

УДК 535.016

https://doi.org/10.33619/2414-2948/73/05

**ИЗУЧЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ СВОЙСТВ  
ЦИКЛОПЕНТАНОЛА И ЕГО РАСТВОРОВ В ЦИКЛОПЕНТАНЕ НОВЫМ  
ВАРИАЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

©Усейнова С. М., Бакинский государственный университет,  
г. Баку, Азербайджан, aak-vak@mail.ru

**STUDY OF DIELECTRIC, POLARIZATION PROPERTIES OF CYCLOPENTANOL  
AND THEIR SOLUTIONS IN CYCLOPENTANE BY A NEW VARIATION METHOD**

©Useinova S., Baku State University, Baku, Azerbaijan, aak-vak@mail.ru

*Аннотация.* В статье представлены результаты расчета теоретических принципов вариационного метода измерения диэлектрических показателей полярных жидкостей: циклопентанола и его растворов в циклопентане. Рассчитаны их диэлектрическая проницаемость  $\xi'$  и диэлектрические потери  $\xi''$ . На основе данного метода были найдены решения уравнений и разработан графический метод решения и автоматизированная методика расчета  $\xi'$  и  $\xi''$ . Сравнение с результатами других методов, выявило, что эти показатели при этом минимальны в пределах 1,5–2,0%.

*Abstract.* Results of calculating the theoretical principles of the variational method for measuring the dielectric parameters of polar liquids: cyclopentanol and its solutions in cyclopentane have been shown in the paper. Their dielectric constant  $\xi'$  and dielectric losses  $\xi''$  are calculated. Solutions to the equations were found and a graphical solution method and an automated method for calculating  $\xi'$  and  $\xi''$  were developed on the basis of this method. Comparison with the results of other methods revealed that these indicators are at the same time minimal within 1.5–2.0%.

*Ключевые слова:* циклопентанол, циклопентан, вариационный метод, полярные жидкости.

*Keywords:* cyclopentanol, cyclopentane, variational method, polar liquids.

Совокупность экспериментальных данных физических исследований макроскопических характеристик, которые неразрывно связаны с молекулярными параметрами и иллюстрируют структуру и движение молекул, связанных с природой и механизмом проявления специфических и универсальных взаимодействий, а также характером ближнего окружения молекул в жидкости лежат в основе теории жидких веществ. Тут следует отметить значение методов диэлектрической радиоскопии [2].

Диэлектрические методы исследования вещества обосновываются на изучении возникновения диэлектрической поляризации и процессов ее установления во времени под действием внешнего электрического поля. При том, если равновесные (статические) диэлектрические свойства отражают суммарный вклад всех кинетических единиц, составляющих вещество, то динамические диэлектрические свойства наглядно

демонстрируют долю каждого из них, обусловленного структурными, фазовыми и конформационными особенностями и агрегатным состоянием вещества [1, 5].

При теоретическом решении данного вопроса с применением предлагаемого вариационного метода используемого для высокочастотных измерений диэлектрических характеристик полярных жидкостей и их растворов, была определена связь между величинами диэлектрических параметров (диэлектрическая проницаемость, диэлектрические потери) и экспериментально определяемыми величинами ( $\lambda_g$  — длина волны в ячейке заполненной жидкостью,  $l_m$  — толщина слоя жидкости в ячейке при котором имеет место минимум амплитуды отраженной волны  $|\hat{\rho}|$  или коэффициента стоячей волны  $\eta$  и величины  $\eta_m$  при этой толщине жидкости) [3, 4].

Объекты, в которых преобладает тип межмолекулярного взаимодействия в исходных компонентах (бинарные и другие системы растворов полярных жидкостей), полярные жидкости и растворы, обладающие заметными диэлектрическими потерями изучены сравнительно мало и истолкование степени влияния на общую релаксационную характеристику отдельных кинетических единиц и сил межмолекулярного взаимодействия по сравнению с чистыми жидкостями довольно ограничена. Именно эти особенности стали причиной возникающих технических трудностей и не позволяют применять известные методы диэлектрических параметров, основанных на анализе экспериментально снимаемой зависимости коэффициента стоячей волны (КСВ~ $\eta$ ) от толщины исследуемой жидкости в измерительной ячейке. Указанное обстоятельство привело к необходимости разработке нового, удобного «вариационного метода», допускающего измерение диэлектрических параметров полярных жидкостей и растворов, обладающих высокими диэлектрическими потерями в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) [5].

#### *Материал и методика*

Основными объектами исследования были *полярные жидкости: циклопентанол и его растворы в циклопентане*. При применении диэлектрических методов исследований, которые базируются на взаимосвязи между микроскопическими параметрами исследуемой жидкости — временем релаксации ( $\tau$ ), характеризующей скорость реакции молекулярного поля, в соответствии с ее размерами и массой, а также окружающей ее ближней средой, в тепловом движении и макроскопическими диэлектрическими свойствами вещества, полученные данные могут стать основой построения молекулярной модели вещества.

Применение диэлектрических методов к исследованию жидкостей позволяют путем оценки поведения частотных и температурных зависимостей диэлектрической проницаемости ( $\xi'$ ) и диэлектрических потерь ( $\xi''$ ) определять значение дипольных моментов ( $\mu$ ) полярных молекул, поляризуемости ( $\alpha$ ), энергии активации дипольной релаксации, характер ориентации диполей и ряд других важных характеристик вещества, времени релаксации ( $\tau$ ), вернее распределение времени релаксации, вблизи наиболее вероятного его значения, которая также сильно меняется с температурой, может быть определена либо из частотных, либо из температурной зависимости диэлектрических коэффициентов. Но для достоверности представлений о молекулярной структуре и характере взаимодействий в веществе пользуются совокупностью данных зависимостей, снятых в достаточно широких пределах частоты внешнего электрического поля и температуры [3, 4].

### Результаты и обсуждение

Для оценки погрешности измерения диэлектрических параметров жидкости, разработанным вариационным методом, уравнения (1) и (2):

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

$$\xi_2 = \frac{2y}{u^2}; \quad (2)$$

проведя следующие преобразования,

$$\xi_1 = \frac{\xi' - P}{1 - P}; \quad \xi_2 = \frac{\xi''}{1 - P}; \quad \text{где } u = \frac{\lambda_g}{\lambda_b}; \quad y = tg \frac{\Delta}{2}; \quad \Delta = \arctg \frac{\xi_2}{\xi_1};$$

$$P = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2; \quad \text{далее } \xi' = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_g}\right)^2 (1 - tg^2 \Delta/2);$$

$$\xi'' = \left(\frac{\lambda}{\lambda_g}\right)^2 tg \frac{\Delta}{2};$$

где,  $\xi'$  — диэлектрическая проницаемость,  $\xi''$  — диэлектрические потери исследуемой жидкости;  $\lambda$  — длина электромагнитной волны в свободном пространстве при отсутствии среды;  $\lambda_0$  — критическая длина волны, определяемая размерами волновода ( $\lambda_0 = 2a$ ,  $a$  — внутренняя ширина волновода),  $\lambda_g$  — длина электромагнитной волны в волноводе;  $\lambda_b = \frac{\lambda}{1-P}$  — длина электромагнитной волны в пустом волноводе, где,  $P = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2$ ; [в случае распространения волн типа ТЕМ  $\lambda_0 \rightarrow \infty$  и  $P=0$ ]. Продолжая преобразования, в итоге, уравнения (1) и (2) представим в виде:

$$\xi' = \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_b}\right)^2 \cdot \frac{x^2 (1-y^2)}{v^2}; \quad (3)$$

$$\xi'' = \left(\frac{\lambda}{\lambda_b}\right)^2 \cdot \frac{2x^2 y}{v^2}; \quad (4)$$

здесь  $x = l_m / \lambda_b$ ,  $l_m$  — толщина слоя жидкости, при которой имеет место минимум или максимум амплитуды отраженной волны.

Так как  $\lambda$ ,  $\lambda_0$ ,  $\lambda_b$  измеряется с высокой точностью, то при условии  $\xi' \gg \frac{\lambda^2}{\lambda_0^2}$  относительные отклонения величин  $\xi'$ ,  $\xi''$  по уравнениям (3) и (4) при измерении параметров  $x$ ,  $y$ ,  $v$ , определяется следующими двумя выражениями:

$$-\frac{\Delta \xi'}{\xi'} = 2 \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta x}{x} + 2a \frac{\Delta y}{y}; \quad (5)$$

$$-\frac{\Delta \xi''}{\xi''} = 2 \frac{\Delta v}{v} - \frac{\Delta x}{x} - 2a \frac{\Delta y}{y}; \quad (6)$$

$$\text{где } a = \frac{y^2}{1-y^2};$$

Экспериментально измеренными величинами в рассматриваемом вариационном методе являются коэффициент стоячей волны  $\eta_m$  в точке минимума зависимости  $\eta$  от  $l$  и  $v = l_m / \lambda_b$ , где  $l_m$  — измеряемая толщина жидкости в ячейке, при которой отражение волны минимально. Как следует из номограммы зависимости  $v$  от  $x$  для первого минимума функции

$\eta$  от  $l$ , рассчитанные по уравнению (8) в широком интервале варьируемого параметра  $y$ , мало отличаются друг от друга и близки в продольной зависимости  $v$  от  $x$  при  $y=0$ .

Известно, что в точке экстремума функции  $\eta$  или  $\delta$  от  $l$ ,  $u = (1+y^2) R^{-\frac{1}{2}}$ ; (7)

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

где  $v = \frac{l_m}{\lambda_b}$ ; тогда

$$R = 1 - y^2 - 2y \frac{1 - \operatorname{ch}(4\pi xy) \cos(4\pi x)}{\operatorname{sh}(4\pi xy) \sin(4\pi x)}; \quad (9)$$

рассчитанные по уравнению (4.8) в широком интервале варьируемого параметра  $y$ .

С учетом этого обстоятельства разложим функцию (4.8) в ряд по  $y$  и ограничимся лишь первым членом этого ряда. Получим, что

$$v = \frac{x}{\sqrt{1-A}}; \quad (10)$$

где  $A = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\alpha}$ ;  $\alpha = 2\pi x$ ; так как  $\Delta v \cong \frac{\delta v}{\delta x} \Delta x$ ;

$$\Delta \eta_m = \frac{\delta \eta_m}{\delta x} \Delta x + \frac{\delta \eta_m}{\delta y} \Delta y; \quad (11)$$

то, подставляя (11) в (5) и (6) имеем

$$-\frac{\Delta \xi'}{\xi'} = 2 \frac{\Delta v}{v} (B_1 - aB_2) + 2 \frac{\Delta \eta}{\eta_m} aB_3; \quad (12)$$

$$-\frac{\Delta \xi'}{\xi'} = 2 \frac{\Delta v}{v} (B_1 + B_2) + \frac{\Delta \eta}{\eta_m} B_3; \quad (13)$$

где  $B_1 = 1 - \frac{v}{x - \frac{\delta v}{\delta x}}$ ;  $B_2 = \frac{v \frac{\delta \eta_m}{\delta x}}{y \frac{\delta \eta_m}{\delta y} \frac{\delta v}{\delta x}}$ ;  $B_3 = \frac{\eta_m}{y \frac{\delta \eta_m}{\delta y}}$ ;

После преобразования уравнений (7) и (8), следует, что экстремальные значения коэффициента стоячей волны в волноводе  $\eta_m$  при толщине слоя жидкости в волноводной секции равной  $l_m$  описывается двумя уравнениями:

$$\eta_m = \sqrt{\frac{\operatorname{cth}(2\pi xy) + y \operatorname{ctg}(2\pi xy)}{\operatorname{th}((2\pi xy) + y \operatorname{tg}(2\pi x))}}; \quad (14)$$

$$\eta_m = \sqrt{\frac{\operatorname{th}(2\pi xy) - y \operatorname{tg}(2\pi xy)}{\operatorname{cth}(2\pi xy) + y \operatorname{ctg}(2\pi x)}}; \quad (15)$$

При  $\eta_m = 1$  оба уравнения приводятся к выражению вида

$$\operatorname{sh}(\pi xy) = -y \sin \pi c; \quad (16)$$

которое описывает в плоскости координат  $x$ ,  $y$  функцию, определяющую границы применимости уравнений (14), (15). Уравнение 15 оказывается справедливым для значений  $x$  и  $y$ , где  $x > x_1$  и  $y < y_1$  определяются из граничного условия (16).

С учетом производных функций (14), (15), (16) получим:

$$B_1 = \frac{A \cos^2 \alpha_1}{1 + (2-3A) \cos^2 \alpha_1};$$

$$B_2 = \frac{2}{A} \frac{1-A}{1 + (2-3A) \cos^2 \alpha_1} \frac{\sin 2\alpha_1 (yk_1 + k_2) + sh 2\alpha_1 y (k_1 - yk_2)}{2\alpha_1 y k_1 + 2k_2 \alpha_1 - sh 2\alpha_1 y k_3};$$

$$B_3 = \frac{sh 2\alpha_1}{y} \frac{2yk_1 + (1-y^2)k_2}{2\alpha_1 y k_1 + 2\alpha_1 k_2 - sh 2\alpha_1 y k_3};$$

где:

$$k_1 = tg^2 \alpha_1 y - tg^2 \alpha_1; k_2 = 2tg^2 \alpha_1 y - tg^2 \alpha_1; k_3 = tg^2 \alpha_1 y + tg^2 \alpha_1;$$

Для упрощения (4.12) и (4.13) примем, что  $l_m$  достаточно близка по величине к  $l/4$ .

$$B_2 = -B_3 = -2b; b = \left[ 1 + \frac{\pi y}{sh(\pi y)} \right]^{-1};$$

подставляем (14) в (12) и (13) и учитывая, что  $\frac{\Delta v}{v} = \frac{\Delta l_m}{l_m}$ , получим выражение для случайной относительной ошибки в определении  $\xi'$  и  $\xi''$ :

$$\frac{\Delta \xi'}{\xi'} = 2 \frac{\Delta l_m}{l} (1 + 2ab) + \frac{\Delta \eta}{\eta} 4ab; \quad (17)$$

$$\frac{\Delta \xi''}{\xi''} = 2 \frac{\Delta l_m}{l_m} (1-2b) + \frac{\Delta \eta}{\eta} 2b; \quad (18)$$

При малых потерях  $y=0$ , значение  $a$ , близко к единице. Поэтому для этого случая выражения (4.15) и (4.16) сводятся к следующим соотношениям:

$$\frac{\Delta \xi'}{\xi'} = 2 \frac{\Delta l_m}{l}; \quad (19)$$

$$\frac{\Delta \xi''}{\xi''} \cong -2 \frac{\Delta l_m}{l_m} + 2 \frac{\Delta \eta}{\eta}; \quad (20)$$

Из уравнений (15) и (16) следует, что погрешность в  $\xi'$  определяется ошибкой в измерении лишь  $l_m$ . Для полярных жидкостей со значением  $\xi' = 10 \div 20$  измеряемых в диапазоне  $\lambda = 3,21$  см, величина  $l_m$  лежит в пределах 2,5–1,0 мм. Так как абсолютная ошибка в измерении длины стандартными микрометрами составляет 0,01 мм, то результирующая относительная погрешность в определении  $\xi'$  будет лежать в пределах 1–2%, в зависимости от типа измеряемой жидкости. Для слабополярных жидкостей ошибка в определении  $\xi'$  достигает менее 0,5%. Ошибка в определении  $\xi''$  определяемая погрешностью в измерении  $l_m$  в 2 раза выше, чем у  $\xi'$ . Из-за погрешности измерения КСВ, достигающей 3–5%, результирующая ошибка в измерении  $\xi''$  может достигать 5%, хотя в случае слабополярных жидкостей она может опускаться до 1–2%, из-за уменьшения относительной ошибки в измерении  $l_m$  и повышении точности отсчета больших значений КСВ.

Для случая жидкостей со значительными диэлектрическими потерями, ошибка в определении  $\xi'$  и  $\xi''$  возрастает. Для ее оценки рассмотрим крайний случай  $y=0\%$ , соответствующему максимально возможной величине  $tg \delta = 1,2$ . Тогда:

$$\frac{\Delta \xi'}{\xi'} = 3 \frac{\Delta l_m}{l} + \frac{\Delta \eta}{\eta}; \quad (21)$$

$$\frac{\Delta \xi''}{\xi''} \cong 0,4 \frac{\Delta l_m}{l_m} + 1,2 \frac{\Delta \eta}{\eta}; \quad (22)$$

При указанных выше погрешностях измерения  $l_m$  и  $\eta_m$  результирующая ошибка в определении  $\xi'$  и  $\xi''$  для случая сильнополярных жидкостей со значениями  $\xi' = 10 \pm 20$  составляет соответственно 5% и 7%. Для слабополярных жидкостей со значениями  $\xi' = 2-4$ , результирующая ошибка уменьшается и составляет соответственно 2% и 4%.

В Таблице приведены результаты измерений  $\xi'$  и  $\xi''$  некоторых полярных жидкостей, выполненных указанным методом при длине волны  $\lambda=3,21$  см и температуре  $t=20$  °С. Там же приведены значения  $\xi'$  и  $\xi''$  тех жидкостей, которые получены методом переменных толщин (1, 2). Как следует из таблицы, между величинами  $\xi'$ , полученными этими двумя методами имеется хорошее согласие, тогда как значение  $\xi''$  определяемых по нашему методу сказывается несколько ниже по величине  $\xi''$ , полученных по методу [1].

Таблица

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ  $\xi'$  И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ  $\xi''$   
ЦИКЛОПЕНТАНОЛА ПРИ ДЛИНЕ ВОЛНЫ  $\lambda = 3,21$  см И  $T=20$ °С

Длина волны $\lambda$ (в см)	Методом Поли-Малова (2)		Предлагаемым вариационным методом	
	$\xi'$	$\xi''$	$\xi'$	$\xi''$
3,21	12,4	3,75	11,8	3,73
0,71	4,68	4,90	4,70	4,76

В практике высокочастотных измерений диэлектрических параметров полярных жидкостей и растворов часто используются методы, основанные на измерении отражения электромагнитной волны от короткозамкнутой на конце волноводной или флоксимальной ячейки с исследуемой жидкостью, при условии, что толщина в ячейке регулируема [3, 4]. Обладая сравнительно высокой точностью измерения, возможностью учета систематических ошибок и рядом других достоинств эти методы, однако весьма трудоемки и требуют нахождения всей экспериментальной зависимости модуля коэффициента отражения электромагнитной волны ( $\rho$ ) или коэффициента стоячей волны ( $\eta$ ) от толщины слоя жидкости в ячейке  $l$ , что технически не всегда возможно, в особенности в диапазоне сверхвысоких частот (СВЧ) — сантиметровые и миллиметровые волны. Кроме того, методы переменной толщины имеют ограниченную сферу применения; они удобны лишь для измерения диэлектрических параметров жидкостей, обладающих в диапазоне сверхвысоких частот средними и малыми потерями. При заметных диэлектрических потерях в жидкости зависимость ( $\rho$ ) или  $\eta$  от  $l$  имеет лишь один экстремум (максимум или минимум) в своем ходе, что естественно, исключает возможность применения метода переменных толщин (1, 2, 4), базирующего на измерении расстояния между минимумами зависимости ( $\rho$ ) или  $\eta$  от  $l$  и отношения ( $\rho$ ) или  $\eta$  в точках максимума этой зависимости. Как показано в [5], из-за больших систематических ошибок указанные методы [1–3] неприемлемы также и для измерения диэлектрических параметров слабополярных жидкостей, обладающих в диапазоне сверхвысоких частот малыми потерями.

#### Заключение

Разработанный новый вариационный метод измерения диэлектрической проницаемости  $\xi'$  и диэлектрических потерь  $\xi''$  полярных жидкостей свободен от перечисленных выше недостатков. Он основан на измерении толщины слоя жидкости в ячейке, при котором имеет место минимум амплитуды отраженной волны ( $\rho$ ) или коэффициента стоячей волны  $\eta$ , и величины  $\eta_m$  при этой толщине жидкости.

Таким образом, циклопентанол и его растворы различной концентрации в циклопентане новым вариационного исследовались впервые и полученные результаты при сравнении с результатами других методов, выявило, что их показатели при этом минимальны в пределах 1,5–2,0%.

*Список литературы:*

1. Ахадов Я. Ю. Диэлектрические свойства чистых жидкостей. М.: Изд-во стандартов, 1972. 412 с.
2. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Физматгиз, 1963. 493 с.
3. Усейнова С. М. Разработка вариационного метода измерения диэлектрических параметров полярных жидкостей в диапазоне сверхвысоких частот. 1. Теоретические принципы вариационного метода измерения // Вестник Бакинского государственного университета. 2015. №1. С. 176-185.
4. Усейнова С. М. Разработка вариационного метода измерения диэлектрических параметров полярных жидкостей в диапазоне сверхвысоких частот. 2. Графический метод решения исходных уравнений. Баку // Вестник Бакинского государственного университета. 2016. №1. С. 177-188.
5. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1965.

*References:*

1. Akhadov, Ya. Yu. (1972). Dielektricheskie svoistva chistykh zhidkостей. Moscow. (in Russian).
2. Brandt, A. A. (1963). Issledovanie dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh. Moscow. (in Russian).
3. Useinova, S. M. (2015). Razrabotka variatsionnogo metoda izmereniya dielektricheskikh parametrov polyarnykh zhidkостей v diapazone sverkhvysokikh chastot. 1. Teoreticheskie printsipy variatsionnogo metoda izmereniya. *Vestnik Bakinskogo gosudarstvennogo universiteta*, (1), 176-185. (in Russian).
4. Useinova, S. M. (2016). Razrabotka variatsionnogo metoda izmereniya dielektricheskikh parametrov polyarnykh zhidkостей v diapazone sverkhvysokikh chastot. 2. Graficheskii metod resheniya iskhodnykh uravnenii. Baku. *Vestnik Bakinskogo gosudarstvennogo universiteta*, (1), 177-188. (in Russian).
5. Kharvei, A. F. (1965). Tekhnika sverkhvysokikh chastot. Moscow. (in Russian).

*Работа поступила  
в редакцию 20.11.2021 г.*

*Принята к публикации  
28.11.2021 г.*

*Ссылка для цитирования:*

Усейнова С. М. Изучение диэлектрических, поляризационных свойств циклопентанола и его растворов в циклопентане новым вариационным методом // Бюллетень науки и практики. 2021. Т. 7. №12. С. 12-18. <https://doi.org/10.33619/2414-2948/73/05>

*Cite as (APA):*

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>