



**СТРЮЦЬКИЙ**

**Олександр Васильович** — доктор хімічних наук, старший науковий співробітник відділу хімії олігомерів і сітчастих полімерів Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України

## ГІПЕРРОЗГАЛУЖЕНІ ІОНОВМІСНІ ОЛІГОМЕРИ – БУДІВЕЛЬНІ БЛОКИ ЕЛЕКТРОЛІТНИХ СИСТЕМ РІЗНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

**Стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 8 квітня 2026 року**

*У доповіді представлено окремі важливі результати фундаментальних і прикладних досліджень Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України з розроблення нових іономерів та полімер-електролітних матеріалів. Отримані результати мають великий потенціал практичного застосування для вдосконалення деяких промислових високотехнологічних фізико-хімічних процесів у наукомістких галузях економіки, зокрема можуть сприяти розвитку альтернативної енергетики, підвищенню екологічної та енергетичної безпеки України.*

Шановні колеги!

Олігомери дендритної будови, відомі також як деревоподібні олігомери, завдяки особливостям будови (рис. 1) характеризуються низкою унікальних властивостей, що зумовлює значний інтерес до них як до об'єктів наукових досліджень, а також щодо їх практичного використання. Серед сполук цього типу особливу увагу привертають олігомери гіперрозгалуженої будови. В літературі за ними закріпилася назва «гіперрозгалужені полімери», хоча за своєю будовою та властивостями вони належать саме до олігомерів.

На відміну від дендримерів (рис. 1а), які мають ідеальну симетричну будову з точно регульованим ступенем розгалуження (генерації), отриману шляхом складного багатостадійного крокового синтезу, а отже, характеризуються монодисперсністю, чіткими розмірами та формами, гіперрозгалужені полімери (рис. 1б) є сполуками статистичної будови з високою полідисперсністю. Однак вагомою перевагою гіперрозгалужених полімерів є те, що їх синтез — одностадійний, методи очищення — простіші і, відповідно, собівартість — нижча.

Завдяки олігомерному стану такі сполуки мають високий вміст кінцевих функціональних груп, що відкриває широ-

кі можливості для їх подальшої модифікації шляхом відповідних полімераналогічних перетворень. З огляду на це основна ідея наших досліджень полягає в реалізації для гіперрозгалужених глобулярних реакційно здатних олігомерів притаманної олігомерним сполукам здатності кардинально змінювати структуру і властивості зі зміненням хімічної природи кінцевих груп.

Тому ми поставили собі за мету розробити підходи до цілеспрямованого дизайну аніонних гіперрозгалужених іоновмісних олігомерів та нанокмпозитних полімерних матеріалів різного функціонального призначення на основі цих сполук, а також дослідити особливості їхньої структурної організації та властивостей.

Для реалізації ідеї дослідження та досягнення поставленої мети ми вперше синтезували низку аніонних протонних та апротонних амфифільних стимул-чутливих до дії зовнішніх факторів іономерів різної будови та молекулярної архітектури. Як вихідні сполуки брали комерційно доступні олігоестерполіоли різних ступенів розгалуження торгової марки Boltorn. На рис. 2 наведено їхні ідеалізовані структурні формули та основні характеристики, зокрема вміст реакційно здатних аліфатичних первинних гідроксильних груп та молекулярну масу.

Ми запропонували методи синтезу протонних та апротонних аніонних карбоксилатних та сульфонатних іономерів гіперрозгалуженої будови шляхом полімераналогічних перетворень вихідних олігоестерполіолів різних генерацій. При цьому як протиіони використовували власне протони, неорганічні катіони лужних металів та органічні катіони як у протонній, так і в апротонній формах. В результаті було отримано низку функціональних матеріалів. Зокрема, протон- та літійпровідні електроліти, гнучкі нанокмпозитні іоногелі та суперконденсатори на їх основі, а також високоеластичні стимул-чутливі композитні полімерні ламінати зі структурно регульованим райдужним забарвленням. Слід зазначити, що всі синтезовані сполуки є аморфними, що сприяє їх використанню як іонопровідних середовищ для електрохімічних застосувань.

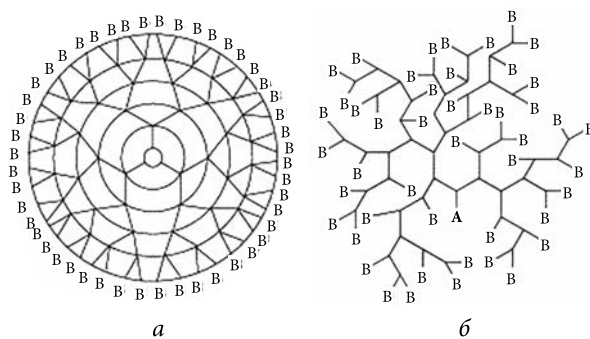


Рис. 1. Структура олігомерів дендритної будови: а — дендример; б — гіперрозгалужений полімер [1]

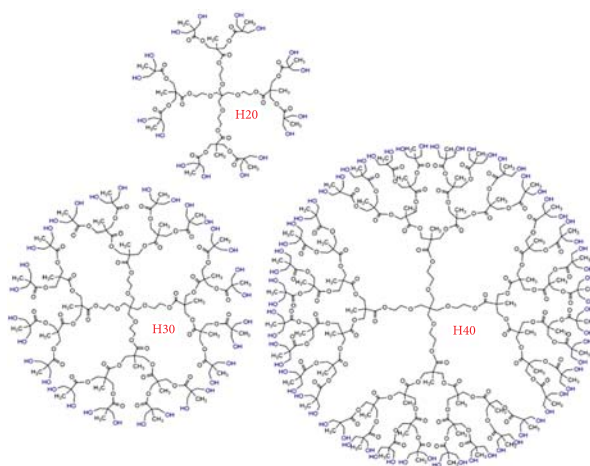
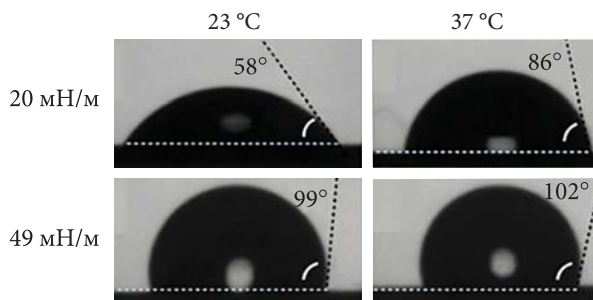


Рис. 2. Вихідні олігоестерполіоли гіперрозгалуженої будови (Boltorn™): Н-20 — друга генерація (вміст ОН — 15,6 %, ММ — 1750 г/моль); Н-30 — третя генерація (вміст ОН — 15,3 %, ММ — 3500 г/моль); Н-40 — четверта генерація (вміст ОН — 15,0 %, ММ — 7277 г/моль)

Серед розроблених сполук розглянемо амфифільні іомери з регульованим гідрофільно-гідрофобним балансом. Регулювання гідрофільних і гідрофобних властивостей відбувається завдяки введенню до складу таких сполук різної кількості гідрофобних довголанцюгових аліфатичних замісників, а також гідрофільних іонних груп з різним типом катіона. Такі сполуки є високоефективними поверхнево активними речовинами зі стимул-чутливою поведінкою щодо змінення рН середовища. Зокрема, зі зниженням рН спостерігається формування



**Рис. 3.** Змочування краплиною води поверхонь мономолекулярних плівок, нанесених на кремнієву підкладку. Плівки отримано методом Ленгмюра—Блоджет за різних температур та поверхневих тисків. Крайовий кут змочування є мірою гідрофобності плівки

складних ієрархічно структурованих супрамолекулярних утворень, у тому числі везикул. Такі колоїдні системи є перспективними для використання в процесах інкапсулювання або контрольованого масопереносу, наприклад для екстракції і доставки лікарських препаратів.

Якщо в таких сполуках невеличкий органічний катіон замінити на великий олігомерний катіон з нижньою критичною температурою розчинення (32 °C), то нова структура стає стимул-чутливою до змінення температури. Такі сполуки характеризуються складнішою і більш різноманітною в плані структуроутворення поведінкою як у розчинах, так і на міжфазних межах. Зокрема, при нанесенні мономолекулярних плівок, одержаних методом Ленгмюра—Блоджет, на тверду кремнієву підкладку можна отримати мономолекулярні покриття з регульованими структурою та морфологією. Наприклад, ми показали, що, змінюючи температуру та поверхневий тиск при формуванні таких плівок, можна регулювати різні властивості покриття, зокрема його гідрофільність (рис. 3). Отримані мономолекулярні плівки є перспективними як «розумні» матеріали для використання в сенсорних системах та мікроелектроніці.

Надалі ми зосередили зусилля на використанні розроблених нами іономерів гіперрозгалуженої будови для створення твердополімерних електролітів, зокрема протонопровідних

полімерних плівкових мембран для водневих паливних елементів як високоефективних та екологічно безпечних електрохімічних джерел струму.

Зазвичай у водневих паливних елементах використовують типові протонобмінні перфторсульфононі мембрани торговельної марки Nafion, які є галузевим стандартом. Однак вони мають низку обмежень. Зокрема, їхня робоча температура не перевищує 90 °C, і для нормального функціонування за температур, вищих за 100 °C, вони потребують зволоження. Крім того, мембрани Nafion досить високоартісні і залишають по собі значний екологічний слід, оскільки перфторовані сульфополімерні матеріали (PFSA) є токсичними і майже не піддаються утилізації, їх навіть називають «вічними хімікатами». Тому є потреба у створенні нових високотемпературних полімерних електролітних мембран. Необхідність зсуву робочих температур в область 100—200 °C пов'язана з підвищенням ефективності електродних реакцій і, відповідно, можливістю використання більш дешевих каталізаторів з неблагородних металів (оскільки зазвичай використовують платинові каталізатори), а також зниженням чутливості каталізаторів до наявних у водневому паливі домішок монооксиду вуглецю.

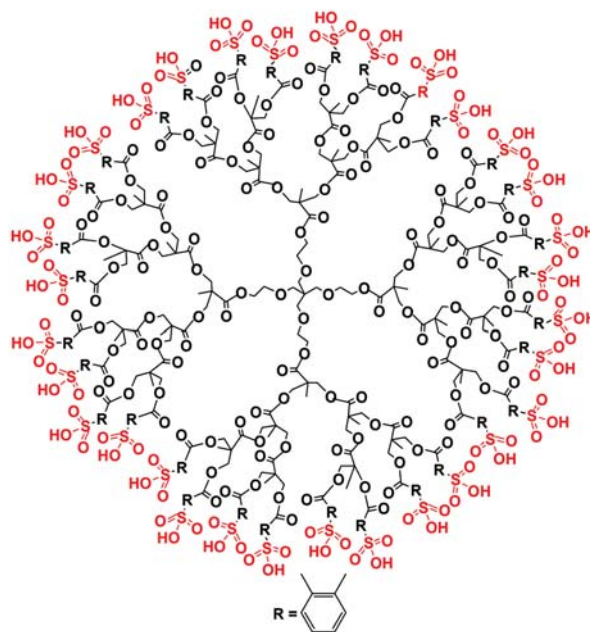
Синтезована нами олігомерна сульфокислотна кислота (рис. 4) є досить ефективним допантом (добавкою) для плівкових H<sup>+</sup>-провідних полімерних мембран і характеризується протонодонорними та наноструктуровальними властивостями. Ця сполука у вигляді протонної солі з органічними катіонами має за відсутності зволоження на порядок вищу іонну провідність. Тому ми використали її для синтезу золь-гель методом високотемпературних (вище 100 °C) протонопровідних плівкових нанокомпозитних полімерних електролітних мембран з безводним механізмом провідності.

Якщо у згаданій вище олігомерній сульфокислоті замінити протони на іони літію, ми отримуємо іономери, які можна використовувати як Li-провідні плівкові полімерні електролітні матеріали. Отримували ми їх введенням літійвмісних гіперрозгалужених іоно-

мерів у суміш полі- та олігооксиетиленуретан-сечовини блокової будови. При цьому жорсткі блоки у складі таких мембран забезпечують механічну міцність та структурування системи загалом, а гнучкі олігоетиленоксидні блоки — гнучкість та здатність до іонної (літєвої) провідності. Розроблені нами Li-провідні плівкові полімерні електролітні матеріали мають низку переваг над традиційними електролітами. Зокрема, вони негорючі, нетекучі, мають високу термічну стабільність, високу енергетичну щільність, ширший температурний діапазон та більше вікно електрохімічної стабільності, пригнічують зростання літєвих дендритів, і їх можна компактніше розмістити в батареї. Слід зазначити, що за таким параметром, як іонна провідність, розроблені матеріали є перспективними для використання саме в твердотільних літєвих акумуляторних батареях.

Якщо у складі таких плівкових матеріалів замінити іони літїю на іони натрію, відкривається шлях для отримання Na-провідних електролітів для натрієвих джерел струму. Однак цей напрям наших робіт перебуває поки що на початковій стадії, ми тільки-но почали його розвивати.

Інший напрям пов'язаний з отриманням формостійких іоногелів як високоефективних твердих електролітів різного електрохімічного призначення. Використання нанокристалічної целюлози у суміші з розробленими нами протонними іономерами як гелеутворювачами та іонної рідини як рідкої фази дозволило отримати формостійкі жорсткі іоногелі, які містять досить багато іонної рідини (94—95 %) як для такого типу систем. На рис. 5 наведено зовнішній вигляд розроблених іоногелів. Аналіз літературних даних засвідчив, що створені нами іоногелі за співвідношенням іонної провідності та механічних характеристик є одними з найкращих на міжнародному рівні, адже зазвичай з підвищенням іонної провідності втрачаються механічні властивості і навпаки. Досягти такої високої іонної провідності (на рівні іонної рідини) з одночасним збереженням механічної міцності вдалося завдяки унікальній пористій структурі розроблених іоногелів.



**Рис. 4.** Олігомерна сульфокислотна кислота як допанти з властивостями  $\text{H}^+$ -донора та наноструктуровального агента для плівкових  $\text{H}^+$ -провідних полімерних мембран; вміст  $\text{SO}_3\text{-H}$  — 27 %,  $T_d = 230$  °C,  $\sigma_{dc} = 1,67 \cdot 10^{-4}$  См/см за 100 °C,  $\sigma_{dc}$  протондонора у вигляді солей з органічними катіонами становить  $(3,2\text{—}3,6) \cdot 10^{-3}$  См/см за 100 °C



**Рис. 5.** Жорсткі іоногелі

Поєднання нановолокон целюлози з нанокристалами целюлози і використання розроблених нами іономерів в апротонній формі як гелеутворювачів дозволило отримати вже гнучкі іоногелі. Вміст іонної рідини в таких системах також досить високий, на рівні 88—90 %. На рис. 6 можна бачити, що це прозорі дуже гнучкі плівкові матеріали з високою термічною

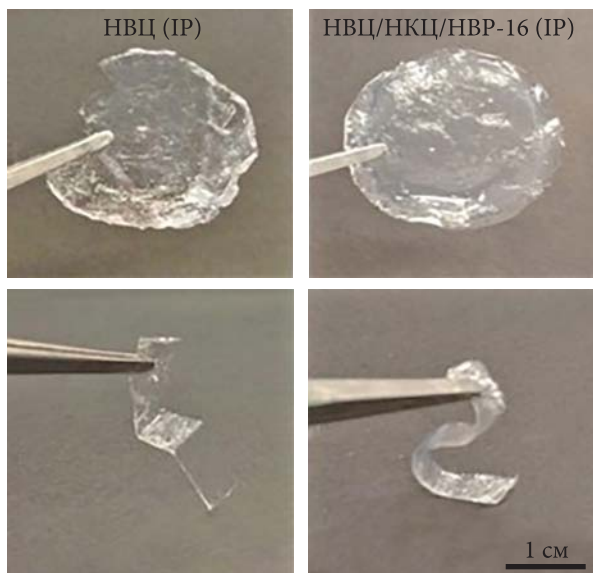


Рис. 6. Гнучкі іоногелі

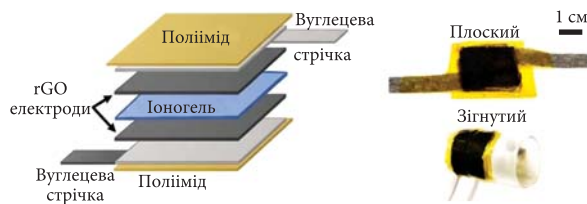


Рис. 7. Суперконденсатори на основі гнучких іоногелів

стабільністю (до 300—400 °С) та пористістю (до 10 % залежно від складу). При аналізі їхніх механічних властивостей, зокрема модуля Юнга, межі міцності, а також ударної в'язкості та іонної провідності, стає очевидним, що саме завдяки наявності у складі цих систем розроблених нами гіперрозгалужених іономерів зазначені показники збільшуються багаторазово (модуль Юнга — аж у 22 рази).

На основі гнучких іоногелів було розроблено гнучкі суперконденсатори (рис. 7) з досить високими робочими характеристиками: питомою ємністю 120 Ф/г (за 0,2 А/г) і питомою енергією 36—38 Вт·год/кг. Крім того, вони мають високу циклічність — найкращі зразки зберігають не менш як 80 % ємності після 10 000 циклів заряджання—розряджання в умовах деформації, що свідчить про перспективність їх вико-

ристання для створення гнучких, високоемних пристроїв зберігання електроенергії.

Ми провели аналіз наявних у літературі даних щодо сучасного стану світових розробок у галузі гелевих електролітів та суперконденсаторів (рис. 8). Як бачимо, порівняння функціональних характеристик розроблених нами іоногелів та суперконденсаторів на їх основі зі світовими аналогами свідчить на нашу користь.

Ще один цікавий напрям наших робіт пов'язаний з отриманням високоеластичних, стимул-чутливих композитних полімерних ламінатів зі структурно регульованим райдужним забарвленням (іризацією). Такі матеріали являють собою тришаровий композит, зовнішні шари якого складаються з комерційно доступного аліфатичного поліуретану, а внутрішній активний шар — це лівозакручена холестерична рідкокристалічна структура з нанокристалів целюлози з додаванням гіперрозгалуженого термочутливого іономера як наноструктуровального агента. На рис. 9 показано, як у цих композитів проявляється явище іризації. Стимул-чутлива природа запропонованих ламінатів зумовлює їхню здатність змінювати забарвлення внаслідок відповідних структурних змін рідкокристалічної компоненти під впливом зміни вологості й температури.

Слід також зазначити, що механічні параметри (відносне видовження, міцність на розрив) цих ламінатів є аномальними для такого типу сполук, що пояснюється характером взаємодії нанокристалів целюлози з розробленими нами іономерами.

Загалом перспективи застосування синтезованих нами гіперрозгалужених іономерів доволі широкі. Можна окреслити такі сфери їх використання:

- **іонопровідні середовища** — як компоненти полімерних електролітів з властивостями наноструктуровальних агентів для електрохімічних пристроїв різного призначення;
- **стимул-чутливі супрамолекулярні ієрархічні поліелектролітні системи** — для процесів інкапсулювання, отримання високодисперсних систем (наночастинок металів),

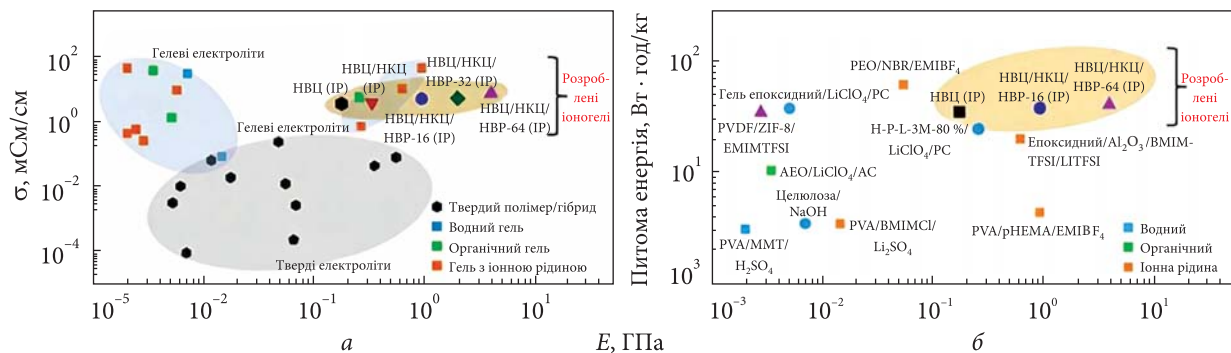


Рис. 8. Стан розробок у галузі гелевих електролітів та суперконденсаторів на їх основі у світі: *a* — співвідношення іонної провідності ( $\sigma$ ) та опору деформації ( $E$ ) отриманих гелевих електролітів; *b* — співвідношення питомої енергії та опору деформації ( $E$ ) суперконденсаторів з гелевими електролітами

контрольованого масопереносу (екстракція, спрямована доставка лікарських препаратів), гетерогенного каталізу тощо;

- **мономолекулярні плівки на гетерогенних поверхнях** — як смарт-покриття в сенсорних системах і мікроелектроніці;

- **полімерні електроліти** — для електрохімічних пристроїв генерації електричної енергії (водневі та метанольні полімер-електролітні паливні елементи; літєві, натрієві, калієві джерела струму; сонячні елементи), а також для сенсорів вологості;

- **жорсткі формостійкі іоногелі** — як тверді електроліти;

- **гнучкі іоногелі** — як компоненти гнучких суперконденсаторів;

- **композитні полімерні ламінати з регульованим райдужним забарвленням** — як гнучкі міцні сенсори та оптичні мітки;

- **електроактивні композитні матеріали** — як матеріали з електромеханічним відгуком (актуатори).

Результати досліджень оприлюднено у високорейтингових фахових журналах з високим імпакт-фактором [2—12].

Отже, підсумовуючи проведені нами фундаментальні і прикладні дослідження, можна констатувати, що було розроблено підходи до синтезу іоновмісних олігомерів гіперрозгалуженої будови та методи їх модифікації з наданням цим сполукам здатності змінювати струк-

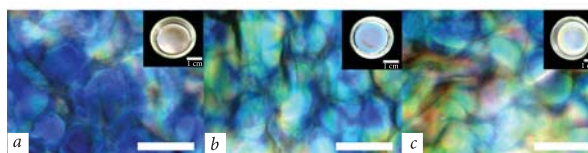
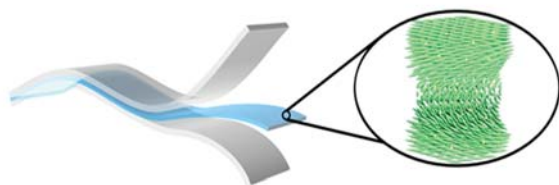


Рис. 9. Композитні полімерні ламінати з регульованим райдужним забарвленням

туру і властивості у відповідь на дію певних фізичних і фізико-хімічних факторів. Також на їх основі створено нанокомпозитні матеріали зі стимул-чутливим відгуком.

Встановлено особливості та взаємозв'язок між хімічною будовою сформованої молекулярної структури і властивостями отриманих систем.

Показано, що запропоновані іономери є ефективними будівельними блоками з високою поверхневою активністю та властивостями наноструктуровувальних агентів для отримання поліелектролітних та полімер-електролітних систем.

З використанням розроблених іономерів отримано колоїдні системи, які характеризую-

ються ієрархічною будовою і є перспективними агентами в процесах інкапсулювання, контрольованого масопереносу, для отримання високодисперсних систем, а полімерні плівкові матеріали та іоногелі можна застосовувати в пристроях генерації та зберігання електроенергії для підвищення їхньої ефективності.

Користуючись нагодою, хотів би висловити подяку за плідну наукову співпрацю колегам з відділу хімії олігомерів і сітчастих полімерів Інституту хімії високомолекулярних сполук НАН України, особливо завідувачу відділу члену-кореспонденту НАН України Валерію Васильовичу Шевченку, а також співробітникам Центру колективного користування науковими приладами «Науково-дослідницька станція для дослідження термічних і механічних властивостей полімерних матеріалів» НАН України.

Окрема наша вдячність професору Володимиру Цукруку (V.V. Tsukruk) з Технологічного інституту Джорджії (США), який став головним ініціатором підготовки спеціального ви-

пуску одного з найвпливовіших видань у галузі полімерної хімії та матеріалознавства — журналу Американського хімічного товариства «Applied Materials & Interfaces». Цей спецвипуск під назвою «Наука в Україні: досягнення в галузі прикладних матеріалів» представляє 22 статті за результатами досліджень українських вчених, проведених у колаборації з іноземними партнерами, і має на меті популяризацію української науки на міжнародній арені. Пишаємося, що одна зі статей цього спецвипуску — наша, і присвячена отриманню згаданих вище високоеластичних, стимул-чутливих композитних полімерних ламінатів. Крім того, за ініціативою та під головуванням професора В.В. Цукрука 22—26 березня цього року в Атланті (штат Джорджія, США) було проведено симпозиум «Bioinspired Functional Polymer Engineering: Materials Science from Ukraine».

Дякую за увагу!

За матеріалами засідання підготувала О.О. Мележик

## REFERENCES

1. Seiler M. Hyperbranched polymers: Phase behavior and new applications in the field of chemical engineering. *Fluid Phase Equilibria*. 2006. **241**(1-2): 155—174. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2005.12.042>
2. Zhang Y., Flouda P., Poliukhova V., Stryutsky A., Shevchenko V., Tsukruk V. Stretchable laminates with tunable structural colors from layered stacks of elastomeric, ionic, and natural polymers. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2025. **17**(14): 21830—21842. <https://doi.org/10.1021/acsami.5c01880>
3. Flouda P., Stryutsky A.V., Buxton M.L., Adstedt K.M., Bukharina D., Shevchenko V.V., Tsukruk V.V. Reconfiguration of Langmuir monolayers of thermo-responsive branched ionic polymers with LCST transition. *Langmuir*. 2022. **38**(39): 12070—12081. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.2c01940>
4. Flouda P., Bukharina D., Pierce K.J., Stryutsky A.V., Shevchenko V.V., Tsukruk V.V. Flexible sustained ionogels with ionic hyperbranched polymers for enhanced ion-conduction and energy storage. *ACS Applied Materials & Interfaces*. 2022. **14**(23): 27028—27039. <https://doi.org/10.1021/acsami.2c04502>
5. Lee H., Erwin A., Buxton M.L., Kim M., Stryutsky A.V., Shevchenko V.V., Sokolov A.P., Tsukruk V.V. Shape persistent, highly conductive ionogels from ionic liquids reinforced with cellulose nanocrystal network. *Advanced Functional Materials*. 2021. **31**(38): 2103083. <https://doi.org/10.1002/adfm.202103083>
6. Lee H., Stryutsky A., Mahmood A.-U., Singh A., Shevchenko V.V., Yingling Y.G., Tsukruk V.V. Weakly ionically bound thermosensitive hyperbranched polymers. *Langmuir*. 2021. **37**(9): 2913—2927. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c03487>
7. Lee H., Stryutsky A.V., Korolovych V.F., Mikan E., Shevchenko V.V., Tsukruk V.V. Transformations of thermosensitive hyperbranched poly(ionic liquid)s monolayers. *Langmuir*. 2019. **35**(36): 11809—11820. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01905>
8. Korolovych V.F., Erwin A., Stryutsky A., Lee H., Heller W.T., Shevchenko V.V., Bulavin L.A., Tsukruk V.V. Thermally responsive hyperbranched poly(ionic liquid)s: assembly and phase transformations. *Macromolecules*. 2018. **51**(13): 4923—4937. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.8b00845>

9. Korolovych V.F., Erwin A.J., Strytsky A., Mikan E.K., Shevchenko V.V., Tsukruk V.V. Self-assembly of hyperbranched protic poly(ionic liquid)s with variable peripheral amphiphilicity. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. 2017. **90**(8): 919—923. <https://doi.org/10.1246/bcsj.20170121>
10. Korolovych V.F., Ledin P.A., Strytsky A., Shevchenko V.V., Sobko O., Xu W., Bulavin L.A., Tsukruk V.V. Assembly of amphiphilic hyperbranched polymeric ionic liquids in aqueous media at different pH and ionic strength. *Macromolecules*. 2016. **49**(22): 8697—8710. <https://doi.org/10.1021/acs.macromol.6b01562>
11. Shevchenko V.V., Strytsky A.V., Klymenko N.S., Gumenna M.A., Fomenko A.A., Bliznyuk V.N., Trachevsky V.V., Davydenko V.V., Tsukruk V.V. Protic and aprotic anionic oligomeric ionic liquids. *Polymer*. 2014. **55**(16): 3349—3359. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2014.04.020>
12. Shevchenko V.V., Strytsky A.V., Sobko O.O., Klimentenko N.S., Gumenna M.A. Peculiarities of self-organization of amphiphilic oligomeric protic ionic liquids of hyperbranched structure with the formation of various hierarchical nanostructures. *Theoretical and Experimental Chemistry*. 2018. **54**(2): 122—127. <https://doi.org/10.1007/s11237-018-9555-9>

Oleksandr V. Striutskyi

*Institute of Macromolecular Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1457-2312>

#### HYPERBRANCHED IONIC OLIGOMERS AS BUILDING BLOCKS OF ELECTROLYTE SYSTEMS FOR VARIOUS PURPOSES

Transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, April 8, 2026

The report presents some important results of fundamental and applied research of the Institute of Macromolecular Chemistry of the NAS of Ukraine on the development of new ionomers and polymer electrolyte materials. The results obtained have great potential for practical application for the improvement of some industrial high-tech physicochemical processes in science-intensive sectors of the economy, in particular, they can contribute to the development of alternative energy, increasing the environmental and energy security of Ukraine.

**Cite this article:** Striutskyi O.V. Hyperbranched ionic oligomers as building blocks of electrolyte systems for various purposes (transcript of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine, April 8, 2026). *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2026. (6): 44—51. <https://doi.org/10.15407/visn2026.06.044>