

Введение Защита подземных металлических конструкций от коррозионных разрушений до сих пор остается сложной инженерно-технической проблемой. Одними из главных препятствий на пути ее решения являются эксплуатация в условиях повышенной влажности и наличие блуждающих токов [1]. Известно [2], что удельное электрическое сопротивление влажного песчано-глинистого грунта почти в 3 раза ниже по сравнению с аналогичным видом сухой почвы, что значительно повышает ее коррозионную агрессивность. Блуждающие токи являются одной из основных причин серьезных коррозионных разрушений подземных коммуникаций и сооружений в промышленной зоне. Их возникновение связано с утечкой в грунт постоянного тока, потребляемого наземным и подземным рельсовым транспортом, электросварочными агрегатами и т. д. Интенсивность коррозионных повреждений находится в прямой зависимости от силы блуждающих токов, величина которых, в некоторых случаях, может достигать 200-500 А [3]. Совокупность таких неблагоприятных условий эксплуатации создает предпосылки для создания надежных методов контроля над состоянием подземных коммуникаций. Однако такие средства мониторинга не всегда гарантируют готовность подземной системы к восприятию аварийных токовых нагрузок. Исходя из этого, разработка методик экспериментального анализа диэлектрических свойств подземных трубопроводов и конструкций, работающих в условиях повышенной коррозионной активности, является актуальной задачей. Экспериментальная часть и описание разработанных методик

Для моделирования электрохимических процессов, протекающих в зонах коррозионной опасности металлических конструкций теплотрасс, были разработаны три экспериментальные методики, позволяющие оценить влияние влажности на величину электрического сопротивления материала теплоизоляции и продуктов коррозии стального трубопровода, которые в сухом виде являются диэлектриками.

1. Методика определения зависимости электрического сопротивления от степени увлажнения (остаточной влажности) продуктов коррозии стали

От стальной трубы отделяют три пластины продуктов коррозии шириной 50-60 мм и толщиной 2-3 мм, после чего взвешивают их с точностью до 0,01 г. и погружают в дистиллированную воду. Поверхностную влагу удаляют фильтровальной бумагой. Образцы взвешивают и определяют содержание остаточной влаги (В, %) по формуле: 
$$B = (m_2 - m_1) / m_1 * 100 (\%) \quad (1)$$
 где  $m_1$  – масса сухого образца, г;  $m_2$  – масса влажного образца, г;

Методика измерения электрического сопротивления образцов

На стальной пластине устанавливают полый цилиндр из полимерного диэлектрического материала диаметром 30-40 мм и высотой 20-30 мм, в который до верхнего уровня засыпают графит. После этого сверху кладут образец, устанавливают на него второй цилиндр и снова засыпают графит. Конструкцию накрывают стальной пластиной, на которую ставят груз массой 200 г для плотного контакта деталей собранной установки с

токопроводящими поверхностями образца. К стальным пластинам прикрепляют контакты мегомметра и замеряют электрическое сопротивление. Затем образец извлекают из конструкции стенда, сушат в термошкафе при температуре 150 оС в течение заданного времени, взвешивают, определяют остаточное содержание влаги и снова замеряют величину электрического сопротивления. Измерения проводят до тех пор, пока масса образца после сушки не станет равной массе сухого образца. Строят зависимость величины электрического сопротивления от остаточного содержания влаги в образцах.

2. Методика определения электрического сопротивления теплоизоляции стальных трубопроводов при различных степенях увлажнения

В качестве теплоизоляции стальных трубопроводов использовалась мелкодисперсная минеральная вата. Подготовку и испытания образцов можно проводить двумя способами.

Способ 1 Сухую измельченную минеральную вату взвешивают и засыпают в цилиндр, изготовленный из диэлектрического полимерного материала, который имеет следующие геометрические размеры: высота - 10 мм, внутренний диаметр - 20 мм, внутренний объем - 3,14 см<sup>3</sup>. Измерения проводят на лабораторном стенде. Нижний контакт основания стенда смазывают графитовой смазкой и устанавливают образец, на верхнюю поверхность которого насыпают графитовый порошок. Устанавливают верхний контакт стенда и измеряют мегомметром электрическое сопротивление. Далее при помощи шприца производят увлажнение образца и снова замеряют электросопротивление. Измерения проводят с интервалом 2-3 минуты до тех пор, пока показания мегомметра не стабилизируются.

Способ 2 Навеску измельченной минеральной ваты массой 0,24 г. увлажняют водой и хорошо перемешивают до тестообразного состояния. Излишки жидкости механически отжимают и промакивают фильтровальной бумагой. Образец в виде плоского диска взвешивают с точностью до 0,01 г. Содержание остаточной влаги определяют по методике 1. Далее образец укладывают на специально сконструированный стенд для измерения величины электрического сопротивления. Стенд состоит из пластины гетинакса или стеклотекстолита с нанесенными на неё двумя параллельными полосками облуженной меди. Ширина полосок - 10 мм, длина - 50 мм, расстояние между ними - 10 мм. К концам полосок припаяны электрические контакты для присоединения мегомметра. Образец минеральной ваты укладывают на токопроводящие пластины и плотно прижимают. Определяют величину электрического сопротивления. Затем образец сушат в термошкафе при 150 оС заданное время, взвешивают и определяют содержание влаги. После этого замеряют величину электрического сопротивления. Эксперимент проводят до тех пор, пока образец полностью не высохнет. Затем строят зависимость величины электрического сопротивления от содержания воды в образцах.

3. Методика моделирования реальных условий изменения влажности в тепловых камерах

Образцы минеральной ваты в виде небольших

кусков призматической формы в количестве 4 штук, предварительно взвешенные с точностью до 0,01 г, помещают в верхнюю часть закрытой камеры на решетку, установленную над водяной баней с температурой воды 95-100 оС. Через определенное время (15, 30, 45 и 60 мин.) достают один образец и взвешивают его с заданной точностью, определяя затем содержание воды. С помощью данной методики и зависимостей величины электрического сопротивления от содержания воды, полученных по методике 2, можно определить время, когда материал теплоизоляции станет токопроводящим при 100% влажности воздуха. Результаты и их обсуждение На рисунках 1 и 2 показаны зависимости величины электрического сопротивления от объема воды, добавляемой к образцу минеральной ваты и времени процесса пропитки водой образца соответственно. Рис. 1 - Зависимость электропроводности мелкодисперсной минеральной ваты от объема воды, добавленной к навеске образца (сплошная линия показывает экспоненциальную зависимость) Как видно из представленных зависимостей, одновременное добавление воды в количестве 30 об. % от объема образца минеральной ваты резко снижает электрическое сопротивление материала с нескольких мегаом (для сухого образца) до 7 кОм, что свидетельствует о возникновении проводниковых свойств. Дальнейшее увеличение объема добавляемой воды практически не влияет на электропроводность материала. Рис. 2 - Зависимость величины электрического сопротивления от времени процесса пропитки (насыщения) образца минеральной ваты водой (сплошная линия показывает экспоненциальную зависимость) Данные рис. 2 говорят о том, что процесс пропитки минеральной ваты водой протекает практически мгновенно, в течение менее 1 минуты. За это время материал успевает полностью смочиться водой и образовать непрерывную поверхностную токопроводящую пленку. В таблице 1 представлены зависимости величины электрического сопротивления от содержания остаточной влаги в образцах продуктов коррозии. Таблица 1 - Зависимость электрического сопротивления образцов продуктов коррозии от влагосодержания № образца Электрическое сопротивление R, кОм Влагосодержание, % масс. 1 32 5,4 73 5,0 6160 3,1 6430 2,5 2 30 9,0 70 8,5 2020 6,7 2420 5,9 3 50 4,5 85 3,7 8000 2,2 9580 1,7 Видно, что ниже области содержания остаточной воды 3,5 - 8 масс. % наблюдается резкое увеличение величины электрического сопротивления. По всей видимости, в данной концентрационной области токопроводящая поверхностная пленка воды постепенно теряет свою непрерывность, и материал начинает проявлять диэлектрические свойства. Разброс данных по электрическому сопротивлению различных образцов продуктов коррозии может объясняться их различием в плотностях и наличием гидрофильных химических групп на поверхности. Для анализа элементного состава образцов с целью прогнозирования механизма коррозионных процессов в типовых марках стали, использующихся для

изготовления тепловых труб, был использован рентгенофлуоресцентный метод анализа. В результате был рассчитан элементный состав образцов продуктов коррозии (таблица 2). Таблица 2 – Элементный состав образцов продуктов коррозии № образца Элементный состав, % масс. Fe Mn Zn Cr Cu Ni 1 97,83 0,58 0,07 0,05 0,04 - 2 96,95 0,25 - 0,04 0,09 0,03 3 95,18 0,22 0,05 0,03 0,06 - Как показывают данные таблицы, образцы 1 и 3 содержат в своем составе цинк при отсутствии никеля. В образце 2 наблюдается обратная картина. Как правило, легирующая добавка никеля улучшает стойкость стали к окислительной деструкции в присутствии воды, что подтверждается экспериментом по установлению зависимости электрического сопротивления от содержания влаги в образцах продуктов коррозии (таблица 1). Образец 2 характеризуется более высокими диэлектрическими показателями, поскольку переход от состояния диэлектрика в состояние проводника наступает в нем при более высоком содержании воды по сравнению с образцами 1 и 3. По-видимому, это связано с кинетикой коррозионных процессов и влиянием на них различных легирующих добавок. В случае присутствия цинка коррозия протекает быстрее, а продукты коррозии обладают большой пористостью. Присутствие в стали никеля замедляет реакции гидролиза железа и, соответственно, слой продуктов коррозии на трубах характеризуется большей плотностью. На рис. 3 представлена зависимость электрического сопротивления от времени выдержки образцов минеральной ваты при 100% влажности и температуре 95-100 оС. Как видно из зависимости, время выдержки теплоизоляции из минеральной ваты в условиях, моделирующих температурно-влажностные условия аварии на теплотрассе, когда она из диэлектрика ( $R > 5$  Мом) превращается в проводник ( $R 100$  кОм) составляет менее 1 минуты. На рис. 4 представлены результаты эксперимента по кинетике насыщения (увлажнения) образца мелкодисперсной минеральной ваты в условиях 100% влажности при температуре 100оС. Рис. 3 - Зависимость величины электрического сопротивления мелкодисперсной минеральной ваты от времени выдержки образцов при температуре 95-100 °С и относительной влажности 100%. Рис. 4 - Зависимость относительной влажности образцов минеральной ваты от времени выдержки при 100% влажности и температуре 95-100 оС В ходе эксперимента имитируются условия, когда подземный канал, в котором находятся трубопроводы тепловых сетей, не вентилируется. Заранее подготовленные образцы минеральной ваты после взвешивания помещают в паровую баню, представляющую собой закрытую емкость, соединенную с атмосферой для поддержания необходимого давления. Через определенные интервалы времени образцы вынимают и взвешивают. Когда масса образцов перестанет изменяться, считают, что материал достиг 100% влажности. По результатам эксперимента видно, что минеральная вата в указанных условиях в течение нескольких десятков минут (около 1,5 часа) достигает таких значений влажности, когда ее электропроводность резко

увеличивается и она становится проводником. Выводы 1. Разработаны экспериментальные методики, позволяющие оценить влияние влажности на величину электрического сопротивления материала теплоизоляции и продуктов коррозии стального трубопровода. 2. Показано, что разработанные методики позволяют спрогнозировать протекание электрохимических процессов в реальных условиях эксплуатации стальных трубопроводов и конструкций.