

Экспериментальное исследование проводящих свойств некоторых жидких биологических дисперсных сред в КВЧ-диапазоне

И.В. Малышев, Н.В. Паршина, Е.Н. Осадчий

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону

Аннотация: В работе исследовалось поведение объёмной электрической проводимости (и её составляющих) различных биологических жидких сред с целью определения возможности влияния на процессы жизнедеятельности. В частотном диапазоне 0-50 ГГц исследовались следующие биологические жидкие среды: масло подсолнечное холодного отжима; масло подсолнечное, полученное с применением термообработки; желток и белок свежего куриного яйца; бактерии *Bacillus amyloliquifaciens*; бактерии *Escherichia coli* MG1655 рХен-lux. Выявлено наличие флуктуаций параметров диэлектрической проницаемости, неравномерность частотных характеристик, в диапазоне 35-37 ГГц, на частотных характеристиках тангенсов угла потерь наблюдались «всплески» значений, характерные для резонансного характера этой зависимости.

Ключевые слова: биологическая жидкая среда, диэлектрическая постоянная, комплексная диэлектрическая проницаемость, тангенс угла потерь, проводимость среды, частотная характеристика, флуктуация, частотный диапазон, биофизический параметр.

На сегодняшний день области проведения исследований с биологическими объектами и средами постоянно расширяют свои границы. Так, актуальными являются работы по изучению поведения объёмной электрической проводимости (и её составляющих) с целью определения возможности влияния на процессы жизнедеятельности и для удовлетворения различных потребностей человека. Этим объясняется цель настоящей статьи, заключающейся в расширении диапазона частот (до значений порядка десятков ГГц) исследований поведения электрофизических параметров биосред.

Известно [1], что основными параметрами, характеризующими соотношение запасённого средой энергии внешнего электрического поля к энергии потерь её в этой среде, являются:

- диэлектрическая постоянная $k = \epsilon^*/\epsilon = \epsilon_r' + j\epsilon_r''$, зависящая от комплексной диэлектрической проницаемости $\epsilon^* = \epsilon_r' + j\epsilon_r''$,

- тангенс угла потерь или коэффициент диссипации $\operatorname{tg}\delta = \varepsilon_r'' / \varepsilon_r' = 1/Q$ (Q – добротность объёма среды), находящийся для вектора $\vec{\varepsilon}_r$ на комплексной плоскости $\varepsilon_r'' = F(\varepsilon')$,

- частотно зависящая электрическая проводимость среды σ , определяемая из мнимого слагаемого ε_r'' как $\sigma = \varepsilon_r'' \omega = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon''f = k_\varepsilon \varepsilon''f$, где $k_\varepsilon = 5,34 \cdot 10^{-11}$ Ф/м.

Таким образом, основной зависимостью, определяющей проводимость σ , является $\varepsilon'' = F(f)$, которая была измерена на установке для исследования параметров проводимости Рис.1 (векторного анализатора цепей со спец оснасткой) и, после проведения необходимых расчётов, были получены частотные зависимости проводимости различных биосред, отличающихся своими физико-химическими параметрами: плотностью, вязкостью, концентрацией дисперсных включений, содержанием воды и т.п.

Были исследованы различные биологические жидкие среды:

1. Масло подсолнечное холодного отжима;
2. Масло подсолнечное полученное с применением термообработки;
3. Желток и белок свежего куриного яйца;
4. Свежая свиная кровь;
5. Бактерии 1 вида: *Bacillus amyloliquifaciens* B-1895 - плотность 6.4×10^8 КОЭ/мл.
6. Бактерии 2 вида: *Escherichia coli* MG1655 pXen-lux - 2.45×10^8 КОЭ/мл.

На Рис. 2 видна резкая хаотическая неравномерность частотной характеристики масла, изготовленного методом холодного отжима на фоне этой зависимости для термически обработанного масла, которая по виду и росту с увеличением частоты очень схожа с проводимостью дистиллированной воды. Вероятно, этот диссонанс связан с присутствием в холодно отжатом масле различных частотно зависимых диссипативных

включений, имеющих разные и отличающиеся друг от друга значения диэлектрической проницаемости.

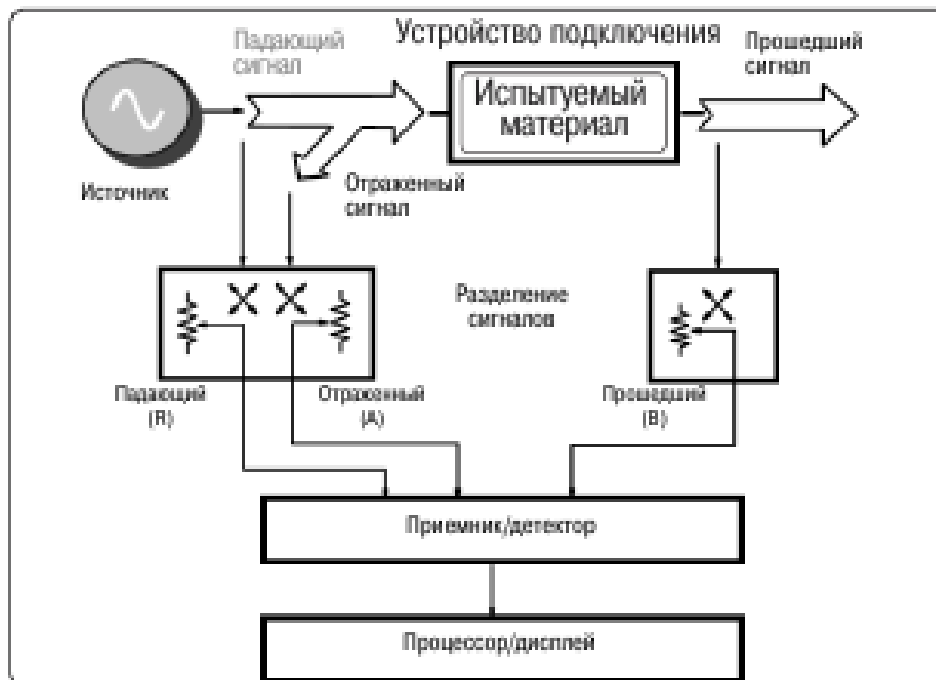


Рис. 1. – Общая блок-схема установки для исследования параметров проводимости в частотном диапазоне 0-50 ГГц.

В начале были измерены и рассчитаны зависимости $\sigma(F)$ и $\text{tg}\delta(F)$ для двух видов подсолнечного масла: холодного отжима (х) и полученного после термообработки (ж) (Рис.2,3).

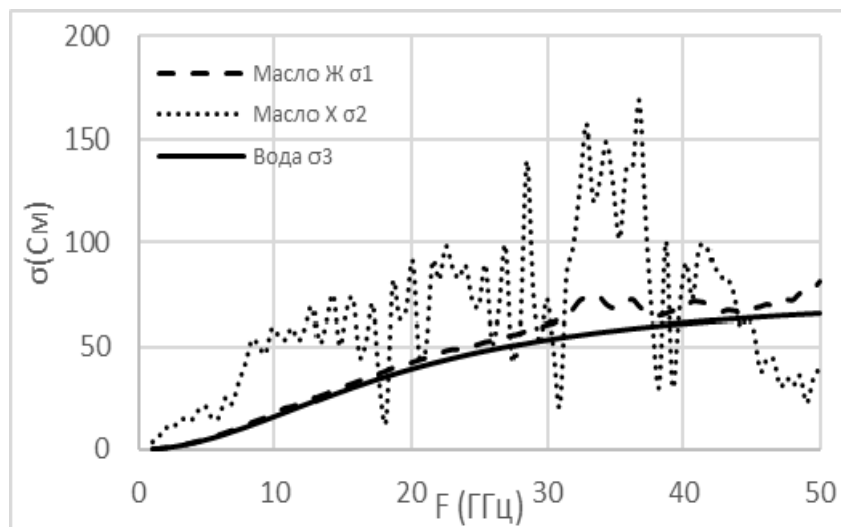
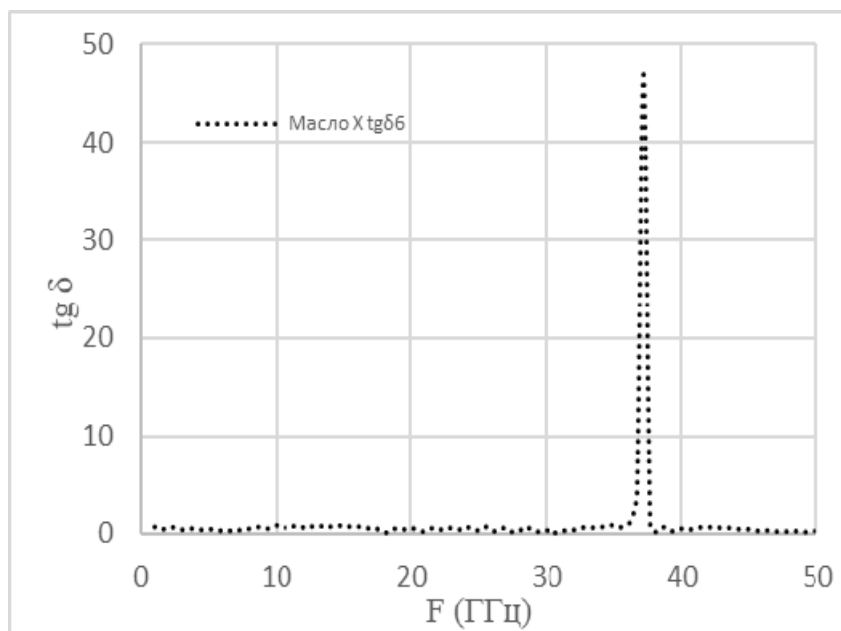
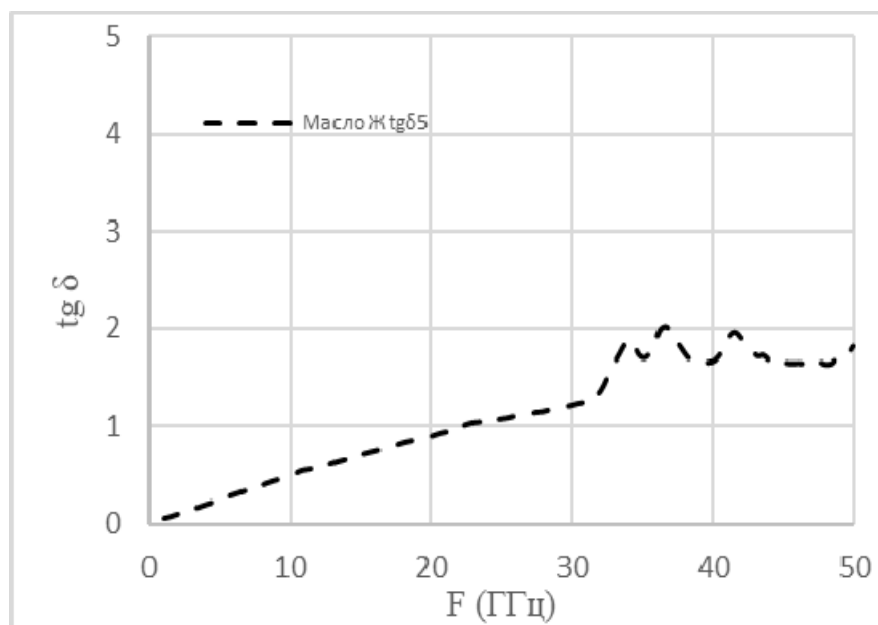


Рис. 2. – Частотные зависимости проводимостей подсолнечного масла, полученного по разным температурным технологиям в сопоставлении с характеристикой воды.



а)



б)

Рис. 3. – Частотные зависимости тангенсов угла потерь двух видов подсолнечных масел: а) холодный отжим, б) с термообработкой.

Также обращают внимание на графиках «всплески» значений тангенсов угла потерь (рис. 3) в диапазоне частот около 35 ГГц, характерные для резонансного характера этой зависимости. Очевидно в этом диапазоне частот влияние на этот параметр могут иметь некие неоднородности молекулярных связей или структурные резонансные эффекты. Однако в остальном частотном диапазоне коэффициенты диссипации рассматриваемых веществ имеют однородно-равномерный характер.

Далее, на основе данных измерений структур белка и желтка куриного яйца, были построены соответствующие зависимости (рис. 4, 5).

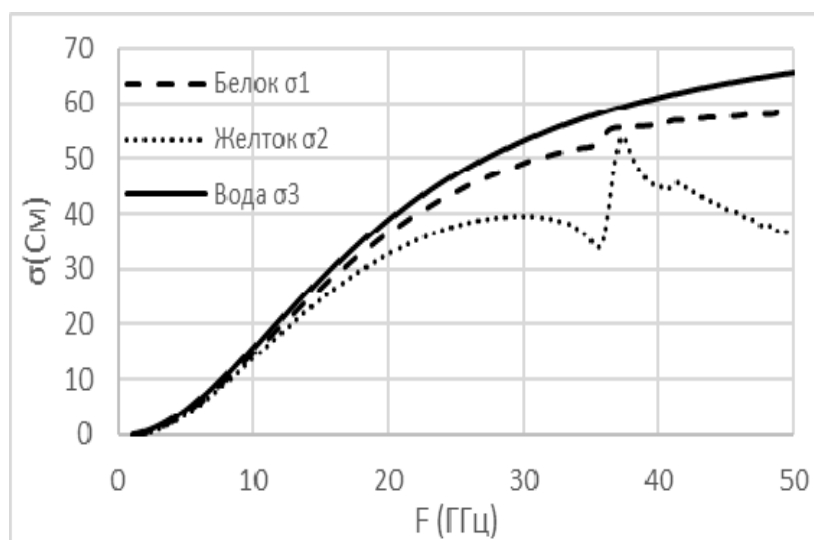


Рис. 4. – Частотные исследование параметров проводимости белка и желтка куриного яйца: σ_1 – проводимость белка, σ_2 – проводимость желтка, σ_3 – проводимость воды.

На этих графиках исследуемые зависимости имеют равномерный рост, почти повторяя ход кривой для дистиллированной воды. Однако в диапазоне 35-37 ГГц наблюдаются небольшие флуктуации, в большей части у желтковых характеристик, что свидетельствует о проявлении неких частотно зависимых эффектов, возможно связанных с плотностью данной структуры [2].

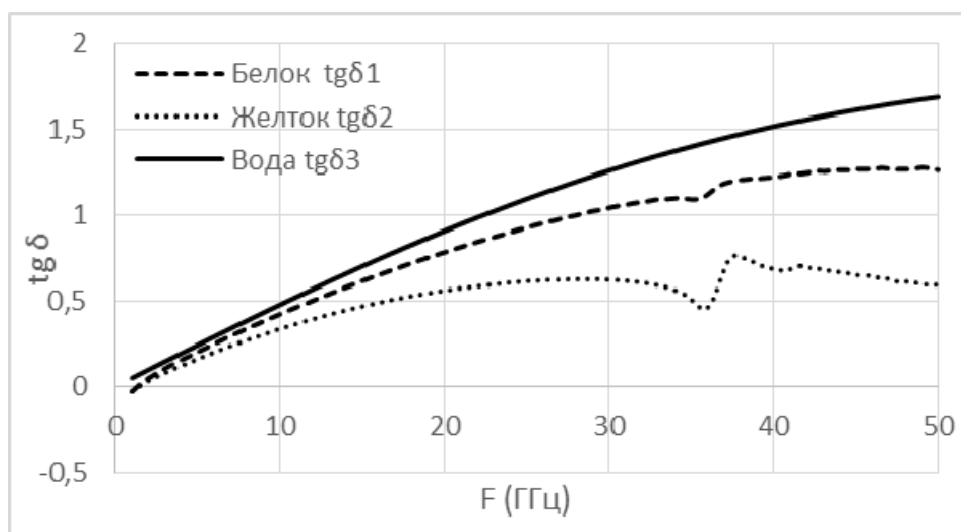


Рис. 5. – Частотные зависимости тангенсов угла потерь белка, желтка куриного яйца и дистиллированной воды.

Третьим видом исследованного вещества была свежая свиная кровь (рис. 6, 7). Полученные графики почти полностью совпали с аналогичными характеристиками воды. По-видимому, в данном частотном диапазоне, диэлектрическая проницаемость компонентов крови гораздо ниже, чем у воды [2 - 4], что объясняет отсутствие возможности регистрации этой разницы проводимостей в графическом исполнении.

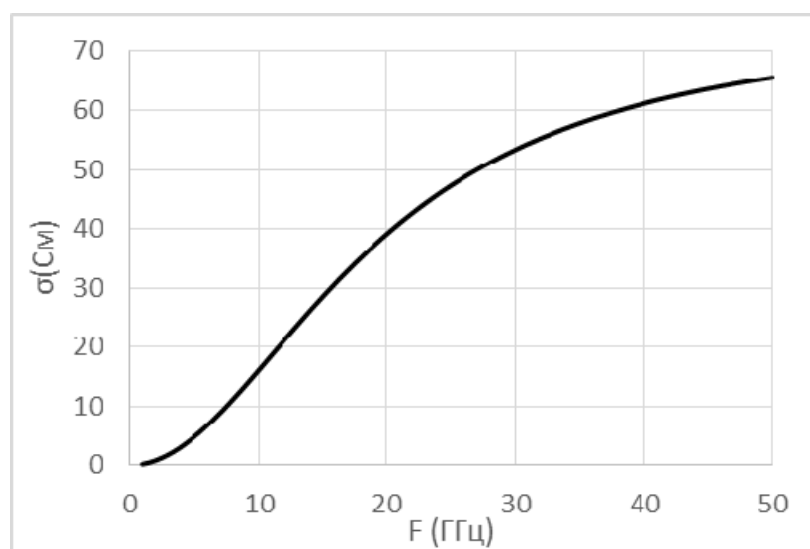


Рис. 6. – Зависимость проводимости крови в диапазоне частот.

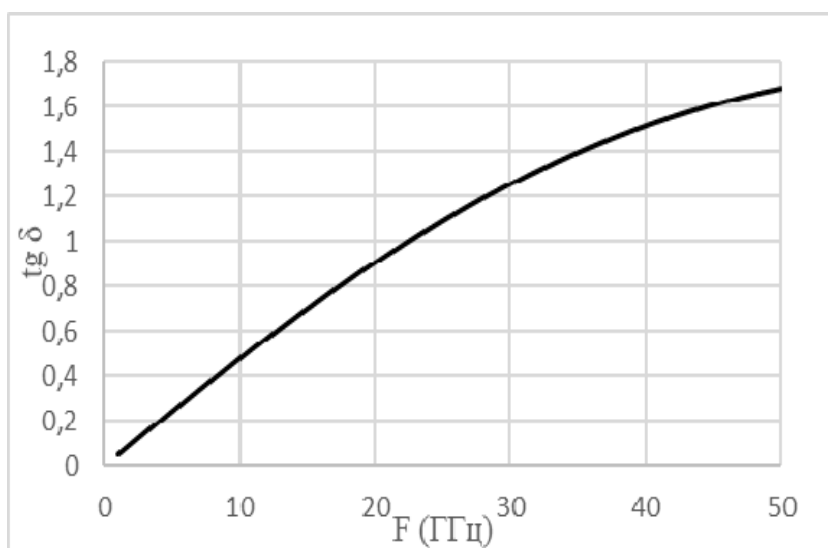
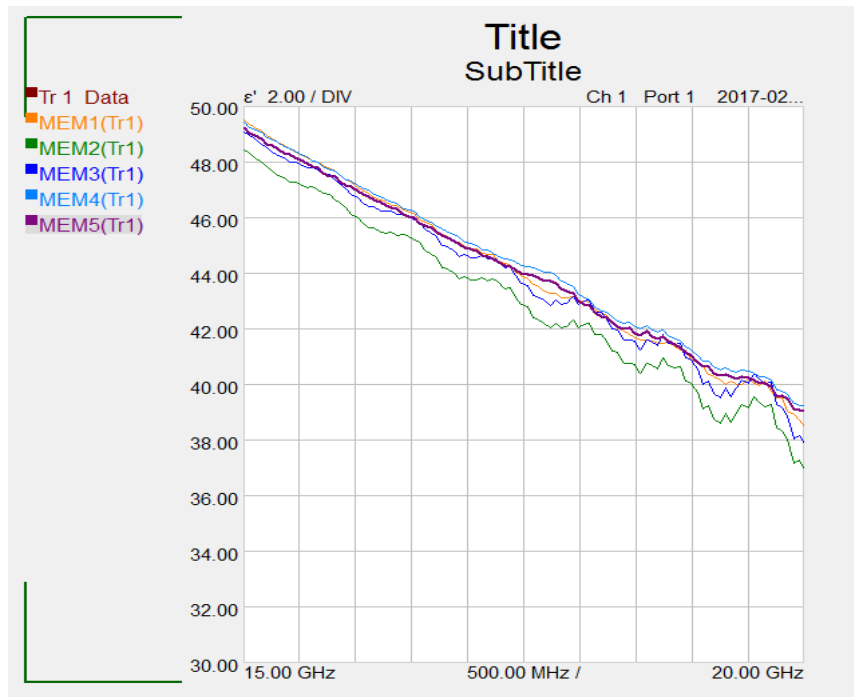


Рис. 7. – Зависимость тангенса угла потерь для крови в диапазоне частот.

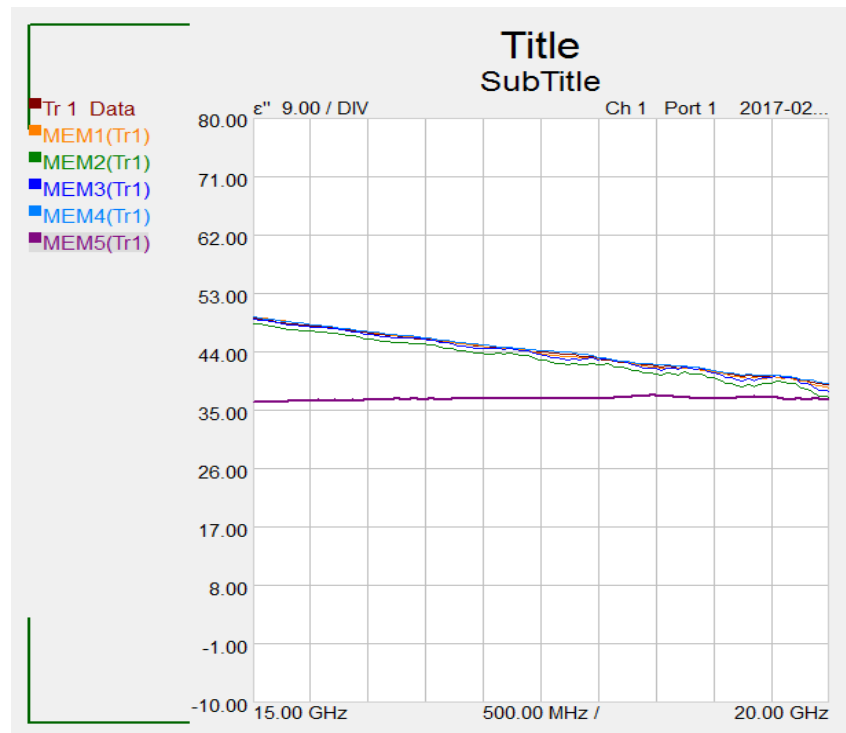
Исследование бактерий показало следующие результаты Рис. 8 - 11 (а – в). Аналогичные исследования были проведены в [5 - 7]. Для удобства восприятия при работе с этими микроорганизмами не проводился непосредственный пересчёт результатов в величину объёмной проводимости, а изображены скрин-шоты частотных зависимостей её составляющих.

При проведении этих экспериментов исходные среды с бактериями были поочерёдно растворены в физ. растворе, который так же был исследован в частотном диапазоне равно, как и дистиллированная вода [8, 9, 10]. Обращает на себя внимание факт наличия флуктуаций в частотных зависимостях компонент ϵ (ϵ' и ϵ'') и их уменьшение с уменьшением концентрации бактерий в исходном растворе.

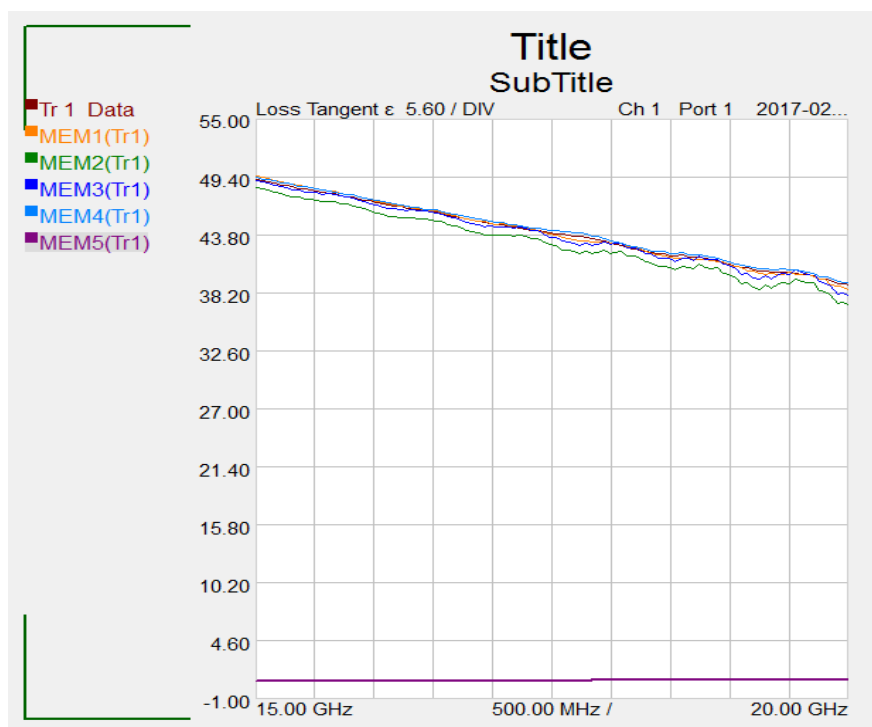
На рис.8 а, б, в показаны скрин-шоты исследования частотно зависимых параметров проводимости бактерий трех видов в диапазоне от 15 до 20 ГГц: а) действительная часть диэлектрической проницаемости, б) мнимая часть диэлектрической проницаемости, в) тангенс угла потерь $\text{tg}\delta$ (MEM 1 – дистиллированная вода, MEM 2 – физ. раствор, MEM 3 – бактерии № 1, MEM 4 – бактерии № 1 (2 группа), MEM 5 – бактерии № 2).



а)



б)

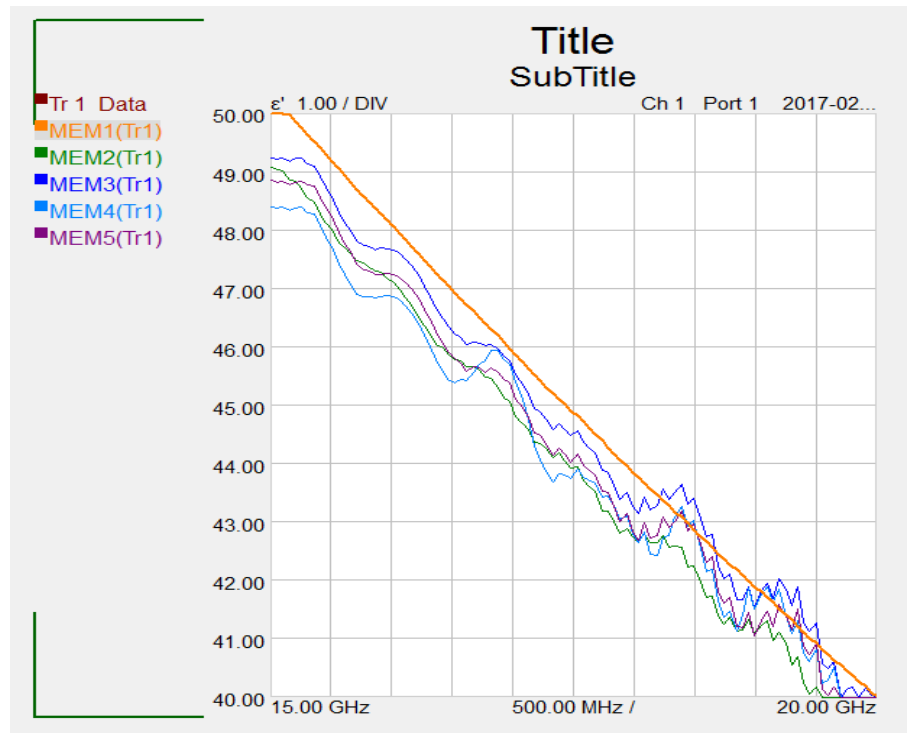


в)

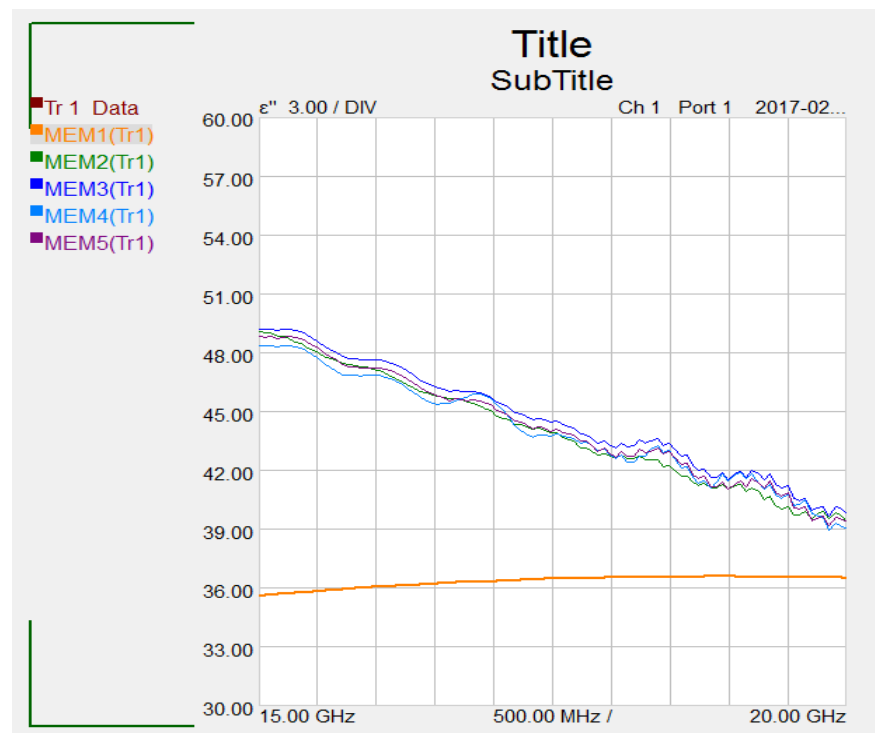
Рис. 8. – Исследование частотно зависимых параметров проводимости бактерий трех видов в диапазоне от 15 до 20 ГГц.

На рис. 9 а, б, в показаны скрин-шоты исследования частотно зависимых параметров проводимости бактерий вида № 1 в диапазоне от 15 до 20 ГГц: а) действительная часть диэлектрической проницаемости, б) мнимая часть диэлектрической проницаемости, в) тангенс угла потерь $\text{tg}\delta$ (MEM 1 – дистиллированная вода, MEM 2 – физ. раствор, MEM 3 – бактерии № 1, MEM 4 – бактерии № 1 и вода 1:1, MEM 5 – бактерии № 1 и вода 1:5).

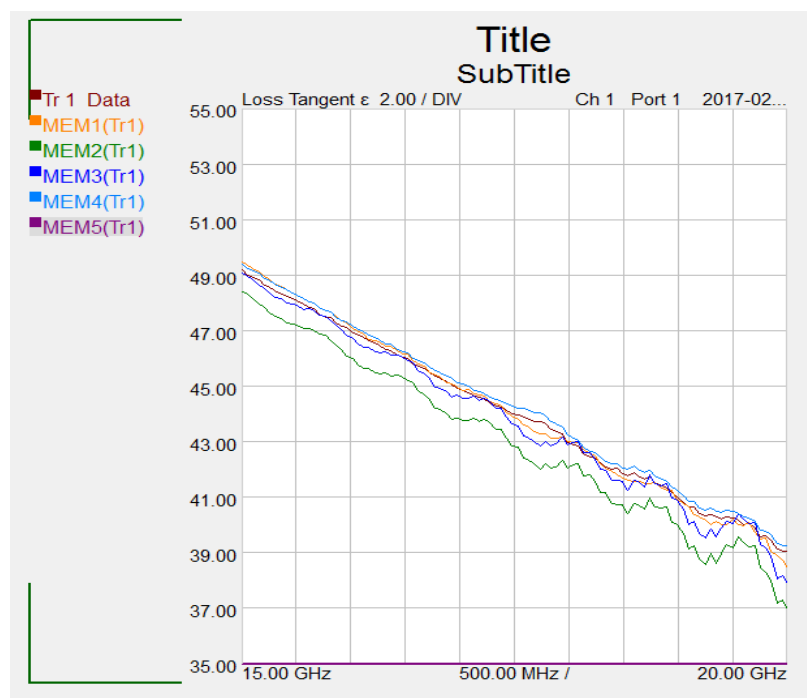
На рис. 10 а, б, в показаны скрин-шоты исследования частотно зависимых параметров проводимости бактерий вида № 2 в диапазоне от 15 до 20 ГГц: а) действительная часть диэлектрической проницаемости, б) мнимая часть диэлектрической проницаемости, в) тангенс угла потерь $\text{tg}\delta$ (MEM 1 – дистиллированная вода, MEM 2 – физ. раствор, MEM 3 – бактерии № 2, MEM 4 – бактерии № 2 и вода 1:1, MEM 5 – бактерии № 2 и вода 1:5)



a)

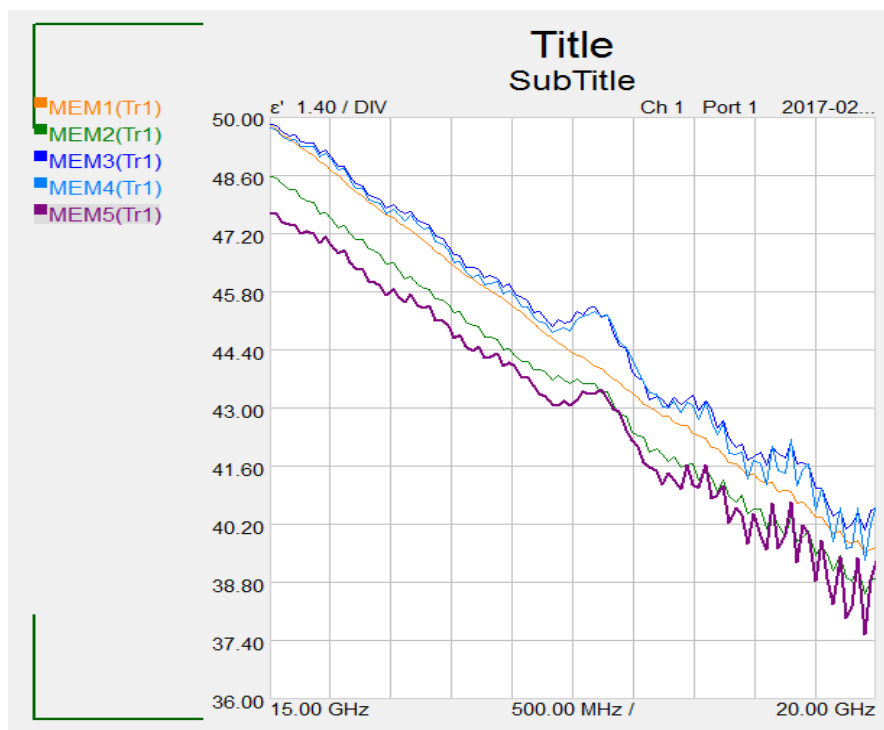


б)

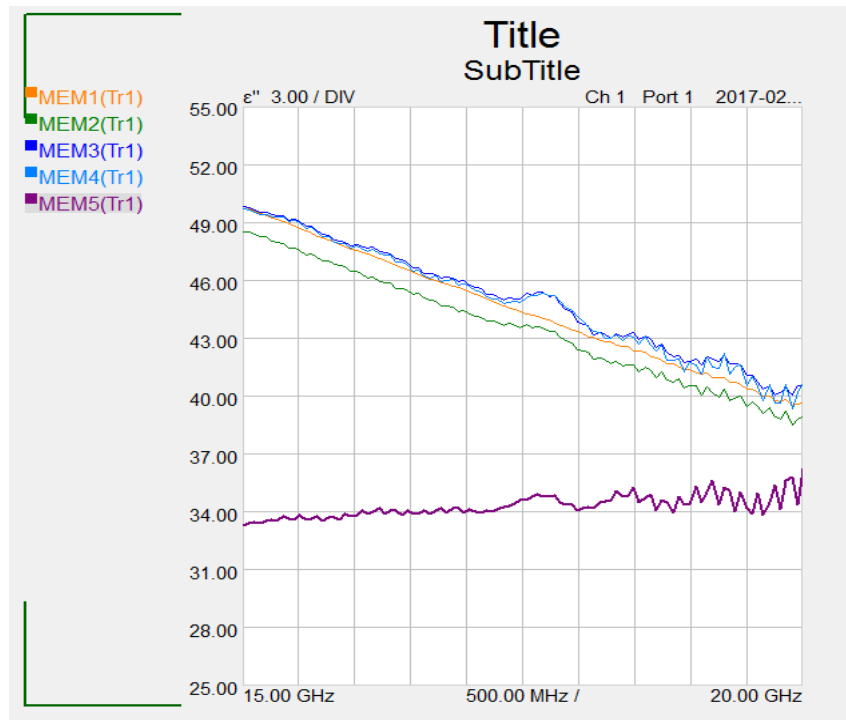


в)

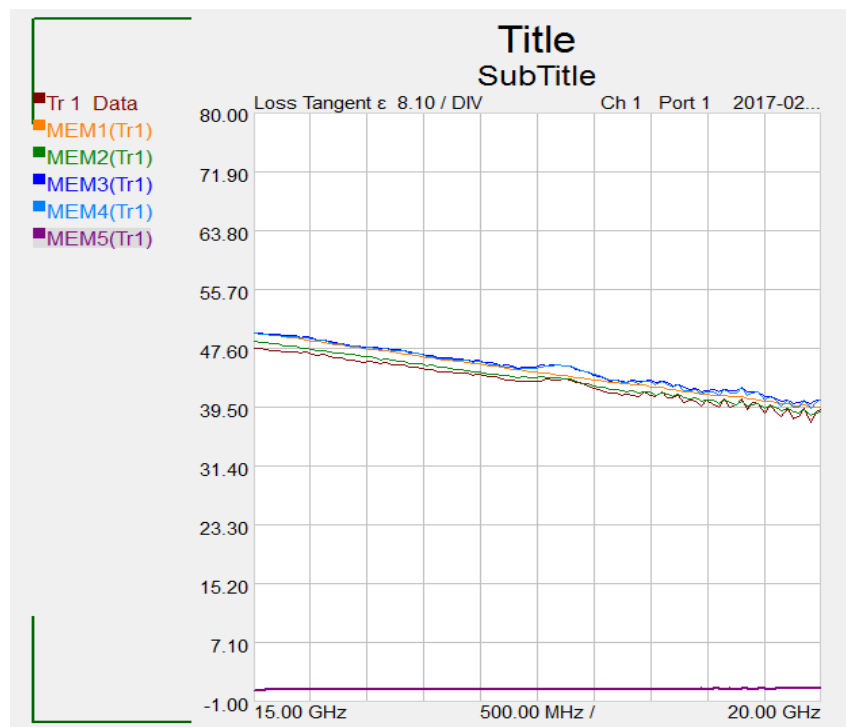
Рис. 9. – Исследование частотно зависимых параметров проводимости бактерий вида № 1 в диапазоне от 15 до 20 ГГц



а)



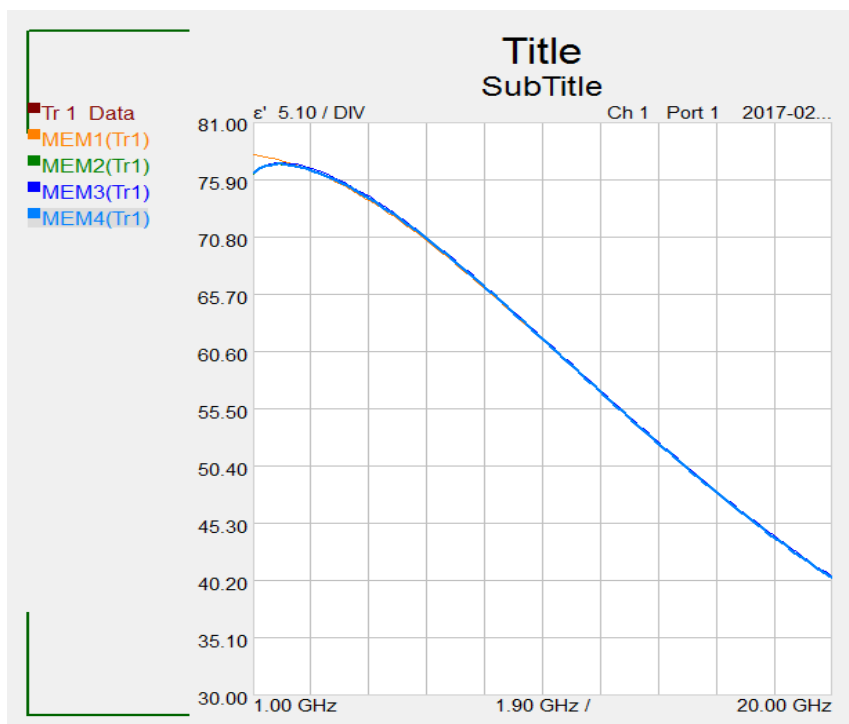
б)



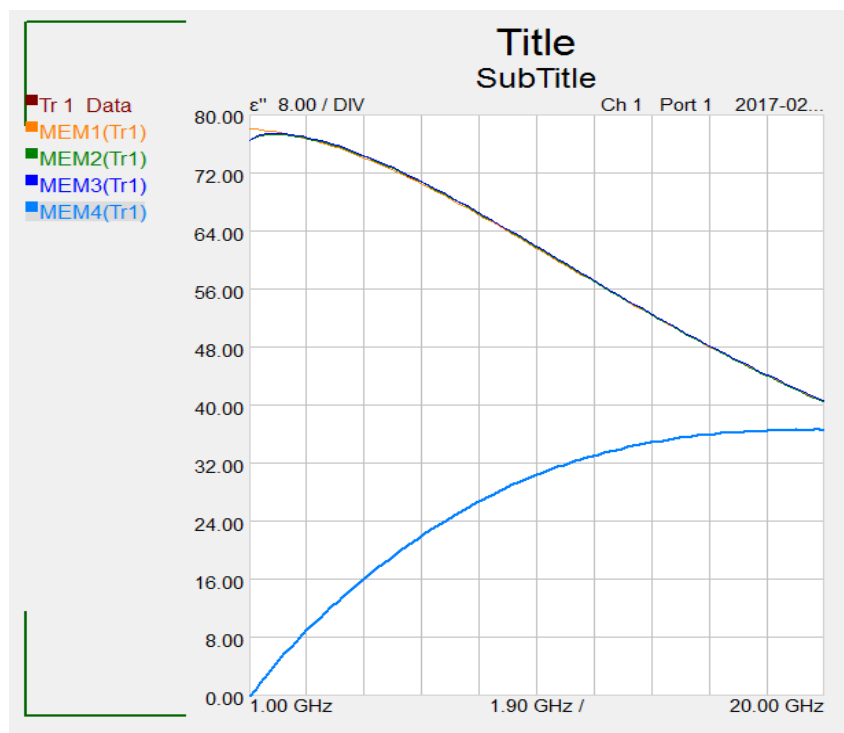
в)

Рис. 10. – Исследование частотно зависимых параметров проводимости бактерий вида № 2 в диапазоне от 15 до 20 ГГц.

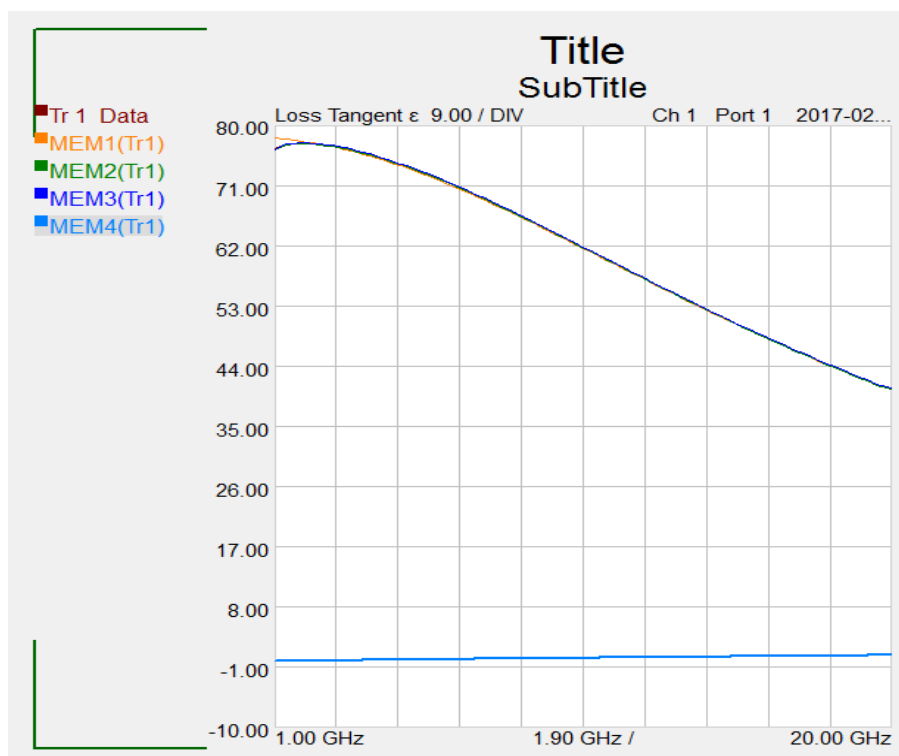
При этом после того как, исходные бактерии после термообработки погибли, были проведены исследования этих сред, которые для всех двух видов имеет почти одинаковый вид (рис. 11 а, б, в).



a)



б)



в)

Рис. 11. – Исследование частотно зависимых параметров проводимости колоний погибших бактерий в диапазоне от 1 до 20 ГГц: а) действительная часть диэлектрической проницаемости, б) мнимая часть диэлектрической проницаемости, в) тангенс угла потерь $\text{tg}\delta$ (MEM 1 – дистиллированная вода, MEM 2 – бактерии № 1, MEM 3 – бактерии № 1 (2 группа), MEM 4 – бактерии № 2)

Отсюда следует вывод, что после гибели колоний бактерий, они по своим биофизическим параметрам превращаются в обычный водный раствор.

Полученные результаты можно обобщить в следующих положениях:

1. Выявлено, что наличие флуктуаций параметров диэлектрической проницаемости (особенно её активной компоненты ϵ'), свидетельствует о жизненной активности колоний бактерий и может являться условием определения и регистрации процессов их жизнедеятельности.

2. Обнаружена неравномерность частотной характеристики масла, изготовленного методом холодного отжима. Эта характеристика имеет сильный

разброс значений во всём диапазоне частот, в отличие от аналогичной зависимости для термически обработанного масла, которая по виду и росту с увеличением частоты очень схожа с графиком для проводимости дистиллированной воды.

3. На частотных характеристиках тангенсов угла потерь, для указанных двух типов масла, в диапазоне частот около 35 ГГц, наблюдались «всплески» значений, характерные для резонансного характера этой зависимости.

4. В диапазоне 35-37 ГГц частотная характеристика параметров σ и $\text{tg}\delta$ для желтка куриного яйца имеет сильно выраженный скачок, который проявляется и на белковых характеристиках. При этом последние близки по своей форме и значениям к зависимостям для дистиллированной воды.

Литература

1. Долгов Е.С., Малышев И.В., Покудина И.О., Рассказов А.Е., Усатов А.В., Цыганков А.Г. Исследование порогов чувствительности микроорганизмов к ЭМИ миллиметрового диапазона // Технологии живых систем. – 2013. – № 1. – С. 58-61.

2. Малышев И.В., Паршина Н.В. Исследование электропроводящих объёмных свойств водосодержащих биосред в СВЧ и КВЧ диапазонах // Материалы 28-й Международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» 9-15 сентября 2018 г. Севастополь, Крым, Россия. - С.1471-1479.

3. Малышев И.В., Паршина Н.В. Измерение компонент проводимости биологических сред в микроволновом диапазоне // Наука и образование на рубеже тысячелетий: сборник научно-исследовательских работ. – Кисловодск, 2018. – С.24-27.

4. Крыницкий П.П. Микроволновые технологии интенсификации пищевого производства. Сообщение 1. Технология регулирования активности хлебопекарных дрожжей низкоинтенсивным электромагнитным



полем мм-диапазона // Инженерный вестник Дона, 2018, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5336/.

5. Черепнёв И.А. Биологические эффекты при воздействии электромагнитных волн. //Системы управления, навигации и связи. 2007,- вып.3-с.118-124.

6. Старовойтов С.В., Халил А.С. Влияние внешних факторов на скорость биохимических реакций микроводорослей // Инженерный вестник Дона, 2017, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4224

7. Будников Д.А. Определение коэффициента диэлектрических потерь псевдооживленного слоя зерна // Инженерный вестник Дона, 2017, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4356/.

8. Minasbekyan L.A., Nerkararyan A.V., Darbinyan M.R. Impact of MM-Waves on the Different Cellular Levels of Wheat Seedlings // Armenian Journal of Physics, 2016, vol. 9, issue 1, pp. 89-94.

9. Nelson S.O. Dielectric properties of agricultural products and some applications // Res. Agr. Eng., №54, 2008(2): pp.104-112.

10. Бецкий О.В., Лебедева Н.Н. Современные представления о механизмах воздействия низкоинтенсивных волн на биологические объекты // Миллиметровые волны в биологии и медицине. 2001. № 3. С. 5-19.

References

1. Dolgov E.S., Malyshev I.V., Pokudina I.O., Rasskazov A.E., Usatov A.V., Cygankov A.G. Tekhnologii zhivyh sistem. 2013. № 1. pp. 58-61.
2. Malyshev I.V., Parshina N.V. Materialy 28-j Mezhdunarodnoj konferencii «SVCH-tekhnika i telekommunikacionnye tekhnologii» 9-15 sentyabrya 2018 g. Sevastopol', Krym, Rossiya pp.1471-1479.
3. Malyshev I.V., Parshina N.V. Nauka i obrazovanie na rubezhe tysyacheletij: sbornik nauchno-issledovatel'skih rabot. Kislovodsk, 2018. pp. 24-27.



4. Krynickij P.P. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5336/.

5. Cherepnev I.A. Sistemy upravleniya, navigatsii i svyazi. 2007, vyp. 3 pp.118-124.

6. Starovoytov S.V., Khalil A.S. Inzhenernyy vestnik Dona, 2017, № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2017/4224.

7. Budnikov D.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, № 3. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2017/4356/.

8. Minasbekyan L.A., Nerkararyan A.V., Darbinyan M.R. Armenian Journal of Physics, 2016, vol. 9, issue 1, pp. 89-94.

9. Nelson S.O. Dielectric properties of agricultural products and some applications Res. Agr. Eng., №54, 2008(2). pp. 104-112.

10. Beckij O.V., Lebedeva N.N. Millimetrovye volny v biologii i medicine. 2001. № 3. pp. 5-19.