

ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ

Новые протяженные гибкие аноды для защиты теплосетей от коррозии и особенности их применения

А.А. Делекторский, Н.В. Стефов, компания «МИНАДАГС»; М.А. Сурис, Академия коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова; Н.П. Глазов, К.Л. Шамшетдинов, ОАО «ВНИИСТ»

О конструкции гибких анодов

В настоящее время в эксплуатации установок электрохимической защиты (ЭХЗ) в «Тепловых сетях филиала ОАО «МОСЭНЕРГО» находят все более широкое применение протяженные гибкие аноды кабельного типа из токопроводящей резины типа ЭР (электроды резиновые) [1].

Применение протяженных анодов серии ЭР позволяет:

- равномерно распределить ток защиты вдоль защищаемого участка теплосети;
- снизить потребление электроэнергии ЭХЗ теплосетей;
- уменьшить вредное влияние ЭХЗ на смежные подземные сооружения;
- исключить необходимость в отводе земельной площади для установки анодного заземления.

Вышеизложенное вполне удовлетворяет требованиям защиты подземных сооружений, на которых есть опасность коррозии на локальных участках, что в первую очередь касается тепловых сетей канальной прокладки, где имеется возможность расположить анодные заземлители непосредственно в каналах [2].

Однако при неоспоримом преимуществе по сравнению с другими типами электродов анодного заземления (железкремниевые, графитовые, металлооксидные и др.), используемые в установках электрохимической защиты тепловых сетей, эластомерные аноды имеют два недостатка. Они обусловлены химической природой электропроводной резины:

- узкий температурный диапазон применения (от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- жесткое регулирование плотности анодного тока, превышение которого выше заданного значения приводит к преждевременному выходу электрода из строя.

Если второй недостаток легко устраняется современными средствами автоматического регулирования параметров ЭХЗ и конструкцией анодов, то первый потребовал разработки новых составов резиновых смесей и технологии изготовления на их основе новых электродов анодного заземления.

В 2003 г. в «Тепловых сетях филиала ОАО «МОСЭНЕРГО» начато применение опытных электродов серии ЭР, изготовленных на основе

«проводов анодорастворимых резиновых теплостойких» – ПАР-Т (ТУ 16.К71-299-2000). Одновременно в Академии коммунального хозяйства им. К.Д. Памфилова были начаты стендовые испытания на износостойкость указанных электродов.

Электроды были разработаны с учетом конструктивных особенностей тепловых сетей канальной прокладки, условий эксплуатации, а также опыта строительно-монтажных работ по устройству средств ЭХЗ.

Электроды на основе ПАР-Т кардинально отличаются от электродов ЭР-2, ЭР-6, ЭР-6М, используемых ранее для защиты теплосетей:

- в качестве полимерной основы используется каучук, резина на основе которого выдерживает температуру до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение длительного времени (десятки лет) без значительных изменений физико-химических свойств;
- в качестве электропроводного наполнителя используется комбинация электропроводного технического углерода и графита;
- токопроводной жилой с площадью поперечного сечения 25 мм^2 является тонкая медная проволока (ТУ 16.К71-087-90), что обеспечивает низкое продольное сопротивление в сочетании с высокой гибкостью электрода;
- электроды имеют диаметр не менее 50 мм и изготавливаются с гладкой, а не рифленой (как у ЭР-6М) активной поверхностью, обеспечивающей равномерное стекание анодного тока с электрода;
- в качестве дренажного используется кабель, шланговая оболочка которого обладает термодинамическим сродством к материалу электрода, что обеспечивает надежный контакт в зоне соединительных узлов, которые проходят проверку на электрогерметичность в воде по ГОСТ 3345-76.

Исследование нового анодного материала ПАР-Т в условиях эксплуатации тепловых сетей

Для проведения стендовых испытаний были отобраны два образца ПАР-Т диаметром 50 и длиной 200 мм, к которым по традиционной кабельной технологии были подсоединены два отрезка кабеля. Нерабочая часть образцов была загерметизирована с использованием починочной

резины, кремнийорганической ленты «ЛЭТСАР» и термоусаживаемых полиэтиленовых трубок.

Физико-механические характеристики резины, из которой были изготовлены образцы для стендовых испытаний, приведены ниже:

Напряжение при удлинении 200%, мПа	5,1
Условная прочность при растяжении, мПа	7,3
Относительное удлинение, %	325
Плотность, кг/м ³	1220
Удельное объемное электрическое сопротивление, Ом·м	0,078

При испытаниях электродов на основе ПАР-Т контролировали следующие факторы:

- температурно-влажностный режим эксплуатации электродов;
- плотность тока утечки с электродов с учетом возможных перегрузок;
- участок перехода от контакта электрода с водой к контакту электрода с воздушной средой – «участок ватерлинии».

Минимальная продолжительность испытаний с целью изучения состояния электродов составляет один год при прогнозируемом сроке службы электродов в нормальном режиме 10 лет.

На рис. 1 приведена схема стенда для проведения испытаний образцов электродов.

Испытания начались 3 февраля 2003 г. В процессе испытаний проводились:

- контроль и поддержание температуры электролита (70 ± 5 °С);
- сохранение заданного уровня электролита;
- контроль и регулирование значений токосъема с образцов электродов Э-1 и Э-2 – 200 и 300 мА/п. м соответственно (ежедневно);
- контроль напряжения между электродами и кюветой (ежедневно);
- периодический визуальный контроль (1 раз в месяц) состояния поверхности образцов.

Результаты испытаний показывают, что характер изменения переходного сопротивления $R_{пер}$ связан в основном с изменением электрического сопротивления анодного материала электрода (сопротивление растеканию на поверхности электрод-электролит постоянно).

По изменению $R_{пер}$ можно судить о природе физико-химических процессов, проходящих в наполненной эластомерной матрице и связанных с ними структурных преобразованиях анодного материала.

Как видно из рис. 2, $R_{пер}$ обоих образцов монотонно возрастало до 5,5 месяцев, после чего практически стабилизировалось для электрода Э-1 и упало для образца Э-2, с последующим возрастанием. Через один месяц от начала испытаний у образца Э-2 на поверхности была обнаружена небольшая шероховатость. Через 5,5 месяцев от начала испытаний в зоне фазового разделения электролит-воздух («ватерлиния») по всему периметру электрода бы-

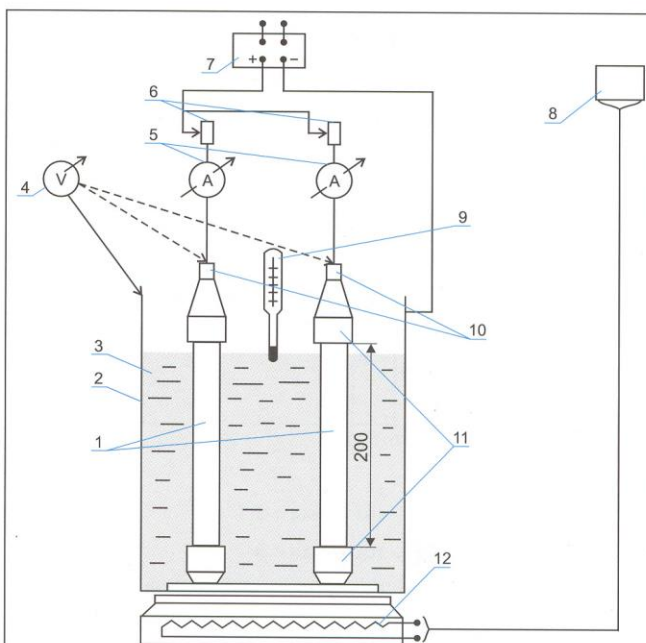


Рис. 1. Схема стенда для проведения испытаний на износостойкость электродов анодного заземления:
 1 – электроды типа ПАР-Т; 2 – кювета металлическая; 3 – раствор электролита; 4 – вольтметр; 5 – миллиамперметр; 6 – реостаты; 7 – источник постоянного тока; 8 – регулятор напряжения переменного тока; 9 – термометр; 10 – тоководы в электродах; 11 – диэлектрические втулки; 12 – электронагреватель наружный.

ли обнаружены вздутия резины различных размеров.

Следует отметить, что для разных точек превышение тока в 1,5 раза от нормативного приводит к вздутию покрытия на границе ватерлинии.

Поскольку время образования вздутий по «ватерлинии» и уменьшения $R_{пер}$ для образца Э-2 совпадают, можно предположить, что у образца Э-2 произошел разрыв вздутия, и электролит вошел под отслоившийся поверхностный слой, тем более что образец своей работоспособности не потерял (монотонное возрастание $R_{пер}$ – кривая 2 на рис. 2).

При очередном визуальном контроле состояния поверхности образцов через 10,5 месяцев испытаний было принято решение электрод Э-2 снять со стенда и подвергнуть его материал структурному анализу.

Для проведения исследований электрод Э-2 был разделен на 3 части:

- первая линия разреза – по границе раздела электрод-вода («ватерлиния»);
- вторая линия разреза – по середине электрода;
- третья линия разреза – по концу электрода, где образец был герметизирован.

Одновременно было проведено вскрытие узла контакта электрод-кабель с целью проверки на электрогерметичность.

Анализ срезов показывает, что имеется один четкий визуальный раздел между слоями электрода по диаметру на глубину 2 мм. В зоне

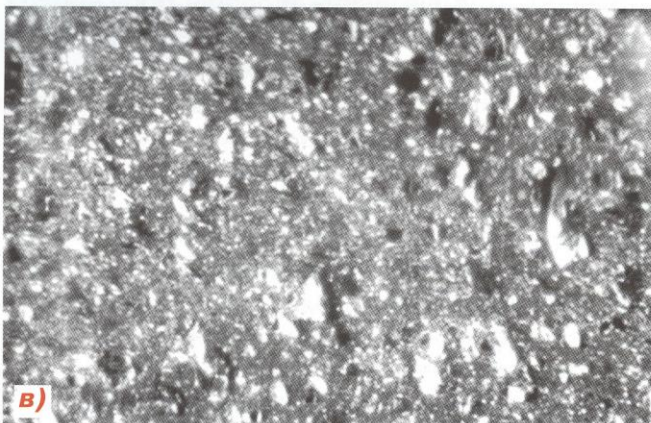
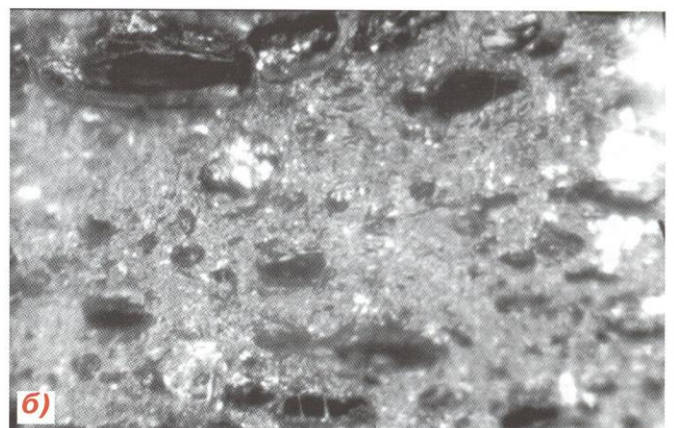
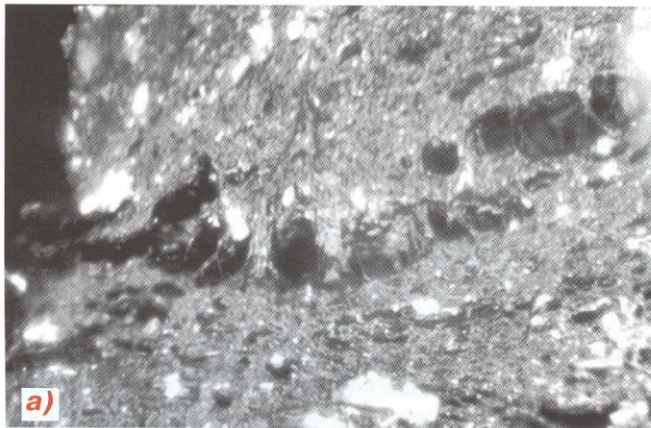
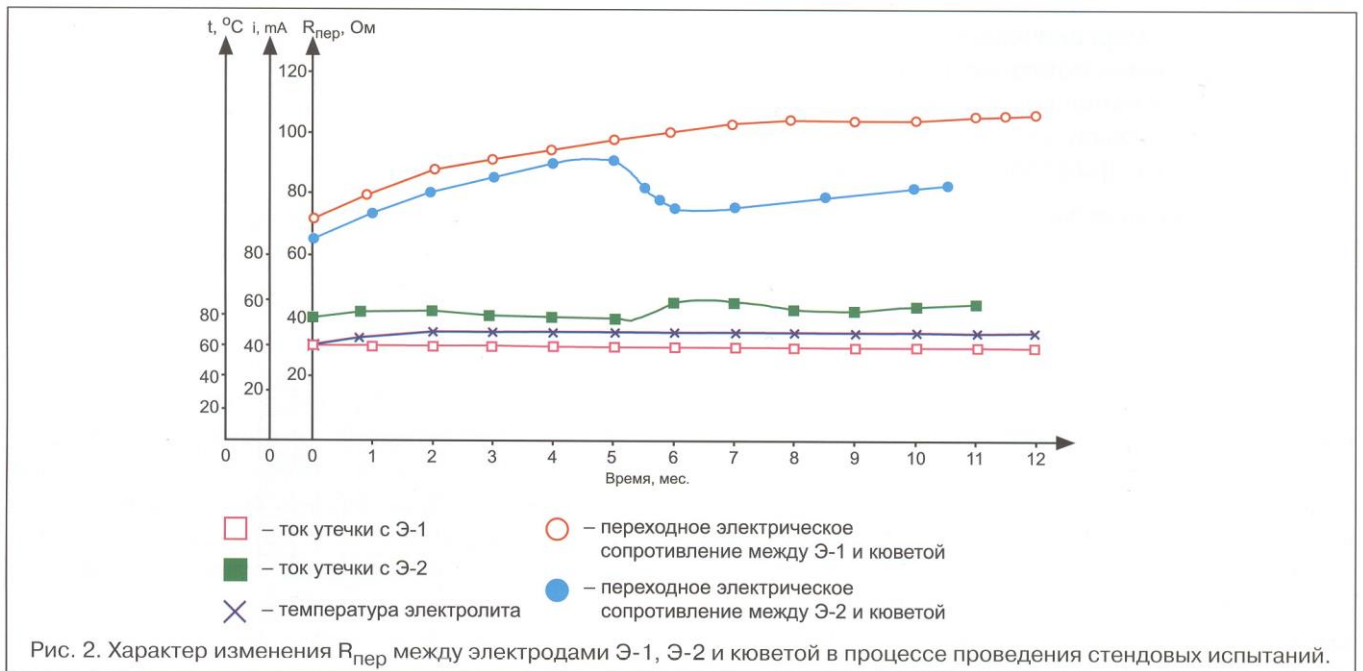


Рис. 3. Фотографии срезов образца Э-2, сделанные с помощью оптического микроскопа МБИ-6: а – у поверхности; б – ближе к центру; в – эталон до испытаний.

На рис. 3 представлены фотографии срезов образца Э-2, расположенные от поверхности электрода (а) к центру (б) и эталон до испытаний (в). Съемка проводилась с помощью оптического микроскопа МБИ-6 в отраженном свете в темном поле, увеличение – 300х.

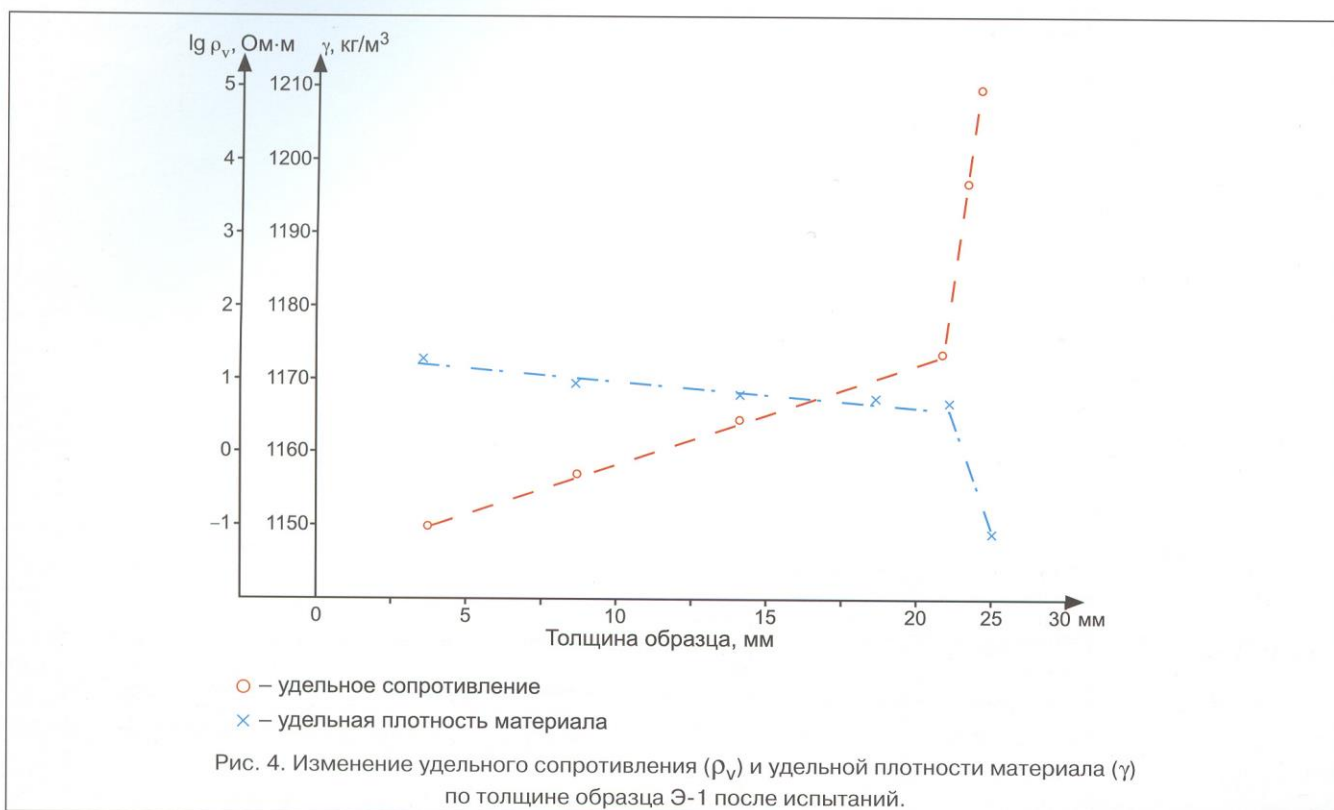
Был сделан поперечный срез Э-2 толщиной около 2 мм, из которого был вырезан радиальный исследуемый образец, такой же толщины таким образом, чтобы на одном образце можно было увидеть всю толщину электрода до токопроводящей жилы.

На снимках наблюдается четкое изменение структуры материала по радиусу электрода, прежде всего, изменения характера микро- и макропор в материале и их направленность. В эталоне (фото 3в) наблюдается незначительное количество микропор, а частицы электропроводного наполнителя (графита), как и должно быть, равномерно распределены по поверхности среза. В процессе эксплуатации электрода количество и размеры пор (темные частицы) увеличивают-

«ватерлинии» наблюдается деформация и отслаивание верхнего слоя, по-видимому, под действием выделяющихся газов.

Было проведено фотографирование образцов электрода от поверхности к центру и установлено:

- наличие микро- и макропор в образце и характер их распределения;
- послойное изменение удельной плотности материала электрода;
- послойное изменение электрического сопротивления образца.



ся, количество графита (светлые частицы) уменьшается, причем, чем ближе к поверхности электрода, тем размеры пор больше и они носят явно выраженный туннельный характер (рис. 3а, б).

Анализ образцов, выполненных по ГОСТ 263-77, показал, что удельная плотность материала электрода также уменьшилась. Плотность верхнего слоя стала 1150 кг/м³, плотность приграничного к медному токовводу слоя также изменилась и стала 1170 кг/м³. Плотность материала до испытаний составила 1220 кг/м³.

Результаты исследования электропроводности образцов материала анода после испытаний, приведенные на рис. 4, 5, показали, что электросопротивление материала медленно увеличивается от центра электрода к периферии от 0,19 до 1,43 Ом вплоть до верхнего двухмиллиметрового слоя, электросопротивление которого резко возросло до 5540 Ом. Изменение структуры поверхностного слоя электрода, а именно наличие в нем открытых и закрытых микро- и макропор, подтверждается экспериментально по изменению электрического сопротивления поверхностного слоя образца. После одного часа выдержки в воде электросопротивление образца уменьшилось с 5540 Ом до 656 Ом, а после 40 минут выдержки на воздухе возросло с 656 Ом до 820 Ом с последующим увеличением до начального значения, что подтверждает наличие открытых пор.

Все это позволяет сделать выводы о сложности и многообразии процессов, происходящих в эластомерном материале анода под действием электрического тока.

Электрохимические процессы, по-видимому, идут одновременно на границе раздела электролит-анод, и в массе полимера, но с разной скоростью, сильно зависящей от плотности тока в аноде, площади контактирующих поверхностей и состава материала анода. Процесс, идущий на границе раздела вода-анод, в первом приближении, – это разложение молекул воды с выделением атомарного кислорода. Взаимодействие атомарного кислорода с электропроводным наполнителем с образованием оксида углерода и взаимодействия атомарного кислорода с эластомерной матрицей каучука [4]. Результатом чего является потеря эластичности и образование кожеподобного верхнего слоя на аноде с большим количеством микро- и макропор, которые по мере их образования, как было установлено, заполняют электролит.

Можно предположить, что аналогичные процессы, только более сложные и замедленные вследствие высокой вязкости полимера, происходят и в массе каучука.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что срок службы эластомерных анодов зависит от нескольких процессов:

- идущих на поверхности электрода с разложением электролита воды и разрушением верхнего каучукового слоя по известным механизмам;
- идущих внутри электрода, в эластомерной матрице каучука и в значительной степени определяющихся скоростью диффузии газообразных продуктов «внутреннего» электролиза на поверхность раздела фаз.

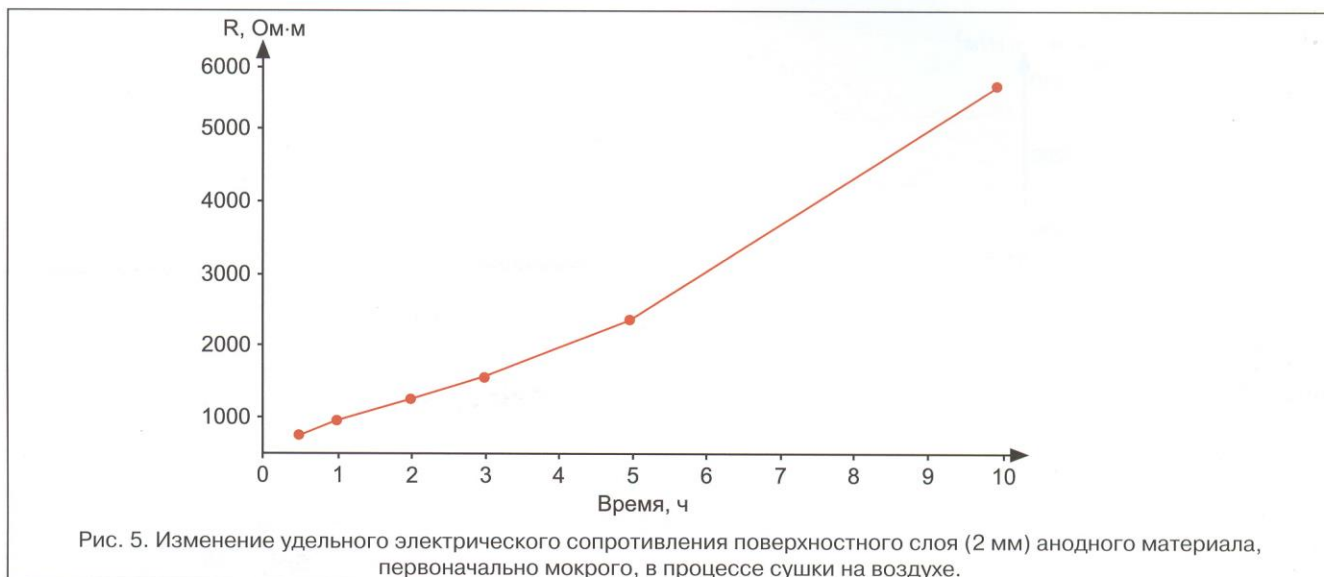


Рис. 5. Изменение удельного электрического сопротивления поверхностного слоя (2 мм) анодного материала, первоначально мокрого, в процессе сушки на воздухе.

Одним из определяющих факторов, влияющих на скорость и характер протекающих процессов, является, по определению, величина плотности электрического тока. Подтверждение этому дает анализ образцов электрода Э-1, испытанного под воздействием тока 200 мА/п. м.

На поверхности образцов Э-1 после одного года работы не обнаружено вздутий и разрывов, хотя также имеется четкий визуальный раздел, расположенный от поверхности на глубине 1,5 мм. Значение удельной плотности первого слоя, по сравнению с образцом Э-2, увеличилось и стало равным 1170 кг/м³, второго также – 1190 кг/м³. Одновременно уменьшилось электросопротивление верхнего слоя до 3000 Ом (по сравнению с образцом Э-2 – 5540 Ом).

Все это указывает на то, что процессы электрохимического разрушения электрода Э-1 также имеют место, однако выражены в значительно меньшей степени.

Анализ узла герметизации токоввода обоих электродов показывает, что технология герметизации токоввода с использованием починочной резины и кремнийорганической ленты «ЛЭТСАР» для применения в условиях эксплуатации в теплофикационных каналах надежна и может быть рекомендована к применению при обеспечении требуемого качества его монтажа.

Заключение

1. Проведены стендовые испытания электродов кабельного типа на основе ПАР-Т и установлена эффективность их применения при защите от коррозии тепловых сетей канальной прокладки.

2. Определены степень и характер разрушения материала жертвенных электродов ПАР-Т под действием анодного тока и установлено наличие двух механизмов электрохимического разрушения материала, идущих: на поверхности электрода, в массе материала электрода. На-

личие двух механизмов разрушения материала электродов и их явная зависимость от плотности анодного тока позволяют реально прогнозировать срок службы и эффективность работы анодного заземления.

3. Поскольку в реальных условиях эксплуатации плотность тока утечки с электродов анодного заземления может быть неравномерной, установлено, что при проведении расчетов ЭХЗ целесообразно не превышать значение токовой нагрузки на электроды из ПАР-Т более 150 мА/п. м.

4. Учитывая, что удельное электросопротивление медной проволоки сечением 25 мм², применяемой в электродах типа ПАР-Т, равно 0,0007 Ом/м, то длина плеча электрода анодного заземления может быть увеличена до 120-130 м, вместо 60-65 м в случае использования электродов ЭР-6М.

Литература

1. Сурис М.А., Липовских В.М. Защита трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии. М.: Энергоиздат, 2003.
2. Типовая инструкция по защите трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии. РД 153-34.0-20.518-2003. М.: Новости теплоснабжения, 2003.
3. Стругацкий М.К., Надеинский Б.П. Общая химия. М.: Высшая школа, 1965.
4. Догадкин Б.А., Донцов А.А., Шершнева В.А. Химия эластомеров. М.: Химия, 1981.
5. Кошельков Ф.Ф., Корнев А., Буканов А.М. Общая технология резины. М.: Химия, 1978.