

ВОЛНОВОДНО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД И УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ И ОБЛУЧЕНИЯ БИОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Полников И.Г., Казаринов К.Д.

ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН

пл. Введенского, 1, г. Фрязино Московской обл., 141190, РФ; e-mail: kazarinovkonstantin@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.07.2023. DOI: 10.29039/rusjbpс.2023.0608

Аннотация. Предложена методика изучения поглощения микроволнового излучения биологических объектов в тонком диэлектрическом капилляре. Представлены результаты экспериментальных исследований и предложен механизм обнаруженных эффектов биологического действия микроволнового излучения. Было установлено, что при определенном соотношении между размерами волновода, диаметром и толщиной стенок капилляра, диэлектрическими параметрами биологического материала, заполняющего капилляр и длиной волны микроволнового излучения в тракте возможно значительное увеличение поглощенной мощности в довольно узкой полосе частот (волноводно - диэлектрический резонанс). Это явление, необходимо учитывать в биотехнологических экспериментах по облучению суспензий. В результате выполненной работы по изучению поглощения микроволнового излучения углеводородными смесями и моделями биологических объектов в водных средах созданы новые конструкции измерительных устройств и разработана методика акваметрии углеводородов. Созданная продукция защищена авторами данной работы патентом на изобретение.

Ключевые слова: волноводно-диэлектрический резонанс, микроволновое излучение, КВЧ спектроскопия, волновод прямоугольного сечения, диэлектрический капилляр, липосомы.

В данной работе показан пример использования современных физических методов микроволновой электроники для разработки новых датчиков определения диэлектрических характеристик биологических сред. Поглощение микроволнового излучения в водных растворах связано с механизмом ориентационной поляризации молекул. Электрическое поле вызывает поворот молекул воды таким образом, чтобы их дипольные моменты ориентировались по направлению этого поля. Этому препятствует тепловое движение и взаимодействие соседних молекул. В результате появляется сдвиг фазы поляризации среды относительно поля, что и определяет диэлектрические потери [1]. В микроволновом диапазоне диэлектрические характеристики воды (\mathcal{U} -дисперсия) удовлетворительно описывают уравнения Дебая [2]. Экспериментально установленные значения коэффициента поглощения электромагнитного излучения для воды в области КВЧ составляют 20-30 дБ/мм. Диэлектрические свойства растворов солей физиологических концентраций в КВЧ диапазоне длин волн тождественны свойствам воды с точностью до небольшой поправки на величину ионной проводимости. Только при концентрации растворенного вещества выше 0,5 М наблюдается изменение коэффициента поглощения раствора по сравнению с чистой водой. На измерении этой разницы основано использование КВЧ спектроскопии для исследования гидратации различных веществ, а также межмолекулярных взаимодействий [3]. В таких исследованиях обычно используются устройства, основанные на принципе традиционных резонансных методов, которые состоят в сравнении резонансной частоты и добротности резонатора, измеренных сначала без исследуемого образца, а затем с образцом, помещенным в полость резонатора [4]. Основным ограничением, которым приходится руководствоваться при выборе конструкции и размеров резонатора, а также способа введения диэлектрического образца в резонатор, является условие квазистационарности. При нарушении условий квазистационарности размеры системы могут оказаться сравнимыми с длиной волны электромагнитного излучения и учет "полезного" сигнала на фоне "паразитных" параметров может оказаться невозможным.

Для решения поставленной задачи обычно пользуются методом малых возмущений [5], который дает возможность установить связь между мощностью, поглощаемой внутри полости резонатора и энергией, поступающей в эту полость в единицу времени. В отличие от рассмотренных выше и широко применяемых в измерительной технике полых резонаторов с поглощающим образцом, для которых измерения основаны на эффекте малого возмущения поля в резонаторе образцом, в данном случае исходная измерительная система с пустым капилляром не обладает резонансными свойствами, а резонанс возникает только в присутствии исследуемого образца. Эта особенность рассматриваемого волноводного резонатора и определяет высокую чувствительность параметров регистрируемого резонанса к диэлектрическим свойствам образца.

Предложенная конструкция резонансной измерительной камеры [6] отличалась возможностью перестройки и подбора оптимальной связи резонатора с волноводным трактом. Широкие стенки волновода раздвигают два цилиндрических поршня, через осевые отверстия которых проходит капиллярная трубка, изготовленная из радиопрозрачного диэлектрика. Поршни регулируются по высоте в резонаторной камере с помощью винтового механизма перемещения. Настройка резонанса на максимальную добротность для измеряемой жидкости осуществляется последовательно верхним и нижним поршнем, которые отличаются по диаметру. Чувствительность настроенного таким образом резонатора к изменению диэлектрических параметров жидкости достаточно высока, что позволяет его использовать в простых микроволновых схемах регистрации прошедшего

сигнала. На первом этапе нашей работы мы проводили измерения на водно-спиртовых растворах различных концентраций. Измерение диэлектрических характеристик жидкостей с помощью данного устройства выполняется следующим образом. В радиопрозрачный капилляр, пронизывающий широкую стенку металлического прямоугольного волновода, наливается исследуемая жидкость. Затем с помощью подвижных поршней добиваются максимального значения добротности резонаторной измерительной системы, что регистрируется по величине амплитуды резонансной кривой на экране. Разность амплитуд резонансной кривой при последовательных измерениях показывает изменение концентрации вещества в бинарной или же многокомпонентной исследуемой жидкости, связанной с изменением величины диэлектрической проницаемости. Более высокая чувствительность измерений наблюдается при измерениях уровня сигнала на склоне резонансной кривой. В этом случае оценивается смещение пика резонансной кривой по шкале частот, что повышает чувствительность измеряемого параметра жидкости, связанного также с изменением величины диэлектрической проницаемости. Доработка измерительного устройства коснулась конструкции дроссельных поршней, и их привода, введения пружин для фиксации положения поршней, а также предусматривалась возможность калибровки положения дроссельных поршней в резонаторе.

В процессе нашей экспериментальной работы нам пришлось столкнуться с неожиданным обстоятельством. Оно заключалось в том, что даже при минимальном уровне мощности генератора СВЧ сигнала 0,1 мВт, обеспечивающего устойчивую работу устройства, мы наблюдали существенное изменение амплитуды резонанса, в зависимости от продолжительности облучения, свидетельствующее о микроволновом нагреве исследуемого экспериментального образца водного раствора. Изменение амплитуды резонанса при микроволновом облучении образца в течение нескольких минут достигало в некоторых случаях 9 дБ, что свидетельствовало о недопустимой погрешности измерений.

Такая ситуация указывает на необходимость надежного термостатирования измерительной резонаторной кюветы в процессе измерений. Обеспечить условия термостатирования в данных условиях довольно сложно, из-за того, что СВЧ облучаемая часть диэлектрической трубки, в которой находится исследуемый раствор, расположена внутри полого волновода. В случае «проточной» измерительной кюветы, такого нагрева не наблюдается, так как движущаяся жидкость в диэлектрической трубке не успевает нагреться в зоне СВЧ облучения. Однако, для дорогостоящих биологических препаратов такой «проточный» режим работы измерительной ячейки неприемлем из-за непомерно высоких материальных затрат на проведение эксперимента.

Удачное решение данной проблемы мы подцепнули из опыта специалистов нефтяной компании «British Petroleum Co LTD», которые предложили определять диэлектрические характеристики углеводородных смесей с водой следующим способом [7]. Учитывая высокий уровень поглощения водой СВЧ излучения, авторы данной работы предлагают в анализируемой водной многокомпонентной смеси измерять повышение температуры контролируемого объекта при его СВЧ облучении, которое оказывается пропорциональным концентрации воды в объекте (например, в сырой нефти).

Температурная зависимость диэлектрических свойств воды и водных смесей хорошо изучена в диапазоне от низких частот до ММ волн [8]. Следует отметить недостаток метода, связанный с необходимостью экранировки термодатчика при СВЧ облучении, а также влияние самих термодатчиков на температуру объекта в капиллярной трубке, что не может не сказаться на точности измерений. Мы же решили заменить в данном способе сложную процедуру измерения температуры анализируемого образца на регистрацию изменения его коэффициента поглощения СВЧ излучения при нагревании за фиксированный промежуток времени [9]. Предложенный таким образом новый способ измерения диэлектрических характеристик водных растворов, хотя и несколько уступает по чувствительности прежнему способу измерений с помощью волноводной резонаторной камеры, но зато свободен от необходимости термостатировать измерительную ячейку, что не всегда представляется возможным. По сравнению же со способом, предложенным «British Petroleum Co LTD», наш подход отличается простотой измерительной установки, процедуры измерений и отсутствием влияния датчиков измерителя температуры на контролируемый объект. В связи с тем, что расчетные количественные соотношения между параметрами резонанса и диэлектрическими параметрами образца установлены с большим приближением, то для определения последних удобно пользоваться методом сравнения, калибруя измерительную систему по эталонным растворам.

В наших экспериментах по изучению первичных механизмов биологического действия микроволнового излучения мы исследовали простые биологические системы (на клеточном, мембранном и молекулярном уровнях) [10]. При подготовке таких экспериментов с суспензиями клеток или липосом (моделями биологических клеточных мембран), а также растворами приходилось принимать сложное решение о способе микроволнового облучения биообъектов. Высокое содержание воды в наших объектах, сильно поглощающей микроволновое излучение, приводило к тому, что основная мощность излучения поглощалась в толщине образца, не превосходящей 0,3 мм. Это обстоятельство диктовало необходимость использовать в наших опытах или очень тонкие кюветы, или же обычные, но снабженные механической мешалкой. Понятно, что в последнем случае снимался вопрос о неравномерности микроволнового облучения объекта, появлялась возможность надежного термостатирования и контроля состояния объекта непосредственно в процессе облучения, например, контролировать кислотность среды (рН), температуру, светорассеяние и т.д. Следует заметить, однако, что эффективность облучения в такой ситуации оказывается достаточно невысокой. По этой причине приходилось искать такой способ микроволнового облучения, при котором весь объект находился бы в поле излучения и в то же время можно было бы контролировать его состояние.

Известно успешное использование прямоугольной волноводной секции с пронизывающим ее широкую стенку диэлектрическим капилляром для исследований растворов, суспензий и гидродинамических свойств воды при поглощении микроволнового излучения [11,12]. В работе [13] выполнен расчет параметров распространения H_{10} волны с диэлектрической неоднородностью, которая представляла собой волноводно-капиллярный резонатор в виде отрезка прямоугольного волновода с заполненным водой капилляром квадратного поперечного сечения, пропущенным через центр волновода перпендикулярно его широким стенкам. Задача была решена методом создания зеркальных изображений капилляра и последующего рассмотрения дифракции бриллюэновских компонент H_{10} волны в волноводе на периодической «решетке капилляров». Размеры прямоугольного капилляра выбирались в данной работе в соответствии с размерами капилляра круглого сечения так, чтобы площадь круглого и квадратного сечений капилляров, как по внешнему периметру, так и по внутреннему, были равны [13]. Выполняя нашу задачу исследований, мы пришли к необходимости воспользоваться тонким полиэтиленовым капилляром, заполненным суспензией липосом. Следует отметить, что подобный способ облучения в капилляре, пропущенном сквозь широкую стенку волновода, обеспечивает хорошее согласование биологического объекта с волноводным измерительным трактом. Однако, при определенном соотношении между размерами волновода, диаметром и толщиной стенок капилляра, диэлектрическими параметрами биологического материала, заполняющего капилляр и длиной волны микроволнового излучения в тракте возможно значительное увеличение поглощенной мощности в довольно узкой полосе частот (волноводно - диэлектрический резонанс). Это явление, приходилось учитывать в наших биотехнологических экспериментах по облучению суспензий.

В экспериментах с липосомами из ДПЛ (дипальмитоиллецитин) наблюдался отчетливый излом кривой поглощения при мощности 40-50 мВт. Пропускание микроволнового сигнала измерялось в двух точках кинетической кривой: P_0 – исходной, т.е. непосредственно после включения мощности в волноводном тракте и $P_{ст}$ – стационарной, после завершения переходного процесса и установления стационарного значения проходящего КВЧ сигнала через диэлектрический капилляр в волноводном тракте. В случае липосом из яичного лецитина, которые претерпевают фазовый структурный переход при более высоких температурах, резких изменений зависимости поглощения от мощности сигнала мы не наблюдали. Эти эксперименты были выполнены на длине волны 8,5 мм.

Можно предположить, что после включения микроволновой мощности суспензия липосом нагревается, а излом на зависимости поглощения сигнала от мощности в случае капилляров с ДПЛ связан с термотропным структурным переходом гель-жидкий кристалл, т.е. с плавлением мембран при температуре фазового перехода 42 °С. Контрольные опыты по обдуванию капилляра горячим воздухом (50-60 °С) подтвердили, что поглощение микроволнового сигнала в нашей измерительной ячейке растет при повышении температуры объекта независимо от способа его нагревания.

Ранее нами были получены аналогичные результаты в экспериментах с суспензиями липидов в плоских кюветах [14]. Гистерезис, обнаруживаемый по светорассеянию при переходе гель-жидкий кристалл и обратно, оказывается при КВЧ нагреве примерно в два раза более узким, чем при обычном ИК нагреве. Полученный в работе результат легко объяснялся исходя из предположения, что теплообмен между мембранами липосом и водой при плавлении происходит достаточно медленно. В случае ИК нагрева энергия поглощалась в основном стенкой кюветы, а липосомы нагревались в результате теплопередачи из внешней водной среды. Средняя температура липосом должна была при этом отставать от температуры в кювете. При микроволновом облучении липосомы, попадая в область поглощения излучения, нагреваются изнутри также, как водная среда в этой области, и в этом случае передача тепла для плавления мембран идет эффективнее.

Экспериментальная проверка, проведенная в указанной выше работе, подтвердила это объяснение. В кювете быстро смешивались две порции липосом: одна с температурой, выше температуры плавления, т.е. в жидкокристаллическом состоянии, другая – охлажденная до такой температуры, чтобы смесь двух порций была чуть ниже температуры фазового перехода. Оказалось, что температура в кювете устанавливается за 2-3 сек, а переход гель-жидкий кристалл, судя по светорассеянию, происходил в течение 6-8 сек. Этот результат, по-видимому, означает, что теплопередача из раствора в мембраны ограничивает скорость структурного перехода в липосомах.

Известно, что кооперативные перестройки легче всего проявляются при изменении температуры среды. Как оказалось, это свойство биологических мембран в физиологическом интервале температур – универсальная способность поддерживать жизнедеятельность клеток. Пороговый характер ответа на физический стимул представляется целесообразным для живой системы, так как ее помехоустойчивость по отношению к внешним сигналам возрастает и создаются условия для адекватного ответа при незначительном изменении интенсивности физического воздействия, превышающего некоторый порог [15].

Температура окружающей среды, при которой происходит микроволновое облучение биологического объекта, может быть близка к температуре фазового перехода углеводородных цепей фосфолипидов, из которых состоят биологические мембраны. Тогда, повышение температуры даже на 0,2 °С в процессе облучения может привести к новому фазовому состоянию фрагмента мембраны, например, белок-липидного комплекса, и отклик системы обнаруживает новое качество с явно выраженным пороговым эффектом. Таким образом, при воздействии микроволновым излучением на биологические структуры, находящиеся вблизи точки фазового перехода, достигается эффект дистанционного управления функциональной активности клетки. Следует также отметить, что незначительное изменение температуры биообъекта, при котором наблюдается фазовый переход в

рассматриваемом случае, не всегда может быть надежно зафиксировано измерительным прибором и эффект микроволнового излучения будет ложно истолкован, как «нетепловой».

Итак, полученные экспериментальные результаты позволяют судить о фазовых переходах в биологических мембранах при воздействии микроволнового облучения как о возможном механизме восприимчивости биообъектов к данному виду излучения. Кроме того, была обнаружена возможность регистрации структурных фазовых переходов в липосомах – моделях биологических мембран по изменению величины поглощения микроволнового сигнала в капиллярной диэлектрической трубке, что должно представлять значительный интерес для исследователей механизмов биологического действия микроволнового излучения, а также специалистов по микроволновой спектроскопии.

В процессе экспериментальной работы проведена конструктивная доработка резонансной измерительной камеры, которая позволяет обеспечить максимальную добротность резонатора для каждой концентрации вещества в исследуемой жидкости и способствует повышению чувствительности измерений диэлектрических параметров контролируемой жидкости. Кроме того, (в случае безпоршневого устройства) упрощается конструкция узла за счет исключения настроечных поршней с дифференциальными винтами, фторопластовыми шайбами, зубчатыми колесами и спиральными пружинами, уменьшаются габариты устройства и его вес в несколько раз и, следовательно, должна снижаться себестоимость измерительного устройства. Предложенная методика определения диэлектрических характеристик водных растворов и суспензий, основанная на температурной зависимости коэффициента поглощения водных растворов с помощью одной из модификаций волноводно-диэлектрического резонансного метода, позволяет расширить возможности данного метода для некоторых его применений.

Работа выполнена в рамках Госзадания № 075-01110-23-01 ИПЭ им. В.А. Котельникова РАН на 2023 год.

Список литературы / References:

1. Pathig R. *Dielectric and electronic properties of biological materials*. Chichester: John Wiley & Sons, 1979, 279 p.
2. Аксенов С.И. *Вода и ее роль в регуляции биологических процессов*. М.: Наука, 1990, 117 с. [Aksenov S.I. *Water and its role in the regulation of biological processes*. М.: Nauka, 1990, 117 p. (In Russ.)].
3. Девятков Н.Д. Взаимодействие миллиметрового излучения с биологически активными соединениями и полярными жидкостями. *Радиотехника и электроника*, 1978, т. 23, № 9, с. 1882-1890 [Devyatkov N.D. Interaction of millimeter radiation with biologically active compounds and polar liquids. *Radio engineering and electronics*, 1978, vol. 23, no. 9, pp. 1882-1890 (In Russ.)].
4. Брандт А.А. Исследования диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963, 403 с. [Brandt A.A. *Studies of dielectrics at ultrahigh frequencies*. Moscow: Fizmatgiz, 1963, 403 p. (In Russ.)].
5. Гвоздочев С.Д. *Теория электронных приборов сверхвысоких частот*. М.: Гостехиздат, 1956, 527 с. [Gvozdochev S.D. *Theory of electronic devices of microwave frequencies*. Moscow: Gostekhizdat, 1956, 527 p. (In Russ.)].
6. Казаринов К.Д., Полников И.Г. *Перестраиваемая волноводно-диэлектрическая камера для контроля жидкостей*. Патент на изобретение № 2614047. Дата гос. регистрации в Гос. Реестре изобретений РФ 22 марта 2017, бюл. № 9 [Kazarinov K.D., Polnikov I.G. *Tunable waveguide-dielectric chamber for the control of liquids*. Patent for invention no. 2614047. State date. registration in the State Register of Inventions of the Russian Federation March 22, 2017, bull. no. 9 (In Russ.)].
7. BP (British Petroleum). Measurement of water content of liquids using microwave. *Claim*, vol. 24, no. 03, 1980.
8. Chamberlain J.E. et al. Submillimetre absorption and dispersion of liquid water. *Nature*, 1966, vol. 210, no. 5038, p. 1003.
9. Казаринов К.Д., Полников И.Г. *Способ измерения концентрации водных растворов*. Патент на изобретение № 2631340. Дата гос. регистрации в Гос. Реестре изобретений РФ 21.09. 2017, бюл. № 27 [Kazarinov K.D., Polnikov I.G. *Method for measuring the concentration of aqueous solutions*. Patent for invention no. 2631340. State date. registration in the State Register of Inventions of the Russian Federation 21.09. 2017, bul. no. 27 (In Russ.)].
10. Казаринов К.Д. Исследование мембранотропной активности ЭМИ в широком диапазоне длин волн. *Электронная техника. сер. 1. СВЧ - техника*, 2018, вып. 2, с. 62-75 [Kazarinov K.D. Study of the membranotropic activity of EMR in a wide range of wavelengths. *Electronic equipment. ser. 1. Microwave technology*, 2018, no. 2, pp. 62-75 (In Russ.)].
11. Bigu del Blanco, Romero-Siera C., Tanner J.A., Bigu M. Luisa. Effects of MW fields on the rate of flow and mass flux of liquids along tubes of small diameter. IEEE. *International electromagnetic compability symposium record*, 1973, p. 56.
12. Бецкий О.В., Казаринов К.Д., Путвинский А.В., Шаров В.С. *Способ измерения мощности СВЧ излучения*. Авторское свидетельство №1101750. Бюлл. ОИ, 1984, № 25, с. 120 [Betsky O.V., Kazarinov K.D., Putvinsky A.V., Sharov V.S. Method for measuring the power of microwave radiation. Copyright certificate no. 1101750. Bull. OI, 1984, no. 25, p. 120 (In Russ.)].
13. Блудов Ю.В. Распространение H₁₀-волны в прямоугольном волноводе с диэлектрической неоднородностью. *ЖТФ*, 2005, т. 75, вып. 8, с. 99-105 [Bludov Yu.V. Propagation of the H₁₀-wave in a rectangular waveguide with a dielectric inhomogeneity. *ZhTF*, 2005, vol. 75, no. 8, pp. 99-105 (In Russ.)].

14. Борисенко Г.Г., Полников И.Г., Казаринов К.Д. Биологические мембраны - первичные мишени рецепции электромагнитных полей в медико-биологическом эксперименте. *Электронная техника. Сер.1. СВЧ-техника*, 2007, № 4, с. 25-372 [Borisenko G.G., Polnikov I.G., Kazarinov K.D. Biological membranes are the primary targets for the reception of electromagnetic fields in a biomedical experiment. *Electronic equipment. Ser.1. Microwave technology*, 2007, no. 4, pp. 25-372 (In Russ.)].

15. Конев С.В. *Структурная лабильность биологических мембран и регуляторные процессы*. Минск: Наука и техника, 1987, 240 с. [Konev S.V. *Structural lability of biological membranes and regulatory processes*. Minsk: Science and technology, 1987, 240 p. (In Russ.)].

WAVEGUIDE DIELECTRIC METHOD AND DEVICES FOR MEASURING THE CONCENTRATION OF AQUEOUS SOLUTIONS AND IRRADIATION OF BIOLOGICAL OBJECTS

Polnikov I.G., Kazarinov K.D.

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics (*Fryasino branch*)

Fryazino, Moscowregion, Vvedensky sq., 1, 141190, Russia, e-mail: kazarinovkonstantin@yandex.ru

Received 17.07.2023. DOI: 10.29039/rusjbpс.2023.0608

Abstract. A technique for studying the absorption of microwave radiation of biological objects in a thin dielectric capillary is proposed. The results of experimental studies are presented and the mechanism of the detected effects of the biological action of microwave radiation is proposed. It was found that at a certain ratio between the dimensions of the waveguide, the diameter and thickness of the walls of the capillary, the dielectric parameters of the biological material that fills the capillary and the wavelength of microwave radiation in the waveguide, a significant increase in the absorbed power in a rather narrow frequency band (waveguide-dielectric resonance) is possible. This phenomenon must be taken into account in biotechnological experiments on the irradiation of suspensions. As a result of the work done on the study of the absorption of microwave radiation by hydrocarbon mixtures and models of biological objects in aquatic environments, new designs of measuring devices were created and a technique for hydrocarbon aquametry was developed. The created products are protected by the authors of this work by a patent for an invention.

Key words: *waveguide-dielectric resonance, microwave radiation, EHF spectroscopy, rectangular waveguide, dielectric capillary, liposomes.*