

Научная статья

УДК 620.22

doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-65-71

Описание молекулярной ориентации аморфных полимеров в рамках кластерной модели

Заира Муссавна Жирикова^{✉1}, Владимир Закиевич Алоев²,
Кантемир Владимирович Алоев³

^{1,2}Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова, проспект
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030

³Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы, улица Миклухо-Маклая, 6,
Москва, Россия, 117198

^{✉1}zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

²aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

³kantemir.aloev@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0006-0765-9790>

Аннотация. Статья посвящена актуальной проблеме создания высокопрочных конструкционных материалов, используемых в узлах и деталях сельскохозяйственных машин. Успешный путь решения этой проблемы связан с приданием высокой степени ориентации макромолекул. В качестве характеристики молекулярной ориентации использована степень молекулярной вытяжки. Для описания молекулярной ориентации в работе использована кластерная модель двух макромолекулярных каркасов: молекулярных захлестов и молекулярных зацеплений. Указаны важные особенности кластерной сетки зацеплений по сравнению с сеткой захлестов. Поставленная цель реализуется на примере более простой структуры аморфного состояния полимера – полиметилметакрилата из-за отсутствия в них кристалличности. Показано, что информацию о типе и характеристиках макромолекулярного каркаса, вовлекаемого в процессы ориентации, можно получить из результатов измерений двулучепреломления от степени вытяжки. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей двулучепреломления от степени вытяжки аморфного полиметилметакрилата показало хорошее соответствие. Показано, что параметры кластерной сетки зацеплений, определенные независимым способом, позволяют достаточно точное описание экспериментальных данных по молекулярной ориентации полиметилметакрилата. Это, в свою очередь, подтверждает корректность структурной модели аморфного состояния полимеров.

Ключевые слова: молекулярная ориентация, кластерная модель, степень вытяжки, кластерная сетка, полиметилметакрилат, коэффициент Пуассона, двулучепреломление, температура стеклования, каучуковая высокоэластичность

Для цитирования. Жирикова З. М., Алоев В. З., Алоев К. В. Описание молекулярной ориентации аморфных полимеров в рамках кластерной модели // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2025. № 1(47). С. 65–71. doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-65-71

Original article

Description of the molecular orientation of amorphous polymers in the framework of the cluster model

Zaira M. Zhirikova^{✉1}, Vladimir Z. Aloeov², Kantemir V. Aloeov³

^{1,2}Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, 1v Lenin Avenue, Nalchik,
Russia, 360030

³Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, 6 Miklukho-Maklay Street, Moscow,
Russia, 117198

^{✉1}zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

²aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

³kantemir.aloev@mail.ru

Abstract. The article is devoted to the urgent problem of creating high-strength structural materials used in assemblies and parts of agricultural machinery. A successful way to solve this problem is to give a high degree of orientation to macromolecules. The degree of molecular weight is used as a characteristic of molecular orientation. To describe the molecular orientation, the cluster model of two macromolecular frameworks is used: molecular entanglements and molecular meshes. The important features of the cluster mesh of meshes in comparison with the mesh of entanglements are indicated. This goal is realized using the example of a simpler structure of the amorphous state of a polymer, polymethylmethacrylate, due to the lack of crystallinity in them. It is shown that information about the type and characteristics of the macromolecular framework involved in the orientation processes can be obtained from the results of measurements of birefringence from the degree of stretching. A comparison of the experimental and theoretical dependences of birefringence on the degree of extraction of amorphous polymethylmethacrylate showed a good agreement. It is shown that the parameters of the cluster mesh of meshes, determined by an independent method, allow a fairly accurate description of experimental data on the molecular orientation of polymethylmethacrylate. This, in turn, confirms the correctness of the structural model of the amorphous state of polymers.

Keywords: molecular orientation, cluster model, degree of stretching, cluster mesh, polymethylmethacrylate, Poisson's ratio, birefringence, glass temperature, rubber high elasticity.

For citation. Zhirikova Z.M., Alov V.Z., Alov K.V. Description of the molecular orientation of amorphous polymers in the framework of the cluster model. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2025;1(47):65–71. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2025-1-47-65-71

Введение. В настоящее время большое внимание уделяется исследованию свойств ориентированных полимеров с целью создания высокопрочных конструкционных материалов [1]. Кроме практических аспектов, одной из причин этих исследований является возможность получения соотношений степень ориентации–свойства на примере более простой структуры аморфных полимеров из-за отсутствия в них кристалличности.

Для описания молекулярной ориентации в аморфных полимерах обычно используются две деформационные схемы – так называемые «аффинная» и «псевдоаффинная», подробное описание и возможности их применения к реальным полимерам даны в ряде работ [2, 3]. Однако выяснилось, что поведение реальных ориентированных полимеров (как аморфных, так и аморфно-кристаллических) во многом не соответствует этим схемам, что и послужило основанием для разработки большого числа их модификации [2, 3].

Основным положением во всех этих модифицированных и немодифицированных деформационных схемах является наличие каркаса макромолекулярных зацеплений [4, 5].

Наиболее известной деформационной схемой макромолекулярных зацеплений является версия «ножевидных» макромолекулярных захлестов [6], сетка которых имеет некоторые особенности. Обычно ее плотность $v_{\text{зах}}$ опре-

деляется при температурах T выше температуры стеклования T_c в рамках концепции каучуковой высокоэластичности, и предполагается, что величина $v_{\text{зах}}$ сохраняется неизменной при $T < T_c$. Наличие такого каркаса зацеплений можно считать доказанным и теоретически, и экспериментально [6–8]. Другой версией является кластерная сетка макромолекулярных зацеплений. Важными особенностями кластерной сетки зацеплений по сравнению с сеткой макромолекулярных захлестов являются следующие положения:

1) узлы кластерной сетки зацеплений имеют конечный, четко определенный размер (длина сегмента в кластере принимается равной длине статистического сегмента полимера [8]);

2) плотность узлов кластерной сетки $v_{\text{кл}}$ является функцией температуры, снижаясь по мере роста T , при T_c кластерная сетка окончательно распадается. При $T \leq T_c - 50\text{K}$ увеличение $v_{\text{кл}}$ по мере снижения T существенно замедляется;

3) плотность $v_{\text{кл}}$ примерно на порядок превышает соответствующую величину для каркаса макромолекулярных захлестов.

Следует отметить, что влияние областей локального порядка, каковыми являются кластеры, на ориентационное поведение аморфных полимеров отмечалось и ранее в работе [9].

Автором работы [4] была предложена версия «временного» макромолекулярного каркаса с высокой плотностью $v_{вр}$, который обусловлен электростатическим взаимодействием единиц цепи.

Анализ результатов работ [2–5, 9] позволил выявить ряд особенностей поведения ориентированных полимеров, которые не укладываются в рамки версии каркаса макромолекулярных захлестов, что не позволяет прямого применения рассмотренных выше деформационных схем. Все особенности несоответствия привели, как было указано выше, к появлению ряда модифицированных деформационных схем, одну из которых можно описать соотношением [4]:

$$\Delta n = c v_0 \alpha (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \exp(-k\lambda), \quad (1)$$

где

Δn – разность хода в измерениях двулучепреломления, характеризующая степень молекулярной ориентации;

v_0 – плотность макромолекулярного каркаса;

α – разность поляризуемостей статистического звена параллельно и перпендикулярно его оси;

λ – степень вытяжки;

k – показатель, характеризующий степень разрушения узлов макромолекулярного каркаса в ходе вытяжки.

Постоянная c определяется соотношением [5]:

$$c = \left(\frac{2\pi}{45} \right) \left(\frac{(\bar{n}^2 + 2)^2}{\bar{n}} \right), \quad (2)$$

где

\bar{n} – средний коэффициент преломления.

Ботто, Даккетт и Уорд [3] отметили, что уравнение (1) хорошо описывает экспериментальные данные при $T < T_c$, однако дает плохое соответствие при $T > T_c$. Они предложили следующую модификацию уравнения (1):

$$\Delta n = \alpha c (v_{п} + v_{вр} \exp(-k(\lambda-1))) (\lambda^2 - \lambda^{-1}), \quad (3)$$

которая предполагает наличие двух каркасов макромолекулярных зацеплений – постоянно и «временного», которые имеют плотности $v_{п}$ и $v_{вр}$ соответственно.

Хотя применение уравнения (3) для описания экспериментальных данных полиметилметакрилата (ПММА) было успешным (и при

$T < T_c$, и при $T > T_c$) [3], необходимо сделать два замечания по поводу его применения. Во-первых, величины $v_{п}$, $v_{вр}$ и k , входящие в уравнение (3), получены подгонкой к экспериментальным данным, и отсутствие независимых способов их определения существенно снижает ценность этого уравнения. Как известно, вариант обусловленного электростатическими взаимодействиями каркаса [4] нигде больше не использовался, хотя трудно предположить отсутствие влияния макромолекулярного каркаса с такой плотностью на другие свойства полимеров. Кластерная модель структуры аморфного состояния полимеров [10] является общей структурной моделью, успешно описывающей механические [11], теплофизические [12] и другие свойства полимеров. Величина $v_{кл}$ может быть оценена независимым способом по результатам механических испытаний ориентированных полимеров [10, 13].

Целью исследования является использование кластерной модели для описания молекулярной ориентации в аморфных полимерах.

Методы и объекты исследования. В данной работе подробное описание выполнено на примере простой структуры аморфного полимера – полиметилметакрилата (ПММА) из-за отсутствия в них кристалличности.

Плотность $v_{кл}$ кластерной сетки зацеплений можно определить из значений коэффициента Пуассона μ , используя следующую аппроксимацию [13]:

$$\mu = 0,5 - 4,87 \cdot 10^{-13} (v_{кл})^{1/2}. \quad (4)$$

Величины μ , как функция T , взяты по данным работы [14]. Полученная указанным способом зависимость $v_{кл}(T)$ для ПММА приведена на вставке рисунка 1. Кластерная модель [10] не отрицает одновременного существования в полимере и каркаса макромолекулярных захлестов. Его плотность $v_{зах}$ можно определить из соотношения [15]:

$$v_{зах} = \frac{\rho N_A}{M_{зах}}, \quad (5)$$

где

ρ – плотность полимера (для ПММА $\rho = 1,20$ г/см³ [16]);

N_A – число Авогадро;

$M_{зах}$ – молекулярная масса участка цепи между узлами зацеплений.

Для ПММА величины $M_{зах}$ существенно различаются в разных источниках [6, 15, 17] и варьируются от ~6,2 [15] до 15,5 кг/моль [18]. В данной работе для оценок плотностей макромолекулярных захлестов выбрано максимальное значение $M_{зах}$, и получена величина $v_{зах} \approx 0,47 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$ согласно уравнению (5). Следовательно, в рамках кластерной модели плотность молекулярного каркаса равна ($v_{кл} + v_{зах}$) при $T < T_c$ и $v_{зах}$ при $T > T_c$. Нетрудно видеть, что предлагаемая трактовка устраняет все расхождения поведения молекулярной ориентации, указанные выше.

Результаты исследования. В таблице 1 приведено сравнение плотностей макромоле-

кулярных каркасов, полученное совмещением с экспериментальными результатами [3, 5] и независимым методом [13]. Как можно видеть из данных этой таблицы, величины v_0 ($v_{вр}$), полученные в работах [3, 5], различаются почти в два раза, что говорит об их подгонном характере. В то же время величины $v_{п}$ работы [3] и $v_{зах}$, а также $v_{вр}$ и $v_{кл}$ попарно хорошо согласуются друг с другом. Таким образом, в настоящей работе по существу использована предложенная в [3] модель двух каркасов, а различиями являются точная физическая интерпретация и независимое определение плотностей этих каркасов.

Таблица 1. Структурные параметры ПММА, используемые при расчете по уравнениям (2) и (3) [3]
Table 1. Structural parameters of PMMA used in calculations according to equations (2) and (3) [3]

T, K	Работа [5]		Работа [3]			Работа [13]		
	$v_0, 10^{26} \text{ м}^{-3}$	k	$v_{п}, 10^{26} \text{ м}^{-3}$	$v_{вр}, 10^{26} \text{ м}^{-3}$	k	$v_{кл}, 10^{26} \text{ м}^{-3}$	$v_{кл}+v_c, 10^{26} \text{ м}^{-3}$	k
303÷323	15,1	1,42	-	-	-	9,23	9,70	2,0
363	8,4	1,22	0,38	4,70	0,89	3,83	4,30	2,0
373	6,4	1,18	-	-	-	1,33	1,80	1,3
389,5	2,4	0,58	-	-	-	-	0,47	-
408	-	-	0,31	0,31	0,61	-	0,47	-

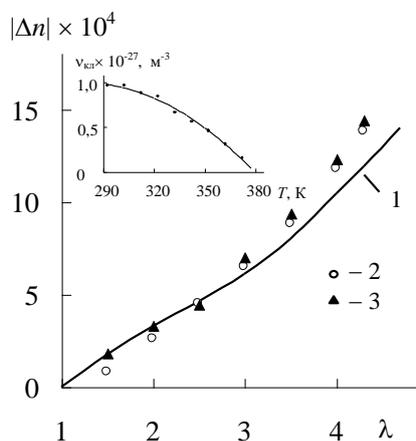


Рисунок 1. Зависимость двулучепреломления $|\Delta n|$ от степени вытяжки λ при $T=408 \text{ К}$ для ПММА: 1 – экспериментальные данные [3]; 2 – расчет по уравнению (3); 3 – расчет по уравнению (7).

На вставке: зависимость плотности кластерной сетки зацеплений $v_{кл}$ от температуры T для ПММА
Figure 1. Dependence of birefringence $|\Delta n|$ on the degree of stretching λ at $T=408 \text{ K}$ for PMMA: 1 – experimental data [3]; 2 – calculation according to equation (3); 3 – calculation according to equation (7). Inset: dependence of the density of the cluster network of entanglements $v_{кл}$ on temperature T for PMMA

На рисунке 1 приведено сравнение рассчитанных по уравнению (3) и экспериментальных [3] значений $|\Delta n|$ как функции λ для ПММА. Поскольку экспериментальные данные получены при $T = 408 \text{ К}$, т.е., при $T > T_c$ (для ПММА $T_c \approx 378 \text{ К}$ [16]), то расчет проведен при $v_{п} = v_{зах}$, $v_{вр} = v_{кл} = 0$ и $k = 0$. Как можно видеть, получено достаточно хорошее соответствие. А. С. Баланкин [19] предложил фрактальную концепцию каучуковой высокоэластичности, в которой напряжение σ зависит от модуля упругости E следующим образом:

$$\sigma = \frac{E}{4,5} (\lambda^2 - \lambda^{-2,5}). \quad (6)$$

Поскольку σ пропорционально $|\Delta n|$, а E – плотности каркаса [5], то можно использовать для оценки $|\Delta n|$ следующую простую формулу (при $T \geq T_c$):

$$|\Delta n| = cv_{зах} \alpha (\lambda^2 - \lambda^{-2,5}). \quad (7)$$

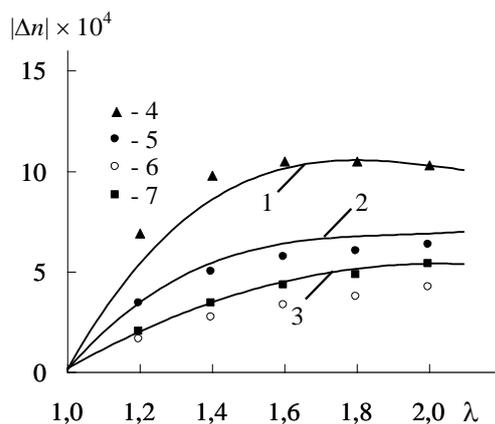


Рисунок 2. Зависимость двулучепреломления $|\Delta n|$ от степени вытяжки λ при $T=303\text{K}$ (1,4), 363K (2,5) и 373K (3,6,7) для ПММА:

1, 2, 3 – экспериментальные данные [5]; 4, 5, 6 – расчет по уравнению (3) с $k = 2,0$; 7 – расчет по уравнению (3) с $k = 1,3$ для $T = 373\text{K}$

Figure 2. Dependence of birefringence $|\Delta n|$ on the degree of drawing λ at $T = 303\text{K}$ (1, 4), 363K (2, 5) and 373K (3, 6, 7) for PMMA:

1, 2, 3 – experimental data [5]; 4, 5, 6 – calculation by equation (3) with $k = 2.0$; 7 – calculation by equation (3) with $k = 1.3$ for $T = 373\text{K}$

Использование этой формулы показало (рис. 1), что при $\lambda < 3$ она дает даже лучшее соответствие с экспериментом, чем уравнение (3). Несколько более завышенные результаты

расчета по обоим указанным уравнениям при $\lambda \geq 3$ демонстрируют необходимость введения коэффициента $k \neq 0$ при достаточно больших деформациях ввиду вероятного разрушения узлов захлестов, особенно для цепей с низкой молекулярной массой [20].

На рисунке 2 приведено сравнение экспериментальных [5] и рассчитанных по уравнению (3) зависимостей $|\Delta n|(\lambda)$ для образцов, вытянутых при 303, 363 и 373K. Поскольку в этом случае ориентация ПММА проводилась при $T < T_c$, то расчет был выполнен при $v_{\text{п}} = v_{\text{зах}}$, $v_{\text{вр}} = v_{\text{кл}}$ и $k = 2,0$. Вновь наблюдается хорошее соответствие теории и эксперимента, а некоторое уменьшение расчетных величин $|\Delta n|$ относительно экспериментальных по мере роста температуры вытяжки легко устраняется уменьшением k . Это продемонстрировано для кривой $|\Delta n|(\lambda)$ при $T = 373\text{K}$ выбором $k = 1,3$.

Выводы. Результаты исследований показали, что параметры кластерной сетки зацеплений, определенные независимым способом, позволяют достаточно точное описание экспериментальных данных по молекулярной ориентации ПММА. Это подтверждает, в свою очередь, корректность структурной модели аморфного состояния полимеров.

Список литературы

1. Захариадес А. Е., Мид В. Т., Портер Р. С. Современные достижения технологии получения полиэтилена в сверхориентированном состоянии методом твердофазной экструзии. В кн.: Сверхвысокомолекулярные полимеры. Ред. Чиферри А., Уорд И. Ленинград: Химия, 1983. С. 63–89.
2. Brown D.J. Molecular orientation and strain in hot-drawn poly (ethylene terephthalate) // Polymer Commun. 1995. Vol. 26. № 2. Pp. 42–45.
3. Botto P.A., Duckett R.A., Ward I.M. The yield and thermoelastic properties of oriented poly (methyl methacrylate) // Polymer. 1987. Vol. 28. № 2. Pp. 257–262.
4. Raha S., Bowden P.B. Birefringence of plastically deformed poly (methyl methacrylate) // Polymer. 1972. Vol. 13. № 4. Pp. 174–184.
5. Kahz N., Duckett R.A., Ward I.M. Stress optical studies of oriented poly (methyl methacrylate). Polymer. 1978. Vol. 19. № 2. Pp. 136–144.
6. Wu S. Chain structure and entanglement // J. Polymer Sci.: Part B: Polymer Rhys. 1989. Vol. 27. № 4. P. 723–741.
7. Charlesby A., Jaroszkiewicz E.M. Entanglement and network formation in polystyrene // Eur. Polymer. J. 1985. Vol. 21. № 1. Pp. 55–64.
8. Richter D., Farago B., Fetters L.Y., Huang J.S., Ewen B., Lartidue C. Direct microscopic observation of the entanglement distance in a polymer melt // Phys. Rev. Lett. 1990. Vol. 64. № 12. P. 1389–1392.
9. Милагин М. Ф., Шишкин Н. И. Изменение плотности аморфного полиметилметакрилата при его ориентационной вытяжке // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1972. Т. 14. № 2. С. 357–362.
10. Козлов Г. В., Новиков В. У. Кластерная модель аморфного состояния полимеров // Успехи физических наук, 2001. Т 171. № 7. С. 717–764. DOI: 10.3367/UFNr.0171.200107b.0717

11. Описание кривых напряжение-деформация стеклообразного полиарилатсульфона в рамках концепций высокоэластичности / В. Н. Шогенов, В. Н. Белоусов, В. В. Потапов, Г. В. Козлов, Э. В. Прут // Высокомолекулярные соединения. Серия А. 1991. Т. 33. № 1. С. 155–160.
12. Белошенко В. А., Козлов Г. В., Липатов Ю. С. Механизм стеклования сетчатых полимеров // Физика твердого тела. 1994. Т. 36. № 10. С. 2903–2906.
13. Sanditov D.S., Kozlov G.V. On the nature of correlations between the elasticity modulus and glass transition temperature of amorphous polymers // Fizika i Himia Stekla. 1993. Т. 19. № 4. С. 561–572. EDN: KSTTSF
14. Hong S.-D, Chung S.Y., Fedors R.F., Moacanin J. Study of molecular deformation mechanisms in the glassy state. I. Temperature effect on 1 stress-birefringence and strain-birefringence responses of poly (methyl methacrylate) // J. Polymer Sci.: Polymer Physics Edition, 1983. Vol. 21. N 9. Pp. 1647–1660.
15. Lin Y.-H. Number of entanglement strands per cubed tube diameter, a fundamental aspect of topological universality in polymer viscoelasticity // Macromolecules. 1987. Vol. 20. № 12. Pp. 3080–3083.
16. Калинин Э. Л., Саковцева М. Б. Свойства и переработка термопластов. Ленинград: Химия, 1983. 288 с.
17. Prevorsek D.C., De Bona V.T. On chain entanglement in high-Tg amorphous polymers // Journal of Macromolecular Science, Part B. Physics. 1981, Vol. 19. N 4. Pp. 605–622.
18. Graessley W.W., Edwards S.F. Entanglement inter actions in polymers and the chain contour concentration // Polymer. 1981. Vol. 22. N 10. Pp. 1329–1334.
19. Баланкин А. С. Теория упругости фракталов и модели нелинейной упругости, высокоэластичности, разрушения материалов с мультифрактальной структурой // Докл. РАН. 1992. Т. 325. № 3. С. 465–471.
20. Шишкин Н. И., Милагин М. Ф., Габараева А. Д. Молекулярная сетка и ориентационные процессы в аморфном полистироле // Физика твердого тела. 1963. Т. 5. № 12. С. 3453–3462.

References

1. Zachariades A.E., Mead W.T., Porter R.S. *Sovremennyye dostizheniya tekhnologii polucheniya polietilena v sverkhoriyentirovannom sostoyanii metodom tverdogfaznoy ekstruzii. V kn.: Sverkhvysokomodul'nyye polimery. Red. Chifferri A., Uord I. L.: Khimiya.* [Modern achievements in the technology of producing polyethylene in a superior oriented state by the method of solid-phase extrusion. In the book: Ultra-high-modulus polymers. Ed. Ciferri A., Ward I.]. Leningrad: Khimiya, 1983. Pp. 63–89. (In Russ.)
2. Brown D.J. Molecular orientation and strain in hot-drawn poly(ethylene terephthalate). *Polymer Commun.* 1995;26(2):42–45.
3. Botto P.A., Duckett R.A., Ward I.M. The yield and thermoelastic properties of oriented poly(methyl methacrylate). *Polymer.* 1987;28(2):257–262.
4. Raha S., Bowden P.B. Birefringence of plastically deformed poly(methyl methacrylate). *Polymer.* 1972;13(4):174–184.
5. Kahz N., Duckett R.A., Ward I.M. Stress optical studies of oriented poly (methyl methacrylate). *Polymer.* 1978;19(2):136–144.
6. Wu S. Chain structure and entanglement. *J. Polymer Sci.: Part B: Polymer Phys.* 1989;27(4):723–741.
7. Charlesby A., Jaroszkiewicz E.M. Entanglement and network formation in poly-styrene. *Eur. Polymer J.* 1985;21(1):55–64.
8. Richter D., Farago B., Fetters L.Y., Huang J.S., Ewen B., Lartidue C. Direct microscopic observation of the entanglement distance in a polymer melt. *Phys. Rev. Lett.* 1990;64(12):1389–1392
9. Milagin M.F., Shishkin N.I. Изменение плотности аморфного полиметил-метакрилата при его ориентационной вытяжке. *Polymer Science. Series A.* 1972;14(2):357–362. (In Russ.)
10. Kozlov G.V., Novikov V.U. Cluster model of the amorphous state of polymers. *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*, 2001;171(7):717–764. (In Russ.). DOI: 10.3367/UFNr.0171.200107b.0717
11. Shogenov V.N., Belousov V.N., Potapov V.V., Kozlov G.V., Prut E.V. Description of stress-strain curves of glassy polyarylate sulfone within the framework of high elasticity concepts. *Polymer Science. Series A.* 1991;33(1):155–160. (In Russ.)
12. Beloshenko V.A., Kozlov G.V., Lipatov Yu.S. Mechanism of glass transition of cross-linked polymers. *Solid State Physics.* 1994;36(10):2903–2906. (In Russ.)
13. Sanditov D.S., Kozlov G.V. On the nature of correlations between the elasticity modulus and glass transition temperature of amorphous polymers. *Fizika i Himia Stekla.* 1993;19(4):561–572. EDN: KSTTSF
14. Nong S.-D, Chung S.Y., Fedors R.F., Moacanin J. Study of molecular deformation mechanisms in the glassy state. I. Temperature effect on 1 stress-birefringence and strain-birefringence responses of poly (methyl methacrylate). *J. Polymer Sci.: Polymer Physics Edition.* 1983;21(9):1647–1660.

15. Lin Y.-H. Number of entanglement strands per cubed tube diameter, a fundamental aspect of topological universality in polymer viscoelasticity. *Macromolecules*. 1987; 20(12):3080–308
16. Kalinchev E.L., Sakovtseva M.B. *Svoystva i pererabotka termoplastov* [Properties and processing of thermoplastics]. Leningrad: Khimiya, 1983. 288 p. (In Russ.)
17. Prevozsek D.C., De Bona B.T. On chain entanglement in high-Tg amorphous polymers. *Journal of Macromolecular Science, Part B. Physics*. 1981;19(4):605–622
18. Graessley W.W., Edwards S.F. Entanglement interactions in polymers and the chain contour concentration. *Polymer*. 1981;22(10):1329–1334.
19. Balankin A.S. Theory of fractal elasticity and models of nonlinear elasticity, high elasticity, and destruction of materials with multifractal structure. *Dokl. RAN*. 1992;325(3)6:465–471. (In Russ.)
20. Shishkin N.I., Milagin M.F., Gabaraeva A.D. Molecular network and orientation processes in amorphous polystyrene. *Fizika tverdogo tela*. 1963;5(12):3453–3462. (In Russ.)

Сведения об авторах

Жирикова Заира Муссавна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 4378-8131, Scopus ID: 55558043600, Researcher ID: AAF-3690-2022

Алоев Владимир Закиевич – доктор химических наук, профессор кафедры технической механики и физики, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова», SPIN-код: 4533-8035, Scopus ID: 6505993830, Researcher ID: AAF-3822-2022

Алоев Кантемир Владимирович – аспирант кафедры теории права и государства, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», SPIN-код: 6392-4344, Researcher ID: JNS-4428-2023

Information about the authors

Zaira M. Zhirikova – Candidate of Physic-mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4378-8131, Scopus ID: 55558043600 Researcher ID: AAF-3690-2022

Vladimir Z. Aloev – Doctor of Chemical Sciences, Professor of the chair of Technical Mechanics and Physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN- code: 4533-8035, Scopus ID: 6505993830, Researcher ID: AAF-3822-2022

Kantemir V. Aloev – Postgraduate Student of the Department of Theory of Law and State, Patrice Lumumba Peoples' Friendship University of Russia, SPIN-code: 6392-4344, Researcher ID: AAF-3822-2022

Авторский вклад. Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Author's contribution. All authors of this research paper have directly participated in the planning, execution, or analysis of this study. All authors of this paper have read and approved the final version submitted.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

*Статья поступила в редакцию 24.01.2025;
одобрена после рецензирования 12.02.2025;
принята к публикации 21.02.2025.*

*The article was submitted 24.01.2025;
approved after reviewing 12.02.2025;
accepted for publication 21.02.2025.*