

**АГРОИНЖЕНЕРИЯ И ПИЩЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**  
**AGROENGINEERING AND FOOD TECHNOLOGIES**

Научная статья

УДК 678.742.2

doi: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-71-78

**Применение концепции каучуковой высокоэластичности  
для описания термоусадки полимеризационно  
наполненных композитов****Владимир Закиевич Алоев<sup>1</sup>, Заира Муссавна Жирикова<sup>✉2</sup>**Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В. М. Кокова, проспект  
Ленина, 1в, Нальчик, Россия, 360030<sup>1</sup>aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133><sup>✉2</sup>zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

**Аннотация.** Целью настоящей работы является количественное описание и выяснение структурной основы термической усадки полимеризационно наполненных композитов. Эта цель реализуется в данной работе на примере сверхвысокомолекулярного полиэтилена, наполненного дисперсными частицами алюминия и боксита. Показано, что информацию о типе и характеристиках макромолекулярного каркаса, вовлекаемого в процессы ориентации, можно получить из результатов измерений термической усадки. В качестве характеристики молекулярной ориентации использована степень молекулярной вытяжки, скорректированная на наличие наполнителя в ориентированных материалах. В рамках теории каучуковой высокоэластичности использованы модели Куна-Грина, Раха-Бюдена и кластерная модель аморфного состояния полимеров. Сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей термической усадки наполненных композитов показывает, что процесс термоусадки полимеризационно наполненных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена может быть описан в рамках теории каучуковой высокоэластичности как «замороженная» деформация макромолекулярного каркаса. Теоретические расчеты позволяют уточнить тип этого каркаса, т. е. его узлами не могут быть макромолекулярные «захлесты» (их плотность постоянна) или кристаллиты (степень кристалличности растет по мере увеличения степени вытяжки). Показано, что этим каркасом может быть только кластерная сетка макромолекулярных зацеплений, чья плотность снижается по мере увеличения степени молекулярной вытяжки.

**Ключевые слова:** твердофазная экструзия, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, наполнитель, степень вытяжки, термоусадка, кластеры, молекулярная ориентация

**Для цитирования.** Алоев В. З., Жирикова З. М. Применение концепции каучуковой высокоэластичности для описания термоусадки полимеризационно наполненных композитов // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. 2022. № 4(38). С. 71–78.

doi: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-71-78

Original article

## Application of concept of rubber high elasticity for description of heat shrinkage of polymerisationally filled composites

Vladimir Z. Alov<sup>1</sup>, Zaira M. Zhirikova<sup>✉2</sup>

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

<sup>1</sup>aloev56@list.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5080-4133>

<sup>✉2</sup>zaira.dumaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5268-5545>

**Abstract.** The aim of the work is to describe quantitatively and elucidate the structural basis of thermal shrinkage of polymerization filled composites. This purpose is realized in this article with the example of ultra-high molecular weight polyethylene filled with dispersed particles of aluminum and bauxite. It has been shown that information on the type and characteristics of the macromolecular framework involved in orientation processes can be obtained from the results of thermal shrinkage measurements. As a characteristic of molecular orientation, the degree of molecular stretch corrected for the presence of filler in oriented materials is used. Within the framework of the theory of rubber high elasticity, Kuhn-Green, Rach-Bowden models and a cluster model of the amorphous state of polymers were used. A comparison of experimental and theoretical dependencies of the thermal shrinkage of filled composites shows that the heat shrinkage process of ultra-high molecular weight polyethylene based polymerization filled composites can be described within the framework of the theory of rubber high elasticity as a "frozen" deformation of a macromolecular framework. Theoretical calculations allow us to specify the type of this framework, i.e. its nodes cannot be macromolecular "overlaps" (their density is constant) or crystallites (the degree of crystallinity increases with increasing degree of extraction). It is shown that this framework can only be a cluster grid of macromolecular meshes, whose density decreases as the degree of molecular extraction increases.

**Keywords:** solid-phase extrusion, ultra-high molecular weight polyethylene, filler, draw ratio, heat shrinkage, clusters, molecular orientation

**For citation.** Alov V.Z., Zhirikova Z.M. Application of concept of rubber high elasticity for description of heat shrinkage of polymerisationally filled composites. *Izvestiya of Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov.* 2022;4(38):71–78. (In Russ.). doi: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-71-78

**Введение.** Ранее рядом авторов был предложен новый способ переработки полимеризационно наполненных композитов на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) – плунжерная экструзия порошковой заготовки [1], позволяющая получать прутковые изделия с высокими деформационно-прочностными характеристиками. Известно, что повышение жесткости и прочности при этом достигается за счет ориентации макромолекул [2]. Информацию о процессах формирования структуры экструдатов можно получить из результатов измерений термической усадки, рассматривая этот процесс в рамках тех или иных моделей [3, 4].

В отличие от большинства предыдущих работ [2–4], где в качестве характеристики

молекулярной ориентации использовано двулучепреломление, в настоящей работе для этой цели будет использована степень молекулярной вытяжки  $\lambda_{\text{МОЛ}}^{\text{КОР}}$ , скорректированная на наличие в ориентированных материалах наполнителя [5, 6]. Как показано в работе [7],  $\lambda_{\text{МОЛ}}^{\text{КОР}}$  дает гораздо более точную информацию о процессах молекулярной ориентации по сравнению с экструдированной степенью вытяжки  $\lambda$  и является прямой характеристикой этих процессов.

**Цель исследования** – количественное описание и выяснение структурной основы термической усадки полимеризационно наполненных композитов в рамках теории каучуковой высокоэластичности.

**Материалы, методы и объекты исследования.** Исследовали полимеризационно наполненные композиты на основе СВМПЭ с молекулярной массой порядка  $1,5 \cdot 10^6$  СВМПЭ-А1 и СВМПЭ-боксит. Размер частиц наполнителей составлял 10 мкм. Содержание соответствовало 70 и 45 мас. %.

Образцы для испытаний готовили методом твердофазной экструзии по той же схеме, что и в работе [1], при температуре 393 К. Экструзионную степень вытяжки  $\lambda$  изменяли за счет использования фильер различного диаметра и определяли по формуле  $\lambda = d_3^2 / d_\phi^2$ , где  $d_3, d_\phi$  – соответственно диаметр заготовки и калибрующего пояска фильеры.

Термическую усадку измеряли на образцах цилиндрической формы диаметром  $5 \div 12$  мм и длиной 15 мм после нагревания их в глицерине с выдержкой при каждой температуре испытаний в течение 15 мин. Величину усадки  $\psi$  рассчитывали по формуле  $\psi = (d_2^2 - d_1^2) / d_2^2$ , где  $d_1, d_2$  – соответственно диаметр экструдата до и после выдержки при заданной температуре. Методика расчета молекулярной степени вытяжки  $\lambda_{\text{мол}}^{\text{кор}}$ , скорректированной на наличие наполнителя, приведена в работе [6].

**Результаты исследования.** Развитие молекулярной ориентации с деформацией может быть описано в рамках модели Куна-Грина каркаса гибких цепей, состоящих из статистических сегментов [3]. В этом случае величина термоусадки  $\psi$  по аналогии с дилатометрическим эффектом может быть записана так:

$$\psi = c v_{\text{карк}} (\lambda^2 - \lambda^{-1}), \quad (1)$$

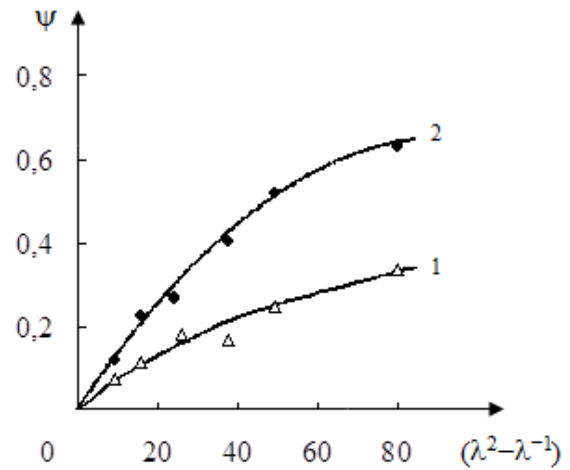
где:

$c$  – константа;

$v_{\text{карк}}$  – плотность каркаса, контролирующего процесс термоусадки.

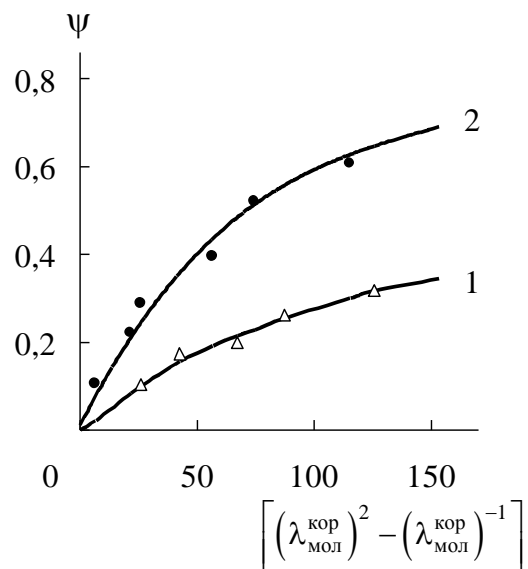
В рамках теорий каучуковой высокоэластичности при  $v_{\text{карк}} = \text{const}$  зависимость  $\psi$  от  $(\lambda^2 - \lambda^{-1})$  должна быть линейной. На рис. 1 и 2 приведены такие зависимости  $\psi(\lambda^2 - \lambda^{-1})$  для композитов СВМПЭ-А1 и СВМПЭ-боксит, где в качестве  $\lambda$  использо-

ваны как экструзионная степень вытяжки  $\lambda$  (рис. 1), так и молекулярная степень вытяжки  $\lambda_{\text{мол}}^{\text{кор}}$  (рис. 2).



**Рисунок 1.** Зависимости термической усадки  $\psi$  от параметра  $(\lambda^2 - \lambda^{-1})$  для композитов СВМПЭ-А1 (1) и СВМПЭ-боксит (2)

**Figure 1.** Dependence of thermal shrinkage of  $\psi$  on parameter  $(\lambda^2 - \lambda^{-1})$  for composites SVMPE-Al (1) and SVMPE-bauxite (2)



**Рисунок 2.** Зависимости термической усадки  $\psi$  от параметра  $[(\lambda_{\text{мол}}^{\text{кор}})^2 - (\lambda_{\text{мол}}^{\text{кор}})^{-1}]$  для композитов СВМПЭ-А1 (1) и СВМПЭ-боксит (2)

**Figure 2.** Dependence of thermal shrinkage of  $\psi$  on parameter  $[(\lambda_{\text{мол}}^{\text{кор}})^2 - (\lambda_{\text{мол}}^{\text{кор}})^{-1}]$  for composites SVMPE-Al (1) and SVMPE-bauxite (2)

Как можно видеть из приведенных на рис. 1 и 2 графиках, получить линейные зависимости в обоих случаях не удается – указанные зависимости имеют явную кривизну. По существу, это означает некорректность условия  $v_{карк} = const$ .

Раха и Боуден предложили модель, где учитывается частичное разрушение каркаса в процессе ориентации, выражаемое снижением  $v_{карк}$  [3].

Для одноосной деформации вновь по аналогии с двулучепреломлением можно записать:

$$\psi = c v_{карк} (\lambda^2 - \lambda^{-1}) \exp(-k\lambda), \quad (2)$$

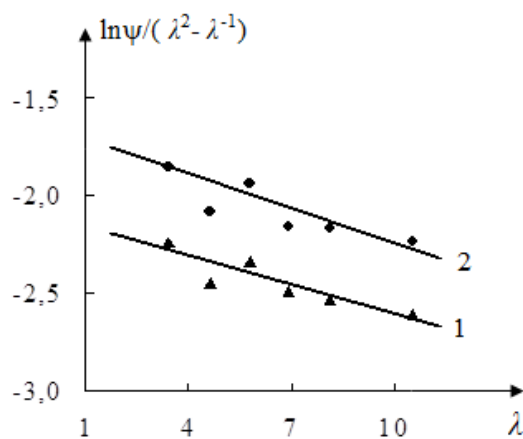
где:

$k$  – эмпирическая константа.

Теория Раха-Боудена предполагает наличие в аморфных полимерах макромолекулярных каркасов двух типов – один из них имеет постоянную плотность, а плотность другого изменяется с вариацией температуры испытаний. Однако эти авторы не дали физического обоснования каркаса с переменной плотностью и независимых способов ее определения. По существу, аналогичная схема двух молекулярных каркасов, предложена в рамках кластерной модели структуры аморфного состояния полимеров [8, 9], в которой постулированы каркас традиционных макромолекулярных «захлестов», чья плотность не зависит от температуры, и каркас, в котором узлами служат области локального порядка (кластеры), являющиеся аморфным аналогом кристаллитов с выпрямленными цепями. Кластеры имеют термофлуктуационное происхождение, и поэтому плотность кластерной сетки  $v_{кл}$  снижается с ростом температуры [8]. В настоящее время существует ряд методик независимого определения величины  $v_{кл}$  [8, 10].

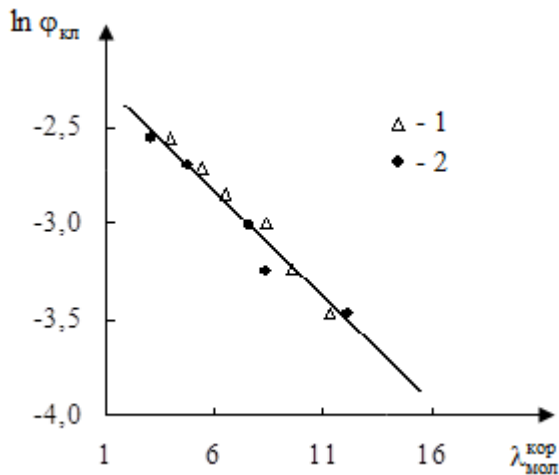
На рис. 3 приведены зависимости  $\ln[\psi/(\lambda^2 - \lambda^{-1})]$  от  $\lambda$  для СВМПЭ-А1 и СВМПЭ-боксит, из которых следует, что изменение термоусадки соответствует уравнению (2). Если предположить, что криволинейность приведенных на рис. 1 и 2 графиков обусловлена уменьшением плотности кластерной сетки по мере роста  $\lambda$ , то константу  $k$  в уравнении (2) можно определить

из логарифмического графика относительной доли кластеров  $\varphi_{кл}$  (пропорциональной  $v_{кл}$  [10]) в функции  $\lambda$ . Отметим, что в работе [11] действительно было обнаружено снижение  $\varphi_{кл}$  (и следовательно,  $v_{кл}$ ) по мере роста  $\lambda$  для исследуемых композитов. Величины  $\varphi_{кл}$  как функция  $\lambda$  для построения зависимости  $\ln \varphi_{кл}(\lambda_{мол}^{кор})$ , показанной на рис. 4, приняты по данным работы [11]. Вместо  $\lambda$  далее будут использованы значения  $\lambda_{мол}^{кор}$ , которые гораздо точнее характеризуют состояние ориентированной структуры полимерной матрицы [5-7]. Как следует из графика рис. 4, наблюдается линейная и общая для обоих композитов зависимость  $\ln \varphi_{кл}(\lambda_{мол}^{кор})$ , из наклона которой была оценена величина  $k$ , равная примерно – 0,11. Следовательно, в такой трактовке постоянная  $k$  не служит эмпирическим подгоночным коэффициентом, а является структурным параметром, характеризующим стабильность кластерной сетки [12] и градиент снижения  $\varphi_{кл}$  (или  $v_{кл}$ ) с  $\lambda$ . Кроме того, из рис. 4 следует, что  $k$  всегда будет отрицательной величиной ( $\varphi_{кл} < 1$ ).



**Рисунок 3.** Логарифмические зависимости параметра  $\psi/(\lambda^2 - \lambda^{-1})$  от молекулярной степени вытяжки  $\lambda$  для композитов СВМПЭ-А1 (1) и СВМПЭ-боксит (2)

**Figure 3.** Logarithmic dependence of  $\psi/(\lambda^2 - \lambda^{-1})$  parameter on molecular draw ratio of  $\lambda$  for composites SVMPE-A1 and SVMPE-Bauxite (2)



**Рисунок 4.** Логарифмическая зависимость относительной доли кластеров  $\varphi_{кл}$  от молекулярной степени вытяжки  $\lambda_{мол}^{кор}$  для композитов СВМПЭ-А1 (1) и СВМПЭ-боксит (2)

**Figure 4.** Logarithmic dependence of the relative fraction of  $\varphi_{кл}$  clusters on the molecular degree of extraction  $\lambda_{мол}^{кор}$  for SVMPE -Al (1) and SVMPE -bauxite (2) composites

Для ассоциации зависимо от температуры каркаса в модели Раха-Боудена и кластерной сетки существует еще одна причина. Энергия образования узлов такого каркаса примерно равна энергии когезии и составляет  $5 \div 9$  ккал/моль [3]. Энергия образования кластерной сетки имеет такой же порядок величины и для большого числа полимеров варьируется в пределах  $5, \div 15,9$  ккал/моль [9, 13]. Следовательно, в рамках кластерной модели можно предложить два альтернативных варианта уравнения (2):

$$\psi = c_1 \varphi_{кл}^0 \left( (\lambda_{мол}^{кор})^2 - (\lambda_{мол}^{кор})^{-1} \right) \exp(-k\lambda); \quad (3)$$

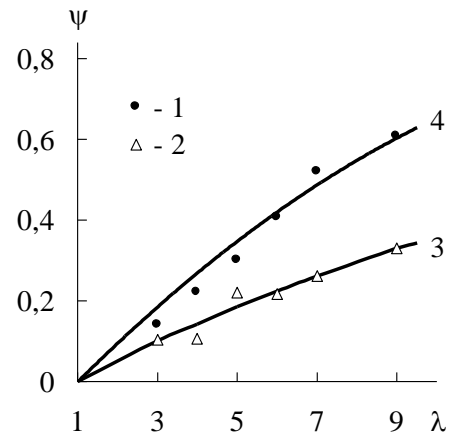
$$\psi = c_2 \varphi_{кл} \left( (\lambda_{мол}^{кор})^2 - (\lambda_{мол}^{кор})^{-1} \right), \quad (4)$$

где:

$c_1$  и  $c_2$  – константы;

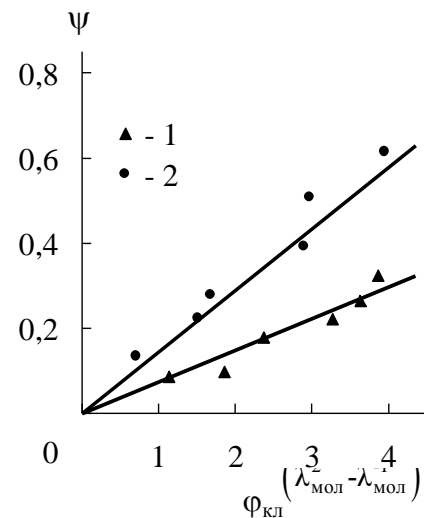
$\varphi_{кл}^0$  – относительная доля кластеров для неориентированного исходного полимера.

На рисунках 5 и 6 приведено сравнение экспериментальных и рассчитанных согласно уравнениям (3) и (4), соответственно, зависимостей  $\psi(\lambda)$  (для СВМПЭ-А1 и СВМПЭ-боксит).



**Рисунок 5.** Сравнение экспериментальных (1, 2) и рассчитанных по уравнению (3) (3, 4) зависимостей термоусадки  $\psi$  от экструзионной степени вытяжки  $\lambda$  для композитов СВМПЭ-А1 (1, 3) и СВМПЭ-боксит (2, 4)

**Figure 5.** Comparison of experimental (1, 2) and heat shrinkage dependences calculated by equation (3) (3, 4)  $\psi$  from the extrusion degree of extraction  $\lambda$  for SVMPE -Al (1, 3) and SVMPE -bauxite (2, 4) composites



**Рисунок 6.** Сравнение экспериментальных (1, 2) и рассчитанных по уравнению (4) (3, 4) зависимостей термоусадки  $\psi$  от молекулярной

степени вытяжки  $\lambda_{мол}^{кор}$  для композитов СВМПЭ-А1 (1, 3) и СВМПЭ-боксит (2, 4)

**Figure 6.** Comparison of experimental (1, 2) and calculated by equation (4) (3, 4) dependences of shrinkage  $\psi$  on the molecular degree of extraction  $\lambda_{мол}^{кор}$  for SVMPE -Al (1, 3) and SVMPE -bauxite (2, 4) composites

Как можно видеть, в обоих случаях получено хорошее соответствие теории и эксперимента. Недостатком этой трактовки являются различные абсолютные величины констант  $c_1$  и  $c_2$  для композитов СВМПЭ-Al и СВМПЭ-боксит. В то же время совместное рассмотрение данных рис. 4 и уравнений (3), (4) позволяет получить общий закон изменения  $\varphi_{\text{кл}}$ , который является параметром порядка аморфной фазы полиэтиленов [14], с вариацией  $\lambda_{\text{мол}}^{\text{кор}}$  [15]:

$$\varphi_{\text{кл}} = \varphi_{\text{кл}}^0 \exp(-k\lambda_{\text{мол}}^{\text{кор}}). \quad (5)$$

Уменьшение плотности кластерной сетки, характеризуемой величинами  $\varphi_{\text{кл}}$  или  $V_{\text{кл}}$ , сильно влияет на абсолютные значения  $\psi$ . Так, при  $\lambda = 9$  при условии  $\varphi_{\text{кл}} = \varphi_{\text{кл}}^0$ , т. е., в отсутствие снижения  $\varphi_{\text{кл}}$ , величина  $\psi$  для СВМПЭ-боксит была бы равна 4,6, а не 0,62, согласно экспериментальным данным. Другими словами, это означало бы почти полный возврат длины экструдированного образца к длине исходной заготовки, если величина  $\psi$  была бы в 7,4 раз больше. Оче-

видно, что для восстановления кластерной сетки в ходе термоусадки требуется предварительное плавление дефектных кристаллитов, сформированных в процессе ориентационной кристаллизации. Это также подтверждено экспериментально [5, 6]. Чтобы использовать уравнения (3) или (4) для практических приложений (прогнозирования  $\psi$ ), необходимо установить физический смысл констант  $c_1(c_2)$  и  $k$  и разработать методику их прогнозирования.

**Выводы.** Таким образом, изложенные выше результаты позволяют сделать следующие выводы. Процесс термоусадки может быть описан для полимеризационно наполненных композитов на основе СВМПЭ в рамках теории каучуковой высокоэластичности как «замороженная» деформация макромолекулярного каркаса. Выполненные расчеты позволяют уточнить тип этого каркаса: его узлами не могут быть макромолекулярные «захлесты» (их плотность постоянна) или кристаллиты (степень кристалличности растет по мере увеличения степени вытяжки). Этим каркасом может быть только кластерная сетка макромолекулярных зацеплений.

#### Список литературы

1. Белошенко В. А., Гринев В. Г., Кузнецов Э. Н., Новокшенова Л. А., Слободина В. Г., Кудинова О. И., Рудаков В. М., Тарасова Г. М. Твердофазная экструзия композиций на основе полиэтилена // Физика и техника высоких давлений. 1994. Т. 4. № 1. С. 91–95.
2. Капаччио Дж., Гибсон А. Г., Уорд И. М. Вытяжки и гидростатическая экструзия сверхвысокомодульных полимеров. В кн.: Сверхвысокомодульные полимеры. Ред. Чиферри А., Уорд И. Ленинград, Химия: Ленинградское отделение, 1983. 272 с.
3. Kahar N., Duckett R.A. Ward I.M. Stress optical studies of oriented poly (methyl methacrylate) // Polymer. 1978. Vol. 19. No. 2. Pp. 136–144.
4. Botto P.A., Duckett R.A. Ward I.M. The yield and thermoelastic properties of oriented poly (methyl methacrylate) // Polymer. 1987. Vol. 28. No. 2. Pp. 257–262.
5. Белошенко В. А., Козлов Г. В., Слободина В. Г., Прут Э. В., Гринев В. Г. Термоусадка экструдатов сверхвысокомолекулярного полиэтилена и полимеризационно наполненных композиций на его основе // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 1995. Т. 37. № 6. С. 1089–1092.
6. Козлов Г. В., Белошенко В. А., Слободина В. Г., Прут Э. В. Изменение структуры сверхвысокомолекулярного полиэтилена при твердофазной экструзии // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. 1996. Т. 38. № 6. С. 1056–1060.
7. Watts M.P.C., Zachariades A.E., Porter R.S. Shrinkage as a measure of the deformation efficiency of ultraoriented high density polyethelene // J. Mater. Sci. 1980. Vol. 15. No. 2. Pp. 426–430.
8. Белоусов В. Н., Козлов Г. В., Микитаев А. К., Липатов Ю. С. Зацепления в стеклообразном состоянии линейных аморфных полимеров // Доклады АН СССР. 1990. Т. 313. № 3. С. 630–633.
9. Козлов Г. В., Сандитов Д. С. Ангармонические эффекты и физико-механические свойства полимеров. Новосибирск: Наука. 1994. 261 с.

10. Kozlov G.V., Beloshenko V.A., Varyukhin V.N., Lipatov Yu.S. Application of cluster model for the description of epoxy polymer structure and properties // *Polymer*, 1999. Vol. 40. No. 6. Pp. 1045–1051.
11. Козлов Г. В., Белошенко В. А., Варюхин В. Н., Новиков В. У. Порядок и фрактальность аморфно-кристаллических полимеров // *Журнал физических исследований*. 1997. Т. 1. № 2. С. 204–207.
12. Козлов Г. В., Белоусов В. Н., Сердюк В. Д., Микитаев А. К., Машуков Н. И. Условие стабильности кластерной сетки макромолекулярных зацеплений // *Доклады Адыгской (Черкесской) Международной академии наук*. 1997. Т. 2. № 2. С. 88–93.
13. Сандитов Д. С., Козлов Г. В., Белоусов В. Н., Липатов Ю. С. Кластерная модель и модель флуктуационного свободного объема полимерных стекол // *Физика и химия стекла*. 1994. Т. 20. № 1. С. 3–13.
14. Козлов Г. В., Газаев М. А., Новиков В. У., Микитаев А. К. Моделирование структуры аморфных полимеров как перколяционного кластера // *Письма в ЖТФ*. 1996. Т. 22. № 16. С. 31–38.
15. Алоев В. З., Козлов Г. В. *Физика ориентационных явлений в полимерных материалах*. Нальчик: Полиграфсервис и Т. 2002. 288 с.

### References

1. Beloshenko V.A., Grinev V.G., Kuznetsov E.N., Novokshonova L.A., Slobodina V.G., Kudinova O.I., Rudakov V.M., Tarasova G.M. Solid state extrusion of compositions based on polyethylene. *Physics and high pressure technology*. 1994;4(1):91–95. (In Russ.)
2. Kapachchio Dzh., Gibson A.G., Uord I.M. Drawings and hydrostatic extrusion of superhigh-modulus polymers. V kn.: *Sverkhvysokomodul'nyye polimery*. Red. Chiferri A., Uord I. Leningrad, Khimiya: Leningradskoe otделение, 1983. P. 12–62. (In Russ.)
3. Kahar N., Duckett R.A., Ward I.M. Stress optical studies of oriented poly (methyl methacrylate). *Polymer*. 1978;19(2):136–144.
4. Botto P.A., Duckett R.A., Ward I.M. The yied and thermoelastic properties of oriented poly (methyl methacrylate). *Polymer*. 1987;28(2):257–262.
5. Beloshenko V.A., Kozlov G.V., Slobodina V.G., Prut E.V., Grinev V.G. Heat shrinkage of ultrahigh molecular weight polyethylene extrudates and polymerization-filled compositions based on it. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya B*. 1995;37(6):1089–1092. (In Russ.)
6. Kozlov G.V., Beloshenko V.A., Slobodina V.G., Prut E.V. Structural changes in ultra-high-molecular-mass polyethylene during solid-phase extrusion. *Vysokomolekulyarnye soedineniya. Seriya B*. 1996;38(6):1056–1060. (In Russ.)
7. Watts M.P.C., Zachariades A.E., Porter R.S. Shrinkage as a measure of the deformation efficiency of ultraoriented high density polyethelene. *J. Mater. Sci*. 1980;15(2):426–430.
8. Belousov V.N., Kozlov G.V., Mikitaev A.K., Lipatov Yu.S. Links in the glassy state of linear amorphous polymers. *Doklady AN SSSR*. 1990;313(3):630–633. (In Russ.)
9. Kozlov G.V., Sanditov D.S. *Angarmonicheskie efekty i fiziko-mekhanicheskie svojstva polimerov* [Anharmonic effects and physical and mechanical properties of polymers.]. Novosibirsk: Nauka. 1994. 261 p. (In Russ.)
10. Kozlov G.V., Beloshenko V.A., Varyukhin V.N., Lipatov Yu.S. Application of cluster model for the description of epoxy polymer structure and properties. *Polymer*. 1999;40(6):1045–1051.
11. Kozlov G.V., Beloshenko V.A., Varyuxin V.N., Novikov V.U. Order and fractality of amorphous-crystalline polymers. *Zhurnal fizicheskikh issledovaniy* [Journal of Physical Research]. 1997;1(2):204–207. (In Russ.)
12. Kozlov G.V., Belousov V.N., Serdyuk V.D., Mikitaev A.K., Mashukov N.I. Stability condition for a cluster network of macromolecular links. *Doklady of Adyghe (Circassian) International Academy of Sciences*. 1997;2(2):88–93. (In Russ.)
13. Sanditov D.S., Kozlov G.V., Belousov V.N., Lipatov Yu.S. Cluster model and fluctuation free volume model of polymer glasses. *Fizika i himia stekla*. 1994;20(1):3–13. (In Russ.)
14. Kozlov G.V., Gazaev M.A., Novikov V.U., Mikitaev A.K. Modeling the structure of amorphous polymers as a percolation cluster. *Technical Physics Letters*. 1996;22(16):31–38. (In Russ.)
15. Aloev V.Z., Kozlov G.V. *Fizika orientacionnyh yavlenij v polimernyh materialah* [Physics of Orientation Phenomena in Polymer Materials.]. Nalchik: Poligrafservis i T, 2002. 288 p. (In Russ.)

#### Сведения об авторах

**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, Author ID: 258589, Scopus ID: 6505993830

**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, Author ID: 742730, Scopus ID: 55558043600

#### Information about the authors

**Vladimir Z. Alov** – Doctor of Chemical Sciences, professor in the chair of Technical mechanics and physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4533-8035, Author ID: 258589, Scopus ID: 6505993830

**Zaira M. Zhirikova** – Candidate of physic-mathematical sciences associate professor at the department of technical mechanics and physics, Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V.M. Kokov, SPIN-code: 4378-8131, Author ID: 742730, Scopus ID: 55558043600

---

**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 14.11.2022;  
одобрена после рецензирования 01.12.2022;  
принята к публикации 07.12.2022.*

*The article was submitted 14.11.2022;  
approved after reviewing 01.12.2022;  
accepted for publication 07.12.2022.*