

Документ № 01294 представлен на конференции
по Коррозии 2001, 11 - 16 марта 2001, Хьюстон,
Техас

Изданный NACE International, Хьюстон, Техас
www.nace.org © NACE, 2001

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ПОГРЕШНОСТИ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ ПОТЕНЦИАЛА ПОДЗЕМНОГО СООРУЖЕНИЯ

James R. Dimond Dimondale Co., Inc.
Почтовый ящик 838
Middlefield, Огайо 44062

Франк Дж. Ансуини
Electrochemical Devices, Inc.
Почтовый ящик 31
Альбион, Род-Айленд 02802

АННОТАЦИЯ

Основными инструментами, которые используются специалистами служб ЭХЗ при замерах потенциала сооружения, являются вольтметр и переносной медносульфатный электрод сравнения (МЭС). Применение данных инструментов помогает сделать выводы о коррозионном состоянии трубопровода и эффективности системы катодной защиты. Не всегда учитывается, что присутствуют источники погрешности в проводимых измерениях. В материале рассмотрены возможные источники погрешностей и способы их минимизации.

ВВЕДЕНИЕ

Измерения потенциалов с применением МЭС и вольтметра стали одними из наиболее распространенных измерений, применяемых при оценке коррозионного состояния подземного сооружения. Результаты измерений представляют ценную информацию о коррозии и являются основой для оценки эффективности системы катодной защиты. Фактически основными критериями коррозионной защищенности подземного сооружения в соответствии с действующими стандартами, являются значения потенциалов. Чтобы сделать правильные выводы о работе системы катодной защиты, очень важно, чтобы специалисты служб ЭХЗ понимали возможные источники погрешностей, возникающих при проведении потенциальных измерений, и использовали полученные знания и опыт, чтобы минимизировать эти погрешности.

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ ЦЕПЬ

Цепь измерения потенциала сооружения - это цепь постоянного тока, показанная на рисунке 1.

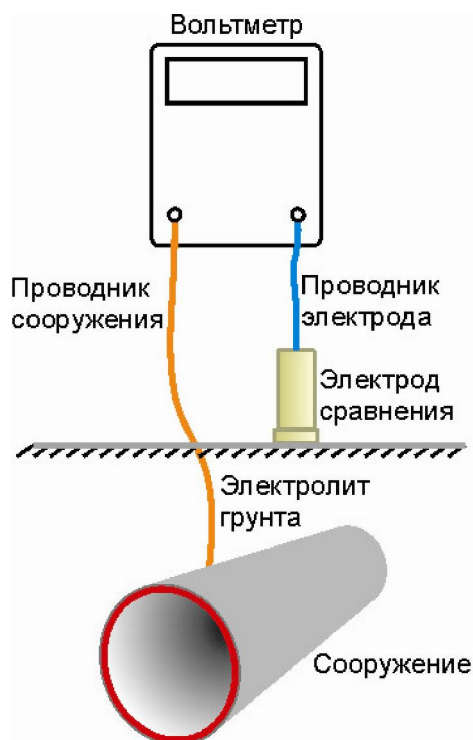


Рисунок 1а. Физическое расположение компонентов при измерении потенциала.

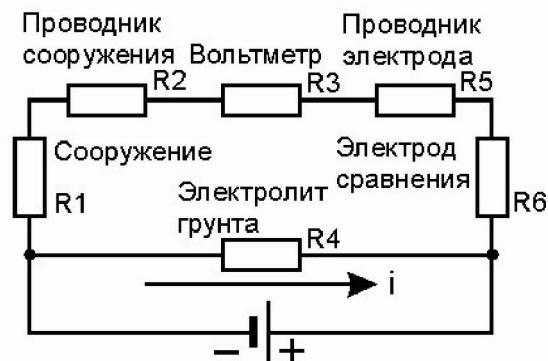


Рисунок 1б. Эквивалентная электрическая схема измерения потенциала. Источником тока, текущего в цепи является потенциал, присутствующий между сооружением и МЭС.

Рисунок 1а иллюстрирует практическую схему измерения потенциала, рисунок 1б - эквивалент электрической схемы этой цепи. Источником потенциала цепи является потенциал, присутствующий между МЭС и сооружением. Когда цепь замкнута во время проведения измерений, создаются предпосылки для протекания тока под действием потенциала. Величина электрического тока подчиняется закону Ома: $I = U/R$, и обратно пропорциональна сумме всех сопротивлений в цепи. Например, если потенциал цепи составит один вольт, а сумма сопротивлений - 10 МОм, ток цепи измерения составит 0,1 мкА.

Падение напряжения присутствует на каждом из резистивных элементов в цепи измерения. Необходимо учитывать присутствие защитного тока, протекающего через электролит грунта при действующей системе катодной защиты, также создающего падение напряжения на резистивных элементах измерительной цепи и влияющего на конечный результат измерения потенциала. Предложенная схема имеет упрощенный вид, не учитывая все детали протекания тока при потенциальных измерениях. Указанные факторы являются источниками погрешностей измерения. При производстве измерений должны использоваться различные методы, компенсирующие или минимизирующие погрешности в зависимости от природы их происхождения.

В большинстве случаев сопротивление соединительных проводов и сооружения достаточно мало, поэтому падение напряжения, которое присутствует на них во время измерений, несущественно. Если использовать эквивалентную схему из приведенного выше примера и предположить, что сопротивление соединительных проводников R2, R5 и сооружения R1 имеет значения 1 Ом, это вызовет падение напряжения 0,1 мВ. Данная величина значительно ниже предела чувствительности обычно используемых измерительных приборов. У большинства МЭС внутреннее сопротивление (R_6 на эквивалентной схеме) около 1 кОм. Даже если бы это сопротивление было бы на порядок выше, падение напряжения при значениях, указанных в вышеупомянутом примере составило бы только 1 мВ. Сопротивление электролита является весьма переменной величиной в пределах от довольно низкого для потенциальных измерений в морской воде, до очень высокого для потенциальных измерений в скальном, сухом или вечномёрзлом грунте. Действующая стратегия состоит в том, чтобы выбрать вольтметр, внутреннее сопротивление которого было бы на несколько порядков выше, чем любое другое сопротивление в цепи. В этом случае падение напряжения на вольтметре будет составлять практически всё падение напряжения, погрешность измерения в этом случае будет не существенной.

СНИЖЕНИЕ ОМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ

Омическая составляющая (или IR , как указано в источнике), измеряемого потенциала является падением напряжения, вызванным протеканием наложенного системой катодной защиты тока, протекающего между сооружением и МЭС. Указанное падение напряжения по сути является погрешностью, суммированной с поляризационным потенциалом. Таким же образом, любые внешние токи, текущие через электролит в области между МЭС и сооружением, вызовут падение напряжения, сказывающееся на результате измерения как дополнительная погрешность. Системы катодной защиты и системы электроснабжения - возможные источники указанных токов. Величина погрешностей, вызванных падением напряжения на омической составляющей, может быть существенной. Необходимо пытаться минимизировать их в максимально возможной степени.

Общепринятая методика исключения омической составляющей из потенциальных измерений предполагает кратковременное прерывание тока катодной защиты. Указанное действие вызывает мгновенное падение напряжения, которое, как полагают, исключает омическую составляющую. Считается, что потенциал, измеренный сразу же после этого кратковременного прерывания, является поляризационным потенциалом сооружения. Ясно, что данный метод работоспособен в системе, обеспечивающей синхронное отключение всех станций катодной защиты, и нет никаких других источников тока, текущего через электролит.

Проблема, которую необходимо рассмотреть, используя синхронное отключение - что считать мгновенным падением напряжения? Ответ не прост, так как он зависит от свойств сооружения, его изоляции, электролита и метода прерывания тока. Рассматривая ответ с электрической точки зрения, это зависит от емкости и индуктивности цепи. Измерение поляризационного потенциала может быть сделано спустя микросекунды после текущего прерывания в низкоомном грунте. Сооружения, находящиеся в высокоомном грунте, обычно требуют нескольких сотен миллисекунд или больше для исключения омической составляющей.

Прерывание тока путем отключения питающего станции катодной защиты напряжения переменного тока, а не на выходе выпрямителя станции катодной защиты увеличит запаздывание, потому что индуктивность цепи более высока. Для обеспечения необходимой точности измерения следует использовать осциллограф, визуально контролируя момент падения потенциала.

Для ситуаций, где синхронное прерывание не может использоваться для получения достоверных результатов, с целью минимизации погрешности измерения поляризационного потенциала за счет омической составляющей, часто используются датчики потенциала, или, что то же самое, вспомогательные электроды. Это небольшие образцы металла, по свойствам подобного металлу сооружения, которые электрически коммутируются с сооружением через ключ. Образец для измерения размещается в непосредственной близости от МЭС, поляризационное состояние образца, как предполагают, подобно поляризационному состоянию сооружения. Измерения делаются так же, как изложено выше за исключением того, что вспомогательный электрод, а не станции катодной защиты на короткий момент времени отключаются от сооружения. Появляется возможность минимизировать погрешность, обусловленную падением напряжения на омической составляющей при измерении потенциала без прерывания тока катодной защиты.

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛА В БЕТОНЕ

Производство потенциальных измерений в бетоне, или через бетон связано с несколькими источниками погрешностей. Некоторые источники этих погрешностей будут здесь рассмотрены.

Протекание тока через электролит обеспечивается посредством ионов, которые физически двигаются через электролит. В потенциальной области анионы двигаются в одном направлении, а катионы в противоположном направлении. Если подвижности ионов неравны, баланс потенциалов нарушается и создаются предпосылки к возникновению потенциала. Этот потенциал, который называют потенциалом соединения, вносится в измерение как погрешность. В бетоне, как правило, имеются области различных композиций электролита. Например, хлористым натрием (NaCl) часто обрабатывается поверхность бетона для того, чтобы удалить лед; натрий и ионы хлорида обладают совершенно разной подвижностью ионов. Другой пример - насыщение угольной кислотой бетона, реакция материала с атмосферной двуокисью углерода, которая распространяется внутрь от подвергнутой реакции поверхности и вызывает изменение и в химическом составе и в pH факторе бетона. Каждый из них может способствовать внесению погрешности в измерение потенциала в бетонных конструкциях.

Подвижность всех ионов в бетоне замедляется клеточной микроструктурой материала. Следовательно, бетон имеет высокое удельное сопротивление электролита, таким образом, присутствие любого внутреннего тока, текущего через него, будет сопровождаться присутствием относительно высокой омической составляющей. Источники этих внутренних токов, как правило - токи коррозии, вызванные коррозией арматуры. Падение напряжения на омической составляющей суммируется в измерениях с потенциалом коррозии и может вызвать погрешность в несколько сотен милливольт.

Погрешности той же самой величины были зарегистрированы при измерениях, сделанных через бетон относительно сооружения, заглубленного ниже бетонного перекрытия. При замерах потенциалов на заглубленных резервуарах, сделанных относительно МЭС, расположенного на бетонном перекрытии и МЭС, расположенного в грунте, непосредственно у сооружения, разница значений потенциалов составляла от 20 до 260 мВ. При этом потенциалы относительно электрода, расположенного на бетоне имели завышенное значение по абсолютной величине. Во время проведения измерений катодная защита была отключена, чтобы устранить защитный ток, как возможный источник погрешности. Подобные потенциальные измерения были произведены на трубе, расположенной ниже взлетно-посадочной полосы аэропорта. Измерения, сделанные через бетон около края взлетно-посадочной полосы, были приблизительно на 200 мВ более отрицательны, чем результаты подобного измерения, произведенного через грунт. Увлажнение бетона и грунта не значительно изменяло измеренные значения. Очевидно, что измерения потенциала подземного сооружения никогда не должны производиться через бетон.

ИЗМЕРИТЕЛИ

В настоящее время большинство специалистов ЭХЗ использует цифровые измерители. Точность даже недорогих измерителей достаточно высока. Они могли бы быть более чем соответствующим инструментом для снятия показаний, если бы падение напряжения в цепи измерения не было так существенно. Когда измеритель подключается в измерительную цепь, для снятия показаний о потенциале сооружения, цепь замыкается и ток течет как указано на рисунке 1. Измеритель измеряет только напряжение, присутствующее на входных зажимах, падение напряжения, присутствующее на соединительных проводниках, МЭС, электролите и сооружении не измеряется. Если падение напряжения будет существенным, то измеритель покажет заниженный, относительно истинного потенциал. В связи с этим величина входного сопротивления измерителя столь же важна, как и его точность, возможно даже более важна.

Большинство цифровых измерителей общего назначения, используемых сегодня для коррозионных измерений, имеет входное сопротивление 10 МОм. Это может показаться достаточно высокой величиной, тем не менее, не достаточной при определенных обстоятельствах. Предположим, что при измерении потенциала зафиксировано значение 900 мВ, при этом сопротивление внешней цепи составляет 10 кОм. 10 кОм это 0.1 % от 10 МОм. Таким образом, 0.1 % напряжения будет потеряно во внешней цепи и 99.9 % будет измерено измерителем. Теперь рассмотрим случай, где сооружение находится в бетоне, скальном или сухом грунте. Сопротивление внешней цепи в этой ситуации может составить 1 МОм и выше. Полное сопротивление цепи теперь составило бы 11 МОм, при этом 90 %, приходится на измеритель и 10 %, на внешнюю цепь. Падение напряжения в этом случае будет распределено следующим образом: 810 мВ падает на измерителе и 90 мВ на внешней цепи. Это уже существенная погрешность.

Привилегированным является способ измерения поляризационного потенциала потенциометрическим вольтметром. Этот тип измерителя был стандартным полевым коррозионным прибором, вплоть до середины 1970-ых. Внутренняя батарея измерителя подает напряжение противоположной полярности в измерительную цепь. Подаваемое напряжение регулируется, для точной компенсации измеряемого потенциала. Далее фиксируется компенсационное напряжение батареи. При отсутствии тока, текущего через цепь, полностью

исключается падение напряжения на омической составляющей. Этот тип измерителя значительно дороже, по сравнению с цифровыми измерителями общего назначения, поэтому понятно, почему приборы данного типа не находят широкого применения.

Переход к использованию цифровых измерителей, в рамках развития технического прогресса является, в действительности шагом назад в коррозионных изысканиях. Потенциометрические вольтметры фактически устраняли погрешности, вызванные влиянием сопротивления внешней цепи. Цифровые универсальные измерительные приборы повторно ввели эту погрешность при замерах потенциалов в высокоомных грунтах. Использование метода компенсации всегда обеспечивает более точные результаты измерений. Однако существует возможность преобразования стандартного вольтметра в потенциометрический вольтметр дополнением простым недорогим преобразователем. Два таких подхода иллюстрирует рисунок 2. На рисунке 2а показана схема с использованием одного измерительного прибора. При измерении сначала переменным резистором R1 устанавливается нулевое значение потенциала. Затем переключатель S1 переводится в противоположную позицию и по показаниям вольтметра измеряется значение потенциала. На рисунке 2б схема с использованием двух измерительных приборов. Переменным резистором, ориентируясь на показания вольтметра 1, устанавливается нулевое значение потенциала, переключатель переводится в противоположную позицию и по показаниям вольтметра 2 фиксируется фактическое значение потенциала. Это основные концептуальные модели, устраняющие погрешности, вызванные влиянием сопротивления внешней цепи при измерении потенциала.

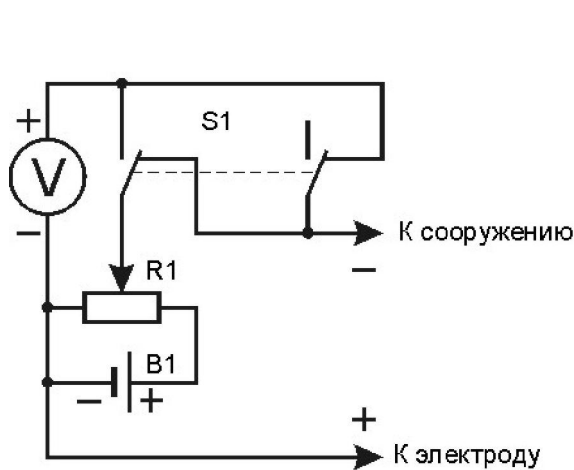


Рис.2а

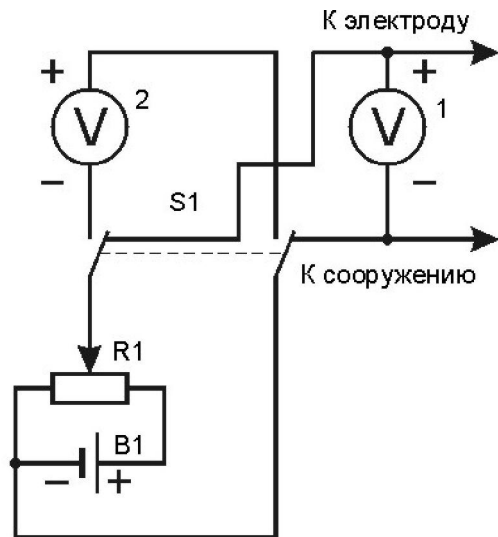


Рис 2б

Другой способ позволяющий исключить погрешности при измерении потенциала заключается в использовании измерителей с переменным значением входного сопротивления или применением измерителей с различным входным импедансом. Если результаты измерений различаются, присутствует погрешность, обусловленная влиянием внешней цепи. Сопротивление внешней цепи может быть вычислено по формуле (1).

Формула 1: Сопротивление внешней цепи:

$$v_1 \times ((r_1 + R) / r_1) = v_2 \times ((r_2 + R) / r_2)$$

v_1 = показания измерителя 1; r_1 = сопротивление измерителя 1; v_2 = показания измерителя 2; r_2 = сопротивление измерителя 2; R = сопротивление внешней цепи.

Используя значение сопротивление внешней цепи, можно вычислить поправочный коэффициент по формуле (2).

Формула 2: Поправочный коэффициент:

$$(r + R) / r = C$$

r = сопротивление измерителя; **R** = внешнее сопротивление цепи; **C** = поправочный коэффициент.

РЕГИСТРИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА, ВХОДНЫЕ ЦЕПИ СТАНЦИЙ КАТОДНОЙ ЗАЩИТЫ И СИСТЕМ ТЕЛЕМЕТРИИ

Использование регистрирующих устройств, входных цепей станций катодной защиты, особенно в режиме автоматического поддержания потенциала и систем телеметрии существенно увеличилось за последние несколько лет. Применение указанного оборудования совместно с МЭС требует принятия особых мер предосторожности. Как отмечалось ранее, подключение измерительного устройства в цепь измерения потенциала, вызывает замыкание электрической цепи и, как следствие, протекание электрического тока. Сила тока обратно пропорциональна импедансу цепи. Этот ток вызывает поляризацию электрода, то есть приводит к сдвигу потенциала, уровень сдвига пропорционален току. Если сдвиг потенциала малой величины, или кратковременный, то МЭС обычно восстанавливается. Когда сдвиг существенный и/или присутствует продолжительный период времени, возможна ситуация, когда электрод может и не восстановиться. Хлорсеребряные электроды более восприимчивы к поляризации, нежели медносульфатные электроды, поскольку элементы их конструкции имеют малые размеры, в результате имеет место увеличенная плотность тока на элементах хлорсеребряного электрода, вызывающая его повреждение или разрушение. Это не относится к стационарным МЭС, но существенные токовые нагрузки, вызванные низким импедансом измерительной цепи, могут стать причиной сдвига потенциала, вызванного поляризацией электрода.

У большинства современных устройств, предназначенных для потенциальных измерений входное сопротивление равно, или более 10 МОм. Высокоомные входы задействованы на время проведения цикла измерения, то есть на период времени, когда непосредственно производится замер. Необходимо исключать ситуации снижения входного сопротивления устройств в циклах ожидания. Входное сопротивление указанных устройств должно быть не менее 10 МОм на период проведения активных измерений, в циклах ожидания лучшим решением является обеспечение разрыва измерительной цепи.

Определить входное сопротивление относительно просто. Для этого к входным зажимам контролируемого устройства подключается батарейка на 1,5 В последовательно соединенная с вольтметром, имеющим входное сопротивление 10 МОм. Снимаются показания вольтметра. Период измерения должен включать циклы как измерения, так и ожидания. Напряжение во время измерения не должно превышать 0,15 В. Увеличение напряжение до 0,75 В, или превышение этого значения, во время циклов ожидания или измерения, говорит о том, что устройство имеет слишком низкое входное сопротивление, это может привести к поляризации МЭС. Многие системы телеметрии имеют несколько независимых входных каналов. Необходима отдельная проверка по всем каналам и во всех рабочих режимах, для получения гарантии, подтверждающей соответствие всех каналов возможности работы с МЭС.

ЭЛЕКТРОДЫ СРАВНЕНИЯ

Другими источниками погрешностей при потенциальном измерении может стать нарушение правил эксплуатации МЭС или непонимание принципов его работы, а так же факторов, влияющих на показания электрода. Эти погрешности могут быть вызваны воздействием температуры, света, нарушением контакта электрода с грунтом или не соблюдением правил технического обслуживания. Погрешности, полученные в результате замеров с применением переносного электрода более вероятны, нежели погрешности при замерах относительно стационарных МЭС, поскольку стационарные электроды менее подвержены внешним воздействиям.

Температура

Электроды сравнения подвержены воздействию температуры. Температурный коэффициент медносульфатного электрода около 1 мВ на $^{\circ}\text{C}$, это может существенно отразиться на результатах измерения. Предположим, что измеренный переносным электродом сравнения на трубопроводе потенциал составляет - 860 мВ, при этом температура окружающего воздуха 30 $^{\circ}\text{C}$. Если то же самое измерение произвести при температуре 5 $^{\circ}\text{C}$, перепад температур вызовет сдвиг потенциала на 25 мВ. Потенциал трубопровода в этом случае составит - 835 мВ, хотя он на самом деле остался неизменным. Исправить ситуацию можно приведением к стандартной температуре с использованием поправки, проблема в том, что отсутствует общепринятое значение этой стандартной температуры. Отмечаемая на практике сезонная вариация потенциалов, измеренных относительно переносного электрода, как правило, результат температурной погрешности.

Свет

Медносульфатные электроды являются фоточувствительными. Многие переносные электроды имеют прозрачный корпус или прозрачное смотровое окно для контроля уровня электролита. Это может стать серьезной проблемой при проведении измерений такими электродами. Разница собственного потенциала электрода с прозрачным корпусом при солнечном свете может превышать 50 мВ, относительно потенциала электрода в затемненном состоянии. Для исключения указанной проблемы, необходимо исключить попадание света на прозрачные электроды при проведении измерений.

Контактное сопротивление

Контактное сопротивление между рабочей частью электрода и грунтом может быть чрезвычайно высоким. Если электрод размещается в сухом грунте, камне или гравии, измерительная цепь может быть вообще разомкнута. При замерах в сухих грунтах необходимо смачивание грунта в месте установки электрода. Однако, в ситуации, когда грунт пересыхает более, чем на 10 см от поверхности, отсутствует гарантия того, что смачивание грунта даст положительные результаты. Высокое сопротивление грунта между сооружением и точкой установки электрода сравнения может вызвать существенную погрешность измерения. Практических способов понизить сопротивление высокоомного грунта не существует.

Единственный способ устранения погрешности - это применение потенциометрического вольтметра или измерителя с переменным входным сопротивлением с последующим вычислением фактического значения потенциала.

Обслуживание

Переносные электроды сравнения должны регулярно чиститься и дополняться электролитом. Сульфат меди содержит растворенный кислород. Кислород постепенно взаимодействует с медью, формируя на медном стержне окись меди, смещающей потенциал электрода. Увеличение окиси меди увеличивает смещение. Возможное смещение потенциала может достигать 10 мВ за неделю. Для исключения указанной проблемы необходима регулярная чистка и доливка электролита (предпочтительно еженедельно, по крайней мере, ежемесячно). Электроды, заполненные гелеобразным электролитом, обладают существенно большей стойкостью, благодаря минимизации контакта с атмосферой.

Другая проблема касается электродов с керамическим наконечником. Пористость керамики подбирается таким образом, что бы обеспечить истечение электролита для создания проводимости. Со временем возможно полное истечение электролита, при этом поры частично заполняются солями сульфата меди, увеличивающими сопротивление электрода. Процесс является прогрессирующим, каждый раз, после пересыхания электрода все больше пор керамики теряет пропускную способность сопровождаемую повышением сопротивления. В конечном счете, наконечник становится полностью изолированным. Возможно восстановление наконечника кипячением в дистиллированной воде в течении одного - двух часов. Подобная ситуация возникает в случае загрязнения керамики грязью или нефтью. Единственный выход из данной ситуации - замена наконечника.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Источниками погрешностей при потенциальных измерениях являются: омическая составляющая потенциала, сопротивление внешней цепи, конструктивные особенности электродов. Обслуживающему персоналу необходимо понимать влияние внешних факторов на возникновение погрешностей и учитывать это влияние при измерении потенциалов.

Стандартные цифровые универсальные измерительные приборы с входным сопротивлением 10 МОм не приемлемы для получения достоверных результатов при потенциальных измерениях в высокоомных грунтах. В этих условиях необходимо использовать измеритель с очень высоким входным сопротивлением, или потенциометрический вольтметр.

Перевод и иллюстрации Енин А.А.