Научная статья
УДК 541.182.022:532.135
DOI: 10.18384/2949-5067-2025-1-17-27

ВЯЗКОУПРУГОСТЬ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО РАСТВОРА СИНТЕТИЧЕСКОГО ПОЛИПЕПТИДА В РАМКАХ СТРУКТУРНОЙ МОДЕЛИ

Вековищев М. П.*, Кирсанов Е. А.

Государственный социально-гуманитарный университет, г. Коломна, Московская обл., Российская Федерация
**Корреспондирующий автор, e-mail: mpv.71@mail.ru*

Поступила в редакцию 31.01.2025
Принята к публикации 07.02.2025

Аннотация
Цель: рассмотреть вязкоупругие характеристики лиотропного жидкого кристалла, а именно – раствора синтетического полипептида поли-*в*-бензил-аспартата (PBA) в *m*-крезоле, которые были получены при различных значениях амплитуды деформации.
Процедура и методы. Проведена аппроксимация экспериментальных данных динамических измерений уравнениями структурной реологической модели на отдельных интервалах циклической частоты сдвиговых колебаний.
Результаты. Показана возможность применения уравнений структурной модели для описания частотных зависимостей динамических модулей в условиях нелинейной вязкоупругости. Показано, что величина коэффициентов реологических уравнений зависит от амплитуды деформации в соответствии с положениями структурной модели.
Теоретическая и/или практическая значимость. Показано, что уравнения структурной реологической модели способны аппроксимировать экспериментальные данные динамических измерений в случае лиотропного жидкого кристалла. Реологические уравнения сохраняют свой вид при разных заданных значениях амплитуды деформации, которые находятся в области нелинейной вязкоупругости.
Ключевые слова: лиотропный жидкий кристалл, структурная реологическая модель, модули потерь, модули накопления, нелинейная вязкоупругость
Для цитирования:
Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Вязкоупругость жидкокристаллического раствора синтетического полипептида в рамках структурной модели // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. 2025. № 1. С. 17–27. https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-1-17-27

© CC BY Вековищев М. П., Кирсанов Е. А., 2025.

Original research article

VISCOELASTICITY OF LIQUID CRYSTAL SOLUTION OF SYNTHETIC POLYPEPTIDE WITHIN THE FRAMEWORK OF THE STRUCTURAL MODEL

M. Vekovishchev*, E. Kirsanov

State University of Humanities and Social Studies, Kolomna, Moscow region, Russian Federation
**Corresponding author, e-mail: mpv.71@mail.ru*

Received by the editorial office 31.01.2025
Accepted for publication 07.02.2025

Abstract
Aim. To consider the viscoelastic characteristics of a lyotropic liquid crystal, namely, a solution of the synthetic polypeptide poly-*б*-benzyl-aspartate (PBA) in *m*-cresol, which were obtained at different values of the strain amplitude.
Methodology. The experimental data of dynamic measurements were approximated by the equations of a structural rheological model at separate intervals of the cyclic frequency of shear vibrations.
Results. The possibility of using the equations of the structural model to describe the frequency dependences of dynamic modules in conditions of nonlinear viscoelasticity is shown. It is shown that the coefficients of the rheological equations depend on the amplitude of the deformation in accordance with the provisions of the structural model.
Research implications. It is shown that the equations of the structural rheological model are capable of approximating the experimental data of dynamic measurements in the case of a lyotropic liquid crystal. Rheological equations retain their form at different set values of the strain amplitude, which are in the region of nonlinear viscoelasticity.
Keywords: lyotropic liquid crystal, structural rheological model, loss modules, accumulation modules, nonlinear viscoelasticity
For citation:
Vekovishchev, M. P. & Kirsanov, E. A. (2025). Viscoelasticity of liguid crystal solution of synthetic polypeptide within the framework of the structural model. In: *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 1, 17–27. https://doi.org/10.18384/2949-5067-2025-1-17-27

Введение

Реологические свойства жидких кристаллов сходны со свойствами других структурированных систем [1], но интерпретация реологических кривых является достаточно трудной задачей, поскольку неориентированные жидкие кристаллы состоят из отдельных молекулярных доменов и демонстрируют тиксотропные свойства. Лиотропные жидкие кристаллы (ЛЖК) состоят из упорядоченных макромолекул в растворе (амфифильных молекул или растворимых макромолекул полимеров).

Различные виды ЛЖК показывают разные реологические свойства, например, кубическая фаза ЛЖК имеет большую вязкость, чем ламеллярная фаза.

Гексагональные и кубические мезофазы подобны гелю и демонстрируют предел текучести, типичный для пластичных суспензий [2].

Реологические кривые описывают зависимость реологических величин от внешних воздействий. Они позволяют судить о процессах стационарного и осциллирующего течения в структурированных жидкостях (суспензиях, эмульсиях, мицеллярных растворах и растворах полимеров). В результате динамических измерений получают зависимости модуля потерь G'' и модуля накопления G' от циклической частоты ω. Обычно такие измерения производят при малых амплитудах сдвиговых колебаний γ_0, чтобы уменьшить воздействие сдвиговой деформации на структуру вещества. Предполагается, что в области линейной вязкоупругости структура вещества не изменяется при изменении частоты колебаний [3].

Зависимости $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$ для некоторых лиотропных жидких кристаллов представлены в работах [4–7], но без какой-либо теоретической интерпретации.

В предлагаемой работе проводится анализ частотных зависимостей динамических модулей лиотропного жидкого кристалла на основе полимерных макромолекул с помощью реологических уравнений структурной модели [8].

Вязкоупругое поведение при осциллирующем течении

Рассмотрим реологическое поведение раствора синтетического полипептида поли-β-бензил-аспартата (PBA) с молекулярной массой 60000 и массовой концентрацией 33,2% в m-крезоле. Эта система находится в жидкокристаллическом состоянии при комнатной температуре, демонстрируя при наблюдении в микроскоп характерную текстуру в скрещенных поляроидах [9]. Растворы спиральных синтетических полипептидов можно отнести к лиотропным жидким кристаллам. Реологические измерения при стационарном течении в устройстве «конус-плоскость» показали существенные тиксотропные свойства образца, которые объясняли наличием некоторой структуры ЖК-доменов. Эта структура постепенно разрушается по мере увеличения скорости сдвига γ, и спонтанно восстанавливается при уменьшении γ или в состоянии покоя.

Динамические свойства раствора PBA были исследованы [9] на реометре RMS-7200 в геометрии конус-плоскость. Экспериментальные зависимости динамической вязкости $\eta'(\omega)$ и модуля накопления $G'(\omega)$ показаны точками на графиках (рис. 1–3). Важно отметить, что динамические модули чувствительны к амплитуде сдвиговой деформации γ_0, что авторы [9] объясняют разрушением структуры за счёт сдвига. Измеряемые величины η' и G' уменьшаются с переходом к более высоким значениям γ_0.

Неориентированные жидкие кристаллы являются структурированными системами, роль агрегатов в которых играют отдельные домены. Поэтому можно описать их реологические свойства с помощью структурной реологической модели [8; 10].

Будем использовать реологические уравнения для двух режимов осциллирующего течения на разных участках реологической кривой. Каждому режиму соответствует определённый характер изменения структуры вещества. В неупорядоченном (полидоменном) образце ЛЖК возможны следующие структурные изменения под действием сдвигового течения: разрушение доменов с уменьшением их размеров; формирование доменов с увеличением их размеров; сосуществование процессов разрушения и формирования доменов с преобладанием одного из них.

Если под действием сдвига домены способны только разрушаться (но не формируются за счёт сдвига), то уравнение для модуля потерь имеет вид [8]:

$$G''^{1/2} = \frac{g'\omega^{1/2}}{\omega^{1/2}+\chi'} + \eta'^{1/2}_{\infty}\omega^{1/2}\,. \qquad (1, \text{а})$$

Поскольку $\eta' = G''/\omega$, то можно записать уравнение для динамической вязкости:

$$\eta'^{1/2} = \frac{g'}{\omega^{1/2}+\chi'} + \eta'^{1/2}_{\infty}\,. \qquad (1, \text{б})$$

Коэффициент агрегации g' зависит от прочности связи между макромолекулами РВА, которая обеспечивает возникновение жидкокристаллических доменов с определённой упорядоченностью внутри образца. Величина g' должна возрастать с увеличением количества тех макромолекул РВА, которые упорядочены внутри доменов. Коэффициент χ' указывает на тенденцию к спонтанному разрушению доменов, что приводит к уменьшению размеров доменов и уменьшению вязкости. Коэффициент $\eta'^{1/2}_{\infty}$ описывает вязкость, возникающую за счёт обтекания отдельных (индивидуальных) макромолекул в некой условной «среде», находящейся в промежутке между жидкокристаллическими доменами.

Зависимость динамической вязкости от частоты $\eta'(\omega)$ показана на рис. 1.

Кривые $\eta'(\omega)$ опускаются вниз при увеличении заданного значения γ_0. Это означает, что динамические измерения проводились в области нелинейной вязкоупругости. Тем не менее аппроксимация уравнениями структурной модели возможна при всех заданных значениях γ_0.

За исключением трёх точек на интервале низких частот возможна аппроксимация уравнением (1), что показано сплошными линиями на графиках.

Аппроксимация проводится методом нелинейной регрессии в пакете Excel, где сумма квадратов разностей определяется выражением

$$\text{СКР} = \sum(G_i^{1/2} - G_{i\text{расч}}^{1/2})^2.$$

Кривая аппроксимации представлена в корневых координатах на рис. 2, *а*. Можно видеть, что при высоких частотах зависимость приближается к прямолинейной.

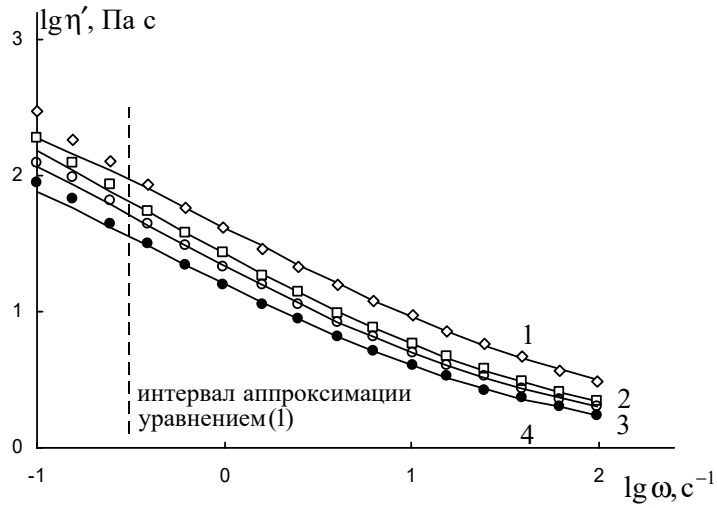

Рис. 1 / Fig. 1. Зависимость динамической вязкости раствора поли-β-бензил-аспартата (PBA) в *m*-крезоле от циклической частоты в двойных логарифмических координатах при различной амплитуде деформации сдвига γ_0: 10% (1); 25% (2); 50% (3); 99% (4) / Dependence of the dynamic viscosity of poly-β-benzyl-aspartate (PBA) solution in *m*-cresol as a function of cyclic frequency in double logarithmic coordinates at different amplitudes of shear deformation γ_0: 10% (1); 25% (2); 50% (3); 99% (4)

Источник: [9].

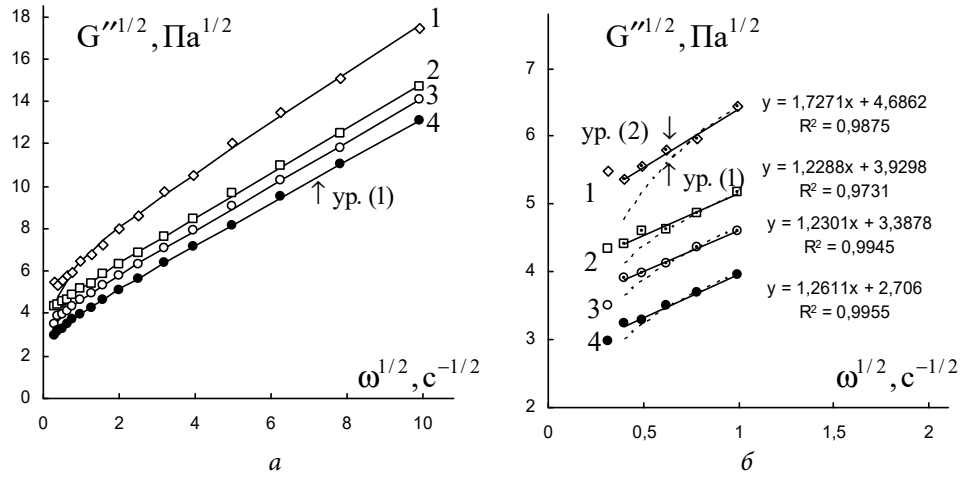

Рис. 2 / Fig. 2. Зависимость модуля потерь раствора поли-β-бензил-аспартата (PBA) в *m*-крезоле от циклической частоты в корневых координатах при различной амплитуде деформации сдвига γ_0: 10% (1); 25% (2); 50% (3); 99% (4):
а – на полном интервале частот; *б* – на интервале низких частот / Dependence of the loss modulus of poly-β-benzyl-aspartate (PBA) solution in *m*-cresol as a function of cyclic frequency in root coordinates at different amplitudes of shear deformation γ_0: 10% (1); 25% (2); 50% (3); 99% (4):
а – on the full frequency range; *б* – on the low frequency range

Источник: [9].

Допустим, что под действием сдвига возможно увеличение количества макромолекул, упорядоченных внутри в ЖК-доменов, и этот процесс идёт одновременно с разрушением доменов.

В этом случае можно использовать уравнение, полученное [8] для суспензий, растворов и расплавов полимеров, которое имеет вид:

$$G''^{1/2} \approx g'_0\omega^{1/2} + \Delta G''^{1/2} \ . \quad (2)$$

Коэффициент $\Delta G''^{1/2}$ может быть как отрицательным, так и положительным.

На рис. 2, *б* показан участок низких частот, где наблюдается постепенный переход от режима течения, которое описывается уравнением (1), к режиму течения, которое описывается уравнением (2). Отклонение самой первой экспериментальной точки от рассчитанной кривой может быть связано с тем, что структура вещества ещё не достигла равновесного состояния после начала эксперимента. Значения коэффициентов реологических уравнений, описывающих вязкие свойства, приведены в табл. 1.

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты уравнения для динамической вязкости и модуля потерь поли-β-бензил-аспартата (PBA) в *m*-крезоле при различных значениях амплитуды сдвиговой деформации γ_0 (%) / The coefficients of the equation for the dynamic viscosity and loss modulus of poly-β-benzyl-aspartate (PBA) in *m*-cresol at different values of the amplitude of shear deformation γ_0 (%)

γ_0 , %	10	25	50	99
g', Па$^{1/2}$	6,234	4,444	3,932	3,333
$\eta'^{1/2}_{\infty}$, (Па с) $^{1/2}$	1,158	1,041	1,023	0,990
χ', с$^{-1/2}$	0,176	0,078	0,084	0,111
g'/χ', (Па с)$^{1/2}$	35,43	57,28	46,69	30,10
$\eta'^{1/2}(0)$, (Па с)$^{1/2}$	36,59	58,32	47,71	31,09
g'_0, (Па с)$^{1/2}$	1,727	1,229	1,230	1,261
$\Delta G''^{1/2}$, Па$^{1/2}$	4,686	3,930	3,388	2,706

Источник: по данным авторов

Структурная модель предполагает, что увеличение значения γ_0 приводит к дополнительному разрушению структуры при каждом фиксированном значении частоты ω. Соответственно, должна уменьшаться динамическая вязкость η', что отражено на графике (рис. 1).

Изменение коэффициентов, приведённых в табл. 1, с увеличением заданной амплитуды деформации γ_0, позволяет сделать некоторые предположения о характере течения. Коэффициент $\eta'^{1/2}_{\infty}$ относится к движению отдельных макромолекул PBA. Поэтому он не должен существенно изменяться при изменении структуры ЖК-образца. Действительно, имеется крайне незначительное уменьшение величины $\eta'^{1/2}_{\infty}$ с увеличением γ_0. Напротив,

коэффициент g', примерно пропорциональный количеству макромолекул РВА внутри доменов, должен существенно уменьшаться при большем разрушении структуры, т. е. при увеличении γ_0, что и происходит.

Рассмотрим упругие характеристики жидкокристаллического раствора РВА.

Если под действием сдвига домены способны только разрушаться, то уравнение для модуля накопления имеет вид [8]:

$$G'^{1/2} = \frac{g''\omega^{1/2}}{\omega^{1/2}+\chi''} + \eta''^{1/2}_{\infty}\omega^{1/2}\,, \qquad (3, а)$$

Поскольку $\eta'' = G'/\omega$, то уравнение для динамической упругости η' приобретает вид:

$$\eta''^{1/2} = \frac{g''}{\omega^{1/2}+\chi''} + \eta''^{\,1/2}_{\infty}\,. \qquad (3, б)$$

Первое слагаемое представляет собой структурную часть модуля накопления (или динамической упругости), обусловленную упругостью доменов; второе слагаемое описывает часть модуля накопления (или динамической упругости), связанную с упругостью отдельных макромолекул РВА. Таким образом, упругие макромолекулы РВА и «упругие» домены, состоящие из упорядоченных макромолекул, можно представить в виде некоторых «молекулярных пружин». С увеличением частоты колебаний ω и, соответственно, амплитуды скорости сдвига $\omega\gamma_0$ «упругая» структура разрушается, и общая упругость вещества уменьшается. Соответственно, с ростом частоты уменьшается величина динамической упругости $\eta'' = G'(\omega)/\omega$ при одновременном некотором увеличении модуля G'.

При низких циклических частотах количество макромолекул РВА внутри доменов изменяется в результате наложения процесса разрушения доменов и процесса формирования доменов, происходящих с различными константами скорости. Тогда при низких частотах может наблюдаться участок, описываемый [8] уравнением:

$$G'^{1/2} \approx g''_0\omega^{1/2} + \Delta G'^{1/2}\,. \qquad (4)$$

Коэффициент $\Delta G'^{1/2}$ может быть как отрицательным, так и положительным.

Кривые частотной зависимости модуля накопления $G'(\omega)$ показаны на рис. 3. Их можно разделить на участки низких и высоких частот. Интервал аппроксимации уравнением (3) совпадает с интервалом аппроксимации уравнением (1) для зависимости и $G''(\omega)$.

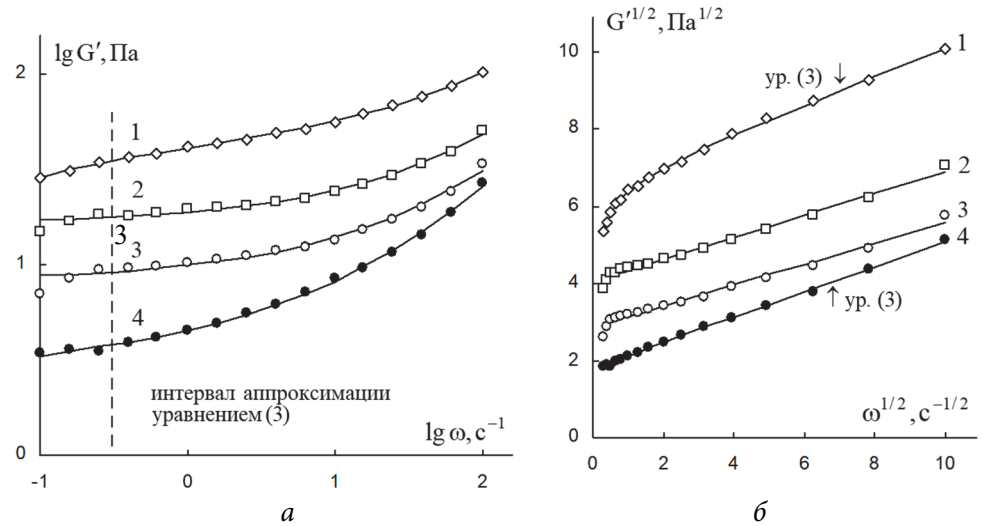

Рис. 3 / Fig. 3. Зависимость модуля потерь раствора поли-*β*-бензил-аспартата (PBA) в *m*-крезоле от циклической частоты при различной амплитуде деформации сдвига γ_0: 10% (1); 25% (2); 50% (3); 99% (4):
а – в двойных логарифмических координатах; *б* – в корневых координатах / Dependence of the loss modulus of poly-*β*-benzyl-aspartate (PBA) solution in *m*-cresol as a function of cyclic frequency at different amplitudes of shear deformation γ_0: 10% (1); 25% (2); 50% (3); 99% (4):
a – in double logarithmic coordinates; *б* – in root coordinates

Источник: [9].

Зависимость, близкая к прямолинейной, наблюдается (рис. 3, *б*) при наиболее высоких частотах, что показывает возможность применения уравнения (3). Значения коэффициентов реологического уравнения приведены в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты уравнения для динамической упругости и модуля накопления поли-*β*-бензил-аспартата (PBA) в *m*-крезоле при различных значениях амплитуды сдвиговой деформации γ_0 (%) / The coefficients of the equation for dynamic elasticity and storage modulus of poly-*β*-benzyl-aspartate (PBA) in *m*-cresol at different values of the amplitude of shear deformation γ_0 (%)

γ_0 , %	10	25	50	99
g'' , Па$^{1/2}$	6,501	4,025	2,876	1,845
$\eta''^{1/2}_{\infty}$, (Па с)$^{1/2}$	0,365	0,286	0,270	0,324
χ'' , с$^{-1/2}$	0,077	0	0	0,023
g''/χ'' , (Па с)$^{1/2}$	84,51	-	-	80,59
$\eta''^{1/2}(0)$, (Па с)$^{1/2}$	84,87	-	-	80,92

Источник: по данным авторов

Поскольку экспериментальные данные хорошо аппроксимируются уравнениями структурной модели при разных заданных значениях γ_0, то можно считать, что механизм осциллирующего течения не изменяется при переходе от одного значения амплитуды деформации γ_0 к другому. Это означает, что уравнения структурной реологической модели справедливы в области нелинейной вязкоупругости осциллирующего течения.

Изменение коэффициентов, приведённых в табл. 2, с увеличением амплитуды деформации γ_0 позволяет сделать некоторые предположения о характере течения. Коэффициент $\eta_\infty^{''\,1/2}$ относится к упругости системы отдельных макромолекул PBA. Поэтому он не должен существенно изменяться при изменении структуры ЖК-образца. Действительно, наблюдаются крайне незначительные изменения величины $\eta_\infty^{''\,1/2}$ с увеличением γ_0.

Напротив, коэффициент g'', примерно пропорциональный количеству макромолекул PBA внутри «упругих» доменов, должен существенно уменьшаться при более значительном разрушении структуры, т. е. при увеличении γ_0, что показано в табл. 2. Нужно отметить низкую величину коэффициента компактности χ'', вплоть до нуля.

Выводы

С помощью структурного подхода рассмотрено вязкоупругое поведение раствора синтетического полипептида поли-β-бензил-аспартата (PBA) в m-крезоле. Система демонстрирует жидкокристаллическое состояние при комнатной температуре, т. е. относится к лиотропным жидким кристаллам. Частотные зависимости динамических модулей $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$ были получены при различной амплитуде деформации γ_0. При этом величина динамических модулей уменьшалась с увеличением γ_0 при фиксированной частоте, т. е. измерения проводились в области нелинейной вязкоупругости.

Показано, что реологические уравнения структурной модели хорошо описывают реологические кривые $G'(\omega)$ и $G''(\omega)$. Величина некоторых коэффициентов реологических уравнений изменяется при изменении γ_0 в соответствии с положениями структурной модели. По приведённым графикам и результатам аппроксимации можно сделать вывод, что механизм осциллирующего течения остаётся неизменным при различных значениях амплитуды деформации, в том числе, в области нелинейной вязкоупругости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Larson R. G. The Structure and Rheology of Complex Fluids. N.Y., Oxford: Oxford University Press, 1999. 663 p.
2. Lyotropic liquid crystals for parenteral drug delivery / V. P. Chavda, S. Dawre, A. Pandya, L. K. Vora, D. H. Modh, V. Shah, D. J. Dave, V. Patravale // Journal of Controlled Release. 2022. Vol. 349. P. 533—549. DOI: 10.1016/j.jconrel.2022.06.062.
3. Шрамм Г. Основы практической реологии и реометрии / пер. с англ., под ред. В. Г. Куличихина. М.: КолосС, 2003. 312 с.

4. Palomo A. R. Study of the flow-induced structure and anisotropy in lyotropic liquid crystals for hierarchical composites: Licentiate Thesis of engineering. Sweden, Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2020. 52 p.
5. Absorption of CO_2 in lyotropic liquid crystals / S. Rodríguez-Fabià, M. Øyen, N. Winter-Hjelm, J. Norrman, R. Lund, G. H. Sørland, H. K. Knuutila, J. Sjöblom, K. G. Paso // Molecular Crystals and Liquid Crystals. 2020. Vol. 703. Iss. 1, P. 87—106. DOI: 10.1080/15421406.2020.1780830.
6. Hybrid molecular/mineral lyotropic liquid crystal system of CTAB and graphene oxide in water / Y. Shao, M. Iliut, I. Dierking, A. Vijayaraghavan // Carbon. 2021. Vol. 173. P. 105—114. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.10.089.
7. In Situ Visualization of the Structural Evolution and Alignment of Lyotropic Liquid Crystals in Confined Flow / A. Rodriguez-Palomo, V. Lutz-Bueno, Xiaobao Cao, R. Kádár, M. Andersson, M. Liebi // Small. 2021. Vol. 17. Iss. 7. Article no. 2006229. DOI: 10.1002/smll.202006229.
8. Кирсанов Е. А., Матвеенко В. Н. Вязкость и упругость структурированных жидкостей: монография. М.: Техносфера, 2022. 284 с.
9. Kiss G., Orrell T. S., Porter R. S. Rheology and rheo-optics of anisotropic poly-β-benzyl-aspartate gel // Rheological Acta. 1979. Vol. 18. P. 657–661. DOI: 10.1007/BF01520363.
10. Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Неньютоновское течение структурированных систем. XXXVII. Вязкоупругость полимерного композита глина / нейлон-11 // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2023. Т. 23. № 4. С. 67–75. DOI: 10.18083/LCAppl.2023.4.67.

REFERENCES

1. Larson, R. G. (1999). *The Structure and Rheology of Complex Fluids*. N.Y., Oxford: Oxford University Press.
2. Chavda, V. P., Dawre, S., Pandya, A., Vora, L. K., Modh, D. H., Shah, V., Dave, D. J. & Patravale, V. (2022). Lyotropic liquid crystals for parenteral drug delivery. In: *Journal of Controlled Release*, 349, 533—549. DOI: 10.1016/j.jconrel.2022.06.062.
3. Schramm, G. (2003). *A practical approach to rheology and rheometry*. Moscow: KolosS publ. (in Russ.).
4. Palomo, A. R. (2020). *Study of the flow-induced structure and anisotropy in lyotropic liquid crystals for hierarchical composites: Licentiate Thesis of engineering*. Sweden, Gothenburg: Chalmers University of Technology.
5. Rodríguez-Fabià, S., Øyen, M., Winter-Hjelm, N., Norrman, J., Lund, R., Sørland, G. H., Knuutila, H. K., Sjöblom, J. & Paso, K. G. (2020). Absorption of CO_2 in lyotropic liquid crystals. In: *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 70 (1), 87—106. DOI: 10.1080/15421406.2020.1780830.
6. Shao, Y., Iliut, M., Dierking, I. & Vijayaraghavan, A. (2021). Hybrid molecular/mineral lyotropic liquid crystal system of CTAB and graphene oxide in water. In: *Carbon*, 173, 105—114. DOI: 10.1016/j.carbon.2020.10.089.
7. Rodriguez-Palomo, A., Lutz-Bueno, V., Xiaobao, Cao, Kádár, R., Andersson, M. & Liebi, M. (2021). In Situ Visualization of the Structural Evolution and Alignment of Lyotropic Liquid Crystals in Confined Flow. In: *Small*, 17 (7), 2006229. DOI: 10.1002/smll.202006229.
8. Kirsanov, E. A. & Matveenko, V. N. (2022). *Viscosity and elasticity of structured liquids*. Moscow: Tekhnosfera publ. (in Russ.).

9. Kiss, G., Orrell, T. S. & Porter, R. S. (1979). Rheology and rheo-optics of anisotropic poly-β-benzyl-aspartate gel. In: *Rheological Acta*, 18, 657–661. DOI: 10.1007/BF01520363.
10. Vekovishchev, M. P. & Kirsanov, E. A. (2023). Non-Newtonian flow of structured systems. XXXVII. Viscoelasticity of polymer composite clay / nylon-11 polymer composite. In: *Liquid crystals and their Application*, 23 (4), 67–75. DOI: 10.18083/LCAppl.2023.4.67 (in Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Вековищев Михаил Петрович (г. Коломна, Московская обл.) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и химии Государственного социально-гуманитарного университета;
https://orcid.org/0000-0001-9100-9526; e-mail: mpv.71@mail.ru

Кирсанов Евгений Александрович (г. Коломна, Московская обл.) – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и химии Государственного социально-гуманитарного университета;
https://orcid.org/0000-0003-3030-7989; e-mail: Kirsanov47@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Mikhail P. Vekovishchev (Kolomna, Moscow region) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Physics and Chemistry, State University of Humanities and Social Studies;
https://orcid.org/0000-0001-9100-9526; e-mail: mpv.71@mail.ru

Evgeny A. Kirsanov (Kolomna, Moscow region) – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Assoc. Prof., Department of Physics and Chemistry, State University of Humanities and Social Studies;
https://orcid.org/0000-0003-3030-7989; e-mail: Kirsanov47@mail.ru