



# Устройства и системы передачи, приема и обработки сигналов

DOI: 10.18721/JCSTCS.10103

УДК 621.317

## ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПЕДАНСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕРОДНЫХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПОДЗЕМНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО И РАДИОФИЗИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

*С. Вэй<sup>1</sup>, В.М. Ольшанский<sup>2</sup>, С.В. Волков<sup>2</sup>, Е.А. Богачев<sup>3</sup>, С.В. Волвенко<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Харбинский инженерный университет г. Харбин, Китай;

<sup>2</sup> Институт проблем экологии и эволюции имени А.Н. Северцова РАН  
Москва, Россия;

<sup>3</sup> ОАО «Композит» Московская обл., г. Королев, Россия;

<sup>4</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Углеродные шнуры и ленты обладают рядом важных преимуществ, таких как прочность, малый удельный вес, коррозионная стойкость, в том числе к бактериям и грибам, экологичность и гибкость. Исследована возможность их применения в качестве электродов-заземлителей для подземного электротехнического и радиотехнического применения. Величина и частотная зависимость импеданса предлагаемых электродов в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц сопоставлены с таковыми для труб из нержавеющей стали, традиционно используемых для заземления и создания антенн.

**Ключевые слова:** подземная низкочастотная связь; заземлитель; углеродный материал; импеданс; электропроводность грунта.

## IMPEDANCE CHARACTERISTICS OF CARBON ELECTRODES FOR UNDERGROUND ELECTRICAL AND RADIOPHYSICAL APPLICATIONS

*X. Wei<sup>1</sup>, V.M. Ol'shanskiy<sup>2</sup>, S.V. Volkov<sup>2</sup>, E.A. Bogachev<sup>3</sup>, S.V. Volvenko<sup>4</sup>*

<sup>1</sup> Harbin Engineering University Harbin, China;

<sup>2</sup> A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution  
Moscow, Russian Federation;

<sup>3</sup> OJSC "Composite" Moscow Region, Korolev, Russian Federation

<sup>4</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University  
St. Petersburg, Russian Federation

Carbon cords and tapes have a number of important benefits, such as strength, low specific weight, corrosion resistance, including against bacteria and fungi, environmental friendliness and flexibility. We investigated the possibility of using them as grounding electrodes for underground electrical and electronic applications. The magnitude and the frequency dependence of the electrodes impedance in the range of

10 Hz ÷ 10 kHz were compared with those of stainless steel pipes traditionally used for grounding and dipole antennas design.

**Keywords:** underground low-frequency communications; earth electrode; carbon material; impedance; ground conductivity.

Коррозионная стойкость и механическая прочность материалов, используемых для подземного применения в различных областях техники, особенно важны при организации заземлений. В этой связи большой интерес представляют тканые углеродные материалы. Эти материалы разрабатывались для нужд авиационной и космической промышленности исходя из требований удельных прочностных характеристик. Между тем их электрические свойства представляют не меньший интерес.

Обеспечение хорошего электрического контакта с грунтом или водой часто требуется в различных электротехнических и радиофизических задачах, например, для организации подземной низкочастотной связи или для электроразведки. К заземлителям предъявляется три основных требования: низкое сопротивление, малая дисперсия импеданса в области низких частот, коррозионная устойчивость. Выполненные ранее исследования [1, 2] показали, что названным требованиям лучше всего удовлетворяют электроды из графита или нержавеющей стали.

Однако графит и нержавеющая сталь – материалы достаточно тяжелые, а графит еще и очень хрупок. Современная промышленность предлагает значительно более легкие и гибкие углеродные материалы: шнуры и ленты из углеродного волокна. Очевидно, что возможность использования углеродных шнуров и лент требовала

тщательной экспериментальной проверки, главным образом из опасений, что относительно большое продольное сопротивление будет препятствовать получению низкого сопротивления заземления. Такие экспериментальные исследования ранее не проводились.

В настоящей работе мы ориентировались прежде всего на задачи аварийной подземной связи для шахтеров и спелеологов. Поскольку в аварийной ситуации нет времени на бурение специальных отверстий для электродов или на другие земляные работы, то с практической точки зрения интереснее всего варианты, когда шнуры и ленты просто раскладываются по поверхности и лишь слегка присыпаются грунтом. Однако полученные результаты на наш взгляд представляют интерес и для более широкого круга приложений, включая организацию промышленных и бытовых заземлений.

Основная цель данной работы – исследование импедансных характеристик контакта тканых углеродных материалов с почвой в частотном диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц.

### Методы и материалы

Применяемая методика измерений и аппаратура аналогичны описанным в [2]. Для измерений частотных характеристик мы использовали лабораторный измеритель импедансов Z-350M, обеспечивающий измерения реальной и мнимой компонент



Рис. 1. Лабораторная установка для экспериментов с углеродными материалами

импеданса в диапазоне от 1 Гц до 1 МГц. Нас интересовал более узкий диапазон — 10 Гц ÷ 10 кГц. Для измерения электропроводности воды использовался кондуктометр «Эксперт-002».

Однако если ранее мы использовали относительно небольшие электроды длиной несколько сантиметров, то настоящие исследования выполнялись на электродах длиной 3–4 м, что соответствует практическому применению. Измерения проводились либо в пластиковом контейнере с размером дна 35×23 см, высотой 22 см, либо в открытом грунте. Вид лабораторной установки показан на рис. 1.

В экспериментах использовался шнур технический углеродный ШТУ (ТУ 1916-003-18070047-98, содержание углерода не менее 99 % масс.) и углеродная лента шириной 100 мм из ткани марки УВИС-Т с поверхностной плотностью 245 г/м<sup>2</sup>.

Шнур из углеродного волокна имел полную длину 420 см, диаметр 6 мм, измеренный вес 73 г, т. е. погонная плотность такого шнура составляет 17 г на метр длины. Для сравнения: вес двухметровой трубки из нержавеющей стали с наружным диаметром 2 см, которая традиционно использовалась нами в качестве электрода-заземлителя, составляет 1,86 кг или 930 г на метр длины, т. е. в 54 раза больше. Измеренное продольное сопротивление шнура при полной длине составило 13,6 Ом. При складывании вдвое сопротивление уменьшается вчетве-

ро за счет уменьшения длины и увеличения площади сечения: измеренное значение составило 3,55 Ом. При складывании еще вдвое, т. е. до длины около 1 м, измеренное сопротивление составило 1,0 Ом. Частотная дисперсия в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц не наблюдалась. Мнимая часть импеданса не превышала 0,01 Ом.

Лента из углеродной ткани имела полную длину 358 см, измеренный вес 88 г. Это соответствует погонной плотности 25 г/м. Продольное сопротивление ленты, сложенной вдвое, составило 2,7 Ом, сложенной вчетверо (длина около 90 см) — 0,7 Ом. Частотная дисперсия в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц не наблюдалась. Мнимая часть импеданса не превышала 0,01 Ом.

Для измерения электропроводности грунта использовался названный выше пластиковый контейнер. Из трех углеродных лент были сшиты электроды по размеру торцов контейнера. Электрический контакт с этими торцевыми электродами обеспечивался за счет латунных трубок диаметром 3 мм.

Продольное сопротивление ткани при измерении между вставленными по краям латунными трубками составило 2 Ом. Частотная дисперсия в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц не наблюдалась. Мнимая часть импеданса не превышала 0,01 Ом.

Перед измерением сопротивления грунта осуществлялась калибровка по воде. В контейнер было залито 12 л водопроводной



Рис. 2. Измерение электропроводности влажной глины с использованием в качестве торцевых электродов угольной ткани. Справа шнур из углеродного материала

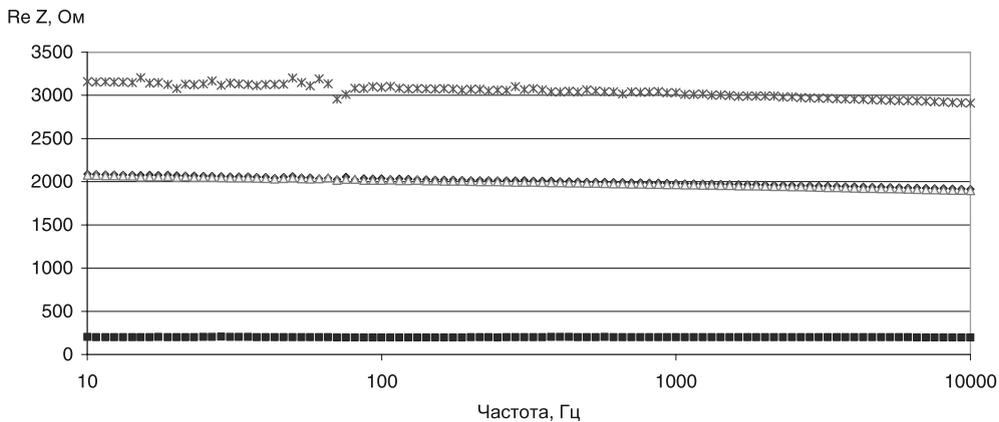


Рис. 3. Зависимость действительной части импеданса в частотном диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц для глины, почвы и воды (♦) глина; (Δ) глина повтор; (\*) почва; (■) вода 533 мкСм/см

воды. Удельная электропроводность, измеренная кондуктометром «Эксперт – 002», составила 533,7 мкСм/см. Для такого значения электропроводности с учетом размеров дна аквариума (35×23 см) и уровня воды (15 см) сопротивление должно составлять  $R = 35 / (0,000534 \times 23 \times 15) = 190$  Ом. Измеренное значение составило 199 Ом, т. е. на 5 % больше, что, с учетом закруглений контейнера и влияния сопротивлений торцевых электродов, вполне приемлемо.

При засыпке в контейнер 12 л влажной

глины (рис. 2) среднее измеренное значение сопротивления составило 2012 Ом при измерении сразу после засыпки грунта и 1994 Ом при повторных измерениях через 30 мин, когда контакт между глиной и торцевыми электродами лучше пропитался влагой. Это соответствует электропроводности 5 мСм/м.

Помимо электропроводности влажной глины измерялась электропроводность верхнего плодородного слоя почвы. Среднее значение составило 3059 Ом, что соот-

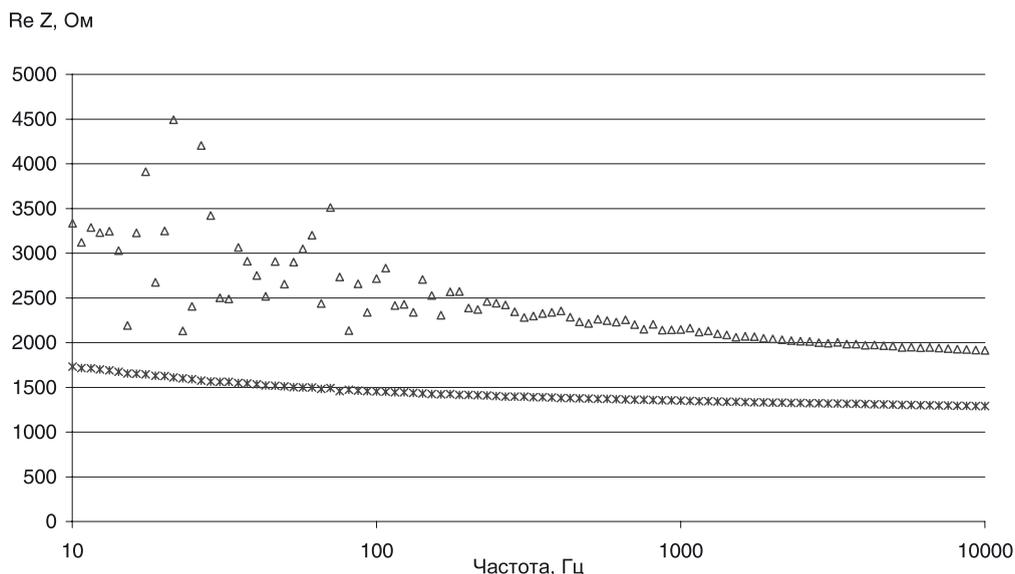


Рис. 4. Зависимость реальной части импеданса от частоты в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц для латунных трубок, воткнутых в глину (Δ) латунная трубка в центре ящика с глиной; (\*) латунные трубки в ящике с глиной

ветствует электропроводности 3,3 мСм/м.

На рис. 3 показаны величины действительной части импеданса в частотном диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц для глины, почвы и воды. На более низких частотах сопротивление выше, но изменение сопротивления в указанном диапазоне в целом не превышает 10 %.

Среднее значение мнимой части составляет 40 Ом для глины, 56 Ом для почвы и 0,9 Ом для воды.

Для сопоставления электрических свойств контактов «металл – грунт» и «углеродный материал – грунт» были проведены эксперименты, аналогичные описанным в [2]. Поскольку латунь относится к металлам, обладающим относительно низкой дисперсией электропроводности, то в качестве референтных электродов, с которыми сопоставлялись углеродные, были взяты латунные трубки.

Латунная трубка диаметром 3 мм втыкалась вертикально в глину в центре контейнера до дна контейнера. Импеданс измерялся между трубкой и одним из торцевых электродов. Среднее значение импеданса в диапазоне 10 Гц ÷ 10 кГц составило 2442 Ом, причем результаты измерений были нестабильны, а средняя величина мнимой части импеданса составила 472 Ом, т. е. около 20 % от реальной. Затем электрод был составлен из двух разнесенных латунных трубок, воткнутых вертикально в глину и

электрически закороченных друг с другом.

Реальная часть импеданса уменьшилась до величины 1430 Ом, т. е. в 1,7 раза, а мнимая – до 119 Ом, т. е. в четыре раза. Частотная зависимость реальной части импеданса для одиночной и двоянной латунных трубок показана на рис. 4.

Затем аналогичные измерения были выполнены с углеродным шнуром, сложенным вдвое, с углеродным шнуром, вертикальные участки которого были разнесены на расстояние 9 см друг от друга, и с углеродной лентой.

Как и в случае с одиночной латунной трубкой, результаты измерений в первом из названных вариантов были нестабильны, а средняя величина реальной части импеданса относительно большой – 1750 Ом. При этом мнимая часть импеданса была заметно меньше, чем у одиночной латунной трубки – 168 Ом. При раздвижении вертикальных участков шнура на 9 см действительная часть упала до 1284 Ом (в 1,4 раза), а мнимая – до 64 Ом, т. е. в 2,6 раза. Кстати, это свидетельствует о том, что на величину мнимой части влияет не только непосредственная граница раздела «электрод – среда», но и её окрестность. Среднее значение реальной и мнимой частей импеданса углеродной ленты составило соответственно 1231 Ом и 79 Ом – значения, близкие к варианту разнесенного шнура.



Рис. 5. Измерение импедансов дипольных антенн. Стрелками отмечены заземлители, изготовленные из трубок из нержавеющей стали



Рис. 6. Шнур из углеродного материала, слегка присыпанный землей

### Результаты экспериментов в открытом грунте

После этих предварительных экспериментов мы приступили к экспериментам в открытом грунте. В ходе данных экспериментов мы сопоставляли импедансы электродов, изготовленных из углеродных волокон, с импедансами традиционных заземлителей. В качестве традиционных заземлителей использовались две трубки из нержавеющей стали с наружным диаметром 2 см, вбитые в грунт на глубину 150 см

(рис. 5). Расстояние между трубками 2 м.

Сначала были измерены импедансы между этими трубками. Затем с поверхности земли удалили слой травы и на образовавшийся плодородный слой мы помещали в разных вариантах ленту и/или шнур из углеродного материала и слегка присыпали их землей, а импеданс измеряли между ними и одной из нержавеющей трубок (рис. 6).

На рис. 7 приведена измеренная зависимость действительной части импеданса от

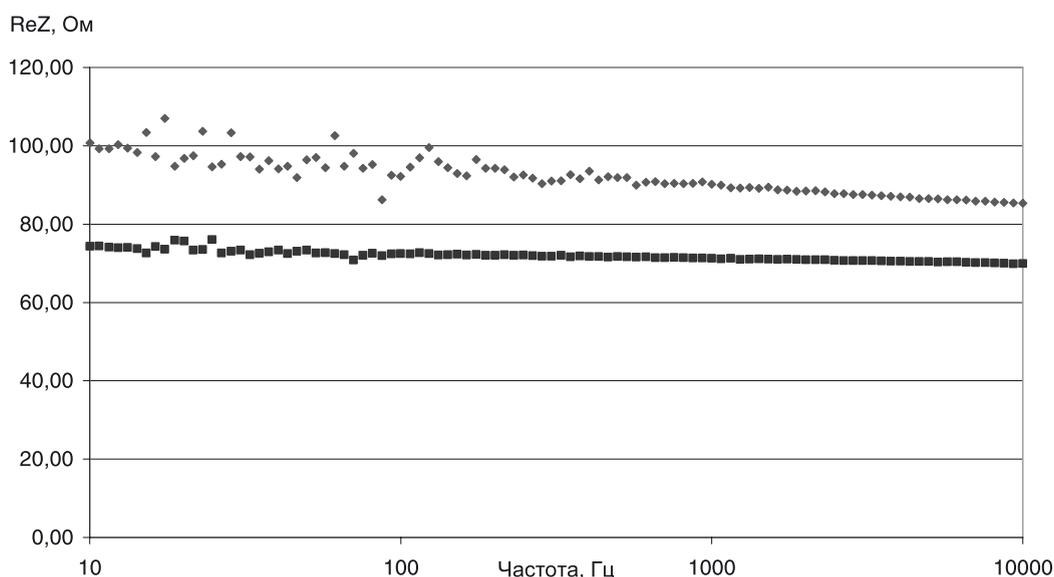


Рис. 7. Сравнение импедансов диполя, оба электрода которого выполнены из нержавеющей стали (синие квадраты), и диполя, один из электродов которого выполнен из стали, а второй — из половины описанной выше углеродной ленты (■) между двумя стальными трубками; (♦) между трубкой и половиной ленты

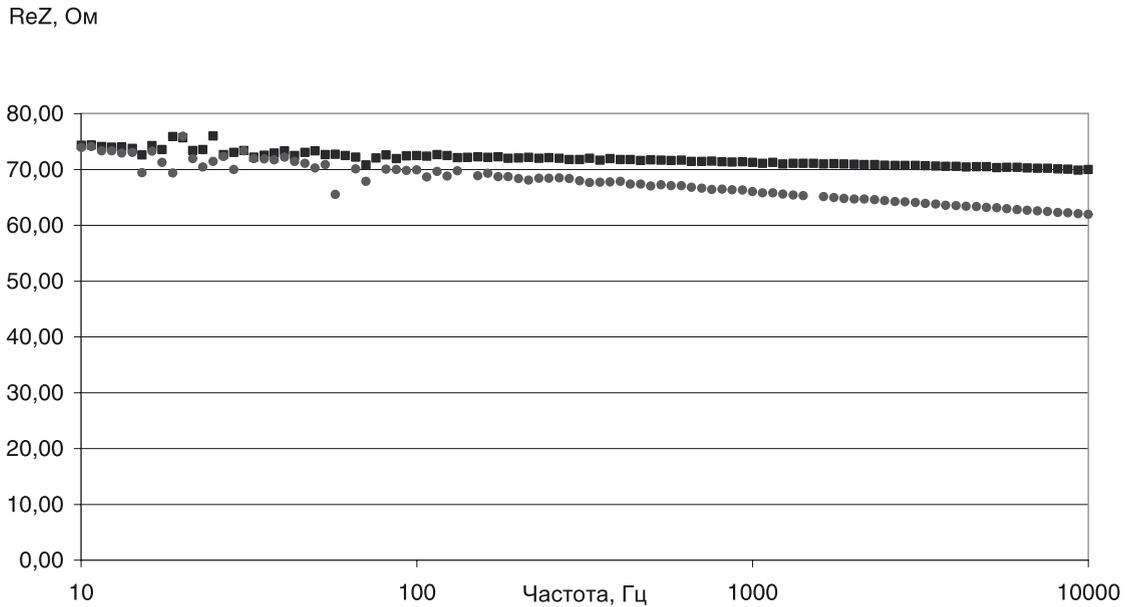


Рис. 8. Тестируемый электрод выполнен в виде полной ленты, присыпанной землей и размещенной в виде двух двухметровых участков под прямым углом друг к другу (■) между двумя стальными трубками; (●) между стальной трубкой и лентой углом

частоты для диполя из двух традиционных заземлителей из стальных трубок (синие квадраты) и диполя, один из электродов которого выполнен из половины описанной выше ленты, т. е. двухметрового отрез-

ка шириной 10 см, присыпанного грунтом. Среднее значение импеданса между трубками 72 Ом, а между трубкой и половиной ленты – 92 Ом.

В случае, когда вторая половина угле-

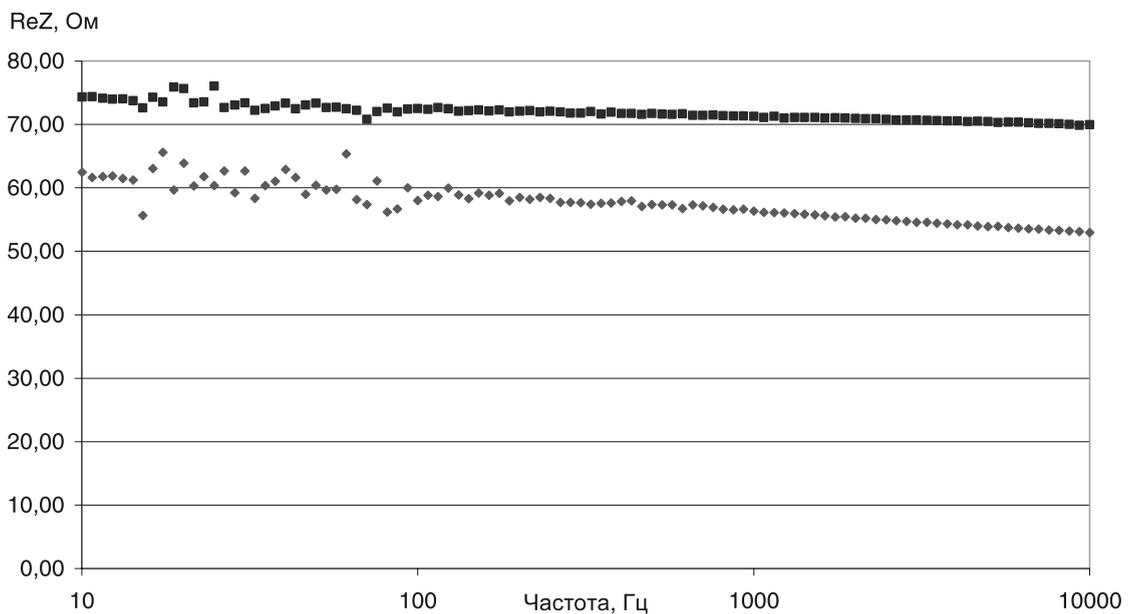


Рис. 9. Уменьшение сопротивления углеродного электрода за счет дополнительного размещения углеродного шнура рядом с углеродной лентой (■) между двумя стальными трубками; (◆) шнур лента и одинарная трубка

родной ленты также была положена на грунт под прямым углом к первоначальному участку, значение импеданса упало до 67 Ом, т. е. стало меньше, чем между двумя стальными трубками (рис. 8).

Если рядом с лентой положить углеродный шнур, а электрический контакт с проводом измерителя (с помощью зажима типа «крокодил») одновременно обеспечить с серединой и ленты, и шнура, то это приведет к уменьшению общего импеданса до 57,7 Ом или на 10 Ом (рис. 9).

Поскольку среднее сопротивление между двумя стальными трубками составляет 72 Ом, то сопротивление одной трубки примерно равно 36 Ом. Это означает, что сопротивление комбинированного углеродного электрода около 21 Ом или в 1,7 раза меньше, чем сопротивление стальной трубки. При этом стальная трубка вбита на глубину 1,5 м, из которых плодородный слой занимает не более 30 см, а остальное — глина. Как показали измерения, электропроводность глины выше, чем электропроводность плодородного слоя. То есть уменьшение импеданса углеродного электрода обусловлено не электропроводностью среды, а улучшением электрического контакта

между электродом и средой.

Чтобы убедиться в том, что большую часть в импеданс вносит именно стальная трубка, мы можем уменьшить его сопротивление за счет параллельного объединения двух стальных электродов (рис. 10).

В этом случае среднее сопротивление упало до 49,6 Ом, т. е. еще на 8 Ом. Поскольку расстояния между электродами соизмеримы с их длиной, а распределение электропроводностей нам неизвестно, то трудно четко указать, какая часть суммарного импеданса связана с комбинированным стальным электродом, а какая — с комбинированным углеродным. Но в любом случае это в 1,44 раза ниже, чем исходный импеданс диполя из традиционного материала. То есть применение легких, компактных, быстро разворачиваемых углеродных материалов с точки зрения величины импеданса не менее эффективно, чем применение тяжелых, жестких стальных труб.

### Обсуждение

Полученные результаты имеет смысл сопоставить с данными из публикаций, по-

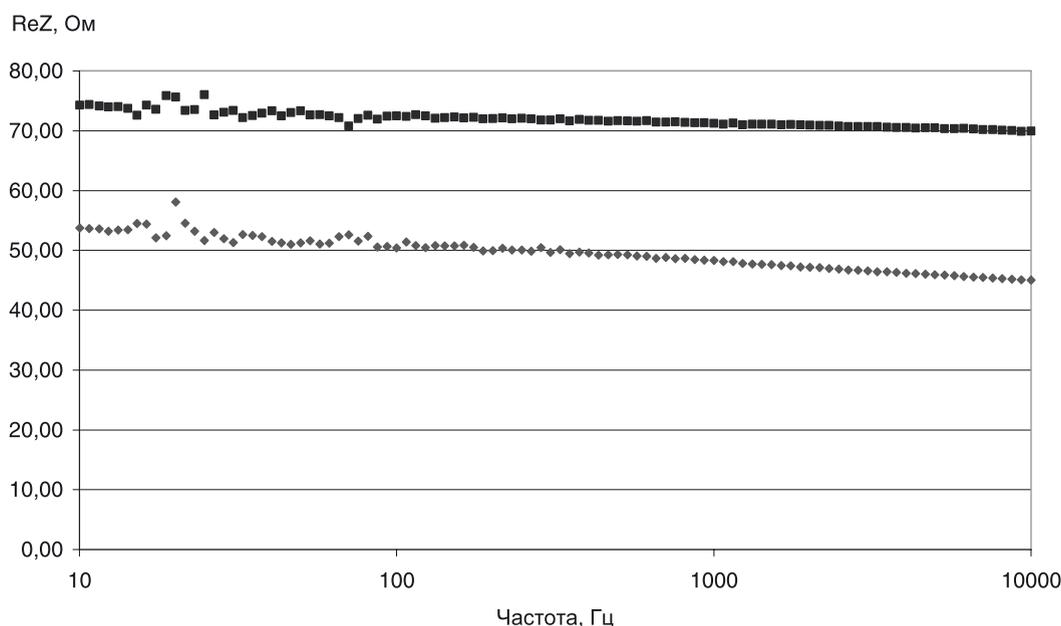


Рис. 10. Референсный электрод образован электрическим соединением двух стальных трубок  
(■) между двумя стальными трубками; (♦) шнур лента и сдвоенная трубка

священных импедансам антенн для подземной связи [3–6]. В этих работах подчеркивается, что уменьшение импеданса контакта электрода и грунта является важным для повышения эффективности антенн. В работах [3–5] испанских авторов в качестве среды описаны скальные грунты электропроводностью  $10^{-2}$  мСм/м, а в качестве электродов – лист алюминиевой фольги размером  $30 \times 45$  см и стальной стержень длиной 20 см и 1 см диаметром. Фольга непосредственно прижимается к грунту, а стержень вбивается в него. Измеренные значения импедансов составили 772–1760 Ом на частоте 70 кГц. Очевидно, что для уменьшения импеданса нужно прежде всего увеличить размеры электродов и улучшить контакт между электродом и скальной породой, однако авторы почему-то про это ничего не пишут.

Аналогично обстоит и с сопротивлением непосредственного контакта между электродом и грунтом. Авторы работ [3–5] измеряют их с помощью 4-электродного метода, получая значения от 20 до 4237 Ом в зависимости от типа грунта и типа используемого электрода. Измерения этих контактов проводятся так, как будто речь идет об измерении природных явлений: тщательно, но без каких-либо модификаций области контакта. Обсуждается лишь эквивалентная схема, объясняющая вид частотной дисперсии импеданса. Казалось бы, контакты между металлами и разными веществами или растворами исследовались со времен Фридриха Вильгельма Георга Кольрауша (1840–1910), не только представившего область контакта в виде параллельного сопротивления и емкости, но и предложившего закон частотной зависимости емкостной и резистивной компонент в области низких частот. Известны пути уменьшения сопротивления этих контактов за счет буферных растворов или гелей и за счет развития поверхности металла. Есть широчайшая практика изготовления защитных заземлений со множеством рекомендаций по уменьшению импедансов. Однако испанские специалисты никаких приемов улучшения электрического контакта не применяют и не упоминают.

Величина сопротивления растекания также описывается ими как величина, задаваемая извне. Складывается впечатление, что они воспринимают её как характеристику местности, которую можно только измерить, но не уменьшить. Между тем, она определяется не только электропроводностью среды, но и топологией поля, т. е. густотой линий тока и эквипотенциалей. А топология поля определяется габаритами и формой электродов.

Если размеры электродов увеличить, то из-за увеличения поверхности уменьшится импеданс контакта, а из-за уменьшения густоты силовых линий уменьшится сопротивление растекания. Если, например, вместо 20-сантиметрового стального стержня взять метровый, то общее сопротивление должно упасть примерно в пять раз. Допустим, авторы почему-то считали, что стержень должен быть вбит на полную длину, а вбивать стержень в скальный грунт на 1 м заметно тяжелее, чем на 20 см. Но что мешало им вместо листа алюминиевой фольги размером  $30 \times 45$  см раскатать полосу этой фольги хотя бы на 2 м при общей длине антенны 10 м?

Более конструктивный подход изложен в работе [6], где даны три рекомендации по уменьшению импеданса антенн:

- электроды должны быть большими;
- электроды имеет смысл изготавливать из трубок, объединенных в параллель;
- между плохо проводящим грунтом и электродом имеет смысл ввести промежуточную зону в виде геля с высокой электропроводностью.

Можно отметить, что все три идеи известны. Авторы публикации [6] тоже не претендуют на их новизну и называют в списке литературы своих предшественников. Этот список легко расширить. Например, в Патенте РФ № 2225420, выданном по заявке от 19.06.2003 г. предлагается состав и способ изготовления электропроводной эластомерной композиции для заземляющих электродов, обеспечивающих снижение импеданса по тому же принципу. В патенте РФ № 2181918 от 20.06.2000 г. предлагается при изготовлении заземлителей для условий вечной мерзлоты закла-

дывать заземлитель в тонкий проводящий слой с удельным электрическим сопротивлением  $10\text{--}100\text{ Ом}\cdot\text{м}$ , толщиной  $0,1\text{--}5\text{ м}$ , находящийся в многолетнемерзлом грунте на глубине от  $3,5$  до  $20\text{ м}$  и сохраняющий низкое сопротивление круглогодично. Этот слой предварительно локализуется методами электроразведки. Очевидно, что это такая же идея, но с использованием доступных природных возможностей. В патенте РФ № 2476622 от 06.07.2011 г. предлагается заземлители собирать в виде гирлянды электродов с помощью специальных токопроводящих приспособлений.

Тем не менее, работа [6] представляется важной, поскольку предложенные идеи рассмотрены теоретически, просчитаны количественно и проверены в эксперименте, в том числе натурном. Авторы работы [6] отмечают, что за счет различных приемов смогли уменьшить сопротивление заземления до величины  $9,75\text{ Ом}$ .

Следует обратить внимание на разницу в электропроводности среды в выполненном нами исследовании и в случае, описанном в [6], а также на отсутствие промежуточного геля с электропроводностью  $2\text{ См/м}$  между электродом и грунтом. Для электрода из нержавеющей стали диаметром  $2\text{ см}$  в глине с измеренным значением удельной электропроводности  $0,005\text{ См/м}$  расчетное значение сопротивления составляет  $104\text{ Ом}$ . Поскольку измеренное значение импеданса между трубками составило  $72\text{ Ом}$ , следует предположить, что реальная электропроводность глины, в которую вбиты трубки, была выше, чем электропроводность измеренной нами глины, из-за большого количества влаги, и составляла  $0,015\text{ См/м}$ .

Можно предположить, что эти отличия электропроводности носят локальный характер: влага течет вдоль границы почва-металл. Из-за этого протекания воды глина вблизи контакта становится более влажной и более проводящей, чем глина, которая взята для измерений электропроводности.

Возможен также более интересный эффект: втягивание более проводящих жидкостей в зону сгущения силовых линий. Этот эффект не зависит от направления тока и

должен наблюдаться как для постоянного тока, так и для переменного. Нержавеющие трубки были вбиты в землю более года назад. За это время они в какой-то степени выполняли функции громоотвода, пропускающая через себя атмосферное электричество. Соответственно растворы солей из почвы должны были смещаться в сторону сгущения силовых линий, т. е. к электродам, тем самым увеличивая их эффективный диаметр.

В работе [6] сопротивление электродов длиной  $1,2\text{ м}$  и диаметром  $7\text{ см}$  без геля составляло  $18,7\text{ Ом}$  при электропроводности  $0,05\text{ См/м}$ , т. е. в  $10$  раз выше. Если мы приведем измеренное нами сопротивление к электропроводности  $0,05\text{ Ом}$ , то получится  $10,4\text{ Ом}$ , что с учетом разницы в размерах и влияния поверхности примерно соответствует данным статьи [6]. Таким образом, если все приемы, рекомендованные в [6], применить при разворачивании диполя из углеродного материала, то мы вполне можем добиться сходных результатов, не используя тяжелые, громоздкие, дорогие стальные трубы.

Можно назвать много причин, по которым использование тканей, шнуров и волокон из углеродных материалов для изготовления электродов-заземлителей представляется очень перспективным.

Углеродные материалы не подвержены химической коррозии, разрушающему действию бактерий и грибов. Это экологически чистый материал: он не загрязняет почву ионами тяжелых металлов. Это очень легкие материалы: шнурок диаметром  $6\text{ мм}$  и длиной  $420\text{ см}$  весит всего  $73\text{ г}$ , тогда как двухметровая трубка из нержавеющей стали диаметром  $2\text{ см}$  весит около  $2\text{ кг}$ . Углеродный шнур или ленту можно быстро и легко разложить на поверхности земли, причем его можно выложить по месту на неровном основании без дополнительных бурений и земляных работ. Это прочный материал: его можно опускать в колодцы и шахты на большую глубину, используя как прочный трос для закрепления грузов и даже для аварийного спуска или подъема людей. Ткани, ленты

и шнуры из углеродных волокон обладают сильно выраженными капиллярными свойствами: они хорошо впитывают и долго удерживают влагу, что полезно для обеспечения хорошего электрического контакта с грунтом.

Одной из основных рекомендаций, данных в статье [6], является рекомендация использования комплексных электродов, составленных из нескольких элементов, например, из четырех металлических труб, соединенных электрически. Наши эксперименты показывают, что еще эффективнее использовать структуры, напоминающие корни дерева, со множеством разветвлений и развитой поверхностью [2]. На базе углеродных лент и шнуров такие структуры можно легко и быстро изготовить с учетом специфики местных условий. При этом электрический контакт между составными элементами обеспечивается простым связыванием в узлы шнуров или лент. Применение материалов из углеродных волокон и изготовление структур, напоминающих корни дерева, будет способствовать удержанию влаги непосредственно вблизи электродов, т. е. в областях, наиболее влияющих на общий импеданс антенны.

В частности, показано, что на одном и том же участке земли углеродный шнур диаметром 6 мм, выложенный под прямым углом со сторонами по 2 м на поверхности земли и слегка присыпанный грунтом, дает

такое же сопротивление, как электрод из нержавеющей стали в виде трубы с внешним диаметром 2 см, вбитой в землю на глубину 1,5 м. Если же рядом со шнуром положить ленту из углеродной ткани шириной 10 см и такой же длины, то сопротивление падает в 1,5 раза, т. е. сопротивление такого комбинированного углеродного электрода заметно ниже, чем сопротивление указанных нержавеющей труб.

Все это делает возможным разработку легких, носимых аварийных комплектов, которые можно быстро развернуть на месте в случае обвала грунта или взрыва в шахте или при организации спасательных работ в пещере. При многих авариях зона завала может быть заметно меньше, чем глубина шахты, и легкое аварийное устройство может оказаться эффективным для связи потерпевших с группой спасателей.

До сих пор разработчики материалов из углеродных волокон обращали основное внимание не на их электрические характеристики, а на проблемы механической прочности при малом весе, ориентируясь на заказы космической и авиационной промышленности. Однако в случае осознания практической значимости снижения сопротивления тканых углеродных материалов и проведения соответствующих исследований можно ожидать, что промышленность освоит выпуск углеродных материалов с заметно лучшими проводящими свойствами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ольшанский В.М.** Бионическое моделирование электросистем слабозлектрических рыб. М.: Наука, 1990. 208 с.
2. **Сюз Вэй, Ольшанский В.М., Волков С.В.** Импедансные характеристики заземлителей // Коррозия, материалы, защита. 2016. № 12. С. 9–21.
3. **Bataller V., Muñoz A., Gaudro P.M., Mediano A., Cuch'í J.A., Villarroel J.L.** Earth Impedance Model for Through-the-Earth Communication Applications with Electrodes // Radio Science. 2010. Vol. 45. No. 6. Pp. 2970–2980. Article ID RS6015.
4. **Bataller V., Muñoz A., Gaudro P.M., Mediano A., Cuch'í J.A., Villarroel J.L.** Improving Medium Access in Through-the-Earth VLF-LF Communications // Journal of Communications. 2009. Vol. 4. No. 4. Pp. 284–294.
5. **Bataller V., Muñoz A., Molina Gaudo P., Mediano A., Cuch'í J.A., Villarroel J.L.** Electrode Impedance Measurement in Through-the-Earth Communication Applications // IET Microwaves, Antennas & Propagation. 2011. DOI: 10.1049/iet-map.2010.0312.
6. **Yidong Xu, Lili Guo, Wei Xue, Korochentsev V., Junwei Qi** An Optimal Electric Dipole Antenna Model and Its Field Propagation // Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation. 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8601497>

## REFERENCES

1. Olshanskiy V.M. *Bionicheskoye modelirovaniye elektrosistem slaboelektricheskikh ryb*. Moscow: Nauka Publ., 1990, 208 p. (rus)
2. Xue Wei, Olshanskiy V.M., Volkov S.V. Impedansnyye kharakteristiki zazemliteley [Impedance Characteristics of Grounding Conductors]. *Korroziya, materialy, zashchita*, 2016, No. 12, Pp. 9–21. (rus)
3. Bataller V., Mu'noz A., Gaudro P.M., Mediano A., Cuch'i J.A., Villarroel J.L. Earth Impedance Model for Through-the-Earth Communication Applications with Electrodes. *Radio Science*, 2010, Vol. 45, No. 6, Pp. 2970–2980, Article ID RS6015.
4. Bataller V., Mu'noz A., Gaudro P.M., Mediano A., Cuch'i J.A., Villarroel J.L. Improving Medium Access in Through-the-Earth VLF-LF Communications. *Journal of Communications*, 2009, Vol. 4, No. 4, Pp. 284–294.
5. Bataller V., Mu'noz A., Molina Gaudo P., Mediano A., Cuch'i J.A., Villarroel J.L. Electrode Impedance Measurement in Through-the-Earth Communication Applications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2011, DOI: 10.1049/iet-map.2010.0312.
6. Yidong Xu, Lili Guo, Wei Xue, Korochentsev V., Junwei Qi An Optimal Electric Dipole Antenna Model and Its Field Propagation. *Hindawi Publishing Corporation International Journal of Antennas and Propagation*, 2016. Available: <http://dx.doi.org/10.1155/2016/8601497>

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / THE AUTHORS

**ВЭЙ Сюэ**

**WEI X.**

E-mail: weihe@mail.ru

**ОЛЬШАНСКИЙ Владимир Менделевич**

**OL'SHANSKIY Vladimir M.**

E-mail: vmolsh@yandex.ru

**ВОЛКОВ Сергей Васильевич**

**VOLKOV Sergey V.**

E-mail: mendur@mail.ru

**БОГАЧЕВ Евгений Акимович**

**BOGACHEV Evgeniy A.**

E-mail: Eug-bogatchev@mail.ru

**ВОЛБЕНКО Сергей Валентинович**

**VOLVENKO Sergey V.**

E-mail: volk@cee.spbstu.ru

Статья поступила в редакцию 10.02.2017

© Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2017