

УДК 535.016

<https://doi.org/10.33619/2414-2948/117/02>

ИЗМЕРЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ПОЛЯРНЫХ ЖИДКОСТЕЙ НА СВЧ С ПРИМЕНЕНИЕМ УНИВЕРСАЛЬНЫХ НОМОГРАММ

©Усейнова С. М., канд. физ-мат. наук, Бакинский государственный университет,
г. Баку, Азербайджан, nushana_kasimova@yahoo.com

MEASUREMENT OF DIELECTRIC COEFFICIENTS OF POLAR LIQUIDS AT MICROWAVE FREQUENCIES USING UNIVERSAL NOMOGRAMS

©Useynova S., Baku State University, Baku, Azerbaijan, nushana_kasimova@yahoo.com

Аннотация. Применение нового вариационного метода к изучению жидкостей и растворов позволило по оценке поведения частотных и температурных зависимостей диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь определить величину дипольных моментов (μ) полярных молекул, поляризуемость (α), времена релаксации (F), закономерности ориентации диполей и ряд других важных молекулярных характеристик вещества. На основе экспериментальных данных рассчитаны дипольные моменты, времена релаксации, параметр распределения времени релаксации, вклады основных и дополнительных областей дисперсии, механизмы, ответственные за существование различных областей дисперсии. Все экспериментальные данные о диэлектрических свойствах и релаксационных характеристиках исследуемых объектов получены впервые.

Abstract. The application of the new variational method to the study of liquids and solutions allowed by evaluating the behavior of the frequency and temperature dependences of the dielectric constant and dielectric loss to determine the value of dipole moments (μ) of polar molecules, polarizability (α), relaxation times (F), orientation patterns of dipoles and a number of other important molecular characteristics of a substance. Dipole moments, relaxation times, the distribution parameter of the relaxation time, the contributions of the main and additional dispersion regions, and the mechanisms responsible for the existence of various dispersion regions were calculated on the base of experimental data. All the experimental data on the dielectric properties and relaxation characteristics of the objects under study were obtained for the first time.

Ключевые слова: полярные жидкости, вариационный метод, диэлектрические коэффициенты, релаксационные характеристики.

Keywords: polar liquids, variational method, dielectric coefficient, relaxation characteristics.

В настоящее время широко охвачены объекты, в которых можно пренебречь дипольными и другими межмолекулярными взаимодействиями, и к которым относительно легко применима молекулярная модель Дебая. А объекты, в которых преобладает тип межмолекулярного взаимодействия в исходных компонентах (полярные жидкости с заметными диэлектрическими потерями, бинарные и другие системы растворов полярных жидкостей), изучены сравнительно мало и интерпретация степени влияния на общую релаксационную характеристику отдельных кинетических единиц и сил межмолекулярного взаимодействия по сравнению с чистыми жидкостями довольно ограничена. Причиной этого можно считать, в частности, трудности, возникающие при применении известных диэлектрических методов исследования этих систем при изучении систем [1-4].

Материал и методика

Методические трудности, возникающие при применении известных диэлектрических методов исследования к указанным выше объектам исследования, привели нас к разработке нового вариационного метода исследования диэлектрических характеристик.

Методы диэлектрической радиоспектроскопии, основанные на изучении природы диэлектрической поляризации и процессов ее установления во времени под воздействием внешнего электрического поля, можно отнести к эффективным методам исследования жидкостей. При этом, если равновесные (статические) диэлектрические свойства вещества отражают суммарный вклад всех кинетических единиц, составляющих вещество, то динамические свойства наглядно демонстрируют долю каждой из них, обусловленную структурными, фазовыми и конформационными особенностями и состоянием вещества [5-7].

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований был предложен вариационный метод определения диэлектрических коэффициентов полярных жидкостей на СВЧ, основанный на измерении коэффициента стоячей волны η_m при толщине слоя жидкости l_m в короткозамкнутой на конце измерительной ячейке, при которой отражение электромагнитной волны минимально. Согласно этому методу для расчета диэлектрических коэффициентов используются длина электромагнитной волны λ_d и фактор потерь исследуемой жидкости, определяемой при помощи номограмм по экспериментально найденным значениям η_m и l_m . В предлагаемом варианте этого метода отпадает необходимость в вычислении промежуточных значений λ_d и фактора потерь. Диэлектрические коэффициенты жидкостей рассчитываются при помощи универсальных номограмм непосредственно по найденным экспериментальным значениям η_m и l_m .

Рассмотрим для общности волновод, заполненный средой с комплексным значением диэлектрической проницаемости $\xi = \xi' - i\xi''$. Порядок вывода сохраняет свое значение и для случая распространения электромагнитной волны в коаксиальных системах или в свободном пространстве, заполненном исследуемой средой. Тогда следуя (1) имеем,

$$\xi_1 = u^{-2}(1 - y^2) \quad (1)$$

$$\xi_2 = 2yu^{-2} \quad (2)$$

$$\text{где } \xi_1 = \frac{\xi' - P}{1 - P}, \quad \xi_2 = \frac{\xi''}{1 - P}; \quad P = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2, \quad u = \frac{\lambda_d}{\lambda_0}; \quad y = \operatorname{tg} \frac{\Delta}{2}; \quad \Delta = \operatorname{arctg} \frac{\xi_2}{\xi_1},$$

λ , λ_b , λ_d — длины электромагнитных волн соответственно в свободном пространстве, в пустом волноводе и в волноводе, заполненном исследуемой средой; λ_0 — критическая длина волны, определяемая размерами волновода. В случае распространения волн типа ТЕМ $\lambda \rightarrow \infty$ и $p=0$. Для связи значений и в (1) и (2) с экспериментально измеряемыми параметрами рассмотрим случай отражения распространяющихся в пустом волноводе электромагнитных волн от отрезка короткозамкнутой на конце линейной волноводной секции, расположенной в конце волноводного тракта и заполненной исследуемой жидкостью. Предполагается, что толщина жидкости l в волноводной секции регулируется. Для полярных жидкостей, обладающих поглощением в диапазоне СВЧ, зависимость коэффициента стоячей волны η в пустом волноводе от l к некоторому предельному значению η . Поэтому удобно в качестве измеряемых параметров, вводимых в (1) и (2), использовать значения η_m и l_m ,

соответствующие экстремальным значениям зависимости η от l . Согласно (1), условие экстремума функции η от l сводится к следующему:

$$\frac{\operatorname{sh}(4\pi xy)\sin(4\pi x)}{1-\operatorname{ch}(4\pi x)\cos(4\pi x)} = \frac{2yu}{(1-y^2)-(1+y^2)^2} \quad (3)$$

где $x=l_m/\lambda_d$ (здесь l_m — толщина слоя жидкости в волноводной секции, при которой имеет место минимум или максимум амплитуды отраженной от ячейки электромагнитной волны). Из (3) следует, что в точке экстремума функции η от l

$$u = (1+y^2) R^{-1/2} \quad (4)$$

$$v = x(1+y^2) R^{-1/2} \quad (5)$$

$$\text{где } v = l_m/\lambda_v; R = 1-y^2 - 2yx \frac{1-\operatorname{ch}(2\pi xy)\cos(4\pi x)}{\operatorname{sh}(4\pi xy)\sin(4\pi x)};$$

При этом экстремальные значения η_m описываются двумя функциями

$$\eta_m = \sqrt{\frac{\operatorname{cth}(2\pi xy) + y \operatorname{ctg}(2\pi x)}{\operatorname{th}(2\pi xy) - y \operatorname{tg}(2\pi x)}} \quad (6)$$

$$\eta_m = \sqrt{\frac{\operatorname{th}(2\pi xy) - y \operatorname{tg}(2\pi x)}{\operatorname{cth}(2\pi xy) + y \operatorname{ctg}(2\pi x)}} \quad (7)$$

Последнее соотношение справедливо для значений $x > x_1$ и $y < y_1$ (x_1 и y_1 определяются из граничного условия $\operatorname{sh}(\pi x_1 y_1) = -y_1 \sin(\pi x_1)$, соответствующего случаю $\eta_m = 1$). Подставляя (4) в (1) и (2) имеем,

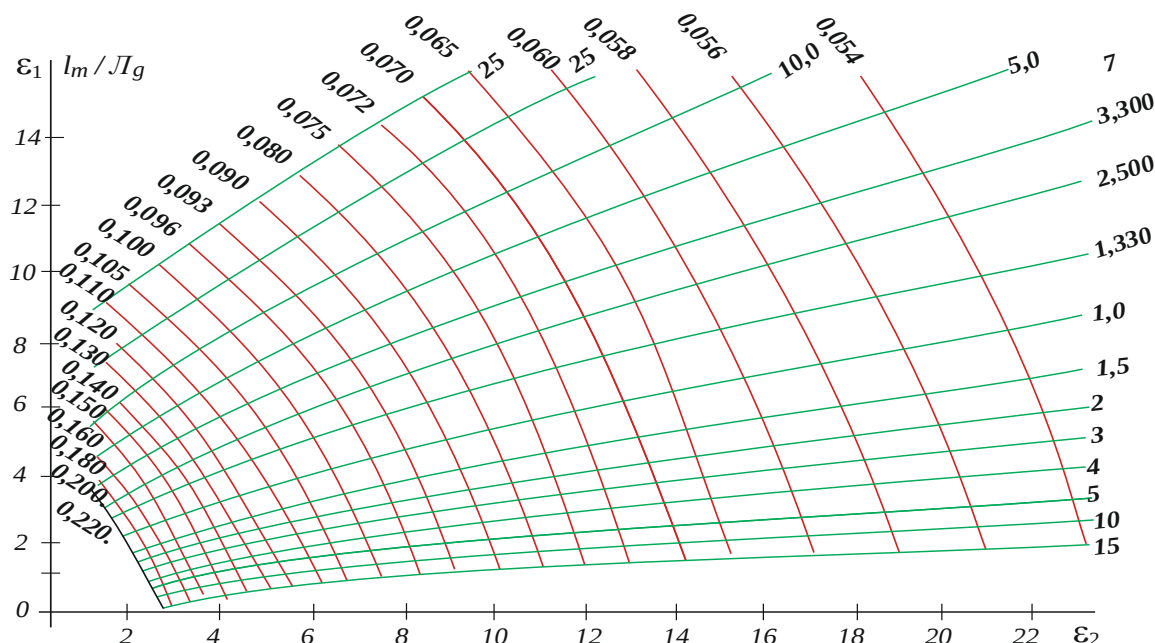
$$\xi_1 = \frac{1-y^2}{1+y^2} R; \quad (8)$$

$$\xi_2 = \frac{2y'}{1+y^2} R \quad (9)$$

Полученные уравнения (5)-(9) содержат лишь функции двух вспомогательных параметров x и y в принципе устанавливают связь между диэлектрической проницаемостью ξ' и диэлектрическими потерями ξ'' жидкости в ячейке l_m , при которой обнаруживается экстремум η_m и значение η_m , при этой толщине жидкости, при условии, что λ и λ_v известны. Однако, получить эту связь в явной форме невозможно из-за наличия в исходных уравнениях (5)-(9). В этих целях удобно использовать данные о η и l , соответствующие минимальным значениям зависимости η и l , поскольку при таких толщинах жидкости в ячейке снижаются погрешности измерения η , обусловленные паразитными отражениями волны от слюдяной прокладки и несовершенством конструкции короткозамыкающего поршня в измерительной ячейке. Кроме того, для полярных жидкостей, обладающих заметными диэлектрическими потерями в диапазоне СВЧ в зависимости η от l , как правило, обнаруживается лишь одно резко выраженный минимум η . С учетом этого, в дальнейшем ограничились установлением взаимосвязи между ξ' и ξ'' и экспериментальными данными о η_m и l_m , соответствующие первому минимуму зависимости η от l .

Для графического решения (5)-(9) ξ_1 , ξ_2 , v и η_m были табулированы в интервале значений x 0,250-0,300 и y 0,05-0,50. При выборе интервала изменения x исходили из того, что расстояние первого минимума зависимости η от l от границы раздела воздух-жидкость в измерительной ячейке всегда больше $\lambda_d/4$ (2). Результаты вычислений были использованы далее для построения номограммы функций v и η_m в плоскости координат ξ_1 и ξ_2 . На рисунке

представлены номограммы, построенные указанным способом, для расчета диэлектрических коэффициентов полярных жидкостей по данным измерений к.с.в. и толщины слоя жидкости в ячейке, соответствующей минимуму отражения волны. аналогичные номограммы при необходимости могут быть построены для последующих экстремумов зависимости η от l .



Следует отметить, что использование при построении номограмм приведенных параметров ξ_1 , ξ_2 , ν и η_m придает номограммам универсальный характер; они не зависят от частоты, при которой ведется измерение и могут быть применены при измерениях диэлектрических коэффициентов полярных жидкостей в свободном пространстве и в коаксиальных системах. Благодаря универсальным номограммам заметно упрощается методика вычисления ξ' и ξ'' . Если известны экспериментальные значения $\nu = l_m/\lambda_g$; η_m в точке первого минимума зависимости η от l , то ордината точки пересечения двух кривых на рисунке, соответствующих данным ν и η_m , дает приведенное значение диэлектрических потерь ξ_2 , тогда как абсцисса точки пересечения — приведенное значение ξ_1 . Найденные значения ξ_1 и ξ_2 используются затем для подсчета ξ' и ξ'' .

Вывод

На основе экспериментальных данных рассчитаны дипольные моменты, времена релаксации, параметр распределения времени релаксации, вклады основных и дополнительных областей дисперсии, а также механизмы, ответственные за существование различных областей дисперсии. Все экспериментальные данные о диэлектрических свойствах и релаксационных характеристиках исследуемых объектов получены впервые.

Список литературы:

1. Kon G. A. R., Smith L. F., Thorpe J. F. LXXXIV. Ring-chain tautomerism. Part XII. Derivatives of $\beta\beta$ -dimethyl- α -ethylglutaric acid // Journal of the Chemical Society, Transactions. 1925. V. 127. P. 567-573. <https://doi.org/10.1039/CT9252700567>
2. Wislicenus J., Hentschel W. III. Der Pentamethenylalkohol und seine Derivate // Justus Liebigs Annalen der Chemie. 1893. V. 275. №2-3. P. 322-330. <https://doi.org/10.1002/jlac.18932750216>

3. Ахадов Я. Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. М.: Изд-во стандартов, 1972. 412 с.
4. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 403 с.
5. Усейнова С. М. Изучение диэлектрических, поляризационных свойств цикlopentанола и его растворов в цикlopентане новым вариационным методом // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7. №12. С. 12-18. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/73/05>
6. Усейнова С. М. Графические способы применения вариационного метода // Fizikanın müasir problemləri: V Respublika konfransının materialları. Bakı. 2011. С. 202-205.
7. Усейнова С. М. Применение вариационного метода в исследовании полярных жидкостей и их концентрированных растворов // Бюллетень науки и практики. 2022. Т. 8. №12. С. 20-27. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/85/02>

References:

1. Kon, G. A. R., Smith, L. F., & Thorpe, J. F. (1925). LXXXIV. Ring-chain tautomerism. Part XII. Derivatives of $\beta\beta$ -dimethyl- α -ethylglutaric acid. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 127, 567-573. <https://doi.org/10.1039/CT9252700567>
2. Wislicenus, J., & Hentschel, W. (1893). III. Der Pentamethenylalkohol und seine Derivate. *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, 275(2-3), 322-330. <https://doi.org/10.1002/jlac.18932750216>
3. Akhadov, Ya. Yu. (1972). Dielektricheskie svoistva chistyx zhidkostei. Moscow. (in Russian).
4. Brandt, A. A. (1963). Issledovanie dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh. Moscow. (in Russian).
5. Useinova, S. (2021). Study of Dielectric, Polarization Properties of Cyclopentanol and Their Solutions in Cyclopentane by a New Variation Method. *Bulletin of Science and Practice*, 7(12), 12-18. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/73/05>
6. Useinova, S. M. (2011). Graficheskie sposoby primeneniya variatsionnogo metoda. In *Fizikanın müasir problemləri: V Respublika konfransının materialları*, Bakı, 202-205. (in Russian).
7. Useinova, S. (2022). Application of the Variational Method in Studying of Polar Liquids and Their Concentrated Solutions. *Bulletin of Science and Practice*, 8(12), 20-27. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/85/02>

Работа поступила
29.05.2025 г.

Принята к публикации
07.06.2025 г.

Ссылка для цитирования:

Усейнова С. М. Измерение диэлектрических коэффициентов полярных жидкостей на СВЧ с применением универсальных номограмм // Бюллетень науки и практики. 2025. Т. 11. №8. С. 16-20. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/117/02>

Cite as (APA):

Useynova, S. (2025). Measurement of Dielectric Coefficients of Polar Liquids at Microwave Frequencies using Universal Nomograms. *Bulletin of Science and Practice*, 11(8), 16-20. (in Russian). <https://doi.org/10.33619/2414-2948/117/02>