

**Зыонг Тхи Май, О. О. Сазонов, А. Р. Ибрагимова,
И. М. Давлетбаева**

МЕТАЛКОМПЛЕКСНАЯ МОДИФИКАЦИЯ СЕГМЕНТИРОВАННЫХ ПОЛИУРЕТАНОВ

Ключевые слова: сегментированные полиуретаны, координационное связывание ионами меди, электрофизические свойства.

В последние годы значительно возрос интерес к созданию полимерных материалов, обладающих не только высокими механическими характеристиками, но и функциональными свойствами, в частности пониженными значениями удельного объёмного электрического сопротивления. Такие материалы находят широкое применение в качестве компонентов гибкой электроники, элементов сенсорных систем, антистатиков и прецизионных мембран. Перспективными для влияния на электрофизические свойства и практически значимыми являются сегментированные полиуретаны (СПУ), обладающие фазово-разделённой морфологией, что делает возможным точечное регулирование их структуры и свойств. В данной работе были исследованы металлокомплексные модификаторы (МК) сегментированных полиуретанов на основе комплексов хлорида Cu(II) с N,N' -диэтилгидроксиламином, которые способствуют появлению обменных центров переноса заряда, что приводит к снижению удельного объёмного электрического сопротивления модифицированных с использованием МК полиуретанов (МСПУ) на несколько порядков. Наименьшие значения объёмного электросопротивления для сегментированных полиуретанов, модифицированных МК, достигаются уже при очень низком его содержании, которое находится в диапазоне 0,1–0,5 мас.% хлорида меди (II), введенного в состав МК. Показано, что увеличение длины жесткого блока в МСПУ приводит к заметному росту значений ρ_v . Изучено влияние мольного соотношения исходных компонентов в металлокомплексной системе на значения ρ_v МСПУ. Наименьшие значения ρ_v достигаются при мольном соотношении хлорида Cu(II) с N,N' -диэтилгидроксиламином, составляющем 1:1. Координационное связывание с использованием низкого содержания МК приводит к повышению температуры перехода в вязкотекучее состояние со 160 °C для немодифицированного сегментированного полиуретана до 185 °C для МСПУ, содержащего 0,1 мас.% хлорида меди (II), введенного в состав МК. Сделан вывод о том, что существенные ориентационные процессы в полимерной матрице МСПУ индуцируются координационным связыванием. Поскольку 0,1 мас.% хлорида меди (II) относительно содержания жестких сегментов в мольном соотношении приближается к 1:100, можно сделать вывод о том, что такое координационное связывание имеет кооперативный эффект и объяснение этого эффекта требует дальнейших исследований.

**Duong Thi Mai, O. O. Sazonov, A. R. Ibragimova,
I. M. Davletbaeva**

METAL-COMPLEX MODIFICATION OF SEGMENTED POLYURETHANES

Keywords: segmented polyurethanes, coordination binding by copper ions, electrophysical properties.

In recent years, there has been a significant increase in interest in creating polymeric materials that have not only high mechanical characteristics, but also functional properties, in particular, reduced values of the specific volume electrical resistance. Such materials are widely used as components of flexible electronics, elements of sensor systems, antistatic agents and precision membranes. Segmented polyurethanes (SPU) with phase-separated morphology, which makes it possible to precisely regulate their structure and properties, are promising for influencing electrophysical properties and are practically significant. In this paper, we investigated metal complex modifiers (MC) of segmented polyurethanes based on Cu(II) chloride complexes with N,N' -diethylhydroxylamine, which promote the appearance of exchange charge transfer centers, which leads to a decrease in the specific volume electrical resistance of polyurethanes (MSPU) modified using MC by several orders of magnitude. The lowest values of volume electrical resistance for segmented polyurethanes modified with MC are achieved already at its very low content, which is in the range of 0.1–0.5 wt.% of copper (II) chloride introduced as part of MC. It is shown that an increase in the length of the rigid block in MSPU leads to a noticeable increase in the ρ_v values. The effect of the molar ratio of the initial components in the metal complex system on the ρ_v values of MSPU is studied. The lowest ρ_v values are achieved at a molar ratio of Cu(II) chloride to N,N' -diethylhydroxylamine of 1:1. Coordination bonding using a low MC content leads to an increase in the transition temperature to the viscous-flow state from 160 °C for unmodified segmented polyurethane to 185 °C for MSPU containing 0.1 wt.% of copper (II) chloride introduced as part of MC. It is concluded that significant orientation processes in the polymer matrix of MSPU are induced by coordination binding. Since 0.1 wt.% copper (II) chloride relative to the content of hard segments in the molar ratio approaches 1:100, it can be concluded that such coordination binding has a cooperative effect and the explanation of this requires further research.

Введение

В последние годы значительно возрос интерес к созданию полимерных материалов, обладающих не только высокими механическими характеристиками, но и функциональными свойствами, в частности пониженными значениями удельного объёмного электрического сопротивления. Такие материалы находят широкое применение в качестве

компонентов гибкой электроники, элементов сенсорных систем, антистатиков и прецизионных мембран [1–5]. Перспективными для влияния на электрофизические свойства и практически значимыми являются сегментированные полиуретаны (СПУ), обладающие фазово-разделённой морфологией, что делает возможным точечное регулирование их структуры и свойств.

СПУ состоят из чередующихся мягких и жёстких сегментов. Жёсткие сегменты, которые получают как правило на основе симметричных ароматических и низкомолекулярных диолов участвуют в формировании доменов, ответственных за прочность и термическую устойчивость СПУ. Мягкие сегменты вносятся в структуру СПУ за счёт использования олигоэфирдиолов или олигобутадиеنديолов и отвечают за гибкость и подвижность полимерной цепи [6-9]. Такая структура обеспечивает высокую адаптивность материала, однако сами по себе СПУ являются диэлектриками и требуют дополнительной модификации для придания им способности отводить статическое электричество.

Одним из перспективных подходов является введение в матрицу полиуретана координационных соединений переходных металлов, в частности меди. Особенностью ионов меди является способность находиться в нескольких устойчивых степенях окисления и участвовать в донорно-акцепторных взаимодействиях. В наших предыдущих работах были получены эффективные модификаторы для полиуретанов на основе металлокомплексных систем (МК) [10–12]. Были исследованы МК на основе комплексов хлорида Cu(II) с N,N' -диэтилгидроксиламином (ДЭГА), которые способствует появлению обменных центров переноса заряда, что приводит к снижению удельного объёмного электрического сопротивления полиуретанов на несколько порядков. Однако эти работы касались густосетчатых уретановых эластомеров без учёта влияния фазового разделения и их термомеханических характеристик.

Целью данной работы является исследование влияния соотношения компонентов при приготовлении МК системы на основе CuCl_2 и ДЭГА и содержания МК на электрофизические и термомеханические свойства модифицированных с использованием МК сегментированных полиуретанов. (МСПУ)

Экспериментальная часть

Для синтеза СПУ использовали полиокситетраметилэтиленгликоль (ПОТМГ, ММ=1000 г/моль), 1,4-бутандиол (БД) были приобретены у Korea PTG (Сеул, Южная Корея); хлорид меди(II) дигидрат ($\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), N,N' -диэтилгидроксиламин (ДЭГА) были приобретены у Acros Organics - Гил, Бельгия, 4,4'-метиленидифенилдиизоцианат (МДИ) приобретены у Soo Kyung Chemical (Чхонан, Южная Корея).

Полиокситетраметилэтиленгликоль освобождали от остаточной влаги при температуре $T=90^\circ\text{C}$ и остаточном давлении 0,7 кПа в течение 2-х часов. Кристаллогидраты $\text{CuCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ обезвоживали путем нагревания в течение 48 часов в термошкафу при температуре $T=120^\circ\text{C}$.

Для приготовления МК использовали следующие компоненты: хлорид меди(II), N,N' -диэтилгидроксиламин, при мольном соотношении 1:(0,25÷1,5). Рассчитанное количество CuCl_2

растворяли в ДЭГА. Процесс вели при охлаждении с использованием замороженной воды.

Синтез МСПУ проводился в несколько стадий. Первая стадия включала синтез уретанового преполимера (УП), содержащего концевые изоцианатные группы, путём взаимодействия МДИ и ПОТМГ при их мольном соотношении $[\text{МДИ}]:[\text{ПОТМГ}] = 2:1$ и $3:2$. Температура синтеза УП поддерживалась 80°C . За момент окончания синтеза УП принимали достижение 50%-ной конверсии NCO-групп, отслеживаемой титриметрически. По окончании синтеза реакционная масса вакуумировалась в течение 30 минут при остаточном давлении 0,7 кПа. На второй стадии в полученный УП вводился МК, далее реакционная система перемешивалась при температуре 80°C и остаточном давлении 0,7 кПа в течение 20 минут. После этого в реакционную массу добавляли эквимольное содержанию ПОТМГ количество БД в качестве удлинителя цепи. Полученную композицию вакуумировали при остаточном давлении 0,7 кПа. в течение 5 минут и заливали в формы. Формы выдерживали в сушильном шкафу при температуре 100°C в течение 24 часов.

Для оценки влияния координационного связывания на электрофизические характеристики СПУ были проведены измерения удельного объёмного электрического сопротивления (ρ_v) образцов, модифицированных различным количеством МК. На рисунках приведено содержание CuCl_2 , введённого в составе МК. На рисунке 1 представлена зависимость $\lg \rho_v$ от массовой доли CuCl_2 в составе МСПУ, полученных при различных мольных соотношениях компонентов жёсткого и мягкого блоков.

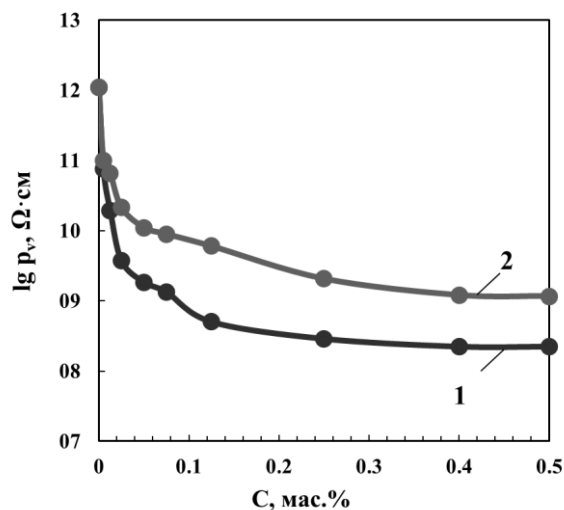


Рис. 1 – Зависимости $\lg \rho_v$ (Ом·см) для МСПУ полученных при $[\text{ПОТМГ}]:[\text{МДИ}]:[\text{БД}]=1:2:1$ (1) и $1:3:2$ (2) от содержания CuCl_2 , введенного в составе МК при $[\text{CuCl}_2]:[\text{ДЭГА}]=1:1$

Fig. 1 – Dependence of $\lg \rho_v$ (Ohm·cm) for MSPU obtained at $[\text{POTMG}]:[\text{MDI}]:[\text{BD}]=1:2:1$ (1) and $1:3:2$ (2) from the CuCl_2 content introduced in the composition of the MC at $[\text{CuCl}_2]:[\text{DEGA}]=1:1$

Анализ полученных данных показал, что при увеличении содержания CuCl_2 от 0 до 0,5 мас.% наблюдается резкое снижение ρ_v , более, чем на три порядка, что указывает на значительное изменение структуры материала. Минимальные значения достигались при содержании CuCl_2 , составляющем 0,5 мас.% после чего наблюдалась стабилизация значений. Такая зависимость свидетельствует о насыщении МСПУ активными центрами, способными к донорно-акцепторному переносу заряда.

Для уточнения оптимального состава МК были получены зависимости ρ_v от мольного соотношения $[\text{CuCl}_2]:[\text{ДЭГА}]$. Как показано на рисунке 2, наименьшие значения ρ_v регистрируются при эквимольном соотношении исходных компонентов, т.е. при $[\text{CuCl}_2]:[\text{ДЭГА}]=1:1$. При увеличении содержания ДЭГА или CuCl_2 вне эквимольного диапазона наблюдается рост сопротивления, связанный с нарушением равновесной структуры комплекса.

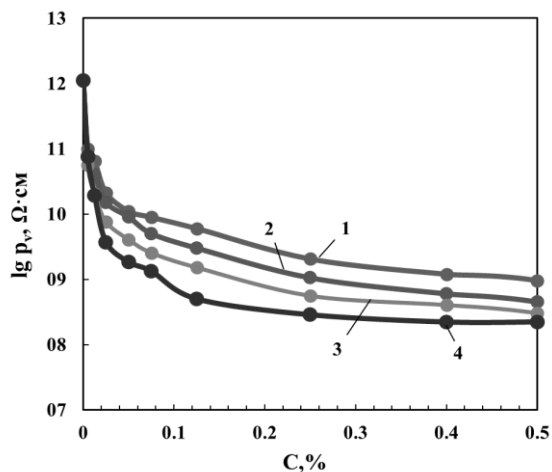


Рис. 2 – Зависимости $\lg \rho_v$ ($\text{Ом}\cdot\text{см}$) для МСПУ, полученных при $[\text{ПОТМГ}]:[\text{МДИ}]:[\text{БД}]=1:2:1$, от содержания CuCl_2 , введенного в составе МК. Мольное соотношение $[\text{CuCl}_2]:[\text{ДЭГА}] = 0,25$ (1), 0,75 (2), 0,75 (3), 1 (4).

Fig. 2 – Dependence of $\lg \rho_v$ ($\text{Ohm}\cdot\text{cm}$) for MSPU obtained at $[\text{POTMG}]:[\text{MDI}]:[\text{BD}]=1:2:1$ on the content of CuCl_2 introduced in the MK composition. Mole ratio $[\text{CuCl}_2]:[\text{DEGA}] = 0.25$ (1), 0.75 (2), 0.75 (3), 1 (4).

Были исследованы диэлектрические характеристики модифицированных полиуретанов в диапазоне частот 10^2 – 10^6 Гц. На рисунке 3 представлены частотные зависимости $\text{tg} \delta$ и ϵ' .

Как известно [13–15], зависимость ϵ' от частоты представляет собой дисперсию диэлектрической проницаемости. Дисперсию диэлектрической проницаемости, которая монотонно уменьшается с ростом приложенной частоты электрического поля, принято называть релаксацией. Характер релаксации ϵ' определяется дипольным и миграционным механизмом поляризации. Согласно данным, представленным на рисунке 3, металлокомплексное связывание оказывает заметное влияние на частотные зависимости $\text{tg} \delta$ и ϵ' для МСПУ. Так, для

немодифицированного СПУ наблюдаются очень низкие значения $\text{tg} \delta$ и ϵ' даже в области очень низких частот. В то же время использование системы CuCl_2 –ДЭГА даже при столь низком содержании, как 0,1 мас.%, приводит к существенным релаксационным переходам для МСПУ. Поскольку в диапазоне частот $\square = 104$ – 105 Гц начинает уменьшаться вклад различных видов поляризации пространственного заряда, можно судить о существенных ориентационных процессах, индуцируемых координационным связыванием в полимерной матрице МСПУ.

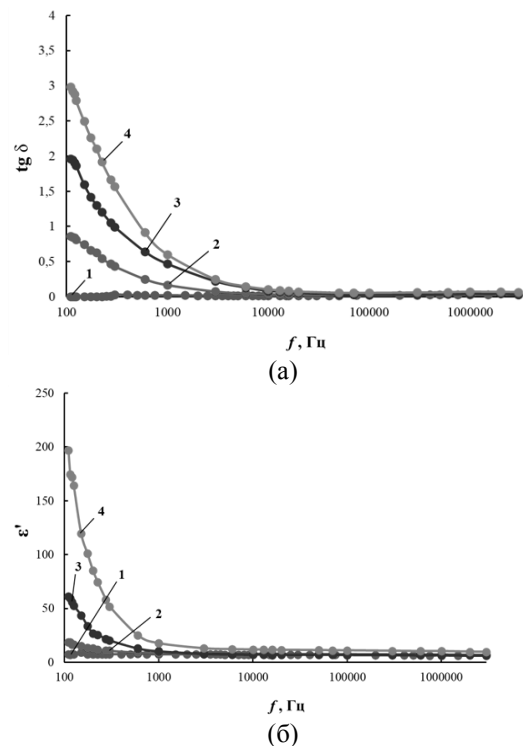


Рис. 3 – Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь (а) и диэлектрической проницаемости (б) для МСПУ, полученных на основе $[\text{ПОТМГ}]:[\text{МДИ}]:[\text{БД}]=1:2:1$ с различным содержанием CuCl_2 , введенного в составе МК при $[\text{CuCl}_2]:[\text{ДЭГА}]=1:1$. $[\text{CuCl}_2] = 0$ (1), 0,1 (2), 1,0 (3), 2,0 (4) мас.%

Fig. 3 – Frequency dependencies of the dielectric loss tangent (a) and dielectric permittivity (b) for MSPUs obtained on the basis of $[\text{POTMG}]:[\text{MDI}]:[\text{BD}]=1:2:1$ with different CuCl_2 contents introduced into the MC at $[\text{CuCl}_2]:[\text{DEGA}]=1:1$. $[\text{CuCl}_2] = 0$ (1), 0.1 (2), 1.0 (3), 2.0 (4) wt. %

Наблюдаемые эффекты начинаются с 0,1 мас.% CuCl_2 относительно содержания жестких сегментов в молярном соотношении, приближающемся к 1:100. То есть резкое падение удельного объемного электросопротивления, частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости при 0,1 мас.% CuCl_2 относительно немодифицированного СПУ не могут быть обусловлены только химическими взаимодействиями в структуре МПУ. Координационный узел связи, образованный с

участием МК, создает центр притяжения и приводит к ориентации взаимодействующих диполей. Взаимодействия в результате кооперативного эффекта приводят к ориентации и самоорганизации макромолекул относительно друг друга, а также к усилению когезионного взаимодействия и улучшению процессов сегрегации жестких блочных доменов и микрофазного разделения в МСПУ, исследованных в данной работе.

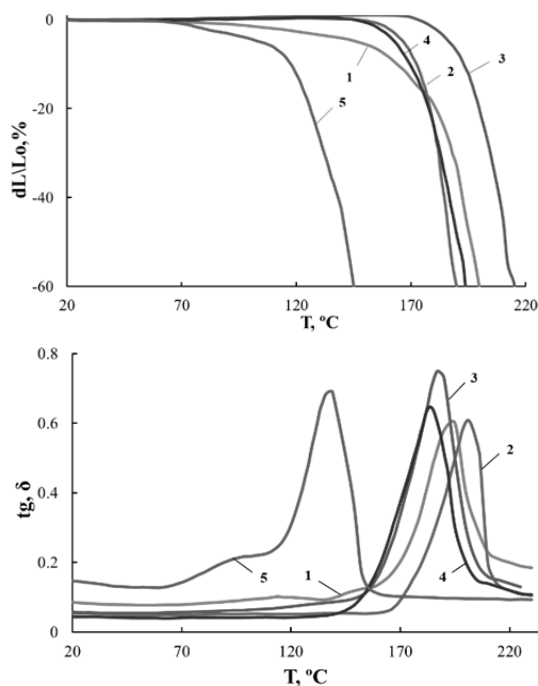


Рис. 4 – Кривые ТМА и ДМА для МСПУ, полученных на основе [ПОТМГ]:[МДИ]:[БД]=1:2:1 с различным содержанием CuCl_2 , введенного в МК при $[\text{CuCl}_2]:[\text{ДЭГА}]=1:1$. $[\text{CuCl}_2] = 0$ (1), 0,1 (2), 0,5 (3), 1,0 (4) и 2,0 (5) мас. %

Fig. 4 – TMA and DMA curves for MSPU obtained based on [POTMG]:[MDI]:[BD]=1:2:1 with different CuCl_2 contents introduced into the MC at $[\text{CuCl}_2]:[\text{DEGA}]=1:1$. $[\text{CuCl}_2] = 0$ (1), 0.1 (2), 0.5 (3), 1.0 (4), and 2.0 (5) wt. %

Для оценки термомеханических характеристик полученных полиуретанов были зарегистрированы кривые ТМА и ДМА. На рисунке 4 представлены результаты анализа для образцов с различным содержанием МК. Контрольный, то есть не модифицированный образец проявляет две температуры релаксационных переходов – при 97 и 152 °С, а температура вязкотекучего перехода (T_g) начинается при 180 °С. Для образца, содержащего 0,1 мас. % МК, релаксационные переходы отсутствуют, а T_g сдвигается в область 173 °С. С увеличением содержания комплекса до 0,5 мас. % значение T_g повышается до 183 °С. При этом в области перехода наблюдаются характерные изломы на кривых $\text{tg} \delta$, что подтверждает фазовые перестройки, инициированные присутствием координационных узлов. Дальнейшее увеличение содержания МК выше 0,5 приводит к процессам разрыхления как

макромолекулярной, так и надмолекулярной структуры МСПУ. Так, при 1 мас. % МК значение T_g составляет 173 °С, а при 2 мас. % понижается уже до 120 °С.

Выводы

Наименьшие значения объемного электрического сопротивления для сегментированных полиуретанов, модифицированных системой CuCl_2 –ДЭГА, достигаются уже при очень низком содержании CuCl_2 –ДЭГА, которое находится в диапазоне 0,1–0,5 мас. % CuCl_2 , введенного в систему CuCl_2 –ДЭГА. Изменение ρ_v происходит скачкообразно, а сами значения ρ_v увеличиваются в 1000–5000 раз. Показано, что увеличение длины жесткого блока в МСПУ приводит к заметному росту значений ρ_v . Изучено влияние мольного соотношения $[\text{CuCl}_2]:[\text{ДЭГА}]$ в металлокомплексной системе CuCl_2 –ДЭГА на значения ρ_v МСПУ. Наименьшие значения ρ_v достигаются при $[\text{CuCl}_2]:[\text{ДЭГА}]=1:1$.

Координационное связывание с использованием низкого содержания CuCl_2 –ДЭГА приводит к повышению температуры перехода в вязкотекучее состояние с 160 °С для немодифицированного СПУ до 185 °С для МСПУ, содержащего 0,1 мас. % CuCl_2 , введенного в систему CuCl_2 –ДЭГА. Сделан вывод о том, что существенные ориентационные процессы в полимерной матрице МСПУ индуцируются координационным связыванием. Поскольку 0,1 мас. % CuCl_2 относительно содержания жестких сегментов в молярном соотношении приближается к 1:100, можно сделать вывод о том, что такое координационное связывание имеет кооперативный эффект и объяснение этого эффекта требует дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ грант № 25-23-00003.

Литература

1. J. O. Akindoyo, M. D. H. Beg, S. Ghazali, M. R. Islam, N. Jeyaratnama, A. R. Yuvaraj, RSC Advances, 6, 114453 (2016).
2. B.-X. Cheng, W.-C. Gao, X.-M. Ren, X.-Y. Ouyang, Y. Zhao, H. Zhao, W. Wu, C.-X. Huang, Y. Liu, X.-Y. Liu, H.-N. Li, R. K. Y. Li, Polymer Testing, 107, 107489 (2022).
3. X. Wang, Y. Wei, D. Chen, Y. Bai, Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry, 54, 956 (2017).
4. S. Naheed, M. Zuber, M. Barikani, Materials Science & Engineering: B, 264, 114960 (2021).
5. C. Prisacariu, E. Scortanu, C. P. Buckley, International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 14, 527 (2009).
6. Y. Zhang, Y. Qi, Z. Zhang, Progress in Organic Coatings, 97, 115 (2016).
7. A. S. Bevilacqua, R. B. Trinca, M. I. Felisberti, Polímeros: Ciência e Tecnologia, 33, 20230008 (2023).
8. S. M. Kakić, I. S. Ristić, B. B. Holló, Polymer Bulletin, — (2024).
9. D. Hermida-Merino, B. O'Driscoll, L. R. Hart, P. J. Harris, H. M. Colquhoun, A. T. Slark, C. Prisacariu, I. W. Hamley, W. Hayes, Polymer Chemistry, 9, 3406 (2018).

10. И. М. Давлетбаева, П. А. Кирпичников, Р. А. Атова, В. П. Кулешов, А. В. Зверев, Журнал прикладной химии, 67(2), 258–262 (1994).
11. И. М. Давлетбаева, А. И. Исмагилова, К. А. Тютко, Г. В. Бурмакина, А. И. Кузаев, Журнал общей химии, 68(6), 1021–1027 (1998).
12. R. S. Davletbaev, I. M. Davletbaeva, R. Ya. Deberdeev, I. I. Zaripov, M. N. Kayumov, O. R. Gumerova, Russian Journal of Applied Chemistry, 87, 861 (2014).
13. M. H. Jomaa, L. Seveyrat, L. Lebrun, K. Masenelli-Varlot, J. Y. Cavaille, Polymer, 63, 214 (2015).
14. M. Watanabe, T. Hirai, M. Suzuki, Y. M. Yoichi, Applied Physics Letters, 18, 2717 (1999).
15. J. Su, Q. M. Zhang, C. H. Kim, R. Y. Ting, R. J. Capps, Journal of Applied Polymer Science, 65, 1363 (1997).
- 5.C. Prisacariu, E. Scortanu, C. P. Buckley, International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 14, 527 (2009).
- 6.Y. Zhang, Y. Qi, Z. Zhang, Progress in Organic Coatings, 97, 115 (2016).
- 7.A. S. Bevilacqua, R. B. Trinca, M. I. Felisberti, Polímeros: Ciência e Tecnologia, 33, 20230008 (2023).
- 8.S. M. Cakić, I. S. Ristić, B. B. Holló, Polymer Bulletin, — (2024).
- 9.D. Hermida-Merino, B. O'Driscoll, L. R. Hart, P. J. Harris, H. M. Colquhoun, A. T. Slark, C. Prisacariu, I. W. Hamley, W. Hayes, Polymer Chemistry, 9, 3406 (2018).
10. I. M. Davletbaeva, P. A. Kirpichnikov, R. A. Aтова, V. P. Kuleshov, Russian Journal of Applied Chemistry, 67(2), 258–262 (1994).
11. I. I. M. Davletbaeva, A. I. Ismagilova, K. A. Tyutko, G. V. Burmakina, A. I. Kuzaev, Russian Journal of General Chemistry, 68(6), 1021–1027 (1998).
12. R. S. Davletbaev, I. M. Davletbaeva, R. Ya. Deberdeev, I. I. Zaripov, M. N. Kayumov, O. R. Gumerova, Russian Journal of Applied Chemistry, 87, 861 (2014).
13. M. H. Jomaa, L. Seveyrat, L. Lebrun, K. Masenelli-Varlot, J. Y. Cavaille, Polymer, 63, 214 (2015).
14. M. Watanabe, T. Hirai, M. Suzuki, Y. M. Yoichi, Applied Physics Letters, 18, 2717 (1999).
15. J. Su, Q. M. Zhang, C. H. Kim, R. Y. Ting, R. J. Capps, Journal of Applied Polymer Science, 65, 1363 (1997).

References

- 1.J. O. Akindoyo, M. D. H. Beg, S. Ghazali, M. R. Islam, N. Jeyaratnama, A. R. Yuvaraj, RSC Advances, 6, 114453 (2016).
- 2.B.-X. Cheng, W.-C. Gao, X.-M. Ren, X.-Y. Ouyang, Y. Zhao, H. Zhao, W. Wu, C.-X. Huang, Y. Liu, X.-Y. Liu, H.-N. Li, R. K. Y. Li, Polymer Testing, 107, 107489 (2022).
- 3.X. Wang, Y. Wei, D. Chen, Y. Bai, Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry, 54, 956 (2017).
- 4.S. Naheed, M. Zuber, M. Barikani, Materials Science & Engineering: B, 264, 114960 (2021).

11. I. I. M. Davletbaeva, A. I. Ismagilova, K. A. Tyutko, G. V. Burmakina, A. I. Kuzaev, Russian Journal of General Chemistry, 68(6), 1021–1027 (1998).
12. R. S. Davletbaev, I. M. Davletbaeva, R. Ya. Deberdeev, I. I. Zaripov, M. N. Kayumov, O. R. Gumerova, Russian Journal of Applied Chemistry, 87, 861 (2014).
13. M. H. Jomaa, L. Seveyrat, L. Lebrun, K. Masenelli-Varlot, J. Y. Cavaille, Polymer, 63, 214 (2015).
14. M. Watanabe, T. Hirai, M. Suzuki, Y. M. Yoichi, Applied Physics Letters, 18, 2717 (1999).
15. J. Su, Q. M. Zhang, C. H. Kim, R. Y. Ting, R. J. Capps, Journal of Applied Polymer Science, 65, 1363 (1997).

© **Зыонг Тхи Май** – аспирант кафедры Технологии синтетического каучука (ТСК), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия; **О. О. Сазонов** – доцент кафедры ТСК, КНИТУ, sazonov.oleg1995@yandex.ru; **А. Р. Ибрагимова** – аспирант кафедры ТСК, КНИТУ, alisa_d17@mail.ru; **И. М. Давлетбаева** – профессор кафедры ТСК, КНИТУ, davletbaeva09@mail.ru.

© **Duong Thi Mai** – PhD-student at the Department of Synthetic Rubber Technology (SRT), Kazan National Research. Technological University (KNRTU), Kazan, Russia; **O. O. Sazonov** – Associate professor of the SRT department, KNRTU, sazonov.oleg1995@yandex.ru; **A. R. Ibragimova** – PhD-student at the SRT department, KNRTU, alisa_d17@mail.ru; **I. M. Davletbaeva** – Professor of the SRT department, KNRTU, davletbaeva09@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 21.05.25.

Дата принятия рукописи в печать – 13.06.25.