«КоммерЦЪ»: Смеси, нормализующие заземление. В чем соль вопроса, или Как не ошибиться при выборе заполнителя

Клуб противодействия отраслевым аферистам



Бипрон
инновационные технологии

Термины «защитное заземление», «технологическое заземление» и «молниезащита» звучат настолько привычно, что сама задача их обустройства часто кажется тривиальной. Однако за кажущейся простотой скрывается комплекс сложнейших электротехнических, физико-химических и климатических проблем. При проектировании и строительстве энергообъектов ключевое значение имеет обеспечение долгосрочной стабильности сопротивления растеканию токов промышленной частоты и грозовых разрядов.

ГК «Бипрон», Московская область, г. о. Солнечногорск

На территории Российской Федерации, в особенности в районах Крайнего Севера, Сибири, Дальнего Востока, а также в засушливых южных регионах, создание заземляющих устройств (ЗУ) сопряжено с экстремальными трудностями. Наличие многолетнемерзлых грунтов (ММГ), сухих песчаных, галечниковых, щебенистых и скальных пород характеризуется высокими значениями их удельного электрического сопротивления (УЭС) – от 1000 до 10000 Ом·м. Надежность и электролитический контакт ЗУ в таких условиях зависят от правильного учета вертикальной геоэлектрической структуры земли и динамики сезонного промерзания-высыхания верхних слоев почвы. Затраты на обустройство заземления подстанций и линейных объектов в сложных грунтах нередко достигают 30–35% от общей сметной стоимости строительства. Оптимизация проектирования и применение инновационных проводящих систем имеют стратегическое значение для экономики электросетевого и нефтегазового комплексов.

На сегодняшний день для снижения сопротивления заземления в высокоомных средах традиционно применяются три метода:

- добавление в грунт поваренной соли в околоэлектродном пространстве;
- конструкционная замена материнского грунта углеродсодержащими засыпками (коксовой мелочью, углем);
- сооружение глубинных заземлителей (длиной от 20–30 м и более).

Рассмотрим физико-химические особенности и эксплуатационные ограничения каждого из этих подходов.

Способ 1. Введение хлорида натрия в околоэлектродное пространство

Исторически самый старый и недорогой в реализации метод, однако в условиях современной электроэнергетики он абсолютно деструктивен. Стремление сэкономить на старте оборачивается критическими аварийными рисками и технологическим провалом уже в среднесрочном периоде эксплуатации по двум главным причинам.

Причина 1 – хлоридный питтинг и скоростная коррозия металлов[1]. Ионы хлора (Cl) являются агрессивнейшими активаторами коррозии. Обладая высокой проникающей способностью, они легко разрушают естественные пассивирующие оксидные пленки на поверхности металлов. В соляной бане даже высоколегированная коррозионно-стойкая сталь марки AISI 304 (не говоря уже об оцинкованном прокате) подвергается стремительной локальной язвенной (питтинговой) коррозии. В результате такого химического воздействия толстостенные металлические элементы заземлителя (например, стенка электрода толщиной 4 мм) полностью теряют несущую способность, а сварные и резьбовые узлы соединений разрушаются в течение всего трех – трех с половиной лет эксплуатации, размыкая контур заземления объекта [8, 12] (на рис. 1 для хлоридной среды – зона $З_{к0}$, норматив убытия металла по толщине слоя – 1,25 мм в год).

Причина 2 – высокая диффузионная подвижность и вымывание (выщелачивание) электролита. Хлорид натрия (NaCl) обладает гигантской растворимостью в воде. Обычный минеральный грунт не способен удерживать свободные ионы солей в своей структуре. В периоды весеннего сне-

[1] Определяется как коррозионная зона с максимально неблагоприятными условиями для металлов – $З_{к0}$. См., например, ГОСТ Р 50571.5.54-2011, ГОСТ Р 58882-2020 в вопросах контроля состояния заземляющих устройств электроустановок.

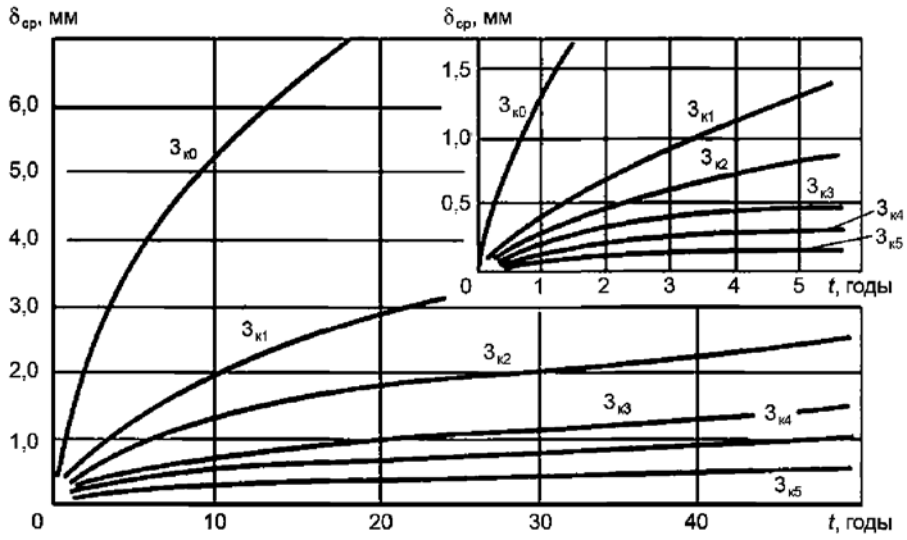


Рис. 1. Зависимость глубины коррозии стальных заземлителей $\delta_{ср}$ от времени для различных коррозионных зон

готаяния, паводков и обильных летних дождей происходит интенсивная фильтрация влаги, которая полностью вымывает соли из околоэлектродного пространства в подстилающие слои грунта. Из-за этого выщелачивания концентрация электролита падает, а эффективность работы заземлителя снижается на 40–50 % уже за первые 12–24 месяца. При этом миграция хлоридов не только приводит к лавинообразному росту сопротивления растеканию тока, но и повышает коррозионную агрессивность окружающего грунта по отношению к смежным подземным коммуникациям, что нарушает нормативные требования к их защите от коррозии [2, 3]. Более того, миграция хлоридов жестко нарушает требования экологической безопасности, загрязняя близлежащие подземные водоносные горизонты.

Катастрофическое засоление почв и формирование техногенных солончаков

Массированное неконтролируемое внесение хлорида натрия в объеме десятков и сотен килограммов на один заземляющий контур кардинально меняет морфологию и химический баланс подстилающих грунтов. Свободная миграция ионов натрия и хлора запускает необратимый процесс искусственного (техногенного) образования солончака[2] [11]. При достижении критической концентрации легкорастворимых солей на уровне более 0,3–0,5 % от сухой массы почвы (в зоне прямого контакта с электродом этот показатель превышает 1,5–2,0 %, а у некоторых производителей доходит до 9,0 %) грунт переходит в категорию типичного солончака. Такая концентрация полностью подавляет осмотическую активность корневых систем любой растительности, вызывая ее гибель (химический ожог) и деградацию почвенного покрова в радиусе до нескольких метров от заземлителя. В условиях жесткого экологического контроля и прохождения трасс через земли лесного или сельскохозяйственного назначения подобное варварское выжигание плодородного слоя является прямым нарушением природоохранного законодательства РФ и влечет за собой многомиллионные штрафы для эксплуатирующих организаций.

Кроме того, возникновение солончаковых эффектов требует учета при проектировании и строительстве сопряженных с ними объектов, например, опор ВЛ. При этом для их создания должен применяться специализированный металл армирования, а также специфические добавки в бетонную смесь.

Способ 2. Конструкционное замещение грунта специальными проводящими композициями

Замещение материнского грунта в околоэлектродном пространстве – это более сложный и технологичный метод, направленный на создание искусственной низкоомной оболочки вокруг проводника. Исторически для этого применялись простые наполнители: коксовая мелочь, шунгит или графитовая крупка. С введением в действие профильного национального стандарта ГОСТ Р 62561.7 (МЭК 62561-7) «Требования к смесям, нормализующим заземление» [2], данный сегмент рынка получил мощный импульс развития. Однако коммерциализация этого направления привела к появлению огромного количества дешевых суррогатных смесей сомнительного качества. Большинство таких продуктов построено на простейшей комбинации: бентонитовая глина, рядовой графит (как правило, с зольностью 20–30 % для удешевления) или кокс, массивные дозы дешевых галогенидных солей (чаще всего хлорида натрия или калия) для искусственной стимуляции проводимости на этапе приемо-сдаточных испытаний.

На этапе первичного монтажа и сдачи контура ЗУ такие «коктейли» демонстрируют отличные показатели УЭС, что вводит заказчика в заблуждение. В долгосрочной же перспективе в теле такой засыпки активизируются деструктивные процессы, разрушающие систему заземления.

Деструктивный процесс 1 – коллоидный коллапс и коагуляция бентонитовой матрицы. Главная ценность бентонитовых глин (особенно высокодисперсных натриевых сортов) заключается в их высочайшей гидрофильности. При контакте с водой макромолекулы бентонита гидротируются и увеличиваются в объеме в 10–15 раз, формируя плотный, вязкий, водоудерживающий токопроводящий гидрогель [9]. Этот гель должен плотно обволакивать тело заземлителя, ликвидируя воздушные пустоты и переходное сопротивление. Однако искусственное введение в эту систему избыточного количества подвижных ионов (например, при добавлении дешевой поваренной соли (NaCl) для мнимого повышения проводимости) приводит к разрушению структуры. Под воздействием свободных катионов натрия (Na^+) происходит физико-химический процесс солевой коагуляции [9]: электрический двойной слой глинистых частиц сжимается, они теряют гидрофильность, мгновенно сворачиваются в жесткие хлопья и выпадают в осадок. Вместо

[2] К солончакам относятся засоленные почвы, содержащие в слое 0...30 м более 1 % хлоридов. Если такое же количество солей находится глубже 30 см, то почвы называются солончаковыми.

монолитного, удерживающего влагу защитного геля образуется нестабильная грязная суспензия (жижа). В летний период эта масса стремительно теряет воду, усаживается, растрескивается на обособленные сегменты и отслаивается от поверхности тела заземлителя. Контакт «металл – засыпка» размыкается, а сопротивление заземляющего устройства лавинообразно возрастает.

Деструктивный процесс 2 – интенсивное фильтрационное вымывание солей и потеря токопроводящих свойств. Ввиду того что бентонитовая глина под действием солевой агрессии сворачивается и теряет свои коллоидные гидроизолирующие и удерживающие свойства (см. выше), внутри околоэлектродного заполнителя формируется рыхлая, высокопористая и проницаемая структура. Хлорид натрия, обладая аномально высокой растворимостью в воде, в таких условиях становится абсолютно нестабильным элементом. Первые же весенние паводки, подъемы грунтовых вод и обильные сезонные дожди запускают процесс сквозной фильтрации ионного раствора. Вся токопроводящая соль полностью вымывается из объема засыпки всего за один климатический сезон. Скорость выщелачивания настолько высока, что уже через 8–12 месяцев после монтажа вся активная проводящая химия уходит в глубокие подземные горизонты, безвозвратно загрязняя экологию и отравляя близлежащие водоносные слои. Вокруг стального заземлителя остается лишь сухой пористый скелет из свернувшейся глины и рядового высокозольного кокса. Заземляющее устройство полностью теряет ионную проводимость, электрический контакт разрывается, а контур заземления промышленного объекта целиком перестает выполнять свою защитную функцию.

«Экологические пустышки» на основе гидрофобного кокса и нерастворимых карбонатов

На противоположном полюсе рынка заземляющих заполнителей находится другая технологическая крайность – так называемые «экологические пустышки». Спекулируя на естественном страхе заказчиков перед хлоридной коррозией, некоторые производители предлагают смеси, состоящие исключительно из рядовой коксовой (угольной) мелочи или высокозольного природного графита в сочетании с безгалогенидными (бесхлорными) минеральными добавками – тонкомолотым мелом, известняком или строительной известью. Подобные композиции позиционируются как абсолютно безопасные для металла заземлителя и окружающей среды. Они действительно химически инертны и не вызывают ускоренного разрушения стальных проводников, однако с точки зрения электротехники такие смеси перестают работать в среднесрочной перспективе, превращаясь в подземный изолятор. Причиной этого фиаско являются фундаментальные законы физики поверхностных явлений.

Причина 1 – критическая гидрофобность углеродного наполнителя и дефицит ионной проводимости. Технический кокс, антрацит и графит обладают выраженной природной гидрофобностью. Высокий краевой угол смачивания заставляет углеродные частицы активно отталкивать воду [10]. Для того чтобы заставить такую гидрофобную углеродную систему непрерывно проводить ток в теле грунта, ей жизненно необходим стабильный внутренний источник свободных ионов – жидкий электролит. Однако вводимые в состав «экологических пустышек» безгалогенидные минеральные добавки (карбонат кальция, мел, известняк) обладают крайне низкой, близкой к нулю, растворимостью в воде и не способны обеспечить диссоциацию свободных токопроводящих ионов. В результате еще на этапе приготовления рабочего раствора (затворения) вода скатывается с гидрофобных зерен кокса, не проникая внутрь микропор. При засыпке или закачке такой смеси в околоэлектродное пространство внутри скважины формируется рыхлая, неравномерная структура, изобилующая скрытыми воздушными кавернами и пустотами.

Причина 2 – термическое осушение и диэлектрическое «запирание» заземлителя. В первые месяцы после монтажа заземляющее устройство удерживает минимальную проводимость исключительно за счет присутствия свободной трассовой или капиллярной влаги материнского грунта. Однако через 2–3 года эксплуатации, по мере прохождения циклов сезонного термического осушения и естественного ухода капиллярной воды из приэлектродной зоны, засыпка окончательно теряет влагу. Ввиду отсутствия гигроскопичных и влагоудерживающих компонентов смесь превращается в абсолютно сухой, жесткий и пористый угольный порошок. Поскольку сухой кокс без электролита обладает высоким мелкоконтактным сопротивлением, он полностью «запирает» протекание токов катодной защиты или молниезащиты. Заземляющее устройство фактически изолируется от вмещающей почвы, что обнуляет защитный потенциал системы.

Способ 3. Сооружение глубинных анодных (ГАЗ) и защитных заземлителей

Данный метод предполагает бурение вертикальных скважин глубиной от 15 до 60–100 м, спуск в них стальных проводников (или железокремнистых анодных электродов) и последующее заполнение прианодного пространства простейшими бентонито-коксовыми или глинопесчаными пульпами, искусственно активированными хлоридом натрия. Проектирование и сооружение таких систем регулируется требованиями ГОСТ 9.602-2016 (в части ЭХЗ) и СТО Газпром 2-1.11-170-2007 (в части молниезащиты) [3, 5]. Метод призван достичь глубоких водоносных горизонтов с низким УЭС, однако его практическая реализация сопряжена с критическими экономическими и техническими ограничениями.

Первое – высокая сметная стоимость и логистическая сложность буровых работ. Технология требует постоянного присутствия на площадке тяжелой буровой техники и мобильных растворных узлов. Себестоимость погонного метра бурения стремительно возрастает при проходке скальных, галечниковых, валунных и многолетнемерзлых грунтов. Дополнительные затраты на монтаж и неизвлекаемый анкерный крепеж обсадных труб, повышенный расход топлива и трудозатраты строительно-монтажных бригад в условиях труднодоступной трассы Крайнего Севера делают этот способ наиболее дорогим в структуре затрат на электрохимическую защиту (ЭХЗ) и молниезащиту объектов.

Второе – геоэлектрическая разнородность разреза и критическая

погрешность проектных измерений. При бурении на значительную глубину заземлитель пересекает множество геологических слоев с резко полярной структурой и проводимостью – от талых суглинков до скальных линз. Традиционные четырехэлектродные методы вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) дают огромную интегральную погрешность в многослойных средах. Как следствие, расчетные проектные значения сопротивления ГАЗ на бумаге кардинально расходятся с фактическими замерами после пусконаладки. Заказчик, инвестировавший миллионы в бурение 100-метровой скважины, в реальности оказывается далек от нормативных показателей растекания тока.

Третье – физическое ограничение импульсной проводимости при грозовых разрядах (скин-эффект). При протекании токов молнии сверхвысоких частот и амплитуд (10–20 кА) определяющей характеристикой ЗУ становится не статическое сопротивление растеканию, а высокочастотный волновой импеданс заземлителя. Из-за проявления электродинамического скин-эффекта и индуктивного сопротивления длинного вертикального проводника импульсный ток грозового разряда сбрасывается в землю преимущественно через первые 5–7 м верхней части электрода. Нижняя 50-метровая часть глубинного заземлителя в момент удара молнии фактически блокируется индуктивным затвором и в демпфировании потенциала не участвует. В импульсном режиме ЭХЗ и молниезащиты пространственный контур из нескольких коротких, но сбалансированных по площади токоотдачи электродов большого диаметра гарантированно эффективнее, чем один-два сверхглубоких трубчатых заземлителя.

Токопроводящие геополимерные матрицы серий «МАГ-Арктик» и «МАГ-Геоматрикс»

Осознавая технологические тупики традиционных методов (разрушительное засоление почв, гидрофобность «пустого» кокса и запредельная стоимость глубинного бурения), научно-производственная группа «Бипрон» разработала принципиально новый класс материалов.

В основу работы заземляющих и прианодных композиций серий «МАГ-Арктик» и «МАГ-Геоматрикс» заложен научно выверенный принцип направленного синтеза низкоомной токопроводящей геополимерной матрицы. Поставляемый материал не является пассивным, механически засыпаемым инертным заполнителем, а выступает в роли активного структурообразователя и модификатора всего околоэлектродного пространства.



а *б*

Рис. 2. Пучение грунта на заземляющих устройствах: *а* – традиционное заземление; *б* – солевые заземлители

Этот сложнейший процесс протекает в три последовательные стадии на протяжении всего многолетнего жизненного цикла системы заземления или электрохимической защиты.

Стадия 1 – процесс щелочной активации и матричный синтез пространственного токопроводящего каркаса. В момент затворения сухой смеси технической водой на строительной площадке (либо при постепенной естественной гидратации за счет капиллярной грунтовой влаги) активируется специализированный силикатно-щелочной комплекс. Растворимые силикаты натрия и щелочные буферные модификаторы вступают в управляемую топохимическую реакцию с мелкодисперсной активной алюмосиликатной фазой смеси.

Запускается процесс направленной поликонденсации с формированием жесткой трехмерной кремний-кислород-алюминиевой (геополимерной) пространственной решетки [7]. На микроструктурном уровне происходит уникальный физический эффект: внутри ячеек этой растущей минеральной матрицы, как в прочной пространственной бронекапсуле, жестко защемляются, иммобилизируются и удерживаются от малейшего вымывания ультрадисперсные частицы искусственного углеграфита высокой степени очистки.

Благодаря такой синергии формируется стабильная монолитная структура, обладающая непрерывной, дублирующей одна другую электронной и ионной проводимостью. Полученная геополимерная матрица обладает абсолютной стабильностью объема и защищена от усадочных трещин даже в условиях жесткого термического дефицита внешней влаги или экстремальной засухи.

Стадия 2 – капиллярное «врастание» и диффузионный перенос в окружающий грунт. В процессе гидратации и первичного гелеобразования синтезируемая геополимерная матрица обладает высочайшей осмотической активностью и внутренним гидростатическим давлением. Жидкая проводящая фаза композиции, насыщенная токопроводящими ионами модифицирующих солей, начинает активно мигрировать в радиальном направлении от оси заземлителя. Она заполняет капилляры, микротрещины и поры окружающего материнского грунта – песка, суглинка, глины или скальных пород. В этой фазе протекают два синергетических процесса:

- диффузионное натекание – глубокое проникновение ионов вглубь пор грунта;
- топохимическое сшивание – реакция щелочного раствора с диоксидом кремния.

Взаимодействие со свободным кварцевым песком и глинистыми минералами на стенках скважины или траншеи запускает процесс локального омоноличивания. Геополимерная матрица физически «врастает» в окружающую породу. При этом полностью стирается резкая диэлектрическая граница раздела сред «электрод – засыпка – грунт».

Стадия 3 – эффект направленной кольматации пор и минимизация переходного сопротивления. На финальной стадии стабилизации структуры активируются сорбционные свойства каркасных алюмосиликатов (цеолитов клиноптилолитового типа и солестойких палыгорскитовых глин – аттапульгитов), которые прочно запирают влагу и ионы в межкристаллических пустотах. Это приводит к следующим эксплуатационным эффектам:

- значительное увеличение эквивалентного радиуса заземлителя – геометрическая зона эффективного растекания тока увеличивается в 5–8 раз;
- трансформация вмещающей породы – прилегающий грунт сам становится продолжением проводящего контура;
- демпфирование термической усадки грунта – летом при засухе полностью исключается образование воздушных зазоров;
- защита от динамических нагрузок – зимой пластичная матрица нивелирует морозное пучение и выталкивание трубы. На рис. 2 показан пример пучения грунта на ЗУ традиционной и солевой технологий.

Сформированный геополимерный кластер гарантирует стабильный электрический и механический контакт «электрод – засыпка – грунт» на протяжении всего 50-летнего срока новой аттестации оборудования вне зависимости от сезонных колебаний температуры и влажности климатической зоны. На рис. 3 показаны решения компании «Бипрон» – минеральный активатор грунта МАГ-2000 и электроды.

Заключение и выводы

Для проектных институтов, строительно-монтажных организаций и подразделений капитального строительства высокотехнологичных компаний крайне важно объективно оценивать риски, возникающие при обустройстве ЗУ и систем ЭХЗ в сложных геоэлектрических условиях. Сезонная динамика промерзания многолетнемерзлых грунтов Крайнего Севера и термическое иссушение почв аридных регионов делают достижение нормативного сопротивления растеканию токов сложнейшей инженерной задачей.

Как показал детальный физико-химический анализ, попытки решить эту проблему устаревшими или суррогатными (сомнительными) методами неизбежно приводят к аварийным последствиям:

- прямое засоление грунта хлоридом натрия или применение дешевых бентонито-соляных смесей гарантирует нарастающее разрушение металла заземлителей от питтинговой коррозии всего за 2–3 года, при этом почва превращается в бесплодный техногенный солончак и вымывается паводками за один сезон;
- «экологические пустышки» на базе мела и рядового кокса ввиду природной гидрофобности углерода превращаются в сухие подземные изоляторы уже после первой сезонной засухи и разрывают контакт «электрод – грунт»;
- бессистемное углубление скважин до 60–100 м приводит к необоснованному росту сметной стоимости буровых работ (до 30–35% от бюджета объекта), не решая при этом задач импульсной молниезащиты из-за проявления волнового скин-эффекта.

В условиях строгих требований к безопасности, когда бесперебойная работа микропроцессорной автоматики, телемеханики, силового оборудования компрессорных и трансформаторных подстанций и другого оборудования напрямую зависит от стабильности контура заземления, любая сиюминутная лжеэкономия и закупка контрафактных засыпок оборачивается колоссальными затратами в будущем. Выход дорогостоящей техники из строя, паралич каналов связи и системные простои технологических процессов в условиях экстремально низких температур Крайнего Севера несут в себе прямую угрозу промышленной безопасности.

Применение токопроводящих геополимерных матриц серий «МАГ-Арктик» и «МАГ-Геоматрикс» ГК «Бипрон» позволяет изменить экономику и надежность проектирования ЗУ. За счет эффекта капиллярного «врастания» в поры материнской породы и искусственного увеличения эквивалентного радиуса токоотдачи в 5–8 раз, данные композиции позволяют:

- сократить глубину и объемы бурения вертикальных скважин в 2–3 раза без потери нормативного сопротивления растеканию;
- отказаться от использования экологически опасных галогенидов и сульфатов, исключив коррозионную агрессию к металлу;
- обеспечить 50-летний срок службы заземляющего контура с неизменными круглогодичными электротехническими параметрами.



Рис. 3. Решения компании «Бипрон» для заземления в высокоомных средах: минеральный активатор грунта МАГ-2000 и электроды

Переход от примитивных засыпных смесей к патентованным геополимерным технологиям представляется организационно-техническим путем к созданию безаварийной, экономичной и долговечной инфраструктуры заземления и электрохимической защиты нового поколения [1, 3, 7].

Вместо выводов сегодняшней встречи позволим себе рекомендовать коллегам-специалистам внимательно отнестись к новым отечественным продуктам рынка электроэнергетики, позволяющим не просто осуществить импортозамещение, но и предложить более эффективные и экономичные решения.

Желаем всем благотворного сотрудничества на благо нашей Родины!

Литература

1. ГОСТ Р 58882-2020. Заземляющие устройства. Системы уравнивания потенциалов. Заземлители. Заземляющие проводники. Технические требования. М., 2020.

2. ГОСТ Р МЭК 62561.7-2016. Компоненты системы молниезащиты. Часть 7. Требования к смесям, нормализующим заземление. М., 2016.

3. ГОСТ 9.602-2016. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии. М., 2017.

4. ГОСТ Р 51164-98. Магистральные стальные трубопроводы. Общие требования к защите от коррозии. М., 1999.

5. СТО Газпром 2-1.11-170-2007. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и коммуникаций ОАО «Газпром». М., 2007.

6. СТО Россети 56947007-29.130.15.114-2012. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6–750 кВ. М., 2012.

7. Патент № 2664723 С2 РФ. Геополимерная вяжущая система для жаростойких бетонов... / Верц Дж. [и др.] ; патентообладатель РЕФРАТЕХНИК ХОЛДИНГ ГМБХ. – Опубл. 22.08.2018, Бюл. № 24.

8. Розенфельд И. Л. Коррозия и защита металлов (локальные коррозионные процессы). М., 1970.

9. Петров Н. А. Физико-химические основы управления свойствами технологических жидкостей и эмульсионных систем при строительстве скважин. Уфа, 2011.

10. Грибанов А. С. Патент № 2528831. Композиция для снижения переходного сопротивления электрод-грунт. Заявка: 2013133146/04, 17.07.2013 Опубликовано: 20.09.2014 Бюл. № 26 Патентообладатель: ООО «Бипрон».

11. Добровольский Г. В., Никитин Е. Д. Сохранение почв как незаменимого компонента биосферы: функционально-экологический подход. М., 2000.

12. Улиг Г. Г., Реви Р. У. Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку и технику. Л., 1989.

Д. А. Белов, генеральный директор,
А. С. Грибанов, технический директор,
ГК «Бипрон»,
Московская область, г. о. Солнечногорск,
тел.: +7 (800) 550-4944,
+7 (906) 722-2550,
эл. почта: info@bipron.com,
сайты: www.npo-bipron.ru, www.bipron.com

Иллюстрации предоставлены
ГК «Бипрон»

