

УДК 577.342:53.08:621.372.41

УЧЕТ СКИН-ЭФФЕКТА ПРИ БЕЗЭЛЕКТРОДНОМ ИССЛЕДОВАНИИ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ ЖИДКОСТИ В КАПИЛЛЯРАХ

О. В. ГУЦУЛ¹, В. З. СЛОБОДЯН²

¹Буковинский государственный медицинский университет,
Украина, Черновцы, 58000, пл. Театральная, д. 2

²Черновецкий национальный университет им. Ю. Федковича,
Украина, Черновцы, 58012, ул. Коцюбинского 2

Аннотация. Рассмотрены процессы, которые происходят в установке для безэлектродного измерения электропроводности жидкостей. Проведено экспериментальное исследование зависимости добротности колебательного контура от удельного сопротивления жидкости с использованием электродного и безэлектродного методов измерения. Исследованы частотные зависимости дополнительного затухания d в колебательном контуре, вызванные наличием жидкости с удельным сопротивлением ρ в индуктивно связанном капиллярном соленоиде в диапазоне частот 2,2–8,8 МГц. Показано, что для рассмотренных значений ρ влияние скин-эффекта существенно, и дополнительное затухание описывается формулой $d = -a_0(f) + a_1(f)\rho^{-1/2}$, где функция $a_1(f)$ пропорциональна $f^{3/2}$, а функция $a_0(f)$ пропорциональна f^2 . Благодаря различным частотным зависимостям функций $a_1(f)$ и $a_0(f)$ в явном виде получена частотная зависимость относительной глубины скин-слоя в жидком электролите $h/r_k = A(f)\rho^{1/2} = af^{1/2}\rho^{1/2}$, где a — константа, которая не зависит от частоты и удельного сопротивления жидкости.

Ключевые слова: частотная зависимость; скин-эффект; безэлектродный метод; добротность; удельная электропроводность; резонанс частот; колебательный контур; жидкость

ВСТУПЛЕНИЕ

Безэлектродные исследования электропроводности жидкости являются актуальными для различных отраслей науки и производства, в том числе для технологических процессов с использованием, как химически чистых, так и химически агрессивных жидкостей. Исследование свойств водных растворов электролитов для большого интервала концентраций представляет значительный интерес, как для практики, так и для развития теоретических представлений [1]. Современное состояние исследований электрофизических параметров жидкостей позволяет получать информацию об

особенностях поведения и структуры различных растворов [2, 3].

Измерения электропроводности в твердых телах обычно осуществляют с помощью контактов, а в жидкостях — с помощью электродов. Поэтому соответствующие методы измерений часто называют контактными или электродными.

В настоящее время для исследования удельной электропроводности жидкости используются электродные и безэлектродные методы измерений характеристик электропроводных сред. В основе большинства этих методов [4–8] лежит анализ переходных и установившихся процессов, в которых принимает

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Jungwirth, P.; Finlayson-Pitts, B. J.; Tobias, D. J. "Introduction: Structure and chemistry at aqueous interfaces," *Chemical Rev.*, Vol. 106, No. 4, p. 1137-1139, 2006. DOI: [10.1021/cr040382h](https://doi.org/10.1021/cr040382h).
2. Golnabi, H.; Matloob, M. R.; Bahar, M.; Sharifian, M. "Investigation of electrical conductivity of different water liquids and electrolyte solutions," *Iranian Phys. J.*, Vol. 3, No. 2, p. 24-28, 2009. URI: <https://www.sid.ir/en/journal/ViewPaper.aspx?ID=191551>.
3. Zhang, S.; Sun, N.; He, X.; Lu, X.; Zhang, Z. "Physical properties of ionic liquids: database and evaluation," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 35, No. 4, p. 1475-1517, 2006. DOI: [10.1063/1.2204959](https://doi.org/10.1063/1.2204959).
4. Популях, К.С. *Электронные резонансные измерительные приборы*. Харьков: ХГУ, 1961. 138 с.
5. Карандеев, К.Б.; Красиленко, В.А.; Панков, Б.Н.; Соболев, В.С.; Соболевский, К.М. "Методы измерений пассивных электрических параметров," *Автометрия*, № 5, С. 86-100, 1967. URI: https://www.iae.nsk.su/images/stories/5_Autometria/5_Archives/1967/5/86-100.pdf.
6. Охотин, А.С.; Пушкарский, А.С.; Боровикова, Р.П.; Симонов, В.А. *Методы измерения характеристики термоэлектрических материалов и преобразователей*. М.: Наука, 1974. 168 с.
7. Miller, G. L.; Robinson, D. A. H.; Wiley, J. D. "Contactless measurement of semiconductor conductivity by radio frequency-free-carrier power absorption," *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 47, No. 7, p. 799-806, 1976. DOI: [10.1063/1.1134756](https://doi.org/10.1063/1.1134756).
8. Калинин, В.В.; Казак, В.В. "Способ и устройство для измерения сопротивления водных электролитов," *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*, Т. 8, № 74, С. 46-48, 2008.
9. Гуцул, О.В.; Шаплавский, Н.В.; Слободян, В.З. "Электромагнитная индукция в биометрии крови," *Прикладная радиоэлектроника*, Т. 11, № 3, С. 373-377, 2012. URI: <http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/1046/1/12.pdf>.
10. Gutsul, O. V.; Shaplavsky, N. V.; Buzhdygan, V. V.; Slobodian, V. Z. "A charge of the erythrocyte test by automated method," *J. Biomedical Sci. Eng.*, Vol. 5, No. 4, p. 186-189, 2012. DOI: [10.4236/jbise.2012.54024](https://doi.org/10.4236/jbise.2012.54024).
11. Шаплавський, М.В.; Пішак, В.П.; Слободян, О.В.; Коломоє, М.Ю.; Григоришин, П.М. "Безелектродний спосіб автоматизованого вимірювання питомого опору електролітів та біологічних рідин," Пат. 36976 Україна, МПК G 01 N 27/00, заявник та патентовласник Буковинський державний медичний університет МОЗ України. № 200807872; заявл. 10.06.08; опубл. 10.11.2008; *Бюл. Изобр.*, № 21. 6 с. URI: <http://uapatents.com/6-36976-bezelektrodnij-sposib-avtomatizovanogo-vimiryuvannya-pitomogo-oporu-elektrolitiv-ta-biologichnih-ridin.html>.
12. Гуцул, О.В.; Слободян, В.З. "Особенности дослідження параметрів рідин електродним та безелектродним методами," *Вісник Запорізького національного університету. Серія: Фізико-математичні науки*, № 2, С. 21-28, 2013.
13. Батыгин, Ю.В.; Гнатов, А.В.; Барбашова, М.В.; Гаврилова, Т.В.; Степанов, А.А. "Бесконтактный способ измерения удельной электропроводности листовых металлов," *Электротехника і електромеханіка*, № 1, С. 69-72, 2012. URI: <http://eie.khpi.edu.ua/issue/view/6470>.
14. Ащеулов, А.А.; Бучковский, И.А.; Романюк, И.С. "Устройство для бесконтактного измерения электропроводности полупроводников," *Технология и конструирование в электронной аппаратуре*, № 2, С. 55-57, 2007. URI: http://www.tkea.com.ua/tkea/2007/2_2007/st_017.htm.
15. Латышев, Л.Н.; Иванов, В.В. "Бесконтактный кондуктометр для контроля проводимости скважинной жидкости," *Нефтегазовое дело*, № 2, С. 1-10, 2013. URI: <http://ogbus.ru/article/view/beskontaktnyj-konduktometr-dlya-kontrolya-provodimosti-skvazhinnoj-zhidkosti>.

Поступила в редакцию 04.02.2017

После доработки 28.02.2019

Принята к публикации 30.03.2019