



<https://doi.org/10.15407/polymerj.48.03.123>

УДК 541.26:678.01:678.664:66.011

Лариса ГОРБАЧ

ORCID: [0000-0003-2711-7244](https://orcid.org/0000-0003-2711-7244)

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України

48, Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

e-mail: gorbachla@ukr.net

Любов ВОРОНЦОВА

ORCID: [0000-0002-3792-9409](https://orcid.org/0000-0002-3792-9409)

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України

48 Харківське шосе, Київ, 02155, Україна

ОСОБЛИВОСТІ МОРФОЛОГІЇ ТА СОРБЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ ГІДРОФІЛЬНИХ ШВИДКОСОРБУВАЛЬНИХ ПЛАТФОРМ ЗАЛЕЖНО ВІД ЇХНЬОГО СКЛАДУ ТА УМОВ УТВОРЕННЯ

Отримано гідрофільні швидкосорбувальні платформи (ГШП) на основі желатину як основи для ефективних колориметричних сенсорних систем позалабораторного контролю токсинів (атразину). За різних умов було синтезовано чотири серії ГШП₁-ГШП₄. Охолодженням розчину желатину до 5 °С отримували фізичну сітку ГШП₁. Отримання ГШП₂, жорсткої ковалентної сітки, проводили шляхом термічного тверднення желатину з глутаровим альдегідом (ГА). Формування ГШП₃ відбувалося за рахунок УФ-опромінення желатину й бісакриламиду (БАА) та отриманням структури напіввзаємопроникних полімерних сіток. ГШП₄ отримували на основі желатину та натрій карбоксиметилцелюлози (Na-КМЦ) з використанням комбінованої системи шпичачів (БАА й ГА) та способів тверднення (нагрівання і УФ-опромінення), з отриманням структури взаємопроникних полімерних сіток. Синтезовано та інтегровано в структуру ГШП подрібнений молекулярно імпринтований полімер, селективний щодо атразину (МІП_{атр}). Досліджено морфологію та сорбційну здатність індивідуальних і наповнених ГШП. Морфологію зразків досліджено за допомогою світлової мікроскопії. Ступінь набухання (β) визначено гравіметричним методом. Встановлено, що варіювання умов формування дає змогу регулювати архітектуру пор і гідрофільність матриці, що забезпечує високу швидкість масоперенесення. Визначено, що всі зразки демонструють загальну тенденцію до зниження ступеня набухання в ряду ГШП₁ > ГШП₃ > ГШП₄. Зниження сорбції води свідчить про ущільнення гідрофільної матриці. Але введення наповнювача МІП_{атр} у ГШП₂ змінює морфологію та підвищує сорбційну здатність системи, формуючи більш пухку, пористу структуру. Зразок ГШП₃ є найперспективнішим завдяки найбільш збалансованій структурі. Завдяки Na-КМЦ пори ГШП₄ значно більші, ніж у ГШП₁, ГШП₂ або ГШП₃, що забезпечуватиме швидку доставку атразину до частинок МІП_{атр} через великі пори, а самі частинки МІП_{атр} виконуватимуть роль селективних фільтрів.

Ключові слова: гідрофільна швидкосорбувальна платформа, молекулярно імпринтовані полімери, атразин, колориметрична сенсорна система

Цитування: Горбач Л., Любов Воронцова Л. Особливості морфології та сорбційної здатності гідрофільних швидкосорбувальних платформ залежно від їхнього складу та умов утворення. *Полімерний журнал*. 2026. **48**, № 3. С. 123—130. <https://doi.org/10.15407/polymerj.48.03.123>

© Publisher PH "Akadempriodyka" of the NAS of Ukraine, 2026. This is an open access article distributed under the CC BY-ND 4.0 licence

Вступ

Один з найбільш прогресивних підходів до селективного визначення атразину поза лабораторними умовами, тобто в місцях, де безпосередньо перебуває об'єкт аналізу, — це використання молекулярно імпринтованих полімерів (МІП) [1—4]. МІП мають високий рівень селективності, що забезпечує можливість їх використання для детектування й визначення концентрації токсинів, зокрема атразину, в реальних умовах [5—8]. Завдяки своїй структурі МІП здатні специфічно розпізнавати молекулу-аналіт. Ця специфічність базується на створенні «відбитків», так званих тривимірних каверн [1—4], які за формою, розміром і розташуванням функціональних груп точно відповідають молекулам атразину. Маючи такі «відбитки» в структурі, полімер у процесі сорбції «ігнорує» інші токсини, реагуючи лише на атразин. Завдяки розробленим нами раніше колориметричним сенсорним системам на основі тонких полімерних плівок МІП можна як якісно, так і кількісно визначати концентрацію токсинів [10]. Принцип дії таких сенсорних систем ґрунтується на хімічних реакціях, які супроводжуються появою або зміною забарвлення плівки, що легко візуально зафіксувати. Проте недоліком таких тест-систем є потреба у тривалому (впродовж 180 хв) витримуванні МІП-мембран у досліджуваному водному розчині, що суттєво уповільнює сам процес визначення. Ця робота спрямована на усунення цього недоліку шляхом підвищення сорбційної здатності та суттєвого скорочення тривалості аналізу.

Метою роботи було отримання гідрофільних швидкосорбувальних платформ (ГШП) на основі желатину, наповнених МІП, як основи ефективних колориметричних сенсорних систем поза лабораторного контролю токсинів (атразину), а також дослідження їх морфології та сорбційної здатності.

Експериментальна частина

Матеріали. Желатин (Жел), натрій карбоксиметилцелюлоза (Na-КМЦ), бісакриламід (БАА), глутаральдегід (ГА), триетиленглікольдиметакрилат (ТЕГДМА), диметилформамід (ДМФА), полі(етиленгліколь) (ММ 20000) (ПЕГ), 2,2'-диметокси-2-фенілацетофенон (кеталь, $\lambda = 330\text{—}340$ нм) (99 %), метакрилова кислота (МАК),

атразин отримано від Sigma-Aldrich (Alsі, Київ, Україна). Усі реактиви були марки «ч.д.а.» і використовувалися у вихідному стані без додаткового очищення. Олігоуретанакрилат (ОУА) було синтезовано, як описано раніше [5].

Атразин-селективні МІП

Атразин-селективні МІП були синтезовані з три(етиленгліколь)диметакрилату (ТЕГДМА) як акрилатної складової, олігоуретанакрилату (ММ 2610) (ОУА) як модифікатора-еластифікатора і МАК як функціонального мономеру. За отриманими нами раніше експериментальними результатами й даними комп'ютерного моделювання [6] встановлено, що найвищі колориметричні сенсорні відгуки сенсорної системи для виявлення атразину характерні для МІП, синтезованих за участю МАК як функціонального мономеру. Як матрицю використовували атразин. МІП синтезували, як описано в роботі [7]. Отримані МІП використовували як наповнювач, загальний вміст якого в усіх зразках становив 5 мас.%. Гранулометричний склад наповнювача визначали за допомогою комплекту сит 25—200 мкм.

Для досягнення поставленої мети на основі желатину за різних умов було отримано чотири серії ГШП₁, ГШП₂, ГШП₃ та ГШП₄ у вигляді плівок і наповнених плівкових систем.

Перша серія ГШП₁

Зразки першої серії ГШП₁ отримували у вигляді плівок фізично зшитого гідрогелю желатину. Для цього розчин желатину з концентрацією 10 мас.% витримували на ультразвуковій бані (УЗБ) за 60 °С для одержання гомогенного розчину. Отриманий розчин заливали у форму з двох скляних пластин, фіксованих на відстані 60 мкм за допомогою тefлонових спейсерів, охолоджували до 5 °С, витримували в холодильнику протягом 24 год, потім сушили на повітрі за 20 °С протягом 48 год.

Друга серія ГШП₂

Зразки другої серії ГШП₂ отримували шляхом термічного тверднення желатину, який зшивали ГА. Основу становив розчин желатину з концентрацією 10 мас.%, який витримували на УЗБ за 60 °С, додавали зшивальний агент ГА 1 мас.%, заливали у форму з двох скляних пластин,

фіксованих на відстані 60 мкм за допомогою тefлонових спейсерів і затверджували за 55 °С у термошафі SNOL (Литва) впродовж 4 год.

Третя серія ГШП₃

Третю серію ГШП₃ отримували за допомогою УФ-опромінення на основі желатину, який зшивали БАА. Желатиновий розчин з концентрацією 10 мас.% перемішували на УЗБ за 60 °С, додавали зшивальний агент БАА 1 мас.%, ініціатор кеталь, заливали у форму з двох скляних пластин, фіксованих на відстані 60 мкм за допомогою тefлонових спейсерів і опромінювали композицію за допомогою люмінесцентної лампи (Philips TL 2001 8W × 4, $\lambda = 365$ нм) впродовж 30 хв.

Четверта серія ГШП₄

Четверту серію ГШП₄ отримували на основі кополімерізації желатину і Na-КМЦ, як зшивальні агенти для складових системи застосовували БАА й ГА відповідно, для затверднення застосовували желатиновий розчин з концентрацією 10 мас.%, перемішували на УЗБ за 60 °С, додавали зшивальний агент БАА 1 мас.%, кеталь, потім додавали розчин Na-КМЦ 1 мас.% і зшивальний агент ГА 1 мас.%. Полімерну суміш заливали у форму з двох скляних пластин, фіксованих на відстані 60 мкм за допомогою тefлонових спейсерів. Спочатку опромінювали композицію за допомогою люмінесцентної лампи впродовж 30 хв, а потім витримували в термошафі за 55 °С впродовж 4 год.

Наповнена система ГШП₁/МП_{атр}

Отримували на основі фізично зшитого гідрогелю желатину. До гідрофільної частини композиції, розчину желатину з концентрацією 10 мас.%, вносили наповнювач у вигляді подрібнених до тонкодисперсного стану плівок МП_{атр}, гомогенізували на УЗБ за 60 °С. Отриману суміш заливали у форму з двох скляних пластин, фіксованих на відстані 60 мкм за допомогою тefлонових спейсерів, охолоджували до 5 °С, витримували в холодильнику протягом 24 год, потім сушили на повітрі протягом 48 год.

Наповнена система ГШП₂/МП_{атр}

Отримували на основі гідрофільної частини системи Жел/ГА. До гідрофільної частини композиції розчину желатину з концентрацією 10 мас.% додавали зшивальний агент ГА 1 мас.%, вносили

наповнювач у вигляді подрібнених до тонкодисперсного стану плівок МП_{атр}, перемішували на УЗБ за 60 °С для одержання гомогенного розчину. Отриману суміш заливали у форму з двох скляних пластин, фіксованих на відстані 60 мкм за допомогою тefлонових спейсерів і затверджували у термошафі за 55 °С впродовж 4 год.

Наповнена система ГШП₃/МП_{атр}

Систему отримували на основі гідрофільної частини системи Жел/БАА. До гідрофільної частини композиції розчину желатину з концентрацією 10 мас.% додавали зшивальний агент БАА 1 мас.%, вносили наповнювач у вигляді подрібнених до тонкодисперсного стану плівок МП_{атр}, гомогенізували на УЗБ за 60 °С, додавали кеталь в кількості 0,5 мас.% і заливали у форму з двох скляних пластин, фіксованих на відстані 60 мкм за допомогою тefлонових спейсерів. Опромінювали композицію за допомогою люмінесцентної лампи впродовж 30 хв.

Наповнена система ГШП₄/МП_{атр}

Наповнену систему отримували на основі гідрофільної частини системи Жел/Na-КМЦ. До желатинового розчину з концентрацією 10 мас.% додавали зшивальний агент БАА (1 мас.%), ініціатор кеталь (0,5 мас.%), потім додавали розчин Na-КМЦ з концентрацією 1 мас.% та зшивальний агент ГА 1 мас.%, гомогенізували на УЗБ за 60 °С. Отриману суміш заливали у форму з двох скляних пластин, фіксованих на відстані 60 мкм за допомогою тefлонових спейсерів та спочатку опромінювали композицію за допомогою люмінесцентної лампи впродовж 30 хвилин, а потім витримували у термошафі за 55 °С впродовж 4 год.

Методи дослідження. Ступінь набухання (β) визначали гравіметричним методом. Експеримент проводили в дистильованій воді за температури 25 °С. Аналізовані зразки занурювали в дистильовану воду, виймали через задані проміжки часу і зважували. Похибка у вимірюванні маси приладом Radwag WPS 60/180/C/2 на повітрі становила 0,0001 г.

Ступінь набухання (β , %) розраховували за формулою:

$$\beta = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \cdot 100 \%,$$

де: β — ступінь набухання, m_1 — маса зразка до набухання, m_2 — маса зразка після набухання.

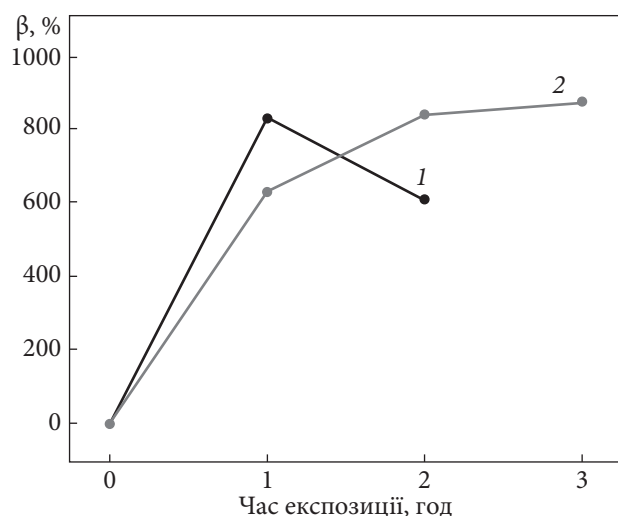


Рис. 1. Ступінь набухання зразків індивідуальної фізичної сітки ГШП₁ і наповненої атразин-селективним МІП_{атр}: 1 — ГШП₁, 2 — ГШП₁/МІП_{атр}

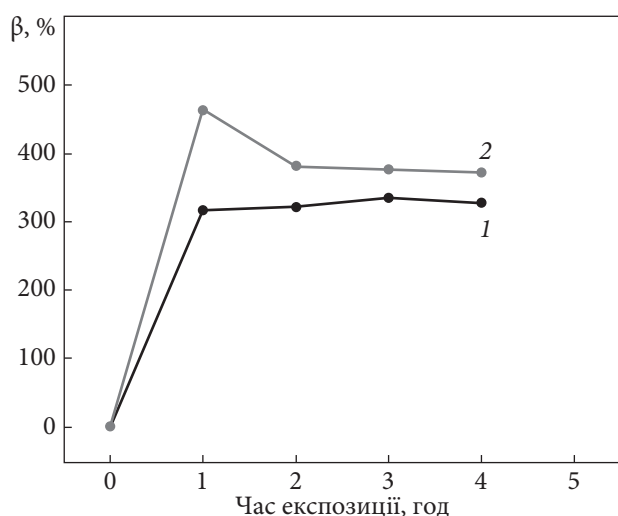


Рис. 2. Ступінь набухання зразків індивідуальної сітки ГШП₂ і наповненої атразин-селективним МІП_{атр}: 1 — ГШП₂, 2 — ГШП₂/МІП_{атр}

Таблиця 1. Зразки ГШП

Зразок	Склад
ГШП ₁	Жел
ГШП ₂	Жел/ГА
ГШП ₃	Жел/БАА
ГШП ₄	Жел/БАА/Na-КМЦ/ГА
ГШП ₁ / МІП _{атр}	Жел/МІП _{атр}
ГШП ₂ / МІП _{атр}	Жел/ГА/МІП _{атр}
ГШП ₃ / МІП _{атр}	Жел/БАА/МІП _{атр}
ГШП ₄ / МІП _{атр}	Жел/БАА/Na-КМЦ/ГА/МІП _{атр}

Морфологію зразків досліджували методом світлової мікроскопії на оптичному мікроскопі МБІ-6 в прохідному світлі у світлому полі за збільшення $\times 1000$. Мікрофотографії досліджуваних структур отримані за допомогою цифрової камери-окуляра MDC-300 і програмного забезпечення Scope Photo.

Результати та обговорення

За різних умов на основі желатину отримано функціональні полімерні системи у вигляді індивідуальних плівок ГШП і наповнених МІП_{атр}-систем. Склад отриманих зразків наведено в табл. 1.

Гравіметричним методом визначено ступінь набухання отриманих зразків. На рис. 1 наведено криві ступеня набухання зразків першої серії ГШП₁.

Як видно з рис. 1, початковий нахил кривих ГШП₁ (рис. 1, кр. 1) і ГШП₁/МІП_{атр} (рис. 1, кр. 2) дуже стрімкий, впродовж експерименту зразок ГШП₁/МІП_{атр} набуває значень рівноважного набухання і виходить на плато. Зразок індивідуальної ГШП₁, що являє собою фізичну сітку, набуває максимального ступеня набухання 828 %, не досягає рівноважного набухання й розчиняється.

На рис. 2 наведено показники ступеня набухання зразків другої серії ГШП₂.

Як видно з рис. 2, обидві криві набухання також мають стрімкий початковий нахил, але наповнена система ГШП₂/МІП_{атр} (рис. 2, кр. 2) має вищі показники сорбції порівняно з не-наповненою ГШП₂ (рис. 2, кр. 1). На відміну від фізичної сітки ГШП₁, зразок ГШП₂ базується на ковалентному зшиванні желатину глутаровим альдегідом (Жел/ГА). Саме альдегідні групи ГА реагують з первинними аміногрупами, які входять до складу білкового ланцюга Жел з утворенням імінів —CH=N— , з подальшим термічним твердненням, що змінює характер набухання. Введений наповнювач підвищує сорбційні показники системи, тобто може полегшувати доступ води до внутрішніх шарів наповненої системи.

На рис. 3 наведено показники ступеня набухання зразків третьої серії ГШП₃.

Як показав аналіз кінетичних кривих набухання, на початковому етапі швидкість поглинання води для зразків ГШП₃ (рис. 3,

кр. 1) і ГШП₃/МІП_{атр} (рис. 3, кр. 2) є практично ідентичною, що вказує на збереження сорбційних властивостей желатинової матриці після наповнення. Зниження рівноважного ступеня набухання за наявності частинок МІП_{атр} може свідчити про створення додаткового опору розширенню полімерної сітки [11, 12].

Початковий нахил кривих ГШП₄ (рис. 4, кр. 1) і ГШП₄/МІП_{атр} (рис. 4, кр. 2) стрімкий. Кінетична крива набухання ГШП₄ проходить через максимум 438 % з подальшим виходом на плато. У наповненій системі ГШП₄/МІП_{атр} максимальне значення ступеня набухання становить 372 %. Час виходу на плато індивідуальної ГШП₄ довший, ніж ГШП₄/МІП_{атр}, але обидві криві демонструють однакове рівноважне набухання.

Методом світлової мікроскопії досліджували морфологію зразків всіх серій. На рис. 5 наведено мікрофотографії зразків вихідних індивідуальних ГШП і наповнених МІП_{атр} чотирьох серій.

На рис. 5 зафіксовані зміни морфології, які відбуваються в наповнених МІП_{атр} зразках ГШП. Так, зразок індивідуальної сітки першої серії ГШП₁ демонструє неоднорідність у вигляді густої сітчастої структури з дрібними (~1 мкм) порами (рис. 5, а). Для зразка ГШП₁/МІП_{атр} введення наповнювача проявляється утворенням неоднорідних елементів структури, які, виходячи з особливостей формування оптичного зображення, можуть мати губчасту будову (рис. 5, б) та спостерігаються пори великих (до ~5 мкм) розмірів.

Для зразків другої серії ГШП₂ характерна однорідна морфологія (рис. 5, в), а з введенням наповнювача МІП_{атр} спостерігаються розосереджені об'ємні структурні утворення переважно губчастої будови, які мають різну неправильну геометричну форму (рис. 5, г). Їхні розміри в горизонтальному та вертикальному напрямках становлять від ~5 мкм до кількох десятків мкм.

В індивідуальних зразках третьої серії ГШП₃ спостерігаються об'ємні структурні утворення фрактального вигляду (рис. 5, д), і за характером формування оптичного зображення можна припустити, що ці структурні утворення пронизані взаємопов'язаними порожнинами різної конфігурації. В ГШП₃/МІП_{атр} з'являються щільно та достатньо рівномірно розподілені структурні елементи у вигляді доменів, імовірно утворених наповнювачем МІП (рис. 5, е).

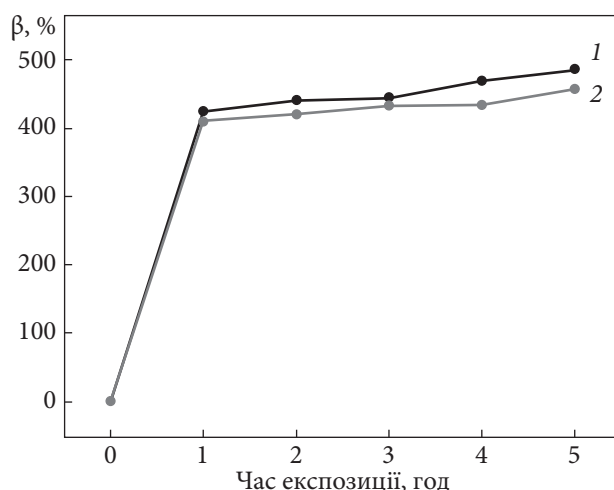


Рис. 3. Ступінь набухання зразків індивідуальної сітки ГШП₃ і наповненої атразин-селективним МІП_{атр}: 1 — ГШП₃, 2 — ГШП₃/МІП_{атр}

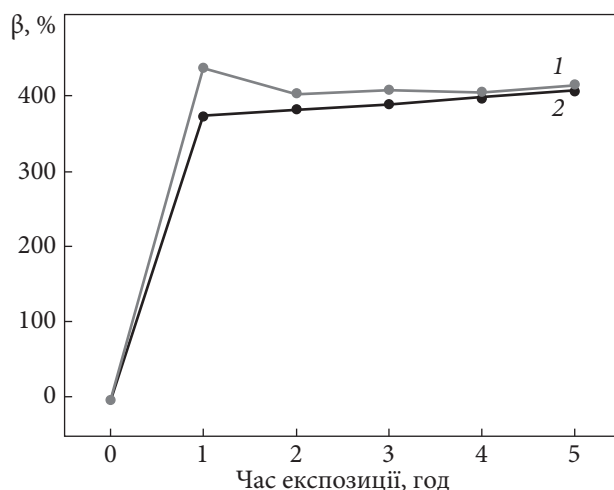


Рис. 4. Ступінь набухання зразків індивідуальної сітки ГШП₄ і наповненої атразин-селективним МІП_{атр}: 1 — ГШП₄, 2 — ГШП₄/МІП_{атр}

Для четвертої серії ГШП₄ характерна морфологія типу взаємопов'язаних регулярних структур, властива для взаємопроникних полімерних сіток у разі фазового поділу за механізмом спінодального розпаду. Також, крім цього, видно, що утворилися досить однорідно розподілені пори розмірами від ~0,5 до ~2 мкм (рис. 5, ж). У наповнених ГШП₄/МІП_{атр} введення подрібненого імпринтованого полімеру МІП_{атр} (5 мас.%) істотно збільшує пористість структури, що проявляється наявністю достатньо великих як відкритих, так і закритих пор розміром до ~20 мкм (рис. 5, з). Водночас

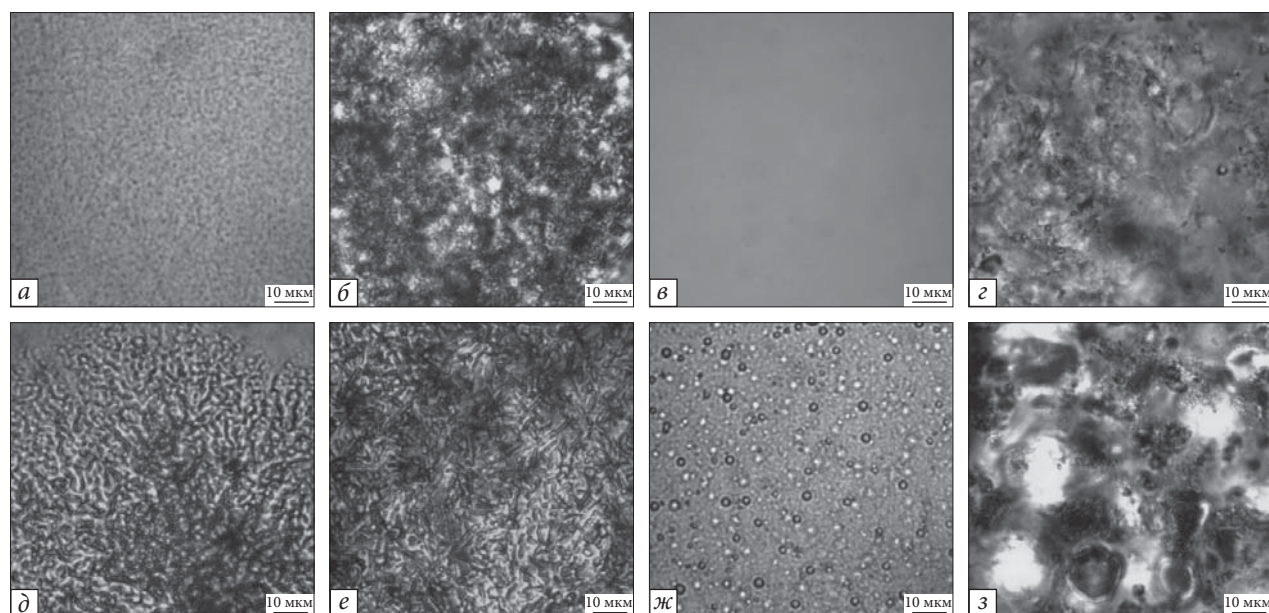


Рис. 5. Морфологічні особливості вихідних індивідуальних ГШП (а, в, д, ж) і наповнених селективним до атразину МП_{атр} (б, з, е, з)

Таблиця 2. Порівняльна динаміка зміни ступеня набухання води індивідуальними та наповненими ГШП

Зразок	Ступінь набухання, (β, %) ГШП	Ступінь набухання, (β, %) ГШП/МП	Динаміка зміни ступеня набухання, %
ГШП ₁	828	632	-196
ГШП ₂	319	464	+145
ГШП ₃	424	412	-12
ГШП ₄	438	372	-66

спостерігаються об'ємні структурні утворення губчастої будови розміром до ~30 мкм.

Як стверджують автори робіт [11, 12], при отриманні ГШП₁ (охладження розчину до 5 °С) нижче критичної температури гелеутворення відбувається фазовий перехід з формуванням потрійних спіралей. Ці спіралі утворюють густу мережу з дрібними порами [13]. При контакті з водою фізична желатинова сітка ГШП₁ не досягла рівноважних значень, а розчинилася, натомість зразок ГШП₁/МП_{атр} зберіг цілісність, що може свідчити про ефект армування частинками МП_{атр} [11–13].

Отримання ГШП₂ (Жел/ГА) виконували шляхом термічного тверднення желатину, який зшивали глутаровим альдегідом. Сформована таким шляхом ГШП₂ має іншу морфологію та динаміку набухання порівняно з фізичним гелем ГШП₁. Якщо структура ГШП₁ утворюється

водневим зв'язком між спіралями желатину, то в ГШП₂ формується щільна, однорідна структура, жорстка ковалентна сітка [11, 13]. Система стає нерозчинною, змінюється характер набухання, а введення наповнювача МП_{атр} змінює морфологію та підвищує ступінь набухання, що в подальшому може полегшити доступ розчину атразину до внутрішніх шарів наповненої системи.

Отримання ГШП₃ (Жел/БАА) за допомогою УФ-опромінення желатину та БАА кардинально змінює морфологію ГШП. На відміну від термічного тверднення (ГШП₂) або холодного гелеутворення (ГШП₁), під дією УФ-опромінення формується жорстка зшита сітка поліакриламід, «заплутуючи» ланцюги желатину всередині своєї сітки, створюючи структуру по типу напіввзаємопроникних сіток [11, 12]. Застосування УФ-променів запобігає утворенню макродефектів, агрегації частинок наповнювача, що характерно при повільному твердненні й забезпечує їх однорідний розподіл [11, 12]. Впродовж першої години експерименту ступені набухання практично ідентичні, що вказує на збереження сорбційних властивостей ГШП₃ після наповнення й затверднення.

ГШП₄ отримували на основі Жел/Na-КМЦ з використанням комбінованої системи зшивачів (БАА і ГА) та способів тверднення (нагрівання й УФ-опромінення), що формувало най-

складнішу морфологію серед усіх розглянутих систем. ГА виступає основним біфункціональним агентом хімічного зшивання, де альдегідні групи ГА реагують з первинними аміногрупами ланцюгів Жел з подальшою дегідратацією та утворенням імінів. У свою чергу, гідроксильні групи ($-\text{OH}$) ланцюгів Na-KMЦ можуть реагувати з альдегідними групами ГА та працювати в системі як «осмотична помпа». За наявності кеталю, БАА утворює щільну просторову акриламідну сітку, яка пронизує біополімерну матрицю, формуючи структуру, подібну до взаємопроникних полімерних сіток [11–14]. Завдяки Na-KMЦ пори ГШП_4 значно більші, ніж у ГШП_1 , ГШП_2 або ГШП_3 .

Аналіз отриманих результатів сорбції води індивідуальними зразками чотирьох серій (ГШП_1 — ГШП_4) та зразками, наповненими $\text{МІП}_{\text{атр}}$ впродовж першої години експерименту наведено в табл. 2.

При введенні наповнювача відстежується тенденція до зниження ступеня набухання $\text{ГШП}_1 > \text{ГШП}_3 > \text{ГШП}_4$, тоді як зразок $\text{ГШП}_2/\text{МІП}_{\text{атр}}$ демонструє зростання на 145 %, що може свідчити про формування більш пухкої, пористої структури при введенні наповнювача. Система ГШП_3 найстабільніша, демонструє найменші зміни ступеня набухання (–12 %), оскільки формується жорстка структура, в якій миттєво фіксуються введенні частинки $\text{МІП}_{\text{атр}}$.

Висновки

Було отримано гідрофільні швидкосорбувальні платформи (ГШП) на основі желатину як основи ефективних колориметричних сен-

сорних систем для позалабораторного контролю токсинів (атразину). За різних умов (охолодження, термоотверднення, УФ-отверднення, термо + УФ-отверднення) було синтезовано 4 серії ГШП_1 — ГШП_4 . Синтезовано та інтегровано в структуру ГШП подрібнений молекулярно імпринтований полімер, селективний щодо атразину ($\text{МІП}_{\text{атр}}$). Досліджено морфологію та сорбцію води індивідуальними і наповненими ГШП . Встановлено, що варіювання умов формування дає змогу регулювати архітектуру пор і гідрофільність матриці, що забезпечує високу швидкість масоперенесення. Зафіксовано загальну тенденцію до зниження сорбції води: $\text{ГШП}_1 > \text{ГШП}_3 > \text{ГШП}_4$. Зниження сорбції свідчить про ущільнення гідрофільної матриці. Але введення наповнювача $\text{МІП}_{\text{атр}}$ у ГШП_2 змінює морфологію та підвищує сорбційну здатність системи, формуючи більш пухку, пористу структуру. Зразок ГШП_3 є найперспективнішим завдяки найбільш збалансованій структурі, має стабільну систему мікропор, а УФ-метод отримання гарантує високу відтворюваність результатів. ГШП_4 має найскладнішу морфологію серед усіх розглянутих систем. Завдяки Na-KMЦ пори ГШП_4 значно більші, ніж у ГШП_1 , ГШП_2 або ГШП_3 , що забезпечуватиме швидку доставку атразину до частинок $\text{МІП}_{\text{атр}}$ через великі пори, а самі частинки $\text{МІП}_{\text{атр}}$ виконуватимуть роль селективних фільтрів. У подальшому для проведення випробувань із реальними розчинами атразину перспективними є системи $\text{ГШП}_2/\text{МІП}_{\text{атр}}$, $\text{ГШП}_3/\text{МІП}_{\text{атр}}$ та $\text{ГШП}_4/\text{МІП}_{\text{атр}}$.

REFERENCES

1. Wulff G. Molecular Imprinting in Cross-Linked Materials with the Aid of Molecular Templates — A Way towards Artificial Antibodies. *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 1995, **34**, 17:1812—1832. <https://doi.org/10.1002/anie.199518121>
2. Tokonami S., Shiigi H., Nagaoka T. Micro- and nanosized molecularly imprinted polymers for high-throughput analytical applications. *Analytica Chimica Acta*, 2009, 641:7—13. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.03.035>
3. Guan G., Liu B., Wang Z., Zhang Z. Imprinting of Molecular Recognition Sites on Nanostructures and Its Applications in Chemosensors. *Sensors*, 2008, 8: 8291—8320. <https://doi.org/10.3390/s8128291>
4. Vasapollo G. et al. Molecularly Imprinted Polymers: Present and Future Prospective. *International Journal of Molecular Sciences*, 2011, **12**, 9: 5908—5945. <https://doi.org/10.3390/ijms12095908>
5. Sergeyeva T.A., Brovko O.O., Piletska E.V. et al. Porous molecularly imprinted polymer membranes and polymeric particles. *Analytica Chimica Acta*, 2007, **582**, 2: 311—319. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.09.011>
6. Sergeyeva T., Yarynka D., Piletska E. et al. Development of a smartphone-based biomimetic sensor for aflatoxin B1 detection using molecularly imprinted polymer membranes. *Talanta*, 2019, 201: 204—210. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.04.016>

7. Sergeyeva T.A., Piletsky S.A., Brovko A.A. *et al.* Selective recognition of atrazine by molecularly imprinted polymer membranes. Development of conductometric sensor for herbicides detection. *Analytica Chimica Acta*, 1999, **392**, 2—3: 105—111. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(99\)00225-1](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(99)00225-1)
8. Yarynka D., Honcharenko A., Gorbach L. *et al.* Validation of a smartphone-compatible MIP-based sensor for bisphenol A determination in wastewater samples. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2024, **416**: 7121—7129. <https://doi.org/10.1007/s00216-024-05616-y>
9. Horbach L.A., Purikova O.H., Serheieva T.A., Brovko O.O. Hydrophilic fast-absorbing platform, filled with molecularly imprinted polymers. *Him. Fiz. Tehnol. Poverhni* 2025, **16**, 3: 376—384. <https://doi.org/10.15407/hftp16.03.376>
10. Sergeyeva T.A., Gorbach L.A., Slinchenko O.A. *et al.* Towards development of colorimetric test-systems for phenols detection based on computational molecularly-imprinted polymer membranes. *Materials Science and Engineering*, 2010, **30**, 3: 431—436. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2009.12.012>
11. Ullah F., Othman M. B. H., Javed F. *et al.* Classification, processing and application of hydrogels: A review. *Materials Science and Engineering C*, 2015, **57**: 414—433. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2015.07.053>
12. Ahmed E.M. Hydrogel: Preparation, characterization, and application; A review, *Journal of Advanced Research*, 2015, **6**, 2:105-121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>
13. Ross-Murphy S.B. Structure and rheology of gelatin gels: recent progress. *Polymer*, 1992, **33**, 12: 2622—2627. [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(92\)91146-S](https://doi.org/10.1016/0032-3861(92)91146-S)
14. Farris S., Song J., Huang Q. Alternative reaction mechanism for the cross-linking of gelatin with glutaraldehyde. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, **58**, 2: 998—1003. <https://doi.org/10.1021/jf9031603>

Received 18.05.2026

Accepted 01.09.2026

Published 19.10.2026

Larysa Gorbach

Institute of Macromolecular Chemistry, NAS of Ukraine

48, Kharkivske Highway, Kyiv, 02160, Ukraine

e-mail: gorbachla@ukr.net

Liubov Vorontsova

Institute of Macromolecular Chemistry, NAS of Ukraine

48, Kharkivske Highway, Kyiv, 02160, Ukraine

FEATURES OF THE MORPHOLOGY AND SORPTION CAPACITY OF HYDROPHILIC FAST-ABSORBING PLATFORMS DEPENDING ON THEIR COMPOSITION AND CONDITIONS OF FORMATION

The aim of the work was to obtain Hydrophilic Fast-absorbing Platforms (HFP) based on gelatin as a basis for effective colorimetric sensor systems for out-of-laboratory monitoring of toxins (atrazine). Four HFP series (HFP1—HFP4) were synthesized under different conditions. Cooling the gelatin solution to 5 °C produced a physical network of HFP1. HFP2, a rigid covalent network, was obtained by thermally curing gelatin with glutaraldehyde (GA). Formation of HFP3 occurred due to UV irradiation of gelatin and bisacrylamide (BAA), resulting in the structure of semi-interpenetrating polymer networks. HFP4 was obtained from gelatin and sodium carboxymethylcellulose (Na-CMC) using a combined system of crosslinkers (BAA and GA) and curing methods (heating and UV irradiation), yielding interpenetrating polymer networks. A crushed molecularly imprinted polymer selective for atrazine (MIPatr) was synthesized and integrated into the structure of the HFP. The morphology and water sorption capacity of individual and filled HFPs were studied. The morphology of the samples was examined using light microscopy. The degree of swelling (β) was determined by the gravimetric method. It was established that varying the formation conditions allows regulation of the matrix's pore architecture and hydrophilicity, which ensures a high mass transfer rate. All samples showed a general tendency to decrease water sorption in the order HFP1 > HFP3 > HFP4. The decrease in sorption indicates the compaction of the hydrophilic matrix. However, introducing the MIPatr filler into HFP2 changes the morphology and increases the sorption capacity of the system, forming a looser, porous structure. The HFP3 sample is the most promising, with the most balanced structure. Thanks to Na-CMC, the pores of GSHP4 are significantly larger than those of HFP1, HFP2, or HFP3, ensuring rapid delivery of atrazine to the MIPatr particles through these large pores. The MIPatr particles themselves will act as selective filters.

Keywords: *hydrophilic fast-sorption platform, molecularly imprinted polymers, atrazine, colorimetric sensor system.*