

## ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ БРОМБЕНЗОЛА В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

**С.Т. АЗИЗОВ, О.А. АЛИЕВ**

*Институт Физики Национальной Академии Наук Азербайджана*

*Азербайджан, г. Баку, AZ 1143, пр. Джавида 33,*

*e – mail: [samir\\_azizov@mail.ru](mailto:samir_azizov@mail.ru)*

В статье приведены результаты исследований диэлектрической релаксации бромбензола в диапазоне микроволн. Исследования проводились методом короткозамкнутой линии для определения температурной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon^*$ .

Ключевые слова: диэлектрическая спектроскопия, диэлектрическая релаксация, диэлектрические свойства бромбензол.

PACS: 61.20. – p; 77.22. – d; 77.22.Gm;

### ВВЕДЕНИЕ

Механизм диэлектрической поляризации, возможно, исследовать аномальной дисперсией диэлектрической проницаемости полярных жидкостей и связанного с ней сильного поглощения электромагнитной энергии. Данные исследований дают ценные сведения о природе межмолекулярных сил полярных жидкостей.

Известно, что область аномальной дисперсии определяется временем релаксации  $\tau$ . Время релаксации характеризует процесс развития поляризации в диэлектрике при наложении внешнего поля и связано с частотой максимально поглощаемой волны –  $\omega_m$  условием:

$$\omega_m \tau = 1. \quad (1)$$

Для большинства полярных жидкостей область аномальной дисперсии лежит в диапазоне микроволн. Что вызывает значительные трудности экспериментальных исследований. Между тем, как следует из соотношения (1) дисперсионную кривую можно изучить, изменяя время релаксации  $\tau$  при постоянной частоте  $\omega$ . Согласно работе [1], релаксационный процесс в жидкости связан с ее вязкостью, вследствие этого время релаксации  $\tau$  выражается следующим образом:

$$\tau = \frac{4\pi\eta a^3}{kT} \quad (2)$$

где  $\eta$  – коэффициент внутреннего трения,  $a$  – радиус молекулы,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

Из формулы (2) получим, что характерной величиной, определяющей изменение времени релаксации  $\tau$ , является температура  $T$ . Следовательно, дисперсионные явления можно изучить, снимая температурную зависимость комплексной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon^*$  на фиксированной частоте.

### ТЕОРИЯ МЕТОДА

В настоящей работе предложена новая методика короткозамкнутой линии для исследований температурной зависимости комплексной диэлектрической

проницаемости  $\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon''$  бромбензола на диапазоне микроволн и интервале температур  $+20^\circ \div -90^\circ\text{C}$ . Температурная зависимость диэлектрических коэффициентов исследуемой жидкости изучалось в работе [2]. В предложенном методе [3] используется связь между входным импедансом  $Z_0$  и комплексной постоянной распространения  $\gamma$  линии, заполненной диэлектриком.

Согласно теории длинных линий [4] имеем:

$$\gamma = \alpha + i\beta = i\omega(\varepsilon^* \mu^*)^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

где  $\alpha$  – постоянная затухания, характеризующая уменьшение амплитуды волны, распространяющейся вдоль линии,  $\beta$  – фазовая постоянная, характеризующая изменение фазы той же волны,  $\mu^*$  – комплексная магнитная проницаемость.

Принимая  $\mu^* = 1$ , получим:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' = \frac{\gamma \lambda_1}{2\pi} \quad (4)$$

Где  $\lambda_1$  – длина волны в воздушной части линии.

Величина  $\gamma$  связана с входным импедансом  $Z_0$  следующим образом [3]:

$$\frac{th\gamma d}{\gamma d} = -i \frac{\lambda_1}{2\pi d} \cdot \frac{Z_0}{Z_1} \quad (5)$$

где  $d$  – толщина диэлектрика,  $Z_1$  – волновое сопротивление воздушной части линии.

Входной импеданс  $Z_0$  выражается через экспериментально определяемые коэффициентом бегучести  $q = E_{min}/E_{max}$  ( $E$  – напряженность электрического поля) и смещение узла  $y_1$  стоячей волны:

$$Z_0 = Z_1 \frac{q - i \operatorname{tg} \beta_0 y_1}{1 - i q \operatorname{tg} \beta_0 y_1} \quad (6)$$

где  $\beta_0 = \frac{2\pi}{\lambda_1}$ . Уравнение (5) решается графическим методом, в виде:

$$\frac{th T e^{ir}}{T e^{ir}} = C e^{i\xi} \quad (7)$$

где  $T e^{ir}$  – полярная форма комплексной величины  $\gamma d$ .  $C$  и  $\xi$  – модуль и аргумент, соответственно, правой части у

равнения (5).

Подставляя обозначения  $Z_0 / Z_l = R + iX$ , тогда из уравнения (6) получим:

$$\begin{cases} R = \frac{q(1+itg^2\beta_0y_1)}{1+q^2tg^2\beta_0y_1} \\ X = \frac{(q^2-1)tg\beta_0y_1}{1+q^2tg^3\beta_0y_1} \end{cases} \quad (8)$$

Принимая во внимание (5) и (8) имеем:

$$\begin{cases} C = \sqrt{A^2 + B^2} & \text{где } A = \frac{\lambda_1}{2\pi d} X \\ tg\xi = arctg \frac{B}{A} & \text{где } B = \frac{\lambda_1}{2\pi d} R \end{cases} \quad (9)$$

Определив из выражений (8) и (9)  $C$  и  $\xi$ , из графического решения уравнения (7), приведенного в (9) находим  $T$  и  $\tau$ .

Поскольку  $Te^{i\tau} = \gamma d = d(\alpha + i\beta)$ , то

$$\begin{cases} \alpha = \frac{T \cos \tau}{d} \\ \beta = \frac{T \sin \tau}{d} \end{cases} \quad (10)$$

Имея в виду (4), для определения действительной и мнимой части комплексной диэлектрической проницаемости получим следующие выражения:

$$\begin{cases} \epsilon' = \left(\frac{\lambda_1}{2\pi}\right)^2 (\beta^2 - \alpha^2) \\ \epsilon'' = \left(\frac{\lambda_1}{2\pi}\right)^2 2\alpha\beta \end{cases} \quad (11)$$

Анализ метода показал, что в случае малых и средних потерь  $tg\delta < 0,1$ , точные результаты достигаются при толщинах кратных нечетному числу четвертей длины волны в образце. При больших потерях  $tg\delta > 0,1$  толщину образца приходится брать настолько малой, что она сама становится источником заметных погрешностей.

Другим недостатком является крайняя чувствительность детекторной части аппаратуры к температурным колебаниям. Оба эти недостатка удаётся устранить предложенным методом [5,6].

Суть метода состоит в том, что производится трансформация входного импеданса заполненной диэлектриком короткозамкнутой линии в измерительную линию таким образом, что создаются оптимальные условия для измерений.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлена блок – схема установки, работающей по вышеописанному методу. Из сети напряжение поступает через феррорезонансный стабилизатор (1) на блок питания (2) генератора дециметровых волн (3), собранного на металлокерамическом триоде ГС-9Б по схеме с общей сеткой.

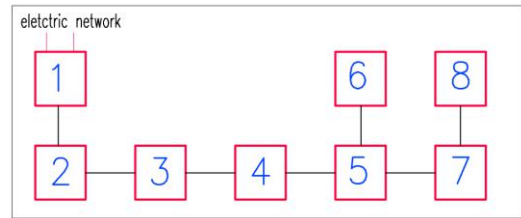


Рис. 1. Блок – схема установки.

Входной импеданс короткозамкнутой – секции (8), заполняемой исследуемой жидкостью, преобразуется с помощью регулируемого трансформатора (7) в коаксиальную измерительную линию (5) с волновым сопротивлением 70 Ом. Индикатором служит кремниевый детектор, на выходе которого включен прибор на 100 мкА (6). Ввиду того, что при данном методе сопротивление нагрузки генератора изменяется в больших пределах, особое значение приобретает развязка генератора. С помощью развязывающего ослабителя (4) в систему вводится затухание около 20 дБ. Короткозамкнутая секция (8) является отрезком 70 – омной коаксиальной линии длиной 12 см. Ее нижняя часть закрыта тefлоновой пробкой. Секция окружена металлической рубашкой, по которой пропускаются пары жидкого воздуха. Высота столба жидкости устанавливается с помощью короткозамыкающего поршня, положение плоскости короткого замыкания которого определяется с точностью 0,05 мм.

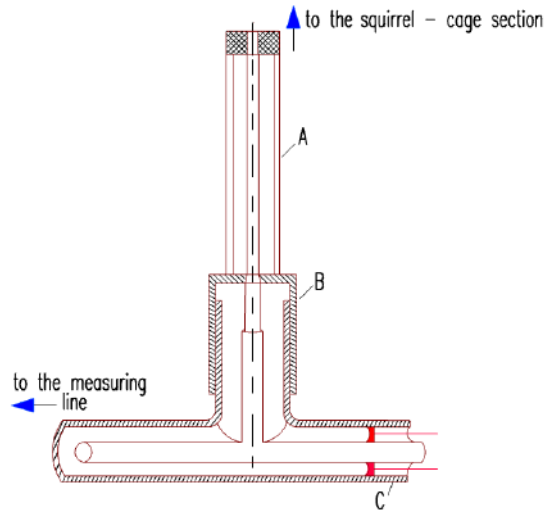


Рис. 2. Устройство трансформатора.

Регулируемый трансформатор (рис.2) состоит из отрезка линии  $A$ , удлинителя  $B$  и отрезка линии  $C$  с подстраивающим поршнем. Длина отрезка линии  $A$  16 см, диаметр внешнего проводника 4 мм, внутреннего – 0,8 мм. Этот коаксиальный переход окружен керамической трубкой, на которую намотана печь, мощностью порядка 5 ватт. Печь предварительно была проградуирована таким образом, чтобы охлаждение пустой секции (8) не вызывало смещения узла стоячей волны в измерительной линии. Это позволило устранить влияние охлаждения секции (8) на собственные параметры измерительной системы. Все токопроводящие поверхности линий и поршни посеребрены. Температура жидкости определялась термопарой медь – константан с точностью  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .

На описанной установке была изучена температурная зависимость комплексной диэлектрической проницаемости бромбензола на диапазоне микроволн и интервале температур от +20°C до -90°C.

Результаты даны в таблице 1.

Таблица 1

t°C	Бромбензол	
	$\epsilon'$	$\epsilon''$
20	5,17	0,82
15	5,19	0,87
10	5,22	0,93
5	5,27	1,01
0	5,31	1,09
-5	5,34	1,17
-10	5,40	1,25
-15	5,36	1,35
-20	5,31	1,41
-25	5,22	1,46
-28	5,14	1,51
-30	5,05	1,57
-31	2,95	0,82
-33	2,85	0,44
-35	2,82	0,21
-40	2,81	0,15
-42	2,80	0,11
-45	2,80	0,08
-50	2,79	0,06
-60	2,79	0,04
-72	2,80	0,03
-87	2,81	0,02

Следует отметить, что в точке затвердевания (-30,6°C) происходит резкое уменьшение диэлектрических коэффициентов [7,8,9], указывающее на наличие скачка времени релаксации  $\tau$ . Следовательно, при температуре затвердевания происходит упорядочение молекул. Вследствие этого ограничивается их вращательная подвижность.

По измеренным значениям  $\epsilon'$  и  $\epsilon''$  можно определить величину времени диэлектрической релаксации.

В интервале температур от комнатной до температуры скачка вычисление времени релаксации производится по формуле:

$$\tau = \frac{1}{\omega} \frac{\epsilon''}{\epsilon' - \epsilon_{\infty}}$$

Учитывая, что после скачка выполняется условие  $\omega\tau \gg 1$  в дальнейшем исходим из соотношения:

$$\tau = \frac{1}{\omega} \frac{\epsilon_0 - \epsilon_{\infty}}{\epsilon''}$$

где  $\omega$  – круговая частота приложенного поля,  $\epsilon_{\infty}$  – диэлектрическая проницаемость при бесконечной частоте,  $\epsilon_0$  – статическая диэлектрическая проницаемость. Найденные значения времени релаксации для различных температур приведены в табл.2.

Таблица 2

Бромбензол	
t°C	$\tau \times 10^{10}$ сек
20	0,21
10	0,23
0	0,26
-10	0,29
-20	0,34
-30	0,42
-31	2,54
-33	4,77
-35	10,1
-40	14,4
-42	19,8
-45	27,5
-50	37,3
-60	58,2
-72	81,8

Из табл. 2 видно, что время релаксации, при переходе через точку плавления, резко возрастает (почти на один порядок). Следует отметить, что скорость изменения значения времени релаксации с температурой существенно зависит от скорости охлаждения. Приведенные здесь данные относятся к скорости 0,3-0,4 гр/мин.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования проводились методом короткозамкнутой линии. Метод основан на трансформации входного сопротивления короткозамкнутой линии, заполненной исследуемой жидкостью.

Приведены данные температурной зависимости комплексной диэлектрической проницаемости  $\epsilon^*$  бромбензола в интервале температур +20°C ÷ -90°C на диапазоне микроволн.

При переходе через точку затвердевания исследуемой жидкости обнаружен скачок  $\epsilon^*$ . Определены значения времени релаксации во всем температурном интервале и величины энергии активации для молекул жидкого бромбензола.

- |  |   |
|--|---|
| [1] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 733 с.   | [3] Я.Ю.Ахатов. Диэлектрические параметры чистых жидкостей, Москва, (1999) 854.                             |
| [2] И.И. Адаменко, Н.А. Адаменко, Л.А. Булавин, В.Е. Погорелов. Колебательная и ориентационная релаксация молекул хлорбензола и бромбензола//Журн. физ. химии. 1996. Т. 70. №1.- С. 97-98. | [4] Ю.А. Гусев. Спецпрактикум по сверхвысоким частотам, Учебное пособие (второе издание) Казань, 129, 2008. |
|  | [5] S.T.Azizov, O.A.Aliev, R.G.Abaszade. "Low – frequency dielectric properties of acetone",                |

- International Journal of Latest Research in Science and Technology, , 2016, 5, 58-62.
- [6] *M. Chalaris*. Computer simulation studies of the liquid mixtures water-dimethylsulfoxide using different effective potential models: Thermodynamic and transport properties. *J. Molec. Liquids*, 2002, v. 98-99, p. 401-411.
- [7] *M.M. Palaiologou, G.K. Arianas, N.G. Tsierkezos*. Thermodynamic investigation of dimethyl sulfoxide binary mixtures at 293.15 and 313.15K. *J. Solut. Chem.*, 2006, v. 35, p. 1551-1565.
- [8] *E. A. Losev, E. V. Boldyreva*. "The role of a liquid in "dry" co-grinding: a case study of the effect of water on mechanochemical synthesis in "L-serine – oxalic acid" system", *CrystEngComm*. 2014. v. 16. p. 3857-3866.
- [9] *P. Aruna, A.G. Murugkar, S.S. Patil, P.W. Khirade*. "Characterization of Dominant Hydrogen Bonded Complex Structures", *Asian Journal of Chemistry*, 2013, vol. 25, No. 2, 937-940

**S.T. Əzizov, O.A. Əliyev**

#### **MIKRODALĞA DIAPAZONUNDA BROMBENZOLUN DIELEKTRİK RELAKSASIYASI**

Məqalədə mikrodalğalı diapazonda brombenzolun dielektrik relaksasiyası tədqiqatlarının nəticələri təqdim olunur. Tədqiqatlar kompleks dielektrik keçiriciliyin  $\epsilon^*$  temperaturdan asılılığını təyin etmək üçün qısa qapanmış koaksial xətt üsulu ilə aparılmışdır.

**S.T. Azizov, O.A. Aliyev**

#### **DIELECTRIC RELAXATION OF BROMOBENZENE IN THE MICROWAVE RANGE**

The article presents the results of studies of the dielectric relaxation of bromobenzene in the microwave range. The studies were carried out using the short-circuited line method to determine the temperature dependence of the complex permittivity  $\epsilon^*$ .