

Научная статья**УДК 541.182.022:532.135****DOI: 10.18384/2310-7251-2026-2-23-33****ВЯЗКОУПРУГОСТЬ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ПОЛИМЕРА
В РАМКАХ СТРУКТУРНОЙ РЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ****Вековищев М. П.*, Кирсанов Е. А.***Государственный социально-гуманитарный университет, Московская обл., г. Коломна,
Российская Федерация*** Корреспондирующий автор, e-mail: mpv.71@mail.ru**Поступила в редакцию 26.12.2025**Принята к публикации 12.01.2026***Аннотация****Цель:** рассмотреть реологическое поведение термотропного жидкокристаллического полимера (LC-5000) в области линейной вязкоупругости.**Процедура и методы.** Проведена аппроксимация экспериментальных данных уравнениями структурной реологической модели.**Результаты.** Показана связь коэффициентов реологических уравнений с температурой и фазовым состоянием полимера.**Теоретическая и/или практическая значимость.** Предложены уравнения, которые способны аппроксимировать экспериментальные данные частотных зависимостей модуля накопления и модуля потерь и описывают определённое структурное состояние расплава жидкокристаллического полимера.**Ключевые слова:** расплав жидкокристаллического полимера, линейная вязкоупругость, модуль накопления, модуль потерь, структурная реологическая модель**Для цитирования.**

Вековищев М. П., Кирсанов Е. А. Вязкоупругость жидкокристаллического полимера в рамках структурной реологической модели // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-математика. 2026. № 2. С. 23–33. <https://doi.org/10.18384/2310-7251-2026-2-23-33>

Original research article**VISCOELASTICITY OF A LIQUID CRYSTAL POLYMER WITHIN
THE FRAMEWORK OF A STRUCTURAL RHEOLOGICAL 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 26.12.2025**Accepted for publication 12.01.2026*

Abstract

Aim. To examine the rheological behavior of a thermotropic liquid-crystalline polymer (LC-5000) in the linear viscoelasticity region.

Methodology. Experimental data were approximated using the equations of a structural rheological model.

Results. The relationship between the coefficients of the rheological equations and the temperature and phase state of the polymer was demonstrated.

Research implications. Equations are proposed that can approximate experimental data on the frequency dependences of the storage and loss modulus and describe a specific structural state of the liquid crystalline polymer melt.

Keywords: liquid-crystalline polymer melt, linear viscoelasticity, storage modulus, loss modulus, structural rheological model

For citation.

Vekovishchev, M. P. & Kirsanov, E. A. (2026). Viscoelasticity of a liquid crystal polymer within the framework of a structural rheological model. In: *Bulletin of the Federal State University of Education. Series: Physics and Mathematics*, 2, pp. 23–33. <https://doi.org/10.18384/2310-7251-2026-2-23-33>

Введение

Термотропные жидкокристаллические полимеры (ЖК-полимеры) являются высокотемпературными полимерами, объединяющими в себе свойства обычных полимеров и свойства жидких кристаллов [1–4].

Макромолекулы ЖК-полимеров содержат жёсткие мезогенные группы, способные ориентироваться параллельно друг другу, создавая ориентационно упорядоченную структуру в объёме ЖК-полимера. Такой ориентационный порядок соответствует нематической ЖК-фазе и проявляется в виде специфической шлирен-текстуры при скрещённых поляроидах микроскопа. Образец ЖК-полимера содержит множество областей-доменов с одинаковой ориентацией мезогенных групп внутри одного домена. Такие полидоменные структуры существуют как в расплавах (термотропные полимерные жидкие кристаллы), так и в растворах (лиотропные полимерные жидкие кристаллы). Жёсткие мезогенные группы могут быть включены как в основную цепь полимера, так и в боковые цепи с помощью гибких спейсеров.

Термотропные жидкие кристаллы демонстрируют образование мезофазы в расплаве в определённом температурном диапазоне, между температурой плавления твёрдого кристалла и температурой просветления при переходе в изотропное состояние.

Реология нематических ЖК-полимеров демонстрирует определённое сходство с реологией изотропных полимерных расплавов и растворов. При этом исследуются неориентированные образцы в изотропном и жидкокристаллическом состоянии с помощью известных реологических приборов; вязкие и упругие свойства изотропных и анизотропных полимеров сравниваются между собой. Реологическое поведение ЖК-полимеров сильно зависит от термической и деформационной истории по сравнению с обычными полимерами. Поэтому для получения воспроизводимых реологических данных необходимо поддерживать одинаковые начальные условия.

Архитектура и морфология молекул ЖК-полимеров меняются в зависимости от температуры и скорости сдвига, что делает ЖК-полимеры термореологически сложными веществами. Сосуществование твёрдой, нематической и изотропной фаз также наблюдается при определённых температурах.

При интерпретации частотной зависимости модулей накопления и потерь первоначально проводят качественное описание: сравнение величины модулей $G''(\omega)$ и $G'(\omega)$, характер их изменения с частотой, возможность степенной зависимости $G' \sim \omega^n$ на отдельном интервале частот. По этим характеристикам изотропные и жидкокристаллические полимеры близки друг к другу [5]. При обычном реологическом поведении оба модуля уменьшаются с уменьшением угловой частоты ω . В районе малых частот (терминальная зона) наклон G' больше, чем у G'' в логарифмических координатах, $G'' > G'$, а динамическая вязкость имеет тенденцию к выходу на плато.

Нужно отметить попытки объяснения реологии ЖК-полимеров путём прямой аналогии с течением ориентированных жидких кристаллов [6].

Более глубокое понимание достигается при использовании известной концепции релаксационного спектра [7]. Полагают, что релаксационное поведение ЖК-полимеров сложнее, чем у гибких полимеров, из-за наличия полидоменной структуры. Кроме того, обнаружено, что при температуре расплава существует смесь нематического жидкого кристалла и твёрдого вещества. Из-за присутствия твёрдых кристаллов реология и релаксационное поведение становятся более сложными [8].

Будем рассматривать частотные зависимости модулей $G''(\omega)$ и $G'(\omega)$ расплава ЖК-полимера в рамках структурной реологической модели [9; 10].

Частотные зависимости динамических модулей ЖК-полимера (LC-5000)

В работе [7] методами реологии и оптической микроскопии исследован термотропный жидкокристаллический полимер LC-5000. Полимер LC-5000 (от Unichika, Иноуэ, Япония), представляет собой сополимер 80 мол. % пара-гидроксibenзойной кислоты и 20% полиэтилентерефталата со случайной последовательностью мономеров.

Реологические эксперименты проводились на установке Haake RheoStress 300 с параллельными пластинами с зазором 1 мм. Измерения модулей при развёртке частоты проводились при различных температурах (280, 285, 290, 295 и 310°C) с амплитудой деформации 5%, в области линейной вязкоупругости. Фазовое состояние вещества определялось с помощью дифференциального сканирующего калориметра и с помощью оптической микроскопии с нагревательным столиком при скрещенных поляризаторах. Было обнаружено, что образец полимера состоит из нерасплавленных твёрдых кристаллов и нематического жидкого кристалла. При увеличении температуры твёрдые кристаллы плавятся, пока не наступает состояние однородного нематического кристалла. По ДСК-термограмме определён диапазон плавления кристаллов примерно от 270 до 293°C и номинальная температура плавления 275°C. При

295°C в скрещённых поляроидах наблюдается нитевидная текстура, характерная для нематического состояния.

Частотные зависимости динамических модулей показаны на рис. 1 и рис. 3. Упругие свойства термотропного ЖК-полимера представлены на рис. 1 и рис. 2.

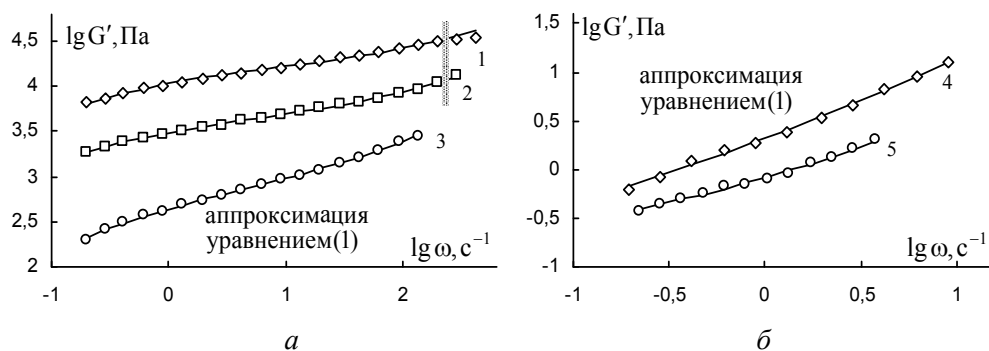


Рис. 1 / Fig. 1. Кривые зависимости модуля накопления от циклической частоты в двойных логарифмических координатах для расплава термотропного ЖК-полимера (LC-5000):

а – при температурах (в °C): 280 (1), 285 (2), 290 (3),

б – при температурах (в °C): 295 (4), 310 (5).

Вертикальной линией обозначена граница интервала аппроксимации уравнением (1) / Curves of the storage modulus versus cyclic frequency in double-logarithmic coordinates for a thermotropic LC polymer melt (LC-5000):

а – at temperatures (in °C): 280 (1), 285 (2), 290 (3),

б – at temperatures (in °C): 295 (4), 310 (5).

The vertical line indicates the boundary of the approximation interval by equation (1).

Источник: [7].

Модуль накопления при 280°C, 285°C и 290°C больше модуля потерь, что принято считать поведением «вязкоупругого твёрдого тела» ($G' > G''$). Модуль накопления становится меньше модуля потерь при 295°C и 310°C, демонстрируя поведение «вязкоупругой жидкости» ($G'' > G'$). Однако типичного реологического поведения при низких частотах в «терминальной зоне» не наблюдается.

Для использования уравнений структурной реологической модели экспериментальные данные представлены в корневых координатах (рис. 2).

Для аппроксимации выберем интервал частот до 225 с⁻¹, чтобы исключить точки, демонстрирующие аномальное снижение модулей.

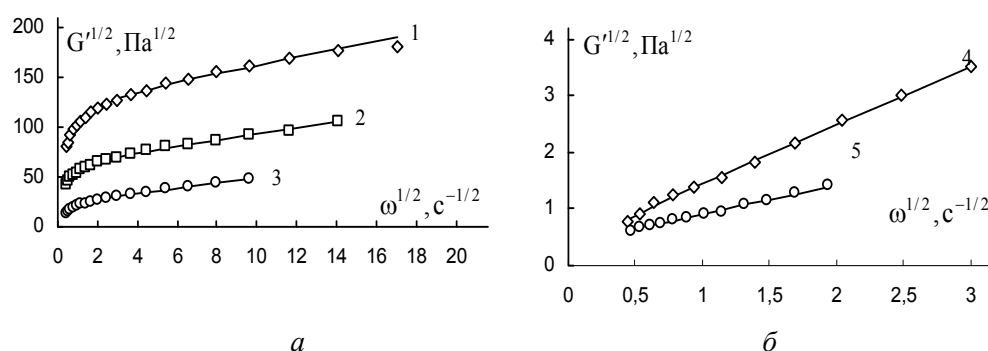


Рис. 2 / Fig. 2. Зависимость модуля накопления от циклической частоты для расплава термотропного ЖК-полимера (LC-5000) в корневых координатах:

a – при температурах (в °C): 280 (1), 285 (2), 290 (3);

б – при температурах (в °C): 295 (4), 310 (5) /

Storage modulus as a function of cyclic frequency for a thermotropic LC polymer melt (LC-5000) in square root coordinates:

a – at temperatures (in °C): 280 (1), 285 (2), 290 (3);

б – at temperatures (in °C): 295 (4), 310 (5)

Источник: [7].

Используем следующие реологические уравнения [9; 10] для частотной зависимости модулей накопления и потерь:

$$G'^{1/2} = \frac{g'' \omega^{1/2}}{\omega^{1/2} + \chi''} + \eta_{\infty}^{1/2} \omega^{1/2}, \quad (1)$$

$$G''^{1/2} = \frac{g' \omega^{1/2}}{\omega^{1/2} + \chi'} + \eta_{\infty}^{1/2} \omega^{1/2}. \quad (2)$$

Все коэффициенты в уравнениях используются при аппроксимации с помощью процедуры нелинейной регрессии в пакете Exel. Величина коэффициентов показана в табл. 1.

Кривые, полученные в результате аппроксимации, показаны сплошной линией на графиках (рис. 1 – рис. 4).

В табл. 1 приведены также значения (g''/χ'') и (g'/χ') , относящиеся к структурным частям динамической упругости и динамической вязкости.

Вязкие свойства ЖК-полимера представлены на рис. 3 и рис. 4.

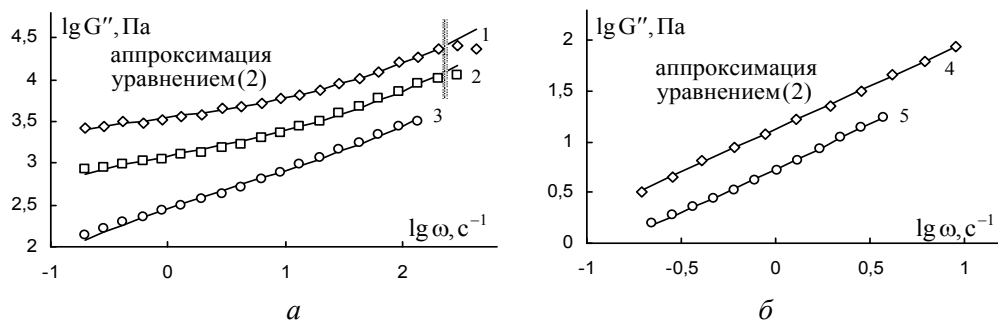


Рис. 3 / Fig. 3. Кривые зависимости модуля потерь от циклической частоты в двойных логарифмических координатах для расплава термотропного ЖК-полимера (LC-5000):

a – при температурах (в °C): 280 (1), 285 (2), 290 (3),

б – при температурах (в °C): 295 (4), 310 (5).

Вертикальной линией обозначена граница интервала аппроксимации уравнением (2) /
Curves of the loss modulus versus cyclic frequency in double-logarithmic coordinates for a
thermotropic LC polymer melt (LC-5000):

a – at temperatures (in °C): 280 (1), 285 (2), 290 (3),

б – at temperatures (in °C): 295 (4), 310 (5).

The vertical line indicates the boundary of the approximation interval by equation (1).

Источник: [7].

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты уравнения (1) и уравнения (2) для модуля накоплений $G'(\omega)$ и модуля потерь $G''(\omega)$ в расплаве термотропного ЖК-полимера (LC-5000) при различных температурах (система СИ) / Coefficients of equation (1) and equation (2) for the storage modulus and loss modulus in the melt of a thermotropic LC polymer (LC-5000) at different temperatures (SI system)

$t, ^\circ\text{C}$	280	285	290	295	310
g''	127,6	66,88	26,35	0,497	0,402
$\eta_\infty^{1/2}$	3,815	2,808	2,429	1,017	0,513
χ''	0,277	0,266	0,423	0,156	0,016
g''/χ''	460,1	251,0	62,32	3,193	25,62
g'	57,67	35,31	22,14	1,499	0,274
$\eta_\infty^{1/2}$	6,862	5,056	3,183	2,715	2,029
χ'	0,096	0,180	0,597	0,624	0
g'/χ'	601,1	196,6	37,09	2,402	-
кривая	1	2	3	4	5

Источник: составлено по данным авторов.

Судя по графикам и данным в табл. 1, при температурах выше 294°C реологическое поведение резко изменяется, что можно связать с завершением плавления твёрдых кристаллов и переходом в однородную нематическую фазу. Однако упругие и вязкие свойства образца при всех температурах описываются одинаковыми реологическими уравнениями.

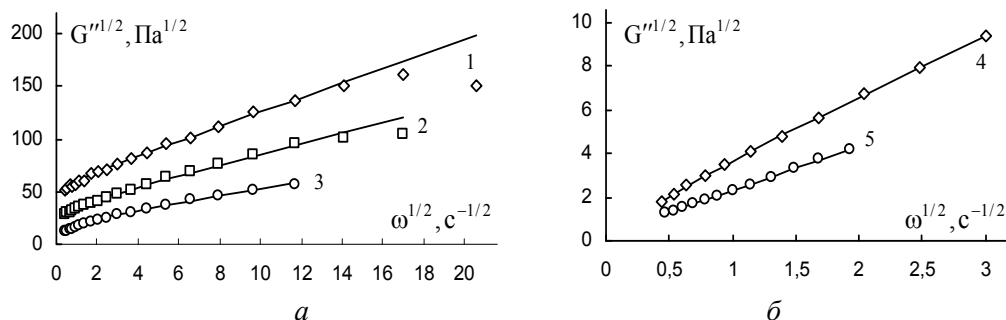


Рис. 4 / Fig. 4. Зависимость модуля потерь от циклической частоты для расплава термотропного ЖК-полимера (LC-5000) в корневых координатах:

a – при температурах (в °C): 280 (1), 285 (2), 290 (3),
б – при температурах (в °C): 295 (4), 310 (5) /

Loss modulus as a function of cyclic frequency in square root coordinates for a thermotropic LC polymer melt (LC-5000):

a – at temperatures (in °C): 280 (1), 285 (2), 290 (3),
б – at temperatures (in °C): 295 (4), 310 (5).

Источник: составлено по данным авторов.

Для большей наглядности представим значения коэффициентов на графиках (рис. 5, 6).

Видно, что коэффициенты g' и g'' , $\eta_{\infty}^{1/2}$ и $\eta_{\infty}''^{1/2}$ достаточно равномерно уменьшаются с ростом температуры, что свидетельствует об уменьшении степени агрегации частиц веществе и об уменьшении вязкости, связанной с индивидуальными макромолекулами.

Наиболее явно переход к однородной нематической фазе заметен на рис. 6, где величина коэффициентов χ' и χ'' увеличивается до температуры 290°C, а затем резко снижается в интервале от 295°C до 310°C. Переход от «твёрдообразного» к «жидкообразному» состоянию в данном случае связан только с изменением величины коэффициентов одного и того же реологического уравнения.

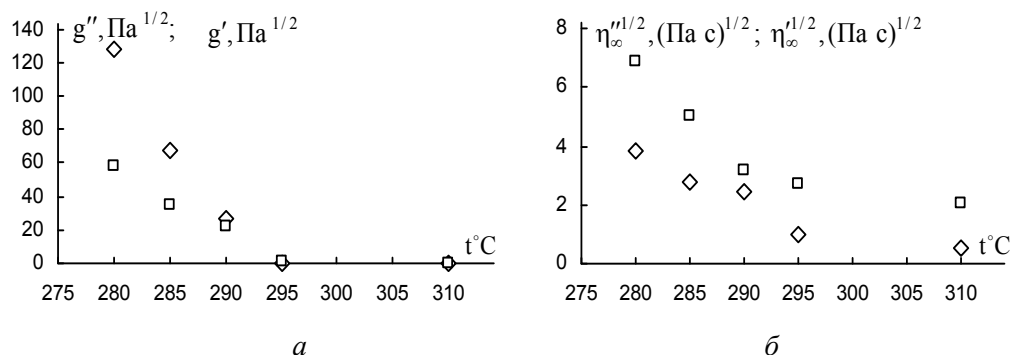


Рис. 5 / Fig. 5. Сравнение коэффициентов, рассчитанных для упругих свойств и для вязких свойств расплава термотропного ЖК-полимера (LC-5000):

a – зависимость $g''(t^{\circ}\text{C})$, обозначенная ромбами, зависимость $g'(t^{\circ}\text{C})$, обозначенная квадратами;

b – зависимость $\eta_{\infty}''^{1/2}(t^{\circ}\text{C})$, обозначенная ромбами, зависимость $\eta_{\infty}'^{1/2}(t^{\circ}\text{C})$, обозначенная квадратами /

Comparison of coefficients calculated for the elastic and viscous properties of a thermotropic LC polymer melt (LC-5000):

a – dependence $g''(t^{\circ}\text{C})$ denoted by diamonds, dependence $g'(t^{\circ}\text{C})$ denoted by squares;

b – dependence $\eta_{\infty}''^{1/2}(t^{\circ}\text{C})$ denoted by diamonds, dependence $\eta_{\infty}'^{1/2}(t^{\circ}\text{C})$ denoted by squares

Источник: составлено по данным авторов.

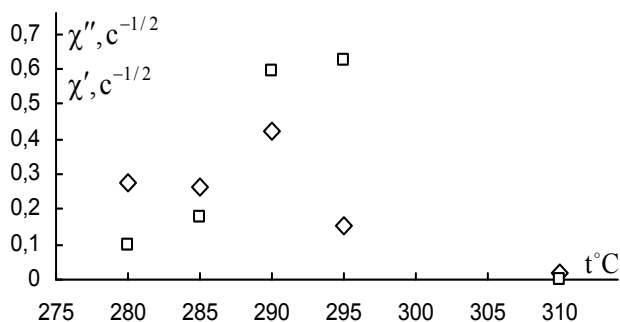


Рис. 6 / Fig. 6. Сравнение коэффициентов, рассчитанных для упругих свойств и для вязких свойств расплава термотропного ЖК-полимера (LC-5000):

зависимость $\chi''(t^{\circ}\text{C})$ обозначена ромбами, зависимость $\chi'(t^{\circ}\text{C})$ обозначена квадратами / Comparison of coefficients calculated for the elastic and viscous properties of a thermotropic LC polymer melt (LC-5000):

dependence $\chi''(t^{\circ}\text{C})$ denoted by diamonds, dependence $\chi'(t^{\circ}\text{C})$ denoted by squares

Источник: составлено по данным авторов.

Выводы

Реологическое поведение термотропного ЖК-полимера (LC-5000) в области линейной вязкоупругости сходно с поведением изотропных расплавов полимеров и может адекватно описываться уравнениями структурной реологической модели. Переход из нематической фазы с включениями твёрдых кристаллов в однородную нематическую фазу связан с изменением величины коэффициентов реологических уравнений структурной модели. Уточнение структурной реологической модели применительно к реологии термотропных ЖК-полимеров требует установлении характера изменения структуры образца ЖК-полимера как с температурой, так и с частотой осциллирующего течения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rahman A. Rheology of thermotropic liquid crystal polymers for injection moulding: a thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Melbourne: School of Civil, Environmental and Chemical Engineering College of Science, Engineering and Technology, RMIT University, 2013. 257 p.
2. Marchetti M. Liquid Crystalline Polymers as Tunable Composite Resins for Composites Applications: Doctoral Thesis. Delft: Delft University of Technology, 2021. 128 p. DOI: 10.4233/uuid:5e1093cb-5f7f-485d-9bb5-cd505a772820.
3. de Kort G. W. (2021). Thermotropic polyesters and polylactide: a route to sustainable and reprocessable reinforced composites: Doctoral Thesis. Maastricht: Maastricht University, 2021. 174 p. DOI: 10.26481/dis.20210125gk.
4. Rheology and Processing of Polymers: a reprint of articles from the Special Issue published online in the open access journal Polymers / ed. Kh. Lamnawar A. Maazouz. Basel, Switzerland: MDPI, 2022. 304 p. DOI: 10.3390/books978-3-0365-5264-4.
5. Rheological properties and associated structural characteristics of some aromatic polycondensates including liquid-crystalline polyesters and cellulose derivatives. (IUPAC Technical Report) / J. L. White, L. Dong, P. Han, H. M. Laun // Pure and Applied Chemistry. 2004. Vol. 76. No. 11. P. 2027–2049. DOI: 10.1351/pac200476112027.
6. Marrucci G. Rheology of liquid crystalline polymers // Pure and Applied Chemistry. 1985. Vol. 57. No. 1. P. 1545–1552. DOI: 10.1351/pac198557111545.
7. Rheology and Relaxation Processes in a Melting Thermotropic Liquid–Crystalline Polymer / Yu Ruobing, Yu Wei, Zhou Chixing, J. J. Feng // Journal of Applied Polymer Science. 2007. Vol. 104. Iss. 6. P. 3780–3787. DOI: 10.1002/app.25953.
8. Winter H. H., Mours M. Rheology of Polymers Near Liquid-Solid // Neutron Spin Echo Spectroscopy Viscoelasticity Rheology. Berlin: Springer-Verlag, 1997. P. 165–234 (Series: Advances in Polymer Science. Vol. 134). DOI: 10.1007/3-540-68449-2_3.
9. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Неньютоновское течение дисперсных, полимерных и жидкокристаллических систем. Структурный подход. М.: Техносфера, 2016. 384 с.
10. Кирсанов Е. А., Матвеев В. Н. Вязкость и упругость структурированных жидкостей: монография М.: Техносфера, 2022. 284 с.

REFERENCES

1. Rahman, A. (2013). *Rheology of thermotropic liquid crystal polymers for injection moulding: a thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy*. Melbourne: School of Civil, Environmental and Chemical Engineering College of Science, Engineering and Technology, RMIT University.
2. Marchetti, M. (2021). *Liquid Crystalline Polymers as Tunable Composite Resins for Composites Applications: Doctoral Thesis*. Delft: Delft University of Technology. DOI: 10.4233/uuid:5e1093cb-5f7f-485d-9bb5-cd505a772820.
3. de Kort, G. W. (2021). *Thermotropic polyesters and polylactide: a route to sustainable and reprocessible reinforced composites: Doctoral Thesis*. Maastricht: Maastricht University. DOI: 10.26481/dis.20210125gk.
4. Lamnawar, Kh. & Maazouz, A. (eds.) (2022). *Rheology and Processing of Polymers: a reprint of articles from the Special Issue published online in the open access journal Polymers*. Basel, Switzerland: MDPI. DOI: 10.3390/books978-3-0365-5264-4.
5. White, J. L., Dong, L., Han, P. & Laun, H. M. (2004). Rheological properties and associated structural characteristics of some aromatic polycondensates including liquid-crystalline polyesters and cellulose derivatives. (IUPAC Technical Report). In: *Pure and Applied Chemistry*, 76 (11), 2027–2049. DOI: 10.1351/pac200476112027.
6. Marrucci, G. (1985). Rheology of liquid crystalline polymers. In: *Pure and Applied Chemistry*, 57 (1), 1545–1552. DOI: 10.1351/pac198557111545.
7. Ruobing, Yu, Wei, Yu, Chixing, Zhou & Feng, J. J. (2007). Rheology and Relaxation Processes in a Melting Thermotropic Liquid–Crystalline Polymer. In: *Journal of Applied Polymer Science*, 104 (6), 3780–3787. DOI: 10.1002/app.25953.
8. Winter, H. H. & Mours, M. (1997). Rheology of Polymers Near Liquid-Solid. In: *Neutron Spin Echo Spectroscopy Viscoelasticity Rheology*. Berlin: Springer-Verlag, pp. 165–234 (Series: Advances in Polymer Science. Vol. 134). DOI: 10.1007/3-540-68449-2_3.
9. Kirsanov, E. A. & Matveenko, V. N. (2016). *Non-Newtonian flow of dispersed, polymer and liquid crystal systems. Structural approach*. Moscow: Technosphera publ. (in Russ.).
10. Kirsanov, E. A. & Matveenko, V. N. (2022). *Viscosity and elasticity of structured liquids*. Moscow: Technosphera publ. (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. Vekovichchev (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