

15. Zhang D., Chen X., Gong X. Acoustic nonlinearity parameter, tomography for biological tissues via parametric array from a circular piston source. Theoretical analysis and computer simulations, *J. Acoust. Soc. Amer.*, 2001, Vol. 109, No. 3, pp. 1219-1225.
16. Tereshchenko S.A. Metody vychislitel'noy tomografii [Methods of a computing tomography]. Moscow: Fizmatlit, 2004, 320 p.
17. Khelgason S. Preobrazovanie Radona [Radon transformation]. Moscow: Mir, 1983, 150 p.
18. Khermen G. Vosstanovlenie izobrazheniy po proektsiyam: osnovy rekonstruktivnoy tomografii [Recovery of images on projections: bases of a reconstructive tomography]. Moscow: Mir, 1983, 352 p.
19. Shepp L.A., Logan B.F. The Fourier reconstruction of a head section, *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, 1974, Vol. 21, pp. 21-43.
20. Lavrent'ev M.M., Zerkal' S.M., Trofimov O.E. CHislennoe modelirovanie v tomografii i uslovno-korrektnye zadachi [Numerical modeling in tomographies and conditional and correct tasks]. Novosibirsk: Izd-vo IDMI NGU, 1999, 171 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор Г.В. Куповых.

Гривцов Владимир Владиславович – Южный федеральный университет; e-mail: gvv@sfnu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Чехова, 22; тел.: 88634371794; к.т.н.; доцент.

Gritvov Vladimir Vladislavovich – Southern Federal University; e-mail: gvv@sfnu.ru; 22, Chekhov street, Taganrog, 347928, Russia; phone: 88634371794; cand. of eng. sc.

УДК [614.825 + 331.45]:615.47

DOI 10.23683/2311-3103-2018-6-111-122

Л.М. Веденева, К.А. Черный

ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ПЕРСОНАЛА И ПАЦИЕНТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕДИЦИНСКОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Применение медицинского электрооборудования и приборов, позволяющих осуществлять современные методы обследования и лечения, настоятельно требуют совершенствования требований, обеспечивающих безопасность пациентов и медицинского персонала. Целью работы является анализ обеспечения электробезопасности персонала и пациентов в медицинском учреждении и надежности работы медицинского электрооборудования. Как известно комплекс защитных мер от поражения электрическим током для медицинского учреждения определяется с учетом типа системы электроснабжения здания, класса медицинского оборудования по степени защиты от поражения электрическим током, класса медицинского помещения. При проектировании заземляющих устройств для медицинских учреждений необходим учет всех факторов, которые могут повлиять на эффективность защиты и надежность работы сложного медицинского электрооборудования. Проводимость грунтов является одним из важнейших таких факторов и зависит от рода, пористости (способности горной породы вмещать жидкости и газы) и строения грунта, степени его влажности, температуры, степени уплотнения, времени года и др. Представлены результаты исследования влияния проводимости грунтов на величины их удельных электрических сопротивлений и, следовательно, сопротивлений заземляющих устройств, которые определяют безопасность эксплуатации медицинского электрооборудования. Показано, что удельное электрическое сопротивление в зависимости от разных значений пористости грунтов меняется в широких диапазонах: при больших значениях пористости грунта его удельное электрическое сопротивление резко снижается, так как поры могут заполняться жидкостью, при этом увеличивая проводимость грунта. Приведены результаты расчета в виде графических зависимостей удельного сопротивления грунта от величины его пористости. Так для песка показано, что пределы изменения электрических сопротивлений в зависимости от его пористости, т.е. в зависимости от плотности его

укладки, могут изменяться более чем в семнадцать раз. На основании проведенных исследований обоснованно, что при проектировании заземляющих устройств в медицинских учреждениях необходимо учитывать пористость грунтов с целью снижения фактических значений сопротивлений заземляющих устройств.

Безопасность; медицинское электрооборудование; заземление; удельное электрическое сопротивление грунта; пористость грунта; проводимость грунта.

L.M. Vedeneyeva, K.A. Chernyi

PERSONAL AND PATIENT SAFETY WHEN USING MEDICAL ELECTRIC EQUIPMENT

The use of medical electrical equipment and devices that allow for the implementation of modern methods of examination and treatment urgently require improved requirements to ensure the safety of patients and medical personnel. The aim of the work is to analyze the electrical safety of staff and patients in a medical institution and the reliability of medical electrical equipment. As is well known, a complex of protective measures against electric shock for a medical institution is determined taking into account the type of building power supply system, the class of medical equipment according to the degree of protection against electrical shock, the class of the medical room. When designing grounding devices for medical institutions, consideration should be given to all factors that may affect the effectiveness of protection and reliability of complex medical electrical equipment. The conductivity of soils is one of the most important of these factors and depends on the type, porosity (the ability of the rock to contain liquids and gases) and the structure of the soil, the degree of its humidity, temperature, degree of compaction, time of year, etc. The results of the study of the effect of the conductivity of soils on the values of their specific electrical resistance and, consequently, the resistance of grounding devices, which determine the safety of operation of medical electrical equipment, are presented. It is shown that the specific electrical resistance varies over wide ranges depending on different values of the porosity of the soil: for large values of the porosity of the soil, its specific electrical resistance decreases dramatically, since the pores can be filled with liquid, while increasing the conductivity of the soil. The calculation results are presented in the form of graphical dependences of the soil resistivity on the value of its porosity. So for sand it is shown that the limits of change of electrical resistance depending on its porosity, i.e. depending on the density of its installation, may vary by more than seventeen times. Based on the research conducted, it is reasonable that when designing grounding devices in medical institutions, it is necessary to take into account the porosity of soils in order to reduce the actual values of the resistances of grounding devices.

Safety; medical electrical equipment; grounding; the specific electrical resistance of the soil; the porosity of the soil; the conductivity of the soil.

Введение. Современные лечебно-профилактические учреждения располагают большим количеством разнообразного медицинского электрооборудования: приборов, аппаратов, вспомогательных устройств, в которых в том или ином виде используется электрическая энергия. Электромедицинская аппаратура находит применение для диагностики, лечения, обслуживания пациента, при лабораторных исследованиях, сборе и обработке информации, иначе говоря, на всех стадиях лечебного процесса.

Использованию электрической энергии сопутствует опасность поражения электрическим током. Отметим также, что существуют специфические условия, которые требуют особых мер по защите пациента и медицинского персонала от поражения электрическим током. Так например, пациент во многих случаях не может нормально реагировать на действие электрического тока, чтобы уменьшить возникшую опасность. Он может быть парализован, находиться под наркозом, быть без сознания, он может быть привязан к операционному столу или кровати. Кроме того пациента могут намеренно включать непосредственно в цепь постоян-

ного низкочастотного или высокочастотного тока, например, при введении электродов, катетеров непосредственно в полость или мышцу сердца, что представляет наибольшую опасность для человека.

Ситуация усложняется еще и тем, что как правило в процессе лечения или обследования к больному нередко подключаются несколько аппаратов, а генерируемые ими электрические, магнитные и электромагнитные поля нарушают действие чувствительной измерительной аппаратуры, осложняя правильное диагностирование. При этом действие помех на электрокардиостимуляторы, устройства автоматики аппаратов для искусственного дыхания и другую аппаратуру для замещения либо поддержания функций органов организма может иметь катастрофические последствия.

Разнообразие и сложность обстоятельств, в которых оказывается больной в медицинском учреждении, приводит к тому, что для обеспечения его электробезопасности недостаточно отдельных, изолированных друг от друга мер электрозащиты, реализованных в медицинской аппаратуре, или мер обеспечения электробезопасности здания. Необходимый уровень электробезопасности может обеспечить только комплекс согласованных между собой защитных средств, принятых как при создании медицинской аппаратуры, так и при специальном электрозащитном оборудовании медицинского учреждения. При этом обязательным условием является достаточная квалификация специально обученного медицинского персонала, а также технических работников, обеспечивающих регулярный контроль и ремонт аппаратуры и электрооборудования здания [1–3].

Комплекс защитных мер от поражения электрическим током для медицинского учреждения определяется с учетом типа системы электроснабжения здания, класса медицинского оборудования по степени защиты от поражения электрическим током, класса медицинского помещения.

В состав крупного медицинского учреждения входят не только операционные, реанимационные блоки, кабинеты врачей и помещения для физиопроцедур и диагностики, а также и административные, хозяйственные помещения, блоки питания, лифты и т.п. Для каждой группы таких помещений разработаны различные меры по электробезопасности. Помещения здравоохранения разделены на 3 группы [4]:

- ◆ К группе 0 относят такие медицинские помещения, где вообще не могут быть использованы контактирующие с пациентом проводящие части и приборы (административные и хозяйственные помещения, столовые, кабинеты некоторых врачей.) При первом же коротком замыкании (КЗ) или пробое изоляции здесь производится автоматическое отключение;

- ◆ К группе 1 относят помещения, в которых пациент имеет физический контакт с электроприборами (наружно или даже внутренне). Это могут быть комнаты для физиотерапии или гидротерапии в поликлинике, санатории, клинике. В таких помещениях нарушение снабжения электричеством не может привести с серьезной угрозой жизни и здоровью пациента. При первом же КЗ или при перебоях в электропитании в таких помещениях автоматически отключается подача электричества на открытые проводящие части приборов. В качестве защитных мер в таких помещениях следует использовать двойную изоляцию, устройство защитного отключения (не более 30 мА), безопасное сверхнизкое напряжение (БСНН), заземленную цепь системы БСНН (ЗСНН).

Уравнивание потенциалов и аварийное электроснабжение может быть использовано здесь в качестве мер дополнительной защиты;

- ◆ К группе 2 отнесены помещения, в которых проводятся жизненно важные лечебные процедуры, и контактирующие части электроприборов имеют физический контакт с пациентом (операционные, реанимационные и аналогичные помещения). В таких помещениях, любая первичная неисправность в системе электроснабжения

не должна привести к отказу аппаратуры жизнеобеспечения. В помещениях группы 2 при первом же КЗ на корпус или пробое изоляции не производится автоматическое отключение электропитания. В этом случае предусмотрен целый комплекс защитных мер: двойная изоляция, медицинская система ИТ, использование медицинских разделительных трансформаторов (МРТ), БСНН; ЗСНН. В качестве дополнительных мер применимо уравнивание потенциалов и аварийное электроснабжение. В клиниках также используются источники бесперебойного питания (ИБП) со временем переключения не более 0,5 с. В операционных и реанимационных помещениях критически важно защитить пациента от поражения электричеством и от микрошока, возникающего при приложении даже самой небольшой разницы потенциалов к сердечной мышце пациента и очень опасного для него.

Одним из основных способов защиты от поражения электрическим током при работе с аппаратурой медицинского персонала и пациентов, а также обеспечения надежности работы сложного медицинского электрооборудования является заземление. Устанавливаются два класса заземлений, которые обозначаются, как защитное (РЕ) и функциональное (FE). Защитное заземление (РЕ) необходимо выполнять только в целях электробезопасности персонала и пациентов. Для нормальной работы медицинского электрооборудования, в котором используются новые технологии, например, ядерный магнитный резонанс, сканирование, поддержка жизнеобеспечения (искусственное сердце и легкие, гемодиализ и пр.) требуется функциональное заземление FE. Причём, разброс требований к сопротивлению заземления достаточно широкий, например, для рентгеновского аппарата это может быть 10 Ом, а для кардиографа и другой чувствительной аппаратуры, необходимой в операционных, реанимационных и палатах интенсивной терапии – только 2 Ом. Таким образом, при проектировании заземляющих устройств возникают определенные сложности. Одним из возможных практических выходов из положения – это установка заземляющего устройства, обеспечивающего минимальное сопротивление, которое одновременно может использоваться как для защитного РЕ, так и функционального FE заземлений.

При проектировании заземляющих устройств для медицинских учреждений необходим грамотный подход и учет всех факторов, которые могут повлиять на эффективность защиты и надежность работы сложного медицинского электрооборудования.

Постановка задачи. Известно, что величина сопротивления заземляющего устройства напрямую зависит от удельного электрического сопротивления грунта. Эта величина определяет свойства грунта с точки зрения его электрической проводимости и чем она меньше, тем меньше сопротивление и больше проводимость грунта, следовательно, благоприятнее условия для растекания тока. В зависимости от состава (глина, известняк, песок), размеров и плотности прилегания друг к другу частиц, влажности и температуры, наличия растворимых химических веществ (кислот, щелочей, продуктов гниения и т.д.) удельное сопротивление грунтов изменяется в очень широких пределах. Наиболее важными факторами, влияющими на величину удельного электрического сопротивления грунта, являются влажность и температура. В течение года в связи с изменением атмосферных и климатических условий содержание влаги в грунте изменяется, следовательно, изменяется и удельное сопротивление. Наиболее резкие колебания удельного сопротивления наблюдаются в верхних слоях грунта, которые зимой промерзают, а летом высыхают [5–7].

Для создания точной карты грунта при проектировании заземляющих устройств необходимо провести большой объем геологических работ (буровые работы) и определить уровень залегания грунтовых вод, а также их общий уровень минерализации, который показывает количество содержащихся в воде растворенных веществ (неорганические соли, органические вещества). Во многих случаях при

определении структуры грунта не выполняют буровые работы и не учитывают влияние грунтовых вод на глубинные слои грунта. Вода довольно быстро дренируется вниз, до водоупорных слоев, что в значительной степени влияет на удельное сопротивление этих слоев грунта. Воды, прошедшие через водопроницаемые породы, на глубине скапливаются над водоупорным слоем, образуя водоносные слои. Таким образом, следует определить влияние грунтовых вод на удельное сопротивление грунтов, с учетом того, что способность горной породы вмещать жидкости и газы характеризуется пористостью [8–11].

Влияние пористости грунта на удельное сопротивление. Рассмотрим влияние пористости на удельное сопротивление грунта на примере Пермского края: к водопроницаемым относятся песчаные грунты (супеси, пески), а к водоупорным – глиняные грунты (кристаллические породы) [12–15]. Недр Пермского края весьма богаты подземными водами, чему способствует геологическое строение региона – переслаивание водоносных и водоупорных горизонтов, а также значительная расчлененность рельефа, обеспечивающая пополнение запасов подземных вод. Подземные воды – единственный источник питания рек зимой и в засушливые летние периоды. В годовом стоке рек их доля составляет 20–25 %, а в карстовых районах возрастает до 30–40 %. Следовательно, учет подземных вод является важным при проектировании заземляющих устройств объектов в Пермском крае [16–18].

Особенные условия существования грунтовых вод в толщах рыхлых пород заставляют нас прежде всего остановиться на некоторых физических свойствах этих грунтов, влияющих на их удельное электрическое сопротивление. Среди этих свойств особенное значение имеют: пористость пород, их влагоемкость, капиллярные свойства и водопроницаемость. Большинство слоев грунтов имеет пористую структуру.

На основании сведений [19] сделан выбор структуры грунта для северной и южной части Пермского края.

Удельное электрическое сопротивление водосодержащих пород ρ можно сопоставить с содержанием воды, используя эмпирическую формулу:

$$\rho = a \cdot P_w \cdot \Phi^{-m} \cdot S^{-n}, \quad (1)$$

где P_w – удельное электрическое сопротивление содержащейся в породе воды; Φ – значение пористости горной породы; S – доля порогового объема, заполненного водой; n – пористость (эмпирический коэффициент, который меняется); a , m – эмпирические параметры, принятые согласно [15, табл. 3.4]. Параметр m принимает значения от 1,3 для рыхлого песка до 2,5 для плотно сцементированной зернистой породы.

Проведено исследование влияния пористости горной породы на удельное электрическое сопротивление грунта для различных регионов Пермского края на примере горных пород: песок, песчаник и известняк. В табл. 1 представлены значения пористости грунтов Φ и коэффициентов a , m для водонасыщенных пород [15, табл. 3.4].

Таблица 1

Значение пористости Φ и коэффициентов a , m для водонасыщенных пород

Горная порода	Φ	a	m
Песок	0,25	0,62	2,15
Песчаник	0,14	0,62	2,1
Известняк	0,13	2,2	1,65

Удельное электрическое сопротивление воды в зависимости от степени минерализации изменяется от 30 до 100 Ом·м, в расчетах принято значение 50 Ом·м.

Пористость отдельной горной породы изменяет значение в диапазоне от 6 до 52 % для песка, от 3,5 до 29 % для песчаника, от 5 до 33 % для известняка, от 6 до 50 % для глины.

Для определения доли порового объема, заполненного водой, необходимо воспользоваться методикой, представленной в [20].

Задав пористостью и объемом грунта $V_{гр} = 200 \text{ м}^3$ (например, при проектировании заземляющего устройства, заземлители которого расположены по периметру здания), производим необходимые расчеты для анализа влияния пористости горных пород на удельное электрическое сопротивление грунтов.

Обозначим как ρ_s – отношение массы сухого грунта (исключая массу воды в его порах) к объему твердой части этого грунта. Согласно [20, табл. 1.2] для песка $\rho_s = 2660 \text{ кг/м}^3$, для песчаника $\rho_s = 2320 \text{ кг/м}^3$, для известняка $\rho_s = 2600 \text{ кг/м}^3$.

Обозначим как ρ_w – отношение массы влажного грунта (исключая массу воды в его порах) к объему грунта; для песка $\rho_w = 1920 \text{ кг/м}^3$, для песчаника $\rho_w = 1450 \text{ кг/м}^3$, для известняка $\rho_w = 1400 \text{ кг/м}^3$.

Тогда, плотность сухого грунта (отношение массы сухого грунта (исключая массу воды в его порах) к занимаемому этим грунтом объему (включая имеющиеся в этом грунте поры)) определяется как:

$$\rho_d = (1-n) \cdot \rho_s, \text{ кг/м}^3. \quad (2)$$

Найдем объем твердой части грунта:

$$V_{тв} = (1-n) \cdot V_{гр}, \text{ м}^3. \quad (3)$$

Объем влажной части грунта:

$$V_{вл} = V_{гр} - V_{тв}, \text{ м}^3. \quad (4)$$

Масса сухой части грунта составляет:

$$m_{сух.гр} = \rho_d \cdot V_{тв}, \text{ кг}. \quad (5)$$

Масса влажной части грунта составляет:

$$m_{вл.гр} = \rho_w \cdot V_{вл}, \text{ кг}. \quad (6)$$

Масса грунта равна:

$$m = m_{сух.гр} + m_{вл.гр}, \text{ кг}. \quad (7)$$

Эквивалентная плотность грунта:

$$\rho_{эвк} = \frac{m}{V_{тв}}, \text{ кг/м}^3. \quad (8)$$

Влажность грунта определяется:

$$w = \frac{\rho_{эвк} - \rho_d}{\rho_d}, \text{ кг/м}^3. \quad (9)$$

Пористость не дает исчерпывающей характеристики состояния грунта, поэтому при расчетах используем показатель плотности грунта – коэффициент пористости e :

$$e = \frac{n}{100-n}. \quad (10)$$

Коэффициентом водонасыщенности или степенью влажности грунта называется отношение природной влажности грунта w к влажности, соответствующей полному заполнению пор водой:

$$S_r = \frac{w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_w} \quad (11)$$

Величины пористости и дополнительный коэффициент пористости определяют структуру грунта [21].

При изменении объема твердой части грунта, меняется доля порогового объема, заполненного водой, а сам объем грунта не меняется. Результаты расчета удельного электрического сопротивления песка с учетом влияния пористости горной породы представлены в табл. 2.

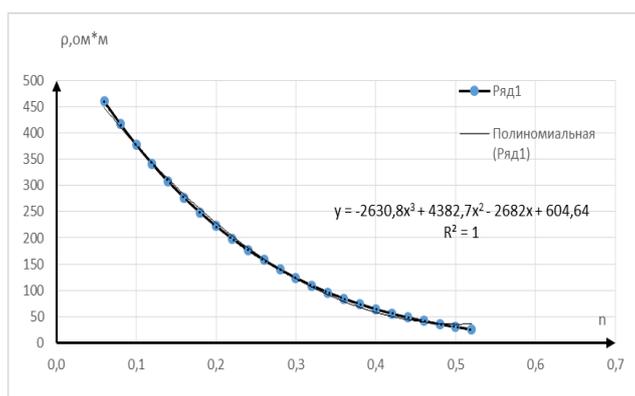
Таблица 2

Расчет удельного электрического сопротивления песка с учетом влияния пористости

n	ρ_d , кг/м ³	V_{TB} , м ³	$m_{сух.гр}$, кг	m, кг	$\rho_{экв}$, кг/м ³	w	e	S_r	ρ , Ом·м
0,06	2500,4	188	470075,2	493115,2	2623,0	0,05	0,0006	113,1	459,8
0,06	2340,8	176	411980,8	458060,8	2602,6	0,11	0,0012	129,0	340,8
0,12	2181,2	164	357716,8	426836,8	2602,7	0,19	0,0018	148,5	248,3
0,18	2021,6	152	307283,2	399443,2	2627,9	0,30	0,0024	172,7	177,4
0,24	1862,0	140	260680	375880	2684,9	0,44	0,0030	203,5	123,9
0,30	1702,4	128	217907,2	356147,2	2782,4	0,63	0,0036	243,3	84,5
0,36	1542,8	116	178964,8	340244,8	2933,1	0,90	0,0042	296,0	56,0
0,42	1383,2	104	143852,8	328172,8	3155,5	1,28	0,0048	368,0	35,8
0,48	1276,8	96	122572,8	322252,8	3356,8	1,63	0,0052	431,8	26,0

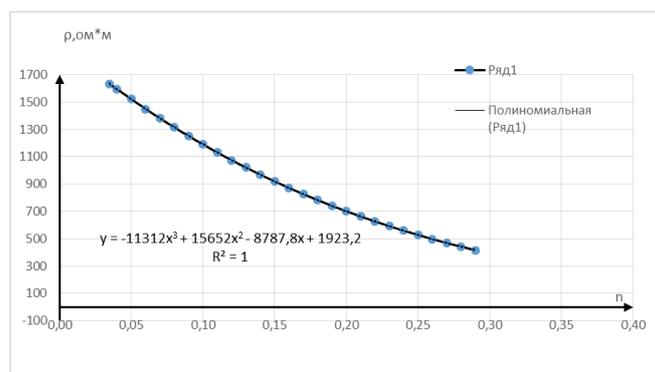
Аналогично выполнены расчеты для песчаника и известняка в диапазоне изменения их пористости, соответственно от 3,5 до 29 % и от 5 до 33 %.

Зависимости удельных электрических сопротивлений грунтов (песка, известняка и песчаника) от их пористости по рассчитанным данным представлены на рис. 1.

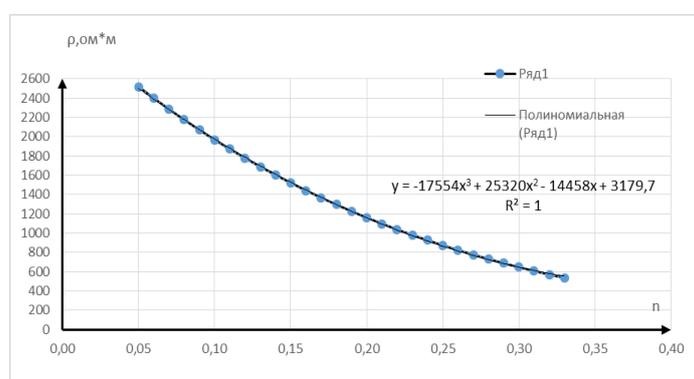


а

Рис. 1. График зависимости удельного электрического сопротивления от пористости грунта: а – песок



б



в

Рис. 1. График зависимости удельного электрического сопротивления от пористости грунта: б – песок; в – известняк

Наглядно изображено, что удельное электрическое сопротивление грунтов в зависимости от разных значений пористости меняется в широких диапазонах. Зависимостями удобно пользоваться при проектировании заземляющих устройств. Особенно отметим, что при больших значениях пористости грунта его удельное электрическое сопротивление резко снижается, так как поры могут заполняться водой, при этом увеличивается их проводимость. Резкое снижение удельного электрического сопротивления грунта наблюдается обычно при увеличении влажности до 15–20 % (по массе). При влажности более 80 % удельное электрическое сопротивление грунта может возрасти за счет снижения концентрации растворимых в воде веществ. Такое влияние на удельное электрическое сопротивление объясняет соотношение между количествами связанной и свободной воды в грунте. Связанная вода обладает большим удельным сопротивлением, чем свободная, и изменение соотношения между количествами связанной и свободной воды в грунте будет влиять на его удельное сопротивление [22].

Пределы изменения удельного электрического сопротивления грунта в зависимости от его пористости представлены в табл. 3. При изменении пористости от минимального до максимального значений, в наибольшее число раз уменьшилось удельное электрическое сопротивление песка (в 17,7 раз), а по величине – известняка (на 1982,8 Ом·м). При многослойности грунта этот факт может существенно влиять на величину сопротивлений заземляющих устройств.

Таблица 3

**Пределы изменения удельного электрического сопротивления грунта
в зависимости от его пористости**

Горная порода	n_{\min} , %	n_{\max} , %	ρ_{\max} , Ом·м	ρ_{\min} , Ом·м	$(\rho_{\max} - \rho_{\min})$, Ом·м	$\rho_{\max} / \rho_{\min}$
Песок	6,0	52	459,8	26,0	433,8	17,7
Песчаник	3,5	29	1634,6	415,5	1219,1	3,9
Известняк	5,0	33	2518,7	535,9	1982,8	4,7

Выводы. На основании проведенных исследований показано, что при проектировании заземляющих устройств в грунтах необходимо учитывать их пористость с целью снижения фактических значений сопротивлений заземляющих устройств, которое используется тем лучше, чем выше проводимость грунта, в котором оно помещено. Это особенно важно учитывать при проектировании заземляющих устройств для медицинских учреждений, которые должны не только обеспечить защиту от поражения электрическим током медицинского персонала и пациентов, а также поддерживать нормальное функционирование медицинского электрооборудования. Очевидно, что для грунтов существуют некоторые оптимальные значения влажности и содержания растворимых веществ, при которых их удельное электрическое сопротивление достигает минимума. В практических условиях резкое снижение удельного электрического сопротивления грунта наблюдается обычно при увеличении влажности до 15–20 % (по массе). Дальнейшее увлажнение мало влияет на его сопротивление. При влажности более 80–90 % удельное электрическое сопротивление грунта может возрасти за счет снижения концентрации растворимых в воде веществ. Поэтому для достижения малого сопротивления заземляющего устройства для медицинского электрооборудования при многослойных грунтах можно использовать современные решения на основе модульных систем заземления. Применение модульно-штыревых заземлителей глубокого залегания (до 30 м и более) позволяет проектировать повторное защитное заземление РЕ на входе в здание равным по параметрам сопротивлению функциональному заземлению, при этом отпадает необходимость в использовании отдельных систем заземления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ливенсон А.П. Электробезопасность медицинской техники. Вып. 1. – М.: Медицина, 1975. – 165 с.
2. Герцик Ю.Г. Техника безопасности при клинической эксплуатации электромедицинских изделий. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. – 64 с.
3. Colella P., Pons E., Tommasini R. Dangerous touch voltages in buildings: The impact of extraneous conductive parts in risk mitigation // Electric Power Systems Research. – 2017. – Vol. 147. – P. 263-271.
4. ГОСТ Р 50571.28-2006 Электроустановки зданий. Ч. 7-710. Требования к специальным электроустановкам. Электроустановки медицинских помещений.
5. Веденеева Л.М., Чудинов А.В. Исследование влияния основных свойств грунта на сопротивление заземляющих устройств // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т. 16, № 1. – С. 89-100.
6. Zhou M., Wang J., Cai L., Fan Y. Laboratory investigations on factors affecting soil electrical resistivity and the measurement // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2015. – Art. No. 7182309.
7. Malanda S.C., Davidson I.E., Singh E., Buraimoh E. Analysis of Soil Resistivity and its Impact on Grounding Systems Design // IEEE Power and Energy Society and Industrial Applications Society PowerAfrica, 26–29 June 2018, Cape Town, South Africa. – Cape Town: 2018. – Art. No. 8520960. – P. 324-329.

8. Консультации по геологии. Пористость грунтов. – URL: <http://sprogigeologa.ru/opredelenie-svoystv-gruntov/poristost-grunta/> (дата обращения: 26.10.2018).
9. *Coelho Vilson Luiz, Piantini Alexandre, Almaguer Hugo A.D., Coelho Rafael A., Boaventura Wallace do C., Paulino Jose Osvaldo S.* The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems // In the Lightning Flash and Lightning Protection (SIPDA 2013), Electric Power Systems Research. – 2015. – Vol. 118. – P. 76-82.
10. *Fuji-ta K., Seki M., Ichiki M.* Random network model of electrical conduction in two-phase rock // Mineralogy and Petrology. – 2018. –Vol. 112, Issue 6. – P. 857-864.
11. *Wei Bai, Lingwei Kong, Aiguo Guo.* Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2013. – No. 5, Issue 5. – P. 406-411.
12. *Tung C.C., Lim S.C.* Performance of electrical grounding system in soil at low moisture content condition at various compression levels // Journal of Engineering Science and Technology. – 2017. – Vol. 12, Special Issue 1. – P. 27-47.
13. Явления, возникающие при замыкании на землю // Электротехнический портал. – URL: <http://xn---8sbnaarbidfksmiphlmncm1d9b0i.xn--p1ai/bezgd/r5-gl52/64-yavlenia-pri-zamikanii-na-zemly.html> (дата обращения: 26.10.2018).
14. *Долин П.А.* Основы техники безопасности в электроустановках: учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.
15. *Карякин Р.Н.* Заземляющие устройства электроустановок: справочник. – М.: Энергосервис, 2006. – 523 с.
16. *Назаров Н.Н.* География Пермского края. Ч. 1. Природная (физическая) география: учеб. пособие. – Пермь, 2006. – 139 с.
17. *Власов М.Н.* Учебная практика по почвоведению: учеб.-метод. пособие. – Пермь: Перм. гос. сельскохоз. академия, 2013. – 122 с.
18. Карта почв Пермского края. – URL: <http://gnilomedova.59313s016.edusite.ru/p7aa1.html> (дата обращения: 26.10.2018).
19. *Веденева Л.М., Чудинов А.В.* Учет неоднородности грунта при проектировании заземляющих устройств в различных регионах Пермского края // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника. – 2016. – № 2. – С. 136-152.
20. ОФнПС. Характеристики плотности грунтов и плотности их сложения. – URL: <http://xn--h1aleim.xn--p1ai/sogochan/g1-2.html> (дата обращения: 26.10.2018).
21. Тюменский государственный нефтегазовый университет. Физические характеристики грунтов. – URL: <http://www.studfiles.ru/preview/5333520/page:2/> (дата обращения: 26.10.2018).
22. *Mohamed Ahmed Khalil, Fernando A. Monterio Santos.* Influence of Degree of Saturation in the Electric Resistivity–Hydraulic Conductivity Relationship // Surveys in Geophysics. – 2009. – Vol. 30. – P. 601-615.

REFERENCES

1. *Livenson A.R.* Elektrobezopasnost' meditsinskoj tekhniki [Electrical safety of medical equipment]. Issue 1. Moscow: Meditsina, 1975, 165 p.
2. *Gertsik Yu.G.* Tekhnika bezopasnosti pri klinicheskoy ekspluatatsii elektromeditsinskih izdeliy [Safety in clinical use of electromedical products]. Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 2017, 64 p.
3. *Colella P., Pons E., Tommasini R.* Dangerous touch voltages in buildings: The impact of extraneous conductive parts in risk mitigation, *Electric Power Systems Research*, 2017, Vol. 147, pp. 263-271.
4. GOST R 50571.28-2006. Elektroustanovki zdaniy [Electrical installation of buildings]. Part 7-710. Trebovaniya k spetsial'nym elektroustanovkam. Elektroustanovki meditsinskih pomeshcheniy [Requirements for special electrical installations. Electrical installations of medical facilities].

5. Vedeneeva L.M., Chudinov A.V. Issledovanie vliyaniya osnovnykh svoystv grunta na soprotivlenie zzemlyayushchikh ustroystv [Investigation of the influence of the basic properties of soil on the resistance of grounding devices], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo* [Bulletin of the Perm national research Polytechnic University. Geology. Oil and gas and mining], 2017, Vol. 16, No. 1, ppS. 89-100.
6. Zhou M., Wang J., Cai L., Fan Y. Laboratory investigations on factors affecting soil electrical resistivity and the measurement, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2015, Art. No. 7182309.
7. Malanda S.C., Davidson I.E., Singh E., Buraimoh E. Analysis of Soil Resistivity and its Impact on Grounding Systems Design, *IEEE Power and Energy Society and Industrial Applications Society PowerAfrica, 26–29 June 2018, Cape Town, South Africa*. Cape Town: 2018, Art. No. 8520960, pp. 324-329.
8. Konsul'tatsii po geologii. Poristost' gruntov [Consultations on Geology. The porosity of soils]. Available at: <http://sprosigeologa.ru/opredelenie-svoystv-gruntov/poristost-grunta/> (accessed 26 October 2018).
9. Coelho Vilson Luiz, Piantini Alexandre, Almaguer Hugo A.D., Coelho Rafael A., Boaventura Wallace do C., Paulino Jose Osvaldo S. The influence of seasonal soil moisture on the behavior of soil resistivity and power distribution grounding systems, *In The Lightning Flash and Lightning Protection (SIPDA 2013), Electric Power Systems Research*, 2015, Vol. 118, pp. 76-82.
10. Fuji-ta K., Seki M., Ichiki M. Random network model of electrical conduction in two-phase rock, *Mineralogy and Petrology*, 2018, Vol. 112, Issue 6, pp. 857-864.
11. Wei Bai, Lingwei Kong, Aiguo Guo. Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, No. 5, Issue 5, pp. 406-411.
12. Tung C.C., Lim S.C. Performance of electrical grounding system in soil at low moisture content condition at various compression levels, *Journal of Engineering Science and Technology*, 2017, Vol. 12, Special Issue 1, pp. 27-47.
13. Yavleniya, voznikayushchie pri zamykanii na zemlyu [The phenomena occurring when short to ground], *Elektrotekhnicheskii portal* [Electrical engineering portal]. Available at: <http://xn--8sbnaarbedfksmiphlnmcm1d9b0i.xn--p1ai/bezgd/r5-g152/64-yavlenia-pri-zamikanii-na-zemly.html> (accessed 26 October 2018).
14. Dolin P.A. Osnovy tekhniki bezopasnosti v elektroustanovkakh: ucheb. posobie dlya vuzov [Basics of safety in electrical installations: a textbook for universities]. Moscow: Energoatomizdat, 1984, 448.
15. Karyakin R.N. Zzemlyayushchie ustroystva elektroustanovok: spravochnik [Grounding devices of electrical installations: reference]. Moscow: Energoservis, 2006, 523 p.
16. Nazarov N.N. Geografiya Permskogo kraya [Geography of Perm region]. Part 1. Prirodnaya (fizicheskaya) geografiya: ucheb. posobie [Natural (physical) geography: textbook]. Perm', 2006, 139 p.
17. Vlasov M.N. Uchebnaya praktika po pochvovedeniyu: ucheb.-metod. Posobie [Educational practice in soil science: teaching manual]. Perm': Perm. gos. sel'skokhoz. akademiya, 2013, 122 p.
18. Karta pochv Permskogo kraya [Soil map of the Perm region]. Available at: <http://gnilomedova.59313s016.edusite.ru/p7aa1.html> (accessed 26 October 2018).
19. Vedeneeva L.M., Chudinov A.V. Uchet neodnorodnosti grunta pri proektirovanii zzemlyayushchikh ustroystv v razlichnykh regionakh Permskogo kraya [Taking into account the heterogeneity of soil in the design of grounding devices in different regions of the Perm region], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika* [Bulletin of the Perm national research Polytechnic University. Electrical engineering], 2016, No. 2, pp. 136-152.
20. OFiPS. Kharakteristiki plotnosti gruntov i plotnosti ikh slozheniya [Ofips. Characteristics of soil density and density of their addition]. Available at: <http://xn--h1aleim.xn--p1ai/sorochan/g1-2.html> (accessed 26 October 2018).
21. Tyumenskiy gosudarstvennyy neftegazovyy universitet. Fizicheskie kharakteristiki gruntov [Tyumen state oil and gas University. Physical characteristics of soils]. Available at: <http://www.studfiles.ru/preview/5333520/page:2/> (accessed 26 October 2018).

22. *Mohamed Ahmed Khalil, Fernando A. Monterio Santos. Influence of Degree of Saturation in the Electric Resistivity–Hydraulic Conductivity Relationship, Surveys in Geophysics, 2009, Vol. 30, pp. 601-615.*

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор А.И. Сидоров.

Веденева Людмила Михайловна – Пермский национальный исследовательский политехнический университет; e-mail: lmv2000@mail.ru; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; тел. 89197050479; кафедра безопасности жизнедеятельности; к.т.н.; доцент.

Черный Константин Анатольевич – e-mail: chernyy_k@mail.ru. тел.: 89024791211; кафедра безопасности жизнедеятельности; д.т.н.; доцент.

Vedeneva Liudmila Mihajlovna – Perm National Research Polytechnic University; e-mail: lmv2000@mail.ru; 29, Komsomolsky av. Perm, 614990, Russia; phone: +79197050479; the department of health and safety; cand. of eng. sc.; associate professor.

Chernyi Konstantin Anatolievich – e-mail: chernyy_k@mail.ru; phone: +79024791211; the department of health and safety; dr. of eng. sc.; associate professor.

УДК 534.7

DOI 10.23683/2311-3103-2018-6-122-130

А.Ю. Вареникова

ПРИМЕНЕНИЕ ИТЕРАЦИОННЫХ МЕТОДОВ РЕКОНСТРУКТИВНОЙ ТОМОГРАФИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ*

Рассмотрены вопросы применения методов реконструктивной томографии для восстановления структурных характеристик слоистого биологического объекта. Приведены особенности реализации интегральных (аналитических) и итерационных методов обработки томографических данных. Отмечены преимущества и недостатки каждой группы методов. Показано, что итерационные методы реконструктивной томографии обладают рядом преимуществ при исследовании биологического объекта в сравнении с интегральными методами. Представлен математический аппарат итерационных методов реконструктивной томографии. Приведены отличия различных модификаций данной группы методов. В частности, отражено, что мультипликативная модификация алгебраических методов (MART) позволяет получить наиболее информативные данные о распределении структурных характеристик на границах слоистого биологического объекта. Рассматривается решение прямой задачи акустической томографии. В качестве информативной характеристики предложен нелинейный параметр, обладающий большей чувствительностью к структурным изменениям объекта, слои которого обладают близкими значениями акустического импеданса. Представлена математическая модель метода восстановления распределения нелинейного параметра. Данная модель основана на уравнении для простой волны и функции точечного источника. Получены математические выражения для определения значения нелинейного параметра второго порядка в точке исследуемого объекта на основе восстановления распределения амплитуды колебательной скорости второй гармоники ультразвуковой волны. С учетом математической модели метода определения значений нелинейного параметра в точке среды было получено распределение добавок к колебательной скорости для слоистого биологического объекта. Описана структура исследуемого объекта. На основе полученных данных показан процесс получения проекций, реализуемый с помощью алгебраических методов реконструкции (ART).

Акустическая томография; прямая и обратная задачи реконструктивной томографии; интегральные и итерационные методы реконструктивной томографии; нелинейный параметр.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-07-00374.