

УДК 537.226.5, 538.956

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-1-102-110

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖИДКОГО КРИСТАЛЛА ЖК-1289

Емельянов В. А.

*Московский государственный областной университет
141014, Московская область, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24, Российская
Федерация*

Аннотация. Целью статьи является экспериментальное исследование диэлектрической проницаемости в СВЧ-диапазоне и проведение числовой аппроксимации частотных зависимостей диэлектрической проницаемости нематического жидкого кристалла.

Процедура и методы исследования. На частоте 39 ГГц измерения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь проводились волноводным методом, а на частотах до 10 МГц – ёмкостным методом.

Результаты проведённого исследования. Получены экспериментальные значения диэлектрической проницаемости нематического жидкого кристалла ЖК-1289 на частоте 39 ГГц. Проведена числовая аппроксимация диэлектрических спектров. Рассчитаны времена дипольной релаксации, связанные с вращением молекул вокруг короткой и длинной осей, и соответствующие энергии активации.

Теоретическая/практическая значимость. Получены значения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь, необходимые для оценки эксплуатационных характеристик рабочих тел устройств отображения информации.

Ключевые слова: жидкий кристалл, диэлектрическая проницаемость, время релаксации, энергия активации

DIELECTRIC PROPERTIES OF LIQUID CRYSTAL LC-1289

V. Emelyanov

*Moscow Region State University
ul. Very Voloshinoi 24, 141014 Mytishchi, Moscow region, Russian Federation*

Abstract. Purpose. We examine experimentally the permittivity in the microwave range and approximate numerically the frequency dependences of the permittivity of a nematic liquid crystal.

Methodology and Approach. At a frequency of 39 GHz, measurements of the permittivity and dielectric loss are performed using the waveguide method, and at frequencies up to 10MHz, using the capacitive method.

Results. Experimental values of the permittivity of a nematic liquid crystal LC-1289 at a frequency of 39 GHz are obtained. Numerical approximation of dielectric spectra is performed. The dipole relaxation times associated with the rotation of molecules around the short and long axes and the corresponding activation energies are calculated.

Theoretical and Practical Implications. The values of the permittivity and dielectric loss are obtained for evaluating the performance characteristics of the working bodies of information display devices.

Keywords: liquid crystal, dielectric constant, relaxation time, activation energy

Введение

Применение жидких кристаллов в различных областях науки и техники, в частности в устройствах отображения информации, во многом определяется их диэлектрическими свойствами. Наиболее точным методом, дающим сведения о диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерях, является диэлектрическая спектроскопия. Существует много статей, посвящённых изучению диэлектрических свойств жидких кристаллов в диапазоне частот до 10^7 Гц. Работы, изучающие измерения диэлектрической проницаемости на более высоких частотах, достаточно редки, что обусловлено определёнными сложностями. Так, для измерения диэлектрической проницаемости на частотах меньших 10^7 Гц можно использовать стандартные измерительные мосты. На частотах выше 10^7 Гц большое влияние оказывают сопротивление и индуктивность соединительных проводов и электродов, включённых последовательно с измерительной ячейкой. При этом измеренные ёмкость и сопротивление измерительной ячейки могут не совпадать с истинными значениями.

Целью данной работы является экспериментальное исследование диэлектрической проницаемости в СВЧ-диапазоне и проведение числовой аппроксимации частотных зависимостей диэлектрической проницаемости нематического жидкого кристалла.

Объект исследования и методика измерений

В качестве объекта исследования был выбран нематический жидкий кристалл ЖК-1289 на основе цианбифенилов, обладающий положительной анизотропией диэлектрической проницаемости. Измерения диэлектрической проницаемости и диэлектрических потерь жидкого кристалла проводились на частоте 39 ГГц волноводным методом вариации толщины жидкого диэлектрика [1; 2]. Данный метод основан на измерении изменения коэффициента отражения электромагнитной волны от поверхности жидкости при изменении её толщины.

Ориентация директора жидкого кристалла задавалась постоянным магнитным полем индукцией 0,25 Тл.

Результаты измерений и их анализ

Полученные значения продольной ϵ'_{\parallel} и поперечной ϵ'_{\perp} компонент действительной части комплексной диэлектрической проницаемости при различных температурах представлены на рис. 1.

Значения ϵ'_{\parallel} с увеличением температуры уменьшаются. Значения ϵ'_{\perp} в пределах погрешности не зависят от температуры до 326 К, а вблизи фазового перехода увеличиваются. $\epsilon'_{\text{из}}$ в рассматриваемом диапазоне не зависит от температуры.

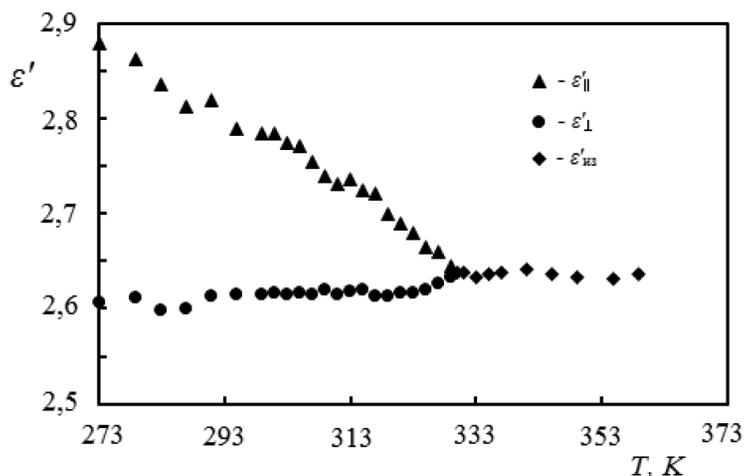


Рисунок 1 / Figure 1

Температурная зависимость продольной $\epsilon'_{||}$ и поперечной ϵ'_{\perp} компонент действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ЖК-1289 в нематической фазе и $\epsilon'_{из}$ в изотропной фазе.

Temperature dependence of longitudinal $\epsilon'_{||}$ and transverse ϵ'_{\perp} components of the real part of the complex permittivity of LC-1289 in the nematic phase and in the isotropic phase $\epsilon'_{isotropic}$.

Источник: данные автора.

Рассчитанные по экспериментальным данным величины показателей преломления при комнатной температуре составили: для необыкновенной волны $n_e = \sqrt{\epsilon_{||}} = 1,67$ и для обыкновенной волны $n_o = \sqrt{\epsilon_{\perp}} = 1,62$. Полученные значения находятся в согласии со значениями показателей преломления, определёнными оптическим методом на длине волны 633 нм: $n_e = 1,68$ и $n_o = 1,52$ [3]. Таким образом, можно считать, что на частоте 39 ГГц из диэлектрической поляризации исключается вклад, связанный с вращением молекул жидкого кристалла вокруг коротких и длинных осей. Значения $\epsilon'_{||}$ и ϵ'_{\perp} определяются поляризуемостью молекул и параметром ориентационного порядка. Согласно теории Майера-Мейера [4] высокочастотная анизотропия диэлектрической проницаемости $\Delta\epsilon$ пропорциональна параметру ориентационного порядка S :

$$\Delta\epsilon \sim \rho\Delta\alpha S, \quad (1)$$

где $\Delta\alpha$ – анизотропия поляризуемости, ρ – плотность НЖК.

С учётом того, что изменение плотности в температурной области существования нематической фазы мало [5], по температурной зависимости $\Delta\epsilon$ (рис. 2) можно судить об изменении параметра S .

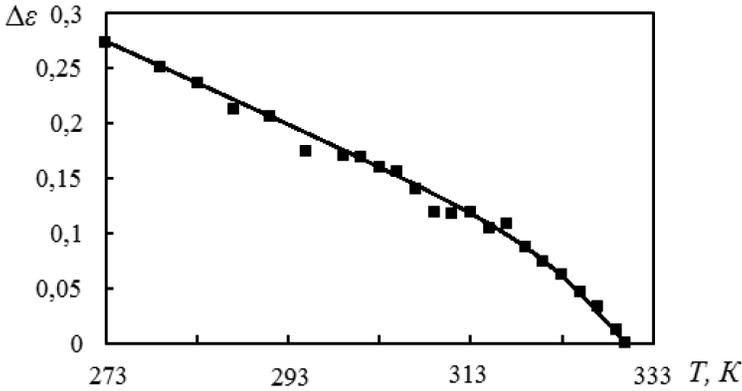


Рисунок 2 / Figure 2

Температурная зависимость анизотропии диэлектрической проницаемости ЖК-1289 на частоте 39 ГГц.

Temperature dependence of the permittivity anisotropy of LC-1289 at a frequency of 39 GHz.

Источник: данные автора.

Высокочастотные значения диэлектрической проницаемости позволяют проанализировать дисперсионные кривые диэлектрической проницаемости в широком диапазоне частот. Значения диэлектрической проницаемости в диапазоне частот 10^3 – 10^7 Гц были получены ёмкостным методом [6; 7] при помощи прецизионного анализатора WK 65120P.

Анализ частотной зависимости продольной компоненты комплексной диэлектрической проницаемости ЖК-1289 проводился с помощью эмпирического уравнения Коула-Коула для случая с распределённым временем релаксации [8; 9]:

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon - \varepsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau_0)^{1-\alpha}}, \quad (2)$$

где ε и ε_∞ – статическая и высокочастотная диэлектрические проницаемости, α – коэффициент распределения времени релаксации ($0 < \alpha < 1$), τ_0 – наиболее вероятное время релаксации, ω – циклическая частота. Из уравнения (2) для $\varepsilon'_{||}$ и $\varepsilon''_{||}$ следует:

$$\varepsilon'_{||} = \varepsilon_{||\infty} + (\varepsilon_{||} - \varepsilon_{||\infty}) \frac{1 + (\omega\tau_{||})^{1-\alpha} \sin \frac{\pi\alpha}{2}}{1 + 2(\omega\tau_{||})^{1-\alpha} \sin \frac{\pi\alpha}{2} + (\omega\tau_{||})^{2(1-\alpha)}}, \quad (3)$$

$$\varepsilon''_{||} = (\varepsilon_{||} - \varepsilon_{||\infty}) \frac{(\omega\tau_{||})^{1-\alpha} \cos \frac{\pi\alpha}{2}}{1 + 2(\omega\tau_{||})^{1-\alpha} \sin \frac{\pi\alpha}{2} + (\omega\tau_{||})^{2(1-\alpha)}}. \quad (4)$$

При $\alpha = 0$ уравнения (3) и (4) переходят в уравнения Дебая.

Числовая аппроксимация измеренных при температуре 273 К значений ϵ'_{\parallel} , проведённая по формуле (3), представлена кривой 1 на рис. 3. Кривая 1 построена при следующих параметрах: $\alpha = 0,06$, $\epsilon_{\parallel} = 12,00$, $\epsilon_{\parallel\infty} = 2,88$ и $\tau_{\parallel} = 4,98 \cdot 10^{-7}$ с. Из рисунка видно, что данная аппроксимация даёт достаточно хорошее совпадение расчётной дисперсии продольной компоненты диэлектрической проницаемости с экспериментальными данными.

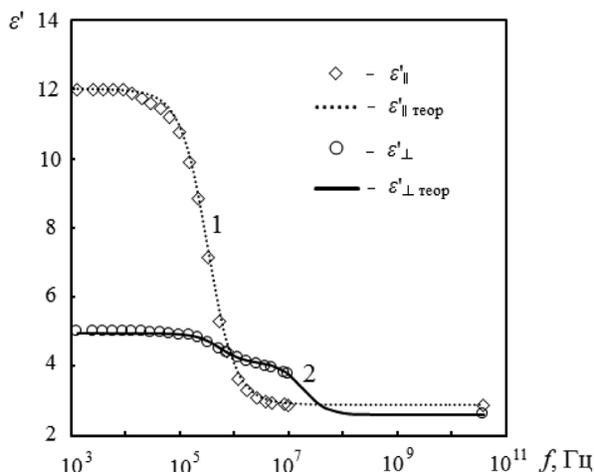


Рисунок 3 / Figure 3

Частотные зависимости продольной ϵ'_{\parallel} и поперечной ϵ'_{\perp} компонент действительной части комплексной диэлектрической проницаемости ЖК-1289 при $T = 273$ К.

Frequency dependences of longitudinal ϵ'_{\parallel} and transverse ϵ'_{\perp} components of the real part of the complex permittivity of LC-1289 at $T = 273$ K.

Источник: точки отложены по данным автора, кривая 1 построена автором по уравнению Коула и Коула [8; 9], кривая 2 построена автором по уравнению Бергмана, Роберти и Смита [10].

Из представленных на рис. 3 результатов также видно, что для поперечной компоненты ϵ'_{\perp} наблюдаются две области дисперсии. При этом анизотропия диэлектрической проницаемости $\Delta'\epsilon = \epsilon'_{\parallel} - \epsilon'_{\perp}$ дважды меняет знак.

В случае нескольких независимых релаксационных процессов диэлектрическая релаксация описывается уравнением [10]:

$$\frac{\epsilon' - \epsilon_{\infty}}{\epsilon - \epsilon_{\infty}} = \sum_k \frac{C_k}{1 + (\omega\tau_k)^2}, \quad \frac{\epsilon''}{\epsilon - \epsilon_{\infty}} = \sum_k \frac{C_k \omega\tau_k}{1 + (\omega\tau_k)^2}, \quad (5)$$

где C_k – параметр, характеризующий вклад, вносимый каждым независимым релаксационным процессом ($\sum C_k = 1$). Из уравнения (5) для ϵ'_{\perp} и ϵ''_{\perp} следует:

$$\epsilon'_{\perp} = \epsilon_{\infty} + \frac{(\epsilon_{\perp} - \epsilon_{\perp\infty})C_1}{1 + (\omega\tau_{\perp 1})^2} + \frac{(\epsilon_{\perp} - \epsilon_{\perp\infty})C_2}{1 + (\omega\tau_{\perp 2})^2}, \quad (6)$$

$$\varepsilon''_{\perp} = \frac{(\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_{\perp\infty})\omega\tau_{\perp 1}C_1}{1 + (\omega\tau_{\perp 1})^2} + \frac{(\varepsilon_{\perp} - \varepsilon_{\perp\infty})\omega\tau_{\perp 2}C_2}{1 + (\omega\tau_{\perp 2})^2}. \quad (7)$$

Результаты числовой аппроксимации, проведённой по формуле (6), представлены кривой 2 на рис. 3. Кривая 2 построена при следующих параметрах: $\varepsilon_{\perp} = 4,95$, $\varepsilon_{\perp\infty} = 2,61$, $\tau_{\perp 1} = 2,93 \cdot 10^{-7}$ с, $C_1 = 0,36$, $\tau_{\perp 2} = 8,25 \cdot 10^{-9}$ с, $C_2 = 0,64$. Полученная кривая также хорошо согласуется с экспериментальными данными.

По экспериментальным и полученным числовой аппроксимацией данным построены диаграммы Коула-Коула, представленные на рис. 4.

Из рис. 4а видно, что аппроксимация экспериментальных значений $\varepsilon''_{\parallel}$, проведённая по формулам Коула и Коула (при $\alpha = 0,06$) для распределённого времени релаксации (кривая 1), даёт лучшее согласие с экспериментальными данными по сравнению с расчётами, проведёнными по формулам Дебая (при $\alpha = 0$) для одного времени релаксации (кривая 2).

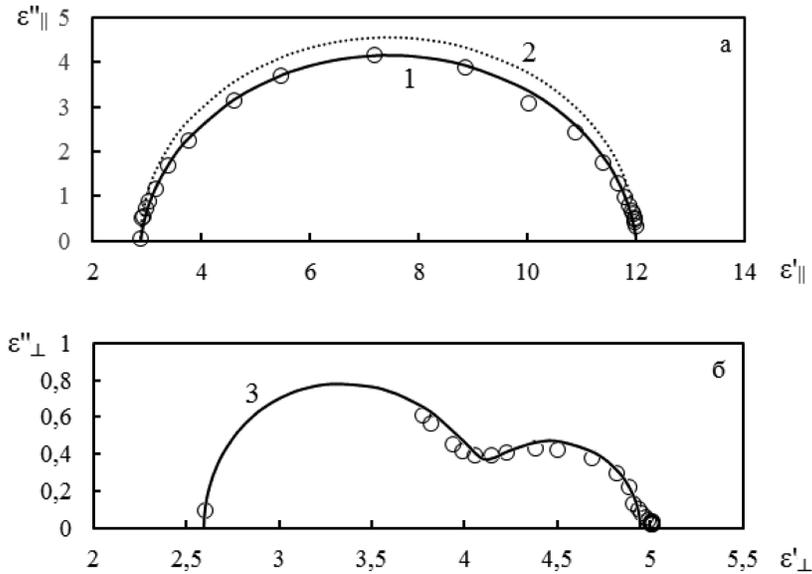


Рисунок 4 / Figure 4

Диаграммы Коула-Коула для а) продольной компоненты диэлектрической проницаемости (кривая 1 при $\alpha = 0,06$, кривая 2 при $\alpha = 0$) и б) поперечной компоненты диэлектрической проницаемости ЖК-1289.

Cole-Cole diagrams for (a) the longitudinal component of the permittivity (curve 1 at $\alpha = 0,06$, curve 2 at $\alpha = 0$) and (b) the transverse component of the permittivity of LC-1289.

Источник: точки отложены по данным автора, кривые 1, 2 построены автором по уравнениям Коула и Коула [8; 9], кривая 3 построена автором по уравнениям Бергмана, Роберти и Смита [10].

Времена релаксации τ_{\parallel} и $\tau_{\perp 1}$, связанные с вращением молекул вокруг короткой оси, определялись через частоты, на которые приходился максимум диэлектри-

ческих потерь ϵ''_{\parallel} и ϵ''_{\perp} . Время $\tau_{\perp 2}$, связанное с вращением молекул вокруг длинной оси, рассчитывалось по формуле, полученной из уравнений Дебая:

$$\tau_{\perp 2} = \frac{1}{\omega} \frac{\epsilon''_{\perp}}{\epsilon'_{\perp} - \epsilon'_{\perp\infty}},$$

где ϵ'_{\perp} и ϵ''_{\perp} действительная и мнимая части диэлектрической проницаемости, измеренные на частоте $f = 10$ МГц ($\omega = 2\pi f$), $\epsilon'_{\perp\infty}$ – диэлектрическая проницаемость, измеренная на частоте 39 ГГц.

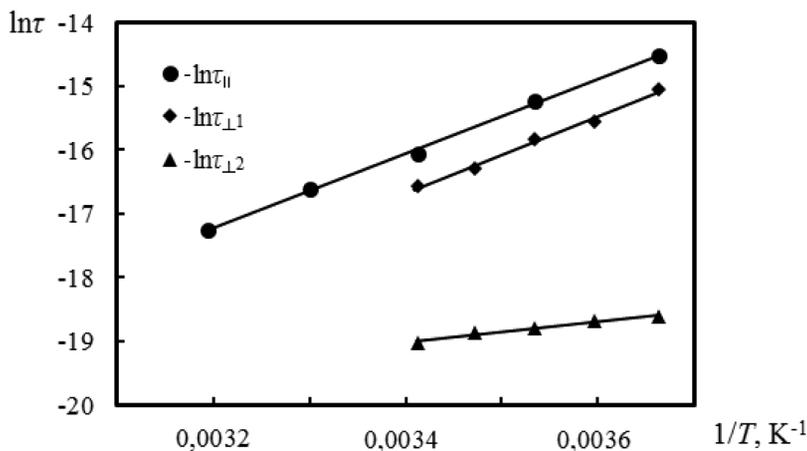


Рисунок 5 / Figure 5

Зависимость $\ln\tau$ от $1/T$ для ЖК-1289.
Dependence of $\ln\tau$ on $1/T$ for LC-1289.

Источник: данные автора.

Полученные температурные зависимости времён релаксации позволили рассчитать значения энергии активации соответствующих процессов. Энергия активации $E_{\perp 1} = 50,2$ кДж/моль первого релаксационного процесса для поперечной компоненты диэлектрической проницаемости близка к значению $E_{\parallel} = 48,9$ кДж/моль, полученному для продольной компоненты диэлектрической проницаемости. А энергия активации второго релаксационного процесса для поперечной компоненты диэлектрической проницаемости оказалась значительно меньше, всего 13,9 кДж/моль.

Заключение

Волноводный метод позволяет определять значения диэлектрической проницаемости на частоте, при которой процессы, связанные с вращением длинных молекул жидкого кристалла вокруг короткой и длинной осей, можно считать «замороженными». Полученные данные по комплексной диэлектрической проницаемости нематического жидкого кристалла ЖК-1289 в СВЧ-диапазоне позволили провести числовую аппроксимацию диэлектрического спектра в диа-

пазоне частот 10^3 – 10^{10} Гц. Установлено, что частотная зависимость поперечной компоненты диэлектрической проницаемости ЖК-1289 описывается суммой двух дебаевских процессов. Анизотропия диэлектрической проницаемости в рассматриваемом частотном диапазоне дважды меняет свой знак.

Статья поступила в редакцию 12.11.2019 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Емельянов В. А., Шубин А. В. Методика измерения диэлектрической проницаемости нематических жидких кристаллов в СВЧ-диапазоне // Вестник Московского государственного областного университета (Электронный журнал). 2012. № 3. С. 116–119. URL: <https://vestnik-mgou.ru/ru/Articles/View/206> (дата обращения: 19.12.2019).
2. Брандт А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. 404 с.
3. Электрически контролируемые анизотропные жидкокристаллические волноводы / Гончаренко И. А., Кабанова О. С., Мельникова Е. А., Романов О. Г., Рушнова И. И., Толстик А. Л. // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2017. № 2. С. 4–9.
4. Maier W., Meier G. Eine einfache Theorie der dielektrischen Eigenschaften homogen orientierter kristallinüssiger Phasen des nematischen Typs // Zeitschrift für Naturforschung A. 1961. Vol. 16. Iss. 3. P. 262–267.
5. Де Жё В. Физические свойства жидкокристаллических веществ. М.: Мир, 1982. 153 с.
6. Barsoukov E., Macdonald J. R. Impedance spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. Hoboken: Wiley Publ., 2018. 528 p.
7. Raju G. G. Dielectrics in electric fields: Tables, Atoms, and Molecules; second edition. Boca Raton: CRC Press Publ., 2016. 751 p.
8. Cole K. S.; Cole R. H. Dispersion and Absorption in Dielectrics – I Alternating Current Characteristics // The Journal of Chemical Physics. 1941. Vol. 9. Iss. 4. P. 341–352.
9. Cole K. S.; Cole R. H. Dispersion and Absorption in Dielectrics – II Direct Current Characteristics // The Journal of Chemical Physics. 1942. Vol. 10. Iss. 2. P. 98–105.
10. Bergmann K., Roberti D. M., Smyth C. P. Microwave absorption and molecular structure in liquids. XXXI. Analysis in terms of two relaxation times for some aromatic ethers // The Journal of Chemical Physics. 1960. Vol. 64. Iss. 5. P. 665–667.

REFERENCES

1. Emel'yanov V. A., Shubin A. V. [Methodology For Measuring Dielectric Permeability Of Nematic Liquid Crystals In The Microwave Range]. In: *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo oblastnogo universiteta (Elektronnyi zhurnal)* [Bulletin of Moscow Regional State University (e-journal)], 2012, vol. 3, pp. 116–119. Available at: <https://vestnik-mgou.ru/ru/Articles/View/206> (accessed: 19.12.2019).
2. Brandt A. A. *Issledovanie dielektrikov na sverkhvysokikh chastotakh* [Study of dielectrics at ultrahigh frequencies]. Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury Publ., 1963. 404 p..
3. Goncharenko I. A., Kabanova O. S., Mel'nikova E. A., Romanov O. G., Rushnova I. I., Tolstik A. L. [Electrically controlled anisotropic liquid crystal waveguides]. In: *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika* [Journal of the Belarusian State University. Physics], 2017, no. 2, pp. 4–9.

4. Maier W., Meier G. Eine einfache Theorie der dielektrischen Eigenschaften homogen orientierter kristallinlyssiger Phasen des nematischen Typs. In: *Zeitschrift für Naturforschung A*, 1961, vol. 16, iss. 3, pp. 262–267.
5. De Zhe V. *Fizicheskie svoystva zhidkokristallicheskich veshchestv* [De V. Physical properties of liquid crystalline substances]. Moscow, Mir Publ., 1982. 153 p.
6. Barsoukov E., Macdonald J. R. Impedance spectroscopy: Theory, Experiment, and Applications. Hoboken, Wiley Publ., 2018. 528 p.
7. Raju G. G. Dielectrics in electric fields: Tables, Atoms, and Molecules; second edition. Boca Raton, CRC Press Publ., 2016. 751 p.
8. Cole K. S.; Cole R. H. Dispersion and Absorption in Dielectrics – I Alternating Current Characteristics. In: *The Journal of Chemical Physics*, 1941, vol. 9, iss. 4, pp. 341–352.
9. Cole K. S.; Cole R. H. Dispersion and Absorption in Dielectrics – II Direct Current Characteristics. In: *The Journal of Chemical Physics*, 1942, vol. 10, iss. 2, pp. 98–105.
10. Bergmann K., Roberti D. M., Smyth C. P. Microwave absorption and molecular structure in liquids. XXXI. Analysis in terms of two relaxation times for some aromatic ethers. In: *The Journal of Chemical Physics*, 1960, vol. 64, iss. 5, pp. 665–667.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Емельянов Владимир Анатольевич – доцент, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики Московского государственного областного университета; e-mail: vladanemel@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Vladimir A. Emelyanov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of General physics, Moscow Region State University; e-mail: vladanemel@mail.ru

ПРАВИЛЬНАЯ ССЫЛКА НА СТАТЬЮ

Емельянов В. А. Диэлектрические свойства жидкого кристалла ЖК-1289 // Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-Математика. 2020. №1. С. 102-110.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-1-102-110

FOR CITATION

Emelyanov V. A. Dielectric properties of liquid crystal LCD-1289. In: Bulletin of the Moscow state regional University. Series: Physics-Mathematics, 2020, no. 1, pp. 102–110.

DOI: 10.18384/2310-7251-2020-1-102-110