

**Т. М. Зьонг, А. Р. Ибрагимова, М. И. Гимадеева,  
Р. Р. Мингазов, О. О. Сазонов, И. М. Давлетбаева**

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕГМЕНТИРОВАННЫХ ПОЛИУРЕТАНОВ,  
МОДИФИЦИРОВАННЫХ КООРДИНАЦИОННЫМИ СОЕДИНЕНИЯМИ МЕДИ (II)**

*Ключевые слова:* сегментированные полиуретаны, электрофизические свойства, металл-координированные полиуретаны, удельное объёмное электрическое сопротивление.

Исследовано влияние модифицирующего воздействия металлокомплексной системы (МК) на электрофизические свойства сегментированных полиуретанов (СПУ). Для синтеза СПУ в качестве гибкоцепного компонента использовали полиокситетраметиленгликоль (ММ=1000 г/моль), жёсткие блоки формировались на основе 4,4'-дифенилметандиизоцианата и 1,4-бутандиола. Металлокомплексная система была получена с использованием эквимольных количеств  $\text{CuCl}_2$  и N,N'-диэтилгидроксиламина (ДЭГА). МК вводилась в предварительно синтезированный и растворённый в тетрагидрофуране СПУ. В результате проведённых исследований установлено, что добавление металлокомплексной системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА в СПУ оказывает значительное влияние на их надмолекулярную структуру и электрофизические свойства. При введении низких концентраций  $\text{CuCl}_2$  в составе системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА (около 0,03–0,1 мас.%) происходит десятикратное увеличение размеров частиц по сравнению с исходным (немодифицированным) материалом, что обусловлено формированием более крупных сегментов в результате координационного связывания уретановых групп с металлом. Металлокомплексное структурирование приводит к скачкообразному снижению удельного объёмного электрического сопротивления ( $\rho_v$ ) модифицированных соответствующим образом сегментированных полиуретанов (МСПУ), что свидетельствует о росте электропроводности материала. Модифицирование СПУ металлокомплексной системой в количестве 0–0,05 мас.%  $\text{CuCl}_2$ , введённого в составе  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА понижает значение  $\rho_v$  на 4 порядка, т.е. в  $10^4$  раз. К тому же, содержание МК повышает гидрофильность поверхности сегментированных полиуретанов, о чем можно судить по понижению значений краевого угла смачивания. Это связано с усилением процессов микрофазового разделения и другими морфологическими изменениями в структуре модифицированных ПУ. Показано, что внедрение металлокомплекса способствует усилению релаксационных процессов, о протекании которых свидетельствуют результаты измерения частотных зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ). Резкие пики и изменения этих показателей в области низких частот ( $10^2$ – $10^4$  Гц) указывают на то, что в растворённых МСПУ происходят поляризационные процессы, вызванные перераспределением диполей в структуре полиуретана. Полученные результаты подтверждают перспективность использования металлокомплексных систем для модификации полиуретанов с целью улучшения их характеристик и расширения областей использования.

**T. M. Duong, A. R. Ibragimova, M. I. Gimadeeva,  
R. R. Mingazov, O. O. Sazonov, I. M. Davletbaeva**

**ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF SEGMENTED POLYURETHANES MODIFIED  
WITH COPPER (II) COORDINATION COMPOUNDS**

*Keywords:* segmented polyurethanes, electrophysical properties, metal-coordinated polyurethanes, specific volume electrical resistance.

The effect of the modifying effect of a metal complex (MC) system on the electrophysical properties of segmented polyurethanes (SPU) was studied. Polyoxytetramethylene glycol (MM = 1000 g/mol) was used as a flexible-chain component for the SPU synthesis, while rigid blocks were formed based on 4,4'-diphenylmethane diisocyanate and 1,4-butanediol. The metal complex system was obtained using equimolar amounts of  $\text{CuCl}_2$  and N,N'-diethylhydroxylamine (DEHA). MC was introduced into SPU pre-synthesized and dissolved in tetrahydrofuran. The studies revealed that the addition of the  $\text{CuCl}_2$ -DEHA metal complex system to SPU significantly affects their supramolecular structure and electrophysical properties. With the introduction of low concentrations of  $\text{CuCl}_2$  in the  $\text{CuCl}_2$ -DEHA system (approximately 0.03–0.1 wt%), the particle size increases tenfold compared to the original (unmodified) material, which is due to the formation of larger segments as a result of the coordination bonding of urethane groups with the metal. Metal-complex structuring leads to a sudden decrease in the specific volume electrical resistance ( $\rho_v$ ) of the correspondingly modified segmented polyurethanes (MSPU), indicating an increase in the electrical conductivity of the material. Modification of SPU with a metal-complex system in an amount of 0–0.05 wt%  $\text{CuCl}_2$  introduced in the  $\text{CuCl}_2$ -DEHA composition reduces the  $\rho_v$  value by 4 orders of magnitude, i.e., by  $10^4$  times. In addition, the MC content increases the hydrophilicity of the segmented polyurethane surface, as can be judged by the decrease in the contact angle values. This is due to enhanced microphase separation processes and other morphological changes in the structure of modified PUs. The introduction of the metal complex was shown to enhance relaxation processes, as evidenced by the frequency dependences of the dielectric loss tangent ( $\text{tg}\delta$ ) and permittivity ( $\epsilon'$ ). Sharp peaks and changes in these parameters in the low-frequency range ( $10^2$ – $10^4$  Hz) indicate polarization processes occurring in dissolved microphase polyurethanes, caused by the redistribution of dipoles in the polyurethane structure. The obtained results confirm the potential of using metal complex systems to modify polyurethanes to improve their performance and expand their applications.

## Введение

Полиуретаны – класс полимеров, отличающийся широким диапазоном эксплуатационных характеристик – повышенной твердостью, высоким модулем упругости, стойкостью к истиранию, растворителям, маслам [1-3]. Благодаря изменению химической природы исходных компонентов, можно направленно варьировать свойства материалов [4-12].

Одним из перспективных направлений в науке о полимерах является металлокомплексное связывание высокомолекулярных соединений. Введение координационных соединений переходных металлов позволяет воздействовать на химическое строение и морфологию полиуретанов, что позволяет улучшать технологические характеристики, а так же придавать им специальные свойства. Многочисленные исследования, связанные с металлокомплексным структурированием полиуретанов, подтверждают актуальность данного научного направления [13-24].

В большей части этих работ ионы щелочноземельных и переходных металлов внедряются в состав полимерной сетки взаимодействием карбоксилат-анионов с ионами металла [17,22,23,25]. Например, МКПУ, синтезированные из диизоцианата и диола, связанного с ионами металла, характеризуются повышенной гибкостью, растворимостью и пониженной температурой стеклования. Во многих работах для синтеза в качестве растворителей использовали сильнополярные диметилформамид и диметилсульфоксид, что связано с необходимостью предварительного растворения солей металлов для последующего их внедрения в уретанообразующую систему.

Координационное связывание ограничивает подвижность цепей, что ведет к повышению модуля упругости, росту температуры стеклования мягких сегментов и уменьшению удлинения при разрыве. Одновременно с этим наблюдается образование межмолекулярных комплексов за счёт связывания жёстких сегментов, что способствует разрушению исходных водородных связей и увеличению кристалличности в этой области.

Известно, что металлсодержащие полиуретаны могут проявлять антибактериальные свойства и использоваться в качестве антибактериальных покрытий в медицине. Существующие исследования показывают, что антибактериальная активность полиуретанов зависит от металла и вида бактерий, вводимых в систему полимера [6,7,9,15,17,18].

Несмотря на большое количество работ, связанных с введением ионов переходных металлов в полиуретан, мало исследований, в которых изучались их электрофизические свойства. Например, в работе [19] синтезированы моно- и полигетероядерные металлокомплексы, иммобилизованные в шитых полиуретановых системах, и установлено, что ионная проводимость некоторых ПУ повышается до уровня полупроводников.

В наших предыдущих исследованиях [26-27] для структурирования полиуретанов использовалась

металлокомплексная система на основе хлорида меди Cu(II) и N,N'-диэтилгидроксиламина (ДЭГА), проявляющая активность в реакциях с изоцианатными группами. Было выявлено, что эквимольное взаимодействие CuCl<sub>2</sub> и ДЭГА приводит к структурным изменениям в последней за счёт окислительно-восстановительного взаимодействия с хлоридом меди. Получаемая структура содержит нитрон, а большая часть ионов Cu(II) восстанавливается до Cu(I). К тому же, особенностью системы, полученной при эквимольном соотношении CuCl<sub>2</sub> и ДЭГА, является её способность растворяться в различных полиэфирах и уретановых преполимерах, что расширяет возможности её использования.

В данной работе, в отличие от проведённых ранее исследований, металлокомплексная система CuCl<sub>2</sub>-ДЭГА вводится в предварительно синтезированные и растворённые сегментированные полиуретаны.

Это позволяет вводить малые количества модификаторов для влияния на надмолекулярную организацию полиуретанов и, соответственно, на их эксплуатационные характеристики.

## Экспериментальная часть

Для синтеза сегментированных полиуретанов (СПУ) в качестве гибкоцепного компонента использовали полиокситетраметилэтиленгликоль (ПФ, ММ=1000 г/моль), жёсткие блоки формировались на основе 4,4'-дифенилметандиизоцианата (МДИ) и 1,4-бутандиола. ПФ предварительно очищали от остатков воды при T=90 °C и остаточном давлении 0,7 кПа и перемешивании в течение 2-х часов.

Металлокомплексную систему получали взаимодействием хлорида меди (II) (CuCl<sub>2</sub>) и N,N'-диэтилгидроксиламина (ДЭГА). Кристаллы CuCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O предварительно обезвоживали в сушильном шкафу в течение 48-ми часов при температуре 120 °C. Высушенный хлорид меди (II) и N,N'-диэтилгидроксиламин использовали в мольном соотношении [CuCl<sub>2</sub>]:[ДЭГА]=1:1. Рассчитанное количество CuCl<sub>2</sub> добавляли в ДЭГА порционно в малых количествах при постоянном и интенсивном перемешивании и охлаждении до температуры 0-5 °C.

Синтез СПУ проводили в две стадии в трёхгорлой круглодонной колбе, снабжённой мешалкой и термометром. На первой стадии путём взаимодействия МДИ и ПФ в молярном соотношении [МДИ]:[ПФ] = 1:2 синтезировали уретановый преполимер, содержащий функциональные изоцианатные группы. Процесс вели при нагревании до 80 °C и остаточном давлении 0,7 кПа до достижения 50 %-ной конверсии NCO-групп. На второй стадии получали СПУ с использованием мольных соотношений [МДИ]:[ПФ]:[БД]=1:2:1, 1:3:2 и 1:4:3. Для получения СПУ в синтезированный уретановый преполимер добавляли соответствующее количество 1,4-бутандиола, продолжали перемешивать при нагревании до 80 °C и остаточном давлении 0,7 кПа в течение 5-ти минут, затем уретанообразующую

систему заливали в форму и выдерживали 24 часа в термошкафу при температуре 100 °С.

Далее синтезированные СПУ измельчали и растворяли в тетрагидрофуране при массовом соотношении [СПУ]:[ТГФ] = 1:10. После полного растворения в раствор СПУ добавляли рассчитанное количество металлокомплексной системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА. Затем полученные растворы выливали в чашки Петри и оставляли при комнатной температуре на 24 часа для удаления ТГФ. Затем модифицированные СПУ (МСПУ) нагревали при 100 °С в течение 1 часа для полного удаления остаточного растворителя.

Тангенс угла диэлектрических потерь, диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) исследуемых плёночных образцов полиуретановых материалов измеряли при 25 °С с использованием измерителя иммитанса E7-30 (ОАО «МНИПИ», Беларусь) в диапазоне частот 25 Гц – 3 МГц. Плёнки полиуретана толщиной 400–500 мкм фиксировали между диэлектрическими пластинами с никелевыми электродами толщиной 0,1 мм и шириной 10 мм.

Удельное объёмное электрическое сопротивление образцов СПУ и МСПУ измеряли с использованием тераомметра E6-13A при температуре 21 °С. Измерения проводили двухзондовым методом в ячейке типа «сэндвич».

Измерение размеров частиц материала определяли с использованием метода динамического рассеяния света и проводили на приборе Malvern Zetasizer Nano ZS (Malvern, Великобритания), оснащённом гелий-неоновым лазером мощностью 4 мВт и длиной волны 632,8 нм. Рассеяние света регистрировалось при угле 173°. В качестве растворителя использовался тетрагидрофуран (ТГФ). Эксперименты проводились при температуре 25 °С в одноразовых пластиковых кюветках с длиной оптического пути 1 см.

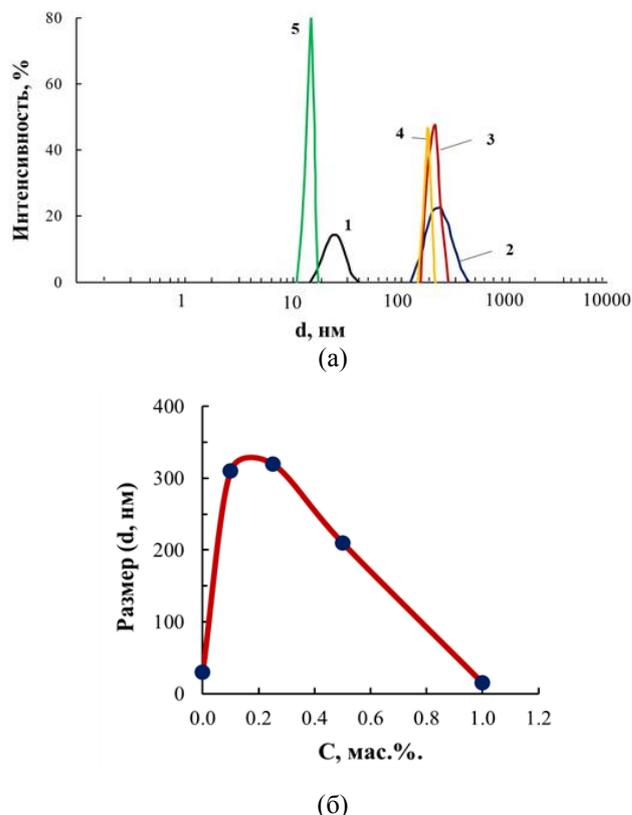
Угол смачивания жидкости ( $\theta$ ) определялся как угол между касательной, проведенной к поверхности смачивающей жидкости, и смачиваемой поверхностью твердого тела. Угол смачивания всегда измеряется от касательной к жидкой фазе. В качестве жидкой фазы использовалась дистиллированная вода. Мембрана закреплялась на штативе, на ее поверхность наносилась капля воды объемом 1 мм<sup>3</sup>.

### Обсуждение результатов

Опытным путём было установлено, что наиболее подходящим растворителем для СПУ является тетрагидрофуран (ТГФ). Для исследований был использован 10 %-ный раствор СПУ в ТГФ.

Для исследования размеров частиц использовались СПУ с минимальной протяжённостью жёсткого ароматического сегмента, полученные при соотношении [ПФ]:[МДИ]:[БД] = 1:2:1. Результаты измерений методом динамического светорассеяния показали, что размеры частиц исходного СПУ, растворённого в ТГФ, составляют 36 нм (рисунок 1). Небольшой размер частиц и умеренная ширина их распределения обусловлены

низкой концентрацией полимера в среде растворителя (10 % от массы ТГФ) и ограниченными межмакромолекулярными взаимодействиями в растворе.



**Рис. 1 – Распределение по размерам частиц для СПУ и МСПУ, полученных на основе [ПФ]:[МДИ]:[БД] = 1:2:1. Содержание  $\text{CuCl}_2$  в составе системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА составляет: 0 (1), 0,1 (2), 0,25 (3), 0,5 (4), 1,0 (5) мас.% в ТГФ (а) и зависимость размера частиц для МСПУ, от содержания  $\text{CuCl}_2$  в составе системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА (б)**

**Fig. 1 – Particle size distribution for SPU and MSPU obtained on the basis of [PF]:[MDI]:[BD] = 1:2:1. The content of  $\text{CuCl}_2$  in the  $\text{CuCl}_2$ -DEHA system is: 0 (1), 0,1 (2), 0,25 (3), 0,5 (4), 1,0 (5) wt.% in THF (a) and the dependence of the particle size for MSPU on the content of  $\text{CuCl}_2$  in the  $\text{CuCl}_2$ -DEHA system (b)**

Введение 0,1-0,25 мас.%  $\text{CuCl}_2$  в составе системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА приводит к значительному укрупнению частиц МСПУ до 312-313 нм. Это свидетельствует о формировании координационных связей, способствующих агрегации молекул. Если для МСПУ, полученного с содержанием 0,1 мас.%  $\text{CuCl}_2$  в составе системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА, как и для исходного образца, распределение по размерам частиц остаётся относительно широким, то для МСПУ, содержащего 0,25 мас.%  $\text{CuCl}_2$  в составе системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА, наблюдается сужение пиков, что можно объяснить вовлечением различающихся по длине макромолекул СПУ в общий процесс структурной перестройки.

С дальнейшим повышением содержания  $\text{CuCl}_2$  в составе системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА до 0,5 мас.% размеры частиц уменьшаются до 217 нм и распределение по размерам частиц существенно сужается. Такой результат может быть объяснён тем, что даже наименее протяженные макромолекулы СПУ вовлекаются в область воздействия МК на сегментированные полиуретаны. Наблюдаемый эффект подтверждает кооперативный механизм модифицирующего воздействия МК на СПУ.

При повышении концентрации  $\text{CuCl}_2$ , вводимого в составе системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА до 1 мас.% наблюдается уменьшение размеров частиц до 20 нм – величины, меньшей, чем у немодифицированного СПУ. Распределение размеров частиц становится уже, что указывает на образование более однородных надмолекулярных структур.

Увеличение частиц МСПУ позволяет сделать вывод о том, что координационное связывание понижает подвижность сегментов, усиливая сцепление между сегментами и формируя более крупные домены. Так, введение МК вызывает почти десятикратное увеличение размеров частиц МСПУ по сравнению с немодифицированным СПУ.

Согласно результатам, представленным на рисунке 2, при введении металлокомплексной системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА наблюдается скачкообразное уменьшение удельного объёмного электрического сопротивления ( $\rho_v$ ) сегментированных полиуретанов. Модифицирование СПУ малым количеством (0-0,05 мас.%)  $\text{CuCl}_2$  в составе системы  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА приводит к снижению удельного объёмного электрического сопротивления на 4 порядка, что увеличивает электропроводность материала. Такой результат обусловлен изменением надмолекулярной структуры полимера вследствие ориентационных процессов, инициируемых координационным взаимодействием соединений  $\text{Cu(II)/Cu(I)}$  с уретановыми группами. Полученные данные согласуются с ранее предложенным механизмом, согласно которому  $\text{CuCl}_2$  и ДЭГА вступают в окислительно-восстановительные процессы с частичным восстановлением  $\text{Cu(II)}$  до  $\text{Cu(I)}$  и одновременным окислением ДЭГА до содержащего нитрон лиганда, обладающего высокой координационной активностью [27].

При дальнейшем увеличении количества вводимого МК значения  $\rho_v$  не изменялись. Наименьшие величины сопротивления были характерны для МСПУ с составом  $[\text{ПФ}]:[\text{МДИ}]:[\text{БД}]=1:2:1$ . Повышение доли жёсткого сегмента приводит к росту  $\rho_v$  примерно в 10 раз, что связано с более плотной упаковкой и меньшей поляризуемостью полимера.

Изменения электропроводности согласуются с результатами исследования поверхностных свойств полученных МСПУ. Совместно с понижением объёмного электрического сопротивления при введении  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА наблюдалось понижение значений краевого угла смачивания образцов полиуретана (рис. 3). Такой результат связан с изменением полярности поверхности, увеличением размеров частиц, а также агрегацией жестких блоков.

Подобные морфологические изменения способствуют росту площади активной поверхности и более тесному её взаимодействию с жидкостями, что ведет к уменьшению значений краевого угла смачивания.

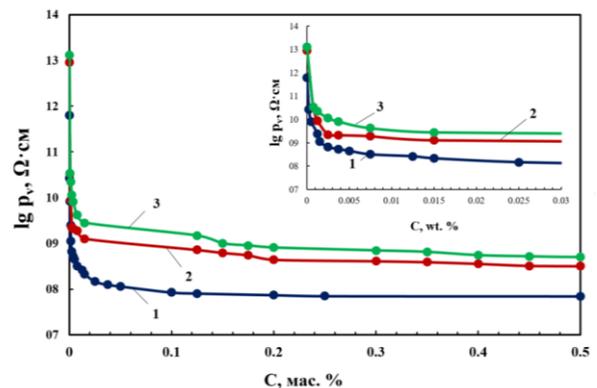


Рис. 2 – Зависимости  $\lg \rho_v$  для МСПУ, полученных при  $[\text{ПФ}]:[\text{МДИ}]:[\text{БД}]=1:2:1$  (1), 1:3:2 (2), 1:4:3 (3) от содержания  $\text{CuCl}_2$  в составе  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА

Fig. 2 – Dependences of  $\lg \rho_v$  for MSPU obtained at  $[\text{PF}]:[\text{MDI}]:[\text{BD}]=1:2:1$  (1), 1:3:2 (2), 1:4:3 (3) on the content of  $\text{CuCl}_2$  in the composition of  $\text{CuCl}_2$ -DEHA

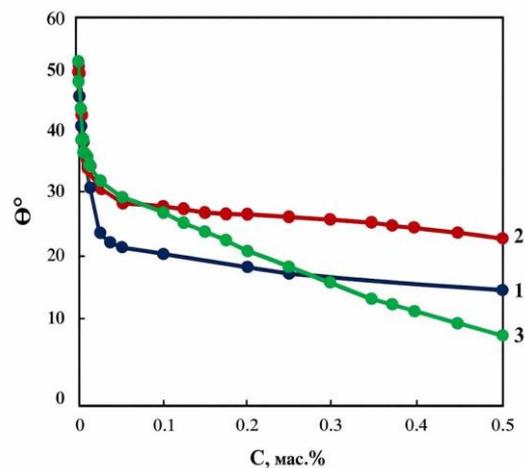


Рис. 3 – Зависимость краевого угла смачивания для МСПУ, полученных при  $[\text{ПФ}]:[\text{МДИ}]:[\text{БД}]=1:2:1$  (1), 1:3:2 (2), 1:4:3 (3) от содержания  $\text{CuCl}_2$  в составе  $\text{CuCl}_2$ -ДЭГА

Fig. 3 – Dependence of the contact angle for MSPU obtained at  $[\text{PF}]:[\text{MDI}]:[\text{BD}]=1:2:1$  (1), 1:3:2 (2), 1:4:3 (3) on the content of  $\text{CuCl}_2$  in the composition of  $\text{CuCl}_2$ -DEHA

Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg} \delta$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) для образцов СПУ и МСПУ представлены на рисунке 4 и рисунке 5 соответственно. Для немодифицированных ПУ наблюдались низкие значения  $\text{tg} \delta$ , что связано с ограниченной поляризацией полимера. При введении малых количеств МК происходили резкие изменения показаний тангенса угла диэлектрических потерь в области низких частот  $\nu = 10^2$ – $10^4$  Гц с выраженными релаксационными максимумами при  $\nu = 10^2$  Гц. Увеличение значений предельных частот на

частотных зависимостях тангенса угла диэлектрических потерь указывает на активизацию дипольно-ориентационных процессов и перераспределение локальных зарядов в результате координационного связывания уретановых групп.

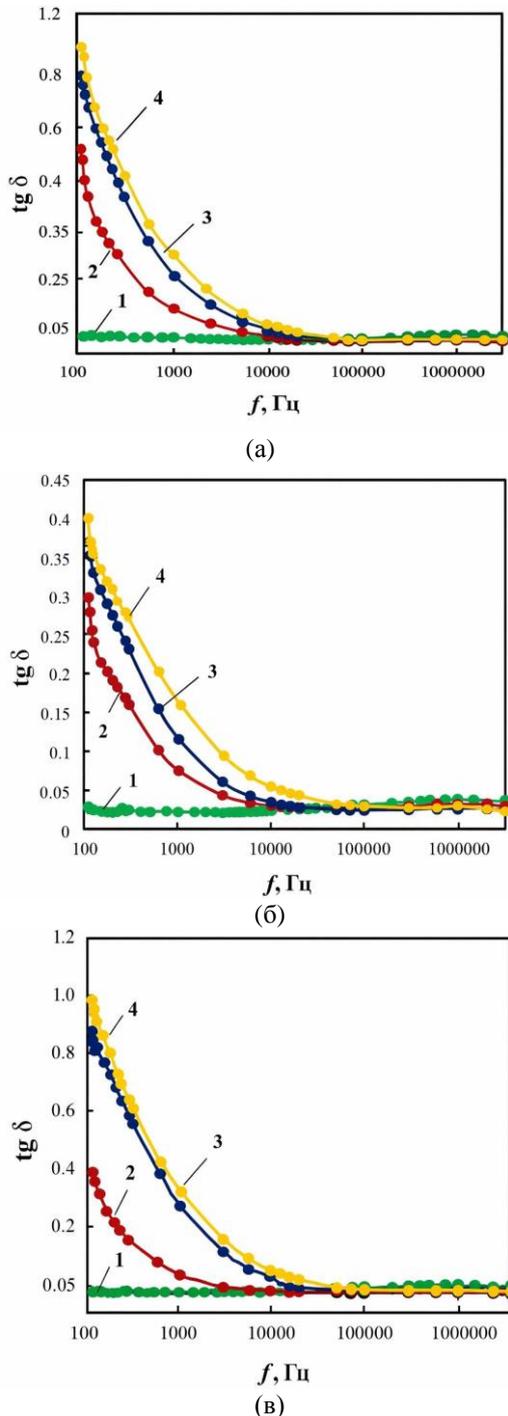


Рис. 4 – Частотные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ) для МСПУ, полученных на основе [ПФ]:[МДИ]:[БД] = 1:2:1 (а), 1:3:2 (б), 1:4:3 (в) при содержании  $CuCl_2$  в составе системы  $CuCl_2$ -ДЭГА: 0 (1), 0.05 (2), 0.1 (3), 0.5 (4) мас.%

Fig. 4 – Frequency dependences of the dielectric loss tangent ( $tg\delta$ ) for MSPU obtained on the basis of [PF]:[MDI]:[BD] = 1:2:1 (a), 1:3:2 (b), 1:4:3 (c) with a  $CuCl_2$  content in the  $CuCl_2$ -DEHA system of: 0 (1), 0.05 (2), 0.1 (3), 0.5 (4) wt.%

Возрастание доли жёсткого сегмента и количества вводимого МК усиливало механизмы поляризации, что проявлялось в увеличении значений ( $tg\delta$ ) и диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ).

Подобные изменения в показателях диэлектрических характеристик при конкретных частотах служат свидетельством активных ориентационных процессов внутри материала, вызванных координационными взаимодействиями в полимерной матрице МСПУ.

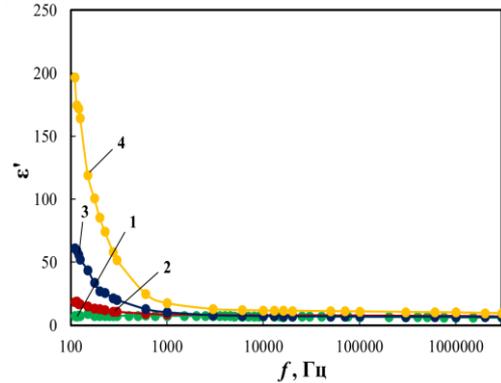


Рис. 5 – Частотные зависимости диэлектрической проницаемости ( $\epsilon'$ ) для МСПУ, полученных на основе [ПФ]:[МДИ]:[БД]=1:2:1 при различном содержании  $CuCl_2$  в составе системы  $CuCl_2$ -ДЭГА. [ $CuCl_2$ ] = 0 (1), 0.05 (2), 0.5 (3), 1 (4) мас.%

Fig. 5 – Frequency dependences of the permittivity ( $\epsilon'$ ) for MSPU obtained on the basis of [PF]:[MDI]:[BD]=1:2:1 with different  $CuCl_2$  content in the  $CuCl_2$ -DEHA system. [ $CuCl_2$ ] = 0 (1), 0.05 (2), 0.5 (3), 1 (4) wt.%

### Выводы

В результате проведённых исследований установлено, что добавление металлокомплексной системы  $CuCl_2$ -ДЭГА в СПУ оказывает значительное влияние на их надмолекулярную структуру и электрофизические свойства.

При введении низких концентраций  $CuCl_2$  в составе системы  $CuCl_2$ -ДЭГА (около 0,03–0,1 мас.%) происходит десятикратное увеличение размеров частиц по сравнению с исходным (немодифицированным) материалом, что обусловлено формированием более крупных сегментов в результате координационного связывания уретановых групп с металлом.

Модификация СПУ с использованием МК сопровождаются изменениями электрофизических параметров МСПУ. Так, возрастают значения предельных частот на частотной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь ( $tg\delta$ ), свидетельствующие о развитии ориентационных процессов и усилении поляризационных переходов в полимерной матрице. Одновременно с этим снижается краевой угол смачивания, что свидетельствует о росте полярности поверхности и изменении её морфологии за счёт агрегации жёстких блоков.

Существенное уменьшение показателей объёмного удельного электрического сопротивления ( $\rho_v$ ) так же связано с укрупнением частиц полиуретана и протеканием ориентационных

процессов, способствующих формированию более упорядоченной и поляризуемой структуры.

Так, модификация полиуретанов координационными соединениями переходных металлов открывает возможности для создания материалов с регулируемыми электрофизическими характеристиками и расширяет их потенциал для применения в электронике и в качестве антистатических покрытий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ грант № 25-23-00003

### Литература

1. M.L. Polo; M.E. Spontón; A. Huespe; D.A. Estenoz; G.R. Meira. *J. Appl. Polym. Sci.*, **138**, 49782 (2021).
2. J. Xu; W. Xiao; S. Zhang; Z. Dong; C. Lei. *Eur. Polym. J.*, **179**, 111553 (2022).
3. M. Asensio; V. Costa; A. Nohales; O. Bianchi; C.M. Gómez. *Polymers*, **11**, 1910 (2019).
4. M.S. Sanchez-Adsuar; E. Papon; J.-J. Villenave. *J. Appl. Polym. Sci.*, **76**, 1590–1595 (2000).
5. Y. Wang; H. Nie; S. Wang; H. Zhang; X. Zhang; L. Jiang; M. Huang. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **5**, 9364–9374 (2023).
6. S. Tomaselli; F. Bertini; A. Cifarelli; A. Vignali; L. Ragona; S. Losio. *Molecules*, **28**, 1966 (2023).
7. J. Wu; C. Wang; Y. Xiao; C. Mu; W. Lin. *Prog. Org. Coat.*, **147**, 105812 (2020).
8. M. Gholami; V. Haddadi-Asl; I.S. Jouibari. *J. Plast. Film Sheeting*, **38**, 502–541 (2022).
9. P. Król; L. Uram; B. Król; K. Pielichowska; M. Sochacka-Piętal; M. Walczak. *Colloid Polym. Sci.*, **298**, 1077–1093 (2020).
10. A. Yildirim; E. Yilgor; I. Yilgor. *Polymer*, **326**, 128340 (2025).
11. B.D. Akkoyun; A.A. Wis; R. Yildirim; Ü. Makal; G. Özkoç; M. Kodal. *J. Appl. Polym. Sci.*, **142**, 56593 (2025).
12. K. Jirakittidul; D. Limthin; S. Mahithithummathorn; S. Phaewchiphlee. *Polymers*, **15**, 364 (2023).
13. Y.S. Lee; S. Nanjundan. *J. Appl. Polym. Sci.*, **92**, 710–721 (2004).
14. S. Nanjundan; T. Pakula; M. Klapper. *Eur. Polym. J.*, **40**, 1767–1778 (2004).
15. Y.S. Lee; M. Rajkumar; S. Nanjundan. *J. Appl. Polym. Sci.*, **91**, 288–295 (2004).
16. M. Rajkumar; R. Nagendran; S. Nanjundan. *J. Macromol. Sci., Pure Appl. Chem.*, **A38**, 869–888 (2001).
17. C.R. Prabha; C.N. Murthy. *J. Polym. Mater.*, **20**, 83–89 (2003).
18. M. Rajkumar; R. Nagendran; S. Nanjundan. *J. Appl. Polym. Sci.*, **85**, 1194–1206 (2002).
19. P.S. Vijayanand; S. Nanjundan. *Polym. Int.*, **49**, 1464–1472 (2000).
20. Y.S. Lipatov; V.F. Babich; L.N. Perepelitsyna. *Polym. Sci. Ser. A*, **45**, 644–649 (2003).
21. A. Kanapitsas; P. Pissis; Y.V. Savelyev; V.Y. Veselov; E.G. Privalko. *Eur. Polym. J.*, **36**, 1113–1126 (2000).
22. H. Yu; C.Z. Yang. *Polym. Adv. Technol.*, **8**, 335–338 (1997).
23. S. Khan; M. Alam; A. Ghosal; A.H. Mondal; F. Zafar; M. Shahid; N. Nishat. *Prog. Org. Coat.*, **168**, 106886 (2022).
24. N. Kozak; Y. Nizelskii; N. Mnikh; V. Shtompel; O. Grischuk. *Macromol. Symp.*, **243**, 247–260 (2006).

25. R. Jayakumar; S. Nanjundan. *J. Macromol. Sci., Pure Appl. Chem.*, **43**, 945–954 (2006).
26. Зьонг Тхи Май, О.О. Сазонов; А.Р. Ибрагимова; И.М. Давлетбаева. *Вестник технол. ун-та*. **28** (7), 80–84 (2025).
27. Зьонг Тхи Май, О.О. Сазонов; А.Р. Ибрагимова; И.М. Давлетбаева. *Вестник технол. ун-та*. **28** (8), 87–90 (2025).

### References

1. M.L. Pole; M.E. Spontón; A. Huespe; FROM. Estenoz; G.R. Meira. *J. Appl. Polym. Sci.*, **138**, 49782 (2021).
2. J. Xu; W. Xiao; S. Zhang; Z. Dong; C. Lei. *Eur. Polym. J.*, **179**, 111553 (2022).
3. M. Asensio; V. Costa; A. Nohales; O. Bianchi; C.M. Gomez. *Polymers*, **11**, 1910 (2019).
4. M.S. Sanchez-Adsuar; E. Papon; J.-J. Villenave. *J. Appl. Polym. Sci.*, **76**, 1590–1595 (2000).
5. Y. Wang; H. Nie; S. Wang; H. Zhang; X. Zhang; L. Jiang; M. Huang. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **5**, 9364–9374 (2023).
6. S. Tomaselli; F. Bertini; A. Cifarelli; A. Vignali; L. Ragona; S. Losio. *Molecules*, **28**, 1966 (2023).
7. J. Wu; C. Wang; Y. Xiao; C. Mu; W. Lin. *Prog. Org. Coat.*, **147**, 105812 (2020).
8. M. Gholami; V. Haddadi-ASL; I.S. Jouibari. *J. Plast. Film Sheeting*, **38**, 502–541 (2022).
9. P. Krol; L. Uram; B. Krol; K. Pielichowska; M. Sochacka-Piętal; M. Walczak. *Colloid Polym. Sci.*, **298**, 1077–1093 (2020).
10. A. Yildirim; E. Yilgor; I. Yilgor. *Polymer*, **326**, 128340 (2025).
11. B.D. Akkoyun; A.A. Wis; R. Yildirim; Ü. Makal; G. Özkoç; M. Kodal. *J. Appl. Polym. Sci.*, **142**, 56593 (2025).
12. K. Jirakittidul; D. Limthin; S. Mahithithummathorn; S. Phaewchiphlee. *Polymers*, **15**, 364 (2023).
13. Y.S. Lee; S. Nanjundan. *J. Appl. Polym. Sci.*, **92**, 710–721 (2004).
14. S. Nanjundan; T. Pakula; M. Klapper. *Eur. Polym. J.*, **40**, 1767–1778 (2004).
15. Y.S. Lee; M. Rajkumar; S. Nanjundan. *J. Appl. Polym. Sci.*, **91**, 288–295 (2004).
16. M. Rajkumar; R. Nagendran; S. Nanjundan. *J. Macromol. Sci., Pure Appl. Chem.*, **A38**, 869–888 (2001).
17. C.R. Prabha; C.N. Murthy. *J. Polym. Mater.*, **20**, 83–89 (2003).
18. M. Rajkumar; R. Nagendran; S. Nanjundan. *J. Appl. Polym. Sci.*, **85**, 1194–1206 (2002).
19. P.S. Vijayanand; S. Nanjundan. *Polym. Int.*, **49**, 1464–1472 (2000).
20. Y.S. Lipatov; V.F. Babich; L.N. Perepelitsyna. *Polym. Sci. Ser. A*, **45**, 644–649 (2003).
21. A. Kanapitsas; P. Pissis; Y.V. Savelyev; V.Y. Veselov; E.G. Privalko. *Eur. Polym. J.*, **36**, 1113–1126 (2000).
22. H. Yu; C.Z. Yang. *Polym. Adv. Technol.*, **8**, 335–338 (1997).
23. S. Khan; M. Alam; A. Ghosal; A.H. Mondal; F. Zafar; M. Shahid; N. Nishat. *Prog. Org. Coat.*, **168**, 106886 (2022).
24. N. Kozak; Y. Nizelskii; N. Mnikh; V. Shtompel; O. Grischuk. *Macromol. Symp.*, **243**, 247–260 (2006).
25. R. Jayakumar; S. Nanjundan. *J. Macromol. Sci., Pure Appl. Chem.*, **43**, 945–954 (2006).
26. Duong Thi Mai, O. O. Sazonov; A. R. Ibragimova; I. M. Davletbaeva. *Herald of Technological University*, **28** (7), 80–84 (2025).
27. Duong Thi Mai, O. O. Sazonov; A. R. Ibragimova; I. M. Davletbaeva. *Herald of Technological University*. **28** (8), 87–90 (2025).

© Т. М. Зьонг – асп. каф. технологии синтетического каучука (ТСК), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия; А. Р. Ибрагимова, асп. каф. ТСК КНИТУ, alisa\_d17@mail.ru; М. И. Гимадеева – магистрант кафедры ТСК, КНИТУ, m.gimadeeva@mail.ru; Р. Р. Мингазов – аспирант кафедры Материаловедение и технологии материалов, Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия; О. О. Сазонов – доцент кафедры ТСК КНИТУ, sazonov.oleg1995@yandex.ru; И. М. Давлетбаева – профессор кафедры ТСК, КНИТУ, davletbaeva09@mail.ru.

© Т. М. Duong – PhD-student at the Department of Synthetic Rubber Technology (SRT), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia; A. R. Ibragimova – PhD-student at the SRT department, KNRTU, alisa\_d17@mail.ru, M. I. Gimadeeva – Master-student at the SRT department, KNRTU, m.gimadeeva@mail.ru; R. R. Mingazov – PhD-student at the Department of Material Science and Technology of Materials, Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia; O. O. Sazonov – Associate Professor of the SRT department, KNRTU, sazonov.oleg1995@yandex.ru; I. M. Davletbaeva – Professor of the SRT department, KNRTU, davletbaeva09@mail.ru.

Дата поступления рукописи в редакцию – 18.12.25

Дата принятия рукописи в печать – 27.01.26