по формуле:

$$R_{из.ср} = \Delta U_{тр.ср} S_{сум} / I_{сум}, \text{ Ом.м}^2. \quad (3.12)$$

3.5.2. Расчет распределения удельного сопротивления изоляции в трубопроводной сети

Настоящий расчет выполняют для сравнительной оценки качества изоляции в соседних точках исследуемой трубопроводной сети с целью определения степени однородности покрытия и выявления участков с аномальными значениями $R_{из}$.

Исходными данными для расчета являются:

- измеренные значения защитного потенциала трубопровода в узлах расчетной схемы сети, $U_{тр}$;
- значения стационарного потенциала трубопровода в тех же узлах, $U_{ст}$;

- значения токов КС, соответствующих измеренным значениям $U_{\text{тр}}$;
- удельное электрическое сопротивление грунта, ρ .

Расчетная схема должна быть ограничена зоной действия рассматриваемых КС.

Задачу решают с помощью программ АРМ-ЭХЗ-7П в режиме М=3 "Удельное сопротивление изоляции".

В результате расчета определяются значения $R_{\text{из},i}$ в узлах $i = 1, 2, \dots, N$, где N - общее число узлов дискретизации.

3.5.3. Определение удельного сопротивления изоляции в произвольной точке сети

В соответствии с данной методикой определяют *локальное* значение $R_{\text{из}}$ в заданной точке трубопроводного участка. Расчет $R_{\text{из}}$ по данной методике можно рассматривать как корректировку результатов оценочных расчетов по п.3.5.2.

Первичными исходными данными являются глубина заложения трубопровода в исследуемой точке $h_{\text{тр}}$ и его диаметр d (м).

Для проведения полевых измерительных работ требуется опытная или стационарная КС, ближайшая к исследуемой точке.

Схема полевой измерительной установки представлена на рис.3.10. Периферийные измерительные электроды Э1 и Э2 устанавливаются симметрично относительно оси трубопровода и центрального электрода Э0 на расстоянии $\Delta y \leq 2h_{\text{тр}}$ м.

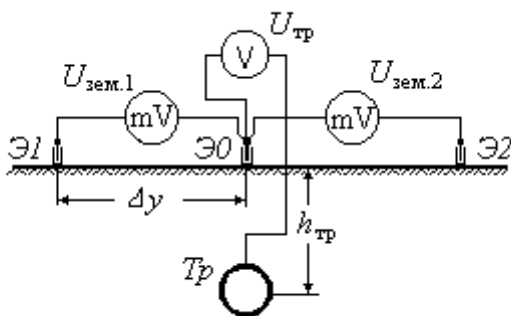


Рис.3.10. Схема размещения измерительных электродов над осью трубопровода.

С помощью электродов Э1 и Э2 выполняют измерения разности потенциалов земля-земля ($U_{зем.1}$, $U_{зем.2}$), а также труба-земля ($U_{тр}$), относительно центрального электрода Э0.

Эти измерения выполняют дважды: с включенной ($U''_{зем.1}$, $U''_{зем.2}$, $U''_{тр}$) и выключенной опытной КС ($U'_{зем.1}$, $U'_{зем.2}$, $U'_{тр}$). При наличии блуждающих токов измерения повторяют многократно и берут средние значения.

Затем вычисляют изменения потенциала земли по обе стороны от трубопровода, вызванные включением-выключением КС:

$$\Delta U_{зем.1} = U''_{зем.1} - U'_{зем.1}, \quad \Delta U_{зем.2} = U''_{зем.2} - U'_{зем.2}.$$

Расчетное приращение потенциала земли $\Delta U_{зем}$ вычисляют как алгебраическую полусумму

$$\Delta U_{зем} = (\Delta U_{зем.1} + \Delta U_{зем.2}) / 2, \text{ В.} \quad (3.13)$$

Вычисляют плотность тока трубопровода

$$j_{тр} = \Delta U_{зем} / (C\rho d), \quad \text{А/м}^2, \quad (3.14)$$

где C - коэффициент формы эквипотенциальной кривой как функция шага установки и глубины укладки трубопровода. Так, при $\Delta y/h_{тр} = 2$ он равен $C = 12,4$.

Вычисляют удельное электрическое сопротивление изоляционного покрытия $R_{из}$ по формуле

$$R_{из} = \rho d \Delta U_{тр} / (C \Delta U_{зем}), \quad \text{где } \Delta U_{тр} = (U''_{тр} - U'_{тр}) \quad (3.15)$$

3.5. Требования к электроизмерительным приборам и оборудованию

3.5.1. Электроды сравнения

Для контакта измерительного прибора с землей применяют стальные и неполяризующиеся электроды сравнения.

Стальной электрод - произвольно изготовленный заостренный стальной стержень. К большому сожалению, стальные электроды все еще применяются при измерениях разности потенциалов труба-земля, что при высокой культуре производства вряд ли приемлемо. Действительно, стальной электрод не может считаться измерительным инструментом, поскольку его *собственный электрохимический потенциал нестабилен*. Во-первых, он *изменяется во времени* (с момента установки в грунт или воду его электрохимический потенциал может стабилизироваться часами, возрастая, например от $-0,3$ до $-0,6$ В), и, во-вторых, *изменяется в пространстве* (его потенциал зависит от химических свойств окружающей среды, а загрязнение почв неизвестными веществами – обычное дело).

Поэтому стальные электроды применяют

- или при грубых измерениях больших напряжений, например, разности потенциалов рельс-земля;
- или в измерительных установках, когда собственным потенциалом электрода можно пренебречь, например, при полевых измерениях удельного электрического сопротивления грунта четырехэлектродным методом с использованием генератора переменного тока, где постоянные составляющие в измерительной цепи просто игнорируются, т.е. не фиксируются измерительными приборами;

Неполяризующийся электрод сравнения, а их несколько типов, напротив, имеет *определенный и стабильный* собственный потенциал. Неполяризующийся *водородный электрод* сравнения (НВЭ) является эталоном при измерениях в электрохимии. Его собственный потенциал принимается равным нулю, а потенциалы других неполяризующихся электродов отсчитываются относительно НВЭ. Так, собственный потенциал *медно-сульфатного* электрода (МЭС) равен $+0,30$ В по НВЭ (см. также главу 7).

В общем случае неполяризующийся электрод это металлический стержень, являющийся собственно электродом, помещенный в сосуд с

раствором определенного электролита, где до начала каких-либо измерений приобретает некоторый стабильный электрохимический потенциал. Контакт со средой осуществляется через пористую перегородку, пропитанную электролитом.

В полевых работах получил широкое распространение медносульфатный электрода сравнения (МЭС), схема которого показана на рис.3.11.

В МЭС стержень 1 выполнен из чистой рафинированной меди, электролитом является насыщенный раствор медного купороса CuSO_4 , контакт с землей осуществляется через пористую перегородку 5, например, деревянную пробку или ионообменную мембрану.

МЭС с целью стабилизации потенциала должен быть залит не менее чем за 24 часа до начала измерений. Наличие нерастворившихся кристалликов медного купороса 4 должно свидетельствовать о том, что раствор - насыщенный и, следовательно, электрод отвечает требованиям стандарта.

При измерениях *переносной* МЭС устанавливают в увлажненную лунку на поверхности земли.

Применяют также *стационарные* МЭС, которые закапывают на несколько лет в землю на глубину заложения трубопровода. У таких МЭС электролит имеет желеобразный вид и долго сохраняется.

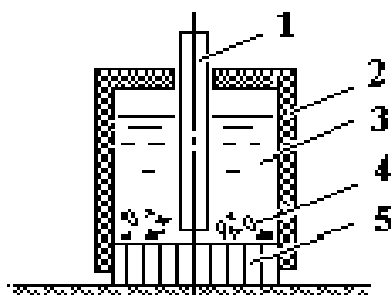


Рис.3.11. Устройство неполяризуемого медносульфатного электрода сравнения (МЭС). 1 - медный электрод; 2 - корпус из диэлектрика; 3 - насыщенный раствор CuSO_4 ; 4 - нерастворившиеся кристаллики; 5 - пористое дно.

Электрическое сопротивление МЭС обычно не превышает 1 кОм, хотя для некоторых типов может достигать 15 кОм.

В практике используются переносные МЭС типа МЭП-АКХ, стационарные МЭСД-АКХ, ЭНЕС и др.

3.5.2. Электроизмерительные приборы

Приборы для измерения градиента потенциала в земле и разности потенциалов между сооружениями и землей *должны иметь высокое внутреннее сопротивление, превышающее сопротивление между точками измерения не менее, чем на два порядка.*

При оценке величины сопротивления измеряемой цепи как нагрузки для измерительного прибора, следует иметь ввиду, что основной вклад в это сопротивление вносит МЭС.

Действительно, сопротивление МЭС, а это его внутреннее сопротивление в совокупности с контактным сопротивлением между пористой перегородкой и землей, может превышать 10 кОм, тогда как сопротивление собственно земли между двумя МЭС много меньше (имеется ввиду двухэлектродная установка вида рис.3.5).

Внутреннее сопротивление измерительного прибора должно быть порядка 1 МОм, что обеспечит приемлемую ошибку измерения.

Этому требованию удовлетворяют все электронные вольт-милливольтметры, но далеко не все стрелочные приборы

Таким образом, *погрешность измерения разности потенциалов определяется сопротивлением измерительного электрода.*

Глава 4. Блуждающие токи

4.1. Источники блуждающих токов

Следует отличать токи коррозии, поражаемые гальванической неоднородностью трубопровода, от блуждающих токов, создаваемых *сторонними* относительно данного трубопровода *источниками*.

В привычном понимании *блуждающие токи* - это токи утечки с *рельсов электрифицированного транспорта*. Однако источником блуждающих токов может быть не только трамвай или электрифицированная железная дорога.

Следует прежде всего отделить блуждающие токи, вызванные источниками *постоянного тока* и источниками *переменного* тока. Так, трамвай всегда питается постоянным током, в то время как ряд электрифицированных железных дорог работает на переменном токе.

Сразу же следует заметить, что токи переменного (синусоидального) напряжения в земле значительно менее опасны и о них мы будем говорить мало. В зарубежной практике переменные блуждающие токи железных дорог, как объект коррозионной опасности, вообще игнорируется.

К источникам блуждающих токов следует также отнести *линии электропередач постоянного тока* (ЛЭП ПТ), в которых одним из проводов является земля. Но такие ЛЭП пока еще не получили в отечественной практике широкого распространения и потому борьба с ними еще впереди.

Ряд предприятий потребляет постоянный ток для технологических процессов, например, в *электролизерах* или же при использовании *электросварочных аппаратов* постоянного тока. В гальванических производствах могут быть утечки тока через железобетонные конструкции, трубопроводы и даже через загрязненные электролитом ограждающие поверхности.

Можно отнести к блуждающим токам токи катодной станции, если эти токи перетекает с одного трубопровода на другой, “блуждая” в сети

подземных коммуникаций. Но эти токи чаще называют *токами взаимного влияния*.

Трудно вообразить в качестве источника блуждающих токов *воздушную* ЛЭП переменного тока, однако здесь не все так просто. Дело в том, что высоковольтная ЛЭП может *индуцировать* на протяженном, например, магистральном, хорошо изолированном трубопроводе, который уложен параллельно трассе ЛЭП, значительные электродвижущие силы, вызывающие *продольные* токи. Величина индуцируемой э.д.с. может превышать *сотни* вольт. В момент разрыва электрической цепи, например, при рассечении трубопровода во время его ремонта, возникает *искра* и, если ремонтируемый трубопровод является газопроводом с остатками взрывоопасного, горючего газа, то можно ожидать беду, что, к сожалению, уже не раз имело место. К тому же не очень желательно прикосновение человека к металлическому телу, напряжение которого сотни вольт, в то время как безопасным для жизни можно считать напряжение 24 В.

Токи подземного *кабеля* электрической сети *не вызывает* поля в земле, поскольку его токоведущие жилы *экранированы* металлической оболочкой и стальной броней. Вредное влияние на соседний трубопровод может оказать лишь сама *оболочка кабеля*, а точнее, защитные заземления, во множестве разбросанные в кабельной сети. Заземленная *кабельная сеть* выступает *катодом* разветвленной гальванической системы, где *аноды* - *различные изолированные трубопроводы*. О возможности возникновения таких гальванических пар уже говорилось выше.

4.1.1. Линии рельсового электротранспорта

На рис.4.1 приведена схема, поясняющая причины и следствия блуждающих токов рельсовой линии, работающей на постоянном токе.

Рельсы являются обратным проводником в цепи нагрузки тяговой подстанции. Ток от “плюса” подстанции поступает через контактный провод и токосъемник электропоезда на его электродвигатель. Далее ток через колесную пару попадает на рельсы и по ним возвращается к минусшине подстанции. Поскольку рельсы не изолированы от земли, то часть тягового тока - *блуждающий ток* - будет протекать в земле, в конечном счете возвращаясь снова в рельсы в районе тяговой подстанции.

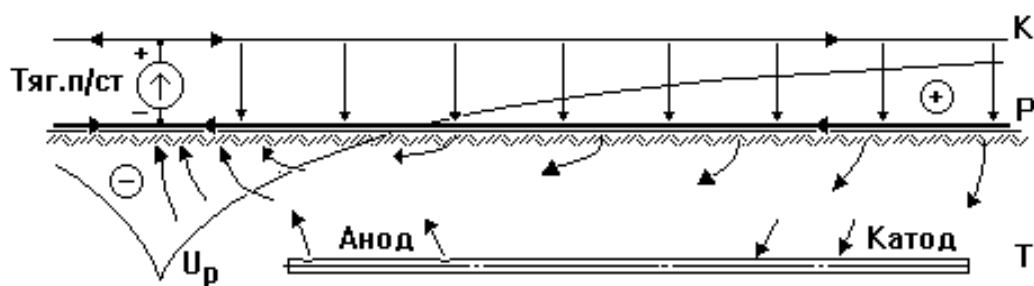


Рис.4.1.Рельсовая линия электротранспорта постоянного тока как источник блуждающих токов. К - контактный провод от “плюса” тяговой подстанции, Р - рельсы, Т - трубопровод, U_p - эпюра разности потенциалов рельсы-земля.

При наличии в земле стального трубопровода, имеющего отличную продольную проводимость и, к сожалению, далеко не нулевую поперечную (за счет повреждений в изоляционном покрытии), блуждающий ток будет *натекать* на трубопровод, если его ось в какой-то степени совпадает с силовой линией тока в земле. Но попав на трубопровод в одном месте, ток в том же количестве будет *стекать* в другом, чтобы вернуться к своему источнику. Ток, *стекающий* в землю, как это определено выше, - *анодный*, разрушающий. В местах *натекания* на трубопровод блуждающий ток приносит неожиданную пользу, являясь *катодным*, т.е. защитным, что, правда, малоутешительно.

Таким образом, на подземном металлическом сооружении возникают *анодная* и *катодная* зоны.

При этом отмечают еще и *знакопеременную* зону, которая занимает некоторую область на границе между катодной и анодной, где блуждающие токи время от времени меняют свое направление. Дело в том, что непрерывно меняется местоположение электропоездов и величина их токовой нагрузки, в результате чего непрерывно меняется картина поля токов в земле.

Одной из характеристик поля блуждающих токов является разность потенциалов рельс-земля

$$U_p = \varphi_p - \varphi_z + U_{ст.р}, \quad (4.1)$$

где U_p - разность потенциалов рельс-земля в некоторой точке рельсовой сети; φ_p , φ_z - соответственно потенциал рельсов и потенциал земли вблизи рельсовой линии, отсчитанные относительно “далекой” земли; $U_{ст.р}$ - стационарный потенциал рельсов.

При полном отсутствии тяговой нагрузки стороннего поля нет, т.е. $\varphi_p = 0$, $\varphi_z = 0$ и вольтметр регистрирует только стационарный потенциал рельсов $U_p = U_{ст.р}$.

Очевидно, стационарный потенциал измерить легко, но лишь тогда, когда вдруг остановились все трамваи и электропоезда. Можно принять при необходимости $U_{ст.р} = -0,55$ В - по МЭС или $U_{ст.р} = 0$ - по стальному электроду сравнения. Обычно при измерении U_p используют *стальной электрод сравнения*, полагая, что электрохимический потенциал *стального электрода* равен электрохимическому потенциалу *стальных рельсов*, т.е. при отсутствии блуждающих токов $U_p = U_{ст.р} = 0$.

Это упрощает анализ поля токов в земле. Так, если при измерении стальным электродом обнаружится, что $U_p > 0$, т.е. в соответствии с соотношением (4.1) $\varphi_p > \varphi_z$, то блуждающие токи направлены *из рельсов* в землю (от большего к меньшему), а условию $U_p = \varphi_p - \varphi_z = 0$ или $\varphi_p = \varphi_z$ будет соответствовать нулевая точка в рельсах, где утечки блуждающих токов в момент измерения нет.

Таким образом, *при $U_p > 0$ рельсы работают анодом, при $U_p < 0$ - катодом.*

Рельсы, между прочим, тоже разрушаются. Однако скорость их коррозионного разрушения меньше скорости механического износа и поэтому блуждающие токи владельцев электротранспорта не интересовали бы вообще, если бы они не были “интересны” для владельцев соседних подземных коммуникаций, где скорость коррозии может достигать 20 мм/год!

Как показала практика, погрешность измерения разности потенциалов рельс-земля с помощью стального электрода приемлема. Так, если стационарный потенциал металла рельсов отличается от стационарного потенциала стального электрода на $\pm 0,1$ В, что и является абсолютной погрешностью измерения, то при измерениях U_p в интервале $U_p = 1 \dots 10$ В возникнет относительная погрешность от 10% до 1%, что вполне допустимо.

4.1.2. Линии электропередач постоянного тока

Другим источником блуждающих токов является ЛЭП постоянного тока, работающая в режиме “провод-земля” по рис.4.2.

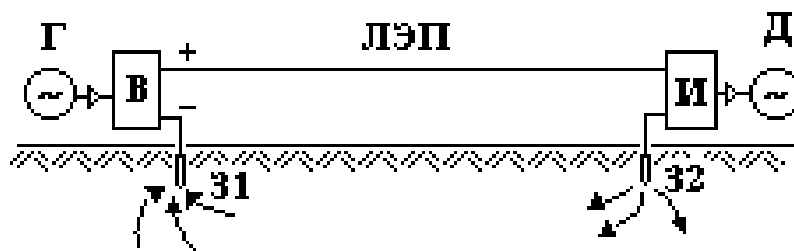


Рис.4.2.Блуждающие токи от линии электропередачи постоянного тока. Г - электростанция, Д - электроприемник, В - выпрямитель, И - инвертор, 31,32 - заземлители, ЛЭП - воздушный провод.

В начале линии переменный ток электростанции (Г) преобразуют в постоянный (В), передают по ЛЭП и затем - перед использованием - постоянный ток инвертируют снова в переменный (И).

Поскольку одним из проводников системы является земля, то на очень обширной территории - в сотни километров между рабочими заземлителями (31,32) - возникает поле блуждающих токов, которое не минует многочисленные подземные сооружения.

Интенсивность действия блуждающих токов ЛЭП на подземные сооружения определяется кроме всего прочего геологическим строением земли. Так, глубинные водонасыщенные и высокоминерализованные слои земли, отсасывая на себя приповерхностные токи, будут заметно уменьшать их плотность у дневной поверхности, уменьшая тем самым коррозионную опасность для подземных коммуникаций.

Но особую опасность можно ожидать вблизи рабочих заземлителей, возможно, в радиусе несколько десятков километров.

Вероятно, будут отмечены аномальные явления и в скальных грунтах, где высокопроводящие слои и прожилки хаотично чередуются с практически непроводящими структурами. В этом случае блуждающие токи могут появиться “вдруг” в местах казалось-бы бесконечно удаленных от всех мыслимых источников.

4.2. Качественный анализ поля блуждающих токов

Коррозионная опасность для трубопровода в поле блуждающих токов определяется конфигурацией трубопровода и его положением относительно источников тока. В простейшем случае, подобном представленному на рис.4.1, *анодная зона* в трубопроводной сети наблюдается *вблизи* тяговой подстанции. Однако в более сложных ситуациях это не так очевидно (рис.4.3).

В *анодных зонах* трубопровода, условно помеченных знаком “+”, трубопровод приобретает *положительное смещение* потенциала, а в катодных “-” - отрицательное. При этом, как и выше, под *смещением потенциала* трубопровода ΔU_T понимают разность потенциалов внешнего поля

$$\Delta U_T = \varphi_T - \varphi_z, \quad (4.2)$$

т.е. потенциалов трубопровода (φ_T) и земли (φ_z), которые при отсутствии блуждающих токов равны нулю. При этом под *разностью потенциалов* труба-земля в поле блуждающих токов U_T будем понимать, как обычно, соотношение

$$U_T = \Delta U_T + U_{ст}, \quad (4.3)$$

где $U_{ст}$ - стационарный потенциал трубопровода.

Таким образом, по формуле (4.2) условию $\Delta U_T > 0$ соответствует направление токов *из трубы* в землю (анодная зона), поскольку в этом случае $\varphi_T > \varphi_z$ (ток течет от большего потенциала к меньшему). На схемах рис.4.3 состоянию “ток из трубы” соответствует знак “+”, а состоянию “на трубу” - знак “-”.

Для трубопровода под номером 1 (рис.4.3) наиболее опасная область - место пересечения с рельсами, в то время как на трубопроводах 3...5 под рельсовой линией на трубопроводе располагаются катодные зоны. Это обусловлено направлением токов в земле в области пересечения.

Действительно, в первом случае рельсы вблизи трубы отрицательны относительно земли ($U_p < 0$), поэтому токи “отсасываются” как из земли,

так и, естественно, с соседнего трубопровода, так что на трубопроводе имеет место $\varphi_T > \varphi_3$ (из трубы в землю) и на нем образуется “плюсовая”, *анодная зона*.

В случае рис.4.3,3 ток с рельсов *стекает* ($U_p > 0$) и “впрыскивается” в соседний трубопровод, так что у его поверхности $\varphi_3 > \varphi_T$ (из земли в трубу).

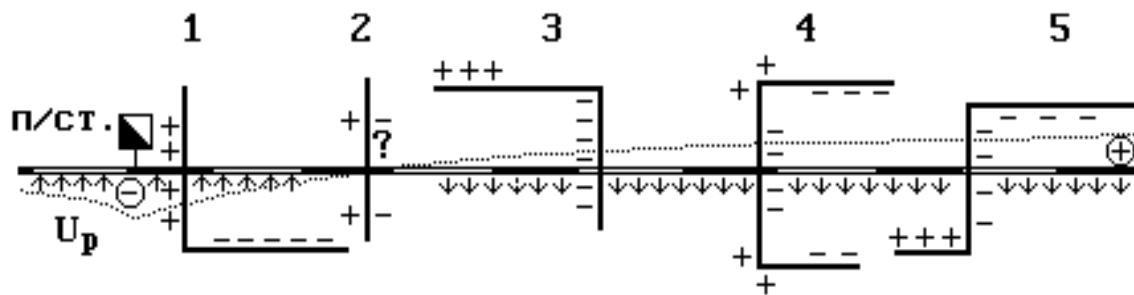


Рис.4.3. Распределение анодных (+) и катодных (-) зон на трубопроводах в зависимости от их конфигурации и положения относительно линии рельсового электротранспорта. U_p - эпюра разности потенциалов рельс-земля; п/ст - тяговая подстанция.

Наименее определено состояние в зоне пересечения с трубопроводом под номером 2 (рис.4.3), который проходит вблизи точки нулевого потенциала рельсов ($U_p = 0$). Здесь находится упомянутая выше *знакопеременная* зона (как на рельсах, так и на трубопроводе), возникающая в связи с нестабильностью тяговой нагрузки в рельсовой сети.

Вероятно, наиболее *неблагоприятное* расположение трубопровода - *вдоль силовой линии*, а наилучшее - *вдоль эквипотенциальной линии поля*. В последнем случае, поскольку трасса трубопровода равнопотенциальна ($\varphi_3 = const$), будет отсутствовать составляющая блуждающего тока, направленная *в земле вдоль трубопровода* и, следовательно, по самому трубопроводу, поскольку нет градиента потенциала - нет тока. Но если нет тока в трубе, то нет *падения потенциала* вдоль *трубопровода*, т.е. должно быть *везде* $\varphi_T = 0$. Тогда из формулы (4.2) следует $\Delta U_T = const$, что удовлетворяется лишь в одном частном случае, если $\Delta U_T = 0$. Действительно,

трубопровод в поле блуждающих токов не может быть *везде только* анодом ($\Delta U_T = \text{const} > 0$) или только катодом ($\Delta U_T = \text{const} < 0$).

4.3. Измерения в поле блуждающих токов

4.3.1. Разность потенциалов труба-земля

Основная особенность поля блуждающих токов - нестабильность во времени, обусловленная перемещением нагрузок в тяговой сети. Поэтому при измерениях в какой-либо точке ведут отсчет *множества мгновенных значений* электрической величины (обычно в течение 10...15 мин через каждые 5...10 с) с последующим вычислением *среднего значения*. Часто выполняют синхронные измерения с одновременным фиксированием значений несколькими приборами в ряде точек сети.

Следует заметить, что основным *признаком наличия блуждающих токов* в трубопроводной сети или земле служат характерные “броски” измеряемого потенциала во времени.

Измерения разности потенциалов труба-земля и градиента потенциалов в земле выполняют теми же инструментами, что и в случае исследования коррозионных макропар, т.е. используя неполяризующиеся медно-сульфатные электроды сравнения (МЭС) и высокоомные вольтметры и милливольтметры. Однако *результаты измерения в поле внешних токов и в поле собственных токов интерпретируются совершенно по разному*, на что следует обратить внимание.

Пусть при отсутствии блуждающих токов стационарный потенциал трубопровода в некоторых точках измерения *А* и *Б* был одинаков и равен $U_T = U_{ст} = -0,55$ В. Если при наличии блуждающих токов потенциал в точке *А* получил отрицательное смещение и снизился до $U_T = -0,75$ В, а в точке *Б* повысился до $-0,35$ В (повысился с учетом знака!), то можно утверждать, что точка *А* - катод, точка *Б* - анод, поскольку известно, что *катодная поляризация - это смещение потенциала в отрицательную сторону, а анодная - в положительную*. Следовательно, **катод - более электроотрицательный** участок.

В случае с *собственными* токами, как было определено выше при анализе работы гальванопары, **анод - более электроотрицательный** участок.

Проследим еще раз. В точке A трубопровод стал отрицательнее, т.е. его смещение $\Delta U_T < 0$ и, следовательно, по формуле (4.2) $\varphi_T < \varphi_3$, т.е. ток направлен *из земли* на трубу, в результате чего труба поляризуется *катодно*.

Таким образом, о вредном влиянии блуждающих токов судят так: если потенциал труба-земля *положительнее своего стационарного потенциала*, то данная точка находится в *анодной зоне*.

Очевидно, что для правильной оценки границ анодной и катодной зон необходимы достоверные сведения о величине $U_{ст}$ во всех исследуемых точках трубопроводной сети. Поскольку это выполнить практически нельзя при включенных тяговых нагрузках, то границы зон определяют приближенно, задаваясь средним значением стационарного потенциала. Как уже отмечалось, в качестве среднего в практике принимают значение $U_{ст} = -0,55$ В.

4.3.2. Градиент потенциала в земле

Метод градиента потенциала, применяемый при оценке поля токов в земле, позволяет исключить влияние неопределенности, связанной с величиной $U_{ст}$. На рис.4.4 рассмотрены некоторые типичные ситуации с результатами измерения градиента потенциала в поле блуждающих токов.

При измерениях предполагалось, что один из измерительных электродов, а именно тот, который подсоединен к зажиму “+” вольтметра, является подвижным, а другой *зафиксирован над осью трубопровода*.

Как в случае *а* (труба - *сток*), так и случае *б* (труба - *исток*) знак градиента ΔU не меняется при перенесении “плюсового” электрода с правой стороны трассы на левую и наоборот. Действительно, направление тока в измерительной цепи вольтметра при этом остается неизменным: от “+” к “-” в случае *(а)* и от “-” к “+” в случае *(б)*. Тогда, поскольку “плюсовая” клемма вольтметра всегда справа, в *катодной зоне (а)* стрелка отклоняется всегда **вправо**, в *анодной (б)* - **влево**, если, разумеется, перемещается “плюсовой” электрод, как это принято в схеме рис.4.4.

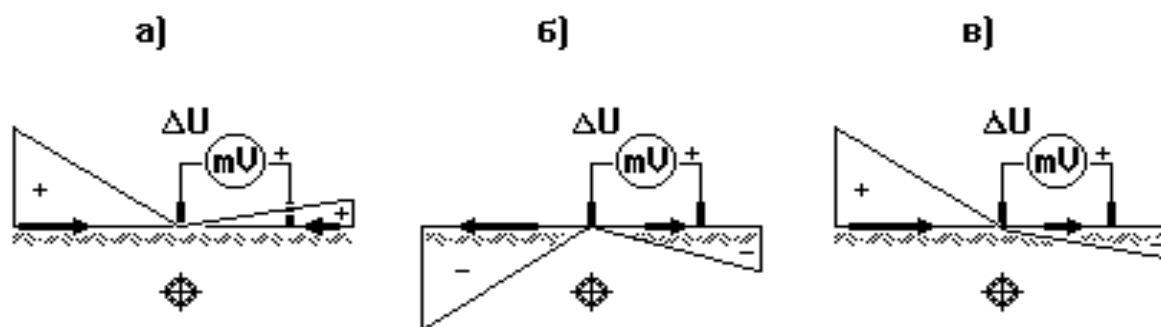


Рис.4.4. Эпюры поперечного градиента потенциала земли над трубопроводом в катодной зоне (а), анодной зоне (б) и катодной зоне для трубопровода с хорошей изоляцией (в).

Но эти два случая идеальны: трубопровод не может полностью “перекрывать” путь току в земле, т.е. экранировать поле. Часть тока обязательно будет просачиваться мимо трубопровода, как это, например, отмечено в случае (в). О том, как работает труба - стоком или истоком, следует судить по *разности* абсолютных величин ΔU слева и справа от оси. Так, если установлено, что направление тока в земле по ту и другую сторону трубопровода неизменно (например, слева направо, как показано на схеме рис.4.4,в), то *уменьшение абсолютного значения ΔU по ходу тока* означает, что часть тока “отсасывается” трубопроводом. Следовательно, в данном случае *ток является натекающим* и зона - катодной. В противном случае отмечается анодная зона.

Направление *вектора плотности тока в земле*, независимо от присутствия трубопровода, *определяется по измерениям на двух взаимно перпендикулярных осях* (ΔU_1 и ΔU_2), разбиваемых на поверхности земли в исследуемом районе. Используется двухэлектродная установка с постоянным шагом обычно в диапазоне $\Delta L = 20...100$ м. На плане территории по измерения ΔU_1 и ΔU_2 *строится результирующий вектор ΔU* (он же вектор плотности тока в земле $\mathbf{j}$).

Так, если подвижный электрод, как и прежде, подсоединен к “+” прибора, и обе составляющие ΔU_1 и ΔU_2 положительны, то: 1) обе составляющие плотности тока направлены в земле от “плюсового” электрода в сторону “минусового”; 2) результирующий вектор плотности тока $\mathbf{j}$ по

направлению ближе к той оси измерения, вдоль которой его составляющая больше.

4.4. Измерения в зоне действия переменных токов

В соответствии с действующим стандартом защита трубопроводов в *зонах опасного влияния* переменного тока, вызываемого рельсовым электротранспортом, работающим на переменном токе, должна осуществляться независимо от степени коррозионной агрессивности грунта. Задача состоит лишь в том, как определить, находится ли трубопровод “в зоне опасного влияния”.

Опасным считается участок трубопровода, где под действием переменного тока потенциал трубы *смещается в отрицательную сторону не менее чем на 10 мВ*.

Экспериментальные исследования показали, что при утечке переменного тока с металлического сооружения формируется *постоянная составляющая* этого тока. И если эта составляющая отрицательна, то она создает на трубе аналог анода как в обычном коррозионном гальваническом элементе. Эту составляющую и следует зафиксировать при полевых исследованиях.

С этой целью в небольшой шурф рядом с трубопроводом помещают по определенной методике подготовленный стальной образец и измеряют его стационарный потенциал ($U_{ст}$) относительно расположенного рядом медносульфатного электрода сравнения. Затем образец *через прерыватель тока* соединяют с трубопроводом, продолжая измерять его потенциал U_i через каждые 5 с в течение 10 мин. После этого вычисляют среднее значение измеренного потенциала $U_{ср}$ и искомое смещение ΔU

$$U_{ср} = \sum_{i=1}^n U_i / n ;$$

$$\Delta U = U_{ср} - U_{ст},$$
(4.6)

где n - общее число измерений.

Если $\Delta U < -10$ мВ, то данная точка находится в опасной зоне.

Кроме образца, медносульфатного электрода сравнения и вольтметра в описанной измерительной установке имеется конденсатор, который включают между образцом и трубопроводом для их гальванической развязки по постоянной составляющей.

Подобные измерения проводят в ряде контрольных точек трубопроводной сети, где уже отмечена переменная составляющая разности потенциалов труба-земля, превышающая 0,3 В (по стальному электроду сравнения). Для измерения используют вольтметр, позволяющий измерять напряжение как переменного, так и постоянного токов.

4.5. Мероприятия по ограничению блуждающих токов

Основные требования по ограничению токов утечки с рельсов сводятся к обеспечению:

- *высокого переходного сопротивления* между рельсами и землей;
- *низкого продольного сопротивления* рельсовых цепей;
- *достаточно равномерного распределения токов* в отсасывающей сети.

Переходное сопротивление рельсовой линии

Характеризует сопротивление между рельсовой линией и землей и влияет на величину тока утечки с рельсового пути: *чем меньше переходное сопротивление, тем больше ток утечки*. Обычно (путем расчета по результатам измерений) определяется *удельное* переходное сопротивление единицы длины рельсовой линии $R_{\text{пер}}$, имеющее размерность Ом·м (или Ом·км).

Величина $R_{\text{пер}}$ зависит от конструкции рельсового пути и лежит, как правило, в следующих пределах:

- для рельсовой линии, утопленной в заасфальтированную мостовую, обычно $R_{\text{пер}} < 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- для магистральных железных дорог со щебеночным основанием на шпалах, пропитанных масляным антисептиком, $R_{\text{пер}} > 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- для рельсовых линий метрополитена, уложенных открыто, нормируется величина $R_{\text{пер}} > 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$;
- для подземных линий метро $R_{\text{пер}} > 1500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Продольное сопротивление рельсовой линии

Также как и $R_{\text{пер}}$, удельное продольное сопротивление $R_{\text{пр}}$ влияет на величину тока утечки: *чем меньше продольное сопротивление, тем меньше сопротивление тяговому току, возвращающемуся по рельсам на подстанцию, тем меньше ток утечки*. Можно было бы надеяться на избавление от каких-либо блуждающих токов, если можно было бы обеспечить одновременно $R_{\text{пр}} \rightarrow 0$ и $R_{\text{пер}} \rightarrow \infty$.

Оценивают продольное сопротивление по величине удельного продольного сопротивления единицы длины $R_{\text{пр}}$ с размерностью Ом/м (или Ом/км).

Величина $R_{\text{пр}}$ зависит от:

- площади поперечного сечения рельса;
- количества ниток рельсовой линии;
- качества рельсовых цепей.

Если площадь поперечного сечения рельса зависит от его типоразмера, а количество ниток - от количества путей данной линии, то для обеспечения высокого *качества рельсовых цепей* вдоль рельсовой линии устанавливают специальные медные и стальные *перемычки*:

- межстыковые (каждый сборный стык рельсов, не надеясь на электрические свойства стальных накладок, болтами соединяющих рельсы, шунтируется приваренной между рельсами медной перемычкой сечением порядка 70 мм^2);
- междурельсовые (через каждые 150 м трамвайные рельсы одного пути сваривают между собой стальной полосой);
- междупутные (примерно через каждые 300 м трамвайные рельсы двух соседних путей электрически объединяют стальной полосой).

Мероприятия в системе энергоснабжения

Токовая нагрузка того или иного участка рельсовой сети определяется количеством и параметрами движущегося транспорта. Если в трамвайной сети более чем один маршрут, то по разным маршрутам курсирует разное число поездов со своими нагрузками и интервалами движения. В результате этого *участки существенно различаются по токовой нагрузке*.

Задача электрического расчета тяговой сети состоит в выборе оптимального расположения точек питания (в контактной сети) и точек отсоса (в рельсовой сети), учитывая неравномерность токовой нагрузки.

На рис.4.1 приведена простейшая схема с одной точкой питания (+) и одной точкой отсоса. В общем случае каждая трамвайная тяговая подстанция может иметь по несколько таких точек.

Если выравнивать нагрузки питающих и отсасывающих кабелей, то создадутся условия, при которых различные точки рельсовой сети будут мало отличаться по потенциалу. *Чем меньше различие между потенциалами в рельсовой сети U_p , тем меньше ток утечки.*

К сожалению, в дальних точках зоны питания данной тяговой подстанции U_p может достигать +10...+20 В, а вблизи подстанции –5... –10 В, т.е. неэквипотенциальность может быть порядка 15...30 В.

Безусловно, эти потенциалы полностью сделать одинаковыми невозможно. Для этого надо было бы обеспечить нулевое продольное сопротивление рельсовых цепей ($R_{пр} \rightarrow 0$). В таком идеальном случае напряжение, вызванное тяговыми токами между любыми точками рельсовой линии, будет равно нулю, следовательно, потенциал рельсов будет везде одинаков и также равен нулю ($U_p = 0$). Тогда причин для возникновения блуждающих токов вообще не останется.

Таким образом, *минимум блуждающих токов* обеспечивается, если

- при строительстве и реконструкции определить *оптимальные* места расположения *тяговых подстанций*, их количество и мощность, имея ввиду, что номинальная нагрузка типичной трамвайной подстанции не превышает 2000 А;

- найти наилучшие *места* расположения точек подключения *отсасывающих кабелей*, связывающих рельсы с “минус-шиной” тяговой подстанции, имея ввиду прежде всего равномерность загрузки отсасывающей сети;

- с помощью реостатов или другими путями обеспечить истинную *равномерность загрузки* отсасывающих кабелей для каждой из подстанций;

- исключить ненужные *заземления* рельсовой сети и особенно заземление “минус-шины”.

Обычно в трамвайной сети тяговые подстанции распределены с интервалом 1...3 км. На электрифицированных железных дорогах постоянного тока этот интервал значительно больше и достигает 25 км.

В заключение оценим отрицательный количественный эффект от блуждающих токов. Пусть на участке длиной $L = 1000$ м рельсовой сети трамвая средний потенциал рельсов равен $U_p = +10$ В. Если переходное сопротивление $R_{\text{пер}} = 50$ Ом.м, то линейная плотность тока утечки с рельсов составит $j = U_p / R_{\text{пер}} = 0,2$ А/м, а суммарный ток, стекающий с участка, будет равен $I = 200$ А. Если только 10% этого тока попадет на соседний трубопровод, то этого будет достаточно, чтобы растворить за один год 186 кг железа. Остается только представить, в какое решето превратится трубопровод, если его не защищать.

Расчет токов в рельсовой сети и плотности тока утечки с рельсов может быть выполнен с помощью пакетов программ АРМ-ЭХЗ-6П и АРМ-ЭХЗ-7П.

Глава 5. Токи электрохимической защиты

5.1. Электрохимическая защита

Электрохимическая защита - *подавление анодных токов катодными* с помощью внешнего источника. Действительно, если ток *натекающий* на участок трубопровода *больше*, чем ток *стекающий* с него (см. точку *a* на рис.5.1), то анодный процесс сменится катодным.

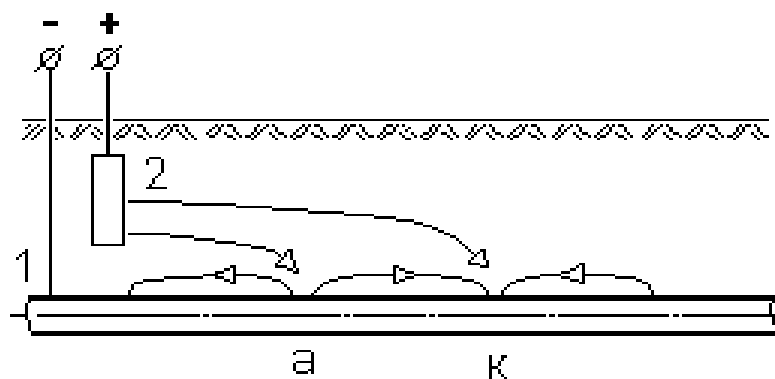


Рис.5.1. Поле коррозионных и защитных токов при электрохимической защите. 1-защищаемый подземный трубопровод; 2-вспомогательный электрод-анод внешнего источника тока.

До тех пор, пока металлическое сооружение работает катодом - оно вечно. Но вечность не дается даром. Мало того, что на электрохимическую защиту расходуется электрическая энергия внешнего источника (рис.5.1), еще и разрушается вспомогательный электрод защитной установки - анод 2. Если ток на защищаемое сооружение натекает, то с анода он должен стекать. Пока “живет” катод-трубопровод, разрушается жерт-

венный анод. Это свойство катода “вечно жить за счет жертвы” и использовано при электрохимической защите.

В соответствии с распространенной классификацией способов защиты от коррозии электрохимическую защиту относят к *активным способам*, в то время как защиту с помощью изоляционных покрытий - к *пассивным способам*. Оба эти способа применяются на подземных металлических сооружениях *совместно*.

При этом можно считать, что *пассивная защита* - *основной* или главный способ защиты, *активная* - *вспомогательный*.

Но нельзя утверждать, что изоляционные покрытия - *достаточный* вид защиты. Как бы ни была хороша изоляция, всегда найдутся в ней повреждения в виде трещин, игольчатых проколов, пузырей, технологических царапин и пр. Именно в этих местах локализуется *язвенная* коррозия. Но изоляция к тому же стареет, отслаивается, общая площадь оголения под разрушающейся изоляцией с каждым годом возрастает. И вот здесь, оказывается, лучшего способа “пломбировать” повреждения в изоляции, чем с помощью токов электрохимической защиты, нет. Особенно если знать, что катодные токи могут вызвать - благодаря электродным реакциям - появление *плотных* солевых, коррозионно инертных отложений вблизи катода, т.е. в порах изоляции, что действительно похоже на заживление ран.

Итак, изоляционное покрытие *ограждает*, а электрохимическая защита *подавляет*.

В зависимости от способа получения электрического тока различают три вида ЭХЗ: **катодную, протекторную, электродренажную**, о чем уже было сказано в *главе 1*.

5.2. Катодная поляризационная характеристика

При электрохимической защите возникает эффект *катодной поляризации*: потенциал корродирующей поверхности приобретает *катодное смещение*, в результате чего электрохимический потенциал защищаемого сооружения становится *электроотрицательнее* своего стационарного потенциала.

Плотность тока катодной поляризации j и *электрохимический потенциал* исследуемого металла U обычно связывают графической зави-

симостью, называемой *катодной поляризационной характеристикой* $U = F(j)$, вид которой определяется множеством физико-химических факторов, проявляющихся на поверхности поляризующегося электрода.

На рис.5.2 приведена типичная поляризационная характеристика и установка для исследования катодной поляризации. Исследуемый электрод-катод 1 подключают к минусу источника тока, плюс которого связывают с вспомогательным электродом-анодом 2. Последний располагают так, чтобы стекающий с него ток затем натекал на катод достаточно *равномерно*. Измерительный электрод или его зонд 3 устанавливают рядом с исследуемым электродом-катодом.

По прошествии некоторого времени, необходимого для стабилизации электрохимических процессов, измеряют *стационарный потенциал* исследуемого электрода $U_{ст}$, после чего, медленно или ступенями изменяя ток поляризации, снимают поляризационную кривую.

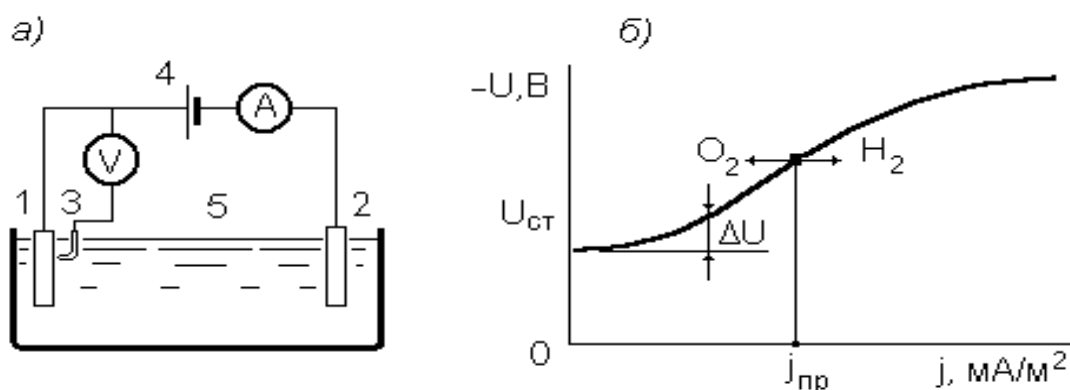


Рис.5.2. Установка для снятия поляризационной характеристики (а) и типичная катодная поляризационная характеристика стального электрода (б): 1- исследуемый электрод; 2-вспомогательный электрод-анод; 3- измерительный электрод; 4- источник тока; 5- сосуд с электролитом.

Следует отметить, что *катодное смещение* ΔU есть отрицательное приращение потенциала электрода относительно своего стационарного состояния $U_{ст}$.

Смещение потенциала неизолированного электрода - это падение напряжения на поляризационном сопротивлении, т.е. $\Delta U = Rj$. Эта зависимость подчинялась бы закону Ома, если бы была линейной.

На рис.5.2 важно обратить внимание на точку перегиба $O_2 - H_2$, которая соответствует так называемому *предельному диффузионному току*

$j_{\text{пр}}$, при достижении которого начинаются затруднения в доставке кислорода через толщу электролита. При *небольшой* плотности тока поляризации $j < j_{\text{пр}}$ катодный процесс идет при участии кислорода, т.е. имеет место *кислородная деполяризация*, описанная одним из уравнений (2.1). Но при $j > j_{\text{пр}}$, поскольку возникают затруднения с диффузией кислорода, процесс кислородной деполяризации постепенно вытесняется *водородной деполяризацией*, которой соответствует реакция



где ион водорода, потребляя электрон, превращается в газообразное вещество.

Таким образом, *при больших плотностях катодного тока на защищаемом сооружении происходит выделение газообразного водорода*. Это важно помнить, так как газообразный водород в данной ситуации - весьма вредное вещество, действующее *разрушающе* и на изоляционное покрытие, и на металл сооружения, о чем немного подробнее сказано ниже.

5.3. Критерии электрохимической защиты

Под критериями электрохимической защиты понимают теоретически и экспериментально обоснованные *значения плотности тока и потенциала* защищаемого сооружения, при достижении которых *коррозия практически прекращается*.

В практике ЭХЗ критериями защиты являются:

- минимальная защитная плотность тока, $j_{\text{защ. min}}$;
- минимальное защитное смещение потенциала, $\Delta U_{\text{защ. min}}$;
- минимальный защитный потенциал, $U_{\text{защ. min}}$;
- максимальный защитный потенциал, $U_{\text{защ. max}}$.

В нормативной и справочной литературе упоминается еще ряд прагматических критериев, применение которых возможно в сложных ситуациях.

5.3.1. Минимальная защитная плотность тока

Внешний катодный ток, даже очень малый по величине, должен иметь защитные свойства - он обязательно уменьшает противоположно направленный ток анода коррозионной пары. Но какой должен быть защитный ток *по величине*, чтобы подавить *самый мощный анод* всех действующих коррозионных пар данного трубопровода? Исследователю не так просто убедиться в том, что при включении электрохимической защиты *все токи* на поверхности трубы приобрели одно единственное направление - *из земли на трубопровод*.

К тому же натекающий ток расходуется не рационально. Если вернуться к рис.5.1, то можно заметить, что часть защитного тока натекает на катодные, уже *защищенные за счет токов коррозии* участки трубопровода. Эту часть защитного тока следует считать как бесполезно затраченную. Лабораторные исследования показали, что бесполезно расходуется 60...80% защитного тока.

Поэтому достоверных сведений о величине *минимальной защитной плотности тока* ($j_{\text{защ. min}}$), гарантирующей надежную защиту данного сооружения в данных коррозионных условиях, как правило, нет. Однако, часто применяют следующее приближенное соотношение

$$j_{\text{защ. min}} = (3 \dots 5) j_{\text{корр}} , \quad (5.2)$$

где $j_{\text{защ. min}}$ - минимальная защитная плотность тока, А/м^2 ; $j_{\text{корр}}$ - плотность тока коррозии, определенная по образцам-свидетелям или другим способом в данных коррозионных условиях, А/м^2 .

Так, если установленные на некоторое время в данной коррозионной среде образцы-свидетели показали скорость коррозии равную $\nu = 0,03 \text{ г / (м}^2 \cdot \text{ч)}$, то по формуле (2.9) это соответствует плотности тока коррозии $j_{\text{корр}} = 28,5 \text{ мА/м}^2$. Следовательно, для подавления такой коррозии потребуется обеспечить плотность защитного тока не менее $j_{\text{защ}} > 85 \text{ мА/м}^2$.

При этом следует учитывать, что $j_{\text{защ. min}}$ из соотношения (5.2) относится к *оголенным* участкам защищаемого сооружения, т.е. это *не средняя плотность* по поверхности защищаемого трубопровода, а *фактическая плотность* тока на металле трубопровода - в порах и повреждениях изоляции, которая может быть на один-два порядка больше средней.

Этот метод оценки степени защищенности применяют при защите морских сооружений, резервуаров и других объектов, если для них нет соответствующих государственных стандартов. Можно для ориентировки полагать, что плотность тока для неизолированного стального сооружения в земле, в пресной и соленой воде лежит в пределах 20...150 мА/м². Причем, чем менее агрессивна среда, тем меньше плотность защитного тока.

5.3.2. Минимальное защитное смещение потенциала

Из-за технических трудностей, возникающих при натурных измерениях плотностей токов $j_{\text{защ}}$ и $j_{\text{корр}}$, особенно при исследовании подземных трубопроводов, чаще о качестве защиты судят не по j , а по величине потенциала U или смещения потенциала ΔU .

Расчетное защитное смещение потенциала по В. В. Красноярскому

В.В.Красноярский получил теоретическое соотношение, позволяющее оценивать *степень защиты* сооружения в зависимости от величины *катодного смещения* потенциала. Предлагаемая им расчетная формула может быть представлена в виде

$$\Delta U_{\text{защ.min}} = -0,059 \lg (j_{\text{корр}} / j_a), \quad (5.3)$$

где $\Delta U_{\text{защ.min}}$ - минимальное защитное смещение потенциала, В; $j_{\text{корр}}$ - первоначальная плотность тока коррозии без ЭХЗ; j_a - предельно допустимая плотность тока коррозии при включенной ЭХЗ.

Так, для снижения скорости коррозии в 100 раз, т.е. для выполнения условия $j_{\text{корр}} / j_a = 100$, необходимо сместить потенциал сооружения на величину $\Delta U_{\text{защ.min}} = -0,059 \lg 100 = -0,118$ В.

Даже при $\Delta U_{\text{защ.min}} = -0,018$ В *скорость коррозии снижается вдвое!*

Оценка по формуле (5.3) полезна уже тем, что вселяет уверенность, что даже такое незначительное смещение как $\Delta U_{\text{защ.min}} = -0,02$ В продлит срок службы вашего трубопровода вдвое, а при $\Delta U_{\text{защ.min}} = -0,1$ В вообще можно ни о чем не беспокоиться.

Стандарт NACE (Национальная ассоциация инженеров-коррозионистов) США

Предлагают в качестве *минимального защитного смещения потенциала* следующие значения

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{защ. min}} &= -0,1 \text{ В} && \text{- для неизолированных сооружений;} \\ \Delta U_{\text{защ. min}} &= -0,3 \text{ В} && \text{- для изолированных трубопроводов.} \end{aligned}$$

Первый из этих критериев хорошо определен теоретически, что было отмечено только-что выше, как *достаточное поляризационное смещение* потенциала стали, обеспечивающее примерно 100-кратное снижение скорости коррозии. Этим критерием часто пользуются при защите корпусов кораблей, поскольку окраска судна - это еще не изоляция, а также в других аналогичных случаях.

Второй критерий учитывает не только *поляризационную*, но и *омическую* составляющую смещения потенциала, под которой обычно понимают падение потенциала в порах изоляции.

Здесь следует сделать введение в спорную область о паритете поляризационной составляющей защитного потенциала. Условимся считать, что

- ***омическая составляющая*** смещения потенциала ($\Delta U_{\text{ом}}$) это неизбежное и к тому же совершенно бесполезное и даже *вредное* падение напряжения, вызванное током защиты на некотором сопротивлении, куда входит сопротивление электролита в порах изоляции и участок земли между трубопроводом и измерительным электродом, особенно если вблизи измерительного электрода активно поле внешних токов, например, поле токов анодного заземлителя катодной станции;

- ***поляризационная составляющая*** ($\Delta U_{\text{пол}}$) - *полезное* падение напряжения на поляризационном сопротивлении металл-электролит, т.е. в тонком слое на границе металл-электролит.

Таким образом, для этого критерия

$$\Delta U_{\text{защ. min}} = \Delta U_{\text{пол. min}} + \Delta U_{\text{ом. min}} . \quad (5.4)$$

Так как для защиты достаточно $\Delta U_{\text{пол. min}} = -0,1$ В, то при использовании значения $\Delta U_{\text{защ. min}} = -0,3$ В, как критерия защиты, полагают, что величина омической составляющей на изоляционном покрытии в данном случае не превышает $\Delta U_{\text{ом. min}} = -0,2$ В.

О способах измерения потенциалов с целью исключения омической составляющей как погрешности сказано ниже.

5.3.3. Минимальный защитный потенциал

Общепризнанным в мировой практике критерием защиты *является минимальный защитный потенциал*, который принимают равным $U_{\text{защ. min}} = -0,85$ В (по медносульфатному электроду сравнения).

Этот критерий ввел в практику электрохимической защиты подземных стальных трубопроводов Роберт Кун еще в 1928 г. Он экспериментально доказал, что при таком защитном потенциале скорость коррозии становится пренебрежимо малой с практической позиции. До 60-х годов прошлого столетия спокойно использовали этот критерий и защищенные трубопроводы не корродировали.

Однако затем в порядке уточнения этого критерия к нему добавили слово *поляризационный*. Однако это уточнение привело к весьма существенным изменениям в методике измерения защитных потенциалов. Дело ставилось так, чтобы обязательно *исключить омическую составляющую* как погрешность при всех полевых измерениях на подземных трубопроводах.

Требуя выполнения таких “тонкостей”, нельзя обойти вниманием некоторые противоречия. Действительно, минимальный защитный потенциал есть сумма минимального защитного смещения потенциала *неизолированной* поверхности $\Delta U_{\text{защ. min}} = -0,1$ В и стационарного потенциала $U_{\text{ст}}$, т.е.

$$U_{\text{защ. min}} = \Delta U_{\text{защ. min}} + U_{\text{ст}}. \quad (5.5)$$

Так как можно ожидать, что фактические значения $U_{\text{ст}}$ для реального подземного трубопровода (они определяются физико-химическими свойствами окружающего грунта) лежат в диапазоне

$$U_{\text{ст}} = -0,4 \dots -0,75 \text{ В},$$

то приемлемый минимальный защитный *поляризационный* потенциал может лежать практически в пределах

$$U_{\text{защ. min}} = -0,5 \dots -0,85 \text{ В}.$$

Выбор величины $U_{\text{защ. min}} = -0,85 \text{ В}$ как единственного критерия защиты связан скорее со стандартизацией, унификацией и желанием обеспечить запас надежности. При прагматическом подходе выбор критерия защиты может быть иным, и особенно при спокойном состоянии трубопровода, когда $U_{\text{ст}} \approx \text{const}$.

Проблема выделения поляризационной составляющей и исключения омической имеет практическое значение. Действительно, это связано не только с надежностью защиты, но и со снижением затрат на электроэнергию.

Было бы не плохо снизить минимальный защитный потенциал до уровня, например, $U_{\text{защ. min}} = -0,75 \text{ В}$, что, как показали наши исследования, вполне допустимо. Во всяком случае, не следует пересматривать принятое мировой практикой значение минимального защитного потенциала $U_{\text{защ. min}} = -0,85 \text{ В}$.

Отечественные стандарты по коррозии и защите трубопроводов регламентируют величину минимального поляризационного защитного потенциала для стальных сооружений в соответствии с табл.5.1. Однако применение критериев в диапазоне $U_{\text{защ. min}} = -0,95 \dots -1,2 \text{ В}$ даже для горячих труб вряд ли оправдано и, вероятно, будет пересмотрено.

Минимальное защитное смещение потенциала $\Delta U_{\text{защ. min}}$ как критерий упоминается в ГОСТ 9.602-89 лишь для свинцовых оболочек кабелей связи и регламентируется величиной $\Delta U_{\text{защ. min}} = -0,1 \text{ В}$, соответствующей мировым стандартам.

Таблица 5.1

$U_{\text{защ. min}}, \text{В}$	Условия применения
-0,85	С исключением омической составляющей при измерении
-0,9	При невозможности исключения омической составляющей
-0,95...-1,2	Для трубопроводов, транспортирующих нагретые среды

5.3.4. Максимальный защитный потенциал

Необходимость ограничения защитного потенциала сверху, т.е. введение *максимального защитного потенциала* $U_{\text{защ.мах}}$, как критерия защиты, также не может рассматриваться безальтернативно. Безусловно, было бы идеальным в целях экономии электроэнергии заполяризовать всю защищаемую сеть лишь до уровня минимального защитного потенциала $U_{\text{защ.мин}}$. Однако законы распределения потенциала в трубопроводной сети таковы, что неизбежна существенная неэквипотенциальность. Так, вблизи анодных заземлителей (см.рис.5.1) плотность тока защиты всегда больше и, следовательно, больше разность потенциалов труба-земля. Минимальный защитный потенциал поддерживают, как правило, *на границах* зоны действия установок ЭХЗ.

ГОСТ 9.602-89 нормирует для подземных сооружений величину максимального *поляризационного* защитного потенциала и устанавливает его равным $U_{\text{пол.защ.мах}} = -1,15$ В для всех видов трубопроводов, не определяя допустимую величину *общего* потенциала (с учетом омической составляющей). В этом же стандарте для стальных оболочек кабелей связи допускается *общий* потенциал защиты $U_{\text{защ.мах}} = -2,5$ В.

По ГОСТ Р 51164-98 на магистральных трубопроводах допускается *общий* потенциал $U_{\text{защ.мах}} = -2,5$ В, если трубопроводы имеют битумную изоляцию, или $U_{\text{защ.мах}} = -3,5$ В - для трубопроводов с полимерной пленочной изоляцией.

В американском и немецком стандартах величина максимального защитного потенциала *не нормируется вообще* и выбирается исходя из технико-экономических соображений при проектировании защиты.

Отсутствие необходимости тщательного нормирования величина $U_{\text{защ.мах}}$ может быть обосновано следующим образом.

При больших токах поляризации и, следовательно, больших защитных потенциалах, как уже отмечалось, выделяется газообразный водород. Возникая в порах изоляции и в пазухах, он способен собираться в пузыри и создавать разрушающее давление. Микропузыри, если в них большое давление, могут вызвать дальнейшее разрушение изоляции. *Отслоение изоляции - основная опасность, связанная с большими отрицательными потенциалами.*

Как показано на рис.5.3, активное выделение водорода начинается при защитном потенциале отрицательнее $U_{\text{пол.защ}} = -1 \text{ В}$ (по МЭС). Количество выделяющегося водорода при больших отрицательных потенциалах слабо зависит от плотности катодного тока, причем, как это следует из графиков, не зависит от качества изоляции и, вероятно, других параметров защиты. Потенциал выделения водорода не превышает $-1,15 \dots -1,2 \text{ В}$, поскольку плотность катодного тока в реальных условиях не может быть больше 10 А/м^2 .

Поэтому поляризационный потенциал подземного трубопровода *фактически* не может быть отрицательнее величины $U_{\text{пол.защ}} = -1,2 \text{ В}$, независимо от величины тока поляризации. Т.е. какой бы в реальных условиях ЭХЗ не наводился защитный потенциал в пределах $U_{\text{защ.мах}} = -1,5 \dots -4 \text{ В}$, поляризационная составляющая практически будет одной и той же.

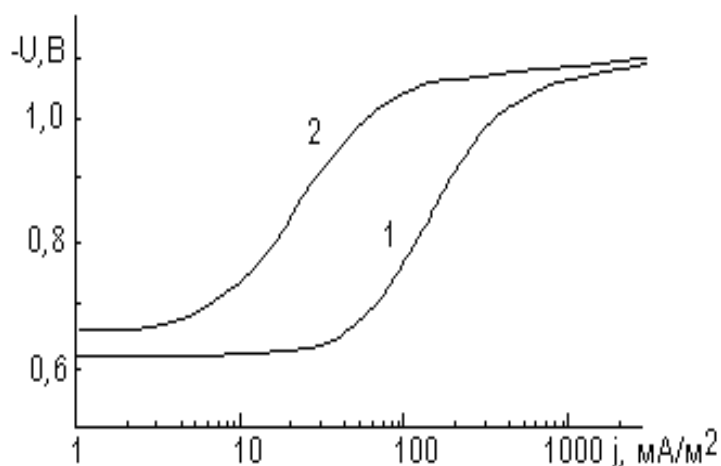


Рис.5.3. Гальваностатические поляризационные характеристики стального образца в нейтральном электролите без изоляционного покрытия (1) и с пористым покрытием (2).

В отечественных стандартах используются именно эти значения потенциала выделения водорода в качестве максимального *поляризационного* защитного потенциала ($U_{\text{пол.защ.мах}} = -1,15 \text{ В}$). Фактически в стандартах констатируется естественное состояние защиты, что, по всей видимости, можно было бы и не делать.

При выборе величины $U_{\text{защ.мах}}$ целесообразнее было бы руководствоваться лишь технико-экономическими показателями проекта ЭХЗ, обес-

печивая минимум капитальных и эксплуатационных затрат защищаемого объекта.

5.4. Измерение поляризационной составляющей защитного потенциала

Несмотря на сомнительную необходимость оценки величины поляризационной составляющей защитного потенциала, в действующей нормативной документации широко регламентируются методы измерения $\Delta U_{\text{пол}}$.

Как было отмечено, в защитную разность потенциалов труба-земля $U_{\text{защ}}$ входят, помимо стационарного потенциала $U_{\text{ст}}$, еще две составляющие

$$U_{\text{защ}} = U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{пол}} + \Delta U_{\text{ом}}, \quad (5.6)$$

где омическая составляющая $\Delta U_{\text{ом}}$ является нежелательной погрешностью, которую при измерениях следует исключить или, по крайней мере, учесть, а $\Delta U_{\text{пол}}$ - искомое напряжение на поляризующемся слое металлической поверхности (рис.5.4).

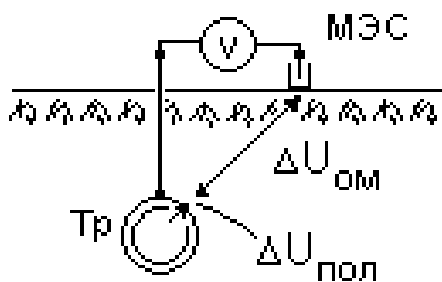


Рис.5.4. Распределение составляющих разности потенциалов труба-земля $\Delta U_{\text{ом}}$ и $\Delta U_{\text{пол}}$ в цепи измерения выносным электродом (МЭС).

В омическую составляющую входит падение напряжения в порах изоляции $\Delta U_{\text{пор}}$ и в земле $\Delta U_{\text{зем}}$ между трубопроводом и измерительным электродом, т.е.

$$\Delta U_{\text{ом}} = \Delta U_{\text{пор}} + \Delta U_{\text{зем}}. \quad (5.7)$$

Величина $\Delta U_{\text{ом}}$ зависит не только от токов трубопровода, но и от токов других внешних источников.

Методика измерения поляризационной составляющей

Для исключения омической составляющей и выделения поляризационной $\Delta U_{\text{пол}}$ полевые измерения ведут *методом прерывания тока* поляризации. Дело в том, что при отключении тока омическая составляющая, как того требует закон Ома, мгновенно исчезает. Но совсем не так ведет себя составляющая $\Delta U_{\text{пол}}$: с момента отключения тока *поляризационная составляющая уменьшается медленно, постепенно затухая*.

Это объясняется тем, что происходит *разряд двойного электрического слоя* металл-электролит по аналогии с разрядом конденсатора, что всегда связано с затратами времени. На катоде - защищаемом трубопроводе - имеются *избыточные электроны*, поступавшие с анода (кстати, именно благодаря избыточным электронам катод “отрицательный”). При разрыве цепи катод-анод этим электронам потребуется еще какое-то время для *полной рекомбинации*, поскольку в конечном счете металлическое сооружение должно стать *нейтрально заряженным* телом.

Продолжительность разряда зависит от емкости двойного электрического слоя и сопротивления цепи разряда. *Начало процесса разряда* при измерениях и пытаются зафиксировать с тем, чтобы измерить в этот момент *максимальное* значение $\Delta U_{\text{пол}}$.

Для измерения мгновенного значения $\Delta U_{\text{пол}}$ разработаны различные методы и приборы. На рис 5.5 приведен один из этих способов, рекомендуемый отечественной нормативной документацией.

Рядом с трубопроводом 1 устанавливают стальной неизолированный электрод-датчик 2, который нормально должен быть всегда переключен на трубопровод. Этот *электрод моделирует оголенный участок трубопровода*. При этом полагают, что интенсивность катодных процессов поляризации на электроде-датчике и в местах оголения трубопровода - одна и та же, т.е. $\Delta U_{\text{пол}}$ электрода равна $\Delta U_{\text{пол}}$ трубопровода.

Измерения ведут по следующей методике. С помощью автоматического прерывателя тока 4 электрод-датчик 2 периодически переключают от трубопровода к вольтметру. Продолжительность коммутации “датчик-вольтметр” должна быть в пределах 0,2...0,5 мс, продолжительность коммутации цепи “датчик-трубопровод” - в пределах 5...10 мс.

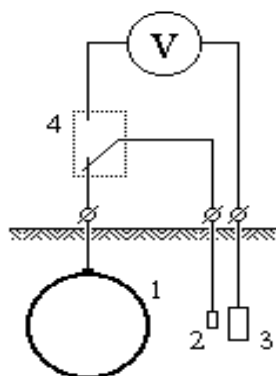


Рис.5.5. Схема установки для измерения поляризационной составляющей разности потенциалов труба-земля. 1 - трубопровод; 2 - стальной электрод-датчик; 3 - измерительный электрод МЭС; 4 - автоматический прерыватель тока.

С помощью измерительного электрода 3 (стационарный или переносной МЭС) и вольтметра через каждые 5 с в течение 10 мин фиксируют множество мгновенных значений потенциала электрода-датчика U_i ($i = 1, 2, \dots, n$).

Мгновенные значения U_i различаются между собой из-за инерционности полевых вольтметров и присутствия переменных во времени блуждающих токов. Лишь только осциллограф способен зафиксировать истинно мгновенное значение электрической величины.

После обработки результатов измерения получают *среднее значение* поляризационного защитного потенциала трубопровода $U_{\text{пол}} = \Delta U_{\text{пол}} + U_{\text{ст}}$, лишенного омической составляющей

$$U_{\text{пол}} = 1 / n \sum_{i=1}^n U_i, \quad (5.8)$$

где n - общее число измерений.

5.5. Расчет поляризационной составляющей

Если для существующего трубопровода количественно оценить соотношение поляризационной и омической составляющих можно экспериментальным путем, то для проектируемого - только расчетом.

Для оценки величины поляризационной составляющей защитной разности потенциалов труба-земля при катодной защите воспользуемся методом, изложенным ниже в *главе 6*. Решение задачи электрохимической защиты сводится к решению системы алгебраических уравнений вида

$$\mathbf{j} = (\mathbf{BA} - \mathbf{E})^{-1} (\mathbf{J} - \mathbf{B}\varphi_3), \quad (5.9)$$

где $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{E}$ - квадратные матрицы, определяющие параметры участков трубопроводной сети и их связи, а остальные матрицы - столбцовые, причем $\mathbf{j}$ - искомая линейная плотность тока защиты; φ_3 - потенциал земли в поле анодных заземлителей; $\mathbf{J}$ - удельная токовая нагрузка катодных станций.

После отыскания $\mathbf{j}$ определяют разность потенциалов труба-земля $U_{\text{защ}}$ и ее составляющие

$$\begin{aligned} \Delta U_{\text{защ}} &= \mathbf{R}_{\text{из}} \mathbf{j}; \\ \mathbf{R}_{\text{из}} &= \mathbf{R}_{\text{пол}} + \mathbf{R}_{\text{ом}}; \\ \Delta U_{\text{пол}} &= \mathbf{R}_{\text{пол}} \mathbf{j}, \quad \Delta U_{\text{ом}} = \mathbf{R}_{\text{ом}} \mathbf{j}, \end{aligned} \quad (5.10)$$

где $\mathbf{R}_{\text{из}}$ - вектор удельного электрического сопротивления изоляции трубопровода; $\mathbf{R}_{\text{пол}}, \mathbf{R}_{\text{ом}}$ - поляризационная и омическая составляющие; $\Delta U_{\text{пол}}, \Delta U_{\text{ом}}$ - искомые поляризационная и омическая составляющие смещения потенциала.

Удельное поляризационное сопротивление $\mathbf{R}_{\text{пол}}$ зависит от искомой плотности тока $\mathbf{j}$, причем нелинейно. Это можно отметить, например, по поляризационной характеристике рис.5.2, если иметь ввиду, что отношение $\Delta U / j$ есть удельное поляризационное сопротивление металла. В связи с этим выражение (5.9) превращается из простой формулы в нелинейное уравнение относительно $\mathbf{j}$.

Пример расчета 1

Пусть участок трубопроводной сети диаметром $d = 300$ мм уложен в грунт с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 40$ Ом·м и защищен катодной станцией, подключенной в начале участка с анодным заземлителем, расположенным на расстоянии 25 м от трубопровода против точки

дренажа. Стационарный потенциал трубопровода $U_{\text{ст}} = -0,55$ В. Шаг дискретизации или расстояние между исследуемыми точками - 100 м.

В табл.5.2 приведены результаты расчета защитных параметров трубопровода с плохой изоляцией ($R_{\text{ом}} = 10$ Ом.м), а в табл.5.3 - с удовлетворительной ($R_{\text{ом}} = 100$ Ом.м). При этом в первом случае коэффициент пористости изоляции оказался равным $s_{\text{пор}} = 0,04$, во втором - в 10 раз меньше.

Расчет выполнен с помощью программ пакета АРМ-ЭХЗ-6П в оптимизационном режиме, т.е. при условии обеспечения на заданном участке трубопровода минимального защитного потенциала $U_{\text{защ}} \leq U_{\text{защ.мин}} = -0,85$ В.

Таблица 5.2

nn	$j_{\text{пор}},$ мА/м ²	$j,$ мА/м	$P,$ Ом.м ²	$R_{\text{пол}},$ Ом.м	$\Delta U_{\text{пол}},$ В	$\Delta U_{\text{ом}},$ В	$U_{\text{защ}},$ В	$U'_{\text{защ}},$ В
1	1760	70.385	0.341	9.363	-0.600	-0.704	-1.854	-2.625
2	491.2	19.649	0.636	15.769	-0.313	-0.196	-1.059	-1.217
3	364.4	14.576	0.668	16.420	-0.243	-0.146	-0.939	-1.061
4	321.8	12.871	0.689	16.891	-0.222	-0.129	-0.900	-1.009
5	300.6	12.026	0.700	17.125	-0.210	-0.120	-0.881	-0.983
6	288.7	11.550	0.694	17.086	-0.201	-0.116	-0.866	-0.964
7	282.3	11.294	0.691	17.036	-0.195	-0.113	-0.858	-0.955
8	280.0	11.200	0.690	17.018	-0.193	-0.112	-0.855	-0.951
9	281.4	11.258	0.691	17.029	-0.194	-0.113	-0.857	-0.954

Таблица 5.3

nn	$j_{\text{пор}},$ мА/м ²	$j,$ мА/м	$P,$ Ом.м ²	$R_{\text{пол}},$ Ом.м	$\Delta U_{\text{пол}},$ В	$\Delta U_{\text{ом}},$ В	$U_{\text{защ}},$ В	$U'_{\text{защ}},$ В
1	545.4	2.182	0.628	156.4	-0.343	-0.218	-1.111	-1.140
2	331.8	1.327	0.684	169.2	-0.227	-0.133	-0.910	-0.920
3	298.7	1.195	0.699	172.9	-0.209	-0.119	-0.878	-0.888
4	287.9	1.152	0.694	172.3	-0.200	-0.115	-0.865	-0.867
5	282.7	1.131	0.691	171.7	-0.195	-0.113	-0.859	-0.868
6	279.6	1.119	0.690	171.4	-0.193	-0.112	-0.854	-0.864
7	277.9	1.112	0.689	171.2	-0.191	-0.111	-0.853	-0.862
8	277.6	1.110	0.689	171.2	-0.191	-0.111	-0.852	-0.862
9	279.0	1.116	0.689	171.3	-0.192	-0.112	-0.854	-0.864

В первом варианте для оптимальной защиты потребовался ток катодной станции $I_{\text{скз}} = 20,0 \text{ А}$, во втором $I_{\text{скз}} = 1,3 \text{ А}$.

При расчете $R_{\text{пол}}$ использовали опытные данные для удельного (поверхностного) поляризационного сопротивления P ($\text{Ом}\cdot\text{м}^2$), приведенные в графе 1 табл.5.4, которые соответствуют малой степени заполяризованности металла, например, в сухих грунтах или в первые сутки после включения тока поляризации.

Таблица 5.4

$j_{\text{пор}},$ $\text{мА}/\text{м}^2$	Варианты $P, \text{Ом}\cdot\text{м}^2$			
	1	2	3	4
50	0.3	0.3	0.5	0.8
75	0.4	0.5	1.2	2.5
100	0.5	0.7	2.1	3.1
150	0.6	1.1	2.5	3.3
200	0.65	1.2	2.2	3.1
300	0.7	1.1	1.7	2.1
400	0.65	1.0	1.2	1.3
600	0.62	0.8	0.8	0.8
800	0.62	0.7	0.7	0.7
1000	0.6	0.6	0.6	0.6

Там же (P_2, P_3, P_4) приведены рекомендованные для практических расчетов данные для других условий. Так, данные из графы P_4 характерны для условий длительной поляризации, например, в течение 30 сут. во влажной среде.

В дополнение к табл.5.4 для вычисления удельного поляризационного сопротивления при $j_{\text{пор}} > 1000 \text{ мА}/\text{м}^2$ можно пользоваться формулой

$$P = 0,6 / j_{\text{пор}} . \quad (5.11)$$

Анализируя результаты расчета, можно отметить следующее.

1. Омическая составляющая значительна и ее нельзя игнорировать, особенно в грунтах с высоким удельным электрическим сопротивлением.

Заметим, что в данном примере принято $\rho = 40$ Омм и что омическая составляющая пропорциональна величине ρ .

2. Независимо от качества изоляции, соотношение между омической и поляризационной составляющими примерно одно и то же. В данном случае $\Delta U_{\text{пол}} / \Delta U_{\text{ом}} = 1,7$. При $\rho = 20$ Омм это соотношение заметно больше и равно $\Delta U_{\text{пол}} / \Delta U_{\text{ом}} = 5,9$.

3. Защитный поляризационный потенциал $U_{\text{пол}}$ как сумма стационарного потенциала $U_{\text{ст}}$ и поляризационной составляющей смещения $\Delta U_{\text{пол}}$ нигде не превышает максимальный защитный потенциал, установленный нормами ГОСТ 9.602-89 и равный $U_{\text{защ.мах}} = -1,15$ В. Действительно, при принятом в расчете $U_{\text{ст}} = -0,55$ В защитный поляризационный потенциал в точке 1 равен $U_{\text{пол}} = -0,55 - 0,6 = -1,15$ В, что и нормируется. В то же время суммарный защитный потенциал в этой точке равен $U_{\text{защ}} = U_{\text{ст}} + \Delta U_{\text{пол}} + \Delta U_{\text{ом}} = -1,854$ В.

4. В таблицах под $U'_{\text{защ}}$ дан суммарный защитный потенциал, рассчитанный при условии, что измерительный электрод расположен *на дневной поверхности земли над трубопроводом*, в то время как $U_{\text{защ}}$ предполагает измерение относительно точки земли непосредственно *у поверхности трубы*. Как следует из результатов расчета, омическая составляющая может существенно возрасти, особенно вблизи анодного заземлителя, где она равна $\Delta U_{\text{ом}} = -2,625 + 0,55 + 0,6 = -1,475$ В.

Таким образом, доля омической составляющей в суммарном защитном потенциале хоть и велика, но не настолько, чтобы незнание ее величины отразилось бы на качестве защиты. Достаточно, как это оговаривается в действующих нормах, ограничиться добавкой $-0,05$ В к минимальному защитному потенциалу $-0,85$ В и сделать его равным $-0,9$ В (см.табл.5.1). Но лучше и этого не делать, поскольку поляризационной составляющей вполне достаточно, чтобы обеспечить приемлемый уровень защиты. Действительно, везде в таблицах поляризационное смещение $\Delta U_{\text{пол}}$ много отрицательнее $-0,1$ В, что уже было бы достаточно для снижения скорости коррозии в 100 раз.

5.6 Вторичные явления при электрохимической защите

5.6.1. Катодные осадки

В результате протекания катодной реакции вблизи трубопровода образуются избыточные ионы гидроксидов OH^- , т.е. происходит подщелачивание среды. Известно, что *подщелачивание* изменяет условие равновесия ряда солей, содержащихся в почве: они *из раствора выпадают в осадок*. Непосредственно на поверхности трубопровода образуется *слой солевых отложений*, в основном состоящий из карбоната кальция CaCO_3 и гидроксида магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Характерно существенное увеличение концентрации CaO и CO_3^{2-} .

Кинетика образования *гидроокисно-карбонатных осадков* определяется многими факторами. Так, при *большой плотности тока*, несмотря на выпадение в связи с этим большого количества осадков, образуются *рыхлые* слои. Разрыхлению осадков способствуют *пузырьки водорода*, возникающие при большой плотности тока, т.е. при водородной деполяризации. Напротив, при малой плотности тока (при кислородной деполяризации) формируется плотный солевой слой, который в силу своих диэлектрических свойств создает некоторое подобие “слоя изоляции”, способствуя *снижению общего тока* защиты и *увеличивая равномерность* распределения защитной плотности тока.

Можно отнести все факторы, меняющие во времени кинетику электрохимических процессов на катоде, к одному - к *изменению поляризационного сопротивления*. Действительно, как затруднение (*торможение*) катодной реакции в двойном электрическом слое, например, из-за диффузионных проблем с доставкой кислорода, так и затруднение (*сопротивление*), вызванное растущим слоем осадков, приведет к одному и тому же результату - уменьшению тока поляризации или, что равнозначно, к *увеличению поляризационного сопротивления*.

С ростом удельного поляризационного сопротивления R при *постоянной плотности тока* защиты в порах изоляции ($j_{\text{пор}}$) должна *возрастать поляризационная* составляющая защитного потенциала $\Delta U_{\text{пол}} = Rj_{\text{пор}}$. Скорость возрастания $\Delta U_{\text{пол}}$ и предельный уровень этого роста трудно предугадать, поскольку это определяется физико-химическими

условиями на катоде и в окружающей среде. Однако отмечено, что *рост поляризационного потенциала* может продолжаться в течение *нескольких месяцев*.

И еще одно замечание по поводу изменения поляризационного сопротивления во времени. В грунтах, в отличие от жидких сред, поляризационное сопротивление может изменяться во времени в непредсказуемом направлении. Так, при плотностях тока $100...300 \text{ мА/м}^2$, близких к плотности предельного диффузионного тока, можно ожидать “борьбу за право на участие в процессе” между молекулами кислорода (кислородная деполяризация) и ионов водорода (водородная деполяризация). При таких плотностях первые *уже* не могут, поскольку наступил диффузионный предел для кислорода, вторые *еще* не могут, поскольку недостаточно электрическое напряжение между взаимодействующими частичками.

При кислородной деполяризации катодный осадочный слой *плотный*, при водородной, благодаря воздействию пузырьков водорода, - *рыхлый*. Следовательно, в первом случае поляризационное сопротивление будет возрастать во времени, во втором - снижаться. Кислород строит, водород - разрушает. Результат такой совместной постройки непредсказуем.

Ниже рассмотрен пример расчета поляризационного потенциала трубопровода с учетом *изменяющегося во времени* удельного поляризационного сопротивления. Предполагается, что предварительно выполнены полевые и лабораторные электрохимические исследования стали в грунтах, характерных для трассы данного трубопровода.

Пример расчета 2

Пусть тот же трубопровод, исследованный в примере 1, далее поляризуется постоянным по величине током $I_{\text{скз}} = 20,0 \text{ А}$. По мере накопления катодных осадков поляризационное сопротивление будет возрастать (или уменьшаться - при больших плотностях тока) и, следовательно, будет меняться защитный потенциал.

Расчет будем вести для различных поляризационных условий, представленных табл.5.3, где столбцы от P_1 до P_4 характеризуют различную степень поляризуемость стали от слабой (P_1) до весьма существенной. Так, P_4 следует отнести к металлам в очень влажных грунтах или воде при непрерывной поляризации в течение нескольких недель. Остальные столбцы - промежуточные, где P_1 , как было отмечено, характеризует на-

чальный этап поляризации. Результаты расчета приведены в табл.5.5.

Таблица 5.5

NN	P_1		P_2		P_3		P_4	
то- чек	$j_{\text{пор}},$ мА/м ²	$\Delta U_{\text{пол}},$ В	$j_{\text{пор}},$ мА/м ²	$\Delta U_{\text{пол}},$ В	$j_{\text{пор}},$ мА/м ²	$\Delta U_{\text{пол}},$ В	$j_{\text{пор}},$ мА/м ²	$\Delta U_{\text{пол}},$ В
1	1760	-0.600	1814	-0.600	1857	-0.600	1885	-0.600
2	492	-0.313	475	-0.439	491	-0.500	510	-0.523
3	365	-0.243	353	-0.369	346	-0.509	345	-0.600
4	322	-0.222	313	-0.340	299	-0.510	290	-0.638
5	301	-0.210	294	-0.325	279	-0.503	265	-0.649
6	289	-0.201	283	-0.315	267	-0.498	252	-0.650
7	283	-0.195	277	-0.310	261	-0.494	245	-0.649
8	281	-0.193	274	-0.308	258	-0.493	241	-0.648
9	282	-0.194	276	-0.310	257	-0.494	241	-0.648

Если проследить помеченную строку табл.5.5 слева направо, то можно отметить трехкратное повышение потенциала и, следовательно, такое же увеличение удельного поляризационного сопротивления *во времени*. Но это имеет место лишь на участке с кислородной деполяризацией (при $j_{\text{пор}} < 300$ мА/м²). При чисто водородной деполяризации (точка 1) поляризационное смещение потенциала остается практически неизменным, так как *росту* плотности *тока* соответствует такое же *снижение* удельного поляризационного *сопротивления*, в результате чего их произведение $\Delta U_{\text{пол}} = P j_{\text{пор}}$ остается практически *неизменным*. На этом участке солевые катодные отложения из-за их рыхлости, как уже отмечалось, не исполняют роль дополнительного защитного барьера. Величина удельного поляризационного сопротивления оказывается обратно пропорциональной плотности тока (см.формулу 5.11).

На рис.5.6 представлены графики суммарного защитного потенциала, в который входит поляризационная составляющая из табл.5.5. Очевидно, что чем лучше изоляция, в том числе и за счет поляризационного сопротивления, тем качественнее защита.

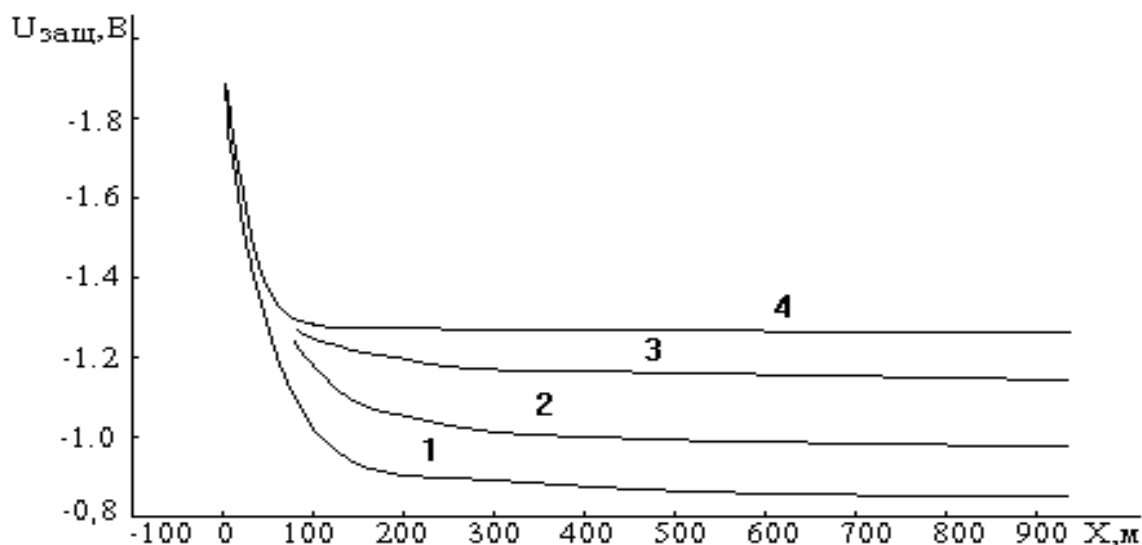


Рис.5.6. Распределение защитного потенциала вдоль трубопровода при различных поляризационных характеристиках. Номера у кривых соответствуют данным в колонках $P_1...P_4$ табл.5.5.

5.6.2. Последствие катодной поляризации

Поскольку по мере накопления катодных осадков и увеличения поляризационного сопротивления поляризационный потенциал $U_{\text{пол}}$ во времени медленно возрастает, достигая своего предела через сотни часов, то снижение поляризационного потенциала - при *выключении* тока поляризации - не может быть мгновенным и также может длиться много часов. Именно этот *эффект последствия* используют при измерении поляризационной составляющей защитного потенциала $\Delta U_{\text{пол}}$, о чем сказано выше.

Но известны успешные примеры использования *эффекта последствия* не только при измерениях потенциала, но и непосредственно для увеличения *эффективности катодной защиты*. Действительно, если металлическое сооружение какое-то время после отключения тока поляризации “помнит” свой защитный потенциал, то было бы выгодно приме-

нять катодную защиту в прерывистом режиме, чередуя включение катодной защиты с ее выключением.

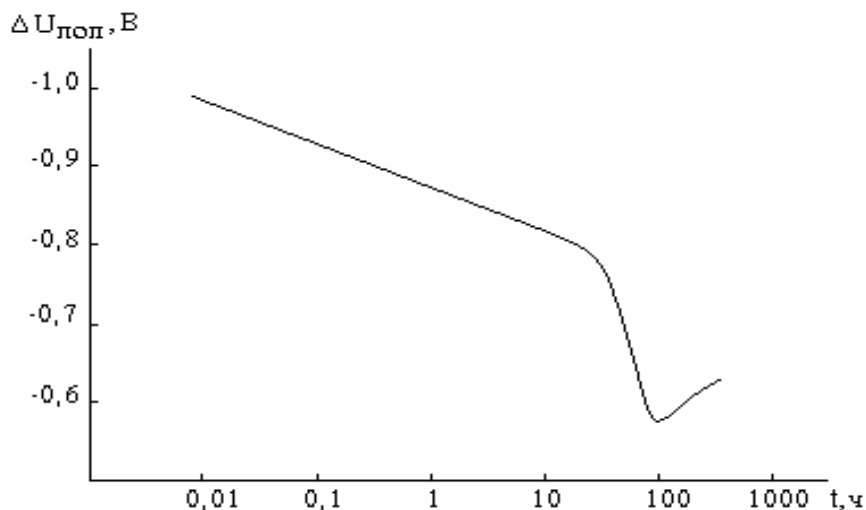


Рис.5.7. Изменение потенциала стали после отключения катодного тока при продолжительности поляризации 500 ч и плотности тока 200 мА/м².

На рис.5.7 показана характерная кривая снижения электродного потенциала стали после отключения катодного тока [1].

Судя по характеру кривой, катодную защиту - благодаря эффекту последействия - можно было бы безболезненно отключить на 10 и более часов, после чего включить ее снова и, вероятно, на такой же срок.

Возврат металла к своему стационарному состоянию продолжается очень долго и может превышать сотни часов.

Эффект последействия ярко проявляется в жидких средах, т.е. в морской и речной воде, и используется при защите таких сооружений как корпуса судов. Но, к сожалению, этот эффект незначителен для подземных трубопроводов. Как отмечено в практике, при отключении катодной защиты на трубопроводе вместо эффекта последействия могут возникнуть коррозионные макропары.

Действительно, вследствие того, что процесс располяризации или “разряда” замедлен, область трубопровода *вблизи анодного заземлителя*, как более электроотрицательная часть трубопровода, будет какое-то время работать *анодом*.

Такая гальваническая макропара может функционировать несколько часов, принося ощутимый и порой неожиданный ущерб. Не редки случаи, когда отмечалась язвенная коррозия на трубопроводах, казалось бы защищенных надежно. Причина этому - периодические перерывы в электроснабжении катодных станций.

Глава 6. Решение сетевой задачи электрохимической защиты

6.1. Исходная система уравнений

6.1.1. Сетевая задача электрохимической защиты

Под *сетевой задачей* будем понимать задачу расчета распределения тока и потенциала в трубопроводной сети *произвольной конфигурации* в поле внешних (блуждающих и защитных) и собственных (гальванических) токов.

Предлагаемый ниже метод решения сетевой задачи пригоден также для расчета распределения тока и потенциала в рельсовой сети электро-транспорта, в металлических оболочках кабельных линий, вдоль стержней сложных контуров заземления, в арматурной сетке железобетонной конструкции, по обсадной колонне скважины и на других подобных металлических сооружениях.

Перечисленные задачи образуют новую, ранее *не рассмотренную в теории* группу задач для системы *электрических проводников с утечкой*, отличительная особенность которой:

- произвольная конфигурация сети проводников;
- электрическая и гальваническая неоднородность участков;
- взаимовлияние полей токов проводников в земле.

В зависимости от постановки сетевой задачи искомыми при решении могут быть:

1) *потенциал* (потенциал трубопровода и потенциал земли, разность потенциалов сооружение-земля, градиент потенциала при заданных *токах* источников и известном *сопротивлении* цепей);

2) *ток* (ток источников, вызывающих заданный *потенциал* при заданном *сопротивлении* цепей, количество источников и их оптимальное размещение в трубопроводной сети);

3) *сопротивление* (удельное сопротивление изоляции, поляризационное сопротивление, сопротивление дренажной перемычки при заданном *токе* и *потенциале*).

Решения всех трех задач в конечном счете построены на одном фундаменте - законе Ома для электрического проводника с утечкой конечной длины.

6.1.2. Основные уравнения и формулы

Пусть участок подземного трубопровода отсечен от сети и находится в поле каких-либо внешних или собственных токов. Направим вдоль оси трубопровода криволинейную координатную ось $0L$ и рассмотрим вблизи точки L элементарный участок длиной ΔL (рис.6.1).

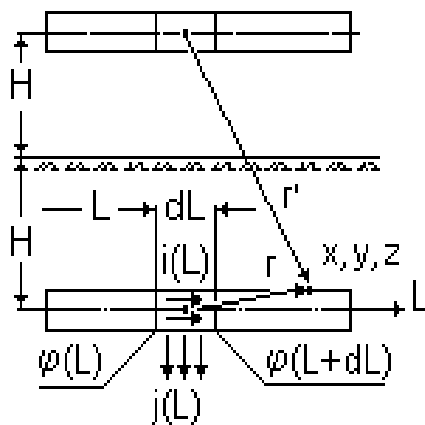


Рис.6.1.Расчетная схема для вывода основных уравнений для тока и потенциала трубопровода, где r' - расстояние от элементарного участка зеркального отображения трубопровода до исследуемой точки у поверхности реального трубопровода.

Если $\varphi_T(L)$ и $\varphi_T(L+\Delta L)$ - потенциалы трубопровода на границах элементарного участка, то по закону Ома для продольного тока будем иметь

$$i(L) = (\varphi_T(L+\Delta L) - \varphi_T(L)) / (R_{\text{пр}} \Delta L),$$

где $i(L)$ - среднее значение продольного тока трубопровода на элементарном участке ΔL ; $R_{\text{пр}}$ - удельное продольное сопротивление трубопровода, Ом/м.

В дифференциальной форме это уравнение имеет вид

$$i(L) = - 1 / R_{\text{пр}} \cdot d\varphi_{\text{т}}(L) / dL, \quad (6.1)$$

где знак “–” утверждает, что принятому направлению тока ($i > 0$) соответствует противоположное направление градиента потенциала ($d\varphi_{\text{т}} < 0$).

Но ток на элементарном участке dL не постоянен. Изменение продольного тока $di(L)$ здесь определяет ток утечки трубопровода, т.е.

$$j(L) = -di(L) / dL, \quad (6.2)$$

где $j(L)$ - линейная плотность тока утечки трубопровода, А/м.

При этом принято, что *ток утечки положителен, если он направлен из трубы в землю*, и отрицателен, если он натекает из земли на трубопровод. Тогда в соответствии с принятым направлением тока при $j > 0$ должно быть $di < 0$, т.е. *уменьшение* продольного тока в *положительном* направлении координатной оси, что и отмечено знаком “–”.

Формулы (6.1) и (6.2) приводят к одному из основных уравнений, связывающих две неизвестные j и $\varphi_{\text{т}}$

$$j(L) = 1 / R_{\text{пр}} d^2\varphi_{\text{т}}(L) / dL^2. \quad (6.3)$$

Другое уравнение для тех же неизвестных имеет вид

$$R_{\text{из}}j(L) = \varphi_{\text{т}}(L) - \varphi_{\text{зем}}(L) - \varphi_{\text{ст}}(L), \quad (6.4)$$

где $R_{\text{из}}$ - удельное сопротивление изоляции трубопровода, Ом·м; $\varphi_{\text{зем}}$ - потенциал земли у стенки трубопровода; $\varphi_{\text{ст}}$ - стационарный потенциал *металла* трубы относительно выбранного электрода сравнения.

Рассмотрим составляющие уравнения (6.4) подробнее.

Левую часть уравнения можно интерпретировать как *напряжение на изоляции* трубопровода, т.е.

$$\Delta U = R_{из} j \quad (6.5)$$

или как *смещение потенциала на поверхности трубы*, вызванное токами утечки трубопровода.

Правая часть уравнения (6.4) есть выражение этого же напряжения ΔU , но представленного как *разность потенциалов* трубы (φ_T) и ближайшей точки земли ($\varphi_{зем}$) с учетом электрохимической неэквипотенциальности металла трубы ($\varphi_{ст}$).

Стационарный потенциал

Условимся различать стационарный потенциал *металла* $\varphi_{ст}$ и стационарный потенциал *трубопровода* $U_{ст}$. Оба они прежде всего предполагают, что при их измерении отсутствуют внешние токи. Но если $U_{ст}$ есть обычным способом измеряемая разность потенциалов труба-земля, то $\varphi_{ст}$ есть разность потенциалов между обособленным “куском” трубы и землей, т.е. $\varphi_{ст}$ - электрохимический потенциал некоего обособленного металлического образца-электрода из материала трубопровода в данных грунтовых условиях, измеренный относительно определенного электрода сравнения. Часто $\varphi_{ст}$ называют *потенциалом коррозии*.

При решении задач с коррозионными гальванопарами следует пользоваться понятием $\varphi_{ст}$, а при решении только задач электрохимической защиты можно полагать, что $\varphi_{ст} = U_{ст}$.

Потенциал земли

В правую часть уравнения (6.4) входит еще одна компонента - потенциал земли $\varphi_{зем}$. Его следует представить двумя составляющими

$$\varphi_{зем} = \varphi_{з.т} + \varphi_з, \quad (6.6)$$

где $\varphi_{з.т}$ - потенциал земли поля токов данного трубопровода; $\varphi_з$ - потенциал земли, вызываемый токами внешних источников (рельсовыми линиями электротранспорта, анодными заземлителями установок ЭХЗ и т.д.).

Расчет потенциала земли ($\varphi_з$) базируется на известных законах, которые отображены в нижепредставленных расчетных формулах.

а) Потенциал земли в поле точечного источника тока

Потенциал в поле точечного источника тока (в идеальном случае - это уединенный сферический заземлитель, подключенный к “+” источника тока), находящегося в безграничной проводящей среде, вычисляется по формуле

$$\varphi_3 = I\rho / (4\pi r) , \quad (6.7)$$

где φ_3 - потенциал поля тока в исследуемой точке земли; I - ток точечного источника; r - расстояние от источника до исследуемой точки земли; ρ - удельное электрическое сопротивление земли.

Для источника, находящегося в земле на конечной глубине, формула имеет вид

$$\varphi_3 = I\rho / (4\pi) (1 / r + 1 / r') , \quad (6.8)$$

где r' - расстояние от зеркального (относительно дневной поверхности) отображения источника до исследуемой точки.

В частном случае, когда точечный источник находится на поверхности земли ($r = r'$), имеем

$$\varphi_3 = I\rho / (2\pi r) . \quad (6.9)$$

Реальный заземлитель может быть заменен точечным заземлителем без заметной ошибки для исследуемой точки земли, если для радиальной координаты этой точки справедливо $r > 2 L_a$, где L_a - максимальный размер заземлителя.

б) Потенциал земли в поле протяженного заземлителя

Если размеры заземлителя велики относительно расстояния до исследуемой точки, то его делят на отрезки, каждый из которых затем заменяют точечным источником тока. Тогда, если I - общий ток заземлителя, L_a - его протяженность, то $j = I / L_a$ - линейная плотность тока заземлителя. Представляя *линейный источник совокупностью точечных* интенсивностью $j dL$ и допуская $j = const$, получим

$$\varphi_3 = j\rho / (4\pi) \int_0^L (1/r + 1/r') dL, \quad (6.10)$$

где r - расстояние от текущей точки на заземлителе до фиксированной точки в земле; r' - то же для зеркального отражения электрода (см. рис.6.1).

в) Потенциал земли в поле трубопровода

Потенциал земли, вызванный токами утечки трубопровода, вычисляется по формуле аналогичной (6.10), но с учетом того, что величина плотности тока зависит от продольной координаты

$$\varphi_{3T} = \rho / (4\pi) \int_{(L)} j(\xi) G(\xi, x, y, z) d\xi; \quad (6.11)$$

$$G(\xi, x, y, z) = 1/r(\xi, x, y, z) + 1/r'(\xi, x, y, z),$$

где r - расстояние между текущей точкой ξ на оси трубопровода и фиксированной точкой x, y, z на его поверхности; r' - то же самое, но от зеркального отображения.

6.1.3. Граничные условия для участка сети

а) В точке подключения сосредоточенной токовой нагрузки

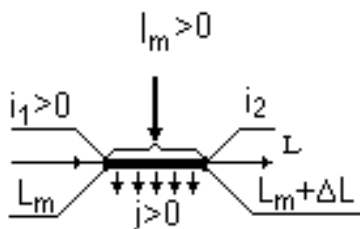


Рис.6.2. Расчетная схема

Пусть к точке $L = L_m$ обособленного участка сети приложена сосредоточенная токовая нагрузка I_m , например, подключена катодная станция. Рассредоточим нагрузку I_m вдоль элементарного участка ΔL и в соответ-

ствии с принятыми на рис.6.2 направлениями токов, запишем первый закон Кирхгофа для малого отрезка ΔL в окрестности точки L_m :

$$i_1 - i_2 + I_m - j\Delta L = 0 \quad (6.12)$$

или

$$j = -(i_2 - i_1) / \Delta L + I_m / \Delta L. \quad (6.13)$$

Выполняя предельный переход, получим дифференциальное уравнение для трубопровода с сосредоточенными нагрузками в точках m

$$j(L) = -di(L) / dL + \delta(L_m, L) I_m$$

или

$$j(L) = (1 / R_{\text{пр}}) d^2\varphi_{\text{т}}(L) / dL^2 + \delta(L_m, L) I_m \quad (6.14)$$

где $\delta(L_m, L)$ - дельта-функция Дирака, использующаяся как символ наличия в точке L_m сосредоточенного источника. Ее свойства в рассматриваемой ситуации:

$$\begin{aligned} \delta(L_m, L) &= 0 && \text{при } L \neq L_m; \\ \delta(L_m, L) I_m &= J_m && \text{при } L = L_m, \end{aligned}$$

где $J_m = I_m / \Delta L_m$ - плотность тока внешней нагрузки в пределах элементарного участка ΔL_m . В реальных условиях ток внешней нагрузки не может быть приложен к физической точке и поэтому величина J_m всегда конечна.

Наличие сосредоточенной нагрузки изменит вид дифференциального уравнения (6.1), которое теперь следует различать для двух участков: до точки подключения нагрузки и после нее:

$$i(L) = \begin{cases} -1 / R_{\text{пр}} d\varphi_{\text{т}}(L) / dL & \text{при } L < L_m \\ -1 / R_{\text{пр}} d\varphi_{\text{т}}(L) / dL + I_m & \text{при } L \geq L_m \end{cases} \quad (6.15)$$

Функция $i(L)$ при переходе через точку приложения сосредоточенной нагрузки может изменить свой знак.

б) В точке рассечения трубопровода

В точке рассечения трубопровода или на его конце, если здесь не приложена внешняя нагрузка ($I_m = 0$), справедливо условие

$$i(L) = d\phi_T(L) / dL = 0 \quad \text{при } L = L_g, \quad (6.16)$$

где L_g - координата конечной точки трубопроводной линии или точки токораздела, где, очевидно $i(L_g) = 0$.

в) В узле разветвления

Пусть в точке $L = L_m$, где приложена сосредоточенная нагрузка I_m , трубопровод разветвляется на T лучей, каждый из которых имеет отличное от других удельное продольное сопротивление $R_{пр.t}$ и удельное сопротивление изоляции $R_{из.t}$ ($t = 1, 2, \dots, T$, рис.6.3). В соответствии с принятым направлением токов имеем:

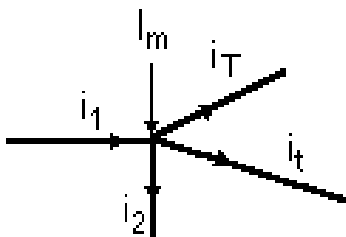


Рис.6.3.Расчетная схема

$$i_1 - (i_2 + i_3 + \dots + i_T) + I_m - j\Delta L = 0; \quad (6.17)$$

при $\Delta L = (\Delta L_1 + \dots + \Delta L_t + \dots + \Delta L_T) / 2$,

где $\Delta L_t / 2$ - половина длины элементарного участка, отсчитанного вдоль координатной оси t -го луча с началом в узле разветвления; ΔL - расчетная длина эквивалентного элементарного участка для узла разветвления. Оче-

видно, что при $T = 2$ формула (6.17) переходит в формулу (6.12) для неразветвленного трубопровода, а при $T = 1$ - для нагруженной консоли.

Разделив (6.17) на ΔL и воспользовавшись выражением (6.14) для плотности тока участка, придем к одному из основных уравнений, связывающих неизвестные $j(L)$ и $\varphi_T(L)$

$$j(L) - 2 / T \sum_{t=1}^T (1 / R_{\text{пр.t}}) d^2 \varphi_T(L_t) / dL_t^2 = \delta(L_m, L) I_m, \quad (6.18)$$

где составляющая со знаком $\sum$ есть средняя плотность тока утечки в узле разветвления, помеченном некоторой криволинейной координатой L .

6.1.4. Система уравнений для обособленной сети

Пусть проектируемая трубопроводная сеть произвольной конфигурации (рис.6.4) с токовыми нагрузками отделена от существующей сети в точках токораздела.

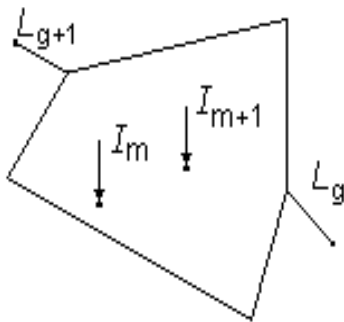


Рис.6.4. Расчетная схема для обособленной сети, где I_m - токовые нагрузки, L_g - точки токораздела.

Система уравнений для нагруженной обособленной сети складывается из уравнений, полученных выше, и имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{из}}(L)j(L) + \rho / (4\pi) \int j(\xi) G(\xi, L) d\xi - \varphi_{\text{т}}(L) = -\varphi_{\text{з}}(L) - \varphi_{\text{ст}}(L); \\ j(L) - \frac{2}{T} \sum_{t=1}^T \frac{1}{R_{\text{прт}}^{(L)}} \frac{d^2 \varphi_{\text{т}}(L_t)}{dL_t} = \delta(L_m, L) I_m; \\ d\varphi_{\text{т}}(L) / dL = 0 \quad \text{при} \quad L = L_q. \end{array} \right. \quad (6.19)$$

Так, первое уравнение в системе (6.19) есть синтез уравнений (6.4), (6.6) и (6.11), второе - (6.18), третье - (6.16).

Решение сетевой задачи (6.19), ввиду ее сложности для сети произвольной конфигурации, возможно лишь численными методами, изложенными ниже.

6.2. Численный метод расчета сетевой задачи

6.2.1. Основные положения метода дискретизации

Заменим трубопроводную сеть, как совокупность проводников с утечкой с *равномерно распределенными* параметрами, проводниками с утечкой с *дискретно изменяющимися* параметрами. С этой целью представим трубопроводную сеть совокупностью прямолинейных *отрезков дискретизации* с неизменными в пределах отрезка параметрами. Точки стыка отрезков дискретизации назовем *узлами дискретизации*.

Зафиксируем положение каждого узла дискретизации в декартовой системе координат, произвольно расположив плоскость xOy на поверхности земли и направив ось Oz вниз.

Узлы дискретизации целесообразно совместить с такими характерными точками трубопроводной сети как узлы разветвления, конечные (граничные) точки трубопроводных линий, углы поворота трасс, места размещения контрольно-измерительных пунктов и прочими *контролируемыми при эксплуатации* точками сети. Для неразветвленных и прямолинейных трубопроводов узлы дискретизации следует назначить произвольно.

Параметры *отрезка дискретизации* ΔL_{ik} между i -м и k -м соседними узлами, а именно, удельное продольное сопротивление ($R_{пр.ik}$), удельное сопротивление изоляции ($R_{из.ik}$) и стационарный потенциал ($U_{ст.ik}$), как мы условились, будем полагать неизменными. Параметры i -го узла *дискретизации* ($R_{пр.i}$, $R_{из.i}$, $U_{ст.i}$), при необходимости, будем вычислять как средние из значений параметров стыкующихся отрезков дискретизации. При этом введем понятие *шаг дискретизации* ΔL_i для i -го узла как полусумму длин стыкующихся отрезков дискретизации (см. также формулу (6.17))

$$\Delta L_i = (L_{i1} + L_{i2} + \dots + L_{iT}) / 2, \quad (6.20)$$

где T - число связей данного узла дискретизации с соседними; L_{it} - длина t -го отрезка дискретизации, исходящего из i -го узла ($t = 1, 2, \dots, T$).

В методе дискретизации для сетевой задачи, в отличие от классического метода конечных разностей, где отрезок дискретизации ΔL является лишь “безымянным” аналогом бесконечно малого элементарного участка dL , отрезок дискретизации ΔL_{ik} “овеществлен”, т.е. координатно привязан, его ось ориентирована в пространстве и имеет далеко не бесконечно малую длину.

Такое представление в определенной степени аналогично физическому моделированию трубопровода с помощью набора последовательно соединенных отрезков-электродов, например, трубок, погруженных в электролит или иную проводящую среду, моделирующую некоторый объем земли. Метод физического моделирования в недалеком прошлом был широко распространен, начиная от Кальмана В.С. в 40-х годах, затем благодаря работам Левина В.М., Котельникова А.В., Марквардта Г.Г., Шакова В.И., Ткаченко В.Н., Куликова А.А., Тозони О.В., В.В.Притулы и др.

Но в эпоху всеобщей компьютеризации *метод физического и аналогового моделирования* был заменен более эффектными *методами численного моделирования*, куда и относится предлагаемый метод дискретизации.

Метод дискретизации является в настоящее время единственным, позволяющим решать сетевую задачу, т.е. задачу распределения тока и потенциала в разветвленной трубопроводной сети произвольной конфигурации.

6.2.2. Система уравнений для сети с дискретными параметрами

В соответствии с методом дискретизации система уравнений сетевой задачи (6.19) должна быть заменена ее конечно-разностным аналогом следующего вида

$$\begin{cases} R_{из i} + \sum_{k=1}^N a_{ik} j_k - \varphi_{Ti} = -\varphi_{zi} - \varphi_{ст i}, & \text{при } i=1,2,\dots,N; \\ j_i - 1/\Delta L_i \sum_{t=1}^{T_i} (\varphi_{T_{it}} - \varphi_{Ti}) / (\Delta L_{it} R_{пр it}) = \delta_i I_m, & \delta_i = \begin{cases} 1 & \text{при } i=m; \\ 0 & \text{иное.} \end{cases} \end{cases} \quad (6.21)$$

где N - число узлов дискретизации; T_i - число узлов на связи с i -м; j_i - искомая плотность тока для i -го узла; φ_{Ti} - искомый потенциал i -го узла; $\varphi_{T_{it}}$ - потенциал t -го узла, находящегося на связи с i -м; ΔL_{it} - расстояние между i -м в t -м узлами (отрезок дискретизации); ΔL_i - расчетный шаг дискретизации для i -го узла; $R_{из i}$ - удельное сопротивление изоляции; $\varphi_{з.i}$ - потенциал земли; $\varphi_{ст.i}$ - стационарный потенциал металла; $R_{пр.it}$ - удельное продольное сопротивление соответствующего отрезка дискретизации; m - номер узла с подключенной сосредоточенной нагрузкой I_m ; a_{ik} - коэффициент, учитывающий влияние k -го отрезка дискретизации на i -й узел и определяемый формулой

$$a_{ik} = \rho / (4\pi) \sum_{t=1}^{T_k} \int_0^{L_{kt}/2} G_{ikt} d\xi \quad (6.22)$$

При этом G_{ikt} вычисляется по формулам типа (6.11). Так, для t -го луча k -го узла, если луч горизонтален, имеем

$$\begin{aligned} G_{ikt} &= 1 / \sqrt{r^2 + (z_k - z_i + d_i/2)^2} + 1 / \sqrt{r^2 + (z_k + z_i + d_i/2)^2}; \\ r^2 &= (x_k + \xi \cos \theta_{kt} - x_i)^2 + (y_k + \xi \sin \theta_{kt} - y_i)^2; \end{aligned} \quad (6.23)$$

$$\theta_{kt} = \arctan(y_k - y_t) / (x_k - x_t),$$

где x_s, y_s, z_s - координаты s -го узла ($s = i, k, t$); d_i - средний диаметр трубопровода в i -м узле.

Следует заметить, ищется влияние k -го узла на i -й. При этом в k -м узле источник тока находится на оси трубопровода, а подверженная влиянию точка узла i расположена на внешней поверхности изоляции трубопровода по его нижней образующей.

6.2.3. Решение системы уравнений

Алгебраическую систему уравнений сетевой задачи (6.21) удобнее представить в матричной форме

$$\begin{aligned} \mathbf{A}\mathbf{j} - \Phi_T &= -\Phi_z - \Phi_{ст}; \\ \mathbf{j} - \mathbf{B}\Phi_T &= -\mathbf{J}, \end{aligned} \quad (6.24)$$

где $\mathbf{A} = \{A_{ik}\}_N$ - квадратная матрица, коэффициенты которой отражают факт наличия взаимных влияний между отрезками дискретизации

$$A_{ik} = \begin{cases} a_{ik} + R_{из.i} & \text{при } i = k; \\ a_{ik} & \text{остальное;} \end{cases} \quad (6.25)$$

где $i, k = 1, 2, \dots, N$ - произвольно назначенные номера узлов дискретизации.

В системе (6.24) $\mathbf{B}$ - квадратная матрица, коэффициенты которой $\{B_{ik}\}_N$ определяют связи и сопротивления между узлами, и вычисляются по формулам:

$$B_{ik} = \begin{cases} -1 / \Delta L_i \sum_{t=1}^{T_i} 1 / (\Delta L_{it} R_{тп it}) & - \text{при } k = i; \\ 1 / (\Delta L_i \Delta L_{it} R_{тп it}) & - \text{при } k = it; \\ 0 & - \text{остальное.} \end{cases} \quad (6.26)$$

где i_t - номер узла дискретизации, находящегося на связи с i -м; t - условный номер ответвления от i -го узла, T_i - число связей i -го узла.

Остальные матрицы $\Phi_T, \Phi_Z, \Phi_{CT}$ в системе (6.24) - столбцовые вида $\{\Phi_i\}_N$ без особенностей, за исключением столбца $\mathbf{J} = \{J_i\}_N$, для которого

$$J_i = \begin{cases} I_m / \Delta L_i & \text{при } i = m; \\ 0 & \text{остальное,} \end{cases}$$

где m - номера узлов с токовыми нагрузками I_m .

Следует напомнить, что за положительное направление тока нагрузки I_m принято направление из питающей сети в трубопровод. Следовательно, ток катодной станции в точке дренажа - нагрузка отрицательная, а тот же ток анодного заземлителя - положительная.

Что касается граничных условий на концах трубопровода (см. третье уравнение в (6.19)), то они автоматически выполняются при заполнении матрицы $\mathbf{B}$. Так, если i -й узел конечный, то в формуле (6.26) для диагонального элемента B_{ii} следует принять $T_i = 1$.

а) Матричное уравнение для плотности тока

Исключим из системы двух уравнений (6.24) неизвестную Φ_T , для чего умножим первое уравнение слева на $\mathbf{B}$ и затем вычтем из него второе, в результате чего получим **основное уравнение сетевой задачи** в матричном виде

$$(\mathbf{BA} - \mathbf{E})\mathbf{j} = \mathbf{J} - \mathbf{B}(\Phi_Z + \Phi_{CT}), \quad (6.27)$$

где $\mathbf{E}$ - единичная матрица размерности $N \times N$, заполненная везде нулями, кроме главной диагонали, где задана единица.

В матричном уравнении (6.27) искомым является вектор плотности тока $\mathbf{j}$.

В общем случае, поскольку все матрицы в уравнении (6.27) отражают физическую реальность и поэтому не имеют особенностей, решение можно представить в виде

$$\mathbf{j} = (\mathbf{BA} - \mathbf{E})^{-1} (\mathbf{J} - \mathbf{B}\varphi_z - \mathbf{B}\varphi_{\text{ст}}), \quad (6.28)$$

где $(\mathbf{BA} - \mathbf{E})^{-1}$ - обратная матрица.

Система более эффективно решается стандартными методами, т.е. без вычисления обратных матриц.

б) Формула для расчета разности потенциалов труба-"близкая" земля.

После определения вектора $\mathbf{j}$ вычисляется разность потенциалов между трубой и "близкой" землей или, как мы уже условились ранее в терминах, просто разность потенциалов труба-земля

$$U = \mathbf{R}_{\text{из}} \mathbf{j} + \varphi_{\text{ст}}. \quad (6.29)$$

в) Формула для расчета потенциала земли, вызванного токами трубопровода

Полезна для дальнейшего анализа формула потенциала земли, вызванного токами трубопровода

$$\varphi_{z, \text{т}} = \mathbf{A}' \mathbf{j} \quad (6.30)$$

где $\varphi_{z, \text{т}}$ - вектор потенциала земли, вызванного токами утечки трубопровода, элементы которого соответствуют формуле (6.7); $\mathbf{A}' = \{a_{ik}\}_N$ - квадратная матрица, элементы которой вычисляются по формуле (6.22); $\mathbf{j}$ - решение системы (6.27).

г) Матричное уравнение для потенциала трубопровода

Для определения продольных токов $\mathbf{i}$ необходимо знать потенциал трубопровода $\varphi_{\text{т}}$. Для исключения из системы (6.24) неизвестной $\mathbf{j}$ умножим второе уравнение слева на $\mathbf{A}$ и вычтем его из первого, в результате чего получим матричное уравнение для $\varphi_{\text{т}}$

$$(\mathbf{AB} - \mathbf{E}) \boldsymbol{\varphi}_T = \mathbf{AJ} - \boldsymbol{\varphi}_3 - \boldsymbol{\varphi}_{\text{ст}}, \quad (6.31)$$

Общее решение для потенциала $\boldsymbol{\varphi}_T$ имеет вид

$$\boldsymbol{\varphi}_T = (\mathbf{AB} - \mathbf{E})^{-1} (\mathbf{AJ} - \boldsymbol{\varphi}_3 - \boldsymbol{\varphi}_{\text{ст}}). \quad (6.32)$$

д) Матричное уравнение для удельного сопротивления изоляции

Определим вектор $\mathbf{R}_{\text{из}}$, исходя из результатов опытных измерений разности потенциалов труба-земля в поле действующей катодной станции, т.е. будем считать известными $U_{\text{ст}}$ и ΔU - стационарный потенциал и смещение потенциала, вызванное токами катодных станций, во всех узлах исследуемой сети.

Выделим из матрицы $\mathbf{A} = \{A_{ik}\}_N$, определяемой формулами (6.25), столбец с $\mathbf{R}_{\text{из}}$. Тогда первое уравнение в системе (6.24) получит следующий вид (при допущении $\boldsymbol{\varphi}_{\text{ст}} = U_{\text{ст}}$):

$$\mathbf{A}' \mathbf{j} + \mathbf{R}_{\text{из}} \mathbf{j} - \boldsymbol{\varphi}_T = -\boldsymbol{\varphi}_3 - U_{\text{ст}}, \quad (6.33)$$

где $\mathbf{A}'$ - матрица взаимных влияний, упомянутая в формуле (6.30).

Так как разность потенциалов труба-земля $U = \Delta U + U_{\text{ст}}$ задана и к тому же $\Delta U = \mathbf{R}_{\text{из}} \mathbf{j}$, то придем к системе, аналогичной системе уравнений (6.24)

$$\begin{aligned} \mathbf{A}' \mathbf{j} - \boldsymbol{\varphi}_T &= -\boldsymbol{\varphi}_3 - U; \\ \mathbf{j} - \mathbf{B} \boldsymbol{\varphi}_T &= -\mathbf{J}. \end{aligned} \quad (6.34)$$

Исключая из системы, как и прежде $\boldsymbol{\varphi}_T$, получим матричное уравнение относительно $\mathbf{j}$

$$(\mathbf{BA}' - \mathbf{E}) \mathbf{j} = \mathbf{J} - \mathbf{B}(\boldsymbol{\varphi}_3 + U), \quad (6.35)$$

после решения которого найдем $\mathbf{R}_{\text{из}}$ по формуле

$$\mathbf{R}_{\text{из}} = \Delta U \mathbf{j}^{-1}. \quad (6.36)$$

е) Формула для расчета разности потенциалов трубы относительно выбранной точки земли

Если есть необходимость в вычислении разности потенциалов между трубой и произвольной точкой земли, то формулу (6.29) следует дополнить

$$U = R_{из} j + \Delta\varphi_3 + U_{ст}, \quad (6.37)$$

где $\Delta\varphi_3$ - напряжение между исследуемой точкой земли и точкой земли на внешней поверхности изоляции трубопровода.

Для определения $\Delta\varphi_3$ вычисляют по формулам (6.30) потенциал земли, вызванный токами трубопровода, дважды: для “близкой” точки земли - $\varphi_{з.т}(x_i, y_i, z_i + d_i/2)$ и для контролируемой точки - $\varphi_{з.т}(x, y, z)$, после чего берут их разность

$$\Delta\varphi_3 = \varphi_{з.т}(x, y, z) - \varphi_{з.т}(x_i, y_i, z_i + d_i/2), \quad (6.38)$$

где $x_i, y_i, z_i + d_i/2$ - координаты точки на поверхности изоляции трубопровода по его нижней образующей.

Так, при $z = 0, x = x_i, y = y_i$ определяется потенциал $\varphi_{з.т}(x, y, 0)$ на поверхности земли над осью трубопровода.

ж) Формула для вычисления продольных токов трубопровода

Если возникает необходимость в вычислении продольных токов трубопровода, то выполняют решение системы (6.31) и затем по закону Ома находят ток i_{kt} на отрезке дискретизации между k -м и kt -м соседними узлами

$$i_{kt} = (\varphi_{т.k} - \varphi_{т.kt}) / (L_{kt} R_{пп.kt}). \quad (6.39)$$

где i_{kt} - среднее значение тока контролируемого участка; $\varphi_{т.k}, \varphi_{т.kt}$ - потенциалы на концах участка; L_{kt} - длина участка; $R_{пп.kt}$ - удельное продольное сопротивление трубы.

6.3. Расчет трубопроводной сети произвольной сложности

6.3.1. Диакоптика - расчет сети по частям

Часто рассматриваемая трубопроводная сеть является частью более крупной сети, расчет которой или выполнен ранее, или не предполагается в настоящий момент. Задача состоит в том, чтобы, рассчитывая только одну часть сети - *подобласть сети*, - учесть влияние другой.

Решение подобных задач ведут методами *диакоптики*, что означает *расчет по частям*.

Отсечение части сети вызовет искажение поля в оставшейся сети, даже если отсеченная часть не имеет токовых нагрузок. Если же отбрасывать трубопроводные сети, нагруженные катодными станциями, или рассекать рельсовую линию магистральной железной дороги - мощный источник блуждающих токов, - то искажения в оставшейся сети могут быть недопустимо большими.

Расчет по частям часто необходим в связи с ограниченностью основной оперативной памяти компьютера и проблемами задействования дополнительной памяти при решении систем уравнений высокого порядка прямыми методами. Однако основная причина привлечения методов диакоптики - отсутствие необходимости расчета соседней, как правило, существующей трубопроводной сети, когда вновь строящийся, подлежащий расчету, участок относительно мал и требует небольшого труда при подготовке и вводе исходных данных.

Можно пренебречь влиянием отсекаемой сети, если, например, в месте стыка запроектировать электрическое рассечение трубопроводов с помощью изолирующего фланцевого соединения. Однако в этом случае нельзя пренебрегать тем фактом, что токи анодных заземлителей катодных станций, действующих в отсекаемой сети, вызовут потенциальное поле Φ_3 в рассчитываемой подобласти, поскольку землю, как трубопровод, просто так отсечь нельзя.

И, напротив, иногда есть необходимость проанализировать ситуацию с возможностью защиты вновь строящегося участка сети за счет уже существующей системы катодной защиты в действующей сети для того, чтобы не строить новую катодную станцию.

Вероятно, учитывая приближенность коррозионных расчетов вообще, можно в ряде случаев пренебречь фактом рассечения сети или учесть эффект взаимного влияния приближенно.

6.3.2. Сеть как совокупность двух подобластей с одной точкой связи

Рассмотрим вначале простейший случай стыка двух подобластей сети по рис.6.5.

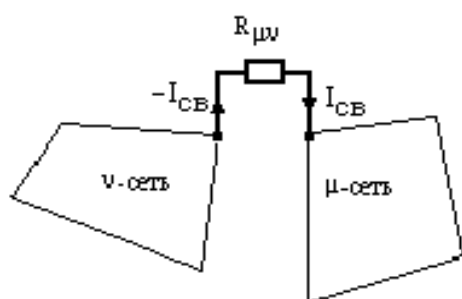


Рис. 6.5. Цепь связи на стыке двух подобластей.

Пусть две подобласти трубопроводной сети μ и ν стыкуются одной *цепью связи*. Для точки стыка справедливо уравнение, аналогичное выражению закона Ома для полной цепи

$$I_{св} = (\varphi_{т\mu} - \varphi_{т\nu}) / (R_{\mu\nu} + Z_{\mu} + Z_{\nu}), \quad (6.36)$$

где $I_{св}$ - *ток перетекания* на стыке; $\varphi_{т\mu}$, $\varphi_{т\nu}$ - потенциалы трубопровода в точках стыка соответственно в μ -й и ν -й подобластях, определяемые при отсутствии связи; $R_{\mu\nu}$ - сопротивление цепи связи между трубопроводами; Z_{μ} , Z_{ν} - *входные сопротивления* сети в точках стыка μ -й и ν -й подобластей.

Если между трубопроводами в стыке отсутствует электрическая перемычка с заданным сопротивлением, например, трубопроводы соединены на сварке, то следует принять $R_{\mu\nu} = 0$.

Входное сопротивление сети “по далекой земле” (Z) в какой-либо точке есть частное от деления потенциала φ_t этой точки на ток сосредоточенной нагрузки I , вызвавшего этот потенциал и приложенному в рассматриваемой точке, т.е.

$$Z = \varphi_T / I. \quad (6.37)$$

Таким образом, для определения входных сопротивлений Z_μ и Z_ν необходимо решить систему относительно φ_T соответствующей подобласти

$$(\mathbf{AB} - \mathbf{E}) \varphi_T = \mathbf{AJ} - \mathbf{U}_{\text{CT}}, \quad (6.38)$$

задав в векторе $\mathbf{J} = \{J_i\}_N$ единичный ток нагрузки $I = 1$ для точки стыка, т.е. приняв $J_i = 1 / \Delta L$ и полагая $J_i = 0$ для других узлов. Значение φ_T в точке стыка будет численно равно Z .

После отыскания величины тока перетекания I_{CB} задача определения плотности тока в μ -й подобласти будет заключаться в решении следующей системы уравнений

$$(\mathbf{BA} - \mathbf{E})\mathbf{j} = \mathbf{J} + \mathbf{J}_{\text{CB}} - \mathbf{B}(\varphi_3 + \varphi_{\text{CB}} + \mathbf{U}_{\text{CT}}), \quad (6.39)$$

где $\mathbf{J}_{\text{CB}}$ - вектор плотности тока перетекания как эквивалентная нагрузка точки стыка μ -подобласти

$$\mathbf{J}_{\text{CB}} = \{J_{\text{CB},i}\}_N, \quad J_{\text{CB},i} = \begin{cases} I_{\text{CB}} / \Delta L_i & \text{при } i = s; \\ 0 & \text{остальное;} \end{cases}$$

φ_{CB} - потенциал земли в μ -подобласти, наведенный ν -подобластью с единственной сосредоточенной нагрузкой I_{CB} , включенной в точке стыка в ν -подобласти. При этом условимся считать, что ток I_{CB} *втекает* в μ -подобласть и *вытекает* из ν -подобласти, т.е. $I_{\text{CB}} > 0$ для μ -й и $I_{\text{CB}} < 0$ для ν -й подобластей.

Для определения φ_{CB} в (6.39) необходимо сначала найти плотность тока $\mathbf{j}$, вызванную в ν -й подобласти током $-I_{\text{CB}}$, из уравнения

$$(\mathbf{BA} - \mathbf{E})\mathbf{j} = -\mathbf{J}_{\text{CB}} - \mathbf{BU}_{\text{CT}}, \quad (6.40)$$

а затем по формуле (6.30) найти значения $\varphi_{з.т}$ в точках μ -й подобласти, имея ввиду, что в данном случае $\varphi_{св} = \varphi_{з.т}$.

Пример расчета 1

Узлами 1...5 на рис.6.6 задана существующая трубопроводная сеть (ν -сеть), к которой проектируется подключение нового трубопровода с узлами 6...8 (μ -сеть). Узлы 3 и 8 подготовлены для сварки и находятся рядом. Требуется найти распределение потенциала в трубопроводах после их соединения.

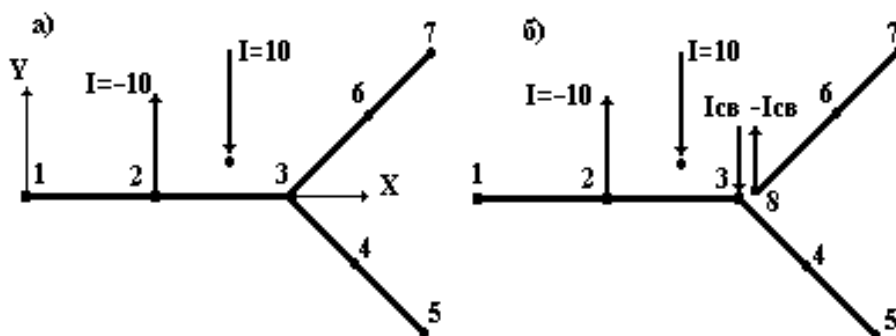


Рис.6.6. Расчетные схемы трубопроводной сети: исходная (а) и рассеченная на две подобласти (б), где I - ток катодной станции; $I_{св}$ - ток перетекания.

Расчет проведем диакоптическим методом, т.е. каждую подобласть рассчитаем в отдельности, вычислим ток перетекания, учтем взаимные влияния подобластей и найдем суммарную разность потенциалов труба-земля. Затем решим ту же задачу без рассечения на подобласти и сравним результаты расчета.

Координаты узлов дискретизации и прочие исходные данные для сети заданы в табл.6.1. Результаты расчета прослежены ниже поэтапно.

Таблица 6.1

Nn	x,м	y,м	Параметры трубопроводов
1	0	0	Глубина заложения, $z = 1$ м
2	200	0	Диаметр и толщина стенки, $d \times t = 200 \times 6$ мм
3	400	0	Удельное сопротивление изоляции, $R_{из} = 100$ Ом·м
4	500	-100	Ток катодной станции, $I = 10$ А
5	600	-200	Координаты размещения анодного
6	500	100	заземлителя - $x_a = 300$, $y_a = 50$, $z_a = 2$ (м)
7	600	200	Удельное сопротивление грунта, $\rho = 30$ Ом·м
8	400	1	Стационарный потенциал, $U_{ст} = 0$

Этап 1. Входные сопротивления для обособленных под областей определим по ф.(6.38) и (6.37):

для узла 3 : $Z_{\mu} = 0,234$ Ом;

для узла 8 : $Z_v = 0,517$ Ом.

Этап 2. Потенциал φ_T при условии, что трубопроводы рассечены и соседняя под область отнесена в бесконечность, вычислим по ф.(6.32):

для узла 3: $\varphi_{T\mu} = 2,012$ В;

для узла 8: $\varphi_{TV} = 0$

Этап 3. Ток перетекания вычислим по ф.(6.36) :

$$I_{св} = (2,012 + 0,0) / (0,234 + 0,517) = 2,68 \text{ А.}$$

Этап 4. Разность потенциалов труба-земля U с учетом J и $J_{св}$, но при $\varphi_{св} = 0$ и $U_{ст} = 0$, определим по формулам (6.39) и (6.29), а результаты зане-сем в табл.6.2.

Таблица 6.2

nn точек	Этап 4		Этап 5		Этап 6	Этап 7
	v-сеть	μ-сеть	v-сеть	μ-сеть		
1	-1,163		-0.062		-1.224	-1.201
2	-1.114		-0.044		-1.158	-1.136
3	-1.081		0.180		-0.901	-0.915
4	-0.926		-0.027		-0.953	-0.936
5	-1.095		-0.047		-1.142	-1.124
6	-	-0.858	-	0.036	-0.822	-0.962
7	-	-1.046	-	0.055	-0.991	-1.139
8	-	-1.059	-	-0.092	-1.151	-0.963

Этап 5. Разность потенциалов труба-земля U с учетом $\varphi_{\text{св}}$, но при $J_{\text{св}} = 0$, вычислим по формулам (6.39) и (6.29) (см.табл.6.2).

Этап 6. Искомое значение разности потенциалов труба-земля U , т.е. с учетом J , $\varphi_{\text{св}}$ и $J_{\text{св}}$, найдем как сумму результатов расчета на этапах 4 и 5 (табл.6.2).

Этап 7. Истинное значение разности потенциалов труба-земля для нерассеченной сети - там же .

Таким образом, погрешность расчета (сравни столбец **этап 6** со столбцом **этап 7** в табл.6.2) в рассмотренном примере вполне приемлема, хотя для ненагруженной подобласти (μ -сеть, т.е. узлы 6...8) она достигает 14%, в то же время для основной (узлы 1...5) не превышает 2% .

Более того, учет $\varphi_{\text{св}}$ не повышает точности расчета (сравни в закрашенной строке: $U = -1,142$ В - с $\varphi_{\text{св}}$, $U = -1,095$ В - без $\varphi_{\text{св}}$, $U = -1,124$ В - точное значение). Следовательно, этой составляющей, вероятно, можно вообще пренебречь, т.е. для компенсации соседней подобласти достаточно учитывать только токовую нагрузку $I_{\text{св}}$ в точке рассеивания со стороны исследуемой подобласти.

При вычислении тока перетекания может возникнуть проблема задания потенциала $\varphi_{\text{т}}$ со стороны существующей сети, поскольку в распоряжении исследователя лишь разность потенциалов труба-"близкая земля" U . Оценим погрешность замены $\varphi_{\text{т}}$ на U и использования вместо формул (6.36) и (6.37) более доступных формул, имеющих вид

$$I_{\text{св}} = (U_{\mu} - U_{\nu}) / (Z_{\mu\mu} + Z_{\mu\nu}) ; \quad (6.41)$$

$$Z_{\mu} = \Delta U / I, \quad (6.42)$$

где Z_{μ} - входное сопротивление по "близкой земле"; ΔU - смещение разности потенциалов труба-земля, вызванное током I , приложенным в исследуемой точке трубопроводной сети.

Сразу следует заметить, что поскольку $\Delta U = \varphi_{\text{т}} - \varphi_{\text{з}}$ и $U = \Delta U + U_{\text{ст}}$, то погрешность от замены формулы (6.37) на (6.42) минимальна, если отсчет значений U в формулах (6.41) и (6.42) вести относительно одной и той же точки земли, т.е. обеспечить условие $\varphi_{\text{з}} = \text{const}$ и $U_{\text{ст}} = \text{const}$.

Пример расчета 2

Рассмотрим ту же трубопроводную сеть, но вычислим ток перетекания не по ф.(6.36), а через потенциалы трубопроводов по “близкой земле” (U_v , U_μ). Изменения в методике расчета каснутся лишь первых трех этапов предыдущего примера расчета. Здесь, как и ранее, будем полагать везде $U_{ст} = 0$.

Пусть узлы 1...5 принадлежат к *существующей сети* (v-сети), а узлы 6...8, как и прежде, к проектируемой (μ -сети).

Этап 1. Входное сопротивление “по близкой земле” для существующей сети в точке стыка определим по результатам натурных исследований. Для этого включим временную катодную станцию в точке стыка, проведем измерения I и U , после чего вычислим искомое сопротивление по формуле (6.42).

Положение *фиксированной точки*, также как и положение анодного заземлителя временной катодной станции, - произвольное. В данном примере для временной катодной станции был использован существующий анодный заземлитель с координатами $x_a = 300$, $y_a = 50$, $z_a = 2$ (м), что в общем не лишено смысла и в действительной практике.

С целью “задания результатов натурных измерений” выполним расчет v-сети по формулам (6.27), (6.32), (6.34) и (6.42).

В табл.6.3 приведены результаты расчета Z_{uv} существующей сети при различных значениях координат фиксированной точки и единичном токе нагрузки ($I = 1$) временной катодной станции.

Таблица 6.3

Варианты	Координаты фиксированной точки, $x, y, z, \text{ м}$	φ_z , В	Z_{uv} , Ом	Z_v , Ом
1	450, 0, 0	– 0,009	0,196	0,205
2	400, 50, 0	0,014	0,219	0,205
3	400, 1, 0	– 0,048	0,157	0,205

При этом φ_3 - суммарный потенциал земли, вызванный всеми токами в земле. Поскольку $\varphi_T = U + \varphi_3$, а численные значения U и Z при $I = 1$ совпадают, то входное сопротивление по “далекой земле” будет равно $Z_v = \varphi_T / I = 0,205$ Ом во всех трех случаях.

Аналогично поступим и с проектируемой сетью (узлы 6...8), т.е. будем полагать, что один полюс источника единичной токовой нагрузки подключен к точке 8, а другой - в земле в точке расположения анодного заземлителя временной катодной станции.

Таблица 6.4

Варианты	Координаты фиксированных точек, x, y, z , м	φ_3 , В	$Z_{\text{из}}$, Ом	Z_{μ} , Ом
1	450, 0, 0	- 0,031	0,462	0,493
2	400,50,0	0,014	0,479	0,493
3	400,1,0	- 0,049	0,443	0,493

Далее “проведем измерение” разности потенциалов труба-земля (U_v) в точке врезки существующей сети, нагруженной катодной станцией по схеме рис. 6.6,а при полном отсутствии проектируемой сети (т.е. μ -сеть отделена и отнесена в бесконечность). При этом, как и прежде, будем “измерять” U_v относительно фиксированных точек земли.

Разность потенциалов труба-земля для точки врезки в проектируемой сети (U_{μ}) примем равной нулю, т.е. также пренебрежем присутствием существующей сети и учтем, что принято $U_{\text{ст}} = 0$.

Таблица 6.5

Варианты	U_v , В	Z_u , Ом	$I_{\text{св}}$, А	%%
1	-1.923	0.658	2.922	8.2
2	-2.158	0.698	3.092	13.3
3	-1.547	0.600	2.578	3.9

В табл.6.5 приведены результаты расчета токов перетекания по формуле (6.41).

Истинное значение тока перетекания, вычисленное через потенциал по “далекой земле”, равно $I_{cb} = 2,68$ А. В последней графе табл.6.5 приведены погрешности данного приближенного расчета относительно истинного значения I_{cb} .

Последняя строка табл.6.5 относится к точке на поверхности земли с отклонением от трассы трубопровода в 1 м. Очевидно, такая погрешность вполне приемлема.

Таким образом, методика вычисления тока перетекания по входному сопротивлению, найденному по “близкой земле”, имеет право на существование, особенно если *измерения U выполнять относительно одной и той же и действительно близкой к трубопроводу точки земли.*

6.3.3. Две подобласти с произвольным числом связей

Общая задача диакоптики - расщепление крупной области на ряд небольших подобластей-районов - может быть поставлена при решении таких сложных объектов как трубопроводная сеть целого города. Даже решение задачи ЭХЗ для внутриквартальной разводки, если рассматриваются разнородные трубопроводные сети одновременно (газо-, водопроводные сети), является трудной, но разрешимой задачей, если воспользоваться приемами диакоптики.

Пусть μ -сеть связана с ν -сетью в Q точках. Включим в точках стыка, как и прежде, компенсирующие нагрузки - токи перетекания $I_{cb,t}$, где $t = 1, 2, \dots, Q$, и направим их так, как показано на схеме рис.6.7, т.е. из ν -сети в μ -сеть.

Теперь значение тока перетекания в t -й точке ($I_{cb,t}$) будут зависеть не только от разности потенциалов на этом стыке, но и от величины тока в соседней цепи связи ($I_{cb,s}$), например, в точке s . Токи перетекания, таким образом, связаны системой уравнений, каждое из которых учитывает взаимовлияние сетей, нагруженных токами перетекания.

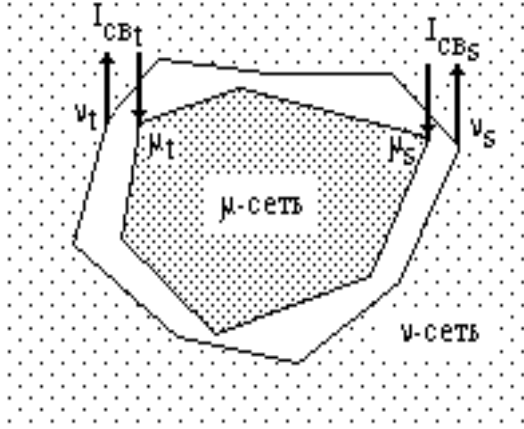


Рис.6.7. Расчетная схема для двух сетей, стыкующихся в ряде точек.

Для цепи связи в t -м стыке можно записать уравнение аналогичное (6.36)

$$I_{CB,t} R_{CB,t} = (\varphi_{T,v,t} - \Delta\varphi_{T,v,t}) - (\varphi_{T,\mu,t} + \Delta\varphi_{T,\mu,t}), \quad (6.43)$$

где $I_{CB,t}$, $R_{CB,t}$ - ток и сопротивление t -й цепи связи; $\varphi_{T,v,t}$, $\varphi_{T,\mu,t}$ - потенциал трубопровода в t -м стыке соответственно в ν -сети и μ -сети при условии, что сети разделены; $\Delta\varphi_{T,v,t}$, $\Delta\varphi_{T,\mu,t}$ - смещения потенциала трубопровода, вызванные токами перетекания, и определяемые соотношениями

$$\Delta\varphi_{T,v,t} = \sum_{s=1}^Q (Z_{v,t,v,s} - Z_{v,t,\mu,s}) I_{CB,s}; \quad (6.44)$$

$$\Delta\varphi_{T,\mu,t} = \sum_{s=1}^Q (-Z_{\mu,t,v,s} + Z_{\mu,t,\mu,s}) I_{CB,s},$$

где Q - количество стыков между подобластями; $Z_{\mu,t,v,s}$ - сопротивление влияния по “далекой земле”, т.е. некоторые, подлежащие определению коэффициенты, отражающие факт влияния ν -сети с током I_{CB} в точке s на точку t в μ -сети. В частном случае $Z_{\mu,t,\mu,t}$ - есть входное сопротивление μ -сети в точке t по “далекой” земле. С целью дальнейшего вычисления $Z_{\mu,t,v,s}$ этот коэффициент целесообразно трактовать как потенциал трубопровода φ_T в точке t , находящейся в μ -сети, вызванный ν -сетью с единичной токовой нагрузкой в точке s .

Знаки перед коэффициентами в ф.(6.44) определяются принятым направлением токов перетекания: из ν -сети в μ -сеть (см.рис.6.7). Если в результате расчета окажется, что $I_{cb.s} < 0$, то в действительности ток направлен из μ -сети в ν -сеть.

После подстановки ф.(6.44) в (6.43) получим систему уравнений относительно тока перетекания

$$\sum_{s=1}^Q (Z_{vt.vs} - Z_{vt.\mu s} - Z_{\mu t.vs} + Z_{\mu t.\mu s}) I_{cb.s} + R_{cb.t} I_{cb.t} =$$

$$= \varphi_{T.vt} - \varphi_{T.\mu t} \quad \text{при } t = 1, 2, \dots, Q, \quad (6.45)$$

которая в матричной форме имеет вид

$$\check{\mathbf{Z}} \mathbf{I}_{cb} = \mathbf{U}_{cb}, \quad (6.46)$$

где $\check{\mathbf{Z}} = \{\check{Z}_{ts}\}_Q$ - прямоугольная матрица с элементами, $\check{Z}_{ts} = Z_{vt.v s} - Z_{vt.\mu s} - Z_{\mu t.v s} + Z_{\mu t.\mu s} + \delta_t R_{cb.t}$, причем $\delta_t = 1$, если $t = s$ и $\delta_t = 0$, если иначе; $\mathbf{U}_{cb} = \{U_{cb.t}\}_Q$ - столбцовая матрица, $U_{cb.t} = \varphi_{T.vt} - \varphi_{T.\mu t}$.

Коэффициенты матриц вычисляются по приведенным выше формулам.

Как было отмечено, влиянием тока перетекания, как нагрузки, включенной в *соседней подобласти*, можно пренебречь. Это означает, что в элементах матрицы $\check{Z}_{ts}$ можно отбросить составляющие со знаком минус, т.е. $Z_{vt.\mu s}$ и $Z_{\mu t.vs}$. Также обычно нет необходимости в учете $R_{cb.t}$. Оставшиеся коэффициенты есть входные сопротивления сетей по “далекой земле”, которые, как показано, при необходимости могут быть заменены на входные сопротивления по “близкой земле” по ф.(6.42). В этом случае составляющие матрицы $U_{cb.t}$ должны быть заменены разностями потенциалов труба-”близкая земля” (U_{vt} и $U_{\mu t}$).

После решения системы (6.46) задача приводится к системе (6.39), где принимают $\varphi_{cb} = 0$, если отброшены коэффициенты $Z_{vt.\mu s}$ и $Z_{\mu t.vs}$.

6.3.4. Сеть как совокупность нескольких подобластей.

Наиболее сложная ситуация - расчет сетей с сотнями или даже тысячами узлов, когда возникает необходимость в рассечении сети не на две, а множество подобластей. Например, ставится задача реконструкции и, следовательно, перерасчета катодной защиты трубопроводных сетей целого города.

В общем задача мало отличается от поставленной выше и сводится к отысканию токов перетекания между всеми подобластями одновременно, т.е. к решению системы (6.46), где Q - общее число связей между всеми подобластями.

Последовательность расчета сетевой задачи следующая.

Этап 1. *Разбиение сети на подобласти.*

Оптимальная схема разбиения будет определяться общим числом узлов дискретизации решаемой сети и допускаемым - в соответствии с ресурсами компьютера и прикладной программы - числом узлов дискретизации подобласти (N). При этом N есть порядок системы уравнений (6.27), которую в состоянии решить данная компьютерная программа.

Этап 2. *Определение потенциала трубопроводов на стыках.*

На каждую подобласть наносят координатную сетку, вводят собственную нумерация узлов и катодных станций, координаты анодных заземлителей, их токи и пр. в соответствии с требованием программы. Решение ведут по ф.(6.28), но фиксируют значения потенциала трубопровода φ_T лишь в точках стыка.

Этап 3. *Определение коэффициентов взаимного влияния для точек стыка.*

В s -й точке стыка μ -й подобласти ($s = 1, 2, \dots, Q_\mu$, где Q_μ - число стыков данной подобласти) включают катодную станцию с единичной токовой нагрузкой и с заземлителем, отнесенным в бесконечность. Все остальные нагрузки подобласти зануляют. Решение ведут по ф.(6.28), фиксируя значения φ_T для точек стыка (t). Численное значение коэффициента взаимного влияния $Z_{\mu t, \mu s}$ в точке t этой подобласти равно абсолютному значению потенциала φ_T в этой точке. Расчет повторяют Q_μ раз, меняя положение нагруженного узла s .

Аналогично готовят таблицу значений $Z_{vt,vs}$ для других подобластей ($v = 1, 2, \dots, M$, где M - число подобластей рассматриваемой сети).

Этап 4. Определение токов перетекания.

Подбирают пары $Z_{vt,vs}$ и $Z_{\mu t,\mu s}$, соответствующие одной цепи связи, складывают их и присваивают им парный индекс в соответствии с раскладом элементов матрицы (6.46). Так, если p, q - индексы матрицы $\tilde{\mathbf{Z}} = \{\tilde{Z}_{pq}\}$, $p, q = 1, 2, \dots, Q$, где Q - общее число связей между подобластями всей рассматриваемой сети, то следует установить соответствие между индексами $v_t \rightarrow p$ и $\mu_s \rightarrow q$. После переиндексации, решая систему (6.46), находят значения токов перетекания $\mathbf{I}_{cb}$.

Этап 5. Решение основного уравнения.

Включая компенсирующие нагрузки $\mathbf{I}_{cb}$, а также нагрузки электрохимической защиты, решают систему (6.39) для любой v -сети, как обособленной подобласти, что дает значения плотности тока утечки трубопровода $\mathbf{j}$. Затем по ф.(6.32) находят искомую разность потенциалов трубопровода $\mathbf{U}$.

Если решено учесть поле в земле от токов перетекания Φ_{cb} , то на этапе 3 дополнительно определяют отброшенные коэффициенты $Z_{vt,\mu s}$ и $Z_{\mu t,vs}$, которые на этапе 4 вычитают из значений соответствующих коэффициентов $\tilde{Z}_{pq}$.

При постановке конкретной задачи и, прежде всего, определения границ подобластей, следует иметь ввиду, что удаленными подобластями относительно рассматриваемой можно вообще пренебречь. Здесь можно руководствоваться собственным опытом катодной защиты. Так, в сложной городской сети радиус действия катодной станции обычно не превышает 1 км и часто равен 150...300 м. Поэтому влиянием даже не очень удаленных подобластей можно пренебречь.

6.4. Оптимизационные задачи электрохимической защиты

При решении сетевой задачи часто возникает необходимость определения *оптимальных* параметров системы ЭХЗ, а именно, достаточного

(минимального) количества катодных станций для рассматриваемой сети, минимально достаточного тока каждой из них при некоторых ограничивающих условиях, например, заданном интервале значений защитного потенциала на заданной территории, минимуме суммарного тока защиты всей сети и пр. Такие задачи решаются методами оптимизации и относятся к *задачам линейного программирования с ограничениями*.

Одним из методов, позволяющих эффективно решать подобные задачи, является *симплекс-метод*.

Пусть требуется определить параметры *оптимальной системы ЭХЗ* заданной трубопроводной сети, руководствуясь следующими ограничениями.

1. Суммарный ток всех установок ЭХЗ минимален.

В соответствии с симплекс-методом это означает, что требуется минимизировать следующую целевую функцию

$$F = I_1 + I_2 + \dots + I_M, \quad (6.47)$$

где I_i - абсолютное значение тока i -й катодной станции и их количество ($i = 1, 2, \dots, M$).

2. Наведенный защитный потенциал во всех узлах сети не должен быть меньше (по модулю) минимального защитного потенциала $U_{\text{защ. min}}$.

Для выполнения этого ограничения следует учесть систему линейных уравнений

$$Z_{i1} I_1 + \dots + Z_{ik} I_k + \dots + Z_{iM} I_M \geq U_i - U_{\text{защ. min}}, \quad (6.48)$$

при $i = 1, 2, \dots, N, \quad k = 1, 2, \dots, M,$

где U_i - разность потенциалов труба-земля без электрохимической защиты; Z_{ik} - входное сопротивление по “близкой земле” для i -го узла при условии, что единственная токовая нагрузка расположена в k -м узле. Аналогичный параметр определен в ф.(6.44), но по “далекой земле”. Фактически произведение $\Delta U_i = Z_{ik} I_k$ есть защитное смещение разности потенциалов труба-земля в i -м узле, вызванное k -й катодной станцией при $I_k > 0$.

3. Наведенный защитный потенциал во всех узлах сети должен быть не больше (по модулю) заданного максимального защитного потенциала.

Ограничения аналогичны и имеют вид

$$\begin{aligned} Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2 + \dots + Z_{1M} I_M &\leq U_1 - U_{\text{защ.max}}, \\ Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2 + \dots + Z_{2M} I_M &\leq U_2 - U_{\text{защ.max}}, \\ &\vdots \\ Z_{N1} I_1 + Z_{N2} I_2 + \dots + Z_{NM} I_M &\leq U_N - U_{\text{защ.max}}. \end{aligned} \quad (6.49)$$

4. Проектная величина тока катодной станции не должна превышать некоторого *предельного значения* $I_{\max}$, например, номинального тока самой мощной катодной станции, доступной проектировщику. Это приводит к системе из M ограничений вида

$$I_k \leq I_{\max}, \text{ где } k = 1, 2, \dots, M. \quad (6.50)$$

Возможны также другие комбинации ограничений. Но важно, чтобы все уравнения системы были линейно независимы, т.е. ни одно из них не должно получаться как линейная комбинация других. Кроме того система должна быть совместной, т.е. среди уравнений не должно быть противоречивых.

Системы уравнений (6.48) - (6.50) совместно с уравнением (6.47) образуют набор исходных данных, достаточный для стандартной компьютерной программы по симплекс-методу. Но надо иметь ввиду, что предварительно все неравенства заменяют равенствами, вводя дополнительные переменные. В данном случае общее число переменных равно $2M + 2N$. Процесса решения мы касаться не будем.

6.5. Нелинейная сетевая задача

6.5.1. Методика расчета поляризационной составляющей

Обсуждение роли поляризационной составляющей было проведено в *главе 5*. Здесь приводятся теоретическое и экспериментальное обоснование соответствующего метода расчета.

Удельное сопротивление изоляции $R_{из}$ состоит из поляризационной $R_{пол}$ и омической $R_{ом}$ составляющих

$$R_{\text{из}} = R_{\text{пол}} + R_{\text{ом}}. \quad (6.51)$$

Поляризационная составляющая.

Будем различать $R_{\text{пол}}$ - удельное линейное поляризационное сопротивление (Ом·м) и P - удельное поверхностное поляризационное сопротивление (Ом·м²). Эти параметры связаны следующим соотношением

$$P = \pi d R_{\text{пол}} s_{\text{пор}}, \quad (6.52)$$

где d - диаметр трубопровода, м; $s_{\text{пор}}$ - коэффициент пористости изолирующего покрытия как доля оголенной части поверхности трубы на единице ее площади.

Удельное поляризационное сопротивление (P) является *функцией*, во-первых, *плотности тока* в порах изоляции ($j_{\text{пор}}$), так как P зависит от активности катодного процесса в двойном электрическом слое металл-электролит и, во-вторых, определяется *продолжительностью поляризации* (t), поскольку P увеличивается по мере накопления катодных солевых отложений, возникающих на защищаемой поверхности. Таким образом, P является сложной функцией тока и времени $P=P(j, t)$.

Соотношение между поверхностной $j_{\text{пор}}$ и линейной j плотностями тока имеет вид

$$j_{\text{пор}} = j / (\pi d s_{\text{пор}}), \quad (6.53)$$

где $j_{\text{пор}}$ - истинная плотность тока в порах изоляции (на свободной от изоляции поверхности металла), А/м²; j - линейная плотность тока на единицу длины изолированного трубопровода, А/м.

На рис.6.8 в качестве примера представлено семейство кривых $P = P(j_{\text{пор}}, t)$ удельного поляризационного сопротивления стали в речной воде.

Кривые построены на основании *кривых заряжения* или временных поляризационных характеристик. Для построения кривых заряжения исследуемые образцы металла выдерживают в гальваностатическом режиме ($j = \text{const}$) каждый при своем токе в течение нескольких месяцев, систематически измеряя их поляризационный потенциал. На рис.6.9 приведе-

ны такие кривые для стальных образцов в нормальных условиях в нейтральном электролите.

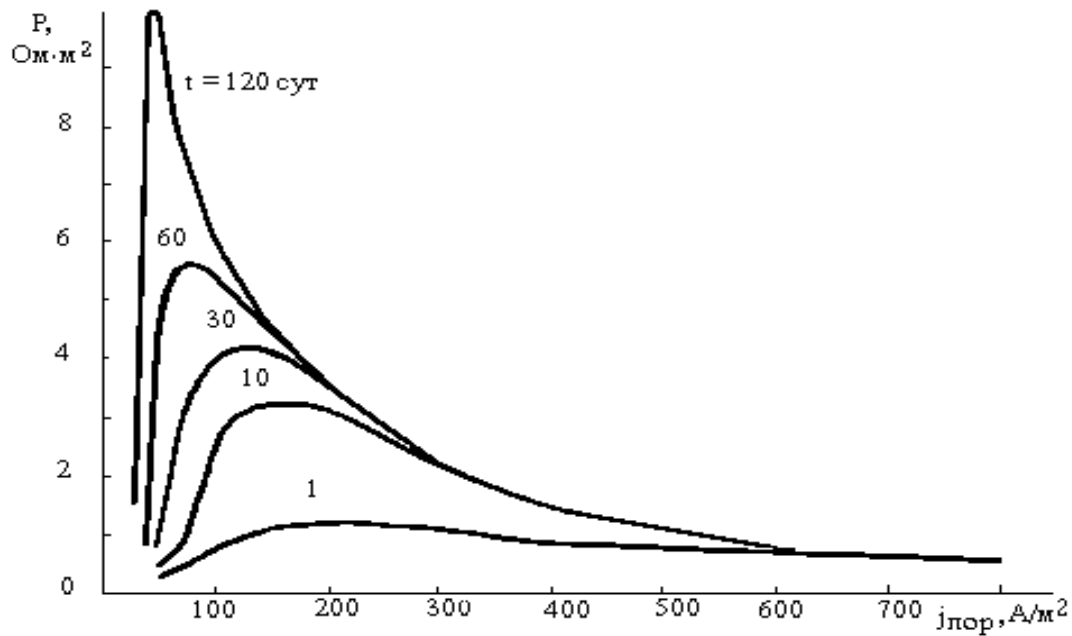


Рис.6.8. Удельное поляризационное сопротивление стали в нейтральной среде как функция плотности тока в порах изоляции ($j_{\text{пор}}$) и продолжительности поляризации (t).

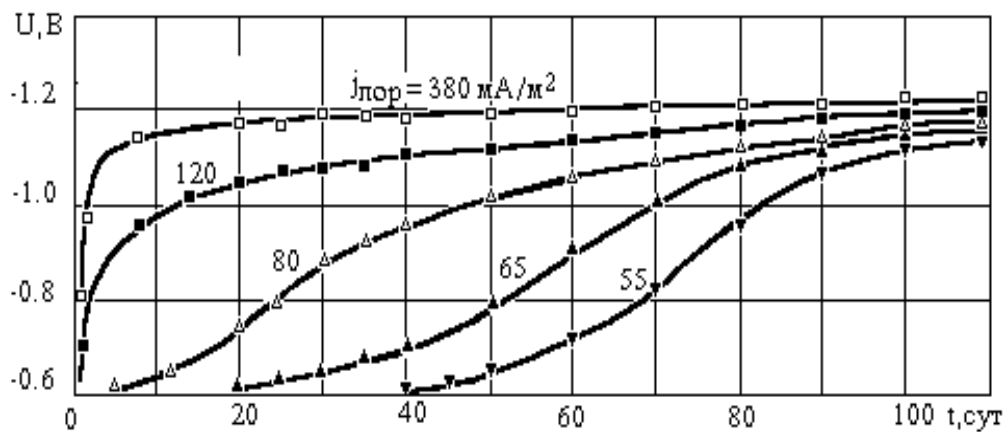


Рис.6.9. Временные характеристики катодной поляризации низкоуглеродистой стали в речной воде при различных плотностях тока, постоянных во времени.

Омическая составляющая.

Представляет собой сопротивление электролита в порах изоляции и вычисляется по формуле

$$R_{\text{ом}} = \rho h_{\text{пор}} / (\pi d s_{\text{пор}}), \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (6.54)$$

где $h_{\text{пор}}$ - средняя длина поры изоляции, м; ρ - удельное сопротивление электролита в порах, Ом·м.

Так, если принять $h_{\text{пор}} = 0,01$ м, то общая формула для удельного сопротивления изоляции (6.51) получит вид

$$R_{\text{из}} = (P + 0,01\rho) / (\pi d s_{\text{пор}}), \text{ Ом}\cdot\text{м}. \quad (6.55)$$

При использовании этой формулы система алгебраических уравнений (6.24), описывающая задачу ЭХЗ, становится нелинейной вследствие того, что коэффициенты уравнений, в которые входит $R_{\text{из}}$, *зависят от искомой плотности тока*. Действительно, в соответствии с формулой (6.25) $R_{\text{из}}$ входит в диагональный элемент матрицы **A**. Поэтому решение такой системы уравнений не может быть выполнено прямыми методами.

6.5.2. Алгоритм решения задачи

Подготовку исходных данных и расчет выполняют в диалоге с компьютерными программами комплекса АРМ-ЭХЗ-6П или АРМ-ЭХЗ-7П, подробное описание которых приведено в *главе 7*.

Решение для $U_{\text{защ}}$ и ее составляющих ищется методом последовательного приближения.

1. Задают нулевое приближение $R_{\text{из}} = \text{const}$ исходя из качества изоляции трубопровода. Так, для городских газопроводов $R_{\text{из}}$ обычно лежит в пределах $R_{\text{из}} = 25 \dots 150$ Ом·м.

2. Определяют коэффициент пористости по приближенной формуле

$$s_{\text{пор}} = P_{\text{ср}} / (\pi d R_{\text{из}}), \quad (6.56)$$

где $P_{\text{ср}}$ - среднее ожидаемое значение удельного поляризационного сопротивления трубопровода, Ом·м². Значение $P_{\text{ср}}$ можно принять из интервала $P_{\text{ср}} = 0,6 \dots 1,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$.

3. Решают основное уравнение (6.27) и вычисляют плотность тока j при заданном значении $R_{\text{из}}$.

4. По формуле (6.53) определяют фактическую плотность тока в порах изоляции $j_{\text{пор}}$ и по заранее подготовленным таблицам или графикам находят значения $P = P(j_{\text{пор}}, t)$

5. По формуле (6.55) вычисляют новое значение удельного сопротивления изоляции $R_{\text{из}}$.

6. Возвращаются к п.2, тем самым включая итерационный процесс, и ведут его до достижения приемлемой точности, сравнивая последующее и предыдущее значения j .

Примеры расчета поляризационной составляющей приведены в главе 5.

Глава 7. Методическое обеспечение задач ЭХЗ

7.1. Комплекс компьютерных программ

Для численного решения задач ЭХЗ трубопроводной сети в соответствии с теорией, представленной в предыдущей главе, в *Волгоградской государственной архитектурно-строительной академии* под руководством автора ведутся постоянные работы по созданию и совершенствованию комплекса компьютерных программ серии АРМ-ЭХЗ. За период с 1981 г. было создано множество модулей и отдельных программ, позволивших отыскать удобные алгоритмы расчета и убедиться в достоверности метода. Позже были созданы первые версии профессиональных программ, которые были переданы в проектные организации различных городов России для апробации предлагаемого метода расчета и учета потребностей проектировщика.

Автор благодарит работников проектных институтов г.Ижевска – «Удмуртгражданпроект» и «Промпроект», первыми взявшими на себя труд по выявлению сервисных недочетов программирования. Автор чрезвычайно обязан Г.М.Глузбергу из «УкрНИИПграждансельстрой», который еще в 1986 г. первым сопоставил результаты расчета ЭХЗ с результатами полевых измерений на сетях одного из микрорайонов г.Киева и остался весьма доволен. Тем более был доволен автор, поскольку решалась задача ЭХЗ для чрезвычайно запутанной схемы, состоящей из газо-, водо-, теплопровода и кабельной линии, соединенных перемычками [42].

В настоящее время в различных организациях РФ находятся в эксплуатации программные комплексы АРМ-ЭХЗ-6(1998) и АРМ-ЭХЗ-7(2002), различающиеся в основном своими сервисными возможностями. Работоспособной является также старая версия этой серии – АРМ-ЭХЗ-5(1994). Ниже дано описание программ комплекса АРМ-ЭХЗ-7 – последней версии этой серии.

Комплекс АРМ-ЭХЗ-7 состоит из трех пакетов:

- 1) АРМ-ЭХЗ-7П – расчет и проектирование ЭХЗ;
- 2) АРМ-ЭХЗ-7С – формирование сметы и спецификации;
- 3) АРМ-ЭХЗ-7Э - ведение архива эксплуатации ЭХЗ.

7.1.1. Пакет программ АРМ ЭХЗ-7П

В зависимости от постановки сетевой задачи программы данного пакета позволяют выполнять расчет в следующих режимах (код задачи M):

$M=1$. Оптимизационная задача ЭХЗ.

$M=2$. Расчет ЭХЗ при заданных токах.

$M=3$. Расчет удельного электрического сопротивления изоляции.

Режим $M=1$

Постановка *оптимизационной* задачи представлена в главе 6. Исходными данными при этом являются:

- предполагаемые места размещения установок ЭХЗ;
- вилка допустимых защитных потенциалов $U_{\text{защ.min}}$ и $U_{\text{защ.max}}$;
- предельный (номинальный) ток каждой из установок ЭХЗ.

В результате решения оптимизационной задачи (она решается в автоматизированном режиме) определяются:

- оптимальное размещение установок ЭХЗ и их минимально приемлемое количество;
- минимальные токи установок ЭХЗ, обеспечивающие заданный режим защиты во всей сети;
- распределение защитного потенциала вдоль участков сети.

После решения оптимизационной задачи находят оптимальные параметры анодных заземлителей и дренажных линий.

Режим $M=2$

В этом режиме решается множество произвольно поставленных задач, главные из которых следующие:

- распределение защитного потенциала при произвольных значениях тока установок ЭХЗ и их размещения;
- расчет токов перетекания между соседними подземными сооружениями при их электрическом или гальваническом различии;
- распределение плотности тока защиты вдоль трубопровода;

- распределение плотности тока коррозии при продольной гальванической неоднородности трубопровода;
- распределение блуждающих токов в земле и на трубопроводах в поле рельсовой сети электротранспорта;
- поиск оптимального варианта совместной защиты ряда подземных сооружений общими защитными средствами;
- расчет распределения потенциала в неоднородной сети, например, с учетом наличия участков с иным качеством изоляции, при заземлении трубопроводной сети с помощью искусственных и естественных заземлителей, при наличии трубопроводных вставок иного диаметра, изолирующих фланцев, футляров и пр.
- распределение тока и потенциала на “эквивалентных трубопроводах” при их электрохимической защите, например, вдоль обсадных колонн скважин, по стержням контура заземления, по металлическим опорам, вдоль арматуры железобетонных конструкций и т.д.
- расчет распределения потенциала земли в поле токов трубопровода или рельсовой линии и т.д.

Режим $M=3$

В данном режиме решается задача определения удельного электрического сопротивления изоляции по участкам существующего трубопровода. Для этого должно быть задано:

- распределение защитного потенциала вдоль исследуемого участка трубопровода при ЭХЗ;
- размещение установок ЭХЗ, вызвавших этот защитный потенциал на исследуемом участке;
- ток установок ЭХЗ;
- удельное электрическое сопротивление грунта.

В результате решения задачи определяются значения $R_{из}$ в намеченных точках вдоль трубопровода.

Теоретическое обеспечение

Метод решения сетевой задачи построен на теоретических положениях *главы 6* и обеспечивает выполнение условий:

- трубопроводная и рельсовая сети произвольны по параметрам и конфигурации;
- рассчитываемая трубопроводная сеть связана непосредственно или за счет взаимных влияний с соседними трубопроводами или подземными

сооружениями, например, обсадными трубами скважин, заземлителями, резервуарами и т.д.;

- анодный заземлитель находится в многослойном грунте.

В целом сетевая задача решается как краевая с граничными условиями третьего рода для цилиндрического проводника с утечкой с разветвлением и закольцованностью. При решении оптимизационной задачи использовался симплекс-метод. Для больших сетей предусмотрено использование методов диакоптики.

Эффективность пакета программ

Технико-экономическая эффективность применения пакета заключается в следующем:

- повышается производительность труда: текстовая и графическая документация подготавливается с помощью компьютера;
- повышается достоверность результатов расчета ЭХЗ: используется научно обоснованный и многократно проверенный в практике метод расчета.
- повышается качество проекта: в автоматизированном режиме определяется оптимальный вариант размещения средств ЭХЗ;
- возможна многовариантность проекта: с учетом старения изоляции, стоимости оборудования и материалов, размещения перемычек, наличия соседних коммуникаций и т.д.;
- наполнение диалоговой части программ рассчитано на слабо подготовленного пользователя;
- возможен расчет распределение токов коррозии в поле действия коррозионных макропар;
- возможен расчет токов перетекания между соседними сооружениями при их гальванической разнородности;

7.1.2. Пакет программ АРМ ЭХЗ-7С

Пакет предназначен для формирования сметы и спецификации на строительно-монтажные работы по ЭХЗ.

Сметные расчеты ведутся в соответствии с действующими нормами и прейскурантами с учетом коэффициента удорожания, ежегодно уточняемого Госстроем РФ. Учтено большинство часто встречающихся сметных коэффициентов, используемых при формировании сметы на производство

работ по ЭХЗ. Коэффициенты можно легко изменять или убирать из распечатки.

База данных спецификации открыта для пополнения и изменения.

7.1.3. Пакет программ АРМ ЭХЗ-7Э

Пакет предназначен для архивирования сведений по действующей системе ЭХЗ:

- адреса и технические данные по установкам ЭХЗ;
- таблицы защитных потенциалов и токов;
- выкопировки из плана трубопроводной сети;
- текущие сведения об остаточном ресурсе анодных заземлителей;
- текущие затраты электроэнергии и пр.

Объем сервисных возможностей пакета может быть расширен и уточнен при заключении договора на поставку.

7.1.4. Структура пакетов АРМ-ЭХЗ

Основные программы перечисленных пакетов работают под управлением MsAccess 2000 - сервисной программы управления базами данных, входящей в состав офисных программ MsOffice 2000.

Основная программа пакета расчета ЭХЗ - *EZрасчет.mde*.

Вспомогательные программы:

- *EZRW.exe* – расчет ЭХЗ;
- *EGD.exe* – графический редактор;
- *EGP.exe* – графика сети;
- *EGS.exe* – графика сети.

Программа *EGD.exe* может работать независимо. С ее помощью можно выполнять множество операций при построении планов размещения установок ЭХЗ и узлов системы ЭХЗ, в том числе корректировать расчетную схему трубопроводной сети с добавлением новых узлов и участков, масштабировать, смещать изображение на экране при подготовке рисунка к печати и т.д.

Вспомогательные файлы, формируемые программой *EZрасчет*:

- *ИМЯ* – исходные данные (имя *ИМЯ* выбирается пользователем произвольно);
- *ИМЯАнод* – результаты расчета анодного заземлителя для задачи *ИМЯ*;
- *ИМЯСмета1*, *ИМЯСмета2*, *ИМЯСпециф* – результаты расчета сметы и спецификации;
- *Потенциалы.txt* – результаты расчета распределения потенциала;
- *ТокиДр.txt* – результаты расчета токов электродренажей;
- *ТокиКат.txt* – результаты расчета токов катодных станций и протекторных установок;
- *УдСопротивление.txt* – результаты расчета удельного электрического сопротивления изоляции;
- *RR30*, *RR33*, *RR43*, *RR47* – примеры графических построений;
- *OUT* – файл-переносчик имени решаемой задачи.

Комплекс АРМ-ЭХЗ снабжен подробными комментариями и подсказками для пользователя. Подведите курсор к нужному полю или кнопке и дождитесь появления всплывающей подсказки. Или введите курсор в это поле и нажмите кнопку «Справка».

Пакет АРМ-ЭХЗ-7П (6П) рекомендован головной организацией РФ по защите городских подземных сооружений от коррозии для широкого использования. Описание пакета и примеры использования приведены в Руководящем документе РД-153-39.4-091-01 «Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии», подготовленном Академией коммунального хозяйства им.К.Д.Памфилова.

7.2. Расчетные параметры трубопровода

7.2.1. Удельное продольное сопротивление

В табл.7.1 приводятся значения удельного продольного сопротивления $R_{пр}$ для широко используемых сортов труб. При отсутствии в таблице требуемых данных их можно вычислить по формуле

$$R_{пр} = \rho_T / (\pi t(d - t)) , \quad (7.1)$$

где $\rho_T = 0,18$ - среднее значение удельного электрического сопротивления трубной стали, Ом·мм²/м; d - внешний диаметр трубы, мм; t - толщина ее стенки, мм.

7.2.2. Удельное электрическое сопротивление изоляции

При отсутствии результатов полевых измерений $R_{из}$ и результатов расчета в режиме $M=3$ (см. пп.7.1.1), рекомендуется значения $R_{из}$ принимать из табл.7.2.

При необходимости для перехода к удельному *линейному* удельному сопротивлению ($R'_{из}$) следует воспользоваться соотношением:

$$R'_{из} = R_{из} / (\pi d), \text{ Ом}\cdot\text{м}, \quad (7.2)$$

Таблица 7.1

Диаметр × толщина стенки трубопровода, $d \times t$, мм	Удельное продольное сопротивление, $R_{пр}$, Ом/м
57×3,5	$3,06 \cdot 10^{-4}$
89×3,5	$1,92 \cdot 10^{-4}$
108×4	$1,38 \cdot 10^{-4}$
133×4,5	$9,91 \cdot 10^{-5}$
159×5	$7,44 \cdot 10^{-5}$
219×6	$4,48 \cdot 10^{-5}$
273×6	$3,57 \cdot 10^{-5}$
325×7	$2,57 \cdot 10^{-5}$
377×8	$1,94 \cdot 10^{-5}$
426×8	$1,71 \cdot 10^{-5}$
529×9	$1,22 \cdot 10^{-5}$
620×9	$1,04 \cdot 10^{-5}$
720×10	$8,07 \cdot 10^{-6}$
820×10	$7,08 \cdot 10^{-6}$
920×11	$5,73 \cdot 10^{-6}$
1020×12	$4,74 \cdot 10^{-6}$
1220×12	$3,95 \cdot 10^{-6}$
1420×12	$3,39 \cdot 10^{-6}$

Таблица 7.2

Качество изоляции	Удельное электрическое сопротивление изоляции, $R_{из}$, Ом·м ²	
	газопроводные сети	магистралы
Отличное	более 500	более 5000
Хорошее	500...100	5000...1000
Удовлетворительное	100...50	1000...200
Плохое	50...20	200...50
Очень плохое	менее 20	менее 50

Существенное различие значений $R_{из}$ для газопроводов сетевых и магистральных объясняется наличием неучтенных связей сетевого газопровода со всевозможными *заземленными* сооружениями - оболочками силовых кабелей, водопроводными и тепловыми сетями, арматурой железобетонных сооружений и т.д. Для сети $R_{из}$ - это параметр некоего *эквивалентного трубопровода*.

Практические рекомендации по выбору значений $R_{из}$.

1. При отсутствии изолирующих фланцевых соединений (ИФС) достаточно приемлемое совпадение результатов расчета с результатами натурных измерений для газопроводных сетей имеет место при использовании строки "удовлетворительное".

2. При наличии ИФС в разветвленных газопроводных сетях значение $R_{из}$ следует брать из верхней части табл.7.2.

3. При полной уверенности, что фланцы *отсекают все заземления*, можно значения $R_{из}$ взять из середины второй колонки - для магистральных трубопроводов.

4. Для водопроводных и теплопроводных сетей значения $R_{из}$ соответствуют последней строке табл.7.2, т.е. не превышают 20 Ом·м².

5. Магистральные нефте-продуктопроводы эквивалентны по электрическим характеристикам магистральным газопроводам. Магистральные водопроводы по качеству изоляции, как правило, хуже.

6. Групповые (коллекторные) промысловые нефтегазопроводы занимают промежуточное положение между магистральными и сетевыми трубопроводами. Значения $R_{из}$ для них лежит в нижней части второй колонки табл.7.2.

7. Сборные (шлейфовые) трубопроводы от промысловых скважин к коллекторам можно отнести к *плохим* сетевым газопроводам.

8. Трубопроводные сети промышленных предприятий имеют *весьма плохую* изоляцию и там катодная защиты без применения ИФС не эффективна.

Обычно качество изоляции и ее количественную характеристику $R_{из}$ определяют опытным путем, если трубопровод *существующий* и на нем можно провести электроизмерительные работы.

7.2.3. Удельное электрическое сопротивление грунта

Удельное электрическое сопротивление грунта (ρ) определяет численное значение потенциала земли ϕ_z , который зависит от ρ *линейно* (см., например, формулу (6.7)). От ϕ_z в свою очередь зависит искомая разность потенциалов труба-земля $U = \phi_T - \phi_z$.

Однако зависимость U от ρ далеко не так однозначна, как это видится из приведенного соотношения. Это, например, продемонстрировано в табл.7.3, где дано распределение U при катодной защите трубопровода диаметром $d = 200 \times 6$ мм *при различных значениях ρ* .

Из расчетных данных следует, что степень затухания потенциала тем больше, чем больше ρ . Однако это отмечается лишь вблизи точки дренажа или, точнее, вблизи анодного заземлителя (в начале трубопровода). Но *суммарный защитный ток*, как следует из той же табл.7.3, практически *не зависит* от величины ρ . Действительно, так как во всех вариантах расчета в примере заложены единые условия режима оптимальной защиты, а именно, ограничение $U \leq U_{защ.min} = -0,85$ В, то результаты можно сопоставлять. И тогда оказывается, что суммарный защитный ток катодной станции *практически не изменится*, если ρ по каким то причинам, вдруг, возрастет в 10 раз.

Таблица 7.3

х, м	Значения U при $R_{из} = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$		Значения U при $R_{из} = 200 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$	
	$\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\rho = 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$	$\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$
0	-2,0371	-4,5483	-0,9526	-1,4199
50	-1,4663	-1,5798	-0,9127	-1,0439
100	-1,3458	-1,3024	-0,9025	-0,9742
200	-1,2348	-1,1100	-0,8924	-0,9243
300	-1,1676	-1,0301	-0,8860	-0,9027
500	-1,0749	-0,9553	-0,8766	-0,8810
800	-0,9801	-0,9012	-0,8661	-0,8645
1200	-0,8998	-0,8649	-0,8564	-0,8531
1800	-0,8500	-0,8500	-0,8500	-0,8500
2000	-0,8893	-1,0573	-0,8544	-0,8929
Ток, А	14,3622	13,9534	0,9978	1,0481

Отсюда можно сделать весьма важный практический вывод: *неопределенность* исходных данных, подготавливаемых для расчета тока катодной станции и имеющих заметный разброс величины ρ на исследуемой территории, является только *кажущейся*. Для вычисления суммарного защитного тока трубопроводной сети достаточно взять *среднее значение* ρ для данной территории.

Таким образом, тщательность измерения удельного электрического сопротивления грунта по трассам проектируемых трубопроводов не имеет смысла, если ставится задача определения *интегральных токов* катодной защиты. Но это не означает, что величина ρ и характер поведения этого параметра в зоне действия катодной станции не имеют никакого значения.

Влияние ρ сказывается при следующих обстоятельствах.

1. Прежде всего, как это видно из данных табл.7.3, степень затухания потенциала зависит от ρ , особенно вблизи анодных заземлителей: здесь *градиент потенциала тем выше, чем больше ρ* .

2. Удельное электрическое сопротивление изоляции $R_{из}$ зависит от величины ρ прилегающего слоя земли: чем меньше ρ , тем меньше как омическая так и поляризационная составляющие сопротивления изоляции.

3. В формулы для вычисления сопротивления растеканию анодных заземлителей ρ входит независимым коэффициентом, так что количество стержней заземлителя почти пропорционально величине ρ . Поэтому следует иметь в виду, что чем *меньше* ρ в районе анодного заземлителя, тем *меньше* его *сопротивление* растеканию и, очевидно, тем *меньше* расход электроэнергии катодной станции.

4. Это же относится и к глубинному заземлителю, пронизывающему слои с различной электропроводимостью: участок заземлителя, проходящий через слой более низкого сопротивления, будет *растворяться быстрее* соседнего участка, поскольку его сопротивление меньше.

5. К последней ситуации примыкает задача о влиянии существенной геологической неоднородности земли на распределение потенциала при ЭХЗ. Так, возникает неопределенность при оценке ρ в скальных или резко неоднородных грунтах. Вероятно, целесообразно провести геофизическое зондирование в районе анодного заземлителя, приняв расстояние между токовыми электродами (AB) четырехэлектродной установки соизмеримым с расстоянием между анодным заземлителем и трубопроводом.

7.2.4. Стационарный потенциал

В теоретической электрохимии терминов, родственных стационарному потенциалу, который мы ранее обозначили через $U_{\text{ст}}$, несколько и их полезно различать.

Электродный потенциал - обобщенный термин разности потенциалов между исследуемым электродом и выбранным электродом сравнения, установленным в непосредственной близости от исследуемого электрода. Стационарный потенциал трубопровода $U_{\text{ст}}$ не следует называть электродным в связи с возможной гальванической неэквипотенциальностью трубопровода.

Потенциал коррозии - электродный потенциал, определяющий электрод в состоянии электрохимической коррозии. Его часто называют бестоковым, компромисным или потенциалом саморастворения, а также стационарным. Однако оставим термин "стационарный потенциал" для трубопровода, а *потенциал коррозии* - для обособленного электрода или,

при необходимости, для независимого от трубопроводной сети *отрезка трубы*. В главе 6 для потенциала коррозии принято обозначение $\varphi_{\text{ст}}$.

Обратимый и необратимый потенциалы - признаки электродного потенциала, характеризующие свойства химических реакций. Если анодная и катодная реакции прямо противоположны, то на электроде установится равновесный или обратимый потенциал. Пример же необратимого (неравновесного) потенциала - потенциал коррозии.

Стандартный (нормальный) потенциал - одно из значений обратимого (равновесного) потенциала, принятое за начало отсчета электрохимических потенциалов. Стандартные потенциалы вычисляются и приводятся в таблицах практически для всех металлов и равновесных систем.

За условный нуль при измерении и расчете электродных потенциалов принят потенциал *нормального водородного электрода* - НВЭ.

Наиболее употребительные электроды сравнения и их собственные потенциалы относительно НВЭ приведены в табл.7.4.

Для пересчета результатов полевых измерения, выполненных с помощью медносульфатного электрода сравнения (МЭС), на другой электрод необходимо к результатам измерения добавить разность значений собственных потенциалов с учетом знака. Так, если потенциал измерен с помощью МЭС и равен $U_{\text{ст}} = -0,55$ В, то при пересчете на другие электроды получим:

- по НВЭ $U_{\text{ст}} = -0,55 + (0,30 - 0) = -0,25$ В;
- по ХСЭ $U_{\text{ст}} = -0,55 + (0,30 - 0,20) = -0,45$ В;
- по НКЭ $U_{\text{ст}} = -0,55 + (0,30 - 0,25) = -0,50$ В.

Таблица 7.4

Наименование электрода сравнения	Обозначение	Собственный потенциал, В
Нормальный водородный	НВЭ	0
Хлорсеребряный насыщенный	ХСЭ	+0,20
Каломельный насыщенный	НКЭ	+0,25
Медносульфатный	МЭС	+0,30

И, наконец, нами широко используется *потенциал трубопровода в поле внешнего тока*, который мы назвали φ_T . Потенциал φ_T в необходимых случаях можно называть *наведенным потенциалом*. Он представляет собой разность потенциалов между трубопроводом и бесконечно удаленной точкой земли или такой точкой, в которой полем токов можно пренебречь. Этот потенциал не пытаются измерять ввиду практической сложности и отсутствием необходимости, но он входит неотъемлемой частью в теорию ЭХЗ, поскольку через него вычисляется искомая разность потенциалов труба-земля (U).

Требования к *стационарному потенциалу* как расчетному параметру определяются постановкой задачи.

1. При расчете электрохимически однородной сети в поле токов ЭХЗ для проектируемого к укладке трубопровода достаточно принять $U_{ст} = const$. Это состояние соответствует ситуации, когда коррозионных макропар нет или ими пренебрегли. При этом для расчета U безразлично, какое значение $U_{ст}$ было выбрано, поскольку при расчете фиксируется лишь *смещение потенциала* ΔU . Поэтому при решении подобных задач, а их большинство в практике проектирования, достаточно выбрать некоторое среднее значение $U_{ст}$, с тем, чтобы результаты расчета в абсолютном исчислении не сильно отличались от данных полевых измерений. Обычно для проектируемых трубопроводов принимают $U_{ст} = -0,55$ В, а для существующих - фактически измеренные значения.

В табл.7.5 проиллюстрировано изменение $U_{ст}$ (по МЭС) стального образца, погруженного во влажный песок, смоченный водопроводной водой. Приведены предельные изменения $U_{ст.min} < U_{ст} < U_{ст.max}$ из серий аналогичных опытов.

Таблица 7.5

Влажность грунта, %	1	5	10	15	20	25
$U_{ст.max}$, В	-0,35	-0,45	-0,53	-0,60	-0,64	-0,65
$U_{ст.min}$, В	-0,55	-0,67	-0,74	-0,76	-0,77	-0,78

2. При расчете коррозионных макропар, действующих вдоль трубопроводов, или расчете ЭХЗ при наличии макропар, условие $U_{\text{ст}} = \text{const}$ неприемлемо. Следует располагать данными о электродном потенциале $\varphi_{\text{ст}}$ стали для условий трассы трубопровода.

7.3. Расчетная схема трубопроводной сети

Реальную трубопроводную сеть со множеством ее деталей и особенностей, кажущихся важными и не являющимися таковыми, или действительно важными, но порой пренебрегаемыми, представляют *расчетной схемой*, безусловно приближенной, упрощенной, воспроизводящей законы распределения потенциала и тока в реальной трубопроводной сети с погрешностью, часто весьма существенной, но вполне приемлемой для инженера-проектировщика, если он знает, какова предельно допустимая погрешность для задач данного класса и насколько безболезненны шаги по корректировке проектного решения в процессе проведения наладочных работ.

Расчетная схема трубопровода - дискретный его аналог. При этом поступают примерно так же, когда гладкую кривую заменяют ломаной и ищут значения тока и потенциала в узлах дискретизации, полагая, что значения этих переменных на участке между соседними узлами пользователь при необходимости найдет простой интерполяцией.

7.3.1. Шаг дискретизации

От шага дискретизации, т.е. расстояния между соседними узлами дискретизации, зависит точность вычисления разности потенциалов труба-земля. При определении величины шага дискретизации будем исходить из ряда очевидных или требующих минимального доказательства правил, первое из которых:

чем меньше шаг дискретизации, тем точнее решение,

поскольку тем ближе численное решение, реализуемое на ЭВМ, к своему пределу, т.е. к решению для проводника с равномерно распределенными параметрами.

Шаг дискретизации нецелесообразно делать очень малым: малый шаг - это большое число узлов дискретизации и, следовательно, дополнительные сложности как при подготовке массива исходных данных, так и при расчете, особенно, если иметь ввиду точность решения систем алгебраических уравнений высокого порядка, поскольку порядок систем уравнений в наших задачах равен числу узлов дискретизации. Отсюда следует, что при выборе оптимального шага необходим компромис:

шаг дискретизации - переменный,

т.е. должен быть:

а) в меру малым, если рассматриваемая область расчетной схемы требует детализации или ответственна за точность решения задачи в целом (например, область вблизи источников тока или на участке пересечения и сближения коммуникаций);

б) достаточно большим, если в этой области поле токов в земле и на трубопроводах изменяется несущественно или может быть задано приближенно (например, для периферийной подобласти, не подлежащей тщательному расчету, для хорошо изолированного магистрального трубопровода, на участке между двумя соседними катодными станциями и пр.).

Оценить одну из погрешностей, связанную с шагом дискретизации, можно, если воспользоваться формулой

$$dU \% = 8,33 R_{\text{пр}} / R_{\text{пер}} dL^2, \quad (7.3)$$

где $dU \%$ - относительная погрешность дискретизации при вычислении разности потенциалов труба-земля, % ; dL - шаг дискретизации; $R_{\text{пер}}$ - удельное переходное сопротивление, Ом·м, определяемое формулой

$$R_{\text{пер}} = R'_{\text{из}} + 1,9\rho, \quad (7.4)$$

где $R'_{\text{из}}$ - удельное линейное сопротивление изоляции по (7.2).

Так, для городского трубопровода с относительно плохими параметрами, т.е. с диаметром $d = 108$ мм, толщиной стенки $t = 4$ мм, удельным линейным сопротивлением изоляции $R'_{\text{из}} = 20$ Ом·м, при $\rho = 20$ Ом·м имеем $R_{\text{пр}} = 1,38 \cdot 10^{-4}$ Ом/м, $R_{\text{пер}} = 58$ Ом·м и, следовательно

при $dL = 50$ м $dU\% = 0,05\%$;
 при $dL = 500$ м $dU\% = 5\%$.

Шаг дискретизации для магистрального трубопровода при $R_{пр} = 8,07 \cdot 10^{-6}$ Ом/м и $R_{пер} = 400$ Ом·м может быть существенно увеличен, так как

при $dL = 500$ м $dU\% = 0,04\%$;
 при $dL = 5000$ м $dU\% = 4,2\%$.

Безусловно, погрешности такого порядка приемлемы для практики и большой шаг дискретизации равный $dL = 500...5000$ м весьма желателен и вполне вероятен.

Однако следует учесть, что использованная оценочная формула пригодна при условии, когда полем анодного заземлителя можно пренебречь, в частности, если расстояние заземлителя от исследуемой точки в 4...5 раз превышает его кратчайшее расстояние до трубопровода. Поэтому с некоторым запасом надежности можно принять

верхний предел шага дискретизации
для городских сетей - 200 м, для магистралей - 2000 м.

Для определения *нижнего предела* для dL воспользуемся методом численного эксперимента, поскольку подходящие расчетные формулы или отсутствуют, или весьма приближенны и сами вносят неопределенную погрешность. Расчет проведем с использованием пакета программ АРМ ЭХЗ-7П. За точное решение примем решение рассматриваемой задачи с предельно малым шагом дискретизации.

В табл.7.6 приведены значения относительной погрешности дискретизации ($dU\%$) при $dL = 25, 50, 100$ м для ряда точек с координатой x прямолинейного трубопровода длиной $L = 1000$ м, имеющего следующие параметры: $d = 108$ мм, $t = 4$ мм, $R_{из} = 30$ Ом·м; ось Ox направлена вдоль трубопровода; единственная СКЗ включена в начале координат с анодным заземлителем в точке $y_a = 0$, $z_a = 1$ м с варьируемой координатой $x_a = \text{var}$.

Таблица 7.6

X, м	$x_a = -100$ м			$x_a = -50$ м			$x_a = -25$ м		
	25	50	100	25	50	100	25	50	100
0	1,0	3,5	9,6	1,6	4,7	11,7	2,8	6,7	15,7
50	0,2	1,3	7,2	1,3	2,6	6,9	1,9	5,2	13,0
100	-	0,7	5,4	1,1	2,2	6,5	1,5	3,8	12,4

Из табл.7.6 следует, что нижний предел шага дискретизации зависит от расстояния до анодного заземлителя. Если, например, допустить погрешность дискретизации $dU\% = 5...10\%$, то в качестве минимального значения dL следует принять величину, близкую к кратчайшему расстоянию от трубопровода до заземлителя. В городских условиях - это $dL = 50$ м. Поэтому вполне приемлемо правило

нижний предел шага дискретизации - на уровне кратчайшего расстояния до анодного заземлителя.

Чем выше качество изоляции трубопровода, тем больше может быть шаг. Так, при $R_{из} = 150$ Ом·м, что в 5 раз лучше принятого для задач в табл.7.6, предельная погрешность дискретизации уменьшается более чем вдвое.

Таким образом, определились предельные значения для шага дискретизации, что и рекомендуется для применения:

для трубопроводных сетей - $dL = 50 ... 200$ м;
 для магистральных трубопроводов - $dL = 200 ... 2000$ м.

7.3.2. Конфигурация расчетной схемы сети

Расположение и количество узлов дискретизации на плане трубопроводной сети зависит прежде всего от степени детализации и, следовательно, точности решения задачи. Прежде всего для построения расчетной схемы необходим удобный для работы масштабированный план сети, но не схема. Произвольно выбирают направления координатных осей

$0x$ и $0y$ декартовой системы, ось $0z$ направляют вниз от поверхности земли.

Как уже отмечалось выше, шаг дискретизации может быть переменным, увеличивающимся по мере удаления от источников тока или других мест, где детализация задачи обязательна. Поэтому размещение узлов начинают с наиболее ответственных участков сети. В этой связи будут полезны следующие советы.

1. Общее число узлов дискретизации не должно превышать предельного значения, указанного в инструкции к пакету программ. Для АРМ ЭХЗ-7П этот предел равен 200 узлам.

2. Узлы дискретизации обязательно располагают:

- а) в узлах разветвления трубопроводов;
- б) на концах ответвлений;
- в) в точках дренажа и в местах размещения переключек;
- г) в ближайших к анодному заземлителю точках;
- д) в местах пересечения и сближения коммуникаций;
- е) на поворотах трасс трубопроводов;
- ж) в точках изменения параметров трубопровода;
- з) в контрольно-измерительных пунктах.

3. Узлы дискретизации необязательны:

- а) на концах небольших по протяженности и неответственных ответвлений-вводов (длиной до 50 м вдали от анодных заземлений);
- б) на поворотах, если спрямление трассы допустимо (вдали от источников тока);
- в) на соседнем трубопроводе, если он объединяется с рассматриваемым в один эквивалентный.

4. Не желателен *резко* изменяющийся шаг дискретизации: последующий шаг должен отличаться от предыдущего, как правило, не более чем в 2 раза.

5. Существующая трубопроводная сеть, не исследуемая в данном проекте, но влияющая на рассматриваемую (проектируемую), учитывается путем введения *периферийной сети* (см. ниже).

6. Для сетей с числом узлов больше предельного применяют метод диакоптики - метод расчета сетей по частям.

7.3.3. Периферийная сеть

Под *периферийной сетью* будем понимать часть расчетной схемы, приближенно воспроизводящую окраинную трубопроводную сеть, расчет которой не обязателен. Будем называть сеть, не подлежащую расчету, *существующей* (μ -сетью), а рассчитываемую - *проектируемой* (ν -сетью).

В *главе 6* приведены примеры расчета, если уже задана конфигурация периферийной сети. В данном параграфе ставится задача *формирования* приближенной периферийной сети. Ниже рассмотрены ситуации, встречающиеся при решении этой задачи.

Программой *EZрасчет* предусмотрена приближенная методика учета периферийной сети.

В существующей сети отсутствуют токи

Как показано в *главе 6*, существующую трубопроводную сеть учитывают путем введения двух параметров:

- токов перетекания ($I_{\text{св}}$), включаемых в точках расщепления со стороны проектируемой сети;
- потенциала земли ($\phi_{\text{св}}$), наведенного токами периферийной сети.

Ток перетекания.

Ток перетекания будем вычислять по формуле (6.41) с использованием потенциалов по “близкой земле”

$$I_{\text{св}} = (U_{\mu} - U_{\nu}) / (Z_{\mu\mu} + Z_{\mu\nu}), \quad (7.5)$$

Входное сопротивление существующей сети в точке стыка $Z_{\mu\mu}$ вычисляют по результатам полевых измерений при использовании передвижной катодной станции. Обычно значения $Z_{\mu\mu}$ для городских трубопроводов лежат в интервале $Z_{\mu\mu} = 0,05 \dots 0,2$ Ом.

Ток перетекания включают как сосредоточенную нагрузку в точке расщепления *со стороны проектируемой* сети и учитывают при численном решении как добавку $J_{\text{св}}$ к правой части основной системы уравнений (6.39). Практически вводят некую эквивалентную катодную станцию с анодным заземлителем отнесенным в бесконечность. При этом следует

учитывать знак тока $I_{\text{св}}$, имея ввиду, что в программах принят знак «+» для тока обычной СКЗ.

Потенциал земли $\phi_{\text{св}}$.

Ток перетекания, но включенный в виде сосредоточенной нагрузки со стороны существующей сети, *противоположен по знаку* вычисленному по формуле (7.5). Подчеркиваем, что за положительное направление тока $I_{\text{св}}$ принято направление *из* существующей сети в проектируемую.

Этот ток создает поле в земле, характеризуемое потенциалом $\phi_{\text{св}}$, который тоже входит в правую часть системы (6.39).

Как показано в примерах расчета главы 6, составляющую $\phi_{\text{св}}$ можно не учитывать или учесть приближенно. В последнем случае можно воспользоваться следующей методикой.

1. Существующую сеть с известным входным сопротивлением $Z_{\text{цм}}$ заменяют периферийной сетью в виде трубопровода-луча, произвольно направленного от точки рассечения в глубь существующей сети и имеющего расчетную длину

$$L_{\text{экв}} = 100 / Z_{\text{цм}}, \quad (7.6)$$

где входному сопротивлению $Z_{\text{цм}}$ поставлены в соответствие (и затем должны быть учтены при вводе исходных данных) следующие параметры трубопровода-луча:

- диаметр, $d = 1500$ мм;
- толщина стенки, $t = 30$ мм;
- удельное сопротивление изоляции, $R_{\text{из}} = 350 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$.

2. Решают *основную задачу* для обособленного трубопровода-луча, т.е. с помощью системы (6.27) вычисляют плотность тока при наличии только лишь нагрузки $I_{\text{св}}$, приложенной к трубопроводу-лучу со стороны рассечения.

3. По формулам (6.30) (программа EZрасчет, кнопка «Поле токов в земле») для всех узлов проектируемого трубопровода вычисляют потенциал земли $\phi_{\text{з.т}}$, вызванный трубопроводом-лучом.

4. Потенциал $\phi_{\text{з.т}}$ (в уравнении (6.39) $\phi_{\text{св}}$ есть ни что иное как $\phi_{\text{з.т}}$, т.е. $\phi_{\text{св}} = \phi_{\text{з.т}}$) вводят как поправку к стационарному потенциалу, т.е. заменяют

столбец $U_{ст} \rightarrow U_{ст} + \Phi_{св}$ и, добавив вектор $J_{св}$, решают систему (6.39) в полном объеме для проектируемой сети.

К задаче с эквивалентным лучем сводится распространенная в практике ситуация с заземленным трубопроводом. В этом случае трубопровод-луч целесообразнее направить вглубь земли.

В существующей сети действуют установки ЭХЗ

В данном случае при построении периферийной сети следует решить *три задачи*.

1. Подобрать наиболее “безболезненные” точки расщепления трубопроводов.
2. Учесть токи перетекания.
3. Учесть токи в земле, вызванные анодами СКЗ, действующими в отсекаемой сети.

Наиболее просто решается *первая задача* в случае отсечения бесконечно длинной ветви магистрального трубопровода. Здесь можно воспользоваться следующей особенностью: расщепление трубопровода в точке *токораздела*, т.е. на границе зон действия катодных станций, наиболее благоприятно, так как расщепление проводника в точке, в которой ток отсутствует, никак не повлияет на работу электрической цепи. Отсюда следует способ решения первой из перечисленных выше задач:

проектируемую сеть ограничивают точками токораздела.

При затруднении с выбором точек токораздела задачу решают методом последовательных приближений.

Вторая задача решается достаточно просто, если имеется возможность провести полевые измерения. В этом случае по формуле (7.5) определяют ток перетекания ($I_{св}$) и учитывают потенциал влияния ($\Phi_{св}$). Возможно, исходя из сложности существующей сети, потребуется использовать не один трубопровод-луч, а два-три, исходящих, из точки расщепления.

Для учета влияния поля токов анодного заземлителя (*третья задача*) достаточно, как правило, учесть анодные заземлители *ближайших* катод-

ных станций, расположенных в существующей сети. Эти катодные станции целесообразно ввести в расчетную схему проектируемой сети, хотя их можно учесть аналогично тому, как это сделано для $\Phi_{\text{св}}$ - предварительно вычислить вектор потенциала земли Φ_z и добавить его в правую часть системы (6.39).

Катодные станции в периферийной сети желательно включить на некий эквивалентный трубопровод произвольной длины и конфигурации, расположенный в области действия этих станций и не связанный гальванически с проектируемой сетью.

Таким образом, для учета поля токов в земле от существующих СКЗ следует:

учесть в расчете ближайшие катодные станции, включив их на периферийную сеть простейшей конфигурации.

При решении сетевой задачи с анодными заземлителями соседних СКЗ их влияние обычно учитывают позже, т.е. в процессе уточнения решения.

В существующей сети имеются блуждающие токи

Данная ситуация является наиболее сложной для определения параметров периферийной сети в точках стыка. Задачи такого рода, если периферийная сеть совершенно не предсказуема, должны решаться методом последовательной детализации. В этом случае задачу решают, по крайней мере, дважды: сначала в мелком масштабе без деталей, но с учетом основных магистральных участков как существующей, так и проектируемой сетей, а затем - в более крупном.

На *первом этапе* находят потенциалы в точках будущего расщепления проектируемой и существующей сетей, второй этап дает основное решение задачи.

Следует заметить, что для первого этапа необходимо выделить область трубопроводной сети, по крайней мере, не меньше (в поперечнике), чем расстояние между ближайшими тяговыми подстанциями. Рельсовая сеть должна охватывать зону действия ближайшей тяговой подстанции.

На *втором этапе* рельсовую сеть воспроизводят вновь, но в точках расщепления проектируемой трубопроводной сети вводят токовые нагрузки $I_{\text{св}}$, подбирая их так, чтобы, по возможности, обеспечить задание первичных потенциалов первого этапа расчета. На этом этапе можно воспользо-

ваться результатами натурных измерений, экстраполируя эти результаты на проектируемый трубопровод.

7.4. Расчетная схема системы ЭХЗ

Построив описанную выше расчетную схему трубопроводной сети и поразмыслив по ходу дела о коррозионной ситуации, к тому же обследовав район в натуре, инженер уже имеет то или иное представление о будущей системе электрохимической защиты. Вероятнее всего он уже наметил места возможного размещения анодных заземлителей и точек дренажа, поставил вопрос о целесообразности применения электродренажей, предположил возможность использования протекторных установок. Остались лишь "мелкие" вопросы:

- сколько катодных станций и где их целесообразнее разместить, руководствуясь принципом "чем меньше, тем лучше";
- каковы оптимальные значения тока каждой из катодных станций и, следовательно, эксплуатационные затраты на катодную защиту в целом;
- каковы оптимальные параметры анодных заземлителей, а отсюда и основные затраты на строительство катодных станций;
- сколько протекторных установок, сколько протекторов в каждой из них да и стоит ли планировать применение той или иной катодной станции, если достаточно, например, одной протекторной установки;
- как выглядит потенциальная диаграмма при той или иной схеме размещения установок ЭХЗ;
- каково качество изоляционного покрытия трубопровода, степень влияния различного рода заземлений, роль существующих изолирующих фланцев и т.д.

В соответствии со структурой пакета АРМ ЭХЗ-7П все эти и ряд других частных задач решаются по одной из трех методик, обозначенных кодами $M=1 \dots 3$.

Ниже даны рекомендации по подбору параметров расчетной схемы ЭХЗ в зависимости от кода задачи и методики ее решения.

7.4.1. Оптимизационная сетевая задача

Сетевая задача для ЭХЗ в режиме $M=1$ ставится следующим образом: определить оптимальное количество установок ЭХЗ и их расположение в пределах исследуемой трубопроводной сети при условии *минимума* защитного тока и *оптимума* защитного потенциала.

При постановке задачи в режиме $M=1$ периферийную часть сети следует исключить из расчета, добавив ее затем при уточнении решения в режиме $M=2$.

Подготовку задачи при $M=1$ начинают с выбора наиболее вероятных мест размещения установок ЭХЗ, поскольку программой предусмотрен выбор оптимума из заданного множества. Дело в том, что программе нельзя доверять самостоятельный выбор мест размещения анодных заземлителей, не ограничив ее планом застройки рассматриваемой территории, привязками к источникам питания и т.д. Но с другой стороны инженер-проектировщик имеет лишь интуитивные соображения о действительной схеме расположения установок ЭХЗ. Поэтому в исходных данных

предполагаемое количество установок ЭХЗ должно быть взято с избытком.

Не стоит особенно беспокоиться, если этот "избыток" не очевиден. Компьютер при решении задачи в необходимый момент выдаст сообщение "Недостаточно количество установок ЭХЗ", - если их мало задумано, или просто проигнорирует ваши предположения и оставит столько установок ЭХЗ, сколько нужно, если у вас перебор.

В общее количество установок ЭХЗ входят катодные станции, проекторные установки и электродренажи. Особенности задания их параметров состоят в следующем.

Катодные станции.

1. Используя имеющийся опыт электрохимической защиты, задают координаты центров анодных заземлителей, располагая их на расстоянии от трубопроводов

для магистральных - 150...250 м,
для сетевых - 30...50 м.

2. Задают предельный ток катодных станций, руководствуясь номинальными значениями существующих или имеющихся в наличии преобразователей. Обычно предельный ток берут на 10...20% меньше номинального для данного катодного преобразователя. Необходимость введения такого параметра диктуется ограничениями оптимизационной задачи.

3. Решают основную задачу.

4. После вычисления оптимальных токов ЭХЗ находят параметры анодного заземлителя, дренажного кабеля, преобразователя.

Протекторные установки

1. Размещают протекторные установки с удалением 4...6 м от трубопровода.

2. Устанавливают предельный ток каждой установки. В качестве предельного тока для одиночного протектора можно принять значение $I_{пр} = 0,03$ А, но лишь для грубой оценки. Фактически необходимое число протекторов и их ток определяют в диалоге с компьютером. При построении расчетной схемы выполняют лишь прикидку суммарного тока защиты каждой установки.

3. При необходимости вычисляют сопротивление растеканию протекторной установки и проверяют ее возможности по генерированию заданного тока.

Электродренажи

1. Определяют технически приемлемые точки дренажа соответственно на трубопроводе и рельсах.

2. В диалоге с компьютером в оптимизационном режиме определяют ток дренажной цепи. Значение предельного тока электродренажа в программе ограничено величиной 500 А для всех видов дренажей.

3. Выбирают тип дренажа и по разности потенциалов рельс-труба в точке дренажа вычисляют сопротивление дренажной цепи.

7.4.2. Расчет при заданных токах

В режиме задачи $M=2$ ищется распределение потенциала, вызванное токами ЭХЗ при условии, что величины токов, а также количество и размещение защитных установок заданы. Проблема подготовки расчетной

схемы сводится лишь к назначению мест размещения анодных заземлителей.

7.4.3. Расчет качества изоляции

Искомым в задаче, решаемой в режиме $M = 3$, является удельное электрическое сопротивление изоляции ($R_{из}$) по участкам существующей трубопроводной сети.

Исходные данные для расчета:

- токи существующих (или опытных) катодных станций;
- таблица приращений потенциала, вызванных данными катодными станциями;
- привязки точек дренажа и мест размещения анодных заземлителей;
- таблица стационарных потенциалов.

Глава 8. Катодная защита

8.1. Схемы соединений катодной станции

На рис.8.1 представлена схемы типичной *станции катодной защиты* (СКЗ). Основные признаки СКЗ, отличающие ее от других видов электрохимической защиты - наличие *источника тока* и *анодного заземлителя*.

Электрическая энергия, необходимая для электрохимической защиты, поступает из сети переменного тока в *преобразователь* 1, где напряжение переменного тока сначала снижается до необходимого уровня, затем выпрямляется и далее используется для создания постоянного регулируемого по величине тока защиты.

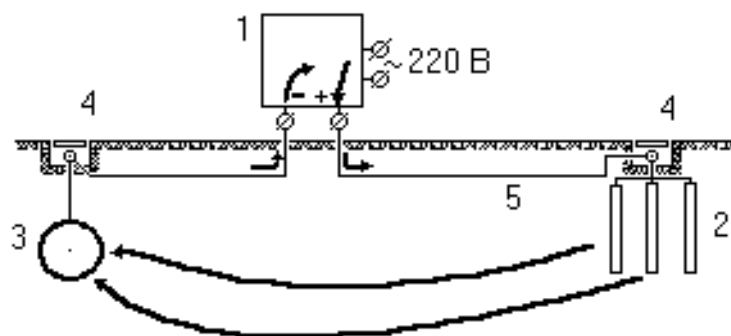


Рис.8.1. Схема соединений катодной станции. 1 - преобразователь переменного тока в постоянный; 2-анодный заземлитель; 3-защищаемый трубопровод; 4-контактные устройства; 5- кабельная линия.

Как следует из схемы соединений, выпрямленный ток от “+” источника 1 поступает на анодный заземлитель 2, затем по земле *натекает* на

трубопровод 3, *выполняя* тем самым свои *защитные функции*, после чего возвращается на “—” своего источника. Контактные устройства 4 - разъемные болтовые соединения - предназначены для подключения кабельной линии 5 и для измерения потенциалов.

Кроме перечисленных узлов в катодную станцию могут входить:

- высоковольтный понижающий трансформатор для питания СКЗ от сети напряжением более 1000 В;
- автоматическое отключающее устройство на питающей линии переменного тока;
- счетчик электрической энергии;
- защитный заземлитель корпуса преобразователя;
- блоки для совместной защиты ряда подземных сооружений;
- ограждение из колючей проволоки вокруг преобразователя с трансформатором (на магистральных трубопроводах).

На рис.8.2 показаны некоторые элементы схемы такой усложненной катодной станции.

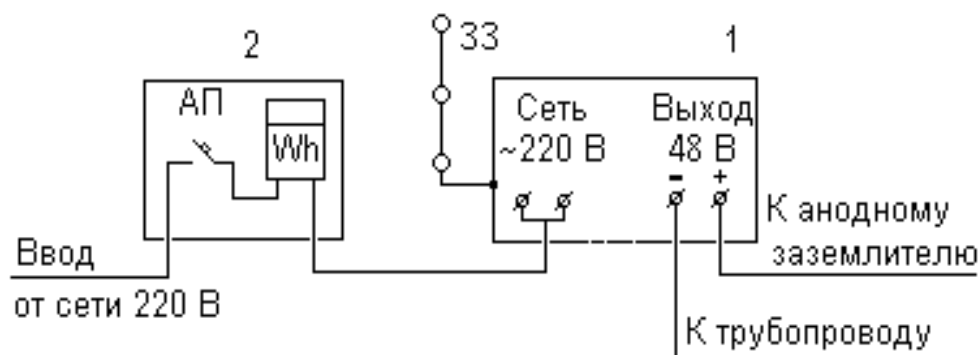


Рис.8.2. Схема подключений катодной станции. 1- преобразователь катодный; 2 - шкаф вводно-учетный; 33 - защитный заземлитель; АП- автоматический выключатель; Wh - счетчик электрической энергии.

8.2. Катодный преобразователь

Преобразователь катодной станции (рис.8.1, поз.1) часто для упрощения называют катодной станцией, что вряд ли может вызвать серьезную путаницу. Кроме того его можно назвать *регулируемым выпрямителем* или же по имени, присвоенному ему заводом-изготовителем.

Преобразователь в основном предназначен для

- выпрямления сетевого переменного тока;
- регулирования величины тока и его измерения.

Этих двух функций большей частью достаточно для задания нормального режима работы катодной станции.

На рис.8.3 приведена электрическая схема типового неавтоматического преобразователя, широко распространенного в практике электрохимической защиты.

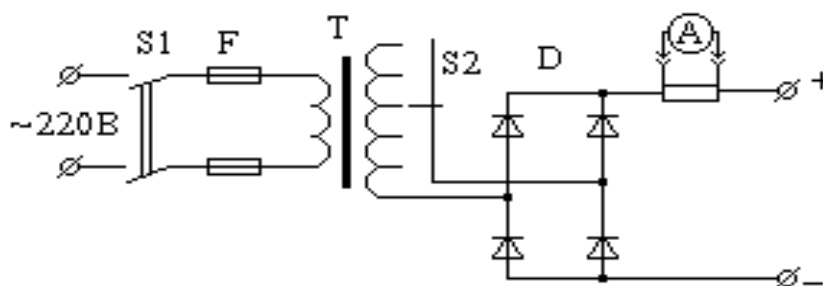


Рис.8.3. Схема типичного преобразователя катодной станции. S1 - выключатель двухполюсный; F - плавкие предохранители; T - трансформатор понижающий с отводами; S2 - переключатель многопозиционный; D - выпрямитель мостовой; A - шунт с амперметром.

Понижающий трансформатор T предназначен для согласования напряжения сети 220 В с рабочим напряжением катодной станции, которое у разных типов установок колеблется от 24 до 96 В. Трансформатор имеет ряд промежуточных отводов, которые при использовании переключателя $S2$ позволяют ступенями изменять выходное напряжение. Трансформатор связан с выпрямителем D , собранным из силовых диодов, например, по

мостовой схеме. На выходе выпрямителя включают амперметр A с внешним шунтом - калиброванным сопротивлением - на ток до 100 А.

Но некоторые преобразователи могут выполнять ряд дополнительных функций:

- поддерживать в автоматическом режиме неизменным поляризационный или общий защитный потенциал на выходе катодной станции;
- снижать уровень радиопомех, возникающих при работе электронных цепей автоматической катодной станции;
- работать в прерывистом режиме включение-отключение с целью использования эффекта последействия катодной поляризации.

Схема преобразователя, позволяющего плавно и автоматически регулировать ток нагрузки, приведена на рис.8.4.

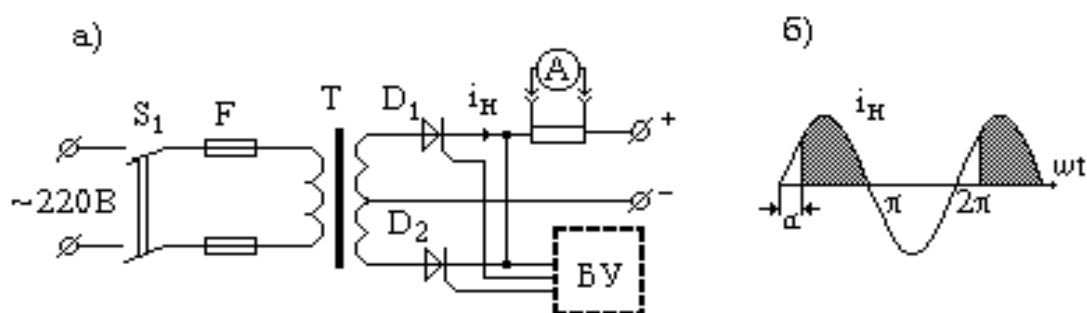


Рис.8.4. Схема управляемого выпрямителя на тиристорах (а) и временная диаграмма тока нагрузки тиристора (б).

Напомним, что тиристор - полупроводниковый прибор, так же как и диод, имеющий одностороннюю проводимость, т.е. обратный ток его очень мал и им пренебрегают. Но в отличие от диода, который открывается практически при нулевом напряжении (при $U = 0,4...0,7$ В), тиристор не работает до тех пор, пока на его управляющий электрод не будет подан сигнал. Чем больше задержка во времени (по фазе) с подачей управляющего сигнала, тем меньше количество электричества, прошедшее через тиристор за период. На рис.8.4,б заштрихованная область - интегральное значение выпрямленного тока. При $\alpha = 0$ тиристор работает в режиме обыкновенного диода.

Формирование управляющего импульса и обеспечение его сдвига по фазе выполняется автоматически в зависимости от заданного уровня защиты трубопровода. Кратко этот процесс можно описать следующим образом.

А) Заданная при пуске катодной станции величина защитного потенциала как эталона непрерывно сравнивается с фактическим значением потенциала на измерительном электроде (в точке дренажа). Как только нарушается их равновесие, возникает сигнал рассогласования.

Б) Сигнал рассогласования включает фазосдвигающее устройство, меняющее в ту или иную сторону угол отсечки α , т.е. устанавливает момент подачи управляющего импульса на тиристор.

В) Подается команда о формировании управляющего импульса, который тут же поступает на управляющий электрод тиристора.

Г) Ток катодной станции изменяется и равновесие восстанавливается. Примерно так работают преобразователи типа ОПС-2 Гайского завода “Электропреобразователь”.

8.3. Конструкции анодных заземлителей

Ниже приведен ряд вариантов устройства анодных заземлителей, выбор которых определяется технико-экономическими соображениями при проектировании системы катодной защиты.

Наиболее простая и дешевая конструкция анодного заземлителя показана на рис.8.5. Стержни (электроды) анодного заземлителя 1 укладываются в траншею на глубину, превышающую глубину промерзания грунта. При этом стержень должен иметь постель и присыпку из коксовой мелочи 4, о назначении которой - несколько позже. Все электроды посредством тщательно изолированных от земли контактных зажимов 3 электрически подсоединяются к общему кабелю 2, выходящему к контактному устройству (КУ) анодного заземлителя.

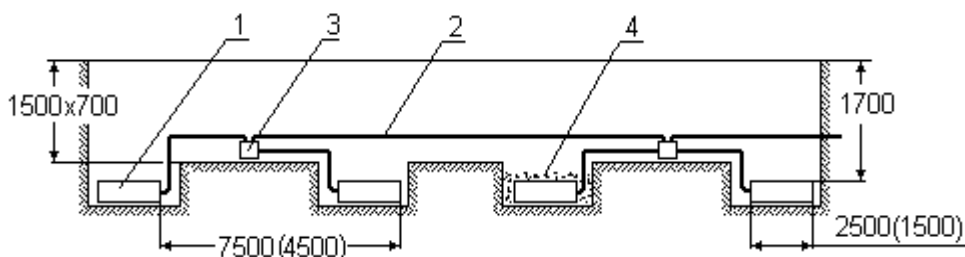


Рис.8.5. Горизонтальный анодный заземлитель из графитопластовых электродов типа ЭГТ-2500 (1500): 1- электрод; 2- кабель одножильный в виниловой оболочке АБВГ 1х25; 3 - разветвительная коробка; 4- коксовая засыпка в приялке 3000 х 400.

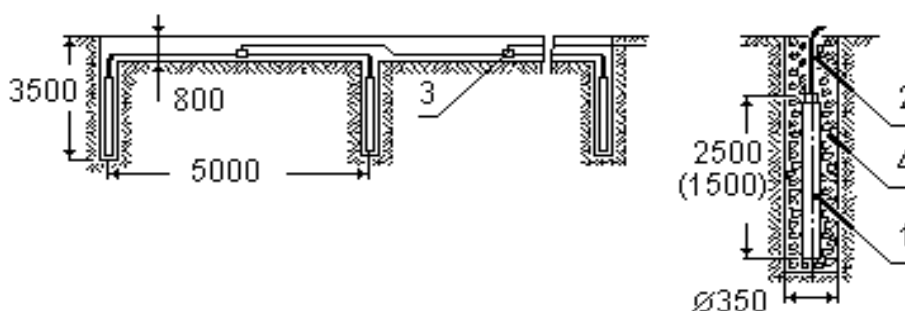


Рис.8.6. Вертикальный анодный заземлитель из графитопластовых электродов ЭГТ-2500(1500). Обозначения - на рис.8.5.

Если нет возможности провести открытые земляные работы по устройству траншеи, например, из-за стесненных городских условий, имея в виду, что расстояние между электродами может превышать 7 м, то изготавливают *вертикальный* анодный заземлитель, показанный на рис.8.6, где не требуются траншейные, но необходимы уже более дорогие работы - бурение скважин.

Более сложный анодный заземлитель - глубинный, выполненный из тех же электродов типа ЭГТ, представлен на рис.8.7. Глубинные анодные заземлители - их длина обычно не превышает 100 м - применяют в стесненных условиях городов, когда приповерхностные заземлители разместить нет возможности. Это диктуется в основном тем, что анодный зазем-

литель должен быть удален от всех подземных коммуникаций на достаточно большое расстояние.

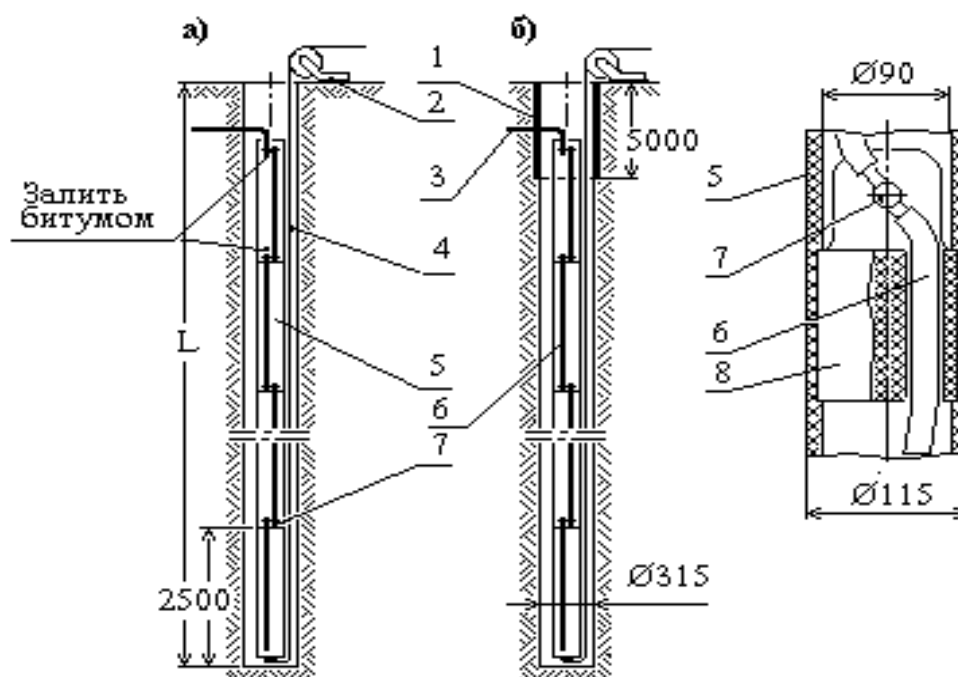


Рис.8.7. Варианты *а* и *б* глубинного анодного заземлителя из электродов типа ЭГТ-2500. 1- направляющий оголовок; 2- ворот для опуска колонны; 3- кабель к “+” преобразователя; 4- стальной провод ПСО-4; 5- электрод ЭГТ-2500; 6- межэлектродная перемычка кабелем АВВГ 1х25; 7- болтовое соединение на стыке двух электродов; 8- соединительный ниппель на резьбе из графитопласта.

Трубчатые графитопластовые электроды 5 свинчивают посредством графитопластовых ниппелей 8 в колонну, которую по мере наращивания длины опускают в скважину с помощью троса 4 и лебедки 2. Электроды при этом электрически соединяют между собой отрезками кабелей 6, а контактные узлы 7 тщательно изолируют. Ниппель 8 имеет плоскую проушину с отверстием для болтового контактного соединения электрода с наконечниками кабелей.

После опуска колонны до проектной отметки L скважину заполняют коксовой мелочью. Иногда в скважину перед этим опускают перфорированную пластмассовую трубку с выходом на дневную поверхность, пред-

назначенную для отвода газообразных продуктов коррозии, которые образуются при растворении графита. С той же целью верхнюю часть скважины часто заполняют гравием.

Если скважина глубокая (более 50 м), то для бурения устанавливают направляющий оголовок 1 по варианту рис.8.7,б.

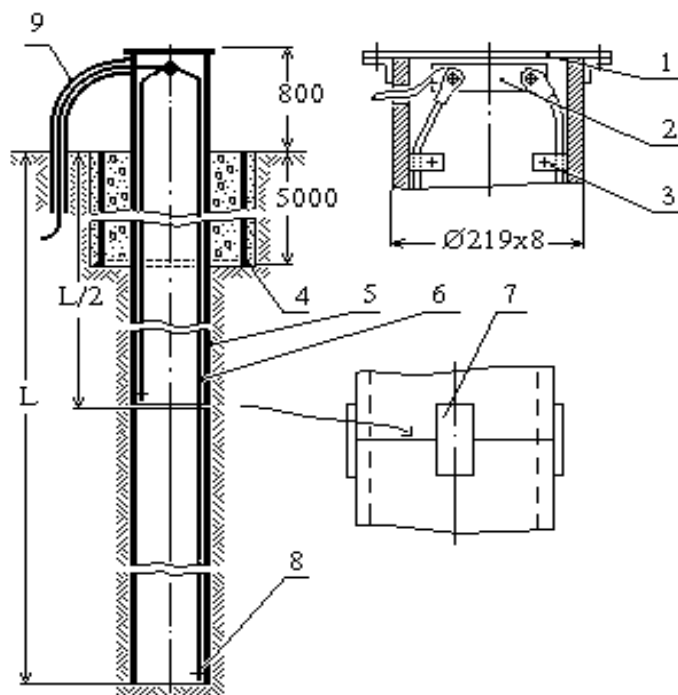


Рис.8.8. Глубинный анодный заземлитель из стальной трубы. 1-крышка; 2-клеммник; 3-хомут; 4-направляющая труба; 5-стальная труба; 6- кабель; 7-накладки приварные; 8-контактный узел; 9- кабель питания.

Возможно применение приповерхностных и глубинных заземлителей из стальных электродов. Вариант такого анодного заземлителя приведен на рис.8.8. Одновременно с бурением в скважину опускают обсадную колонну 5, которая предназначена служить электродом заземлителя. Трубы колонны соединяют между собой привариваемыми накладками 7. В двух-трех местах на внутренней поверхности труб колонны устраивают контактные узлы 8, от которых на общий клеммник 2 выводят питающие кабели 6. Узлы 8 тщательно изолируют от воды, которая в конце концов попадет внутрь трубы.

Возможен еще ряд вариантов анодных заземлителей. Так, в силу некоторых хозяйственных причин часто в качестве электродов используют различный металлолом, в частности, рельсы, трубы (стальные и чугунные), уголковую сталь и т.д.

8.4. Материал анодных заземлителей

Основное требование, предъявляемое к анодному заземлителю, - малая скорость анодного растворения. В соответствии с законом Фарадея (см. формулу 2.8) 1 ампер анодного тока за 1 год растворяет около 10 кг железа. Так, 750 катодных станций г. Волгограда со средним током 20 А каждой из них и суммарным 15000 А за один лишь только год *превратят в ничто 150000 кг железа*. Поэтому наряду со сталью, которая изначально применялась при катодной защите и все еще применяется сейчас, был создан ряд материалов, специально предназначенных для изготовления *слаборастворимых* анодов катодных станций.

В табл.8.1 приведен перечень основных материалов, используемых для анодных заземлителей, а ниже даны комментарии по каждому из них.

8.4.1. Сталь и чугун

По своей долговечности *сталь* - *наихудший* из всех применяемых материалов. Однако, к сожалению, стальные анодные заземлители широко распространены в отечественной практике. При чем причина здесь единственная - относительная доступность материала.

Таблица 8.1

Анодный материал	Скорость растворения, q , кг/(А·год)
Сталь	10
Чугун	4...5
Графит	0,8...1,5
Ферросилид	0,1...0,3
Свинец+серебро	0,04...0,08
Магнетит	0.002
Платина	~ 0

Проблема применения стальных электродов усугубляется еще и тем, что через 1...2 года стальной заземлитель может прекратить свою работу, далеко еще не растворившись полностью. Особенно это касается вертикальных электродов из труб. Если труба при ее установке плотно вбивается в пробуренную скважину, то твердые продукты коррозии, непрерывно образующиеся в процессе растворения, постепенно уплотняясь, создают слой высокого электрического сопротивления, который вызывает медленное, но верное уменьшение рабочего тока электрода до полного его прекращения. Все попытки выдернуть электрод из земли для ремонта, как правило, безуспешны, чему препятствует мощный и далеко не гладкий слой ржавчины. Это и понятно, если учесть, что объем ржавчины более чем в 3 раза превышает первоначальный объем растворившегося стального изделия.

Эра стальных анодных заземлителей все же заканчивается, тем более что существует ряд альтернативных материалов. Но если все же есть обоснованная необходимость применения стальных заземлителей хотя бы в малой степени приемлемым *сроком службы*, то их устраивают *с коксовой засыпкой*.

Целесообразность применения *коксовой засыпки для продления срока службы* анодных заземлителей в зарубежной практике давно не обсуждается и эта технология используется повсеместно.

Кокс - твердый остаток с высоким содержанием углерода, образующийся при нагревании различных видов ископаемого топлива до высоких температур без доступа кислорода. Кокс из каменноугольного и нефтяного пека является сырьем для изготовления электродов плавильных печей.

Для обсыпки заземлителей используется коксовая крошка размером до 8 мм, которая послойно утрамбовывается вокруг электрода. Плотность коксовой крошки примерно $0,6 \text{ т/м}^3$.

Эффект снижения скорости растворения стального электрода объясняется следующим. Благодаря углероду кокс - проводник с электронной проводимостью. Поэтому в точке контакта электрической пары кокс-сталь *нет электролитического растворения*. Растворение имеет место при контакте сталь-вода и кокс-вода. Но кокс, как и уголь растворяется в 10 раз медленнее стали (см.табл.8.1). Слой из коксовой крошки должен *уменьшить долю тока, непосредственно стекающего со стальной поверхности в электролит*. Большая часть тока, перетекая с электрода на контактирующие с ним зерна кокса, стекает в электролит уже не со стальной поверхности, а *с поверхности зерен слаборастворяющегося*

кокса, что и является причиной увеличения срока службы анодного заземлителя.

Однако в отечественной практике до последнего времени бытовала иная точка зрения: *техническими нормами коксовую засыпку разрешается заменять глинистым раствором*.

Но эта замена далеко не равноценная и даже напротив. Действительно, плотный слой глины будет способствовать возникновению *плотного слоя ржавчины*, приводящего, как это сказано выше, к запираанию электрода и прекращению тока. Коксовая крошка, к тому же, способствует образованию *рыхлого слоя ржавчины*, заполняющего пустоты между зернами и не препятствующего протеканию тока. Увеличение стоимости анодного заземлителя при применении коксовой засыпки компенсируется увеличением срока службы как за счет уменьшения скорости растворения, так и за счет повышения работоспособности заземлителя.

Чугунные трубы как аноды имеют более низкую скорость растворения, чем стальные. Типовыми рабочими чертежами альбома серии 5.905-6 они рекомендуются для применения.

Выпускаются специальные стальные анодные заземлители в комплекте с коксовым наполнителем. Так, анодный заземлитель типа АК-1 состоит из стального стержня диаметром 50 мм, длиной 1500 мм, массой 21 кг, опрессованного коксовым наполнителем, который помещен в кожух из жести. Диаметр электрода в кожухе - 185 мм, длина - 1420 мм, масса - 60 кг. Такой заземлитель не желательно применять во влажных грунтах.

Коксобетонный заземлитель типа АКЦ, напротив, предназначен для грунтов с повышенной влажностью. Стальной стержень диаметром 50 мм замоноличен в бетон, наполнителем которого является коксовая крошка. Габариты электрода 150x150x1700 мм, масса - 77 кг.

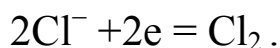
8.4.2. Графит

Графитовые электроды в свое время были названы “нерастворимыми”, но позже, как это следует из табл.8.1, потеряли свой приоритет, однако все еще широко применяются.

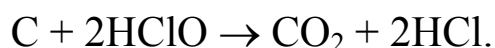
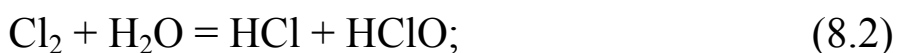
Графит имеет электронную проводимость с удельным электрическим сопротивлением $(2...5) \cdot 10^{-5}$ Ом·м, плотностью 1600...2100 кг/м³. Скорость

растворения графита, как это видно из рис.8.9, слабо зависит от плотности анодного тока.

Слабая растворимость графита, а также других рассмотренных ниже “нерастворимых” электродов, объясняется тем, что при окислительно-восстановительном процессе на аноде происходит *образование газов* по реакциям



Пропорциональное соотношение объемов выделяющихся газов - кислорода, хлора и углекислоты - определяется химическим составом окружающей среды. Так, в морской воде расход графита меньше, чем в грунте, поскольку графит С реагирует с кислотой HClO в соответствии с уравнениями



А поскольку значительная часть хлора отводится с проточной водой, то количество хлорноватистой кислоты HClO невелико и поэтому невелик материальный ущерб от непосредственной коррозии анода по сравнению с коррозией в пресной воде и грунте, где преобладает прямое окисление с участием кислорода по уравнению



Обычно используются графитовые и угольные электроды, предназначенные для дуговых печей в электрометаллургии. Для увеличения стойкости во влажных грунтах и в средах с высоким содержанием сульфат-ионов графитовые электроды пропитывают связующим веществом, например, фенолформальдегидной смолой, а также помещают в коксовую крошку.

Коксовая засыпка дает особо ощутимый эффект - скорость растворения графита снижается в несколько раз. Так, если без коксовой засыпки потеря массы составляет $q = 1,2 \text{ кг}/(\text{А} \cdot \text{год})$, то с засыпкой $q = 0,2 \text{ кг}/(\text{А} \cdot \text{год})$.

Коксовая засыпка в паре с графитовыми или угольными электродами проявляет еще одно свое важное свойство: *способствует отводу газообразных продуктов коррозии*. Если их не отводить организованно, то могут возникнуть пазухи, пустоты, приводящие к неравномерности растворения электрода, увеличению его сопротивления и даже к прекращению работы.

Можно ожидать образование кислорода со скоростью $1,83 \text{ м}^3/(\text{А} \cdot \text{год})$. Образующийся хлор - ядовитый и агрессивный газ, ускоряющий разрушение анода и других элементов заземлителя, в том числе, пластмассовых изолирующих оболочек питающих кабелей. Его тем более надо поскорее удалить.

При растворении стальных электродов газ практически *не выделяется* и поэтому материальные затраты на коррозию соответствуют закону Фарадея.

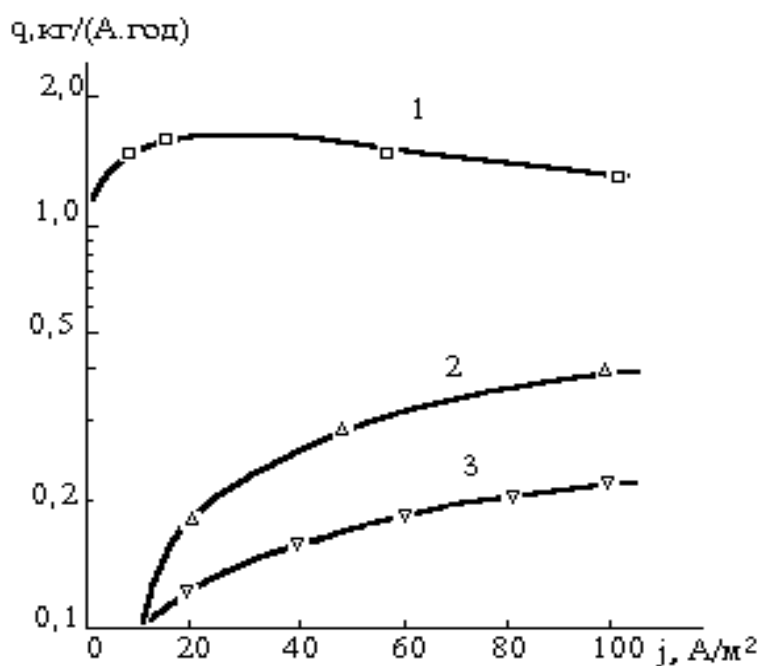


Рис.8.9. Скорость коррозии анодных заземлителей. 1 - графитовый электрод без коксовой засыпки; 2- ферросилидовый электрод без коксовой засыпки; 3- ферросилидовый электрод с коксовой засыпкой.

Отечественной промышленностью выпускаются и нашли широкое применение в стране *графитопластовые* электроды марки ЭГТ, которые

выполняются в виде трубы с внешним диаметром 115 мм, внутренним - 90мм, длиной от 1,5 до 3 м. Средний вес 3-х метрового электрода составляет 22 кг.

Основным компонентом графитопласта является искусственный графит (82%), связующим служит синтетическая смола в виде пресс-порошка. Смесь перемешивают, плавят при температуре 140°C и изготавливают трубу с внутренней резьбой на концах (см.рис.8.7, а также альбомы типовых чертежей серии 5.905-6 и 8.402-5 “Узлы и детали электрохимической защиты”).

Графитопласт имеет удельное электрическое сопротивление $(8...13) \cdot 10^{-5}$ Ом·м, что несколько больше, чем у графитовых электродов. Предельный нагрузочный ток электрода длиной 3 м составляет 5 А или $4,5 \text{ А/м}^2$, в то время как графитовые электроды допускают плотность тока 20 А/м^2 и более.

Основной недостаток графитовых и, особенно, графитопластовых электродов - хрупкость. Образующиеся при монтаже трещины и повреждения в графитопластовой трубе проявляются затем как очаги механических разрушений и локальной коррозии. К тому же графитопласт “разваливается” при большой плотности тока, т.е. пластмассовая матрица в этом случае уже не в состоянии удержать частички графита.

8.4.3. Ферросилид

Наиболее широкое распространение получили анодные заземлители из железокремнистых (ферросилидовых) электродов. В состав железокремнистых сплавов С14...С17 входит 14...17% кремния (Si) из кварцевого песка. Плотность ферросилида $7000...7200 \text{ кг/м}^3$. Он очень хрупок и трудно поддается механической обработке резанием.

Малая скорость растворения электрода объясняется образованием на его поверхности защитной пленки, состоящей из окисла SiO_2 , который способствует выделению кислорода взамен выделения ионов железа. В морской воде и солончаковых грунтах образование пассивирующей пленки SiO_2 затруднено. В этом случае больший эффект дают ферросилиды с добавкой молибдена (до 4%) или хрома.

Скорость растворения ферросилида более существенно зависит от плотности тока, чем графита. Так, из рис.8.9 следует, что скорость рас-

творения ферросилида растет с увеличением плотности анодного тока. Как для графита, так и для ферросилида скорость растворения заметно снижается при использовании коксовой засыпки. Рекомендуемая плотность анодного тока - $10...50 \text{ А/м}^2$.

Ввиду малой скорости растворения, ферросилидовые аноды можно было бы укладывать непосредственно в грунт, но при обязательной организации отвода газообразных продуктов.

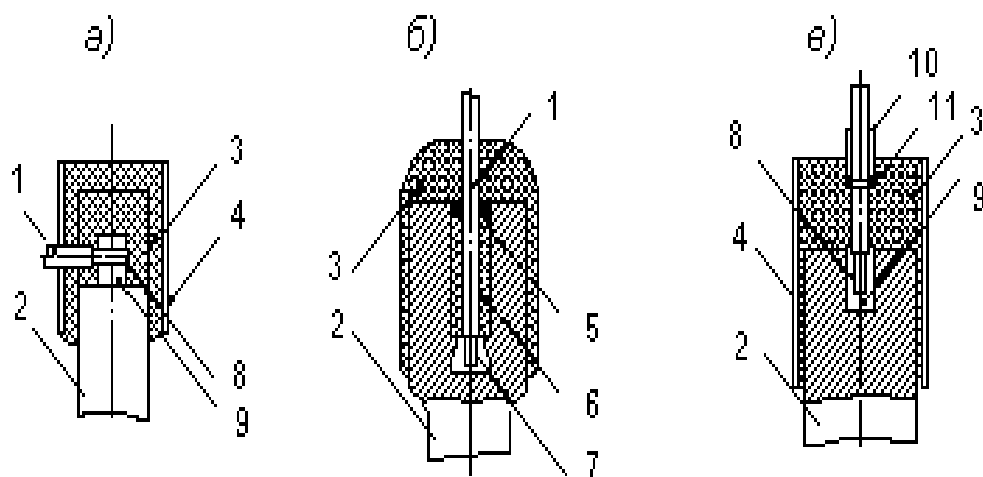


Рис.8.10. Контактный узел ферросилидового электрода. 1- кабель в двойной виниловой оболочке; 2- электрод ферросилидовый; 3- герметизирующая кабельная заливка; 4- полиэтиленовая трубка; 5- фторопластовая шайба; 6- эпоксидная смола; 7- свинцовая зачеканка; 8 - место пайки; 9- стальной вкладыш, заделанный в тело электрода; 10- виниловая трубка; 11- полиэтиленовая лента.

В отечественной практике применяют готовые для установки комплекты ферросилидовых электродов. Так, в комплект анодного заземлителя АЗМ-2 входят 24 электрода, 4 контактные коробки и 60 м соединительного кабеля. Электрод диаметром 65 мм и длиной 1500 мм с двух концов имеет кабельные выводы, тщательно изолированные от окружающей среды. На рис.8.10 даны варианты подсоединения кабелей к ферросилидовым электродам. При этом узел *а* используется в анодах типа

АЗМ-2 и пригоден для сборки колонн глубинного заземлителя, узлы *б* и *в* - для индивидуального применения.

Кроме анодного заземлителя АЗМ-2 выпускаются комплектные ферросилидовые заземлители в кожухе с коксовым наполнителем типа АК-3, АК-1Г, АК-2Г и другие. Габариты электрода АК-3 в сборе: диаметр - 185 мм, длина - 1420 мм, масса - 53 кг, масса ферросилидового стержня - 12 кг, его диаметр - 40 мм.

8.4.4. Свинец

Свинец чистый растворяется со скоростью в три раза большей, чем сталь. Действительно, если для стали по формуле (2.7) электрохимический эквивалент есть $q = 9,12 \text{ кг}/(\text{А}\cdot\text{год})$, то для свинца при его атомной массе $M = 207,2$ имеем

$$q = 3600 \cdot 207,2 / (2 \cdot 96500) = 3,8673 \text{ г}/(\text{А}\cdot\text{ч}) \text{ или}$$

$$q = 3,8673 \cdot 365 \cdot 24 \cdot 0,001 = 33,8 \text{ кг}/(\text{А}\cdot\text{год}).$$

Однако совсем небольшое количество серебра делает такой сплав практически “нерастворяющимся”. Действительно, сплав на основе свинца, содержащий всего лишь 1% серебра и 6% сурьмы, снижает скорость растворения до 0,05 кг/(А·год). Причем допускаемая токовая нагрузка таких электродов весьма существенна и может достигать 350 А/м².

Этот эффект объясняется образованием на поверхности анода *плотного* хорошо проводящего *окисного слоя* PbO₂, который и является токоотдающей поверхностью. При отсутствии легирующих добавок в виде серебра этот слой становится *пористым* и в работу включается нижележащий металлический свинец, который быстро растворяется.

Основное требование к *условиям работы* свинцового анода Pb+Ag - среда должна быть с *большим содержанием хлора*, что далеко не всегда выполнимо для условий подземных трубопроводов. Эти электроды не нашли применения для подземных трубопроводов.

8.4.5. Магнетит

Магнетит, формула которого Fe_3O_4 , можно отнести к окислам железа, т.е. к ржавчине - конечному продукту коррозии. Поэтому как можно от такого вещества ожидать еще какой-либо потери массы при анодной нагрузке, если уже все потеряно? К тому же магнетит не диэлектрик, имеет электронную проводимость и может использоваться в электрических цепях. Его удельное электрическое сопротивление велико, но сравнимо с удельным сопротивлением графита, т.е. порядка $\rho = (5...10) \cdot 10^{-5}$ Ом.м.

Магнетит встречается в виде минерала и добывается как железная руда. Гора Магнитная у г.Магнитогорска - теперь уже бывшая - состояла из магнетита.

Изделия из магнетита отливают при высокой температуре со специальными добавками. Литой электрод гладкий, твердый и плотный как стекло.

Расход материала под токовой нагрузкой чрезвычайно мал и составляет 1...2 г / (А·год), т.е. в 1000 раз меньше, чем у графита и в 10000 раз меньше, чем у железа. Рабочая плотность тока - 90...200 А/м².

Область применения - повсеместно. К сожалению, отечественной промышленностью магнетитовые электроды пока не освоены.

8.4.6. Платина

Несмотря на кажущуюся экзотичность такого материала, особенно при защите коммунальных трубопроводов, этот материал находит применение, например, при защите морских судов и портовых сооружений, а также при катодной защите всевозможных резервуаров, аппаратов, насосов и пр. Однако применяют скорее не платиновые, а *платинированные электроды*.

Электроды на основе платины изготавливают из титана, ниобия или тантала, на которые, как на *пассивные* держатели, наносят электрохимическим или другим способом тонкий слой платины (толщиной 2,5...10 мкм), который и является рабочей частью поверхности электрода. Причем

этот слой может быть даже в виде обособленных островков, лент или поясков на держателе.

Расход платины весьма мал, а эффект чрезвычайно велик. Действительно, предельно допустимая плотность анодного тока с островков платины может достигать 2000 А/м^2 , а потеря массы платины - всего лишь $4...10 \text{ мг/(А·год)}$. При этом титан и особенно ниобий, благодаря непроводящим окисным пленкам, возникающим при их работе, функционируют как *абсолютно нерастворяющиеся* части такого электрода. Лишь только при напряжении $10...14 \text{ В}$ для титана или при $50...100 \text{ В}$ для ниобия происходит *пробой пассивирующего слоя* на держателе и электрод, к сожалению, после этого быстро разрушается. Однако это легко контролировать и недопустить.

Анодные заземлители на основе платинированного титана ждут своего применения при защите коммунальных трубопроводов.

Известны попытки создания и других комбинированных анодов на основе *вентильных металлов* типа титан с разнообразными окисными покрытиями, вплоть до окислов железа. Такие аноды как окиснорутениевые (окисел рутения на титановом держателе) с успехом применяются в электролитических ваннах в гальванических цехах. К сожалению, эти электроды не терпят загрязненных сред, и тем более, грунтовых условий.

8.5. Расчет катодной защиты

8.5.1. Постановка задачи

Современный фундаментальный метод расчета электрохимической защиты, в том числе катодной, причем для трубопроводных сетей любой конфигурации, приведен в *главе 6*. Другие методы расчета – для обособленных прямолинейных трубопроводов - изложены в работах Е.Зунде, Л.Д.Разумова, В.Н.Остапенко, В.В.Луковича, В.Т. Иванова, их учеников и последователей.

Одновременно с решением задач ЭХЗ в фундаментальной постановке можно в оценочных расчетах использовать простейшие аналитические соотношения, имея ввиду, что трубопровод с катодной защитой теоретическая электротехника относит к *активным проводникам с утечкой*. В

этой постановке для бесконечно длинного проводника с утечкой - аналога магистрального трубопровода - с сосредоточенной токовой нагрузкой имеем

$$U(L) = U(0)e^{-\alpha L}, \quad (8.4)$$

где L - координата исследуемой точки вдоль оси трубопровода с началом отсчета в точке подключения токовой нагрузки; $U(L)$ - разность потенциалов труба-земля в исследуемой точке; $U(0)$ - разность потенциалов в начале координатной оси; α - коэффициент затухания или коэффициент утечки.

На рис.8.11 показан характер изменения экспоненциальной функции $e^{-\alpha L}$. Экспонента с отрицательным аргументом - это затухающая функция, описывающая в науке и технике множество аналогичных процессов.

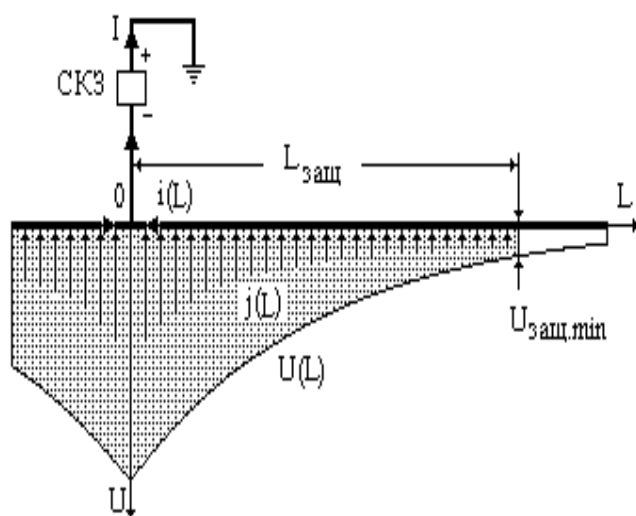


Рис8.11. Распределение разности потенциалов труба-земля $U(L)$ и плотности тока $j(L)$ при экспоненциальном изменении затухающей функции; $L_{\text{зщ}}$ - плечо защиты катодной станции; $U_{\text{зщ.min}}$ - минимальный защитный потенциал.

В теории электрохимической защиты зависимость (8.4) широко применялась ранее. При ее использовании следует иметь ввиду соотношения:

$$\alpha = \sqrt{R_{\text{пр}} / R_{\text{пер}}}; \quad (8.5)$$

$$U(0) = \alpha I R_{\text{из}}; \quad (8.6)$$

$$R_{\text{пер}} = R'_{\text{из}} + b\rho, \quad (8.7)$$

где $R_{\text{пр}}$ - удельное продольное сопротивление трубопровода, Ом/м; $R_{\text{пер}}$ - удельное переходное сопротивление трубопровода, Ом/м; $R_{\text{из}}$ - удельное (линейное) сопротивление изоляции, Ом/м; ρ - удельное электрическое сопротивление грунта, Ом/м; I - ток катодной станции; b - коэффициент, приближенно учитывающий поле, вызванное токами трубопровода в земле ($b = 1,4 \dots 2,0$ при $d = 100 \dots 1000$ мм).

Следует подчеркнуть, что все другие проявления поля, например, от анодного заземлителя или соседнего трубопровода, игнорируются, т.е. везде полагают $\varphi_3 = 0$.

Несмотря на то, что формула (8.4) весьма привлекательна по своей простоте, ею следует пользоваться лишь для оценочных расчетов. Все расчеты катодной защиты будем выполнять с использованием программ комплекса АРМ ЭХЗ-7П, разработанных в соответствии с теорией *главы 6* и представленных в *главе 7*.

8.5.2. Расчет влияния анодного заземлителя на пассивный трубопровод

Положение анодного заземлителя существенно влияет на распределение защитного потенциала вдоль трубопровода и протяженность защитной зоны катодной станции.

Ток анодного заземлителя, стекая в землю от “плюса” своего источника, направляется в конечном счете к заземленному “минусу”, каковым в обычных условиях является защищаемый трубопровод. Однако в поле данного анодного заземлителя может оказаться и другой, не включенный в систему катодной защиты, трубопровод. Такой трубопровод будем называть *пассивным* или соседним, в то время как трубопровод, находящийся в системе катодной защиты - *активным*.

Для анализа влияния поля токов анодного заземлителя на пассивный трубопровод мысленно отнесем защищаемый или активный трубопровод в *бесконечность*. Этим мы - для чистоты анализа - отделим исследуемый заземлитель от всех других активных, т.е. нагруженных током, элементов в земле.

Поле токов обособленного заземлителя (нам пока ничто не мешает заменить реальный заземлитель точечным, расположенным на поверхно-

сти земли) было бы строго радиальным, т.е. линии тока, как лучи светящейся точки, были бы направлены из центра заземлителя по прямой в бесконечность. Но это верно лишь при отсутствии в земле каких-либо препятствий и неоднородностей. Наиболее “мощная” *неоднородность* - *соседний, пассивный трубопровод*.

Пусть обособленный анодный заземлитель установлен вблизи пассивного трубопровода (рис.8.12). Такая ситуация не может не встретиться на практике: катодно защищается *газопровод* и одновременно подвержен влиянию токов анодного заземлителя *соседний водопровод*. Как только что условились, влиянием поля токов газопровода на водопровод пока пренебрежем.

Конфигурацию эпюры смещения потенциала $\Delta U(L)$, представленной на рис.8.12, можно в какой-то степени предугадать, даже не зная аналитической записи этой кривой.

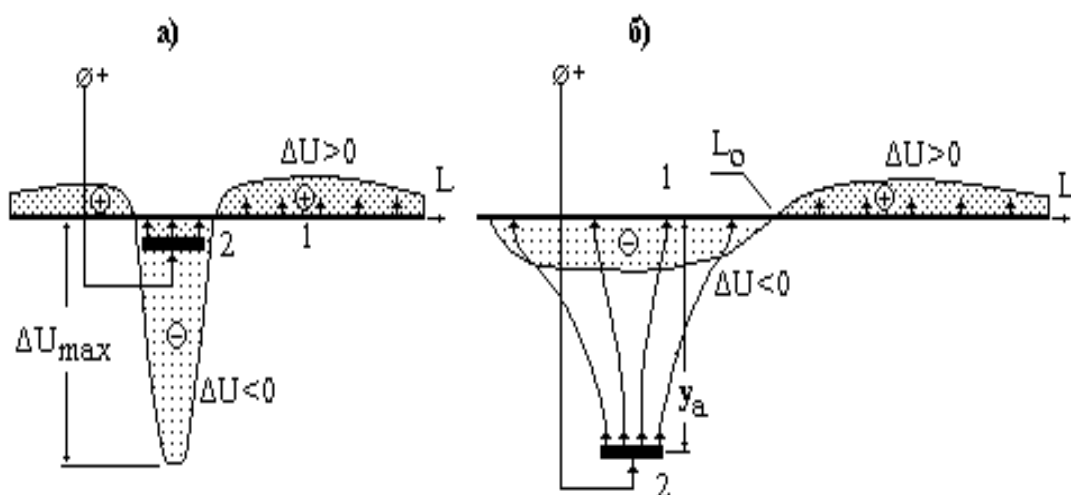


Рис.8.12. Эпюры смещения потенциала трубопровода (1) при близко расположенном (а) и удаленном (б) анодном заземлителе (2).

Действительно, ток *натекает* на трубопровод *вблизи* анодного заземлителя, а стекает - вдалеке. При этом, во-первых, наоборот быть не может, и, во-вторых, если ток натекает, то он где-то и стекает. Отсюда и поведение ΔU как знакопеременной функции продольной координаты L :

- вблизи заземлителя всегда $\Delta U < 0$, поскольку плотность *натекающего* из земли тока (j) имеет *отрицательный* знак и к тому же $\Delta U = R_{из} \cdot j$;

- вдалеке от заземлителя на трубопроводе возникает *анодная зона*, т.е. $j > 0$ и $\Delta U > 0$;

- общая площадь эпюры $\Delta U(L)$, вернее, эпюры $j(L)$, должна быть равной нулю, что означает *баланс токов*: сколько натекает, сколько же стекает (сравни заштрихованные части “+” и “-” рис.8.12). Следовательно,

ток анодного заземлителя разрушает пассивный трубопровод на некотором удалении от заземлителя.

Это первый практически важный вывод.

Сравним, далее, эпюры *а* и *б* рис.8.12 с точки зрения *влияния расстояния* анодного заземлителя от трубопровода. Из графиков видно, что с удалением анодного заземлителя:

- *протяженность* катодной зоны или зоны натекания *увеличивается* и “нулевая” точка L_0 удаляется;

- *пик потенциала* ΔU_{max} в ближайшей к заземлителю точке *уменьшается*.

Действительно, если взять предельный по своей малой вероятности случай - *горизонтальный заземлитель уложен в одной траншее с трубопроводом*, то ток заземлителя, стекая с него, будет тут же *натекать на ближайший участок* трубопровода. Зона натекания будет предельно мала, а пик потенциала, естественно, максимальный.

Если же заземлитель начать *удалять в бесконечность* ($y_a \rightarrow \infty$), то фронт натекания, т.е. протяженность катодного участка, будет явно увеличиваться. При этом увеличение зоны натекания приведет к уменьшению плотности тока натекания, если, разумеется, мы экспериментируем с заземлителем, ток которого неизменен по величине. Именно поэтому потенциал ΔU_{max} с увеличением y_a уменьшается.

При удалении заземлителя в бесконечность поле токов, вызванное заземлителем, исчезнет и, следовательно, везде будет $\Delta U = \Delta U_{max} \rightarrow 0$.

На рис.8.13 показан характер изменения пикового потенциала ΔU_{max} в зависимости от расстояния между заземлителем и трубопроводом y_a . Расчет выполнен при $I = 10$ А, $\rho = 40$ Ом·м, $d = 200 \times 6$ мм, $R_{из} = 50$ Ом·м.

При $y_a > 200$ м влиянием анодного заземлителя можно пренебречь и считать его удаленным в бесконечность.

Этот вывод относится к типичному случаю с протяженным магистральным трубопроводом. Для трубопроводной сети количественный анализ влияния анодного заземлителя можно провести с помощью программ комплекса АРМ ЭХЗ-7П.

Расстояние от анодного заземлителя до любого трубопровода в пределах $y_a = 150...250$ м давно выбрано практикой как *оптимальное для магистральных трубопроводов*. Для сетевых трубопроводов удовлетворить этому требованию не удастся ввиду стесненных условий городов.

Другая кривая рис.8.13 дает представление о протяженности катодной зоны на трубопроводе. Расстояние до границы раздела катодной и анодной зон (L_o) в трубопроводных сетях обычно $L_o = 200...300$ м, в то время как для магистральных трубопроводов $L_o = 600...800$ м.

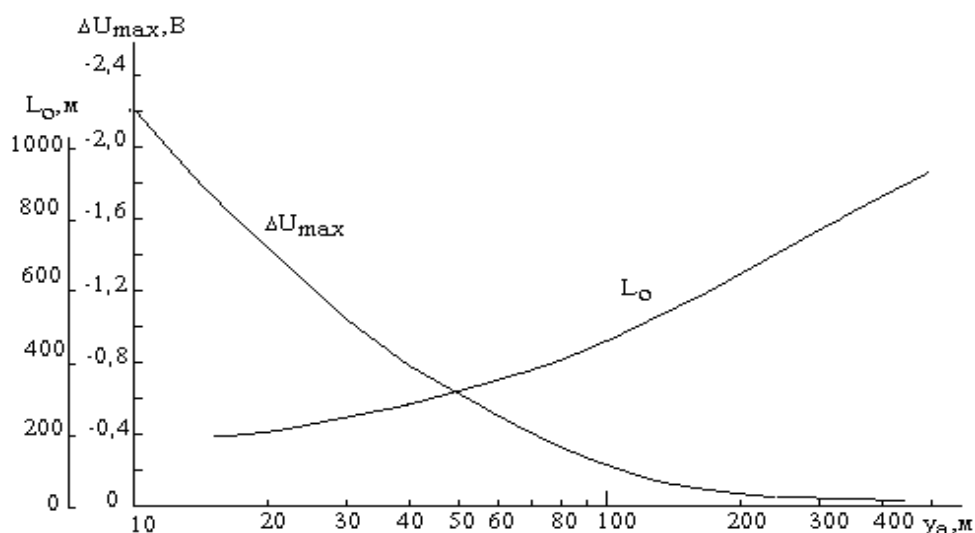


Рис.8.13. Влияние расстояния между анодным заземлителем и трубопроводом y_a на величину смещения потенциала, вызванного током заземлителя, в ближайшей к заземлителю точке трубопровода $\Delta U_{\max}$ и на протяженность плеча натекания L_o .

8.5.3. Расчет влияния анодного заземлителя на активный трубопровод

Рассмотрим далее аналогичную задачу с анодным заземлителем, но уже вблизи катодно защищенного или *активного* трубопровода. Разобьем эту задачу на две и представим себе расчетные схемы:

а) “+” катодной станции подключен к анодному заземлителю, “-” отнесен в бесконечность;

б) “-” катодной станции подключен к трубопроводу, “+” отнесен в бесконечность.

Используя принцип суперпозиции или наложения, можно записать

$$\Delta U = \Delta U_{\kappa} + \Delta U_{\text{a}}, \quad (8.8)$$

где ΔU_{a} , ΔU_{κ} - смещение потенциала трубопровода, вызванное токовой нагрузкой, приложенной соответственно или только к анодному заземлителю, или к трубопроводу; ΔU - действительное защитное смещение потенциала трубопровода.

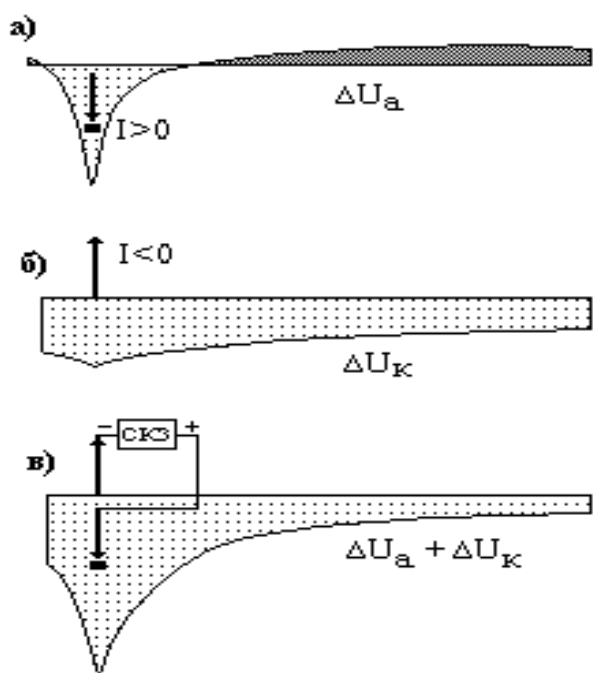


Рис.8.14. Эпюры смещения потенциала трубопровода, вызванные влиянием только анодного землителя (а), при отсутствии анодного заземлителя (б), суммарная (в).

Кривая ΔU_{a} на рис.8.14,а по характеру ничем не отличаются от кривых рис.8.13, а кривая ΔU_{κ} (б) может быть и экспонентой, как это упоминалось выше. Третья кривая (в) получена суммированием соответствующих ординат первых двух.

Сопоставляя эпюры, следует сделать два вывода. Близко расположенный анодный заземлитель:

- увеличивает пик потенциала в ближайшей точке трубопровода;

- уменьшает зону защиты, поскольку уменьшает защитный потенциал вдали от заземлителя.

Эти особенности являются дополнительными причинами малой протяженности зоны действия катодных станций в трубопроводных сетях по сравнению с магистральными трубопроводами.

Основная причина, следует напомнить, связана с низким переходным сопротивлением сетевых трубопроводов за счет естественных заземлений.

Однако на практике - при защите магистральных трубопроводов - y_a увеличивают до 300 м, что объясняют желанием *снизить* до предела *пик потенциала* вблизи заземлителя. Но, как отмечалось выше, при $y_a > 200$ м влиянием анодного заземлителя вообще можно пренебречь.

Из рис.8.15 видно, что чем *хуже качество изоляции*, а также чем *ближе анодный заземлитель*, тем *меньше плечо защиты*. Так, при плохой изоляции $R_{из} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и расстоянии $y_a = 10$ м плечо защиты недопустимо мало и составляет всего лишь $L_{защ} = 65$ м, в то время как при $R_{из} = 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ и том же значении y_a зона действия примерно в 10 раз больше.

На рис.8.15 показано, как влияет y_a - в совокупности с качеством изоляции - на протяженность плеча защиты. Расчет выполнен при $\rho = 40 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $d = 200 \times 6 \text{ мм}$ при условии, что в точке дренажа - она расположена против анодного заземлителя - защитный потенциал равен максимальному защитному, т.е. $U_{защ} = U_{защ.\text{max}} = -2,5 \text{ В}$, а в конце плеча защиты - минимальному защитному $U_{защ} = U_{защ.\text{min}} = -0,85 \text{ В}$.

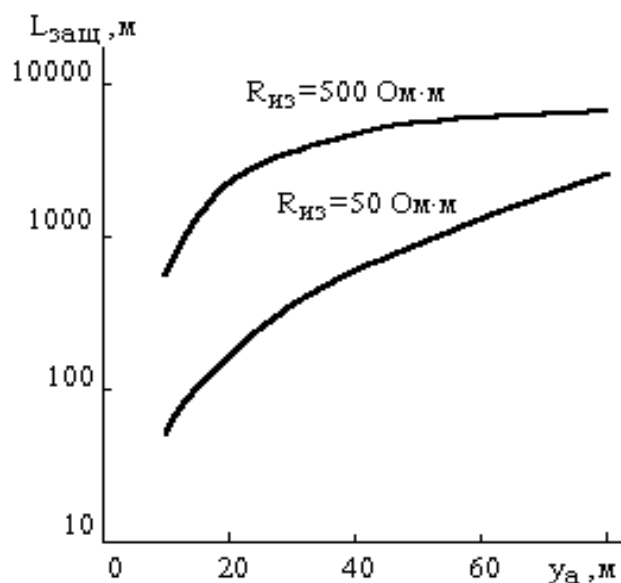


Рис.8.15. Зависимость протяженности плеча защиты от расстояния до анодного заземлителя y_a и качества изоляции трубопровода $R_{из}$.

Для городских сетей, где трубопроводы с $R_{из} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ - обычная практика, было бы очень хорошо, как это следует из графика рис.8.15, относить заземлитель на расстояние $y_a > 60 \text{ м}$.

Отсюда и несравнимые по величине фактические (они же теоретические) значения плеча защиты для сетевых и магистральных трубопроводов:

- сетевые	при $y_a = 30...100 \text{ м}$	$L_{защ} = 150...1500 \text{ м};$
- магистральные	при $y_a = 150...250 \text{ м}$	$L_{защ} = 4000...20000 \text{ м}.$

Для стесненных городских условий следует реально ориентироваться на интервал $y_a = 30...50 \text{ м}$.

Для магистральных трубопроводов, для которых реально значение $R_{из} = 500 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, напротив, вполне приемлемо расстояние $y_a = 100 \text{ м}$, поскольку при дальнейшем увеличении y_a плечо $L_{защ}$ уже увеличивается слабо.

Приведенные значения $L_{защ}$ следует использовать при ориентировочных оценках параметров катодной защиты и затем уточнять расчетом.

И еще одно немаловажное замечание: *чем меньше удельное электрическое сопротивление грунта ρ , тем ближе можно устанавливать анодный заземлитель*. Действительно, в предельном случае, когда $\rho \rightarrow 0$, поле в земле исчезает ($\varphi_z \rightarrow 0$) и, следовательно, исчезает составляющая ΔU_a в формуле (8.8). Так, при $\rho < 10 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ можно допустить, как это ни странно, даже $y_a = 10 \text{ м}$.

8.5.4. Анодный заземлитель в трубопроводной сети

Пусть вблизи анодного заземлителя находятся как активный (защищаемый), так и пассивный (соседний) трубопроводы. Расположим анодный заземлитель произвольно относительно точки дренажа так, как показано на рис.8.16.

Часть тока анодного заземлителя, обозначенная на схеме $j_{п}$, попадает на пассивный трубопровод, а другая часть j_a идет транзитом на защиту активного. Ток $j_{п}$, стекая затем с трубопровода $T_{п}$, создает на нем *вблизи точки дренажа анодную зону*. При этом имеется ввиду точка дренажа на защищаемом (активном) трубопроводе.

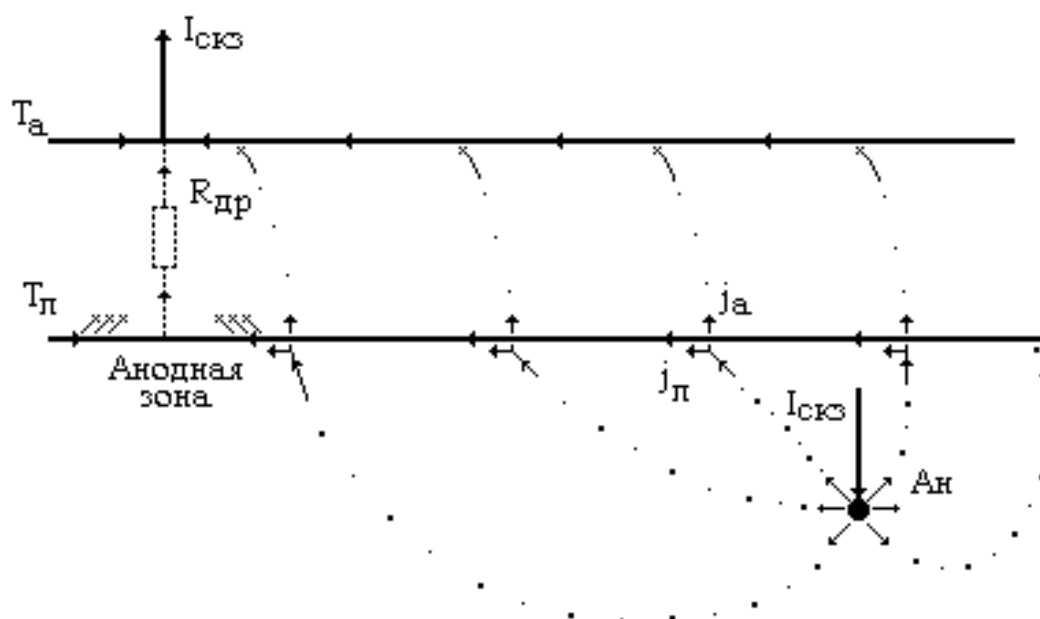


Рис.8.16. Активный T_a и пассивный T_p трубопроводы в поле токов анодного заземлителя An катодной станции $I_{скз}$.

Разумеется, ток j_p , после своего разрушительного действия, по земле возвращается на активный трубопровод и, реабилитируя себя, участвует в его защите.

Итак, как и следовало ожидать, на пассивном трубопроводе возникают *вблизи анодного заземлителя - катодная зона, вблизи точки дренажа - анодная*.

Эффект появления анодной зоны, вызываемой анодным заземлителем, встречается на практике часто и ликвидируется, как правило, путем включения *дренажной перемычки $R_{др}$* (рис.8.16). В этом случае ток *отводится “организованно”*, т.е. не через землю, а по кабелю.

В реальных условиях могут сложиться более сложные ситуации и их анализ проводят, чередуя численные методы расчета (с применением компьютерных программ АРМ ЭХЗ-7П) с полевыми измерениями.

8.6. Расчет анодного заземлителя

Расчет выполняется при условии, что ток катодной станции известен, а также известны типоразмеры выпускаемых промышленностью катодных преобразователей.

8.6.1. Сопротивление растеканию электрода

Под сопротивлением растеканию R понимают частное от деления потенциала заземлителя φ относительно бесконечно удаленной точки земли на величину его тока I . Фактически это входное сопротивление “по далекой земле” Z (см. формулу (6.37)), если заземлитель рассматривать как эквивалентный трубопровод.

Пусть, например, электрод имеет сферическую форму радиуса r и на половину погружен в землю с удельным электрическим сопротивлением ρ . Электрод создает радиальное электрическое поле, напряженность которого E на радиусе r определяется законом Ома

$$E = \rho j = -d\varphi(r) / dr, \quad (8.9)$$

где j - плотность тока в земле. При токе I электрода плотность тока на поверхности полусферы будет равна

$$j = I / S = I / (2\pi r^2). \quad (8.10)$$

Потенциал земли - это напряжение между точкой с координатой r и бесконечно удаленной точкой земли, где поле отсутствует, т.е.

$$\varphi(r) = -\rho \int_r^{\infty} j dr \quad (8.11)$$

Потенциал электрода φ будет отличаться от потенциала земли $\varphi(r)$ в ближайшей к нему точке падением напряжения U на приграничном слое между металлом и электролитом, т.е. - при отсутствии изоляции на по-

верхности электрода - на поляризационном сопротивлении металла электрода

$$\varphi = \varphi(r) + U_{\text{пол}}. \quad (8.12)$$

При расчете анодных заземлителей составляющей $U_{\text{пол}}$ пренебрегают ввиду малости величины удельного анодного поляризационного сопротивления ($P_a = 0,05 \dots 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$). Поэтому для сопротивления току на участке между поверхностью электрода и бесконечно удаленной точкой земли или *сопротивления растеканию полусферического электрода* радиуса r - после интегрирования (8.11) с учетом (8.10) - получим

$$R = \varphi(r) / I = \rho / (2\pi r). \quad (8.13)$$

Сопротивление растеканию более сложных электродов вычисляют по приближенным формулам:

- вертикальный стержень

$$R = \rho / (2\pi L) \ln (2L / d \sqrt{(4h + 3L) / (4h + L)}); \quad (8.14)$$

- горизонтальный стержень

$$R = \rho / (2\pi L) \ln(L^2 / (hd)), \quad (8.15)$$

где L - длина стержня; h - глубина заложения до верха; d - диаметр стержня при условии $d \ll L$, $h \ll L$.

На рис.8.17 приведены результаты расчета распределения плотности тока вдоль стержня заземлителя как эквивалентного трубопровода. Тут же приведены результаты расчет величины R по формулам (8.14) и (8.15).

Прежде всего очевидно, что *от положения стержня величина сопротивления растеканию мало зависит.*

Для дальнейшего следует еще раз отметить, что *сопротивление растеканию прямопропорционально удельному сопротивлению грунта.*

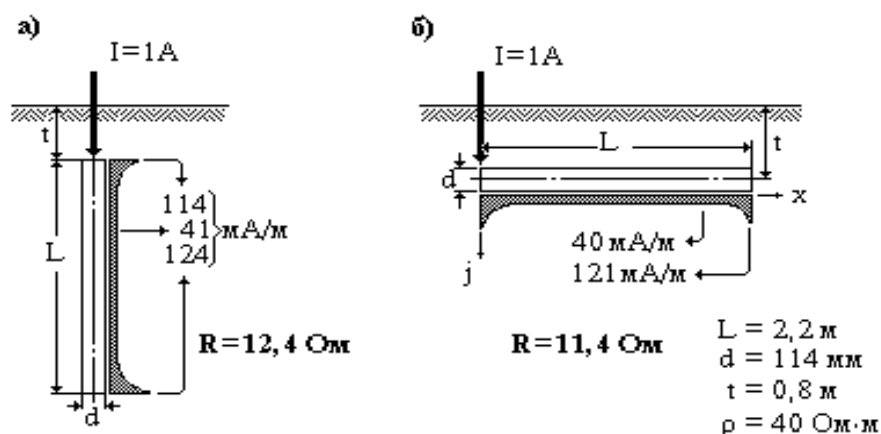


Рис.8.17. Эпюры плотности тока вдоль анода с демонстрацией “краевого эффекта”. Указаны числовые значения плотности тока в характерных точках.

И, наконец, следует подчеркнуть, что плотность тока вдоль стержня – величина существенно не постоянна. Отмечается известный в теории поля “краевой эффект”, когда на концах заряженного стержня плотность зарядов существенно больше, чем в середине. В ситуации с анодным заземлителем это означает, что стержень растворяется на концах активнее и благодаря этому будет в процессе работы заостряться.

Расчет поля токов выполнен в соответствии с методикой главы 6 по программам АРМ-ЭХЗ-7П. Там же учтены все расчетные формулы для вычисления сопротивления растеканию (R) заземлителя любой конфигурации.

8.6.2. Сопротивление растеканию группы электродов

При объединении электродов в общий заземлитель “краевой эффект” переносится на крайние электроды, сопротивление растеканию которых оказывается меньше, чем средних, вследствие чего крайние электроды будут более нагружены. Поэтому, если $R_{\text{заз}}$ – общее сопротивление заземлителя, состоящего из n стержней, а R – сопротивление отдельного стерж-

ня, то кажущаяся верной формула $R_{\text{зaz}} = R / n$ требует поправочного коэффициента, т.е.

$$R_{\text{зaz}} = FR / n, \quad (8.16)$$

где F - коэффициент экранирования или взаимовлияния; $R_{\text{зaz}}$ - сопротивление растеканию всего анодного заземлителя; R - сопротивление растеканию обособленного стержня; n - количество стержней.

В.Бекман с соавторами [] предлагают коэффициент взаимовлияния вычислять по приближенной формуле

$$F = 1 + \rho \ln(0,66 n) / (\pi s R), \quad (8.17)$$

где s - шаг размещения стержней.

Обычно значение F лежит в пределах 1,1...1,8.

8.6.3. Экономичное число стержней заземлителя

Расчетное количество стержней заземлителя (n) можно уточнить, исходя из требований минимума суммарных затрат на капитальное строительство (C_k) и эксплуатацию (C_3) катодной станции, т.е.

$$\begin{aligned} C &= C_k + C_3 = \min ; \\ C_k &= E k n + K_2 ; \\ C_3 &= I^2 (FR / n) (\varepsilon t / \eta) + C_2, \end{aligned} \quad (8.18)$$

где k - удельные строительно-монтажные затраты на один стержень анодного заземлителя, руб./шт; K_2 - приведенные капитальные затраты на строительство катодной станции за вычетом затрат на строительство анодного заземлителя, руб./год; ε - удельная стоимость электроэнергии, руб./кВт.ч; C_2 - годовые эксплуатационные затраты на содержание катодной станции за вычетом стоимости электроэнергии, руб./год; E - нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, $E = 0,11...0,15$; I - ток катодной станции, А; t - число часов работы катодной станции в году, $t = 8750$ ч; η - коэффициент полезного действия катодной станции, $\eta = 0,5...0,6$.

Для минимизации суммарных затрат продифференцируем C по n и решим уравнение $dC/dn = 0$, в результате чего получим

$$n = I \sqrt{8,76 F R \varepsilon / (E k \eta)} . \quad (8.19)$$

Количество стержней (n) следует прежде всего определить *по заданному сроку службы заземлителя*, т.е. исходить из требуемой массы заземлителя, а расчет экономичного числа стержней по формуле (8.19) проводить в спорных случаях.

Для удобства формулу (8.19) можно представить в виде

$$n = 0,21 I \sqrt{\rho} , \quad (8.20)$$

где коэффициент 0,21 соответствует типичным исходным данным.

8.6.4. Срок службы анодного заземлителя

В соответствии с законом Фарадея $G = qIT$ срок службы анода (T) прямопропорционален его массе (G) и обратнопропорционален току (I). Отсюда следует формула для расчета *количества электродов (n) по массе анодного заземлителя*

$$n = q I T / (G_{\text{эл}} \eta) , \quad (8.21)$$

где q - электрохимический эквивалент анодного материала (см.табл.8.1); $G_{\text{эл}}$ - масса одного стержня заземлителя, кг/шт; $\eta = 0,4...0,6$ - коэффициент полезного действия или коэффициент неравномерности растворения заземлителя.

Пример расчета

Анодный заземлитель на ток $I = 10$ А выполнен из ферросилидовых электродов АЗМ-2 массой $G_{\text{эл}} = 12$ кг каждый на срок службы $T = 15$ лет при скорости растворения ферросилида в коксовой мелочи $q = 0,2$

кг/(А·год) и к.п.д. $\eta = 0,5$. По формуле (8.21) требуемое число электродов будет равно

$$n = 0,2 \cdot 10 \cdot 15 / (12 \cdot 0,5) = 5 \text{ шт.}$$

Число электродов *по массе* ($n = 5$) не противоречит числу электродов, определенному *экономическим* путем ($n = 6$). Однако независимо от этого результаты нас могут все же не удовлетворить. Дело в том, что может иметь место несовместимость с рабочим напряжением преобразователя.

Действительно, если сопротивление растеканию одного электрода равно $R = 3,6$ Ом при $\rho = 10$ Ом.м и коэффициент взаимовлияния $F = 1,4$, то напряжение на анодном заземлителе, вычисляемое по закону Ома, составит

$$U = I \cdot R_{\text{зaz}} = I \cdot F \cdot R / n = 10 \cdot 1,4 \cdot 3,6 / 5 = 10 \text{ В.}$$

Для этого заземлителя любой отечественный преобразователь пригоден, поскольку рабочее напряжение преобразователей обычно не менее $U_{\text{н}} = 48$ В.

Но если удельное электрическое сопротивление грунта в четыре раза больше, т.е. $\rho = 40$ Ом.м, то R возрастет в 4 раза и, следовательно, напряжение на заземлителе должно быть равным $U = 40$ В, что уже на пределе возможного для преобразователя.

Заменим ферросилидовый электрод весьма стойким *электродом из магнетита*, для которого скорость растворения в 100 раз меньше. Тогда при расчете по массе достаточно будет ограничиться лишь одним электродом ($n = 1$). В этом случае напряжение на заземлителе будет в 5 раз больше, чем при $n = 5$, т.е. $U = 50$ В (при $\rho = 10$ Ом.м) или $U = 200$ В (при $\rho = 40$ Ом.м), что совершенно нас не устраивает, если в нашем распоряжении преобразователь на $U_{\text{н}} = 48$ В. Т.е. слишком стойкий электрод нам не нужен? Безусловно, торопиться с таким выводом не следует. Необходимо вернуться к технико-экономическим расчетам и, возможно, *заменить преобразователь*.

8.7. Вспомогательное оборудование

Рассмотренное ниже оборудование имеет отношение к системам электрохимической защиты вообще, но все же преимущественно к катодным станциям. Поэтому решено объединить эти сведения в данной главе.

8.7.1. Дренажная и питающая линии

Дренажная линия соединяет преобразователь с анодным заземлителем и трубопроводом, обеспечивая работу цепи *постоянного* тока. *Питающая линия* соединяет преобразователь с источником *переменного* тока.

Как дренажная, так и питающая линии могут выполняться в виде кабельной или воздушной линий.

Дренажная линия

Как известно (см. рис. 8.1), в цепь нагрузки преобразователя входят:

- анодный заземлитель;
- трубопровод;
- дренажная линия;
- земля.

Напряжение на выходе преобразователя, таким образом, уравнивается четырьмя составляющими

$$U_{\text{н}} = U_{\text{а}} + U_{\text{к}} + U_{\text{т}} + \Delta U_{\text{з}}, \quad (8.22)$$

где $U_{\text{н}}$ - номинальное выходное напряжение преобразователя катодной станции; $U_{\text{а}}$ - напряжение на сопротивлении растеканию анодного заземлителя; $U_{\text{к}}$ - потеря напряжения в дренажной линии; $U_{\text{т}}$ - напряжение на сопротивлении растеканию трубопровода (на входном сопротивлении Z); $\Delta U_{\text{з}}$ - напряжение в земле как некоторая поправка, учитывающая конфигурацию поля токов в земле, и которой, как показывает анализ, можно пренебречь.

Дренажная линия может вызвать неприемлемую потерю напряжения, если руководствоваться *стандартными нормами* расчета электрических линий *по току*, не учитывая специфики катодной станции. Поэтому под-

бор сечения кабеля или провода для цепи постоянного тока катодной станции имеет особенность. Рассмотрим это на примере.

Пример расчета

Трехжильный кабель с алюминиевой жилой сечением $2,5 \text{ мм}^2$ может выдержать *по стандартным нормам* нагрузку до 30 А на одну жилу или в целом 90 А, если жилы соединить параллельно и использовать этот кабель как дренажный. Такой кабель был бы достаточен по току для любой катодной станции. Однако, проектировщик катодной станции выбрал бы для тока $I_{\text{скз}} = 50 \dots 100 \text{ А}$ кабель с общей площадью сечения $95 \dots 120 \text{ мм}^2$, т.е. в **40 раз больше**. Только потому, что он будет руководствоваться не стандартными нормами, а величиной *экономически приемлемой потери напряжения*, которая, как правило, составляет $U_{\text{к}} = 1 \dots 2 \text{ В}$.

Пусть, далее, длина кабеля $L = 100 \text{ м}$, ток $I_{\text{скз}} = 50 \text{ А}$, сечение трех алюминиевых жил, включенных параллельно $S = 16 \cdot 3 = 48 \text{ мм}^2$. Сопротивление такой линии при удельном электрическом сопротивлении алюминия $\rho_{\text{Al}} = 0,03 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ равно

$$R = 0,03 \cdot L / S = 0,03 \cdot 100 / 48 = 0,06 \text{ Ом}.$$

Потеря напряжения в кабельной линии составит

$$U_{\text{к}} = IR = 50 \cdot 0,06 \cong 3 \text{ В} ,$$

что в общем уже на экономическом пределе. Действительно, поскольку на долю анодного заземлителя - при номинальном напряжении преобразователя $U_{\text{н}} = 48 \text{ В}$ - останется, имея ввиду соотношение (8.22), лишь $U_{\text{а}} = 44 \text{ В}$ (при $U_{\text{т}} \cong 1 \text{ В}$ и $\Delta U_3 = 0$). К тому же на катодной станции не плохо иметь запас по напряжению порядка 30% или 15 В, поскольку сопротивление анодного заземлителя со временем растет и рабочее напряжение катодной станции приходится в какой-то момент увеличивать. Тогда на анодный заземлитель останется всего лишь 29 В.

Сечение дренажного кабеля для катодной станции можно выбирать из табл.8.2, где даны параметры трехжильного кабеля с алюминиевыми жилами. При этом предполагается, что все жилы кабеля будут включены параллельно.

Таблица 8.2

Ток катодной станции, А	Площадь сечения жилы кабеля, мм ²
0...12	4
12...18	6
18...25	10
25...35	16
35...50	25
50...100	35

Обычно применяют кабели марки АВВГ с двойной виниловой изоляцией, а при тяжелых механических нагрузках - бронированные кабели типа АВРБ, АВБШ и др.

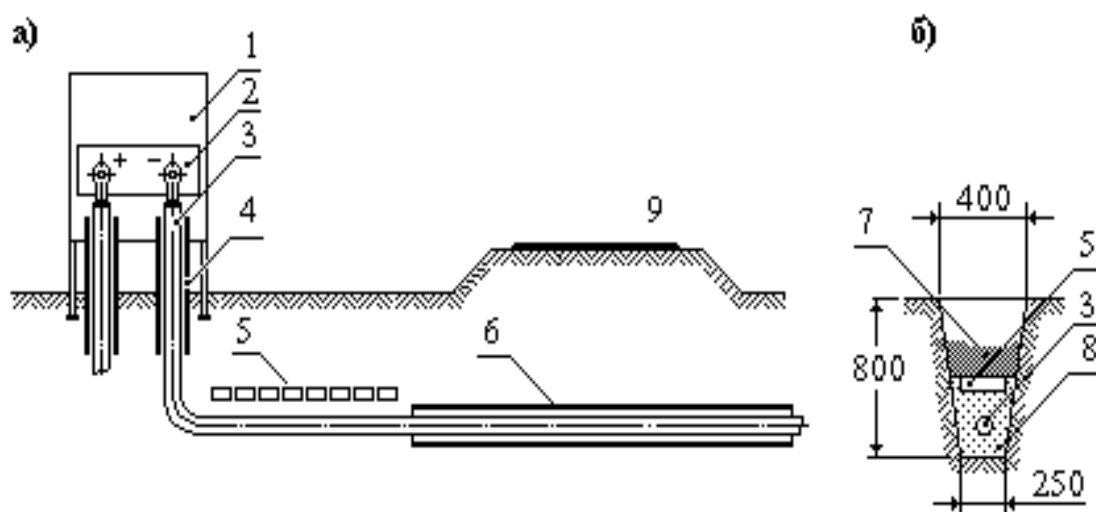


Рис.8.18. Устройство кабельной дренажной линии катодной станции. 1- преобразователь; 2-клеммник; 3-кабель; 4-стальная труба; 5-красный кирпич; 6-асбестоцементная труба; 7-грунт земляной; 8-песчаная подушка; 9-дорога.

Дренажный кабель или укладывают в землю, или закрепляют на стенах зданий. При устройстве воздушных линий на железобетонных опорах подвешивают голый алюминиевый провод.

В городах не желательна прокладка на опорах из эстетических соображений, в то время как для катодных станций магистральных трубопроводов, напротив, воздушные линии предпочтительнее.

Кабельная линия сооружается по нормам и правилам для низковольтных сетей. На рис.8.18 показаны основные элементы кабельной линии катодной станции.

Кабель укладывают в песчаную постель и закрывают от механических повреждений красным кирпичем, а под автомобильными и прочими дорогами используют асбестоцементную трубу.

Питающая линия

Для питания катодных станций городских трубопроводов используют ближайшие трансформаторные подстанции, вводно-распределительные устройства здания и сооружения, распределительные устройства предприятий напряжением 220 В.

При устройстве низковольтной двухпроводной линии для стандартной катодной станции сечение провода достаточно взять равным 6 мм^2 по алюминию.

Некоторые типы катодных станций позволяют использовать источники напряжением 6 или 10 кВ с последующим понижением с помощью стандартного или встроенного трансформатора (рис.8.19). Такие катодные станции устраиваются на магистральных трубопроводах и требуют прокладки высоковольтной линии 6/10 кВ, что, безусловно, существенно повышает стоимость катодной защиты.

Не так давно делались попытки использовать для питания катодных станций ветроэлектрогенераторы, использующие энергию ветра для получения электроэнергии. В пору ветрового затишья для работы катодной станции предполагалось использовать буферные аккумуляторы, которые бы подзаряжались в период нормальной работы ветроустановки. Не исключено, что к этой идее мы вернемся снова, поскольку в последнее время заметно вырос интерес к нетрадиционным возобновляемым источникам энергии.

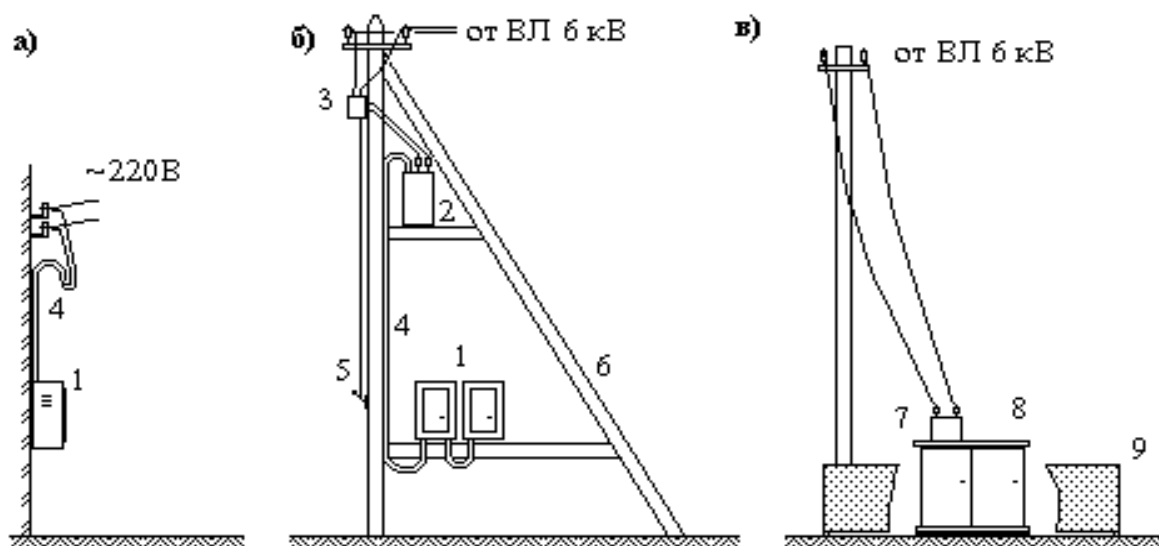


Рис.8.19. Подключение катодной станции к питающей сети переменного тока. а - с питанием от сети напряжением 220 В; б,в - с питанием от воздушной линии напряжением 6/10 кВ. 1 - преобразователи; 2 - однофазный понижающий трансформатор; 3 - разъединитель и предохранитель высоковольтный; 4 - провода 220В в трубе; 5 - ручной привод разъединителя; 6 - конечная опора воздушной линии; 7 - высоковольтный блок СКЗ; 8 - низковольтный блок СКЗ; 9 - ограждение.

8.7.2. Изолирующее фланцевое соединение

На рис.8.20 показано устройство изолирующего фланцевого соединения (ИФС), которое в общем случае предназначено для электрического рассечения трубопровода.

ИФС прежде всего устанавливают на вводах защищаемого трубопровода в здание или сооружение с естественными и искусственными заземлениями. При этом ИФС выполняет две функции:

- содействует снижению скорости коррозии и
- увеличивает зону действия катодной станции.

Воздействие на коррозию объясняется тем, что происходит разделение катода и анода коррозионной макропары и, следовательно, прекращение ее функционирования (о макропарах см. пп. 2.2.3).

Эффект увеличения зоны действия катодной станции связан с тем, что возрастает переходное сопротивление между трубой и землей за счет отсечения заземлений, каковыми являются неизолированные от земли подземные сооружения.

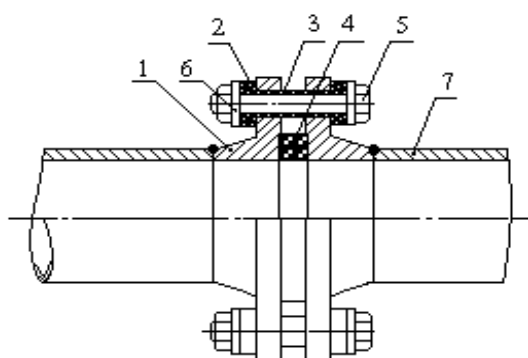


Рис.8.20. Изолирующее фланцевое соединение. 1- фланец приварной; 2 - изолирующая шайба; 3- изолирующая муфта; 4- изолирующее кольцо; 5 - болт с гайкой; 6 - стальная шайба; 7 - трубопровод.

По существующим нормам ИФС должны обязательно устанавливаться на вводах газопроводов в жилые дома, и тем более на вводах в производственные здания и сооружения. ИФС ставят на магистральных трубопроводах на выходе из насосной или компрессорной станции, для отделения подземного участка трубопроводной сети от надземного, уложенного по стальной эстакаде и, следовательно, заземленного. Иногда изолирующими фланцами отделяют вновь построенный участок трубопровода от существующего - с изношенной изоляцией -, если здесь можно ожидать возникновения коррозионной макропары или если один из участков требует локальной электрохимической защиты, а другой можно по каким-то причинам не защищать электрохимически.

ИФС можно устанавливать:

- на воздушном участке трубопровода при выходе его из земли;
- непосредственно в земле;
- в колодце.

Часто в ИФС переоборудывают обыкновенное фланцевое соединение задвижки или какого-либо линейного устройства на трубопроводе.

При эксплуатации следует иметь виду, что если ИФС установлено в колодце или непосредственно в земле, то при катодной защите можно

ожидать ухудшения коррозионного состояния на отсекаемой (не защищаемой) части подземного сооружения в непосредственной близости от ИФС. Действительно, для отсекаемого трубопровода токи катодной станции есть *блуждающие токи* со всеми своими неприятностями. Поэтому участки трубопровода по обе стороны ИФС более тщательно изолируют. К тому же ИФС, предназначенные для установки непосредственно в земле, имеют другую конструкцию, позволяющую изолировать от земли все металлические элементы ИФС.

8.7.3. Контактные устройства

На рис.8.21 приведены варианты контрольно-измерительных пунктов (КИП), предназначенных для контроля зоны действия катодной станции, и контактное устройство (КУ) для подключения дренажного кабеля.

КИПы устанавливают так, чтобы можно было бы измерять потенциалы с шагом не более 200 м - в городских сетях и 500 м - на магистралях. В городских условиях используют КИПы с ковером, на магистралях - с колонкой.

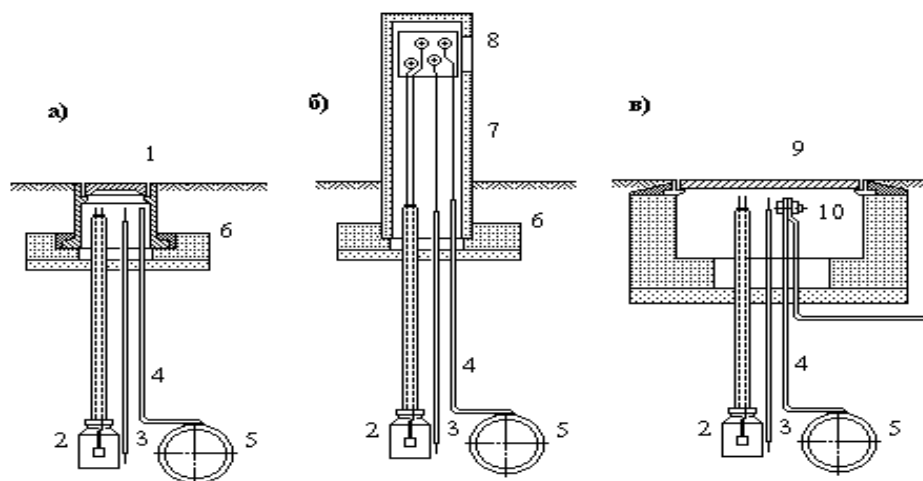


Рис.8.21. Устройство контрольно-измерительного пункта в ковре (а), в колонке (б) и контактное устройство на трубопроводе (в): 1- ковер; 2 - медносульфатный электрод сравнения с датчиком поляризационного потенциала; 3 - стальной электрод сравнения в пластмассовой трубке; 4 - стальная полоса, приваренная к трубопроводу; 5 - защищаемый трубопровод; 6 - бетонная подушка на песчаном основании; 7 - железобетонная колонка; 8- клеммник; 9 - малый колодец с крышкой; 10 - узел подключения кабеля к трубопроводу.

Стальной электрод 3 устанавливают на тот случай, когда медносульфатный электрод сравнения (МЭС) 2 вышел из строя и требует замены. Дело в том, что электролит МЭС, несмотря на его желеобразное состояние, постепенно вытекает и электрод приходит в негодность. Поэтому на период замены стационарного МЭС обычно используют или переносной МЭС, или *стационарный* стальной электрод, хотя следует напомнить, что стальной электрод в цивилизованном мире не применяют.

8.7.4. Блоки совместной защиты

Совместная защита - электрохимическая защита ряда разнородных подземных сооружений с помощью одной или нескольких согласованно работающих установок ЭХЗ.

Комплексная защита - активная защита в сочетании с пассивной. Она предусматривает применение в том или ином сочетании:

- совместной или раздельной электрохимической защиты;
- изолирующих покрытий;
- изолирующих фланцевых соединений, диэлектрических прокладок, футляров, вставок;
- мероприятий на источниках блуждающих токов;
- мероприятий по снижению агрессивности окружающей среды.

Для реализации требований по совместной защите как оптимальном и часто единственном методе защиты в сложных сетевых условиях, когда включение катодной станции на одном сооружении ведет - из-за перетеканий токов защиты - к ухудшению коррозионного состояния на другом, применяют ряд мер, в том числе включают в систему защиты следующие устройства и оборудование:

- глухие потенциалвыравнивающие перемычки между влияющим и подверженным влиянию сооружениями;
- регулируемые перемычки между сооружениями;
- вентильные перемычки между сооружениями;
- дополнительные катодные преобразователи с собственными анодными заземлителями (вспомогательные катодные станции);
- дополнительные анодные заземлители с одним общим катодным преобразователем (распределенные заземлители).

Глухие перемычки между двумя соседним трубопроводами, а также шунтирующие перемычки на задвижках и стыках, обеспечивают надежную проводимость и выполняют, как правило, стальными шинами. Однако неизолированная перемычка при хорошей изоляции трубопровода может существенно ухудшить уровень защиты в районе перемычки, что показано расчетом ниже.

Регулируемая перемычка включает в себя блок с переменным резистором. Характеристики универсальных блоков совместной защиты типа УСБЗ представлены в табл.8.3.

Таблица 8.3

Технические характеристики	УСБЗ-10	УСБЗ-50
Номинальный ток, А	10	50
Максимальный ток, А	30	100
Максимальное сопротивление, Ом	0,3	0,24
Шаг регулирования, Ом	0,01	0,05
Габариты, мм	180x140x95	305x320x150
Масса, кг	2	6,2

В типовых чертежах серии 7.402-5 “Узлы и детали установок ЭХЗ” предусмотрено применение регулируемых сопротивлений типа СДЗ.

В *вентильной перемычке* в блок совместной защиты добавлен полупроводниковый диод. К вентильным блокам относятся, например, блоки дренажной защиты БДЗ-10 и БДЗ-50, регулировочные характеристики которых соответствуют данным табл.8.3. Они обычно устанавливаются в перемычках между трубопроводами и кабелями связи.

Глава 9. Протекторная защита

9.1. Общие сведения

Применение *протектора-защитника* - первый шаг в истории электрохимической защиты. Его вероятнее всего сделали наши древние предки случайно. Действительно, соединив прочно два предмета из различных металлов можно отметить, что один из них перестал корродировать, а другой, напротив, стал разрушаться быстрее. Сейчас теория этого явления известна всем, хотя 200 лет назад этот эффект вызывал только удивление.

Итак, действие протекторной защиты это *действие искусственно созданной гальванической пары*, у которой катодом является охраняемое металлическое сооружение, а анодом - некий “жертвенный” электрод, надежно присоединенный к данному сооружению. Такой *анод* называют *протектором*, а защиту - по-разному: или протекторной, или катодной *без источника тока*, или гальванической. Мы выберем первое.

Прежде всего следует вспомнить, что в паре с катодом *анод* - *более электроотрицательный электрод*.

При разрушении анода-протектора его ионы уходят безвозвратно в землю, а освободившиеся электроны перетекают, как избыточные, на катод-трубопровод, заряжая его отрицательно. Т.е. под действием э.д.с. гальванопары “труба-протектор” в контуре “протектор - земля - трубопровод” возникает защитный ток, натекающий, как и положено при электрохимической защите, из земли на трубопровод (рис.9.1,а).

Поскольку э.д.с. пары есть разность стационарных потенциалов катода и анода, то ток в цепи “протектор - земля - трубопровод” в общем случае определяется законом Ома в форме (2.2).

Напомним также, что в соответствии с законом Фарадея количество растворившегося металла (G) связано с электрохимическим эквивалентом (q) соотношением (2.7).

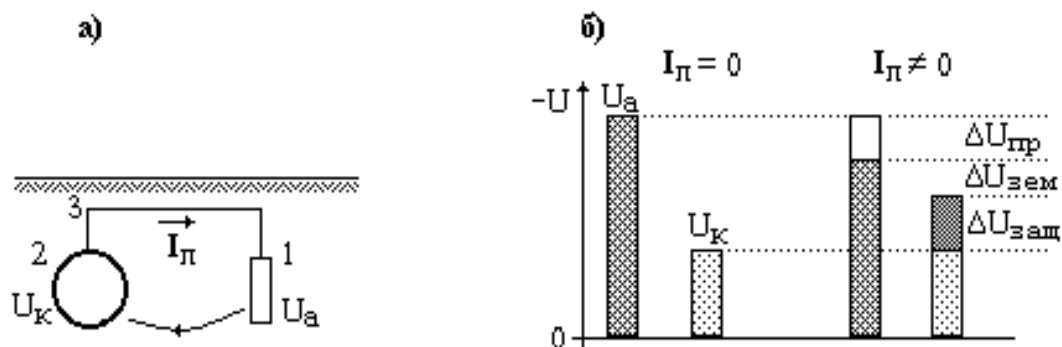


Рис.9.1. Схема простейшей протекторной установки (а) и диаграмма потенциалов (б): 1 - протектор; 2 - трубопровод; 3 - соединительный провод, I_{π} - ток протектора; U_a , U_{κ} - стационарные потенциалы протектора и трубопровода.

Следует познакомиться с новым термином: *токоотдача* - количество электричества на единицу массы

$$Q_T = 8750 / q ; \quad (9.1)$$

$$Q = Q_T \eta ,$$

где Q_T , Q - теоретическая, удовлетворяющая закону Фарадея, и фактическая токоотдачи, А·ч/кг; η - коэффициент полезного использования или коэффициент выхода по току; q - электрохимический эквивалент или скорость растворения, кг/(А·год).

Фактическая токоотдача всегда меньше теоретической. Это связано прежде всего с явлением *саморастворения* протектора как неоднородного металла, включающего в себя легирующие добавки и различные примеси. К тому же на поверхности протектора могут идти побочные реакции с выделением водорода, а не только растворения металла. Это нарушает пропорциональность между током и потерей массы металла по Фарадею, что и учтено коэффициентом η .

Поскольку $Q < Q_T$, то и продолжительность растворения протектора (T), определяемая формулой (2.7), также меньше теоретической, соответствующей закону Фарадея. Поэтому формула для вычисления фактического срока службы протектора (T , ч) в зависимости от его массы (G , кг) и величины тока (I , А) имеет вид

$$T = QG\eta / I. \quad (9.2)$$

Э.д.с. действующей гальванической пары $E = U_K - U_A$ уравнивается падением напряжения на всех участках цепи, что очевидно из диаграммы рис.9.1,б, где $\Delta U_{\text{пр}}$ - смещение потенциала на поляризационном сопротивлении протектора; $\Delta U_{\text{защ}}$ - защитное смещение потенциала трубопровода; $\Delta U_{\text{зем}}$ - потеря напряжения в земле. Следует не забывать, что катод поляризуется отрицательным током, а анод - положительным, благодаря чему $\Delta U_{\text{защ}} < 0$ и $\Delta U_{\text{пр}} > 0$.

В результате поляризации на трубопроводе и протекторе устанавливаются напряжения

$$\begin{aligned} U_{\text{защ}} &= U_K - \Delta U_{\text{защ}}; \\ U_{\text{пр}} &= U_A + \Delta U_{\text{пр}}, \end{aligned} \quad (9.3)$$

где $U_{\text{защ}}, U_{\text{пр}}$ - фактические разности потенциалов труба-земля и протектор-земля.

Если величина $U_{\text{защ}}$ соответствуют принятым критериям электрохимической защиты ($U_{\text{защ}} < U_{\text{защ.min}}$), то протектор надежно выполняет свои функции.

Таким образом, *протекторная защита - это катодная защита, где источником тока служит гальваническая пара "трубопровод-протектор"*.

9.2. Протекторные материалы

За всю историю протекторной защиты стальных сооружений по чисто практическим соображениям широко использовали лишь три вида ме-

талла: *магний, цинк и алюминий*. В настоящее время есть попытки применить для этой цели сплавы марганца и даже марганцовистую сталь.

В ряду стандартных электродных потенциалов названные металлы находятся на левом фланге, т.е. все они *отрицательнее железа*. В табл.9.1 приводятся стандартные электродные потенциалы этих металлов (по НВЭ).

Таблица 9.1

Материал	Магний	Алюминий	Цинк	Марганец	Железо
Потенциал, В	-2,36	-1,66	-0,76	-1,18	-0,44

Для изготовления протекторов используют не чистые металлы из табл.9.1, а сплавы на их основе. Многолетние поиски множества лабораторий мира привели к созданию оптимальных сплавов, удовлетворяющих требованиям практики.

В табл.9.2 ... табл.9.4 приводятся химические составы некоторых протекторных сплавов соответственно на магниевой, алюминиевой и цинковой основе, разработанных отечественной наукой.

Таблица 9.2

Марка магниевого сплава	Легирующие элементы, %			Примеси предельные, %				
	Al	Zn	Mn	Fe	Cu	Ni	Si	Ti
Мл16	7,5...9	2...3	0,15...0,5	0,03	0,15	0,01	0,2	-
Мл4вч	5...7	2...3	0,15...0,5	0,003	0,004	0,001	0,05	-
МП1	5...7	2...4	0,02...0,5	0,003	0,004	0,001	0,04	0,04

Таблица 9.3

Марка алю- миние- вого сплава	Легирующие элементы, %				Примеси предельные, %		
	Zn	Mg	Sn	Zr	Fe	Cu	Si
АП2	0,4...0,8	-	-	-	0,1	0,01	0,1
АП3	4...6	-	-	0,001...0,1	0,1	0,01	0,1
АП4	4...6	0,5...1,0	0,05...0,1	-	0,1	0,01	0,1

Таблица 9.4

Марка цинко- вого сплава	Легирующие элементы, %					Примеси предельные, %		
	Al	Mg	Mn	Ti	Si	Fe	Cu	Pb
ЦП1	0,4...0,8	-	-	-	-	0,001	0,001	0,005
ЦП2	0,5...0,7	0,1...0,3	0,1...0,3	-	-	0,004	0,001	0,005
ЦП3	0,2...0,6	-	-	0,005... .0,1	0,005... .0,1	0,004	0,001	0,005

Чистые металлы не получили распространения в связи с их низкой эффективностью. Так, чистый магний имеет коэффициент полезного использования (η) на 10...20% меньше, чем протекторный сплав на его основе. Чистые цинк и алюминий склонны к пассивации с образованием на поверхности плохо проводящей пленки. Хотя следует заметить, что высокочистый цинк (чистотой 99,995%) пригоден и используется для изготовления протекторов.

Более высокое содержание примесей в сплавах по сравнению с тем, что указано в таблицах, существенно снижает коэффициент полезного использования протектора. Так, для алюминиевых сплавов увеличение суммарного содержания Fe+Si+Cu от 0,2% до 0,5% снижает η от 85% до 55%. В этом случае за счет гальванической неоднородности сплава существенно ускоряется процесс *саморастворения* протектора и, следова-

тельно, снижается доля массы, *полезно* расходуемой непосредственно на защиту трубопровода.

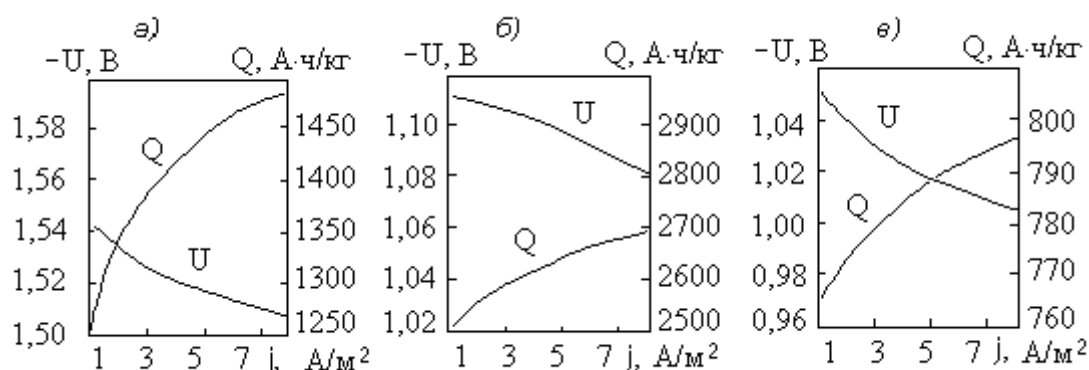


Рис.9.2. Изменение фактического потенциала (U) (по МЭС) и фактической токоотдачи (Q) сплавов МП1 (а), АП4 (б) и ЦП1,ЦП2,ЦП3 (в) в зависимости от плотности анодного тока.

Основными проектными параметрами протекторных сплавов являются *фактический потенциал* ($U = U_{\text{пр}}$) и фактическая токоотдача (Q). На рис.9.2 приведены характерные зависимости этих параметров от плотности анодного тока.

Таблица 9.5

Протекторный сплав	Фактический потенциал, $U_{\text{пр}}$, В (по МЭС)	Теоретическая токоотдача, $Q_{\text{т}}$, А·ч/кг	Выход по току, η , %	Электрохимический эквивалент, q , кг/(А·год)
Магниевый	−1,5	1400	60	7,2
Алюминиевый	−1,1	2600	85	3,9
Цинковый	−1,1	790	95	12,6

Поскольку фактические значения токоотдачи и потенциала существенно зависят от условий эксплуатации, то для приближенного расчета обычно принимают некоторые средние значения этих параметров. Для подземных трубопроводов эти значения приведены в табл.9.5.

Изменение $U_{\text{пр}}$ обусловлено явлением поляризации и является нежелательным. Чем меньше величина смещение потенциала протектора

($\Delta U_{\text{пр}}$), тем качественнее протекторная защита. Безусловно, значение стационарного потенциала зависит от свойств окружающей среды и, как показала практика, может изменяться на величину порядка $\pm 0,1$ В относительно приведенных в табл.9.5.

При использовании протекторов в грунтовых условиях можно ожидать также уменьшения на 5...10% величины η , фактически являющейся *коэффициентом полезного действия* протекторной установки. Это снижение η связано с неоднородностью растворения протектора и, следовательно, с его механическим разрушением, когда уже требуется замена протектора, в то время как он еще не растворился полностью.

9.3. Протекторные установки

9.3.1. Конструкции протекторов

По конструктивному исполнению протекторы делятся на *стержневые, плоские и прутковые* (рис.9.3), хотя принципиальной трудности в отливке протекторов любой другой формы нет. В маркировке протектора, например, ПМ-10 цифры означают его массу в кг, буква М - магниевый, А - алюминиевый и Ц - цинковый сплавы, другие буквы - конструктивное исполнение.

Стержневые магниевые протекторы типа ПМ-5...ПМ-20, а также такие как П1-69...П4-69, предназначены для подземных трубопроводов, а иногда, как подвесные, для морских сооружений. Плоские и прутковые протекторы (П-КОА-10, П-КОМ-10, П-НЛМ-14 и пр.) используются для защиты судов, резервуаров, различных аппаратов. Были попытки применить прутковый протектор и для защиты трубопроводов.

Прутковые протекторы (не проиллюстрированные на рис.9.3) представляют собой бухту из биметаллического прутка, сердечник которого стальной, а оболочка - из протекторного сплава. Например, прутковый протектор типа П-КПА-2 имеет внешний диаметр 30 мм, удельную массу -2 кг/м, диаметр стального сердечника - 4 мм, общую длину -30 м.

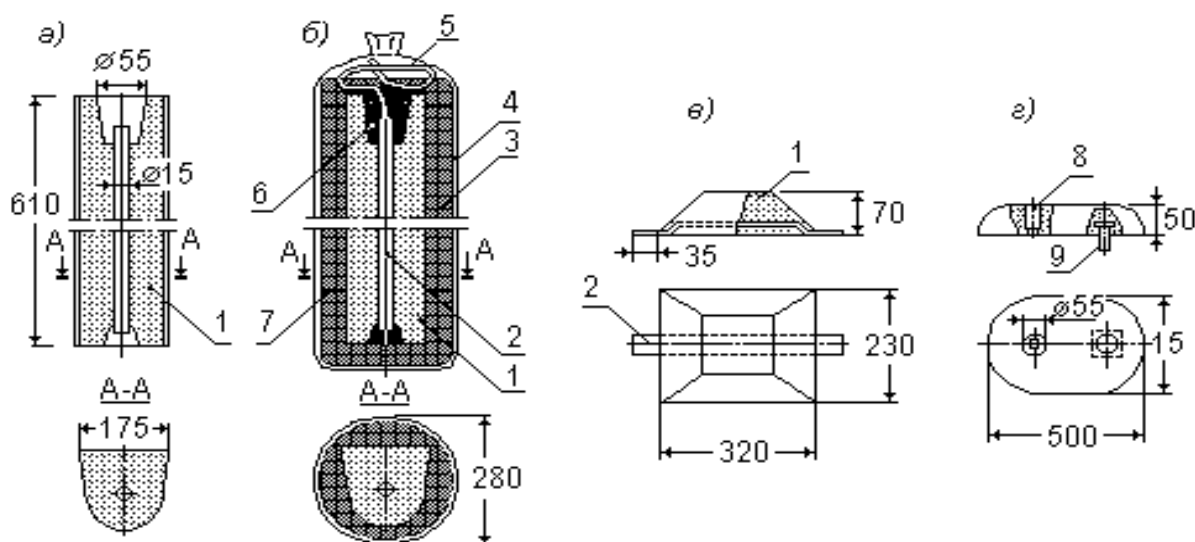


Рис.9.3. Конструкции протекторов: а- стержневой магниевый типа ПМ-20; б-стержневой с активатором типа ПМ-20У; в- плоский алюминиевый типа П-КОА-10; г - плоский алюминиевый типа П-РОА-9. 1- тело протектора; 2 - стальной стержень; 3 - активатор в хлопчатобумажном мешке; 4 - мешок бумажный; 5 - провод изолированный 10 м; 6 - битумно-резиновая масса; 7 - шайба фанерная; 8 - отверстие крепежное; 9 - контактный болт.

Протекторы при монтаже могут соединяться с защищаемым сооружением или *накоротко* или быть *регулируемыми* по току. К последним относится протектор типа П-РОА-9, показанный на рис.9.3,г, который закрепляется на поверхности защищаемого сооружения не на сварке, как, например, протекторы П-КОА-10, а на диэлектрической пластине, к которой крепится с использованием отверстия 8. Между протектором и защищаемым сооружением, используя изолированный от этого сооружения болт с резьбой 9, включается регулируемое сопротивление, которое в процессе наладки защиты обеспечивает нужную величину тока.

Иногда добавочное сопротивление включают в цепь соединительного провода 5 рис.9.3, б. Это может иметь смысл при высокой электропроводности грунта или воды, когда ток слишком большой. В поле блуждающих токов в эту цепь могут включать и полупроводниковый вентиль, не препятствующий прямому току и обеспечивающий запираение цепи для блуждающего тока, направленного с трубопровода в землю.

9.3.2. Активаторная засыпка

Активатор 3 на рис.9.3,б предназначен для обеспечения *равномерности* растворения протектора и уменьшения сопротивления растеканию. В табл.9.6 приводятся составы некоторых порошковых активаторов для применения в грунтах различной электропроводимости.

Таблица 9.6

ρ , Ом·м	Магниевые протекторы				Цинковые протекторы		
	Гипс, %	Бентонит, %	Трепел, %	Na ₂ SO ₄ , %	Гипс, %	Бентонит, %	Na ₂ SO ₄ , %
< 20	65	15	15	5	25	75	-
	25	75	-	-	50	45	5
20...100	70	10	15	5	75	20	5
	75	20	-	10	-	-	-
>100	65	10	10	15	-	-	-
	25	50	-	25	-	-	-

Гипс (CaSO₄·H₂O) препятствует образованию на поверхности протектора плохо проводящей корки, что способствует равномерному растворению.

Бентонит и трепел - минерализованная глина - удерживают влагу и замедляют растворение солей, поддерживая тем самым постоянную проводимость слоя.

Глауберова соль (Na₂SO₄·10H₂O) уменьшает удельное сопротивление активатора.

Стандартным активатором считается состав, выделенный жирно в табл.9.6. Удельное электрическое сопротивление такой массы в приготовленном состоянии $\rho_a = 0,5...1,5$ Ом·м.

9.3.3. Размещение протекторов

Протекторная установка - это один или несколько протекторов, включенных группой. На рис.9.4 показано устройство некоторых видов протекторных установок.

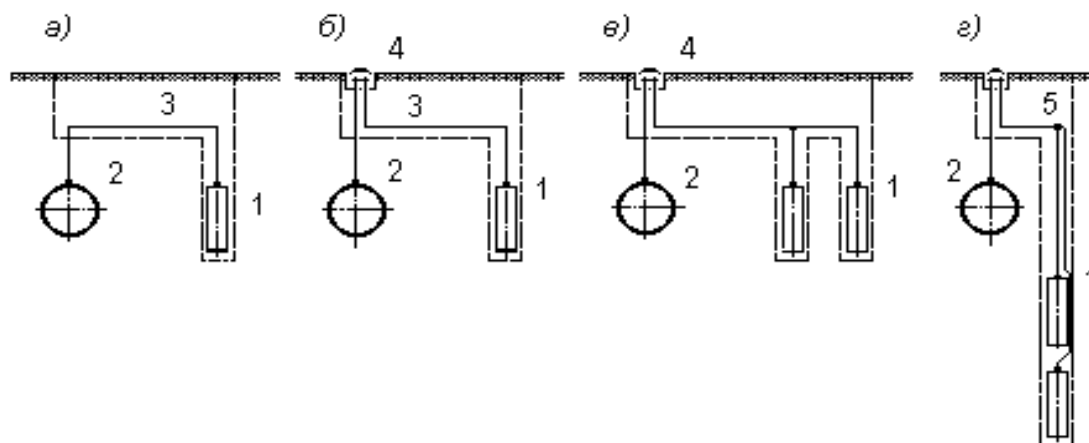


Рис.9.4. Виды протекторных установок: а - короткозамкнутая; б - контролируемая по току (с КИПом); в - групповая с N протекторами вдоль трассы; г - групповая под трубопроводом в скважине. 1- протектор; 2- трубопровод; 3 - изолированный соединительный провод; 4 - контрольно-измерительный пункт под ковром или в колонке; 5- скважина.

Неконтролируемые протекторные установки (рис.9.4,а) применяют в системе протекторной защиты из расчета примерно 5 неконтролируемых установок на одну контролируемую (рис.9.4,б). Групповые установки целесообразны при плохом качестве изоляции трубопровода, когда ток одного протектора недостаточен. Групповую установку по рис.9.4,г удобно применить в стесненных городских условиях.

Расстояние протектора от трубопровода выбирают обычно равным 3...5 м, глубину заложения - на уровне трубопровода. Шаг между протекторными установками определяют расчетом.

В строительные работы входит бурение неглубокой скважины для протектора и рытье траншеи для соединительного провода. Протектор, если он в комплекте с активатором, опускают в скважину вместе с мешком и засыпают с утрамбовкой и увлажнением. Изготовленная таким образом установка развивает свой максимальный ток только спустя несколько дней.

Величина тока протекторной установки ($I_{пр}$) зависит от сопротивления цепи “протектор-земля-сооружение”. Для изолированных трубопро-

водов обычно $I_{\text{пр}} = 20 \dots 200$ мА. При защите таких сооружений как резервуары с высокоминерализованной водой и без изоляционных покрытий стенок ток установки может быть очень большим, достигая 2 А.

9.4. Расчет протекторной защиты

Расчет и проектирование протекторной защиты трубопровода целесообразно выполнять, используя пакет программ АРМ ЭХЗ-7П. При оценочных расчетах возможно применение простейших формул.

Задача расчета может быть в двух постановках:

- ток протекторной установки задан, требуется определить количество протекторов;
- требуется определить фактический ток, который будет генерировать протекторная установка.

9.4.1. Расчет при заданном токе протекторной установки

Пусть в процессе расчета трубопроводной сети в оптимизационном режиме (код $M=1$) оказалось, что одна из установок ЭХЗ, рекомендованных компьютером, должна иметь относительно небольшой ток, например, $I_{\text{скз}} = 0,2$ А. Такую катодную станцию целесообразно заменить групповой протекторной установкой.

9.4.2. Расчет гальванической пары протектор-трубопровод

Ток отдельного протектора или протекторной установки, а также распределение потенциала защиты, вызванного этим током, следует определять с помощью программы в режиме $M=2$ “Гальваническая пара” комплекса АРМ-ЭХЗ-7П. Этот расчет является более полным по сравнению с расчетом по пп.9.4.1.

При вычислении тока в этом режиме задают стационарные потенциалы труба-земля $U_{\text{защ}}$ и протектор-земля $U_{\text{пр}}$ до включения протекторной защиты. Искомое распределение защитной плотности тока (j) находят из системы уравнений (6.27), корректируя ее для гальванической пары, т.е.

при условии отсутствия сосредоточенных нагрузок ($\mathbf{J} = 0$) и при наличии гальванической неоднородности сети ($\varphi_{\text{ст}} = \text{var}$).

В этом режиме рассматривают *эквивалентную трубопроводную сеть*, в которой протекторная установка - *часть* гальванически неоднородной трубопроводной сети, причем $\varphi_{\text{ст}} = U_{\text{пр}}$ - для протекторной, $\varphi_{\text{ст}} = U_{\text{заш}} -$ для трубопроводной части эквивалентной сети.

Здесь нет необходимости в вычислении сопротивления растеканию протекторной установки, а также входного сопротивления трубопровода - эти параметры автоматически учтены при формировании *матрицы взаимных влияний* $\mathbf{A}$. Ток отдельного протектора или установки ($I_{\text{пр}}$) определяют по вычисленной плотности тока (j), интегрируя по длине протектора.

В режиме расчета $M=2$ можно учесть такие особенности как конфигурация защищаемого трубопровода, влияние расположения протектора, например, непосредственно у поверхности трубы, взаимное влияние протекторов при их произвольном расположении в группе и прочие особенности, которые не поддаются учету при использовании известных методов расчета.

После определения тока *типичной* протекторной установки, если таких установок в защищаемой сети не одна, можно вернуться к методике $M=2$ “Токи защитных установок заданы”, что позволит решить задачу *распределения потенциала* в трубопроводной сети с любым числом протекторных установок и различными интервалами их размещения вдоль участков сети.

9.4.3. Оценочный расчет протекторной защиты

Существующие приближенные методы расчета протекторной защиты, не использующие АРМ ЭХЗ-7П, строятся на расчетной формуле типа закона Ома. При этом вводят понятие действующего напряжения $U_{\text{д}}$, которое для магниевого протектора принимают равным $U_{\text{д}} = 0,6$ В, для цинкового - $U_{\text{д}} = 0,2$ В и которое играет роль э.д.с. гальванической пары. Упрощая известные формулы для сопротивления растеканию протектора, приходят к весьма простым формулам. Так, для вычисления тока ($I_{\text{пр}}$) протектора типа ПМ20У предлагается формула

$$I_{\text{пр}} = U_{\text{д}} / R_{\text{пр}} = 0,6 / (0,4\rho) = 1,5/\rho, \text{ А} . \quad (9.4)$$

Далее, задаваясь средним значением плотности тока защиты трубопровода ($j_{\text{ср}}$), определяют суммарный ток протекторной защиты (I_{Σ}) для рассматриваемого участка трубопровода

$$I_{\Sigma} = j_{\text{ср}} \cdot S_{\Sigma}, \quad (9.5)$$

где S_{Σ} - площадь поверхности защищаемого трубопровода, после чего определяют количество (n) протекторов

$$n = I_{\Sigma} / I_{\text{пр}}. \quad (9.6)$$

Метод расчета *по средней защитной плотности тока* разработан сотрудниками АКХ им.К.Д.Памфилова. При удачно выбранной величине $j_{\text{ср}}$ формулы обеспечивают приемлемую точность расчета.

Пример расчета 1

Пусть участок трубопровода рис.9.5 диаметром $d = 100$ мм на одном конце имеет изолирующее фланцевое соединение, а на другом связан с существующей трубопроводной сетью. Стационарный (защитный) потенциал трубопровода принят везде равным $U_{\text{ст}} = U_{\text{заш}} = -0,75$ В в предположении, что рассматриваемый участок *недозащищен* катодными станциями, установленными в существующей сети.

Изоляция трубопровода принята удовлетворительной при $R_{\text{из}} = 100$ Ом·м, удельное электрическое сопротивление грунта - $\rho = 20$ Ом·м.

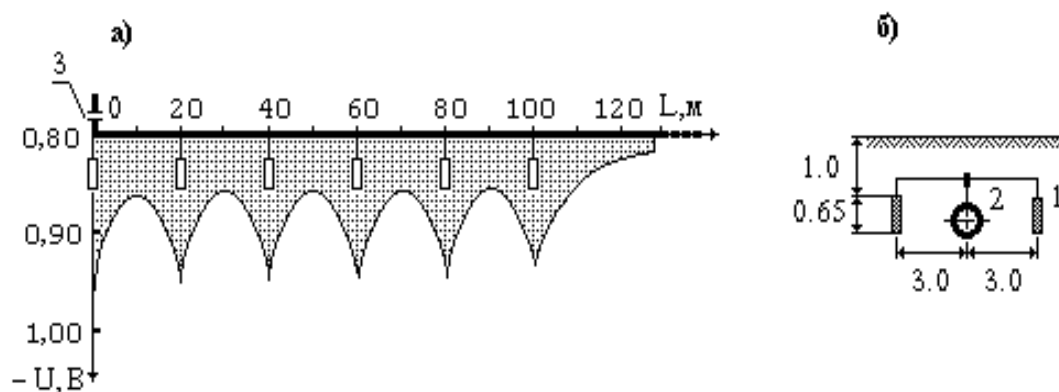


Рис.9.5. Эпюра разности потенциалов труба-земля (а) при протекторной защите трубопровода с установками по схеме (б): 1- протектор; 2 - трубопровод; 3 - изолирующее фланцевое соединение.

Для защиты выберем магниевые протекторы ПМ-20 средним диаметром стержня $d = 175$ мм, длиной $l = 650$ мм, стационарным потенциалом $U_{\text{пр}} = -1,5$ В, заглубленным до уровня укладки трубопровода $h = 1$ м. Пусть одна протекторная установка состоит из *двух протекторов*, размещенных по ту и другую стороны трубопровода на расстоянии 3 м от него. Задача заключается в определении количества протекторных установок и интервала между ними для защиты участка трубопровода.

Этап 1. Определение величины тока протекторной установки.

Рассмотрим схему с *одной парой* протекторов, подключенных к трубопроводу у изолирующего фланца. При подготовке расчетной схемы на этом этапе каждый протектор совместно с соединительным проводом заменим *эквивалентным трубопроводом*, соединенным с основным трубопроводом в точке дренажа. Параметры участков эквивалентного трубопровода определим следующим образом.

Удельное поляризационное сопротивление магниевого протектора, судя по графику рис.9.2, *a*, весьма мало и составляет:

$$P_a = (1,54 - 1,51) / (5 - 1) = 0,0075 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2.$$

Поэтому удельное (линейное) сопротивление изоляции этого участка эквивалентного трубопровода должно быть равно

$$R_{\text{из}} = P_a / (\pi d_a) = 0,0075 / (3,14 \cdot 0,280) \approx 0,01 \text{ Ом}\cdot\text{м},$$

где d_a - диаметр протектора с активатором.

Удельное сопротивление изоляции другого участка эквивалентного трубопровода - изолированного от земли соединительного провода - следует взять большим, например, равным $R_{из}=10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Его эквивалентный диаметр и толщину стенки можно при желании подобрать так, чтобы продольное сопротивление этого участка было бы равно продольному сопротивлению реального кабеля или провода.

Основной трубопровод был разбит на отрезки дискретизации с увеличивающимся по мере удаления от точки дренажа шагом $\Delta L = 3,6,12,\dots,2000 \text{ м}$. Эквивалентный трубопровод, заменяющий протектор, разбит на 3 отрезка дискретизации с узлами дискретизации соответственно вверху, в центре и внизу протектора, а эквивалентный трубопровод, заменяющий соединительный провод, представлен одним участком с узлом, расположенным между протектором и трубопроводом.

При включении одной пары протекторов в начале трубопровода (при $L=0$) у изолирующего фланцевого соединения, зона действия защиты составила всего лишь 5 м с разностью потенциалов труба-земля $U_{защ} = -0,938 \text{ В}$ (по МЭС) в точке $L = 0$ и $U_{защ} = -0,845 \text{ В}$ - в точке $L = 6 \text{ м}$. Ток каждого из протекторов при этом был равен $I = 0,112 \text{ А}$. Величина тока была определена интегрированием токов вдоль протектора.

Этап 2. Определение количества протекторных установок

Для того, чтобы уменьшить затраты ручного труда по формированию расчетной схемы при большом количестве протекторных установок, заменим их эквивалентными катодными станциями с токами, определенными на первом этапе расчета. К тому же это ускорит анализ *вариантов размещения* протекторных установок. С этой целью точечные аноды-протекторы были - после пробных оценок - расставлены попарно вдоль трассы трубопровода с интервалом 20 м и нагружены каждый из них током $I = 0,112 \text{ А}$.

На рис.9.5 показана эпюра потенциала, определенная расчетом.

Если при одной протекторной установке плечо защиты не превышает 5 м, то в группе из 6-ти установок это плечо уже в два раза больше.

Пример расчета 2

В табл.9.7 приведены результаты расчета протекторной защиты короткой трубы - защитного футляра газопровода, прокладываемого, например, под автомобильной дорогой.

Диаметр футляра равен 600 мм, его длина - 40 м, глубина заложения до оси - 2 м, удельное электрическое сопротивление грунта - 20 Ом·м, удельное электрическое сопротивление изоляции трубы - 25 Ом·м.

Таблица 9.7

Продольная координата, м	Стационарный потенциал, В	Защитный потенциал, В			
		один протектор	по 2 протектора на концах	контакт с защищенным трубопроводом	контакт с незащищенным трубопроводом
0	- 0,55	- 0,723	-1,107	-1,141	-0,845
10	- 0,55	- 0,642	-0,849	-0,880	-0,643
20	- 0,55	- 0,630	-0,828	-0,853	-0,625
30	- 0,55	- 0,628	-0,849	-0,883	-0,644
40	- 0,55	- 0,647	-1,107	-1,156	-0,847

При этом рассмотрены варианты ситуации:

- 1) футляр изолирован от газопровода или
- 2) футляр связан с газопроводом электрически за счет случайного контакта.

В последнем варианте газопровод:

- а) уже защищен электрохимически или
- б) незащищен, в то время как футляр уже защищен четырьмя протекторами.

Как следует из табл.9.7, *четырёх протекторов для защиты футляра достаточно*, если к тому же он надёжно связан электрически с газопроводом.

В табл.9.8 приведены результаты расчета протекторной защиты того же футляра в зависимости от расстояния до протектора (y_a). Даны значения разности потенциалов труба-земля в двух точках: в начале (U_1) и в середине (U_3) трубопровода.

Таблица 9.8

При $R_{из} = 25 \text{ Ом}\cdot\text{м}$						При $R_{из} = 250 \text{ Ом}\cdot\text{м}$		
$y_a, \text{ м}$	$U_1, \text{ В}$	$U_3, \text{ В}$	$y_a, \text{ м}$	$U_1, \text{ В}$	$U_3, \text{ В}$	$y_a, \text{ м}$	$U_1, \text{ В}$	$U_3, \text{ В}$
1	-1,461	-0,717	8	-1,002	-0,865	0,5	-1,007	-0,824
2	-1,195	-0,800	10	-0,992	-0,870	1	-0,940	-0,846
3	-1,107	-0,828	15	-0,982	-0,877	2	-0,904	-0,855
4	-1,064	-0,842	20	-0,979	-0,879	3	-0,895	-0,860
5	-1,038	-0,851	50	-0,978	-0,880	5	-0,889	-0,866
6	-1,022	-0,857	∞	-0,978	-0,880	∞	-0,879	-0,866

Из табл.9.8 следует, что предпочтительнее устанавливать протекторы на расстоянии $y_a \geq 5 \text{ м}$ от трубы, если трубопровод - с плохой изоляцией. Если же изоляция хорошая, то можно существенно уменьшить это расстояние. Но поскольку изоляция стареет и разрушается, то можно рекомендовать повсеместно $3 \leq y_a \leq 6 \text{ м}$.

Глава 10. Электродренажная защита

10.1. Общие сведения

Дренажом в мелиорации называют отвод грунтовых вод, а в теории и практике электрохимической защиты - *отвод блуждающих токов*. Есть, кстати, и в медицине дренажные системы.

В главе 4 показано, что блуждающие токи рельсового электротранспорта являются той частью тягового тока, которая возвращается к своему источнику - тяговой подстанции - по земле. Стекает ток в землю вдалеке от тяговой подстанции, а натекает на рельсы - вблизи нее. Стекающий (анодный) ток поляризует рельсы положительно ($\Delta U_p > 0$), натекающий - отрицательно ($\Delta U_p < 0$), причем наиболее отрицательный потенциал наблюдается на рельсах в точке подключения тяговой подстанции, наиболее положительный - на границе зоны питания данной и соседней тяговых подстанций.

В трубопроводной сети, наоборот, *вблизи тяговой подстанции блуждающий ток стекает с трубопровода, разрушая его*. При этом трубопровод поляризуется положительно. Действительно, если ток стекает с трубопровода, то его потенциал (φ_T) больше потенциала ближайшей точки земли (φ_3) и, следовательно, $\Delta U_T = \varphi_T - \varphi_3 > 0$. Вдали от тяговой подстанции трубопровод получает отрицательное или катодное смещение и, следовательно, - независимо от нашего желания - здесь трубопровод электрохимически защищается.

На рис.10.1 приведены типичные картины распределения смещения потенциала трубопровода (ΔU_T) в поле блуждающих токов при отсутствии электродренажной защиты и при ее включении.

Задача электродренажной защиты - распорядиться блуждающим током так, чтобы обеспечить катодное состояние на всем протяжении трубопровода, а не только на участке вдалеке от тяговой подстанции.

Соединим вблизи тяговой подстанции трубопровод с рельсами *дренажной перемычкой* - кабельной линией (рис.10.1,б). Ток, ранее стекавший с трубопровода в землю, теперь будет отводиться из нее “организованно”, т.е. по перемычке.

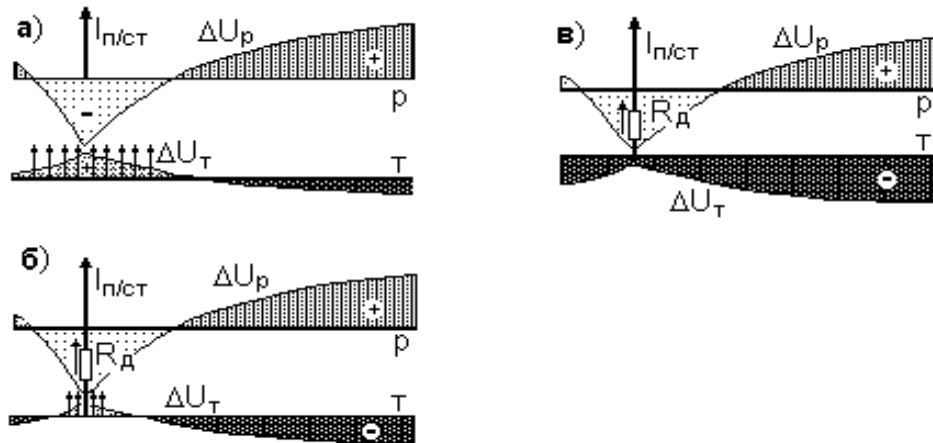


Рис.10.1. Эпюры смещения потенциала на рельсах (p) и трубопроводе (T) без защиты (a), с высоким ($б$) и низким ($в$) значениями сопротивления дренажной цепи R_d .

Казалось бы, *задача электродренажа - отвести ток*, решена. Остается в дренажную перемычку R_d включить *амперметр* - для контроля, *предохранитель* - для безопасности от очень больших токов, *рубильник* - для оперативного управления - и *электродренажная установка* укомплектована.

Что касается рубильника, то здесь все ясно. Но возможно ли отвести *весь* ток, попавший на трубопровод? Ведь ток может возвращаться к рельсам не только по перемычке, как нам хотелось бы, но и по земле, т.е. двумя параллельными путями, что и показано на рис.10.1,б. Дренаж может оказаться не очень эффективным.

Действительно, возьмите в качестве дренажного кабеля *тонкую* проволоку и никакого защитного эффекта не получите, поскольку дренируемый ток в этом случае будет *слишком мал* из-за высокого электрического сопротивления дренажного провода.

Но вообразите кабель *бесконечно большого сечения* так, чтобы падением напряжения в нем вообще можно было бы пренебречь. В этом слу-

чае трубопровод в точке дренажа ничем не будет отличаться *по потенциалу* от рельсов по другую сторону перемычки. *Трубопровод* превратится как бы в *часть рельсовой сети*. И поскольку на рельсы в районе перемычки ток *натекает* (так как дренаж, по нашему условию, установлен вблизи тяговой подстанции), то и на трубу, как часть рельсов, ток также будет только *натекать*. Этим доказана принципиальная возможность электродренажной защиты вообще: *при достаточно малом сопротивлении дренажной цепи ток на трубу - только натекающий* (рис.10.1,в).

Мы вообразили дренажный кабель *бесконечно большого сечения* или лучше сказать - *предельно малого сопротивления*. Можно с уверенностью предположить, что в этом случае дренажный ток, а также и защитное смещение потенциала трубопровода (ΔU_T), будут *предельно большими*.

Далее остается подобрать оптимальное сечение дренажного кабеля в зависимости от требуемой величины смещения ΔU_T .

Если ток велик, то в дренажную цепь включают *регулировочный реостат*, посредством которого в процессе наладки снижают ток и, следовательно, уменьшают величину ΔU_T . Разумеется, при этом предварительно выполняют расчет оптимального сопротивления дренажной цепи R_d и подбирают кабель достаточно малого сечения.

Если напротив дренажный ток мал и недостаточен для защиты при любом большом сечении кабеля, то или отказываются от применения электродренажа вообще и применяют катодную станцию, или же в дренажную цепь включают *дополнительный источник тока*, т.е. опять же используют некую катодную станцию, встроенную в электродренажную цепь.

10.2. Схемы электродренажной защиты

Электродренажи в зависимости от их схемы бывают трех типов:

- *прямые*;
- *поляризованные* ;
- *усиленные*.

Применение того или иного типа определяется прежде всего местом включения дренажа в рельсовой сети. На рис.10.2 представлены три случая включения, характерные для электродренажной защиты.

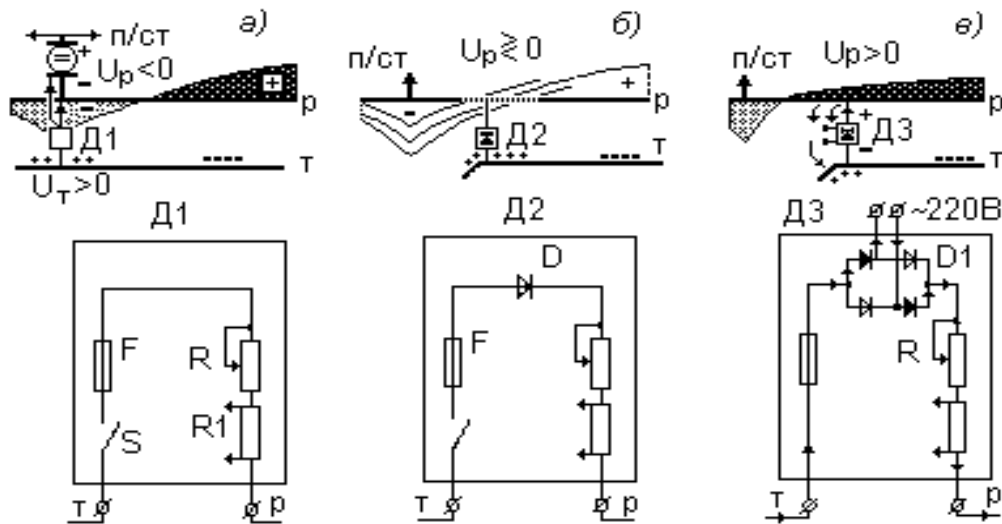


Рис.10.2. Ситуационные условия включения прямого (а), поляризованного (б) и усиленного (в) электродренажей, где Д1...Д3 - соответствующие электрические схемы электродренажных устройств: S - рубильник; F - плавкий предохранитель; R - регулировочный реостат; $R1$ - шунт (калиброванное сопротивление) для измерения тока; D - блок силовых диодов (вентилей); $D1$ - регулируемый выпрямитель сетевого тока; п/ст - тяговая подстанция; τ, p - трубопровод и рельсы.

10.2.1. Прямой электродренаж

Прямой электродренаж (рис.10.2, Д1) применяют при условии

$$U_p < U_T, \quad (10.1)$$

где U_p, U_T - разности потенциалов рельс-земля и труба-земля соответственно.

Эта ситуация, как правило, имеет место в непосредственной близости от тяговой подстанции - в зоне устойчивого отрицательного потенциала на рельсах.

Вместо условия (10.1), конечно, более корректно неравенство $\phi_p < \phi_T$, где ϕ_p и ϕ_T - есть потенциалы рельсов и трубопровода относительно “далекой” земли (см., например, формулу (4.1)).

Применение прямого дренажа далеко не всегда допускается. Потенциал рельсов, даже непосредственно у тяговой подстанции, может, хотя бы на короткое время, менять свой знак. Это связано с характером тяговой нагрузки: она *нестабильна и во времени, и в пространстве*, как нестабильно положение электропоезда на линии и его токовая нагрузка в процессе движения. В этом случае прямой дренаж небезопасен, поскольку *изменение знака потенциала рельсов ведет к изменению направления тока в дренажной цепи*: ток пойдет не из трубопровода, а в трубопровод с тем, чтобы где-то все же выйти из него в землю. В этом случае следует от прямого дренажа перейти к *поляризованному*.

10.2.2. Поляризованный электродренаж

Поляризованный электродренаж применяют при условии

$$U_p \lessgtr U_t \quad (10.2)$$

т.е. *при знакопеременной разности потенциалов рельс-труба*.

На рис.10.2,б проиллюстрирована причина возникновения ситуации (10.2).

В рельсовой сети на границе анодной и катодной зон находится так называемая *точка нулевого потенциала*, в которой $U_p = 0$ - по стальному электроду сравнения – или, в общем случае, $U_p = U_{ст.р.}$, где $U_{ст.р.}$ - стационарный потенциал рельсов. Однако эта точка непрерывно меняет свое положение, поскольку непрерывно меняет свою конфигурацию эпюра потенциала U_p . При перегрузке или недогрузке одного из участков падение напряжения вдоль рельсовой линии будет меняться и нулевая точка будет смещаться в ту или другую сторону (см. пунктирный участок рельсов). Если в районе нулевой точки подключен дренаж, то при $U_p > U_t$ в его цепи обязательно возникнет *обратный ток* - из рельсов в трубопровод, что не приведет ни к чему иному, кроме как к успешному разрушению трубопровода.

Другая причина возникновения знакопеременности потенциала рельсов в точке дренажа заключается в следующем.

Пусть в районе данной тяговой подстанции к рельсам подключен мощный электродренаж или даже несколько дренажей владельцев различных подземных хозяйств. При подключении нового дренажа рельсы

приобретают дополнительное *положительное смещение* потенциала (также как трубопровод - отрицательное).

Пусть эти дренажи подключены непосредственно к *минус-шине* тяговой подстанции, что нормами разрешается, если потенциал рельсов недостаточно отрицателен (см. рис.10.2,а).

Минус-шина - наиболее отрицательная точка системы отсасывающих (обратных) кабелей подстанции. К ней сходятся все отсасывающие кабели, идущие от различных участков рельсовой сети.

Положительное смещение потенциала минус-шины при подключении к ней очередного дренажа вызывает положительное смещение потенциала в рельсах в точках отсоса и может вызвать изменение знака потенциала U_p . Действительно, в отсасывающих кабелях, связывающих минус-шину с рельсами, может иметь место большое падение напряжения. Так, если потенциал минус-шины после подключения дренажей стал равен -5 В, а падение напряжения в кабеле составляет 6 В, то рельсы в точке подключения отсасывающего кабеля будут иметь положительный потенциал $U_p = +1$ В.

Таким образом, угроза появления положительного потенциала на рельсах в точке дренажа делает опасным включение прямого дренажа. В этом случае применяют *поляризованные электродренажи - устройства, обеспечивающие одностороннюю проводимость дренажной цепи*.

На схеме Д2 рис.10.2 показана схема поляризованного электродренажа. Отличается он от прямого тем, что в него включен полупроводниковый *диод* D или блок диодов, благодаря которому при $U_T > U_p$ дренажная цепь работает, а при $U_p > U_T$ она автоматически разрывается.

Правда, при этом электродренажная защита перестает действовать: нет обратного тока, но нет и прямого, защитного. Если временный промежуток, когда дренажная цепь разорвана, относительно невелик, то работа поляризованного дренажа считается эффективной. Если дренаж больше отключен, чем включен, то вместо поляризованного применяют так называемый *усиленный дренаж*, который рассмотрен ниже.

Из существующих отечественных поляризованных электродренажей получили распространение два - ПД-3А и ПГД.

Электродренаж ПД-3А рассчитан на номинальный ток 500 А с допустимой перегрузкой до 1000 А в течение не более 30 с. Выпрямительный блок состоит из 6 параллельно включенных кремниевых диодов (вентилей). Из-за резко нелинейной вольтамперной характеристики кремниевых

го вентиля дренаж полностью открывается лишь при напряжении, превышающем 0,7 В. Электродренаж включает в себя блок регулировочного сопротивления из 4-х секций, имеет габариты 820х410х31 мм, массу 30 кг.

Электродренаж ПГД выпускается в трех модификациях: ПГД-60М, ПГД-100М и ПГД-200М на 60,100 и 200 А соответственно. Регулировочное сопротивление выполнено из 10 секций по 0,05 Ом каждая. Габариты дренажного шкафа - 665х365х285 мм.

10.2.3. Усиленный электродренаж

Условие применения усиленного электродренажа (см.рис.10.2,в)

$$U_p > U_t, \quad (10.3)$$

т.е. при преобладании положительного знака U_p в знакопеременной зоне, когда поляризованный дренаж уже не эффективен.

Усиленный дренаж - это не традиционный дренаж, как устройство для отвода блуждающего тока. Это фактически *катодная станция*, у которой рельсы являются анодным заземлителем, а источником питания - электрическая сеть напряжением 220 В. Усиленный дренаж - это выпрямитель сетевого переменного тока (см. рис.10.2,Д3).

Сетевой ток - после преобразования и выпрямления - поступает от “плюса” дренажа в рельсы, затем из них - в землю, после чего - *на трубопровод* и, далее, - к “минусу” своего источника. *Защищает* трубопровод *сетевой ток совместно* с дренажным током, если он в этот момент протекает в данной дренажной цепи.

На схеме ДЗ рис.10.2 показано направление выпрямленного тока в один из полупериодов работы сети. В другой полупериод, очевидно, будет то же самое, но в работу включится другая пара диодов.

Рельсы - “жертва защиты”, поскольку они, как и положено аноду, разрушаются. Владельцы рельсового хозяйства обычно не возражают, во-первых, потому, что рельсы и без того разрушаются, так как на рельсах в этом районе - анодная зона, и, во-вторых, механический износ головки рельса идет быстрее электрохимического растворения подошвы рельса.

При подключении усиленного дренажа к рельсам *электрифицированной железной дороги* (не трамвая) руководствуются рядом ограничений. Так, не допускают появление устойчивого положительного потен-

циала в рельсах в точках отсоса, не допускают подсоединение дренажей непосредственно к рельсам. Дренажи подключаются к *средним точкам путевых дросселей* (между двумя катушками, соединяющими рельсы одной колеи и предназначенными для обслуживания цепей сигнализации и управления (СЦБ)).

Современные усиленные электродренажи имеют цепи автоматического управления для поддержания заданного защитного потенциала в точке дренажа. Иногда устанавливают дополнительный анодный заземлитель и автоматически переключаются на него в тот момент, когда на рельсах возникает слишком высокий положительный потенциал.

10.3. Расчет дренажной защиты

10.3.1. Общие требования к расчетной схеме

Расчет распределения блуждающих и защитных токов в системе рельсовая сеть-земля-трубопроводная сеть выполняют по программам АРМ ЭХЗ-7П. Для оценочных расчетов имеются эмпирические формулы.

Задача расчета распределения блуждающего тока и токов электродренажной защиты есть сетевая задача в наиболее полной форме и представляется системой

$$(\mathbf{B}\mathbf{A} - \mathbf{E})\mathbf{j} = \mathbf{J} - \mathbf{B}(\varphi_z + \varphi_{\text{ст}}), \quad (10.4)$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}_{\text{из}} \mathbf{j} + \mathbf{U}_{\text{ст}}.$$

Расчет начинают с подготовки *расчетной схемы* нагруженной рельсовой сети, с приемлемой точностью задающей потенциальное поле токов в земле φ_z .

Как показывают расчеты - и это не противоречит натурным данным, - на формирование потенциала трубопровода могут оказать влияние участки рельсовой сети, отстоящие от рассматриваемой точки на многие километры. Но если исследуемый трубопровод имеет протяженность всего лишь 1 км, то возникают сомнения: стоит ли учитывать далекую многокилометровую рельсовую линию, если в результате сравнения точного и

приближенного расчетов выявится потеря точности, например, на уровне 0,05 В ?

К тому же проектировщик, занимающийся данной территорией и располагая материалами электрических измерений на существующих трубопроводных сетях, может оценить интенсивность поля блуждающих токов, например, по амплитуде колебаний разности потенциалов труба-земля в точке врезки проектируемого участка. Даже исходя из этих данных уже можно прогнозировать будущее состояние исследуемого трубопровода.

Для сложных неподдающихся предварительному анализу ситуаций можно, повидимому, руководствоваться следующими правилами:

учитываемая рельсовая сеть по протяженности должна превышать максимальную протяженность рассматриваемого трубопровода в 2...3 раза;

верхний предел протяженности учитываемой рельсовой сети в большинстве реальных ситуаций не превышает расстояния между соседними тяговыми подстанциями.

И вообще, в ситуации с рельсами вполне приемлемо правило: *лучше длиннее, чем короче*. Тем более, что шаг дискретизации на удаленных участках расчетной схемы рельсовой сети можно допустить весьма значительным.

10.3.2. Шаг дискретизации рельсовой линии

Сразу же следует подчеркнуть, что задача выбора шага дискретизации (ΔL_p) для рельсовой сети решается с использованием тех же правил, что и для трубопроводной сети (см. главу 7). И поэтому можно без какого-либо обоснования согласиться с тем, что минимальное значение шага дискретизации для рельсовой сети, как и магистрального трубопровода, равно $\Delta L_{p.min} = 200$ м.

Максимальное значение шага ($\Delta L_{p.max}$) определяется прежде всего характером изменения потенциала вдоль рельсовой линии. Так, если рас-

стояние между соседними тяговыми подстанциями 25...35 км, что соответствует сетям магистральных железных дорог, то и средний шаг дискретизации на этом участке может быть взят равным $\Delta L_{p.\max} = 2...4$ км, т.е. может быть принята расчетная схема с $N_p \geq 10$ узлами дискретизации.

При выборе значения $\Delta L_{p.\max}$ можно исходить, например, из следующего: достаточно ли плавная кривая будет начерчена в том случае, когда вы строите эпюру разности потенциалов рельс-земля по N_p точкам? Если да, то, вероятно, N_p и есть минимальное число узлов дискретизации.

Более сложная ситуация складывается, очевидно, при анализе городских условий, когда расстояние между подстанциями порой уменьшается до 1...2 км, к тому же рельсовая сеть разветвлена, а градиент потенциалов вдоль рельсовой линии достигает 10 В /км. Но и здесь подходит тот же критерий оценки:

минимум точек, необходимых для построения гладкой кривой, есть минимум узлов дискретизации.

Разумеется, имеется в виду, что "гладкую" кривую следует строить по средним, но не мгновенным значениям потенциала. Порой наблюдаемая в действительности амплитуда изменений потенциала во времени не укладывается в рамки здравого смысла (например, ± 20 В !). Но это не должно особенно беспокоить проектировщика по ЭХЗ, поскольку коррозию определяют далеко не мгновенные значения токов и потенциалов.

Таким образом, учитывая возможность применения резко неравномерного шага, максимальный шаг дискретизации рельсовой сети железных дорог может быть принят равным $\Delta L_{p.\max} = 4000$ м.

Для городского трамвая можно принять $\Delta L_{p.\max} = (0,1...0,2) L_p$, где L_p - расстояние между соседними тяговыми подстанциями.

10.3.3. Погрешность поля дискретного проводника

При построении расчетной схемы рельсовой сети возникает вопрос об оптимальном положении того или иного узла дискретизации рельсов относительно ближайших узлов дискретизации трубопровода.

Рельсовая сеть моделируется не ради ее самой. Проектировщика, занимающегося вопросами ЭХЗ, распределение потенциала в рельсах в конечном счете не интересует (разумеется за исключением случаев, когда

заказчиком выступает трамвайно-троллейбусное управление). Рельсовая сеть - источник поля токов в земле и эту функцию дискретная модель рельсовой сети, т.е. ее расчетная схема, должна выполнять достаточно строго.

При дискретном представлении проводника с утечкой, каковым является рельсовая линия, каждый отрезок дискретизации - это линейный источник с неизменной плотностью тока. Такое допущение и вызывает погрешность.

Потенциал дискретного проводника $\varphi_p(L)$ меняется скачком на границе двух соседних отрезков дискретизации. Этого же можно ожидать и с потенциалом земли $\varphi_z(L)$ в непосредственной близости от проводника в районе стыка двух отрезков дискретизации. Но если рассматривать точки земли не очень близкие к проводнику, то при перемещении вдоль той же продольной оси L кривая потенциала земли $\varphi_z(L)$ будет скорее немонотонной, но уже не ломаной.

На кривой $\varphi_z(L)$ можно будет отметить две точки перегиба: а) на границе между отрезками дискретизации и б) против их центров. По мере продвижения вдоль линии L скорость изменения потенциала земли в одной из точек перегиба начнет увеличиваться (в области против центра отрезка), а в другой - уменьшаться (на стыке). В результате этого кривая потенциала земли будет волнообразной и, следовательно, многократно пересекаться с кривой *истинного* значения потенциала, соответствующего идеальному проводнику с утечкой, т.е. проводнику с равномерно распределенными параметрами. В точках пересечения кривых погрешность моделирования равна нулю. Очевидно, что эти точки находятся в непосредственной близости от точек перегиба, т.е. против центра и на стыке.

Таким образом, при определении взаимного положения узлов дискретизации рельсов и трубопровода следует иметь ввиду, что

наименьшая погрешность - в точках против центров отрезков дискретизации и на границах между ними.

Естественно, по мере удаления исследуемой трассы (трубопровода) от дискретного источника токов (рельсов) кривая изменения потенциала земли будет все более сглаживаться и, как показывают оценки, при расстоянии между ними ($L_{т-р}$) более одного шага дискретизации ΔL_p практически эти колебания уже незаметны, т.е.

при $L_{т-р} > \Delta L_p$ погрешностью дискретизации можно пренебречь.

10.3.4. Конфигурация расчетной схемы рельсовой сети

Неразветвленная рельсовая линия

Приняв во внимание рекомендации о длине отрезка дискретизации и оптимальном положении этого отрезка относительно трубопроводной сети, следует приступить к построению расчетной схемы.

Расчетная схема рельсовой сети составляется по правилам, несколько отличным от правил для трубопроводов. Если при подготовке исходных данных для трубопроводной сети компьютер требует от пользователя сведения о *цепях связи* для каждого из узлов дискретизации, то в рельсовой сети по умолчанию принимают, что каждый последующий узел дискретизации связан только с предыдущим. Это упрощение оправдано логикой программиста и нисколько не мешает пользователю, даже если рельсовая сеть разветвлена или в рассматриваемой области две-три не связанных друг с другом рельсовые сети, например, электрифицированная железная дорога и трамвай. Ниже рассмотрены эти ситуации.

И еще очень важное предварительное замечание, обусловленное особенностью пакета программ АРМ-ЭХЗ-7П. Для каждого узла дискретизации рельсовой сети *задается его потенциал* U_p (не забыть, между прочим, что он должен быть измерен и задан относительно МЭС). В силу принятых допущений

потенциал в узле равен среднему потенциалу на отрезке дискретизации между данным узлом и следующим по номеру.

Т.е. необходимо помнить, что если задан потенциал, например, узла 8, то под этим же потенциалом находится отрезок дискретизации между узлами 8 и 9 (но не между узлами 8 и 7).

Поэтому расчет будет точнее, если вблизи некоторого, требующего особого внимания узла трубопроводной сети (например, в точке на пересечении с рельсовой линией), находится не узел 8 и не узел 9, а центр отрезка дискретизации { 8,9 }. К тому же это не расходится с рекомендациями пп.10.3.3.

Можно, разумеется, воспользоваться особенностью, наблюдаемой на стыке двух соседних отрезков дискретизации, где, как отмечено выше, также погрешность приближается к нулю. Но тогда следует помнить, что

на этом стыке потенциал рельсов равен среднему значению потенциалов соседних узлов. Это учитывается компьютером при расчете.

Принято, что самый последний отрезок дискретизации расчетной схемы рельсовой сети равен по длине предпоследнему и геометрически расположен как продолжение его в том же направлении.

Разветвленная рельсовая сеть

Рассмотрим особенности формирования расчетной схемы разветвленной рельсовой сети.

При создании программ АРМ-ЭХЗ-7П принято, что расчетная схема рельсовой сети - это неразветвленная цепь аналогичная цепи для магистрального трубопровода. Для того чтобы моделировать также и разветвленные рельсовые линии, поступают следующим образом.

Нумеруют узлы дискретизации расчетной схемы по какой-либо одной, основной рельсовой линии. Затем в узле ответвления вводят *очередной* номер и продолжают нумерацию далее вдоль ответвления. Узел ответвления имеет, таким образом, двойную нумерацию.

Пусть, например, узлы основной рельсовой линии имеют нумерацию от 1 до 9, а в узле 5 - ответвление. Совместим очередной узел 10 с узлом 5, т.е. в точке разветвления введем *двойную нумерацию*. Далее порядок нумерации оставим обычный - от узла 10 к концу ответвления.

Если в сети есть еще ответвления, то поступают аналогично, т.е. в общем случае

конец последнего пронумерованного участка связывают с началом нового ответвления и нумерацию продолжают.

Если в данной точке рельсовой сети два ответвления (крестообразное пересечение рельсовых линий), то точка разветвления должна иметь тройную нумерацию. В принципе возможна любая кратность нумерации.

Возникает закономерный вопрос о влиянии образовавшегося таким образом *фиктивного отрезка* дискретизации - участка, объединяющего конец основной рельсовой линии и начало ее ответвления.

Для того чтобы исключить это влияние, достаточно последнему на основной рельсовой линии узлу (разумеется, при наличии ответвления) присвоить потенциал равный нулю (при использовании АРМ-ЭХЗ-7П этот потенциал должен быть равен $-0,55$ В). Так, если потенциал узла 9 принять равным нулю (пример см. выше), то автоматически окажется рав-

ным нулю и потенциал всего участка дискретизации между 9-м и 10-м узлами. Это обеспечит нулевое значение тока на фиктивном участке дискретизации и, следовательно, отсутствие поля искажений.

Таким образом, при наличии ответвления необходимо, чтобы потенциал конечного узла основной линии, находящегося на связи с первым узлом ответвления, был равен нулю.

Аналогично подготавливают расчетную схему в случае моделирования смешанных рельсовых сетей. Пусть, например, учитываются одновременно рельсовые сети трамвая и электрифицированной железной дороги. Последовательность работы следующая.

А) Выполняют обычную нумерацию узлов одной из рельсовых линий в соответствии с методикой, изложенной выше. Пусть это будет, например, трамвайная линия с числом узлов в ней равным P .

Б) Последний узел дискретизации трамвайной линии соединяют с первым узлом дискретизации рельсов железной дороги, присваивая ему номер $P+1$, и продолжают нумерацию далее. Узел $P+1$ как начальный должен быть, разумеется, в начале рельсовой линии.

В) Задают нулевое значение тока фиктивного отрезка дискретизации $[P, P+1]$, т.е. принимают потенциал узла P равным $U_{ст.р.}$

10.3.5. Рельсовая линия как эквивалентный трубопровод

В предыдущих случаях в узлах дискретизации рельсов задавался потенциал U_p , который полагался измеренным и известным. Но может возникнуть необходимость расчета U_p по заданным токовым (тяговым) нагрузкам.

Пусть задано распределение токовых нагрузок в рельсовой сети, размещение тяговых подстанций и их токи. Требуется найти распределение потенциала рельсовой линии (U_p), как первый этап решения сетевой задачи для трубопроводной сети.

В этом случае рельсовую сеть заменяют *эквивалентным трубопроводом* и нагружают его *эквивалентными катодными станциями*, воспро-

изводящими тяговые нагрузки. При этом токи эквивалентных СКЗ, моделирующих рельсовую нагрузку, должны иметь знак "минус", а для тяговых подстанций - знак "плюс".

Анодный заземлитель у всех эквивалентных СКЗ должен быть один, положение его - произвольно. А поскольку нагрузка в тяговой сети уравновешена, то суммарный ток эквивалентного заземлителя окажется равным нулю.

Разумеется, такая методика приемлема, если учитывается целиком вся рельсовая сеть или, по крайней мере, в пределах питания одной тяговой подстанции. В противном случае необходимо подобрать приемлемое положение анодных заземлителей эквивалентных катодных станций. Целесообразнее всего ввести несколько таких анодных заземлителей - по числу отсекаемых ветвей рельсовой линии. Анодные заземлители в этом случае следует расположить вблизи точек расщепления во внешней подобласти.

Расчет ведут при варьировании положения и величины токовых нагрузок. После того, как будет найдено распределение потенциал в рельсовой линии U_p , приступают к расчету трубопроводной сети. Значения U_p вводят как исходные данные, после чего программа готовит вектор ϕ_z и решает задачу (10.4) с трубопроводной сетью.

10.3.6. Дренажные цепи

Если рельсовая линия задана эквивалентным трубопроводом с токовыми нагрузками, то дренаж воспроизводят перемычкой с заданным сопротивлением между реальным и эквивалентным трубопроводами. Варьируя сопротивлением перемычки, находят оптимальный режим защиты. Расчет ведут в режиме $M=2$ программ АРМ-ЭХЗ-7П.

При необходимости в перемычку включают катодную станцию, моделирующую усиленный дренаж. Для этого вводят еще две токовые нагрузки: положительную - в точке дренажа на трубопроводе и отрицательную такой же величины в точке дренажа на рельсах. Анодные заземлители этих эквивалентных катодных станций относят в бесконечность.

Если нагрузка рельсовой линии задана потенциалом U_p , то дренажный ток ищется по разности потенциалов рельс-труба. При использовании режима расчета $M=1$ “Оптимизационная задача” вычисляется оптимальное значение тока защиты и дается рекомендация проектировщику об использовании того или иного типа дренажей, а также приводится сопротивление дренажного кабеля.

При использовании известных эмпирических формул для расчета дренажной защиты исходят прежде всего из того, что величина дренажного тока составляет 20% от токов нагрузки тяговой подстанции. Влияние прочих факторов учитывают, вводя некие *поправочные коэффициенты*, назначенные, вероятно, судом экспертов.

Пример расчета 1

На рис.10.3 приведена расчетная схема трубопроводной сети, расположенной в очень опасном сочетании с рельсовой линией. Прежде всего участок трубопровода между точками 1 и 12 длиной 600 м уложен параллельно рельсовому пути, причем на очень малом расстоянии - 10 м. Кроме того трубопровод пересекает рельсовую линию в точке 4, находящуюся, как показал последующий расчет, под “минусовым” потенциалом.

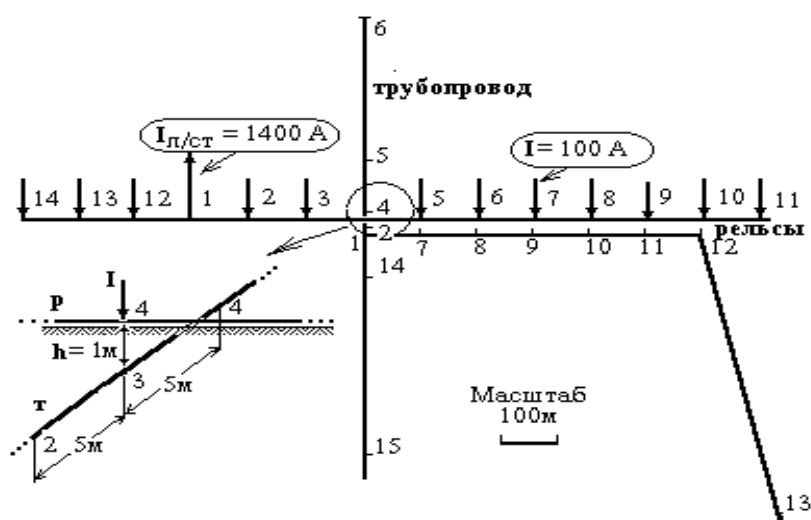


Рис.10.3. Совмещенная расчетная схема трубопровода и рельсов электрифицированной железной дороги.

Трубопровод везде имеет диаметр 200 мм, толщину стенки 6 мм, удельное электрическое сопротивление изоляции 50 Ом·м, глубину заложения 1 м, стационарный потенциал $-0,55\text{В}$.

Рельсовая линия выполнена из рельсов типа Т-60, что по продольной проводимости соответствует эквивалентному трубопроводу диаметром 200 мм с толщиной стенки 11 мм. Переходное сопротивление рельсовой линии - 30 Ом·м, стационарный потенциал $-0,55\text{В}$. Удельное электрическое сопротивление грунта - 20 Ом·м.

В рельсовой сети нагрузка может подводиться сосредоточенно через каждые 100 м. Общий ток тяговой подстанции равен 1400 А.

Рельсовую сеть при расчете сначала заменили обособленным эквивалентным трубопроводом с нагрузками, затем вычислили его потенциал U_p , после чего ввели его в исходные данные для последующего расчета трубопроводной сети и дренажной защиты.

Рассматривались три *режима нагрузки* тяговой сети:

режим А - нагрузка в линии *равномерная*, т.е. как показано на схеме рис.10.3, при $I = 100\text{А} = \text{const}$;

режим Б - допущена *перегрузка дальнего участка* линии: $I_{10} = I_{11} = 300\text{А}$, $I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = 0$;

режим В - *перегрузка ближнего участка*: $I_1 = I_2 = 300\text{ А}$, $I_8 = I_9 = I_{10} = I_{11} = 0$.

Разделим результаты анализа на две части:

- *без дренажной защиты и*
- *с дренажной защитой.*

Без дренажной защиты

На рис.10.4 приведены эпюры потенциалов рассматриваемой задачи при отсутствии какой либо электрохимической защиты.

Как и следовало ожидать, анодная зона располагается на ближних к тяговой подстанции участках трубопроводной сети. Наиболее опасная точка - непосредственно под рельсовой линией.

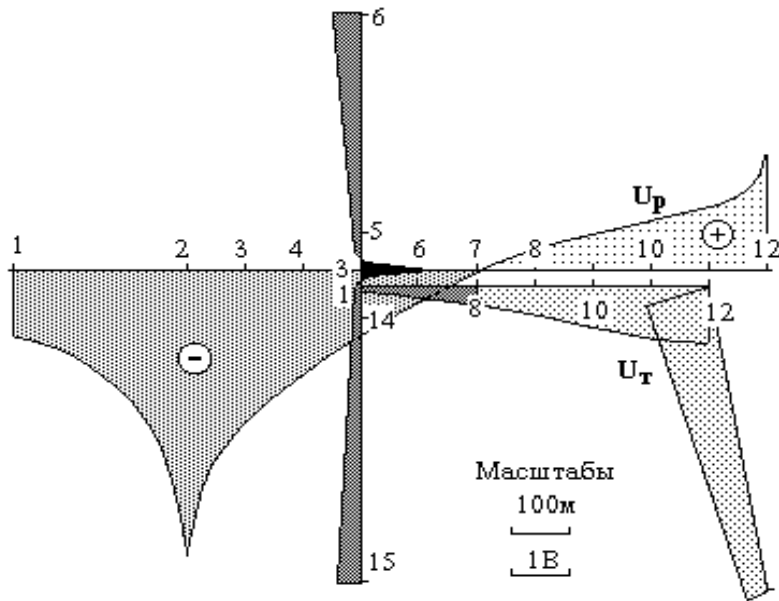


Рис.10.4. Эпюры потенциалов труба-земля и рельс-земля (по МЭС) при отсутствии защиты и равномерно распределенной нагрузке рельсовой линии (режим А).

Обычно при натурных исследованиях эта точка технически недоступна и поэтому полученные расчетным путем сведения о коррозионной угрозе *под рельсами* должны быть отнесены к уникальным. Потенциал трубопровода относительно ближайшей к его стенке точки земли здесь равен $U_T = +1,176$ В (по МЭС), что при наличии повреждения в изоляции вызовет коррозионный ток плотностью

$$j_{\text{кор}} = (1,176 - (-0,55)) / P_a.$$

При удельном анодном поляризационном сопротивлении равном $P_a = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ это приведет к чрезвычайно высокой скорости язвенной коррозии, равной

$$v = 1,18 j_{\text{кор}} = 20,2 \text{ мм/год.}$$

Уже на расстоянии 5 м от оси железной дороги разность потенциалов труба-земля уменьшается до $U_T = +0,065$ В, что снижает коррозионную опасность втрое, хотя и это абсолютно недопустимо.

Таблица 10.1

NN пп	Разность потенциалов труба- земля, U_T , В (МЭС)		
	Режим А	Режим Б	Режим В
1	-0,127	-0,086	-0,312
2	0,065	0,100	-0,251
3	1,176	1,169	0,039
4	0,078	0,115	-0,243
5	-0,172	-0,113	-0,296
6	-0,515	-0,379	-0,310
7	-0,324	-0,359	-0,408
8	-0,566	-0,634	-0,521
9	-0,767	-0,795	-0,610
10	-0,927	-1,006	-0,838
11	-1,046	-1,260	-1,210
12	-1,124	-1,469	-1,419
13	-0,440	-0,272	-0,211
14	-0,234	-0,167	-0,308
15	-0,482	-0,336	-0,285

Таблица 10.2

NN пп	Разность потенциалов рельс-земля, U_p , В (МЭС)		
	Режим А	Режим Б	Режим В
1	-1,33	-2,17	-0,57
2	-5,84	-7,50	-3,85
3	-3,08	-4,22	-1,71
4	-2,13	-3,17	-0,96
5	-1,39	-2,17	-0,57
6	-0,65	-1,20	-0,28
7	-0,07	-0,23	-0,09
8	0,40	0,64	0
9	0,78	1,41	0,02
10	1,07	2,10	0,03
11	1,28	2,74	0,03
12	2,28	4,70	0,21

Граница анодной и катодной зон на трубопроводе (этому соответствует $U_T = U_{ст} = -0,55$ В) находится вблизи точки 8 (на эпюре потенциалов трубопровода анодная зона закрашена более темным тоном).

За пределами точек 15 и 6 анодная зона также переходит в катодную, а вблизи точки 13, напротив, катодная сменяется анодной. Это ни в коей мере не противоречит здравому смыслу - мерику всех теоретических изысканий.

В табл.10.1 приведены более полные сведения о распределении потенциала трубопровода, причем в различных режимах работы тяговой сети (см.выше). Для сравнительного анализа в табл.10.2 даны потенциалы рельсовой линии в этих режимах (нумерацию узлов в рельсах см. на рис.10.4).

Несмотря на, казалось бы, существенные изменения величины U_T при изменении интенсивности токовых нагрузок - и особенно на фоне заметных изменений потенциала U_p - граница анодной и катодной зон практически не сместилась и проходит вблизи т.8, где $U_{ст} \approx -0,55$ В. Поэтому можно полагать, что *в расчетах поля блуждающих токов вполне достаточно задать средние значений потенциалов рельсовой сети.*

Таблица 10.3

пп уз- лов	Режимы нагрузки			пп уз- лов	Режимы нагрузки		
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>		<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>
1	-1,132	-1,087	-1,393	9	-1,802	-1,826	-1,723
2	-1,168	-1,128	-1,577	10	-1,893	-1,969	-1,877
3	-0,85	-0,85	-2,141	11	-1,943	-2,154	-2,175
4	-1,190	-1,149	-1,607	12	-1,967	-2,308	-2,326
5	-1,125	-1,184	-1,453	13	-1,034	-0,864	-0,85
6	-1,398	-1,258	-1,259	14	-1,249	-1,179	-1,401
7	-1,490	-1,520	-1,662	15	-1,491	-1,341	-1,375
8	-1,669	-1,732	-1,707	$I_{д}, A$	49,6	49,4	53,4

Здесь же интересно оценить диапазон изменения потенциала рельсов и трубопровода *во времени* в какой либо выбранной точке. Поскольку режимы *B* и *B* - далеко не предельные, то можно ожидать еще больших амплитудных изменений потенциала.

При дренажной защите

В табл.10.3 приведены результаты расчета распределения потенциала трубопровода при включении дренажа между точкой 1 на трубопроводе и точкой 4 на рельсах. Расчет выполнялся в оптимизационном режиме $M=1$ при заданном из табл.10.2 потенциале рельсовой сети.

Как следует из результатов расчета, минимальный защитный потенциал устанавливается, как правило, в точке с максимальным значением коррозионного потенциала на трубопроводе (точка 3).

Дренажный ток (см. последнюю строку табл.10.3) практически не меняется с изменением режима работы рельсовой сети в рассмотренном диапазоне. Но следует напомнить, что во всех трех режимах ток тяговой подстанции оставался неизменным и равным 1400 А. Очевидно, дренажный ток будет меняться пропорционально изменению тока подстанции.

Глава 11. Схемы электрохимической защиты

11.1. Катодные станции с несколькими заземлителями

В сложной трубопроводной сети возникает необходимость “расщепления” анодного заземлителя одной катодной станции для того, чтобы увеличить зону ее действия.

Известно, чем ближе анодный заземлитель к трубопроводу, тем меньше зона защиты. В ближайших точках трубопровода токи анодного заземлителя вызывают отрицательное приращение потенциала, в удаленных - положительное. Первый фактор вызывает перезащиту, второй - недозащиту.

11.1.1. Распределенные заземлители

Пример расчета 1

Сравним эффект катодной защиты трубопровода диаметром 200 мм, толщиной стенки 6 мм, удельным электрическим сопротивлением изоляции 50 Ом·м, длиной 2000 м при трех вариантах размещения анодных заземлителей (рис.11.1):

вариант 1 - одиночный заземлитель вблизи трубопровода;

вариант 2 - пять заземлителей вдоль трубопровода;

вариант 3 - одиночный заземлитель при оптимальном удалении.

Задачу решим в режиме $M=1$ программ АРМ-ЭХЗ-7П как оптимизационную.

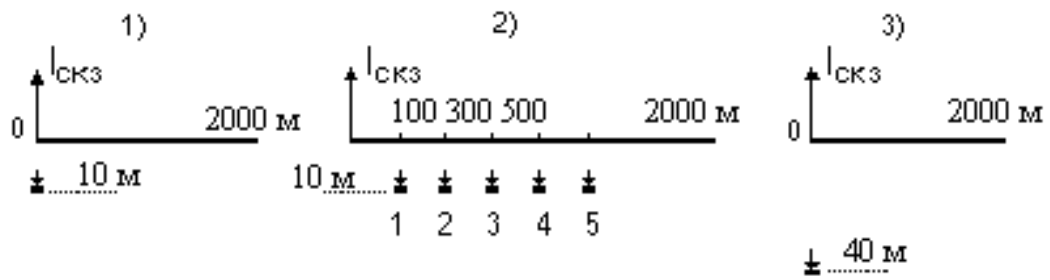


Рис.11.1. Исследуемые варианты размещения анодных заземлителей катодной станции.

Приведенные в табл.11.1 результаты расчета позволяют сделать некоторые обобщающие выводы.

Таблица 11.1

Координата x, м	Варианты размещения анодных за- землителей			Коор- дината x, м	Варианты размещения анодных зазем- лителей		
	1	2	3		1	2	3
0	-2,500	-1,662	-2,458	700	-0,700	1,010-	-0,986
50	-0,986	-1,510	-1,703	800	-0,691	-0,975	-0,959
100	-0,862	-2,500	-1,442	900	-0,683	-0,948	-0,937
150	-0,815	-1,579	-1,319	1000	-0,676	-0,925	-0,918
200	-0,789	-2,500	-1,246	1100	-0,671	-0,906	-0,901
250	-0,772	-1,546	-1,195	1200	-0,666	-0,891	-0,887
300	-0,758	-2,500	-1,156	1300	-0,662	-0,878	-0,875
350	-0,747	-1,461	-1,124	1400	-0,658	-0,867	-0,865
400	-0,737	-2,183	-1,097	1500	-0,656	-0,859	-0,858
450	-0,730	-1,265	-1,073	1600	-0,654	-0,853	-0,853
500	-0,723	-1,147	-1,052	1700	-0,653	-0,850	-0,850
550	-0,716	-1,094	-1,033	1800	-0,653	-0,851	-0,851
600	-0,710	-1,059	-1,016	1900	-0,656	-0,859	-0,859
650	-0,705	-1,032	-1,000	1950	-0,685	-0,942	-0,943

Вариант 1 непригоден вообще, поскольку удалось защитить только 100 м трубопровода: расстояние до анодного заземлителя $y_a = 10$ м слишком мало.

Вариант 2 обеспечивает защиту в заданном диапазоне защитных потенциалов. Это оказалось возможным при следующем *оптимальном* сочетании токов пяти анодных заземлителей : $I_1 = 6,00$ А, $I_2 = 6,07$ А, $I_3 = 6,39$ А, $I_4 = 5,17$ А, $I_5 = 0$ при суммарном токе катодной станции $I_{скз} = 23,63$ А.

Вариант 3 также обеспечивает полную защиту, однако при меньшем значении тока катодной станции - $I_{скз} = 17,98$ А и всего лишь одним анодным заземлителем, но удаленным достаточно далеко от трубопровода ($y_a = 40$ м).

Безусловно, *вариант 3* - наиболее удачный в данной ситуации. Но в инженерной практике встречаются решения близкие к *варианту 2*. Можно полагать, что

вариант с распределенными анодными заземлителями эффективен только при локальной защите выбранного участка трубопровода.

Оптимальное число анодных заземлителей (N_a) оказалось равным 4, в то время как решено было задать $N_a = 5$. Выбором оптимума как по количеству, так и по току распорядилась программа АРМ-ЭХЗ-7П самостоятельно.

11.1.2. Катодная станция с противопотенциалом

В практике делались попытки снизить чрезмерно большой защитный потенциал вблизи анодного заземлителя путем установки рядом с трубопроводом в этом месте дополнительного заземлителя, но с *током противоположным* току основного анодного заземлителя. Такой *катод-заземлитель* наводит противоположный по знаку потенциал в ближайших точках трубопровода, т.е. вызывает *противопотенциал*.

Пример расчета 2

На рис.11.2 приведены две эпюры потенциалов, где первая относится к стандартному режиму работы катодной станции с током 20 А и *анодным* заземлителем на расстоянии 10 м. Во втором варианте дополнительно к первой катодной станции включена вторая - с *противопотенциалом* - при токе 7,5 А, с *катодным* заземлителем, установленным на расстоянии 5 м от трубопровода.

Без противопотенциала режим защиты недопустим, т.к. разность потенциалов труба-земля вблизи анодного заземлителя по расчету равна $U_T = -5,33$ В.

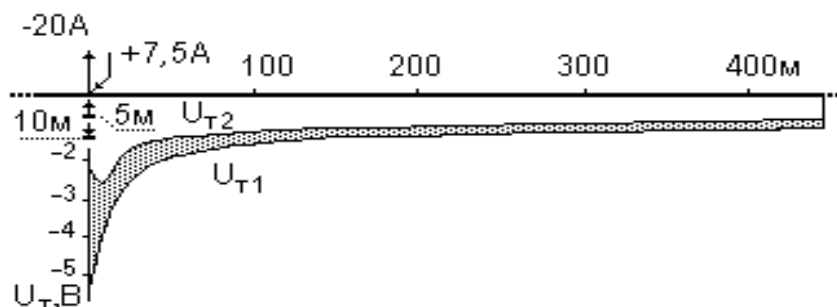


Рис.11.2. Эпюра разности потенциалов труба-земля в нормальном режиме (U_{T1}) и в режиме с противопотенциалом (U_{T2}).

Несмотря на то, что при включении дополнительной катодной станции пик потенциала удалось срезать, *зона действия защиты сократилась*. Возможно, могут быть ситуации, когда снижение зоны защиты не существенно по сравнению с выигрышем от уменьшения пикового потенциала.

Задача решается программой в режиме $M=2$ “Токи ЭХЗ заданы” с двумя катодными станциями и токами, противоположными по знаку.

11.1.3. Катодная станция с заземлителем-токовводом

Снижение пикового потенциала вблизи анодного заземлителя можно обеспечить с помощью специального заземления трубопровода.

Уложим вблизи анодного заземлителя отрезок голой трубы и соединим его с защищаемым трубопроводом в точке дренажа. Трубопровод окажется заземленным, что приведет к снижению его защитного потенциала. Это аналогично включению катодной станции с противопотенциалом, рассмотренной выше, но без дополнительного источника тока.

Таблица 11.2

NN	$x, \text{ м}$	$y_3 = \infty$	$y_3 = 1 \text{ м}$	$y_3 = 7 \text{ м}$
1	0	-5,332	-2,819	-2,342
2	5	-4,816	-3,685	-2,537
3	10	-3,932	-3,435	-2,374
4	20	-2,783	-2,529	-1,868
5	40	-1,945	-1,797	-1,393
6	100	-1,400	-1,311	-1,067
7	200	-1,193	-1,126	-0,941
8	500	-1,005	-0,958	-0,827
9	1000	-0,873	-0,840	-0,747
10	2000	-0,865	-0,832	-0,742

Пример расчета 3

В табл.11.2 приведены данные по катодной защите обычного трубопровода ($y_3 = \infty$) и заземленного на отрезок неизолированной трубы, уложенной параллельно защищаемому трубопроводу на расстоянии $y_3 = 1 \text{ м}$ или $y_3 = 7 \text{ м}$ от него против точки дренажа. Действительно, наблюдается эффект *снижения пикового потенциала*, но, как и при работе катодной станции с противопотенциалом, одновременно *снижается и защитная зона*.

Диаметр защищаемого трубопровода был принят равным 200 мм, толщина стенки - 6 мм, удельное сопротивление изоляции - 50 Ом·м, длина - 2000 м. Заземляющая труба имела длину 6 м, диаметр - 300 мм, удельное катодное поляризационное сопротивление $P_k = 2,8 \text{ Ом·м}^2$, что соответствует удельному погонному сопротивлению изоляции $R_{из} = 3$

Ом·м. Ток катодной станции - 20 А, удельное электрическое сопротивление грунта - 20 Ом·м.

Величина тока, бесполезно натекающего на заземлитель трубопровода при $y_3 = 7$ м, оказалась равной 5,96 А, т.е. составляет 30% от тока катодной станции. Но это, вероятно, выгоднее, чем устанавливать дополнительный катодный преобразователь для создания противопотенциала.

При подготовке расчетной схемы заземлитель был представлен тремя отрезками дискретизации (крайние - по 1,5 м, средний - 3 м) с узлами дискретизации на концах и в центре соответственно. Связь заземлителя с трубопроводом - изолированным проводником.

11.2. Совместная защита

Необходимость в совместной защите диктуется вредным влиянием одного подземного сооружения на другое при электрохимической защите одного из них.

11.2.1. Два параллельно уложенных трубопровода

Пример расчета 4

На рис.11.3 приведены типичные ситуации, возникающие при ЭХЗ трубопроводных сетей, а в табл.11.3 - результаты расчета распределения потенциалов в этих ситуациях.

Для анализа взяты два параллельно уложенных участка разнотипных трубопроводов: первый (узлы 1...9) - газопровод с удовлетворительной изоляцией $R_{из} = 50$ Ом·м, диаметром $d = 200$ мм; второй (узлы 10...18) - водопровод со следами изоляции при $R_{из} = 5$ Ом·м и того же диаметра. Полагаем, что схема симметрична, т.е. на отрицательной полуоси $0x$ - та же ситуация.

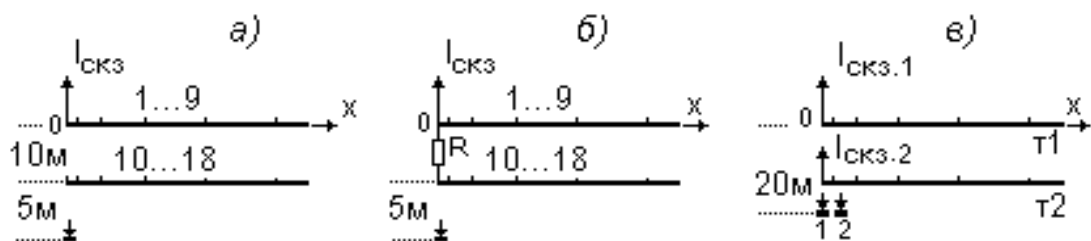


Рис.11.3. Расчетные схемы совместной защиты двух трубопроводов:

а) $I_{\text{скз}} = 15\text{A}$, $x_a = 0$, $y_a = 15\text{м}$; б) то же, но с перемычкой стальной шиной 150 мм^2 ; в) две СКЗ: $I_1 = 15\text{A}$, $I_2 = 50\text{A}$, $x_{a1} = 0$, $x_{a2} = 0$ (или $x_{a2} = 80\text{м}$), $y_{a1} = y_{a2} = 20\text{м}$.

Таблица 11.3

NN уз- лов	Коорди- ната, x , м	Схемы по рис.11.3			
		<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	
				$x_{a2}=0$	$x_{a2}=80\text{ м}$
1	0	-2,777	-1,334	-6,348	-2,651
2	10	-2,051	-1,460	-4,374	-2,085
3	20	-1,709	-1,204	-3,292	-1,875
4	40	-1,411	-0,942	-2,121	-1,805
5	80	-1,238	-0,790	-1,377	-2,616
6	200	-1,100	-0,705	-0,959	-0,935
7	500	-0,964	-0,662	-0,826	-0,857
8	1000	-0,838	-0,635	-0,790	-0,783
9	2000	-0,807	-0,640	-0,855	-0,797
10	0	-3,480	-2,800	-6,929	-2,256
11	10	-1,029	-1,090	-2,757	-1,192
12	20	-0,726	-0,740	-1,746	-0,976
13	40	-0,596	-0,647	-1,133	-0,919
14	80	-0,545	-0,596	-0,857	-2,698
15	100	-0,527	-0,571	-0,712	-0,599
16	500	-0,529	-0,560	-0,639	-0,579
17	1000	-0,538	-0,535	-0,595	-0,564
18	2000	-0,552	-0,552	-0,567	-0,556

Как и следовало ожидать, при отсутствии каких-либо мер по совместной защите (рис.11.3, *a*), *часть тока*, стекающего с анодного заземлителя и идущего в конечном счете на защиту газопровода, сначала натека-

ет на водопровод с узлах 10...13, т.е. на ближайший участок длиной 40 м, а затем стекает с него по всей оставшейся длине.

Нетрудно подсчитать, что на водопровод натекает и, разумеется, затем стекает с него ток 4,75 А, который за один год растворит около 44 кг железа. Единственная надежда, что стекающий ток распределится вдоль трубы равномерно и средняя скорость коррозии будет незначительной. Действительно, если анодной зоной считать участок длиной 1000 м, то средняя линейная плотность тока утечки будет равна $j' = 0,00475$ А/м. Тогда средняя поверхностная плотность тока утечки при диаметре $d = 0,2$ м, принятом в расчете, составит $j'' = 0,00755$ А/м², что эквивалентно средней скорости коррозии $v = 0,00895$ мм/год. Даже, если неравномерность скорости коррозии оценить коэффициентом пористости $s = 0,05$, что при плохой изоляции явно завышено, то местная или язвенная коррозия не будет превышать 0,18 мм/год, с чем какое-то время еще можно мириться.

Подключим *потенциалвыравнивающую перемычку*, например, стальную шину сечением 150 мм² длиной 10 м, между трубопроводами к точке дренажа (рис.11.3,б) и оставим в работе ту же катодную станцию. Негативные последствия этого очевидны: *не защищен ни тот, ни другой* трубопроводы. Если без перемычки зона защиты газопровода достигала 900 м, то с перемычкой - только лишь 70 м. При этом удалось защитить всего лишь 15 м водопровода.

Можно попытаться увеличить ток катодной станции. Так, увеличение тока катодной станции, например, до 50 А - при включенной перемычке - ведет к *перезащите* и на том, и на другом трубопроводах, но не вызывает заметного увеличения защитной зоны.

Вероятнее всего в данной ситуации каждый трубопровод следует защищать отдельными катодными станциями, но при обязательном согласовании их режимов работы.

При подключении двух катодных станций соответственно к точкам 1 и 10 или одной катодной станции, но с двумя регулируемыми выходами на те же точки (рис.11.3,в), картина не меняется к лучшему, если у этих катодных станций один *общий анодный заземлитель* (табл.11.3,вар.1), расположенный против точек дренажа, т.е. в точке с координатами $x_{a1} = 0$, $x_{a2} = 0$ и $y_{a1} = 20$, $y_{a2} = 20$ (м).

Но сдвинув один из анодных заземлителей в сторону вдоль трубопровода ($x_{a2} = 80$ м, $y_{a2} = 0$), получим, пожалуй, наиболее оптимальный вариант защиты, хотя и этот вариант не решает проблему.

Если все же есть настоятельная необходимость в защите данного *неизолированного* водопровода, то перебор вариантов надо продолжить, наращивая число анодных заземлителей вдоль трубопровода. Чаще в таких ситуациях считают, что защита неэффективна и отказываются от совместной защиты с водопроводом до тех пор, пока не будет заменена его изоляция.

При подготовке расчетной схемы, если ставятся задачи о взаимном влиянии между трубопроводами, необходимо внимательно отнестись к выбору шага дискретизации. После первой попытки решения задачи возможно придется уменьшить шаг вдвое и повториться. Шаг дискретизации может быть увеличивающимся по мере удаления от исследуемой области, например, по геометрической прогрессии. Желательно, чтобы вблизи этой области предыдущий шаг дискретизации не превышал последующий более чем в 2 раза.

11.2.2. Пучек параллельно уложенных трубопроводов

Часто параллельно уложены несколько трубопроводов, например, при устройстве многониточного магистрального трубопровода. При этом ставится задача обязательной защиты всех ниток.

Пример расчета 5

На рис.11.4 представлен участок трассы магистрального трубопровода из пяти нитей, уложенных с интервалом 20 м. Участки справа и слева от рассматриваемого учтены, но не показаны. Шаг дискретизации - увеличивающийся в геометрической прогрессии по мере удаления от точки дренажа. Диаметр всех нитей трубопровода - 200 мм, удельное электрическое сопротивление изоляции - 150 Ом·м, удельное электрическое сопротивление грунта - 20 Ом·м, ток первой СКЗ $I_1 = 50$ А, второй - $I_2 = 20$ А.

Включение независимой катодной станции на трубопроводе 1 (рис.11.4,а) вызывает вредное влияние на соседние трубопроводы: начи-

ная с точки с координатой $x=150$ м трубопроводы приобретают анодное смещение потенциала величиной до $+0,06$ В.

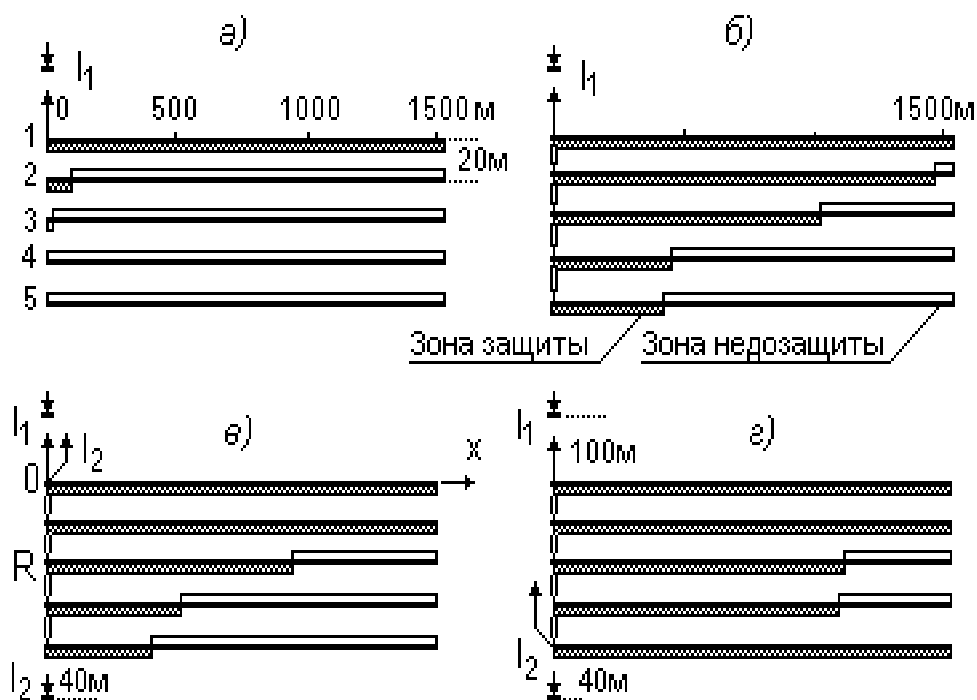


Рис.11.4. Защитные зоны при различных схемах совместной катодной защиты “пучка” магистральных трубопроводов. а- индивидуальная защита крайнего трубопровода 1; б- с перемычками R между трубопроводами; в - то же и два анодных заземлителя с одной точкой дренажа; г - то же и разнесенные точки дренажа.

Судя по результатам расчета включение перемычек между трубопроводами в точке дренажа (рис.11.4,б) не обеспечивает полной защиты участка. Попытки улучшить эффект включением перемычек в других местах также не дали ощутимого результата.

Включение второго анодного заземлителя со стороны 5-й нити и увеличение общего тока защиты до 70 А - при наличии одной точки дренажа (рис.11.4,в) - практически не улучшает картину.

Фактически требуется включение 2-х или даже 3-х катодных станций с обособленными заземлителями и разнесенными точками дренажа

(рис.11.4,з). При этом потенциалвыравнивающая перемычка все же необходима.

Рассмотренная ситуация типична для нефтепромысловых и магистральных трубопроводов, но всякий раз требует внимательного рассмотрения с применением численного эксперимента на базе программ пакета АРМ- ЭХЗ-7П.

В табл.11.4 приведены разности потенциалов труба-земля для области вблизи точки дренажа ($x=0$) с перемычкой.

Таблица 11.4

x, м	Номера трубопроводов				
	1	2	3	4	5
-20	-3.377	-2.332	-1.871	-1.779	-2.090
0	-2,348	-1.354	-1.141	-0.979	-1.450
20	-3.319	-2.282	-1.826	-1.738	-2.053
40	-3.314	-2.325	-1.855	-1.719	-1.867

При этом можно отметить особенность, возникающую в системе взаимовлияющих трубопроводов: *в точке дренажа* каждого из трубопроводов защитный потенциал *менее отрицателен*, чем в соседней точке на этом же трубопроводе. Но такая ситуация не может возникнуть в “нормальных” условиях! Объяснить этот эффект можно следующим образом.

На любой из трубопроводов в области перемычки действуют:

- 1) анодный заземлитель, вызывающий *отрицательное* смещение потенциала труба-земля в ближайших к нему точках ($\Delta U_1 < 0$);
- 2) соседний защищенный трубопровод, вызывающий *положительное* смещение потенциала ($\Delta U_2 > 0$);
- 3) перемычка, если она выполнена стальной *неизолированной* шиной, вызывающая *положительное* смещение потенциала ($\Delta U_3 > 0$), поскольку она в данном случае ничем не отличается от соседнего, защищенного трубопровода, но находится, к сожалению, в непосредственной близости от рассматриваемого трубопровода.

Алгебраическая сумма этих смещений будет определять величину и знак *потенциала влияния* $\Delta U_{\text{вл}} = \Delta U_1 + \Delta U_2 + \Delta U_3$. В данной ситуации в

точке дренажа потенциал влияния - за счет близости неизолированной перемычки - явно положительный ($\Delta U_{\text{вл}} > 0$), а по мере удаления от нее $\Delta U_{\text{вл}}$ уменьшается и далее может сменить знак.

Это и отмечается в табл.11.4, поскольку в расчете была принята стальная неизолированная перемычка. Как только в исходных данных расчета заменили стальную шину *изолированным кабелем*, этот эффект исчез, т.е. в точке дренажа потенциал, как и следует в нормальных условиях, стал наиболее отрицательным.

Кстати, представленная в табл.11.4 защитная разность потенциалов ($U_{\text{защ}}$) есть сумма $U_{\text{защ}} = U_{\text{пер}} + \Delta U_{\text{вл}}$, где $U_{\text{пер}} < 0$ - разность потенциалов, вызванная током, отводимым перемычкой *непосредственно* из трубопровода, в то время как $\Delta U_{\text{вл}} > 0$ - есть смещение, вызванное током, *отсасывающимся* поверхностью перемычки (из-за плохой ее изоляции) из трубопровода *через землю*. Первая составляющая - защищающая, вторая - разрушающая.

11.2.3. Близко расположенные трубопроводы

Пример расчета 6

На рис.11.5 приведена схема двух близко расположенных трубопроводов при их параллельной укладке и пересечении на одном из отводов.

Предполагается, что трубопроводы были уложены в одной траншее на расстоянии 0,5 м между их осями. Просвет между трубами в точке пересечения одной из них с отводом от другой также предельно мал - 0,5 м между осями.

В табл.11.5 приведены результаты расчета разности потенциалов труба-земля при защите одного из трубопроводов катодной станцией $I = 15$ А с точкой дренажа в узле 22 и анодным заземлителем в точке $x_a = 300$ м, $y_a = 40$ м.

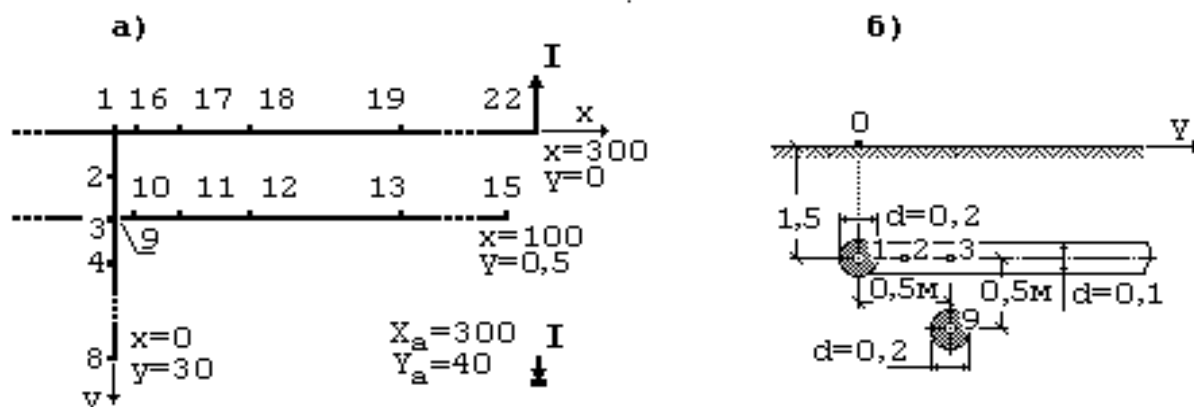


Рис.11.5. Расчетная схема участка сети с близко расположенными и пересекающимися трубопроводами.

Таблица 11.5

nn	x, м	U, В	nn	x, м	U, В	nn	y, м	U, В
9	0	-0,432	1	0	-0,923	2	0,25	-0,870
10	0,5	-0,442	16	0,5	-0,961	3	0,5	-0,869
11	1	-0,455	17	1	-0,978	4	0,75	-0,867
12	3	-0,484	18	3	-1,004	5	1,5	-0,863
13	10	-0,519	19	10	-1,040	6	3	-0,859
14	30	-0,548	20	30	-1,076	7	10	-0,862
15	100	-0,585	21	100	-1,140			
			22	300	-2,136			

Как и следует ожидать, на незащищенном трубопроводе в точках 9...14 возникла коррозионная опасность, поскольку потенциал здесь получил анодное приращение (стационарный потенциал везде был принят равным $U_{\text{ст}} = -0,55$ В). В точке 15 уже заметно влияние анодного заземлителя, который здесь вызвал катодное приращение потенциала.

На защищенном трубопроводе в районе пересечения (точки 1...7) упал эффект защиты. Действительно, градиент потенциала земли (изменение величины разности потенциалов труба-земля на единицу длины)

между точками 1...16 оказался много больше градиента потенциала между точками 19...20, а именно

$$\begin{aligned}\Delta U / \Delta L_{19-20} &= (U_{19} - U_{20}) / 20 = 0,0018 \text{ В/м}; \\ \Delta U / \Delta L_{1-16} &= (U_1 - U_{16}) / 0,5 = 0,076 \text{ В/м}.\end{aligned}$$

В то же время должно быть наоборот: при отсутствии соседнего трубопровода следует ожидать $\Delta U / \Delta L_{1-16} < \Delta U / \Delta L_{19-20}$, т.е. по мере приближения к катодной станции градиент потенциала *должен расти*, но не падать. Все аномалии с градиентом можно объяснить только влиянием соседнего трубопровода.

При анализе потенциального поля следует иметь ввиду, что градиент потенциала между i -й и k -й точками на трубопроводе $\Delta U / \Delta L_{ik}$ есть градиент потенциала в земле между соответствующими точками у поверхности трубопровода, поскольку

$$\Delta U / \Delta L_{ik} = ((\varphi_{ti} - \varphi_{zi}) - (\varphi_{tk} - \varphi_{zk})) / \Delta L_{ik} = (\varphi_{zk} - \varphi_{zi}) / \Delta L_{ik}, \quad (11.1)$$

так как изменением потенциал тела трубы (φ_t) на небольшом отрезке можно пренебречь. Поэтому, чем больше изменение разности потенциалов труба-земля вдоль трубопровода, тем больше градиент потенциала в земле и тем больше плотность тока (j) между этими точками земли, поскольку

$$j_{ik} = - \Delta U / \Delta L_{ik} / \rho. \quad (11.2)$$

Совместная защита начинается, как правило, с установки перемычки между трубопроводами. Рассмотрим ряд вариантов защиты.

Вариант 1. Соединим электрически точки 3 и 9 и увеличим ток катодной станции с 15 А до 20 А. Расчет показывает, что в точке дренажа (т.22) потенциал трубопровода превысит максимальный защитный ($U_{\text{защ. max}} = -2,5 \text{ В}$), поэтому дальше ток увеличивать нельзя. В то же время в точках 2,3 и 4 - недозащита: там защитный потенциал будет положительнее величины $-0,82 \text{ В}$.

Вариант 2. Включим дополнительную СКЗ-2 в районе пересечения трубопроводов, не снимая перемычки. Подсоединим СКЗ-2 в точке 4, анодный заземлитель установим в точке $x_{a2} = 10$ м, $y_{a2} = 10$ м.

Результаты решения задачи, выполненной в оптимизационном режиме, следующие:

$$I_1 = 13,3 \text{ А}, \quad I_2 = 1,9 \text{ А}, \quad U_9 = -1,937 \text{ В}, \quad U_2 = -0,85 \text{ В}.$$

Т.е. для защиты нужен ток 15,2 А, что меньше, чем в варианте 1, но требуются капитальные затраты на установку еще одной катодной станции.

Вариант 3. Отключим СКЗ-2 и оставим СКЗ-1 на прежнем месте, но удалим анодный заземлитель еще на 20 м, т.е. примем $y_a = 60$ м. В этом случае имеется оптимальное решение для условия $U_{\text{защ. min}} < U_{\text{защ.}} < U_{\text{защ. max}}$ при токе $I_1 = 21,5$ А. Вероятно, вариант 3 является более предпочтительным из рассмотренных.

В более сложных случаях взаимного расположения трубопроводов потребуется перебор большего числа вариантов совместной защиты.

11.2.4. Пересекающиеся трубопроводы вблизи анодного заземлителя

Пример расчета 7

На схеме рис.11.6 представлена одна из наиболее опасных ситуаций, требующая незамедлительных мер по совместной защите.

Пусть соседний трубопровод проходит вблизи анодного заземлителя «чужой» катодной станции с током 15 А, а затем пересекается с трассой защищаемого трубопровода под углом 45° . Часть тока натекает на соседний трубопровод у заземлителя и стекает с него в районе пересечения, что хорошо видно из результатов расчета в табл.11.6.

В точках 1...5 образуется весьма активная коррозионная зона с максимальной величиной анодного смещения потенциала $\Delta U_1 = +0,57$ В (стационарный потенциал принят везде $U_{\text{ст}} = -0,55$ В). Средняя плотность тока коррозии в точке 1 при принятом в расчетах значении удельного сопротивления изоляции $R_{\text{из}} = 50$ Ом·м и диаметре трубопровода $d = 0,2$ м составит

$$j_1 = 0,5 / (\pi d R_{из}) = 0,016 \text{ A/м}^2.$$

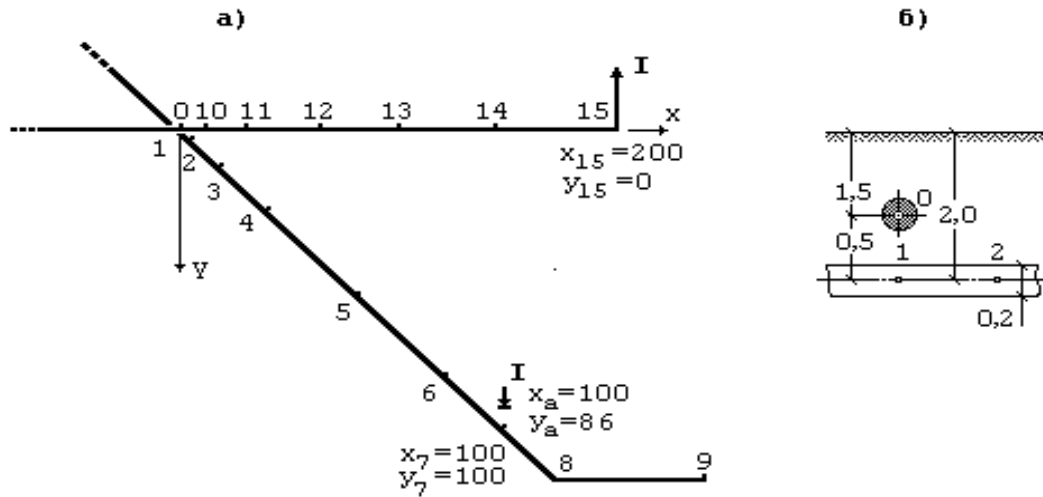


Рис.11.6. Расчетная схема для двух трубопроводов, пересекающихся под углом.

При удельном анодном поляризационном сопротивлении $P_a = 0,5 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ коэффициент пористости изоляции будет равен

$$s = P_a / (\pi d R_{из}) = 0,016.$$

Отсюда скорость язвенной коррозии

$$v_1 = 1,18 j_1 / s = 1,18 \text{ мм/год.}$$

Однако такую “страшную” коррозию можно легко предотвратить, включив перемычку между трубопроводами в точке их пересечения. Расчет показал, что при этом условии оптимальная совместная защита возможна при токе 12,2 А. При этом в точках 1 и 0 защитный потенциал будет равен $-0,85 \text{ В}$, а в точке дренажа (т.15) он составит $-1,21 \text{ В}$. Наиболее отрицательный потенциал ожидается на трубопроводе вблизи анодного заземлителя (т.7), где он составит $-2,59 \text{ В}$.

Таблица 11.6

Nn	x, м	y, м	U, В	Nn	x, м	y, м	U, В
1	0	0	0,021	0	0	0	-1,620
2	1	1	-0,021	10	1	0	-1,598
3	3	3	-0,088	11	3	0	-1,568
4	10	10	-0,195	12	10	0	-1,533
5	30	30	-0,338	13	30	0	-1,523
6	70	70	-0,855	14	60	0	-1,550
7	100	100	-2,066	15	200	0	-1,788
8	130	130	-0,608				
9	250	130	-0,318				

11.3. Заземленные трубопроводы

Трубопроводы могут быть связаны с искусственными и естественными заземлениями, которые, обладая низким сопротивлением растеканию, существенно снижают эффективность электрохимической защиты.

Искусственные заземления - это заземления корпусов электрооборудования, нулевых точек трехфазных сетей, что всегда имеет место в насосных и компрессорных станциях. Кроме того, в газопроводных сетях используются заземления молниезащиты, устанавливаемые на газораспределительных пунктах (ГРП) и газорегуляторных станциях (ГРС). На нефтепереливных базах устанавливают заземления от статического электричества.

Естественные заземления - это заземления через арматуру железобетонных конструкций и фундаментов, всевозможные металлические опоры, кронштейны, футляры и т.д., которые постоянно связаны с землей или с мокрой поверхностью строительных конструкций.

Наиболее радикальный способ устранения влияния заземлений - установка изолирующих фланцевых соединений (ИФС) на стыке между защищаемым трубопроводом и заземлением, что теперь выполняется повсеместно. Однако старые газопроводные сети все еще эксплуатируются

без ИФС. На негазопроводах в городах ИФС вообще не ставятся. Поэтому следует уметь оценивать степень влияния заземления на качество защиты, если они не отсечены электрически от защищаемого трубопровода.

11.3.1. Заземление как эквивалентный трубопровод

Заземление можно включить в расчетную схему трубопроводной сети двумя способами:

А) представить его *эквивалентной трубопроводной сетью*, максимально приближенной к реальной конфигурации заземления;

Б) заменить заземление простейшим *эквивалентным трубопроводом* с соответствующими параметрами.

Способ А можно применять, если конструкция заземления известна, например, в случае с искусственными заземлителями. *Способ Б* предпочтителен для естественных заземлений, когда задано только лишь сопротивление растеканию.

Способ А при наличии сложного, громоздкого заземления потребует разбиение заземления на очень большое число отрезков дискретизации, что может показаться нецелесообразным по разным причинам, например, если трубопроводная сеть также сложна и заземление не единственное. Поэтому большей частью целесообразно использовать оба способа одновременно, что и продемонстрировано ниже.

При необходимости эквивалентной замены сложной трубопроводной сети *эквивалентным трубопроводом* или упрощенной трубопроводной сетью будем использовать условия эквивалентности

$$\begin{aligned} Z_u' &= Z_u''; \\ \Delta U' &= \Delta U'', \end{aligned} \tag{11.3}$$

где Z_u' , Z_u'' - входные сопротивления “по близкой земле” (см. формулу (6.42)) эквивалентных сетей различной сложности, моделирующих данное заземление; $\Delta U'$, $\Delta U''$ - смещения потенциала “по близкой земле” в

точке связи, вызванные одним и тем же по величине током, приложенным в ней.

Параметры эквивалентного трубопровода будем определять по следующей методике.

1. Назначим конфигурацию эквивалентного трубопровода, например, в виде одиночного вертикального стержня или простейшего прямоугольного контура.

2. Выберем произвольно диаметр $d_{\text{ЭКВ}}$ и толщину стенки $t_{\text{ЭКВ}}$ эквивалентного трубопровода.

3. Вычислим значение удельного электрического сопротивления изоляции эквивалентного трубопровода $R_{\text{ИЗ.ЭКВ}}$ в следующей последовательности:

- назначим модельный трубопровод, полностью соответствующий по параметрам эквивалентному, но с произвольным значением $R_{\text{ИЗ.М}}$;
- нагрузим модельный трубопровод в точке связи током произвольной величины I и вычислим в этой точке смещение потенциала ΔU ;
- по формуле (6.42) найдем величину входного сопротивления модельного трубопровода $Z_{\text{У.М}}$;
- вычислим $R_{\text{ИЗ.ЭКВ}}$ эквивалентного трубопровода из пропорции

$$R_{\text{ИЗ.ЭКВ}} = R_{\text{ИЗ.М}} Z_{\text{У}} / Z_{\text{У.М}}, \quad (11.4)$$

где $Z_{\text{У}}$ - входное сопротивление исследуемого заземления.

Формула (11.4) получена исходя из условий (11.3) с учетом (6.42) и (6.5), откуда следует

$$\begin{aligned} j' R_{\text{ИЗ}}'' &= I' Z_{\text{У}}'; \\ j'' R_{\text{ИЗ}}'' &= I'' Z_{\text{У}}''. \end{aligned} \quad (11.5)$$

При условии пропорциональности $j' / j'' = I' / I''$, всегда имеющей место для фиксированной точки, объединив оба равенства (11.5), получим

$$R_{\text{ИЗ}}'' = R_{\text{ИЗ}}'' Z_{\text{У}}' / Z_{\text{У}}'' (I' j'' / I'' j'). \quad (11.6)$$

Поскольку значение выражения в круглых скобках всегда равно 1, то получим формулу (11.4).

Пример расчета 8

Пусть заземление выполнено в виде четырехстержневой конструкции по схеме рис.11.7,а, где горизонтальные стержни также рабочие. Разобьем всю конструкцию на 24 отрезка дискретизации, каждый из которых представим трубой диаметром 50 мм, что соответствует стержню уголкового профиля примерно 40х40х4. Удельное сопротивление изоляции примем равным $R_{из} = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, если заземлитель работает катодом, и $R_{из} = 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, - если он анод. Поскольку стержни неизолированы, то $R_{из}$ - это фактически удельное поляризационное сопротивление (P_k или P_a). Удельное электрическое сопротивление земли примем равным $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

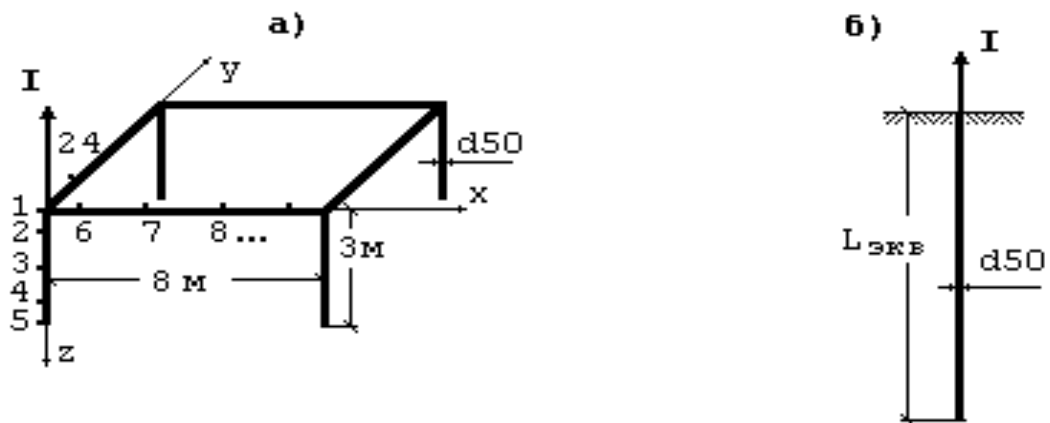


Рис.11.7. Расчетные схемы контура заземления (а) и эквивалентного ему вертикального стержня-трубопровода (б).

Расчет заземлений дал следующие результаты:

- исследуемое заземление (рис.11.7,а):
 $Z_u = 0,183 \text{ Ом};$
- модельный трубопровод (рис.11.7,б):

$L_{\text{ЭКВ}} = 18 \text{ м}, d_{\text{ЭКВ}} = 50 \times 2, Z_{\text{ц.м}} = 0,679 \text{ Ом}$ при $R_{\text{из.м}} = 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$;

- эквивалентный трубопровод (рис.11.7,б):

$L_{\text{ЭКВ}} = 18 \text{ м}, d_{\text{ЭКВ}} = 50 \times 2, R_{\text{из.ЭКВ}} = 2 \cdot 0,183 / 0,679 = 0,539 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$.

Погрешность замены сложной эквивалентной сети простейшим эквивалентным трубопроводом связана с различием их конфигурации. В данном случае расхождение величин $Z_{\text{ц}}$ для исследуемого заземления и эквивалентного трубопровода не превысило 2,5 %.

Кроме того расчет показал, что эквивалентный трубопровод в виде простейшего контура размером $8 \times 8 \text{ м}$, размещенного у поверхности земли, при 4-х узлах дискретизации дает практически ту же ошибку замены, но с другим знаком.

11.3.2. Влияние заземления на эффективность защиты

Прежде чем отсечь с помощью ИФС защищаемый трубопровод от мешающего ему заземления, количественно оценим эффект вредного влияния на качество ЭХЗ.

Прежде всего следует иметь ввиду, что заземление с входным сопротивлением $Z_{\text{ц}}$ отвлекает на себя ток $I = \Delta U / Z_{\text{ц}}$. Так, при $U = -0,85 \text{ В}$, $U_{\text{ст}} = -0,55 \text{ В}$ и $Z_{\text{ц}} = 0,183 \text{ Ом}$ в точке связи, как это принято в предыдущем примере расчета, ток натекания на заземление будет равен $I = 1,64 \text{ А}$. При общем токе защиты равном, например, $I_{\text{скз}} = 16 \text{ А}$ это составит 10%, с чем уже следует считаться.

Однако в реальной ситуации при катодной защите сети это далеко не так все однозначно, о чем свидетельствуют результаты расчета, приведенные ниже.

Пример расчета 9

Газопроводы низкого и среднего давления одновременно заземлены на контур молниезащиты газораспределительного пункта (рис.11.8). Диаметр и толщина стенки газопроводов - $200 \times 6 \text{ мм}$, удельное электрическое сопротивление изоляции - $100 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, общая протяженность - 3000 м , удельное электрическое сопротивление земли - $20 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

Пусть входное сопротивление заземления будет равно $Z_u = 0,183 \text{ Ом}$, т.е. заземление имеет конфигурацию и параметры по рис.11.7,а. Заменим его эквивалентным трубопроводом по рис.11.7,б с параметрами $L_{\text{ЭКВ}} = 45 \text{ м}$, $d_{\text{ЭКВ}} = 50 \times 1 \text{ мм}$ и расчетным удельным электрическим сопротивлением изоляции $R_{\text{из.ЭКВ}} = 1,4 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, что обеспечивает задание Z_u с погрешностью менее 1%. Число узлов дискретизации трубопроводной сети - 17, в том числе на эквивалентном трубопроводе - 4.

Результаты расчета при различных режимах катодной защиты рассматриваемых трубопроводов для узлов 1-8 приведены в табл.11.7.

Режим 1. Трубопроводы заземлены. Попытка эффективно, т.е. в нормативных пределах $-2,5 < U_{\text{заш}} < -0,85 \text{ В}$, защитить заземленный трубопровод катодной станцией, подключенной к узлу 8, не дала результатов из-за недозащиты в точке связи (узел 1, $x = 0$).

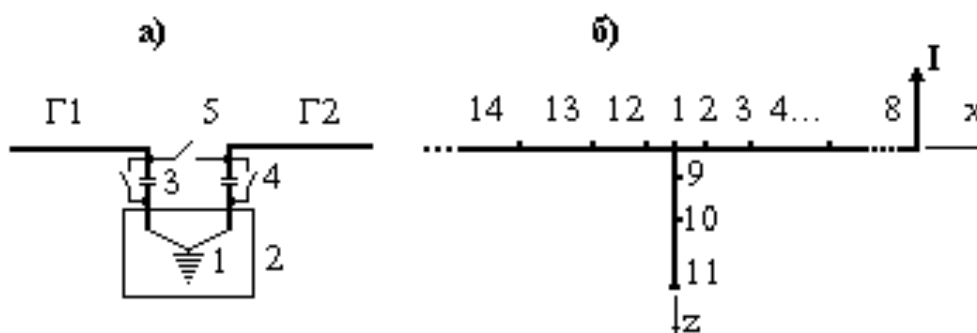


Рис.11.8. Газопроводы $G1$ и $G2$ (а), связанные с контуром заземления 1 ГРП 2 и отделенные затем изолирующими фланцевыми соединениями 3 с возможным шунтированием с помощью перемычек 4 и 5; б - расчетная схема, где узлы 9...11 расположены на эквивалентном трубопроводе.

Таблица 11.7

nn уз- лов	$x, \text{ м}$	Разность потенциалов труба-земля, $U_{\text{заш}}, \text{ В}$, в различных режимах защиты				
		1	2	3	4	5

1	0	-0,777	-0,851	-0,863	-1,010	-0,850
2	5	-0,997	-1,144	-0,863	-1,013	-1,146
3	15	-1,063	-1,231	-0,864	-1,018	-1,242
4	50	-1,124	-1,313	-0,867	-1,041	-1,360
5	150	-1,171	-1,375	-0,875	-1,105	-1,520
6	500	-1,261	-1,495	-0,910	-0,929	-1,208
7	1000	-1,422	-1,708	-0,982	-0,858	-1,083
8	2000	-2,500	-3,141	-1,493	-0,850	-1,070
Ток СКЗ, А		17,9	23,8	8,5	6,9	13,1

Режим 2. То же, но допущена перезащита. Если все же допустить перезащиту в узле 8 ($x = 2000$ м), то для того, чтобы повысить уровень защиты в точке $x = 0$ до $U_{\text{защ. min}} = -0,85$ В, необходимо увеличить ток катодной станции с $I_{\text{СКЗ}} = 17,9$ А до $I_{\text{СКЗ}} = 23,8$ А.

Режим 3. Заземление отключено. Эффективная защита обеспечивается на всем протяжении трубопроводов, причем с малым током $I_{\text{СКЗ}} = 8,5$ А.

Режим 4. Точка дренажа перенесена в узел 5, заземления нет. Еще лучше, если катодную станцию переместить ближе к центру трубопровода.

Режим 5. То же, что и режим 4, но с заземлением. И даже без отсоединения заземления защиту можно считать эффективной, если катодная станция размещена вблизи заземления (с точкой дренажа - в узле 5). Более того, как показал дальнейший расчет, если точку дренажа совместить с точкой связи с заземлением, то ток - еще меньше: с $I_{\text{СКЗ}} = 13,1$ А он снижается до $I_{\text{СКЗ}} = 10,6$ А.

Таким образом, для катодной защиты

хуже не то заземление, которое рядом, а то, которое на периферии.

Воронка напряжения.

Присутствие заземления на трубопроводе обнаруживается по наличию “воронки напряжения”. На рис. 11.8,а показано изменение разности потенциалов труба-земля (U) заземленного в точке $x = 0$ трубопровода

при измерении, например, выносным электродом. Наличие заземления весьма ощутимо: потенциал U непосредственно над заземлением приобретает положительное смещение равное $U_1 - U_2 = 0,29$ В.

О наличии заземления свидетельствует и весьма заметный градиент потенциала земли φ_3 . Так, потенциал земли непосредственно над заземлением равен $\varphi_3 = -0,44$ В (рис.11.8,б). Очевидно, точка над заземлением имеет наиболее *отрицательный* потенциал.

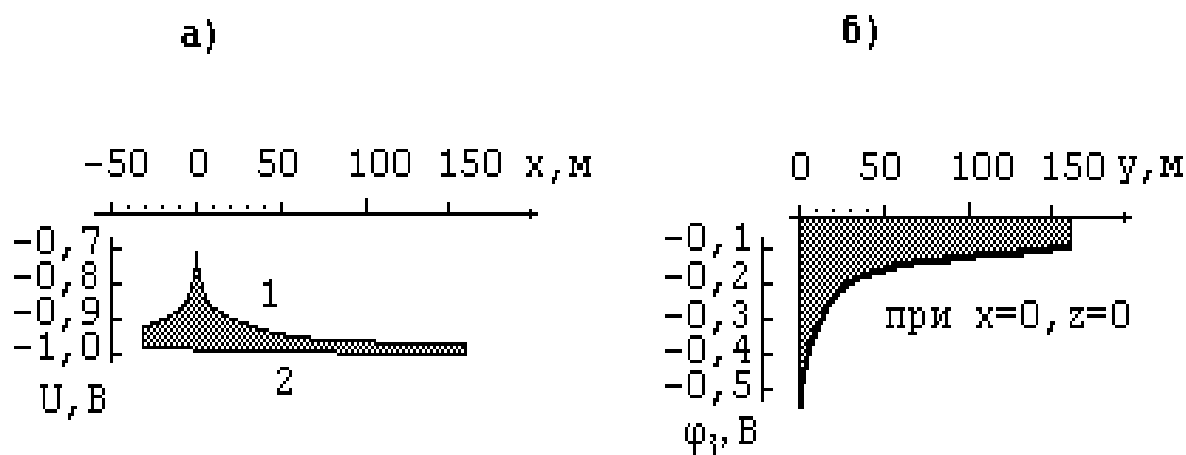


Рис.11.8. Параметры «воронки напряжения» вблизи точки заземления трубопровода: 1 – при наличии заземления, 2 – при его отсутствии.

11.3.3. Многократно заземленная трубопроводная сеть

Городские газопроводы на вводах в жилые дома - за счет связей с неизолированными от земли сооружениями - заземляются. На территориях с плотной застройкой можно считать, что такие связи распределены в сети равномерно с шагом 30...100 м, имея в виду расстояния между подъездами домов и соседними домами. Замена каждого из заземлений отдельным эквивалентным трубопроводом вряд ли целесообразна. Поэтому можно поступить следующим образом.

Пусть в трубопроводной сети с шагом L_z (рис.11.10,а) распределены заземления с входным сопротивлением по “близкой земле” Z_U . Заменяем отрезок L_z заземленного трубопровода *эквивалентным трубопроводом* такой же длины, но без заземления (рис.11.10,б). Реальная многократно заземленная трубопроводная сеть заменяется, таким образом, эквивалентной трубопроводной сетью, отличающейся от реальной только лишь величиной удельного электрического сопротивления изоляции $R_{из.экр}$ и, разумеется, отсутствием заземления.

Для численной оценки рассмотрим участок L_z рис.11.10.

Пример расчета 10

Пусть $L_z = 60$ м, что характерно для газопровода в городском жилом массиве средней плотности застройки. Примем диаметр трубопровода равным $d = 200 \times 6$ мм, удельное электрическое сопротивление грунта - $\rho = 20$ Ом·м и определим, каков вклад в величину $R_{из.экр}$ эквивалентного трубопровода вносит величина входного сопротивления заземления Z_U при различном качестве изоляции реального трубопровода $R_{из}$. Зададимся весьма широким диапазоном изменения $R_{из}$ и Z_U и вычислим значения $R_{из.экр}$ по методике, изложенной выше (см. формулу (11.5)).

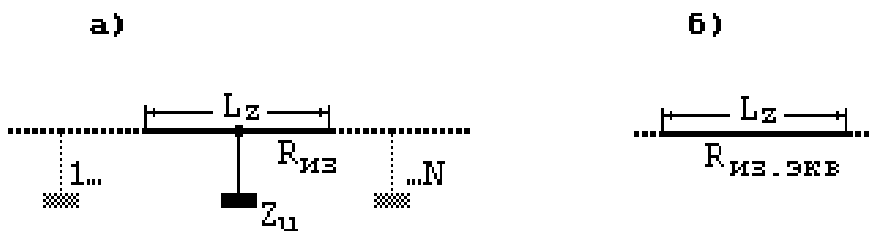


Рис.11.10. Расчетная схема при многократно и равномерно заземленном трубопроводе (а) и отрезок эквивалентного трубопровода (б).

На рис.11.11 приведены графики $R_{из.экр}$ как функции $R_{из}$ и Z_U . Очевидна весьма слабая зависимость $R_{из.экр}$ от $R_{из}$. Это позволяет сделать ка-

залось бы парадоксальный вывод по поводу требований к качеству изоляции реальных городских газопроводов:

нет смысла бороться за высококачественную изоляцию, если трубопроводы заземлены на вводах в здания.

Это тем справедливее, чем меньше входное сопротивление заземления Z_U .

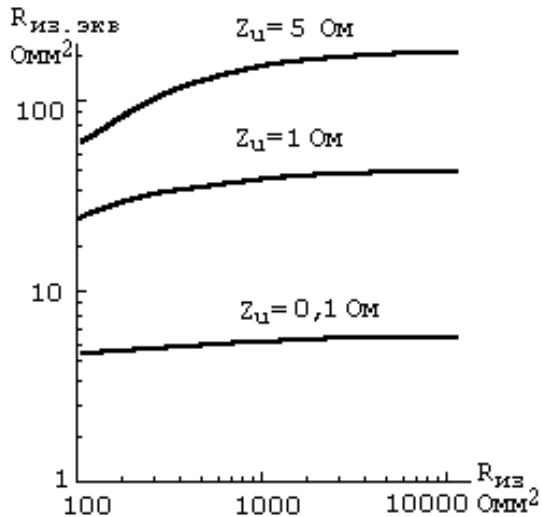


Рис.11.11. Удельное электрическое сопротивление изоляции эквивалентного трубопровода ($R_{из.экр}$), замещающего реальный с удельным сопротивлением $R_{из}$, который равномерно с шагом 60 м заземлен через сопротивление Z_U

Разумеется, это не есть рекомендация к полному безразличию при устройстве изоляции трубопровода. Хуже изоляция - больше коррозионные потери и больше ток защиты. Речь идет не о снижении требований к качеству изоляции, а о *необходимости применения изолирующих фланцевых соединений* на всех вводах газопроводов в здания и сооружения. Установив ИФС, можно считать проблему ЭХЗ решенной.

Этот вывод, пожалуй, *теперь* не подлежит сомнению. К сожалению, в реальных трубопроводных сетях ИФС установлены - так сложилось исторически - далеко не всех газовых вводах.

И, наконец, следует обратить внимание на абсолютные значения $R_{из.экр}$. Отбрасывая крайности, можно полагать, что $15 < R_{из.экр} < 150 \text{ Ом·м}^2$ - есть наиболее вероятный диапазон изменений одного из самых неопределенных расчетных параметров сетевой задачи - удельного электрического сопротивления изоляции. Наши полевые измерения показали, что значения Z_U для городских газопроводов низкого давления лежат в пределах $Z_U = 1,8 \pm 0,75 \text{ Ом}$.

Таким образом, если вы потратили усилия и средства на изготовление высококачественной изоляции, но сэкономили на установке изолирующих фланцев, то при $R_{из} = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ и $Z_U = 1 \text{ Ом}$ (отличная изоляция!) фактически будете защищать трубопровод, имеющий $R_{из.экв} = 50 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, что означает, что вы потратитесь еще раз - на эксплуатации защиты, так как *ток защиты будет превышать требуемый в 20 раз.*

Скупой платит дважды.

Глава 12. Железобетонная конструкция как эквивалентная трубопроводная сеть

12.1. Арматурная сеть железобетона

Металлические элементы таких железобетонных конструкций как свайные опоры зданий и сооружений, ленточные и сплошные фундаменты, опоры мостов, ограждения гидро- и очистных сооружений, железобетонные трубы и т.д. могут быть подвержены:

- собственной коррозии, причем с разрушением как металла так и окружающего их цементного камня;
- воздействию блуждающих токов и токов соседних установок электрохимической защиты;
- влиянию соседних металлических сооружений благодаря образованию с их участием протяженных коррозионных гальванических пар.

Поэтому при рассмотрении причин коррозии и параметров защиты сетей подземных металлических трубопроводов, особенно в городах и на территориях промышленных предприятий, нельзя игнорировать наличие *арматурных сетей* множества всевозможных железобетонных конструкций, особенно если учесть, что задача расчета распределения тока в арматурной сети - одна из разновидностей сетевой задачи, представленной в главе 6.

Действительно, не имеет значения, из каких элементов построена сеть проводников с утечкой - из труб или стержней - лишь бы эта сеть имела электрохимическую связь с окружающей средой и была гальванически едина. Бетон, окружающий арматурные стержни, в мокрых и влажных средах проводит электрический ток не хуже земли, поскольку бетон - пористый материал.

Под коррозией железобетона понимают

- электрохимическое растворение металлических элементов - арматуры и различных закладных деталей;

- химическое и механо-химическое разрушение бетона.

Оба вида разрушения способствуют друг другу. Цементный камень, основа которого - гидроксид кальция, может разрушаться с образованием или рыхлых веществ, которые далее вымываются водой, или, напротив, кристаллов солей в порах, вызывающих растягивающее действие на бетон и появление трещин. И то и другое - губительно для стальной арматуры: образуются каналы для доставки воды и кислорода и начинается электрохимический процесс разрушения металла.

Сплошной слой бетона вокруг арматуры - своеобразная антикоррозионная изоляция. Несмотря на то, что бетон - пористое тело, которое к тому же может быть полностью насыщено водой, электрохимическая коррозия на поверхности арматуры не наблюдается, если защитный слой бетона достаточно толстый, если бетон достаточно плотный, если основные компоненты химически стойки и пр. Но самое главное защитное свойство бетона - его высокая щелочность, о чем - ниже.

12.2. Бетон как электропроводная среда

Бетон представляет собой трехфазную систему - твердый каркас, жидкость и воздух, т.е. он является капиллярно-пористым телом.

Твердая фаза состоит из песка и щебня, склеенных между собой прореагировавшими с водой частичками, например, силиката кальция $n\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ - в случае применения широкораспространенного *портланд-цемента*, о котором в основном и пойдет речь ниже. Пористость бетона из портландцемента составляет не менее 25% от внешнего объема гидратных новообразований.

Следует заметить, что земляной грунт - это также капиллярно-пористое тело с объемом пор от 30 % (песок) до 90 % (торф), что делает грунт и бетон принципиально неразличимыми с точки зрения специалиста по ЭХЗ.

Воздушная фаза в порах бетона представлена компонентами окружающей атмосферы. Кислород, попавший в поры при изготовлении и перемешивании цементного теста, остается в бездействии до тех пор, пока не будет востребован возникшей по каким-либо причинам коррозионной парой, где кислород нужен для катодного процесса. И когда коррозион-

ный процесс на металле в глубине бетона все же возник, то кислорода будет достаточно для поддержания процесса, поскольку проблема его доставки из атмосферы за счет диффузии ничем не отличается от аналогичных проблем для грунтов, где о полном торможении коррозионных процессов по этой причине не может быть и речи.

Жидкая фаза - это, в основном, насыщенный раствор гидроокиси кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в воде, попавшей по разным *физическим* причинам в поры бетона. Вода присутствует также и в *химически* связанном виде как часть гидратированных ионов, и в виде адсорбционной влаги. В бетоне месячного возраста количество химически связанной влаги составляет примерно 70% , а физически связанной - 30% воды затворения. Благодаря связям между порами и пустотами, заполненными водой, бетон - электропроводящее тело. В жидкой фазе содержатся в основном ионы Ca^{++} и гидроксила OH^- , образующие *гидроокись кальция* $\text{Ca}(\text{OH})_2$, и - в меньшей степени - ионы AlO_2^- , SiO_3^{--} , SO_4^{--} и FeO_2^- .

Поскольку концентрация основных ионов в жидкой фазе цементного камня из портландцемента различных составов примерно одинакова, то и удельное электрическое сопротивление жидкой фазы обычно колеблется незначительно и находится в пределах $\rho = 1 \dots 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, что очень хорошо совпадает с диапазоном изменения *реальной величины* удельного электрического сопротивления наиболее распространенных типов грунтов.

Следовательно, если не заданы более точные сведения об удельном электрическом сопротивлении рассматриваемого железобетонного сооружения в земле, то можно принять, что ρ *бетона равно* ρ *окружающей среды*.

Диффузия в тело бетона иона хлора, если он присутствует в окружающей водной среде, может уменьшить электрическое сопротивление жидкой фазы в 3...5 раз.

Вследствие насыщения бетона ионами Ca^{++} и OH^- жидкая фаза имеет явно выраженный *щелочной характер*. По многочисленным данным водородный показатель жидкой фазы бетона находится в пределах $\text{pH} = 12,2 \dots 12,7$, в то время как для почвенной влаги $\text{pH} = 6,5 \dots 7,5$.

Щелочной характер поровой влаги бетона является причиной *высокой коррозионной устойчивости арматуры и цементного камня*. Это не должно показаться удивительным, поскольку еще в первых главах было

отмечено, что процесс на катоде сопровождается подщелачиванием среды. Пусть *щелочная среда* ассоциируется с *некоррозионной средой*.

Часто говорят, что в щелочной среде при $pH > 11,8$ металл переходит в *пассивное состояние* с признаками почти полного отсутствия каких-либо коррозионных проявлений. Поэтому любое проникновение в поры бетона веществ, снижающих щелчность поровой влаги от 11,8 и ниже, ведет к усилению коррозии. К таким коррозионным агентам относят прежде всего *ионы хлора* и *углекислый газ*. Как только в каком-либо месте снижается щелочность, тут же изменяется потенциал металла *в этом месте* и возникает коррозионная пара. В работу вступает основной агент коррозии - *кислород*, всегда ожидающий своего времени в толще бетона.

Скорость проникновения газов, и прежде всего кислорода, в тело бетона связана с водонасыщенностью последнего. Если все поры заполнены водой (подводные конструкции), то диффузия кислорода может быть на три порядка медленнее по сравнению диффузией при воздушно-влажностном состоянии. Полная водонасыщенность может практически полностью затормозить развитие коррозии арматуры. В то же время коррозия прекращается при снижении относительной влажности воздуха до 60 %. Следовательно, наиболее агрессивными можно считать *влажные бетоны* во влажных грунтах, что в общем не противоречит здравому смыслу.

12.3. Электрохимические параметры арматуры

12.3.1. Электрохимический потенциал

Высокая щелочность бетона обуславливает высокий потенциал стальной арматуры. Известно, что электрохимический потенциал стали увеличивается в положительную сторону примерно на +0,06 В с увеличением pH среды на единицу, т.е.

$$\Delta U = 0,059 \text{ pH} , \quad (12.1)$$

где ΔU - смещение потенциала стального электрода относительно своего стационарного состояния.

Так, потенциал арматуры в щелочной среде при $pH=13$ будет *положительнее* потенциала такого же стального электрода в нейтральной среде (при $pH=7$ и тех же физических условиях) на величину $\Delta U = 0,35$ В. Это - одна из основательных причин возникновения следующих *коррозионных гальванопар*:

- сталь в бетоне - сталь открытая;
- арматура под сплошным слоем бетона - арматура под слоем бетона в трещинах;
- открытый торец закладной металлической детали в бетоне - тело этой детали в толще бетона и пр.

Во всех перечисленных случаях *сталь в бетоне работает катодом*, а сталь открытая - анодом. Так, если открытый стальной электрод имеет потенциал $\phi_a = -0,55$ В, то под слоем бетона $\phi_k = -0,2$ В. Возможны и иные значения потенциалов в зависимости от физико-химических условий окружающей среды.

12.3.2. Катодное поляризационное сопротивление

На рис.12.1 приведены типичные поляризационные характеристики, снятые на стальном образце под слоем бетона. Катодное смещение потенциала, вызванное током плотностью $j = 100$ мА/м², примерно равно $\Delta U_k = -0,3$ В. Это соответствует катодному удельному поляризационному сопротивлению $P_k = 3$ Ом·м². При плотности тока меньше 100 мА/м² поляризационное сопротивление больше.

С величиной удельного катодного поляризационного сопротивления порядка $P_k = 2...4$ Ом·м² мы уже встречались при обосновании расчетных параметров для вычисления поляризационных потенциалов *на трубопроводах*, т.е. при анализе поляризационных явлений на открытой металлической поверхности в нейтральных средах (см. главу 6). Судя по сравниваемым данным, количественные различия параметров катодной поляризационной характеристики стали в нейтральной и щелочной средах невелики.

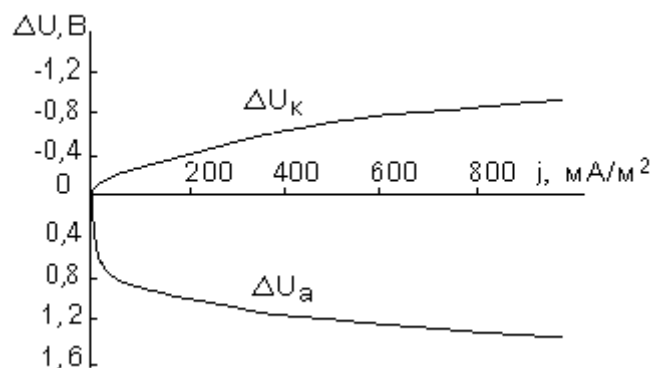


Рис.12.1. Типичные анодная и катодная поляризационные характеристики стального электрода в бетоне из портландцемента

Поэтому можно принимать в качестве расчетного параметра для арматурных сеток величину удельного *катодного поляризационного сопротивления* близкую к $P_k = 3 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$.

12.3.3. Анодное поляризационное сопротивление

Из кривой U_a рис.12.1 следует, что плотности тока $j = 200 \text{ мА/м}^2$ соответствует анодное смещение потенциала примерно $\Delta U_a = 1 \text{ В}$ и удельное *анодное поляризационное сопротивление* $P_a = 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$.

Анодное поляризационное сопротивление стального электрода в бетоне имеет явную особенность: его величина *на один-два порядка больше*, чем P_a для стального открытого электрода.

Как известно, свежезачищенная поверхность анода в нейтральной среде может иметь $P_a = 0,1 \dots 0,5 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, в то время как под слоем бетона $P_a > 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$. Но это не покажется удивительным, если иметь в виду, что именно высокое поляризационное сопротивление - свидетельство высокой коррозионной стойкости металла и его способности к *самопассивации*. Такая особенность присуща всем стальным электродам, находящимся в щелочной среде.

Таким образом, для железобетонной конструкции с *оголенной* арматурой, работающей анодом, величину P_a следует принимать много меньшей, чем для арматуры под надежным слоем бетона.

12.4. Арматурная сетка как эквивалентная трубопроводная сеть

Поскольку арматурная сетка является цельной сварной конструкцией, то ее можно рассматривать как *сеть проводников с утечкой* и решать ее в соответствии с теорией *главы 6*. Тогда в программах пакета АРМ-ЭХЗ-7П везде под термином “трубопровод” следует понимать стержень арматуры диаметром d и толщиной стенки $t = d / 2$. Удельное сопротивление изоляции ($R_{из}$) такого трубопровода должно соответствовать удельным поляризационным сопротивлениям P_a и P_k арматуры.

Конфигурацию эквивалентной трубопроводной сети - уже при ее формировании - целесообразно представить, по возможности, более упрощенной. Рассмотрим ситуации, возникающие при построении расчетных схем эквивалентных трубопроводных сетей.

12.4.1. Пучек из стержней

Пучек из N прутков диаметром $d_{ст}$, сваренных вместе и образующих единый стержень, целесообразно заменить одним эквивалентным трубопроводом диаметром

$$d = \eta n d_{ст}, \quad (12.2)$$

где η - коэффициент экранирования, для которого можно принять следующие значения: при $n = 2$ $\eta = 0,9$, при $n = 3$ $\eta = 0,88$, при $n = 4$ $\eta = 0,85$.

Будем полагать, что удельное (поверхностное) сопротивление изоляции ($R_{из}$) прутка и эквивалентного трубопровода равны друг другу.

12.4.2. Сетка участка конструкции

Рассмотрим характерный участок арматурной сетки *протяженной* конструкции, имея ввиду постановку и решение двух следующих задач.

А. Исследование распределения локальных токов между стержнями сетки, например, при ее гальванической неоднородности или при подключении к какой-либо точке внешнего источника тока.

Б. Определение параметров эквивалентного трубопровода, замещающего участок сетки и всю строительную конструкцию в целом.

При решении задачи **А** эквивалентная трубопроводная сеть, замещающая сетку, должна моделировать эту сетку достаточно подробно, но не детально. Так, целесообразно группировать поперечные перемычки между продольными стержнями в пучки и включать эти пучки только в узлах дискретизации. Возможны и другие упрощения, если они подтверждаются численным экспериментом.

При подготовке расчетной схемы для гальванически неоднородной сетки определяют - исходя из условий ее работы - катодные и анодные области, вводят в узлы дискретизации соответствующие стационарные потенциалы и назначают удельные поляризационные сопротивления.

Ниже, в *примере расчета 1* даны некоторые практические рекомендации, полученные при решении задачи **А**.

Решение задачи **Б** и соответствующие примеры рассмотрены далее.

Пример расчета 1

Исследуем токи коррозии арматуры железобетонной сваи по рис.12.2 длиной 10 м, сечением 350×350 мм, погруженной в землю с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$. Арматурная сетка имеет поперечник 300×300 мм, выполнена из стержней 20 мм диаметром, которые объединены поперечными связями, распределенными равномерно. Будем полагать, что та или иная часть сваи покрыта трещинами и здесь арматура работает анодом ($\varphi_a = -0,4 \dots -0,6 \text{ В} = \text{var}$, $P_a = 2 \dots 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2 = \text{var}$), а неразрушенная часть, следовательно, катодом ($\varphi_k = -0,2 \text{ В}$, $P_k = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$).

Шаг дискретизации *эквивалентной трубопроводной сети* принят неравномерным: по концам сваи $\Delta L = 0,5 \text{ м}$, в середине - $\Delta L = 1 \dots 3 \text{ м}$.

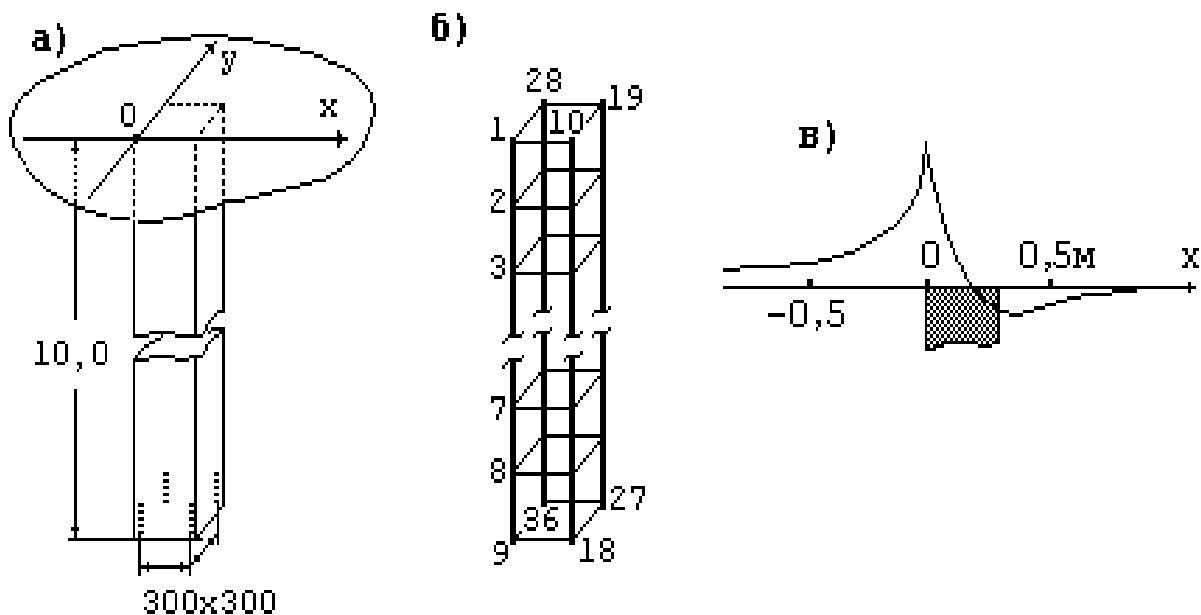


Рис.12.2. Железобетонная свая в земле (а), эквивалентная трубопроводная сеть (б) и эпюра потенциала земли ϕ_3 по оси $0x$ при $y = 0$, $z = 0$ с анодом в узлах 1...9.

Задача 1. Пусть в процессе строительства была разрушена верхняя часть сваи на участке $0 \dots 0,5$ м, где в узлах 1, 10, 19 и 28 стационарный потенциал арматуры стал отрицательнее относительно потенциала остальной части сетки. В зависимости от количества трещин и площади оголения металла его анодное удельное поляризационное сопротивление может изменяться в диапазоне $0,1 < P_a < 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$, где нижний предел - для полностью открытой поверхности, верхний - для поверхности под слоем в тонких трещинах. Можно предполагать, что по мере раскрытия трещин величина стационарного потенциала будет меняться от $\phi_{\text{ст}} = -0,2 \text{ В}$ (катодное состояние под слоем бетона) до $\phi_{\text{ст}} = -0,6 \text{ В}$ (анодное состояние открытой поверхности).

Результаты расчета по вариантам набора данных приведены в табл.12.1. При этом под v_{max} понимается скорость локальной коррозии на дне трещины в отличие от средней скорости коррозии, определенной для единицы площади поверхности арматуры.

Основной, казалось бы абсурдный вывод, следующий из результатов расчета, таков: *чем хуже защитный слой бетона, покрывающий арматуру ($P_a \rightarrow 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$), тем меньше скорость локальной коррозии ($v_{\max}$).*

Таблица 12.А

Варианты	P_a , $\text{Ом}\cdot\text{м}^2$	$\varphi_{\text{ст}}$, В	$U_{\text{ст}}$, В	$j_{\text{ср}}$, $\text{мА}/\text{м}^2$	j_{max} , $\text{мА}/\text{м}^2$	v_{max} , мм/год
1	2	-0,4	-0,313	41,4	414,0	0,497
2	0,5	-0,5	-0,456	81,2	202,5	0,244
3	0,2	-0,6	-0,587	125,8	125,8	0,151

Однако, что уже не противоречит нашему здравому смыслу, с раскрытием трещин *средняя скорость коррозии ($j_{\text{ср}}$) растет.*

Высокая скорость коррозии под слоем бетона в мелких трещинах вдвойне опасна. Кроме прямой угрозы разрушения происходит *разрушение цементного камня*, поскольку твердые продукты коррозии, уплотняясь в трещинах, вызывают появление механических усилий. Последующее затухание коррозии - по мере расширения трещин - вряд ли является утешением.

Задача 2. Пусть разрушен защитный слой бетона не в верхней части сваи, как в задаче 1, а в нижней - в районе узлов 9,18,27 и 36 (рис.12.2).

Расчет показал, что благодаря краевому эффекту относительная скорость коррозии внизу будет на 20% выше, чем сверху. Так, при $P_a = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ и $\varphi_{\text{ст}} = -0,4 \text{ В}$ имеем

$v_{\max} = 0,611 \text{ мм/год}$ - коррозия внизу в узлах 9,18,27,36;

$v_{\max} = 0,497 \text{ мм/год}$ - коррозия сверху в узлах 1,10,19,28.

Задача 3. Пусть разрушен защитный слой бетона вдоль одного из продольных стержней, причем по всей длине сваи (узлы 1... 9). Оценим максимальную скорость коррозии, для чего будем полагать, что бетон покрыт *мелкими* трещинами и, следовательно, анодное поляризационное сопротивление стали арматуры велико ($P_a = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, $\varphi_{\text{ст}} = -0,4 \text{ В}$). В табл.12.2 приведены результаты расчета для этого состояния.

Надо уточнить, что под мелкими трещинами в наших примерах понимается оголение арматуры на 10% , поскольку принято $j_{\text{cp}}/j_{\text{max}} = 0,1$.

Таблица 12.2

nn уз- лов	z, м	$U_{\text{ст}},$ В	$j_{\text{cp}},$ мА/м ²	$j_{\text{max}},$ мА/м ²	$v_{\text{max}},$ мм/год
1	0	-0,321	38,2	382	0,458
2	0,5	-0,307	44,5	445	0,535
...	...	...	...	...	...
8	9,5	-0,307	44,5	445	0,535
9	10	-0,295	50,8	508	0,611

Сравнивая значения локальной скорости коррозии в трех задачах, можно отметить, что скорость v_{max} во всех случаях примерно одна и та же. Поэтому при постановке задач этого вида можно ограничиться более простой расчетной схемой. Следует лишь учесть, что с уменьшением *отношения площадей* анода и катода скорость коррозии увеличивается. Так, если анодом работают не 9 узлов, а лишь один, то

$$v_{\text{max}} = 0,573 \text{ мм/год} - \text{с анодом в узле 1};$$

$$v_{\text{max}} = 0,458 \text{ мм/год} - \text{с анодом в узлах 1... 9}.$$

Задача 4. Можно ли инструментально обнаружить действующую коррозионную макропару? Эта “финишная” задача решается с помощью программы АРМ-ЭХЗ-7П в разделе «Анализ поля токов в земле».

На рис.12.2,в дан график изменения потенциала земли (ϕ_z) по оси Ox на поверхности земли. Наличие анода явно ощущается по градиенту потенциала земли, который может быть свободно измерен с помощью милливольтметра и двух измерительных электродов. Причем отмечается также и катод, если учесть знак градиента потенциала.

Представленная кривая соответствует ситуации с анодом в узлах 1...9 при $R_a = 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, $\phi_{\text{ст}} = -0,6 \text{ В}$. Максимальное напряжение, которое отмечается на поверхности земли, равно $\Delta\phi_{z,\text{max}} = 0,138 \text{ В}$.

Легко обнаруживается локальный анод в верхней части сваи, т.е. в узлах 1,10,19,28, поскольку в этом случае $\Delta\varphi_{z,\max} = 0,246$ В, но инструментально вряд ли может быть зафиксирован анод в нижней части (в узлах 9,18,27,36).

12.4.3. Эквивалентная сеть сооружения

Для исследования распределение токов между элементами протяженной конструкции, например, при рассмотрении токов в ленточном или свайном фундаменте определенной конфигурации, следует от *арматурной сети* участка перейти к простейшему эквивалентному трубопроводу, воспроизводящему этот же *участок* арматурной сети и, далее, к эквивалентной трубопроводной *сети* всей конструкции.

Работу ведут в следующей последовательности.

А. Решают задачу для *сетки характерного участка* исследуемой конструкции по методике пп.12.4.2 с токовой нагрузкой I в одном из центральных узлов и вычисляют входное сопротивление сетки по “близкой земле” $Z = \Delta U / I$ для этого узла (индекс в Z_u опустим для упрощения).

Б. Назначают параметры *участка модельного трубопровода*, замещающего сетку характерного участка:

L - длину, равную протяженности выбранного участка;

d - диаметр, близкий к среднему размеру поперечника конструкции;

t - толщину стенки, задающую совместно с диаметром фактическую продольную проводимость участка сетки; ее следует вычислить, используя соотношение $\pi dt = n\pi d_{\text{ст}}^2 / 4$, где $d_{\text{ст}}$ - диаметр продольных стержней, n - их количество;

Удельное электрическое сопротивление изоляции модельного трубопровода выбирают произвольно, например, $R_{\text{из.м}} = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$.

В. Решают задачу для участка модельного трубопровода с токовой нагрузкой в его средней точке и вычисляют его входное сопротивление $Z_{\text{м}}$.

Г. Вычисляют удельное сопротивление изоляции ($R_{\text{из}}$) *участка эквивалентного трубопровода* по формуле аналогичной (11.4)

$$R_{\text{из}} = R_{\text{из.м}} Z / Z_{\text{м}} . \quad (12.3)$$

Д. Уточняют конфигурацию эквивалентной трубопроводной сети, замещающей *всю конструкцию*, и решают задачу в целом, используя найденные значения d , t и $R_{из}$.

Пример расчета 2

Токи защиты в протяженной конструкции.

В ленточный фундамент под сооружение с габаритами 50×24 м (рис.12.3) заложена арматурная сетка с поперечником 300×300 мм, состоящая из 4-х продольных стержней диаметром 20 мм и ряда поперечных связей. Фундамент уложен в землю с удельным электрическим сопротивлением $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ на глубину 1 м. Каков ток катодной защиты будет отводиться на арматуру, если с ней связан защищаемый подземный трубопровод?

Заменим *арматурную сетку* на типичном участке фундамента *эквивалентной трубопроводной сетью* по схеме рис.12.3,б, а затем и эквивалентным трубопроводом по рис.12.3,в.

Выберем шаг дискретизации вдоль фундамента равным 0,5 м, число узлов дискретизации 5 (минимально возможное!), т.е. рассмотрим участок длиной $L = 2 \text{ м}$. Поперечные связи между продольными стержнями установим во всех узлах дискретизации (рис.12.3,б). Шаг дискретизации поперек конструкции - 0,3 м. Диаметр трубопровода эквивалентной арматурной сети примем равным 20 мм, т.е. равным диаметру арматуры, толщину стенки этого трубопровода - 10 мм, удельное электрическое сопротивление изоляции - $2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, стационарный потенциал арматурной стали $\varphi_{ст} = -0,2 \text{ В}$.

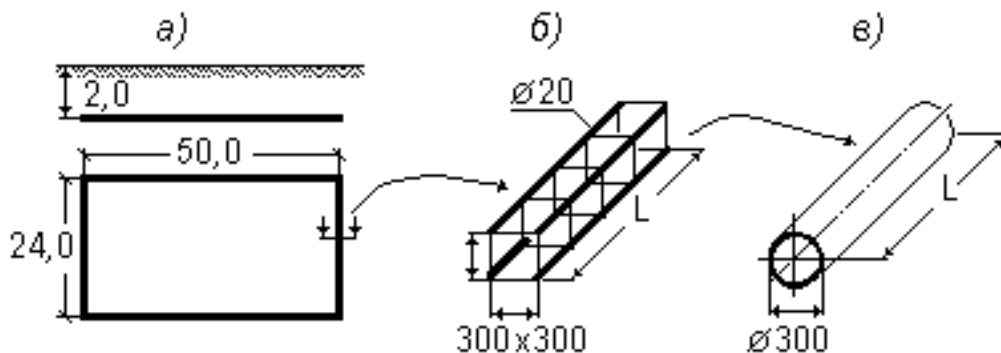


Рис.12.3. Конфигурация ленточного фундамента (а), эквивалентная трубопроводная сеть, замещающая участок арматурной сетки (б) и эквивалентный трубопровод, замещающий участок фундамента (в).

2. Рассчитаем входное сопротивление (Z) участка L арматурной сетки. Для этого подключим к эквивалентной трубопроводной сети по рис.12.3,б катодную станцию в узле 3 с анодным заземлителем, отнесенным в бесконечность, и решим задачу в оптимизационном режиме (код $M = 1$). В результате расчета ток защиты участка оказался равным $I = 0,318$ А, защитное смещение потенциала в точке дренажа $\Delta U = -0,65$ В, следовательно, входное сопротивление участка сетки $Z = 2,04$ Ом.

3. Назначим параметры модельного трубопровода: диаметр - 300 мм, толщина стенки - 3 мм, длина - 2 м, удельное сопротивление изоляции $R_{из.м} = 2$ Ом·м², стационарный потенциал $\varphi_{ст} = -0,2$ В, число узлов дискретизации - 5, катодная станция - в узле 3, ее ток - 0,318 А. Результаты расчета: смещение потенциала в точке дренажа $\Delta U = -0,482 - (-0,2) = -0,282$ В, входное сопротивление $Z_m = 0,888$ Ом.

4. Заменяем модельный трубопровод с параметрами $R_{из.м} = 2$ Ом·м² и $Z_m = 0,888$ Ом искомым эквивалентным трубопроводом, не отличающимся по параметрам от модельного за исключением величины $R_{из}$, которую и найдем по формуле (12.3)

$$R_{из} = R_{из.м} Z / Z_m = 2 \cdot 2,04 / 0,888 = 4,6 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2.$$

Удобно считать, что $R_{из} = 2$ Ом·м² - нулевое приближение, а $R_{из} = 4,6$ Ом·м² - первое приближение решения для эквивалентного трубопровода.

5. Оценим погрешность замены, для чего выполним расчет эквивалентного трубопровода при $R_{из} = 4,6$ Ом·м². При токе $I = 0,318$ в точке дренажа потенциал трубопровода оказался равным $-0,89$ В, в то время как в арматурной сетке по п.2 он при том же токе был равен $-0,85$ В. Абсолютная погрешность - 0,04 В, относительная - не превышает 5%.

6. Не трудно повысить точность эквивалентной замены. Для этого достаточно еще раз уточнить значение $R_{из}$ по формуле (12.3), т.е. найти второе приближение, приняв за параметры модельного трубопровода

$R_{из.м} = 4,6 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$ и $Z_{м} = (0,89 - 0,2) / 0,318 = 2,17 \text{ Ом}$. Тогда уточненное значение искомого параметра будет равно

$$R_{из} = R_{из.м} Z / Z_{м} = 4,6 \cdot 2,04 / 2,17 = 4,34 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2.$$

При этом значении $R_{из}$ погрешность расчета снизилась до 2%, что безусловно вполне достаточно, имея ввиду общий уровень точности численных расчетов методом дискретизации и неопределенность некоторых исходных параметров.

7. Таким образом, параметры эквивалентного трубопровода, замещающего *участок* арматурной сетки 300×300 мм из 4-х продольных стержней диаметром 20 мм, определены: $d = 300 \text{ мм}$, $t = 3 \text{ мм}$, $R_{из} = 4,34 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$.

Следующий этап расчета - от эквивалентного трубопровода, замещающего *участок* сетки, к *формированию* расчетной схемы *эквивалентной трубопроводной сети*, замещающей железобетонную конструкцию в целом.

8. И, наконец, выполняют *расчет эквивалентной трубопроводной сети* всей конструкции, которая в данном случае имеет вид прямоугольного контура размерами 50×24 м, при 8 узлах дискретизации и с катодной станцией в одной из угловых точек (в точке связи с реальной трубопроводной сетью).

Расчет показал, что для защиты такого контура до уровня минимального защитного потенциала необходим ток $I = 22,44 \text{ А}$.

9. Для проверки достоверности расчета определим величину тока защиты (I) всей конструкции через *ток защиты участка* арматурной сетки, определенный в п.2. Так как полная длина фундамента составляет 148 м, а на защиту до уровня минимального защитного потенциала участка длиной 2 м нужен ток 0,318 А, то для защиты всего фундамента понадобится ток $I = 0,318 / 2 \cdot 148 = 23,6 \text{ А}$, что практически совпадает с результатами расчета по п.8.

10. Как вывод следует отметить, что ток, отвлекаемый на защиту фундамента, если к тому же фундамент еще не разрушен и арматура не требует катодной защиты, весьма значителен ($> 0,15 \text{ А}$ на один погонный метр фундамента) и влиянием железобетонных фундаментов при элек-

трохимической защите реальных трубопроводных сетей не следует пренебрегать.

Пример расчета 3

Токи защиты в пространственной конструкции.

Фундамент здания выполнен на железобетонных сваях по схеме рис.12.4. Параметры арматурной сетки отдельной сваи примем такими же как и выше, т.е. 4 продольных стержня диаметром 20 мм по углам квадрата 300 мм. Сваи погружены в грунт с $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

Определим параметры упрощенной эквивалентной трубопроводной сети при условии, что для ее защиты нужен такой же ток, как и для защиты реальной арматурной сети.

Последовательность расчета следующая.

1. Заменим участок реальной арматурной сетки модельным трубопроводом и, далее, *эквивалентным трубопроводом*. Присвоим эквивалентному трубопроводу на этом этапе шифр $T1$.

Для отыскания параметров трубопровода $T1$ воспользуемся результатами, полученными при решении **примера расчета 2**, где для аналогичной сетки определен эквивалентный трубопровод с параметрами: диаметр $d = 300 \text{ мм}$, толщина стенки $t = 3 \text{ мм}$, удельное сопротивление изоляции $R_{\text{из}} = 4,3 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$.

2. Заменим реальный фундамент эквивалентной *трубопроводной сетью* (шифр $T2$), достаточно подробно воспроизводящей его конфигурацию и имеющей параметры участков по $T1$, и определим параметры расчетной схемы сети $T2$.

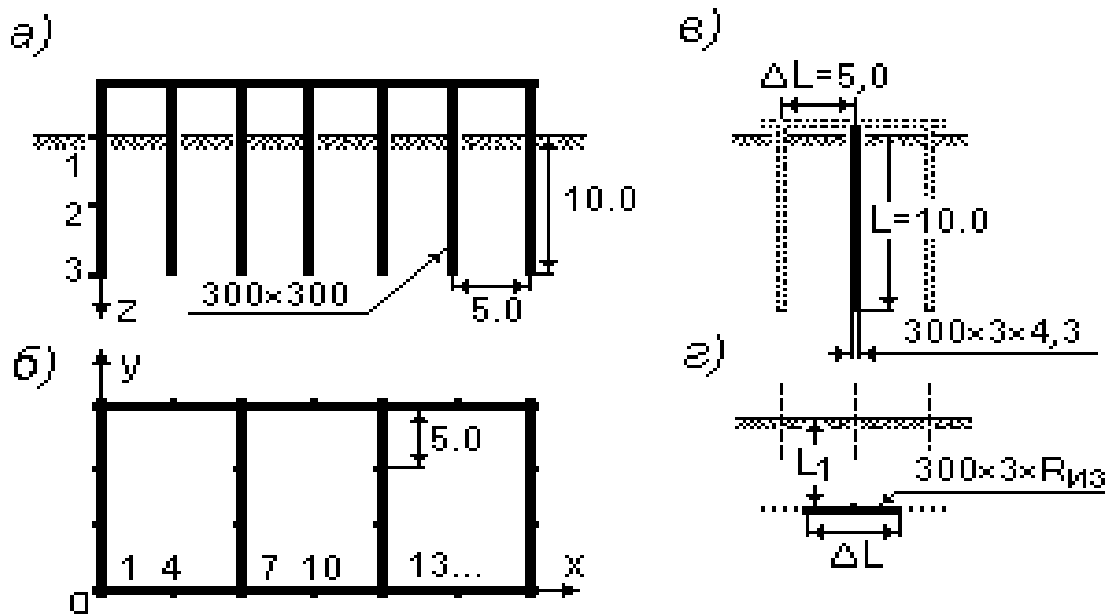


Рис.12.4.Профиль (а) и план (б) свайного фундамента и трансформация его участка в эквивалентный трубопровод (в) и (г).

В соответствии с условиями задачи число свай - 22, шаг между ними $\Delta L = 5$ м, глубина погружения от поверхности земли -10 м. Если в действительности шаг между сваями много меньше и их количество велико, то с целью сокращения объема вычислений (каждая свая отнимет 3 или больше узлов дискретизации!) следует объединить несколько близко расположенных свай в одну, определив ее эквивалентный диаметр по формуле вида (12.2).

Полагаем, что соединяющая арматуру горизонтальная перемычка находится *над* землей. Для нее принято $R_{из} = 10000 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$.

Образовавшуюся таким образом сеть $T2$ (рис.12.4,а) разобьем на 66 отрезков дискретизации длиной $\Delta L = 5$ м и рассчитаем распределение токов в ней при подключении к одному из узлов (безразлично к какому) источника катодного тока с анодным заземлителем, отнесенным в “бесконечность” ($x_a = y_a = z_a = 10000$ м). Задачу решим в оптимизационном режиме при стационарном потенциале $\varphi_{ст} = -0,2$ В.

В результате расчета *общий ток защиты* оказался равным $I = 80,7$ А, ток угловой сваи - $I_1 = 3,67$ А, ток сваи в центре длинной стороны - $I_2 = 2,17$ А.

Ток сваи вычисляли как сумму токов отрезков дискретизации. В данном случае при 3-х узлах дискретизации и длине сваи 10 м имеем

$$I_k = (2,5 \Delta U_i + 5 \Delta U_{i+1} + 2,5 \Delta U_{i+2}) / R'_{из}, \quad (12.4)$$

где i - номер узла верхнего конца k -й сваи, $k = 1, 2$; $R'_{из} = R_{из} / (\pi d)$ - сопротивление изоляции единицы длины сваи, Ом·м; $\Delta U_i / R'_{из}$ - линейная плотность тока i -го узла, А/м.

Входные сопротивления выбранных свай равны $Z_1 = 0,457$ Ом, $Z_2 = 0,461$ Ом. Расчет Z выполнен по средним значениям ΔU вдоль данной сваи. Судя по результатам расчета, очевидно, что можно принять для любой сваи рассматриваемого фундамента среднее значение $Z = 0,46$ Ом.

3. Заменим участок “свайной” сети $T2$ через модельный трубопровод участком “безсвайной” сети, присвоив последнему шифр $T3$.

Пусть участок $T3$ - горизонтальный по рис.12.4,г и воспроизводит участок ΔL фундамента с одной свайей по рис.12.4,в. Для модельного трубопровода примем следующие параметры: $d = 300$ мм, $t = 3$ мм, $R_{из.м} = 2$ Ом·м², $\Delta L = 5$ м, глубина заложения $L_1 = 5$ м.

Расчет показал, что для модельного трубопровода защитное смещение потенциала $\Delta U = -0,65$ В обеспечивается при токе $I = 1,835$ А, что дает $Z_m = 0,354$ Ом.

Параметры участка эквивалентного трубопровода $T3$ (рис. 12.4, г) соответствуют модельному, но при $R_{из}$, вычисленном по формуле (12.3), т.е. при

$$R_{из} = 2 \cdot 0,46 / 0,354 = 2,6 \text{ Ом·м}^2.$$

4. Выберем конфигурацию упрощенной “безсвайной” сети $T4$, замещающей весь фундамент, рассматривая величину общего тока защиты $I = 80,7$ А как критерий эквивалентности.

А) Прежде всего сделаем попытку моделирования сети $T2$ эквивалентной сетью $T4$ в виде вертикального трубопровода длиной равной суммарной длине всех свай, т.е. $L = 220$ м и при четырех равноотстоящих узлах дискретизации. Ток защиты (в оптимизационном режиме) в этом случае равен $I = 61,6$ А, что меньше точного значения на 23,5%.

Б) В другом варианте для $T4$ - в виде *горизонтального* трубопровода - ток защиты оказался равным $I = 60,9$ А, что мало отличается от предыдущего.

В) Если при расчете реальной трубопроводной сети, стыкующейся с данным заземлителем, конфигурация $T4$ не имеет значения, то можно остановиться на варианте с *вертикальным* трубопроводом, но при этом скорректировав его длину. Так, при $L = 300$ м имеем $I = 79,2$ А, что снижает погрешность замены до 2%. Замена исследуемого заземления одиноким вертикальным трубопроводом, вероятно, и есть наиболее простой и достаточно оптимальный вариант.

5. Расчет заканчивают решением задачи электрохимической защиты реальной трубопроводной сети совместно с эквивалентной сетью $T4$ в соответствии с методикой предыдущей главы.

12.5. Распределение токов коррозии по окружности стержня

Во всех рассмотренных выше задачах, построенных на теоретических положениях *главы 6*, исследовалось распределение поверхностного тока *вдоль продольной оси* стержня в предположении, что в поперечном направлении, т.е. по окружности стержня, изменений тока нет. Если это можно допустить для обособленного подземного трубопровода в *однородном* грунте и не делать здесь различия между величиной плотности тока внизу иверху трубы, то при исследовании коррозии арматурного стержня, поскольку он покрыт слоем бетона *в трещинах*, возникает необходимость учета местной неоднородности: часть поверхности *по окружности*, а именно, в районе трещины, работает анодом, а остальная - катодом. До сих пор мы учитывали электрохимическую неоднородность арматурной сетки, но не арматурного стержня.

Необходимость исследования поперечного поля появляется и в задачах с подземным трубопроводом в неоднородных по глубине грунтах, например, при высокостоящих грунтовых водах. В этом случае, как уже говорилось, верх трубы работает катодом, а низ - анодом.

12.5.1. Постановка задачи

Рассмотрим небольшой участок стержня, *вдоль* которого изменением поверхностного тока можно пренебречь. Тогда полевая задача для поверхностных токов в *поперечном* сечении стержня может быть поставлена как *задача на плоскости*. Этим облегчается численная реализация задачи при использовании метода дискретизации.

Как и ранее, будем называть стержень арматуры эквивалентным трубопроводом, тем более, что задача ставится также и для реального трубопровода.

Пусть трубопровод диаметром d погружен в проводящую среду (землю) с удельным электрическим сопротивлением ρ , обособлен от сети, имеет удельное электрическое сопротивление изоляции, зависящим от положения исследуемой точки M на окружности $R_{из} = R_{из}(M)$, с заданным законом изменения стационарного потенциала $\varphi_{ст} = \varphi_{ст}(M)$ (рис.12.5).

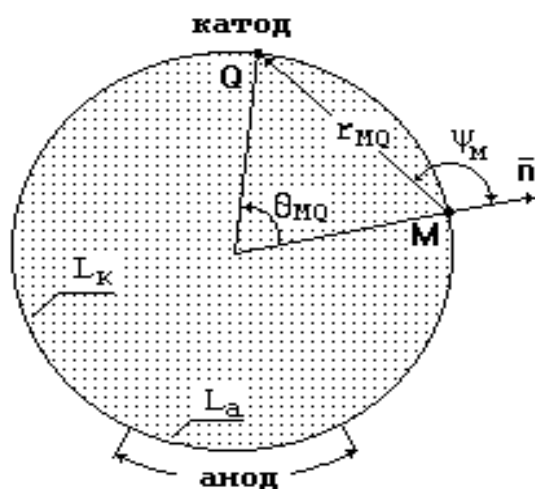


Рис.12.5. Расчетная схема для коррозионной пары по окружности стержня.

В окрестности точки M вблизи поверхности трубы, как и прежде, имеем

$$R_{из}j = \varphi_T - \varphi_3 - \varphi_{ст}, \quad (12.5)$$

где j - плотность тока трубопровода, A/m^2 ; φ_T - потенциал трубопровода или потенциал на внутренней поверхности изолирующего слоя; φ_3 - по-

тенциал земли или потенциал на внешней поверхности изолирующего слоя; $\varphi_{\text{ст}}$ - стационарный потенциал металла.

Будем считать, что направление нормали к поверхности трубы совпадает с направлением анодного тока. Тогда для плотности тока в земле у стенки трубопровода имеем

$$j = -1/\rho \partial\varphi_3/\partial n, \quad (12.6)$$

где n - координата, отсчитанная по *нормальной* оси $\mathbf{n}$ (рис.12.5).

Объединяя уравнения (12.5) и (12.6), получим основное уравнение решаемой задачи

$$\varphi_3 - (R_{\text{из}}/\rho) \partial\varphi_3/\partial n = \varphi_{\text{т}} - \varphi_{\text{ст}}. \quad (12.7)$$

Для конкретизации разделим поверхность трубопровода на две области - анодную и катодную - и зададим их потенциалы. Тогда это уравнение для исследуемой точки M на поверхности изоляции трубопровода примет вид

$$\left| \varphi_3(M) - (R_{\text{из}}(M)/\rho) \partial\varphi_3(M)/\partial n \right|_L = \varphi_{\text{т}}(M) - \varphi_{\text{ст}}(M); \quad (12.8)$$

$$\varphi_{\text{с т}} = \begin{cases} \varphi_{\text{а}} & \text{п р и } M \in L_{\text{а}} \\ \varphi_{\text{к}} & \text{п р и } M \in L_{\text{к}} \end{cases} \quad L = L_{\text{а}} + L_{\text{к}};$$

где $L_{\text{а}}$, $L_{\text{к}}$ - протяженность соответственно анодной и катодной областей по окружности трубопровода; $\varphi_{\text{а}}$, $\varphi_{\text{к}}$ - электрохимические потенциалы трубопровода соответственно в анодной и катодной областях.

Отыскание потенциала в земле (φ_3) и его производной ($\partial\varphi_3/\partial n$) на поверхности трубопровода является целью задачи, описываемой дифференциальным уравнением в частных производных (12.7).

12.5.2. Аналитическое решение

Задачи для криволинейных поверхностей, когда ищется распределение поля лишь на границе исследуемой области, сводятся к интегральному уравнению типа (6.19), но не относительно плотности тока j , а некоторой вспомогательной функции.

Введем неизвестную пока вспомогательную функцию $\mu(M)$ на граничной поверхности и, воспользовавшись *теорией потенциала* и понятием *простого слоя*, выразим искомый потенциал земли в точке M через эту функцию следующим образом

$$\varphi_3(M) = \rho / \pi \int_L \mu(Q) \ln(1/r_{MQ}) dl_Q \quad (12.9)$$

где r_{MQ} - расстояние между исследуемой (M) и влияющей (Q) точками; l_Q - криволинейная координата точки Q на окружности L (рис.12.5).

Производная потенциала так называемого *простого слоя* на граничной поверхности ($\partial\varphi_3/\partial n$) имеет особенность и выражается следующей формулой

$$\partial\varphi_3(M)/\partial n = (\partial\varphi_3(M)/\partial n)_0 \pm \pi\mu(M), \quad (12.10)$$

где первое слагаемое справа - обыкновенная производная интеграла (12.9) в точке M по нормали; знак перед вторым слагаемым зависит от направления нормали и положения точки: M - вне или внутри ограниченной области. Поскольку нами выбрана внешняя нормаль и внешняя задача, то следует взять “минус”.

Производная подинтегральной функции по нормали имеет вид

$$\partial / \partial n (\ln(1/r_{MQ})) = -\cos \psi_M / r_{MQ}, \quad (12.11)$$

где ψ_M - угол между нормалью и направлением из точки M в точку Q (рис.12.5).

Можно показать, что $\cos \psi_M$ определяется формулой:

$$\cos \psi_M = -r_{MQ}/d. \quad (12.12)$$

Поэтому производная интеграла получит вид

$$\left(\partial \varphi_3(M)/\partial n\right)_0 = \rho/\pi d \int_L \mu(Q) dl_Q. \quad (12.13)$$

Подставляя формулу (12.11) с учетом (12.12) в (12.10) и умножая на $1/\rho$, получим выражение для второй составляющей уравнения (12.8)

Теперь, умножая обе части равенства (12.10) на $R_{из}/\rho$ и объединяя выражения (12.13), (12.8) и (12.7), получим окончательно искомое уравнение для $\mu(M)$ в виде интегрального уравнения Фредгольма второго рода

$$R_{из}\mu(M) + \int_L \mu(Q)K(M, Q) dl_Q = \varphi_T - \varphi_{с.т.}, \quad (12.14)$$

где $K(M, Q) = \rho/\pi \ln(1/r_{MQ}) - R_{из}/(\pi d)$ - ядро интегрального уравнения.

12.5.3. Численное решение

Для численного решения уравнения (12.14) разобьем окружность L на N отрезков дискретизации длиной $\Delta L = \pi d/N$, полагая в пределах отрезка $\mu(M) = \text{const}$. Тогда интеграл в уравнении (12.14) можно заменить суммой ряда, в результате чего интегральное уравнение превращается в систему алгебраических уравнений N -го порядка

$$R_{из.i} \mu_i + \Delta L \sum_{k=1}^{k=N} \mu_k a_{ik} = \varphi_{т.i} - \varphi_{с.т.i}, \quad (12.15)$$

$$a_{ik} = \int_{l_k}^{l_k + \Delta L} K(M_i, Q_k) dl_k, \quad (12.15')$$

где i -й узел дискретизации отображает исследуемую точку M , а k -й узел - точку Q , соответствующую переменной интегрирования.

В матричной форме система (12.15) имеет вид

$$\mathbf{A}\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\varphi}, \quad (12.16)$$

где $\mathbf{A} = \{a_{ik}\}_{1...N}$ - квадратная матрица, элементы которой определяются формулами:

$$a_{ik} = \Delta L (\rho/\pi \ln(1/r_{ik}) - R_{из.i}/(\pi d)) + R_{из.i} \delta_i;$$

$$r_{ik} = 0,5 \sqrt{2} d \sqrt{1 - \cos \theta_{ik}};$$

$$\theta_{ik} = 2\pi / N |i - k|;$$

$$\delta_i = 1 \text{ при } i = k;$$

$$\delta_i = 0 \text{ при } i \neq k;$$

$\boldsymbol{\varphi} = \{\varphi_i\}_{1...N}$ - столбцовая матрица с элементами двух видов

$$\varphi_i = \begin{cases} \varphi_{т.i} - \varphi_a & \text{при } i = 1...N_a; \\ \varphi_{т.i} - \varphi_k & \text{при } i = N_a + 1 \dots N, \end{cases} \quad (12.16')$$

N_a - число узлов дискретизации в пределах анодной области.

В системе (12.16) к неизвестным следует в общем случае отнести и потенциал $\varphi_{т.i}$, т.е. переместить его в левую часть. Однако для ограниченных по размеру тел можно допустить $\varphi_t = \text{const}$, установив к тому же произвольно начальный уровень отсчета потенциал, например, приняв $\varphi_t = 0$. Тогда соотношения (12.16') должны быть скорректированы: $\varphi_i = -\varphi_a$ и $\varphi_i = -\varphi_k$ соответственно.

Поскольку исследуемая M_i и влияющая Q_k точки находятся по разные стороны слоя изоляции трубопровода, каким бы тонким не был этот слой, то при $i = r$ всегда $r_{ik} > 0$. Как показал численный эксперимент в этой особой точке достаточно взять $r_{ik} = \Delta L$.

12.5.4. Анализ результатов расчета

Расчет выполнен по программе EZST из пакета APM-ЭХЗ-6П. Исследовалось влияние различных параметров с целью отыскания определяющих.

Параметры анода P_a и φ_a

В табл.12.3 приведены результаты расчета скорости коррозии на поверхности арматурного стержня диаметром $d = 20$ мм при условии $P_k = 2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ с вариантами параметров P_a и φ_a для анода при соотношении площади анода к площади катода 1:12 и различной пористости ($s_{\text{пор}}$) защитного слоя бетона над анодом. При этом окружность была разбита на 80 отрезков дискретизации равной длины, из которых 6 располагались на аноде.

В табл.12.3 приведены данные о коррозии в приграничном с катодом узле (в узле 6), т.е. максимальные значения токов коррозии.

Таблица 12.3

P_a , Ом·м ²	φ_a , В	$s_{\text{пор}}$	$j_{\text{ср}}$, мА/м ²	j_{max} , мА/м ²	v_{max} , мм/год
2	-0,4	0,1	0,090	0,900	1,062
0,5	-0,5	0,4	0,417	1,042	1,230
0,2	-0,6	1	0,963	0,963	1,136

Основной вывод, который следует из табл.12.3, - *скорость коррозии слабо зависит от параметров анода P_a и φ_a* , поскольку эти параметры изменяются в процессе коррозии одновременно и в разных направлениях.

Электрическое сопротивление среды

Оценочный расчет выполнен при *изменении* величины удельного электрического сопротивления (ρ) в 20 раз при неизменных значениях $P_a = 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, $\varphi_a = -0,6 \text{ В}$ и $d = 20 \text{ мм}$. Результаты расчета следующие

$$\begin{aligned} v_{\max} &= 1,254 \text{ мм/год при } \rho = 5 \text{ Ом}\cdot\text{м}; \\ v_{\max} &= 0,823 \text{ мм/год при } \rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}; \end{aligned}$$

Судя по результатам - *скорость коррозии слабо зависит от величины* ρ , хотя и растет с его уменьшением.

Диаметр стержня

Расчет при $P_a = 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, $\varphi_a = -0,6 \text{ В}$ и $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ показал, что *диаметр (d) - также не определяющий фактор коррозии*. Результаты расчета следующие

$$\begin{aligned} v_{\max} &= 1,211 \text{ мм/год при } d = 10 \text{ мм}; \\ v_{\max} &= 1,074 \text{ мм/год при } d = 30 \text{ мм}. \end{aligned}$$

Соотношение площадей анода и катода

В табл.12.4 приведены результаты расчета скорости коррозии в зависимости от количества узлов дискретизации на аноде (N_a) и катоде (N_k) при общем их числе $N = 80$ и $P_a = 0,2 \text{ Ом}\cdot\text{м}^2$, $\varphi_a = -0,6 \text{ В}$, $\rho = 20 \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $d = 20 \text{ мм}$.

Таблица 12.4

N_a	N_k	$v_{\max}$, мм/год
2	78	1,701
6	74	1,136
40	40	0,302
75	5	0,055

Как следует из табл.12.4, с *увеличением относительного размера анода скорость коррозии существенно снижается*. Это один из важных определяющих факторов коррозии.

Из этого можно сделать и такой вывод: *по мере разрушения защитного слоя бетона скорость коррозии снижается*. Но это уже вряд ли является утешением.

Самая опасная ситуация (N_a - мало) имеет место в начале процесса разрушения - при появлении первой трещины. К тому же надо учесть, что *катодом* работает не только часть рассматриваемого стержня, но и все остальные стержни конструкции, если они находятся в неразрушенном бетоне и гальванически связаны между собой.

Заключение.

Анализируя все результаты в совокупности можно сделать один глобальный вывод: при первых, случайных разрушениях защитного слоя бетона начнется *самовозбуждающийся* процесс коррозии: продукты коррозии металла в тонких трещинах бетона вызовут механическое разрушение бетона; увеличивающиеся в размерах трещины вызовут дальнейшее увеличение общего тока коррозии и т.д. Процесс взаимовлияния будет протекать до полного разрушения железобетона.

Определяющим фактором коррозии является э.д.с. коррозионной пары, т.е. разность стационарных потенциалов анода (φ_a) и катода (φ_k).

При измерениях на железобетоне в естественных условиях возможно определение только лишь некоторого *среднего стационарного потенциала конструкции* $U_{ст}$, который свидетельствует о коррозии косвенно. Однако при фиксировании величины $U_{ст} < -0,2$ В можно говорить о наличии работающей коррозионной пары. Чем больше трещин в бетоне, тем отрицательнее потенциал арматуры железобетонной конструкции.

Основная рекомендация по защите арматуры железобетонной конструкции - *обеспечение целостности цементного камня*. После появления трещин - процесс коррозии неуправляем.

Литература

1. Акользин П.А. Коррозия и защита металла теплоэнергетического оборудования. М.: Энергоиздат, 1982.-304 с.
2. Артамонов В.С. Защита железобетона от коррозии. М.: Стройиздат, 1967. -128 с.
3. Бибииков Н.Н., Люблинский Е.Я., Поварова Л.В. Электрохимическая защита морских судов от коррозии. Л.: Судостроение, 1971.
4. Бэкман В, Швенк В. Катодная защита от коррозии: Справочник. М.: Металлургия, 1984. -495 с.
5. Волков Б.Л., Тесов Н.И., Шуванов В.В. Справочник по защите подземных металлических сооружений от коррозии. Л.: Недра, 1975.-224 с.
6. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. М.: Металлургия, 1981.-270 с.
7. Дизенко Е.И., Новоселов В.Ф. и др. Противокоррозионная защита трубопроводов и резервуаров. М.: Недра, 1978. -199 с.
8. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. ГОСТ 9.602-89. М.: Издательство стандартов. 1991.
9. Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Металлургия, 1976.-472 с.
10. Защита подземных металлических сооружений от коррозии: Справочник. / И.В.Стрижевский, А.Д.Белоголовский и др. М.: Стройиздат, 1990. -303 с.
11. Инструкция по защите городских подземных трубопроводов от коррозии. РД 153-39.4-091-01. АКХ им.К.Д.Памфилова, М.: Воениздат, 2002.-202 с.
12. Инструкция по контролю состояния изоляции законченных строительством участков трубопроводов катодной поляризацией / Глазов Н.П., Ловачев В.А. и др. М.: ВНИИСТ. 1995.-40 с.

13. Иванов В.Т., Газизов Р.Р. Методы граничных интегральных уравнений и их приложения. Уфа: Башгосуниверситет, 1990.-85 с.

14. Иванов В.Т. Методы расчета и оптимизации электрических и тепловых полей в электрохимических системах. Уфа: Башгосуниверситет, 1977.- 67 с.

15. Иоссель Ю.Я., Кленов Г.Э. Математические методы расчета электрохимической коррозии и защиты металлов: Справочник. М.:Металлургия, 1984. –272 с.

16. Иоссель Ю.Я., Кленов Г.Э., Павловский Р.А. Расчет и моделирование контактной коррозии судовых конструкций. Л.: Судостроение, 1979.-264 с.

17. Каунов С.Я., Школенко А.М., Михайлова Л.Н. Антикоррозионная защита подземных коммуникаций. Киев:, Будивельник, 1968.-99 с.

18. Коррозия и защита судов: Справочник / Е.Я.Люблинский, В.Д.Пирогов и др. Л.: Судостроение, 1987.-375 с.

19. Коррозия бетона в агрессивных средах/ Под ред. Москвина В.М. М.: Стройиздат, 1971.-250 с.

20. Красноярский В.В. Электрохимический метод защиты металлов от коррозии. М.: Машгиз, 1961.-87 с.

21. Красноярский В.В., Цикерман Л.Я. Коррозия и защита подземных металлических сооружений. М.:Высшая школа,1968. -296 с.

21. Кеше Г. Коррозия металлов. М.:Металлургия. 1984. – 400 с.

21. Лорткипанидзе Б.Г. Цепи постоянного тока с утечкой и электрическая защита от коррозии.Тбилиси Изд.АН ГССР. 1962. – 289 с.

22. Люблинский Е.Я. Электрохимическая защита от коррозии. М.:Металлургия, 1987.-97 с.

23. Люблинский Е.Я. Протекторная защита морских судов и сооружений от коррозии.Л.: Судостроение,1979.-188 с.

24. Маттсон Э. Электрохимическая коррозия. М.:Металлургия, 1991.

25. Методы расчета электрических полей при электрохимической защите металлических сооружений от коррозии/ В.Н.Остапенко, Ф.Н.Жапакова, В.В.Лукович и др. Киев: Наук. думка, 1980.-251 с.

26. Методические рекомендации по количественной оценке состояния магистральных газопроводов с коррозионными дефектами, их ранжирования по степени опасности и определению остаточного

ресурса. ВРД-39.10-004-99. ПО «Спецнефтегаз». М.: ВНИИГАЗ. 2000. - 50 с.

26. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., , Гузеев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980. - 536 с.

27. Муниц Н.М. Защита силовых кабелей от коррозии. М.: Энергоиздат, 1982. - 176 с.

28. Никольский К.К. Коррозия и защита от нее подземных металлических сооружений связи. М.: Радио и связь, 1984. - 208 с.

29. Никитенко Е.А. Электрохимическая коррозия и защита магистральных газопроводов. М.: Недра, 1972. - 120 с.

30. Палашов В.В. Расчет полной катодной защиты. М.: Недра, 1988. - 136 с.

31. Плудек В. Защита от коррозии на стадии проектирования. М.: Мир, 1980. - 438 с.

32. Рейзин Б.П., Стрижевский И.В., Шевелев Ф.А. Коррозия и защита коммунальных водопроводов. М.: Стройиздат, 1979. - 395 с.

33. Руководство по эксплуатации средств противокоррозионной защиты трубопроводов / Хмельницкий Б.И., Петров Н.А., Соколов А.С. М.: ВНИИГАЗ. 1997. - 118 с.

34. Сборник нормативных документов для работников строительных и эксплуатационных организаций газового хозяйства РСФСР. Защита подземных трубопроводов от коррозии/ ВО Росстройгазификация, АКХ им. К.Д. Памфилова. Л.: Недра, 1991. - 221 с.

35. Стрижевский И.В. Теория и расчет дренажной и катодной защиты магистральных трубопроводов от коррозии блуждающими токами. М.: Гостоптехиздат. 1963. - 238 с.

35. Стрижевский И.В., Дмитриев В.И. Теория и расчет влияния электрифицированных железных дорог на подземные металлические сооружения. М.: Стройиздат. 1967. - 248 с.

36. Стрижевский И.В., Сурис М.А. Защита подземных теплопроводов от коррозии. М.: Энергоатомиздат, 1983. - 344 с.

37. Ткаченко В.Н. Электрохимическая защита нефтепромысловых резервуаров и аппаратов. М.: ВНИИОЭНГ, 1982. - 52 с.

38. Ткаченко В.Н. Методы расчета и моделирования токов коррозии и защиты трубопроводных сетей произвольной конфигурации// Док. дисс. - М.: МИНХ и ГП им. Губкина, 1985.

39. Ткаченко В.Н. Расчет поля токов при электрохимической защите трубопроводных сетей произвольной структуры// Электромеханика, 1989. С.13-19.

40. Ткаченко В.Н. Методы расчета и проектирования электрохимической защиты трубопроводных сетей от подземной коррозии /.М.: ВНИИОЭНГ. Деп.6.04.88. №1532-НГ-137 с.

41. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов. М.: АН СССР, 1960.

42. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии. ГОСТ 25812-83. М.: Издательство стандартов. 1983.

43. Улиг Г.Г., Ревя Р.У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. Л.: Химия, 1989.-456 с.

44. Цикерман Л.Я., Никольский К.К.,Разумов Л.Д. Расчет катодной защиты трубопроводов. М.: Госстройиздат, 1958.-142 с.

44. Цикерман Л.Я. Диагностика коррозии трубопроводов с применением ЭВМ. М.: Недра. 1977. – 320 с.

45. Электрохимическая защита трубопроводов от коррозии/ В.Н.Остапенко, Л.Н.Ягупольская, В.В.Лукович и др. Киев:Наук. думка, 1988.-245 с.