



DOI: <http://dx.doi.org/10.15688/jvolsu10.2015.2.10>

УДК 669.017

ББК 24.4

## ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРЫ СМЕСИ ПОЛИЭТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ/ПОЛИБУТИЛЕНТЕРЕФТАЛАТ ОТ СКОРОСТИ ЕЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ИЗ РАСПЛАВА <sup>1</sup>

**Микитаев Муслим Абдулахович**

Кандидат химических наук,  
старший научный сотрудник кафедры органической химии и высокомолекулярных соединений,  
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Бербекова  
I\_dolbin@mail.ru  
ул. Чернышевского, 175, 360004 г. Нальчик, Российская Федерация

**Козлов Георгий Владимирович**

Старший научный сотрудник кафедры органической химии и высокомолекулярных соединений,  
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Бербекова  
I\_dolbin@mail.ru  
ул. Чернышевского, 175, 360004 г. Нальчик, Российская Федерация

**Зайков Геннадий Ефремович**

Доктор химических наук, профессор,  
заведующий отделом биологической и химической физики полимеров,  
Институт биохимической физики им. Н.М. Эмануэля РАН  
chembio@sky.chph.ras.ru  
ул. Косыгина, 4, 119334 г. Москва, Российская Федерация

**Микитаев Абдулах Касбулатович**

Доктор химических наук,  
профессор кафедры органической химии и высокомолекулярных соединений,  
Кабардино-Балкарский государственный университет им. Бербекова  
I\_dolbin@mail.ru  
ул. Чернышевского, 175, 360004 г. Нальчик, Российская Федерация

**Аннотация.** Исследованы структурные изменения смеси полиэтилентерефталат/полибутилентерефталат, вызванные вариацией скорости охлаждения смеси из расплава в широких пределах. Показано, что эти изменения реализуются как для кристаллической фазы, так и для аморфной на всех структурных уровнях: молекулярном, топологическом и надсегментальном. Все указанные изменения тесно взаимосвязаны между собой.

**Ключевые слова:** полимерная смесь, структура, скорость охлаждения, кристалличность, эффективность нуклеации.

## Введение

Исследования полимерных смесей выполняются с целью получения материалов, имеющих специфические физические и химические свойства, и для оптимизации процессов их получения, что позволяет снизить стоимость конечного продукта. Особенности таких смесей можно предсказать, используя соответствующие модели, основанные на представлениях о совместимости и взаимодействии компонент смеси. В последние годы особый интерес вызывают смеси полиэтилентерефталат/полибутилентерефталат (ПЭТ/ПБТ) [10; 15; 16; 20; 21], поскольку они показали превосходные механические свойства из-за синергетических эффектов в процессе кристаллизации [20]. Как отметили авторы публикации [20], процесс формирования структуры указанных смесей является достаточно сложным и включает такие эффекты, как совместимость, реакции трансэтерификации и термической деструкции, а также отдельную кристаллизацию компонент. Поскольку и ПЭТ, и ПБТ являются аморфно-кристаллическими полимерами, то для них важным фактором формирования структуры из расплава служит скорость охлаждения. Этот эффект исследовали авторы работы [20], но только в рамках кристаллической структуры смесей. Однако для аморфно-кристаллических полимеров важным фактором является как структура кристаллических областей, так и структура полимерного материала в целом [17]. Поэтому целью настоящей работы является исследование влияния скорости охлаждения смеси ПЭТ/ПБТ на указанные структурные факторы, что будет выполнено с привлечением современных физических концепций – фрактального анализа [17] и кластерной модели структуры аморфного состояния полимеров [8].

## Эксперимент

Для получения смеси ПЭТ/ПБТ с содержанием ПЭТ 40 масс. % использованы промышленные полимеры: ПЭТ со среднечисловой молекулярной массой  $\bar{M}_n = 16,5$  кг/моль и ПБТ с  $\bar{M}_n = 19,3$  кг/моль. Смесь по-

лучена смешиванием компонент в расплаве на шнековом экструдере с диаметром шнека 30 мм и отношением длина/диаметр шнека 35 при скорости 200 об/мин (продолжительность пребывания в экструдере ~ 150 с) в атмосфере инертного газа. Затем экструдат гранулировался и образцы для испытаний в виде тонких пленок с размерами  $25 \times 20 \times 0,1$  мм получены прессованием на лабораторном прессе «Carver» при температуре 543 К под вакуумом. Вариация скорости охлаждения образцов из расплава в широком интервале ( $dT/dt = 0,1 - 1000$  К·с<sup>-1</sup>, где  $T$  – температура,  $t$  – время) достигалась с помощью разных методов: изменением типа охлаждающей среды (вода или воздух), скорости течения этой среды и толщины металлических пластин держателя образцов [20].

Кристаллическая структура смеси ПЭТ/ПБТ исследована методом широкоугольной рентгеновской дифракции на дифрактометре «Bruker» модели «D8 Advance». Плотность образцов измерена в градиентной колонке при температуре 277 К, а микротвердость определена по методу Виккерса, на микротвердомере модели «МНТ-10 Anton Paar» при температуре 293 К [20].

## Результаты и обсуждение

Как известно [12], наиболее общим информатором структуры любого материала (в том числе и полимерного) является ее фрактальная (хаусдорфова) размерность  $d_f$ . Оценить величину  $d_f$  можно по результатам измерения микротвердости  $H_v$  с помощью следующего уравнения [6]:

$$\frac{H_v}{\sigma_T} = \left[ 0,07 + 0,61 \ln \left( \frac{3d_f}{3-d_f} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\sigma_T$  – предел текучести, равный для рассматриваемой смеси 59 МПа [15].

Как можно видеть на рисунке 1, наблюдается снижение размерности  $d_f$  по мере роста скорости охлаждения  $dT/dt$ , причем эта зависимость разбивается на два линейных участка с разным наклоном. Объяснение этому переходу при  $dT/dt \approx 1 - 40$  К·с<sup>-1</sup> будет дано ниже.

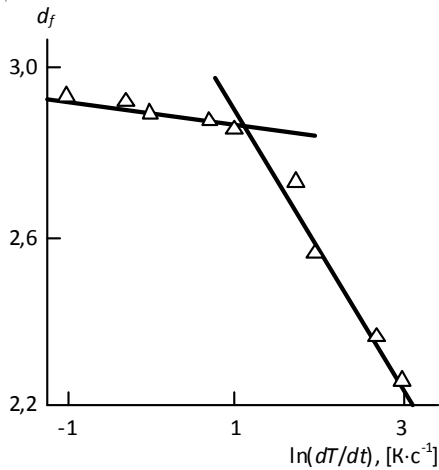


Рис. 1. Зависимость фрактальной размерности структуры  $d_f$  от скорости охлаждения  $dT/dt$  в логарифмических координатах для смеси ПЭТ/ПБТ

Ранее было показано [11], что в случае аморфно-кристаллических полимеров величина  $d_f$  является растущей функцией их степени кристалличности  $K$ , и для полиэтиленов эта взаимосвязь дается следующим уравнением:

$$d_f = 2 + K. \quad (2)$$

Аналогичная зависимость была получена для смеси ПЭТ/ПБТ, которая приведена на рисунке 2. Форма этой зависимости  $d_f(K^{1/2})$  выбрана с целью ее линеаризации, и аналитически ее можно описать следующим эмпирическим уравнением:

$$d_f = 2 + 1,35K^{1/2}. \quad (3)$$

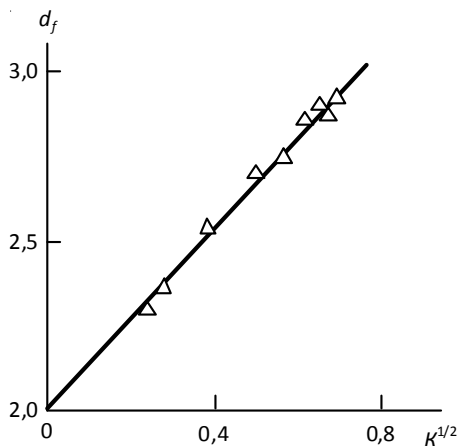


Рис. 2. Зависимость фрактальной размерности структуры  $d_f$  от степени кристалличности  $K$  для смеси ПЭТ/ПБТ

Отметим, что максимальная для реальных твердых тел величина  $d_f = 2,95$  [2] достигается при  $K \approx 0,5$ , что является предельным значением степени кристалличности для неориентированных ПЭТ и ПБТ [7]. Из сравнения уравнений (2) и (3) следует, что степень кристалличности сильнее влияет на размерность структуры для полиэфиров ПЭТ и ПБТ, чем для полиолефинов (полиэтиленов).

Авторы работы [1] на примере ряда полимеров получили следующую зависимость степени кристалличности  $K$  от молекулярной характеристики этих полимеров  $C_\infty$ :

$$K = BC_\infty^{1/3}, \quad (4)$$

где  $B$  – константа, равная 0,32;  $C_\infty$  – характеристическое отношение, которое является показателем статистической гибкости полимерной цепи [4].

Величина  $C_\infty$  связана с размерностью  $d_f$  следующим уравнением [8]:

$$C_\infty = \frac{2d_f}{d(d-1)(d-d_f)} + \frac{4}{3}, \quad (5)$$

где  $d$  – размерность евклидова пространства, в котором рассматривается фрактал (очевидно, в нашем случае  $d = 3$ ).

Оценки согласно уравнению (5) показали снижение  $C_\infty$  в интервале 16,9–2,33 при вариации  $dT/dt$  от 0,1 до 1000. Расчет согласно уравнению (4) обнаружил уменьшение параметра  $B$  от 0,191 до 0,053 в указанном интервале скоростей охлаждения. Зависимость  $B(dT/dt)$  в логарифмических координатах приведена на рисунке 3. Как и график рисунка 1, зависимость  $B(dT/dt)$  снова распадается на два линейных участка с точкой перехода в интервале  $dT/dt = 1 - 40 \text{ К} \cdot \text{с}^{-1}$ . По своему физическому смыслу уменьшение  $B$  означает снижение вероятности реализации гибкости полимерной цепи формировать складки кристаллита, поскольку этот процесс зависит от времени, а не является мгновенным. Отметим, что в случае изотермической кристаллизации при  $C_\infty = 4,1$  для ПЭТ и ПБТ [23] величина  $K$  согласно уравнению (4) равна 0,512, что хорошо согласуется с цитированным выше значением  $K$  для этих полимеров в неориентированном состоянии. Очевидно, что снижение продолжительности кристаллизации, определяемое ростом ее скорости, существенно затрудняет реализацию гибкости полимерной цепи при формировании кри-

сталлитов, что уменьшает коэффициент  $B$  и, следовательно, степень кристалличности  $K$ .

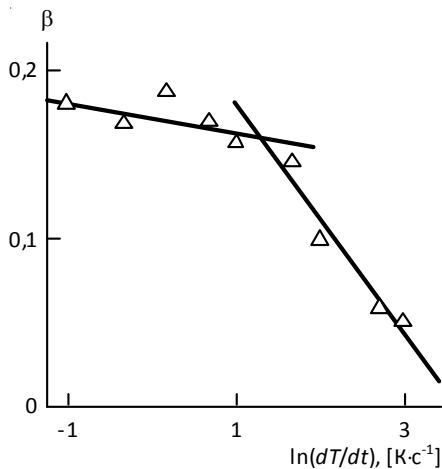


Рис. 3. Зависимость коэффициента  $B$  в уравнении (4) от скорости охлаждения  $dT/dt$  в логарифмических координатах для смеси ПЭТ/ПБТ

Далее вернемся к точке перехода при  $dT/dt = 1 - 40 \text{ K}\cdot\text{c}^{-1}$  на графиках рисунков 1 и 3. Как указано в работе [20], такой же переход при указанных значениях  $dT/dt$  наблюдается и для зависимостей  $K(dT/dt)$  и  $H_v(dT/dt)$ . Он обусловлен структурным фактором, а именно переходом от совместной кристаллизации ПЭТ и ПБТ к формированию отдельных кристаллитов компонент смеси ПЭТ/ПБТ. Как следует из данных рисунка 3, такой переход процесса кристаллизации резко снижает вероятность реализации гибкости полимерной цепи при формировании кристаллитов, что отражается на величине  $K$  и, как следствие, на структуре смеси в целом, характеризуемой размерностью  $d_f$  (рис. 2).

Существует еще один аспект кристаллизации смеси ПЭТ/ПБТ с переменной скоростью охлаждения. Чем меньше скорость охлаждения расплава, тем больше последовательности полимерных цепей включаются в формирование надсегментальных формирований согласно правилу Гиббса – Томсона. В аморфно-кристаллических полимерах образуются два типа указанных формирований: кристаллиты и нанокластеры (области локального порядка) в некристаллических областях. Если типичный размер первых составляет  $\sim 10 \text{ нм}$ , то вторых – порядка  $1 \text{ нм}$  [8]. Поэтому повышение скорости охлаждения будет смещать равновесие в сторону последних, которые пред-

ставляют собой аморфный аналог кристаллита с вытянутыми цепями (КВЦ). Определить относительную долю нанокластеров  $\varphi_{\text{ккл}}$  можно согласно следующему перколяционному соотношению [8]:

$$\varphi_{\text{ккл}} = 0,03(1 - K)(T_{\text{охл}} - T)^{0,55}, \quad (6)$$

где  $T_{\text{охл}}$  и  $T$  – температуры начала и окончания процесса охлаждения смеси, равные  $443$  и  $293 \text{ K}$  соответственно [20].

На рисунке 4 приведены зависимости степени кристалличности  $K$  и относительной доли нанокластеров  $\varphi_{\text{ккл}}$  от скорости охлаждения  $dT/dt$  для рассматриваемой смеси ПЭТ/ПБТ. Как и следовало ожидать, повышение  $dT/dt$  приводит к снижению  $K$ , поскольку для формирования кристаллита со сложными цепями (КСЦ) требуется последовательность полимерной цепи длиной порядка  $20 \text{ нм}$ , и повышению  $\varphi_{\text{ккл}}$ , поскольку для формирования нанокластеров требуется последовательность указанной цепи с длиной порядка длины статистического сегмента, то есть  $\sim 1 \text{ нм}$  [8]. По существу, график рисунка 4 отражает процесс «аморфизации» аморфно-кристаллического полимера по мере роста скорости его охлаждения. Отметим, что условие  $K = \varphi_{\text{ккл}}$  реализуется в интервале  $dT/dt = 1 - 40 \text{ K}\cdot\text{c}^{-1}$  по аналогии с интервалом перехода на графиках рисунков 1 и 3.

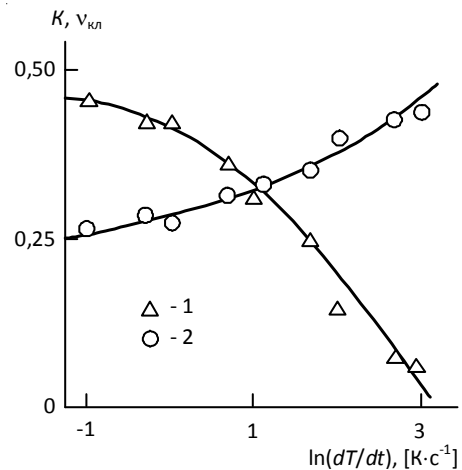


Рис. 4. Зависимости степени кристалличности  $K(I)$  и плотности кластерной сетки физических зацеплений  $\nu_{\text{ккл}}(2)$  от скорости охлаждения  $dT/dt$  в логарифмических координатах для смеси ПЭТ/ПБТ

Формирование кристаллитов и нанокластеров – тесно взаимосвязанные процессы. Как известно [18], увеличение плотности сетки мак-

ромолекулярных зацеплений затрудняет формирование кристаллической фазы, что в конечном итоге приводит к снижению степени кристалличности. Нанокластеры представляют собой многофункциональные узлы сетки физических зацеплений, чья плотность  $\nu_{\text{кл}}$  определяется следующим образом [8]:

$$N_{\text{кл}} = \frac{\Pi_{\text{кл}}}{S l_0 C_{\infty}}, \quad (7)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения макромолекулы,  $l_0$  – длина скелетной связи основной цепи. Для рассматриваемых полимеров  $S = 20 \text{ \AA}^2$  [13] и  $l_0 = 0,125 \text{ нм}$  [14].

На рисунке 5 приведена зависимость  $K(\nu_{\text{кл}})$  для рассматриваемой смеси ПЭТ/ПБТ, из которой следует ожидаемое снижение  $K$  по мере роста  $\nu_{\text{кл}}$ .

И наконец, как хорошо известно [20], ПБТ является нуклеатором кристаллизации ПЭТ. Для количественной оценки эффективности нуклеации может быть использован параметр  $N_{\text{эф}}$ , который определяется согласно уравнению [9]:

$$N_{\text{эф}} = 21 + 3,5C_{\infty}, \quad (8)$$

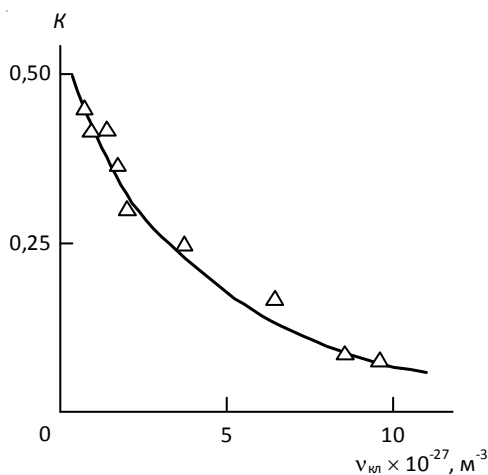


Рис. 5. Зависимость степени кристалличности  $K$  от плотности кластерной сетки физических зацеплений  $\nu_{\text{кл}}$  для смеси ПЭТ/ПБТ

На рисунке 6 приведена зависимость  $N_{\text{эф}}(dT/dt)$  для рассматриваемой смеси ПЭТ/ПБТ. Как и следовало ожидать, наблюдается снижение  $N_{\text{эф}}$  по мере роста  $dT/dt$ , что в конечном итоге приводит к снижению кристалличности смеси. Этот эффект обусловлен физическим смешиванием сегментов макромолекул ПЭТ и ПБТ, который усиливается по мере роста скорости охлаждения  $dT/dt$  [20].

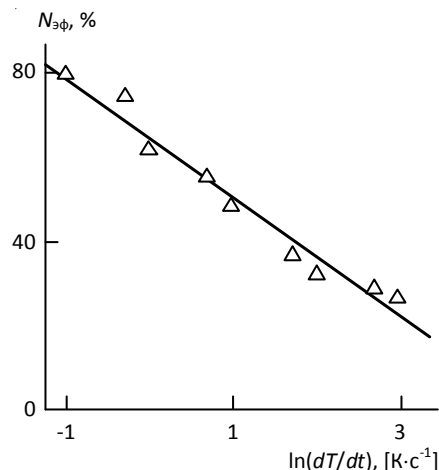


Рис. 6. Зависимость показателя эффективности нуклеации  $N_{\text{эф}}$  от скорости охлаждения  $dT/dt$  в логарифмических координатах для смеси ПЭТ/ПБТ

### Выводы

Таким образом, результаты настоящей работы продемонстрировали, что изменение скорости охлаждения из расплава аморфно-кристаллической смеси ПЭТ/ПБТ изменяет не только кристаллическую структуру, но и всю структуру смеси как целого. Указанные изменения происходят в кристаллических и аморфных областях структуры и затрагивают ее надсегментальный, топологический и молекулярный уровни. Более того, все эти изменения взаимосвязаны. Процесс «аморфизации» аморфно-кристаллической смеси ПЭТ/ПБТ со структурной точки зрения реализуется тогда, когда относительная доля областей локального порядка в аморфной фазе превысит степень кристалличности. Эффективность нуклеации кристаллической фазы ПЭТ/ПБТ полибутилентерефталатом резко снижается по мере роста скорости охлаждения.

### ПРИМЕЧАНИЕ

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках комплексного проекта по созданию высокотехнологичного производства при участии российского высшего учебного заведения, Договор ООО «Таннета» с Министерством образования и науки Российской Федерации от 12 февраля 2013 г. № 02.G25.31.0008 (Постановление Правительства РФ № 218).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алоев, В. З. Физика ориентированных явлений в полимерных материалах / В. З. Алоев, Г. В. Козлов. – Нальчик : Полиграфсервис и Т, 2002. – 288 с.
2. Баланкин, А. С. Синергетика деформируемого тела / А. С. Баланкин. – М. : Изд-во Министерства обороны СССР, 1991. – 404 с.
3. Бахрачева, Ю. С. Оценка вязкости разрушения сталей по результатам контактного деформирования / Ю. С. Бахрачева // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10, Инновационная деятельность. – 2012. – № 6. – С. 53–57.
4. Будтов, В. П. Физическая химия растворов полимеров / В. П. Будтов. – СПб. : Химия, 1992. – 384 с.
5. Влияние содержания азота на структуру и свойства нитроцементованной стали / В. И. Шапочкин, Л. М. Семенова, Ю. С. Бахрачева, Е. Л. Гюлиханов, С. В. Семенов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2010. – № 9. – С. 12–18.
6. Джангуразов, Б. Ж. Структура и свойства нанокompозитов полимер/органоглина / Б. Ж. Джангуразов, Г. В. Козлов, А. К. Микитаев. – М. : Изд-во РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2013. – 316 с.
7. Калинин, Э. Л. Свойства и переработка термопластов / Э. Л. Калинин, М. Б. Саковцева. – Л. : Химия, 1983. – 288 с.
8. Козлов, Г. В. Структура аморфного состояния полимеров / Г. В. Козлов, Е. Н. Овчаренко, А. К. Микитаев. – М. : Изд-во РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2009. – 392 с.
9. Козлов, Г. В. Физико-механические свойства наноструктурированных полимерных композитов в рамках фрактального и мультифрактального описаний / Г. В. Козлов, Ю. Г. Яновский, Ю. Н. Карнет. – М. : OneBook, 2013. – 341 с.
10. Микитаев, М. А. Влияние типа переработки смесей полиэтилентерефталат/полибутилентерефталат на их ударную вязкость / М. А. Микитаев, Х. Ш. Яхьяева, Г. В. Козлов // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. – 2014. – Т. 4, № 6. – С. 61–67.
11. Порядок и фрактальность аморфно-кристаллических полимеров / Г. В. Козлов, В. А. Белошенко, В. Н. Варюхин, В. У. Новиков // Журнал физических исследований. – 1997. – Т. 1, № 2. – С. 204–207.
12. Сложные системы в природе и технике / И. Р. Кузеев, Г. Х. Самигуллин, Д. В. Куликов, М. М. Закирничная. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 1997. – 225 с.
13. Aharoni, S. M. Correlations Between Chain Parameters and Failure Characteristics of Polymers

Below their Glass Transition Temperature / S. M. Aharoni // *Macromolecules*. – 1985. – Vol. 18, № 2. – P. 2624–2630.

14. Aharoni, S. M. On Entanglements of Flexible and Rodlike Polymers / S. M. Aharoni // *Macromolecules*. – 1983. – Vol. 16, № 9. – P. 1722–1728.
15. Aravinthan, G. Blends of Poly(ethylene terephthalate) and Poly(butylene terephthalate) / G. Aravinthan, D. D. Kale // *J. Appl. Polymer Sci.* – 2005. – Vol. 98, № 1. – P. 75–82.
16. Guerrica-Echevarria, G. Structure and Mechanical Properties of Impact Modified Poly(ethylene terephthalate)/Poly(butylene terephthalate) Blends / G. Guerrica-Echevarria, J. I. Eguiazabal // *Polymer Engng. Sci.* – 2009. – Vol. 49, № 4. – P. 1013–1021.
17. Kozlov, G. V. Fractal Mechanics of Polymers. Chemistry and Physics of Complex Polymeric Materials / G. V. Kozlov, Yu. G. Yanovskii. – Toronto, New Jersey : Apple Academic Press, 2015. – 370 p.
18. Mandelkern, L. The Relation Between Structure and Properties of Crystalline Polymers / L. Mandelkern // *Polymer J.* – 1985. – Vol. 17, № 1. – P. 337–350.
19. Szostak, M. Mechanical and Thermal Properties of PET/PBT Blends / M. Szostak // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* – 2004. – Vol. 416, № 2. – P. 209–215.
20. The Solidification Behavior of a PBT/PET Blend over a Wide Range of Cooling Rate / A. Stocco, V. La Carrubba, S. Piccarolo, V. Brucato // *J. Polymer Sci.: Part B: Polymer Phys.* – 2009. – Vol. 47, № 4. – P. 799–810.
21. Transesterification Reaction of the BaSO<sub>4</sub>-filled PBT/poly(ethylene terephthalate) Blend / S.-S. Lee, J. Kim, M. Park, S. Lim, C.R. Choe // *J. Polymer Sci.: Part B: Polymer Phys.* – 2001. – Vol. 39, № 11. – P. 2589–2597.
22. Vasilyev, A. The Arrangement Scheme and its Influence on Vibration Process of the Vehicle Piston Engine / A. Vasilyev, K. Dolgov // *Mechanika*. – 2007. – Vol. 66, № 4. – P. 44–48.
23. Wu, S. Secondary Relaxation, Brittle-Ductile Transition Temperature, and Chain Structure / S. Wu // *J. Appl. Polymer Sci.* – 1992. – Vol. 46, № 4. – P. 619–624.

REFERENCES

1. Alov V.Z., Kozlov G.V. *Fizika orientirovannykh yavleniy v polimernykh materialakh* [Physics of Oriented Phenomena in Polymeric Materials]. Nalchik, Poligrafservis i T Publ., 2002. 288 p.

2. Balankin A.S. *Sinergetika deformiruemogo tela* [Synergetics of Deformable Body]. Moscow, Izd-vo Ministerstva Oborony SSSR, 1991. 404 p.

3. Bakhracheva Yu.S. Otsenka vyazkosti razrusheniya staley po rezultatam kontaktnogo deformirovaniya [Evaluation of Fracture Toughness of Steels According to the Results of Contact Deformation]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10, Innovatsionnaya deyatelnost* [Science Journal of Volgograd State University. Technology and Innovations], 2012, no. 6, pp. 53-57.

4. Budtov V.P. *Fizicheskaya khimiya rastvorov polimerov* [Physical Chemistry of Polymer Solutions]. Saint Petersburg, Khimiya Publ., 1992. 384 p.

5. Shapochkin V.I., Semenova L.M., Bakhracheva Yu.S., Gyulikhandanov E.L., Semenov S.V. Vliyanie sodержaniya azota na strukturu i svoystva nitrotsementovannoy stali [The Influence of Nitrogen Content on the Structure and Properties of Steel Nitrosomethane]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2010, no. 9, pp. 12-18.

6. Dzhangurazov B.Zh., Kozlov G.V., Mikitaev A.K. *Struktura i svoystva nanokompozitov polimer/organoglina* [Structure and Properties of Nanocomposites Polymer/Organoclay]. Moscow, Izd-vo RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2013. 316 p.

7. Kalinchev E.L., Sakovtseva M.B. *Svoystva i pererabotka termoplastov* [Properties and Processing of Thermoplastics]. Leningrad, Khimiya Publ., 1983. 288 p.

8. Kozlov G.V., Ovcharenko E.N., Mikitaev A.K. *Struktura amorfnogo sostoyaniya polimerov* [The Structure of the Amorphous State of Polymers]. Moscow, Izd-vo RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2009. 392 p.

9. Kozlov G.V., Yanovskiy Yu.G., Karnet Yu.N. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva nanostrukturirovannykh polimernykh kompozitov v ramkakh fraktalnogo i multifraktalnogo opisaniy* [Physical and Mechanical Properties of Nanostructured Polymer Composites in the Framework of Fractal and Multifractal Descriptions]. Moscow, OneBook Publ., 2013. 341 p.

10. Mikitaev M.A., Yakhyaeva Kh.Sh., Kozlov G.V. Vliyanie tipa pererabotki smesey polietilentereftalat/polibutilentereftalat na ikh udarnuyu vyazkost [The Influence of Type of Processing Mixtures of Polyethylene Terephthalate/Polybutylene Terephthalate on Their Toughness]. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2014, vol. 4, no. 6, pp. 61-67.

11. Kozlov G.V., Beloshenko V.A., Varyuhkin V.N., Novikov V.U. Poryadok i fraktalnost amorfnokristallicheskiykh polimerov [Order and Fractality of Amorphous-Crystalline Polymers]. *Zhurnal fizicheskikh issledovaniy*, 1997, vol. 1, no. 2, pp. 204-207.

12. Kuzeev I.R., Samigullin G.H., Kulikov D.V., Zakirnichnaya M.M. *Slozhnye sistemy v prirode i tekhnike* [Complex Systems in Nature and Technology]. Ufa, Izd-vo UGNTU, 1997. 225 p.

13. Aharoni S.M. Correlations Between Chain Parameters and Failure Characteristics of Polymers Below Their Glass Transition Temperature. *Macromolecules*, 1985, vol. 18, no. 12, pp. 2624-2630.

14. Aharoni S.M. On Entanglements of Flexible and Rodlike Polymers. *Macromolecules*, 1983, vol. 16, no. 9, pp. 1722-1728.

15. Aravinthan G., Kale D.D. Blends of Poly(ethyleneterephthalate) and Poly(butylene-terephthalate). *J. Appl. Polymer Sci.*, 2005, vol. 98, no. 1, pp. 75-82.

16. Guerrica-Echevarria G., Eguiazabal J.I. Structure and Mechanical Properties of Impact Modified Poly(ethyleneterephthalate)/Poly(butylene-terephthalate) blends. *Polymer Engng. Sci.*, 2009, vol. 49, no. 4, pp. 1013-1021.

17. Kozlov G.V., Yanovskiy Yu.G. *Fractal Mechanics of Polymers. Chemistry and Physics of Complex Polymeric Materials*. Toronto, New Jersey, Apple Academic Press, 2015. 370 p.

18. Mandelkern L. The Relation Between Structure and Properties of Crystalline Polymers. *Polymer J.*, 1985, vol. 17, no. 1, pp. 337-350.

19. Szostak M. Mechanical and Thermal Properties of PET/PBT Blends. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2004, vol. 416, no. 2, pp. 209-215.

20. Stocco A., La Carrubba V., Piccarolo S., Brucato V. The Solidification Behavior of a PBT/PET Blend Over a Wide Range of Cooling Rate. *J. Polymer Sci.: Part B: Polymer Phys.*, 2009, vol. 47, no. 4, pp. 799-810.

21. Lee S.-S., Kim J., Park M., Lim S., Choe C.R. Transesterification Reaction of the BaSO<sub>4</sub>-Filled PBT/Poly(ethylene terephthalate) Blend. *J. Polymer Sci.: Part B: Polymer Phys.*, 2001, vol. 39, no. 11, p. 2589-2597.

22. Vasilyev A., Dolgov K. The Arrangement Scheme and Its Influence on Vibration Process of the Vehicle Piston Engine. *Mechanika*, 2007, vol. 66, no. 4, pp. 44-48.

23. Wu S. Secondary Relaxation, Brittle-Ductile Transition Temperature, and Chain Structure. *J. Appl. Polymer Sci.*, 1992, vol. 46, no. 4, pp. 619-624.

**THE DEPENDENCE OF BLEND POLY(ETHYLENE TEREPHTHALATE)  
/POLY(BUTYLENE TEREPHTHALATE) STRUCTURE  
ON ITS COOLING RATE FROM A MELT**

**Mikitaev Muslim Abdulahovich**

Candidate of Chemical Sciences, Senior Researcher,  
Department of Organic Chemistry and Macromolecular Compounds,  
Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov  
I\_dolbin@mail.ru  
Chernyshevskogo St., 175, 360004 Nalchik, Russian Federation

**Kozlov Georgiy Vladimirovich**

Senior Researcher,  
Department of Organic Chemistry and Macromolecular Compounds,  
Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov  
I\_dolbin@mail.ru  
Chernyshevskogo St., 175, 360004 Nalchik, Russian Federation

**Zaikov Gennadiy Efremovich**

Doctor of Chemical Sciences, Professor,  
Head of Department of Biological and Chemical Physics of Polymers,  
Institute of Biochemical Physics named after N. M. Emanuel, RAS  
chembio@sky.chph.ras.ru  
Kosygina St., 4, 119334 Moscow, Russian Federation

**Mikitaev Abdulah Kasbulatovich**

Doctor of Chemical Sciences, Professor,  
Department of Organic Chemistry and Macromolecular Compounds,  
Kabardino-Balkarian State University named after H. M. Berbekov  
I\_dolbin@mail.ru  
Chernyshevskogo St., 175, 360004 Nalchik, Russian Federation

**Abstract.** Investigation of polymer mixtures is performed with the aim of obtaining materials with specific physical and chemical properties, and optimizing the processes of their production, thus reducing the cost of the final product. Features of such mixtures can be predicted using appropriate models based on the notions of compatibility and interaction of mixture components. In recent years the mixtures of polyethylene terephthalate/polybutylene terephthalate are of particular interest.

The structural changes of blend poly(ethylene terephthalate)/poly(butylene terephthalate), caused by blend cooling from a melt rate variation within the wide limits, have been studied. It has been shown that these changes are realized for both crystalline and amorphous phases and on all structural levels: molecular, topological and suprasegmental ones. All indicated changes are interconnected closely between themselves.

Thus, the results of this work demonstrated that changing the cooling rate from the melt amorphous-crystalline mixture modifies not only the crystal structure but also the entire structure of the mixture as a whole.

**Key words:** polymer blend, structure, cooling rate, crystallinity, nucleation efficiency.