

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2017.07.069>

УДК 541.182.644 - 127.665.785

**Ю.М. Самченко, Л.О. Керносенко,  
С.О. Крикля, Н.О. Пасмурцева, Т.П. Полторацька**

Інститут біологічної хімії ім. Ф. Д. Овчаренка НАН України, Київ

E-mail: kernosenko@ukr.net

## **Гібридні пористі полімери на основі похідних полівінілового спирту та акрилових гідрогелів**

*Представлено академіком НАН України М.Т. Картелем*

*Розроблено методи синтезу і досліджено фізико-хімічні властивості (міцність та еластичність, ступінь та швидкість набухання, сорбційна здатність) гібридних матеріалів на основі губчатих ацеталів полівінілового спирту з поровим простором, частково просоченим функціональними рН- та термочутливими гідрогелями (відповідно на основі акрилової кислоти та N-ізопропілакриламід). Показано синергетичне покращення властивостей гібридних гідрогелів порівняно з компонентами, з яких вони збудовані, і перспективність вказаних матеріалів для розділення, видалення та концентрування барвників із забруднених стічних вод.*

**Ключові слова:** *гібридні полімери, гідрогелі функціональні, полівініловий спирт, акрилова кислота, N-ізопропілакриламід, сорбція, барвники, очищення стічних вод.*

Гідрогелі — просторово-зшиті гідрофільні полімери — успішно використовуються як матеріали для тканинної інженерії та пластичної хірургії [1], засоби для спрямованого транспорту лікарських препаратів [2], оптичні та аналітичні сенсори і датчики [3], матриці для біологічних досліджень [4] тощо. Аномально висока порівняно з твердими полімерами біосумісність гідрогелів з підвищеним рівноважним водовмістом насамперед зумовлена схожістю їх 3D структури з екстрацелюлярним матриксом [5]. Область їх застосування, однак, часто сильно обмежується недостатніми механічними властивостями гідрогелів [6], а саме низькою міцністю та еластичністю, а також крихкістю та ламкістю, зумовленими невисокою енергією руйнування традиційних гідрогелів, що становить близько 10 Дж/м<sup>2</sup> [7]. Подолати вказані обмеження можна шляхом створення так званих гібридних гідрогелів, які сконструйовані на основі взаємопроникних сіток двох полімерних матеріалів з різною природою (насамперед гідрофільністю, а відповідно, і міцністю), або шляхом введення до складу гідрогелю неорганічних наповнювачів [8]. Отримані гібридні гідрогелі позбавлені недоліків окремих вихідних компонентів і акумулюють їх переваги. “Розумні” гібридні гідрогелі виявляють підвищену чутливість до таких зовнішніх чинників, як незначна зміна температури чи рН, магнітного та електричного полів [9], УФ-опромінювання. Так, інкорпорування до складу гідрогелів магнетиту або діоксиду титану дає можливість отримувати магніточутливі [10] і фоточутливі [11] гібридні гідрогелі відповідно.

© Ю.М. Самченко, Л.О. Керносенко, С.О. Крикля, Н.О. Пасмурцева, Т.П. Полторацька, 2017

ISSN 1025-6415. Допов. Нац. акад. наук Укр. 2017. № 7

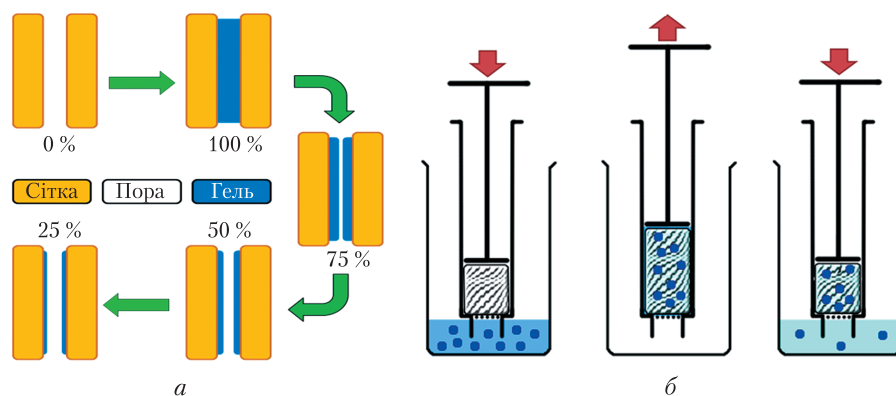
Важливою проблемою сьогодення є видалення техногенних забруднювачів із стічних вод, що супроводжують видобуток корисних копалин, фарбування тканин, дублення шкіри та безліч інших технологічних процесів. Відомо, що велика частина забруднювальних речовин у стічних водах є токсичними і канцерогенними, а отже, їх присутність у навколишньому середовищі має ретельно контролюватися. Поряд із хімічним осадженням, іонним обміном, мембранними технологіями, флокуляцією, флотацією тощо для видалення як неорганічних, так і органічних забруднювачів широко застосовуються адсорбційні методи, що відрізняються своєю дешевизною та ефективністю [12]. Завдяки своїй пористій гідрофільній структурі, що з легкістю просочується в усьому своєму об'ємі водними розчинами, як адсорбенти для очищення води могли б використовуватись і гідрогелі. Також завдяки високій пористості та можливості функціоналізації пор селективними сорбентами, наприклад з активними карбоксильними групами, вони виявляються перспективним матеріалом для створення сенсорів, датчиків для аналітичних потреб, накопичувачів проб для газової хроматографії тощо. Проте на заваді практичному застосуванню гідрогелів стають погані механічні властивості [7], що унеможливує їх регенерацію та тривале багаторазове використання.

За мету дослідження ставилося створення губчатих гібридних полімерів на основі похідних полівінілового спирту та функціональних гідрогелів (акрилова кислота, *N*-ізопропілакриламід) і вивчення їх фізико-хімічних властивостей у порівнянні з відповідними параметрами компонентів.

Акрилову кислоту (АК) ("Merck") переганяли під вакуумом з додаванням 1 мл концентрованої сульфатної кислоти і піддавали дробній кристалізації. *N*-ізопропілакриламід (НІПА) ("Aldrich", 97 %) перекристалізовували з гексану і висушували під вакуумом. Акриламід (АА) ("Merck", 99,9 %), *N,N*-метиленабісакриламід (МБА) ("Merck", 98 %), персульфат амонію (ПСА) ("Sigma", 98 %), персульфат калію (ПСК) ("Sigma", 98 %), метабісульфіт натрію (МБСН) ("Sigma", 98 %), *N,N,N,N*'-тетраметилетилендіамін (ТМЕД) ("Merck", 99 %), полівініловий спирт (ПВС) ("AppliChemGmbH", 98 %, молекулярна маса 72000), формальдегід 37 % (LAB-SCAN), концентровану сірчану кислоту та тритон X-100 ("AppliChemGmbH"), лапоніт RD ("Rockwood Ltd"), а також барвники — метиленовий синій та флуоресцеїн — використовували без додаткового очищення.

Окремі компоненти гібридних гідрогелів (ацеталі полівінілового спирту (АПВС) та різноманітні функціональні гідрогелі) отримували таким чином. Гомогенний розчин ПВС відповідної концентрації отримували з використанням роторної мішалки при нагріванні до 82 °С; охолоджували до 49 °С; додавали 10 % розчин тритону X-100; при 45–49 °С додавали по краплях 50 % розчин сірчаної кислоти; охолоджували до 37–40 °С і по краплях додавали розчин формальдегіду; перемішували ще 1 хв і заливали у форми з різною геометрією, які поміщали в термостат і витримували 1 год при 60 °С, а потім ще 12 год при 40 °С. У результаті було отримано губчаті АПВС, що характеризуються розгалуженою системою відкритих транспортних пор, а також підвищеними механічними властивостями [13]. Губчаті АПВС отримано в діапазоні концентрацій ПВС від 6,5 до 13 % (мас.), вміст формаліну при цьому варіював від 7,5 до 15,2 % (мас.).

Синтез гідрогелів здійснювали методом радикальної полімеризації у водному середовищі при кімнатній температурі в атмосфері аргону. Поліакриламідний гель отримували таким чином: АА (0,6 г) розчиняли у 2,95 мл дистильованої води, додавали 0,15 мл 3 % розчину МБА, 0,15 мл 1 % розчину ПСК і 0,15 мл 2,5 % розчину МБСН. Отриману композицію



**Рис. 1.** Схематичні зображення процесу отримання гібридних матеріалів на основі АПВС та акрилових мономерів з частковим вивільненням порового простору (а) і процесу сорбції барвника з його розчину шляхом прокачування через шприц з гібридним матеріалом на основі губки АПВС та акрилового гідрогелю (б)

заливали між плоскопаралельними скельцями, розділеними спейсерами. Гідрогелі на основі АК та НПА отримували аналогічним чином, але як ініціувальну окисно-відновну систему використовували пару ПСА–ТМЕД. Детальніше синтез функціональних гідрогелів різного хімічного складу описувався нами раніше в [14].

Гібридні матеріали на основі АПВС та функціональних гідрогелів отримували шляхом набухання сітки (губки) АПВС у відповідній гелеутворювальній композиції протягом 5 хв. Після цього набухлу губку поміщали в атмосферу аргону при 20 °С і витримували протягом однієї доби при 40 °С. Паралельно отримували композити з частковим заповненням пор — шляхом віджимання певної частини композиції з набухлої губки, тобто набухлу губку піддавали рівномірному механічному стисканню, що призводило до видалення необхідної кількості композиції (рис. 1, а). У випадку циліндричних губок вказаний процес здійснювали у шприцах відповідного діаметра, шляхом поступового видавлювання необхідної кількості композиції поршнем. При цьому після зняття навантаження губка, маючи достатню еластичність, поверталася у вихідне положення вже з частково вивільненими від композиції порами. Після цього залишок композиції в поровому просторі губок АПВС піддавали гелеутворенню шляхом термостатування при 40 °С протягом однієї доби.

**Набухання.** Кінетику набухання композитів та їх компонентів у розчинниках різної природи вивчали гравіметричним методом. Для цього зразки заливали надлишком розчинника і зважували їх через певні проміжки часу. Розрахунок рівноважного ступеня набухання  $Q$  (г/г) зразків проводили за формулою

$$Q = \frac{m - m_0}{m_0},$$

де  $m_0$  — маса сухого зразка (г);  $m$  — маса зразка, набухлого до рівноважного стану (г).

Константи швидкості набухання для синтезованих губок АПВС, гелів та композитів на їх основі визначали з кінетичних кривих набухання як тангенс кута нахилу дотичної до кривої набухання в координатах  $\ln(Q_\infty / (Q_\infty - Q_t))$  від  $\tau$  (хв), де  $Q_\infty$  — рівноважний ступінь набухання,  $Q_t$  — ступінь набухання в момент часу  $\tau$  — на початковій стадії процесу набухання.

**Міцність на розрив.** Дослідження проводили на розривній машині для випробування пластичних мас 2167 Р-50. Зразки, що набухли до рівноважного стану, закріплювали в затискачі розривної машини і розтягували зі швидкістю 20 мм/хв до повного руйнування зразка. Початкова довжина зразка між затискачами ( $l_0$ ) становила 25 мм, ширина — 10 мм. Товщину зразків визначали за допомогою мікрометра. Міцність на розрив розраховували як відношення прикладеної сили  $F$  до площі перерізу зразка  $S$  (в кПа):

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

Відносне видовження розраховували за формулою

$$\varepsilon = \frac{l-l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l},$$

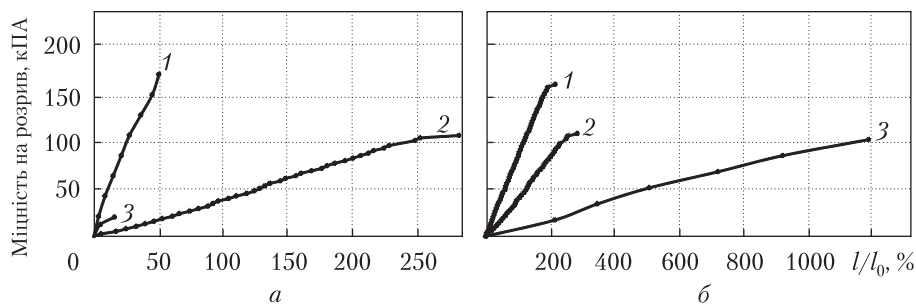
де  $l$  — довжина зразка в певний момент деформації;  $l_0$  — початкова довжина зразка.

**Сорбцію** гідрогелями розчинів органічних барвників, що належать до різних класів, а саме основного метиленового синього і кислотного флуоресцеїну, оцінювали за зміною їх концентрації в розчині.

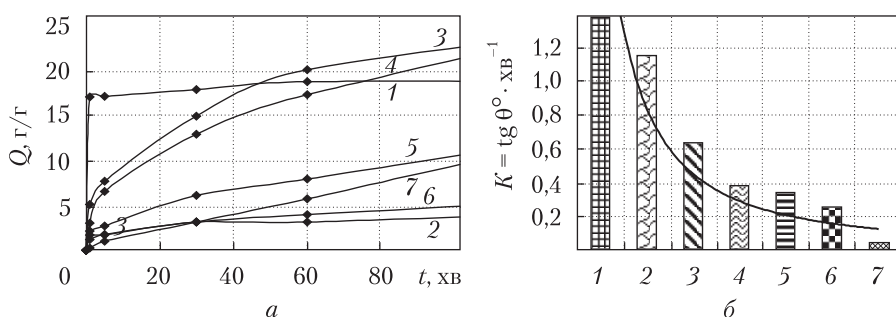
Сорбційні властивості досліджували таким чином. Наважку губчатого АПВС або гібридного матеріалу на основі АПВС і функціонального гідрогелю поміщали в шприц об'ємом 10 мл. Після чого шприцем набирали 5 мл розчинів органічних барвників або їх суміш. Через певний інтервал часу сорбент віджимали, а отриманий розчин поміщали у вимірювальну кювету УФ спектрофотометра Sperecord M 40. Максимум поглинання становив 480 нм для ФЛЦ і 670 нм для МС.

Результати дослідження механічних властивостей свідчать про значне зростання міцності на розрив гібридних матеріалів на основі АПВС порівняно з їх складовими. Так, у випадку інкорпорування в поровий простір гідрогелю на основі АК міцність композита вдвічі перевищує міцність відповідної губки і майже на порядок більша, ніж у гідрогелю (рис. 2, а). Останніми роками було показано, що механічні властивості синтетичних полімерів (насамперед на основі термочутливого НІПА) значно покращуються у разі використання для його зшивання замість традиційного ковалентного зшивального агента (наприклад, МБА) наночастинок лапоніту [15]. Наприклад, як впливає з порівняльного аналізу рис. 2, а і 2, б, розривна міцність гідрогелю на основі НІПА перевищує міцність гідрогелю на основі АК у 4 рази, а еластичність вища майже на 2 порядки. Однак навіть стосовно вказаного фізично зшитого гідрогелю на основі НІПА досягається синергетичне зростання міцності гібридного матеріалу (приблизно в 1,5 та 2 рази порівняно зі складовими компонентами). Вказаний параметр є вкрай важливим для багатьох галузей застосування розроблених гібридних матеріалів, як медико-біологічних, так і технологічних, зокрема стосовно створення та збільшення періоду експлуатації ефективних сорбентів.

Проаналізуємо процес набухання губок АПВС, гідрогелів та гібридних гелів на їх основі (з різним ступенем віджиму, а також невіджатих з повністю заповненим гідрогелем поровим простором) у модельних розчинниках (дистильованій воді та буферних розчинах з рН 1,68 і 9,18). Загалом рівноважний ступінь набухання губок АПВС майже на порядок вищий, ніж у випадку гідрогелів. Така значна різниця у водопоглинанні пояснюється принциповою відмінністю структури порового простору відповідних матеріалів. Губки АПВС займають довгі розгалужені



**Рис. 2.** Залежність розривної міцності від відносного видовження для гібридного гідрогелю на основі АПВС та акрилової кислоти (а), гібридного гідрогелю на основі АПВС та фізично-зшитого НПА (б): 1 – гібридний гідрогель; 2 – АПВС; 3 – гідрогель

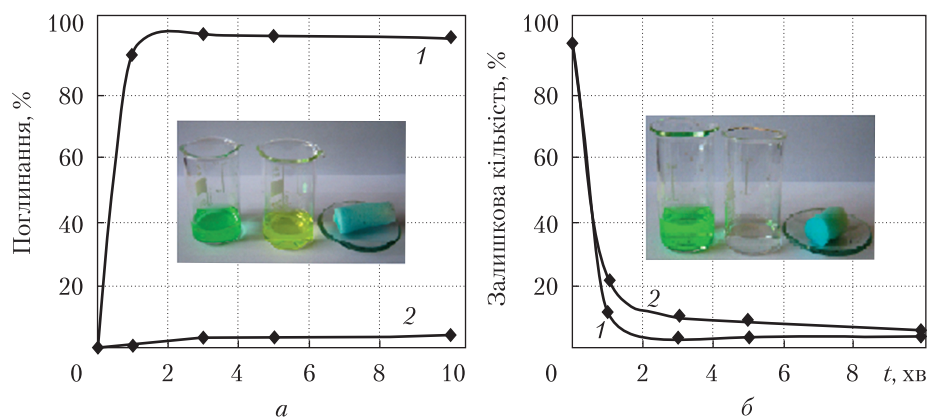


**Рис. 3.** Кінетика набухання губок АПВС (1), гібридних гідрогелів на основі АПВС та АК з різним ступенем віджимання: 83 % (2); 66 % (3); 50 % (4); 33 % (5) і без віджимання (6), а також чистих гідрогелів (7) у буферному розчині з рН 9,18 (а) і величини їх констант швидкості набухання в дистильованій воді (б)

відкриті транспортні пори, тоді як у випадку гідрогелів вони тупикові і близькі за формою до ізольованих сфер. Губки АПВС з повністю заповненим гідрогелем поровим простором (невіджаті губки) характеризуються практично таким самим низьким рівноважним водовмістом, як і самі гідрогелі. Зі збільшенням ступеня віджиму і вивільнення транспортних пор від інкорпорованого гідрогелю набухання гібридного матеріалу значно зростає, наближаючись за гідрофільністю до чистої губки АПВС, а у деяких випадках (рис. 3, а) навіть перевищуючи її.

Принципово відрізняються не тільки рівноважні значення ступеня набухання губок АПВС, гідрогелів і гібридних матеріалів на їх основі, але й кінетика процесу набухання. У випадку гідрогелів час досягнення рівноважного ступеня набухання становить понад добу, тоді як ненаповнені губки поглинають більше 95 % рівноважного водовмісту лише за кілька хвилин. Гібридні матеріали за швидкістю поглинання оточуючого їх розчинника у міру звільнення порового простору від гідрогелю наближаються до ненаповнених губок.

Вказані відмінності у швидкості набухання зумовлені різною різницею у константах швидкості набухання гібридних матеріалів і їх складових, обчислених нами за тангенсом кута нахилу початкової стадії кривої набухання в логарифмічних координатах. Встановлено, що у випадку ненаповнених губок константа швидкості набухання приблизно на 2 порядки вища, ніж у випадку гідрогелів і на порядок вища порівняно з просоченими, але невіджатими губками. Водночас, у міру віджимання гелеутворюючої композиції з губок АПВС



**Рис. 4.** Ступінь поглинання МС (1) і ФЛЦ (2) з їх суміші (а) у разі використання як сорбенту губки АПВС і залишкова кількість (б) барвників після їх поглинання із суміші з використанням гібридного сорбенту (на вставці – зміна забарвлення розчину та сорбенту після одного прокачування протягом 1 хв)

константа швидкості набухання гібридних гідрогелів стрімко збільшується і при 85 %-му віджиманні становить уже близько 90 % відповідного параметра для ненаповненої губки.

Отже, завдяки функціоналізації гідрогелями транспортних пор у АПВС у поєднанні з максимально можливим збереженням їх проникності синтезовані гібридні гідрогелі здатні поєднувати (і навіть підсилювати) переваги компонентів, з яких вони сконструйовані. Вказане стосується і адитивного зростання міцності у порівнянні з компонентами, і надання гібридним матеріалам рН-чутливості (у разі наповнення губок гідрогелем на основі АК) чи термочутливості (у випадку інкорпорування гідрогелю НПА). У результаті ступінь набухання рН-чутливих гібридних матеріалів зростає на порядок із переходом від кислого до лужного середовища, а термочутливі гібридні матеріали характеризуються фазовим переходом з набухлого до сколапсованого стану при нагріванні вище 32 °С.

Процес сорбції індивідуальних барвників метиленового синього і флуоресцеїну та їх суміші досліджено з використанням як сорбенту ненаповненої губки на основі АПВС та гібридних гідрогелів, у яких поровий простір АПВС частково заповнений гідрогелем на основі АК. Показано, що у випадку АПВС ступінь сорбції барвників з індивідуальних розчинів (з концентрацією  $10^{-3}$  % (мас.)) різко відрізняється. Для МС уже за два прокачування (протягом 3 хв) розчину барвника через шприц з наважкою сорбенту ступінь поглинання становив 98 %, тоді як для ФЛЦ – лише 3 %. Схожу поведінку вказаного сорбенту відмічено і стосовно поглинання барвників із їх еквімолярної суміші – ступінь сорбції за вказаний проміжок часу становив 97 і 3,5 % відповідно (рис. 4, а). Таким чином, сорбент на основі АПВС може використовуватися для експрес-методу розділення вказаних барвників і концентрування ФЛЦ у розчині та МС у твердій фазі гібридного гідрогелю відповідно. У випадку використання як сорбенту гібридного матеріалу на основі АПВС та АК (ступінь віджиму гелеутворюючої композиції 75 %) вже через 3 хв залишкова кількість барвників після їх сорбції з розчину становила 13 % для ФЛЦ і 3 % для МС (див. рис. 4, б), а через 10 хв (4 прокачування) ступінь сорбції їх обох перевищував 95 %, що створює передумови для застосування вказаного гібридного матеріалу як ефективного сорбенту для очищення забруднених стічних вод, оскільки реальна присутність барвників у промислових стоках значно нижча.

Таким чином, розроблено методи синтезу і досліджено фізико-хімічні властивості (міцність та еластичність, ступінь та швидкість набухання, а також сорбційна здатність) гібридних матеріалів на основі губчатого АПВС з поровим простором, частково просоченим функціональними рН- та термочутливими гідрогелями. Показано синергетичне покращення властивостей гібридних гідрогелів порівняно з компонентами, з яких вони сконструйовані, і перспективність вказаних матеріалів для розділення, вилучення та концентрування барвників із забруднених стічних вод.

#### ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Lee K., Mooney D. Hydrogels for tissue engineering. *Chem Rev.* 2001. **101**. P. 1869–1879
2. Qiu Y., Park K. Environment-sensitive hydrogels for drug delivery. *Adv. Drug Deliv. Rev.* 2001. **53**. P. 321–339.
3. Dong L., Agarwal A., Beebe D., Jiang H. Adaptive liquid microlenses activated by stimuli responsive hydrogels. *Nature.* 2006. **442**. P. 551–554.
4. Discher D., Mooney D., Zandstra P. Growth factors, matrices, and forces combine and control stem cells. *Science.* 2009. **324**. P. 1673–1677.
5. Balakrishnan B., Banerjee R. Biopolymer-based hydrogels for cartilage tissue engineering. *Chem. Rev.* 2011. **111**. P. 4453–4474.
6. Calvert P. Hydrogels for soft machines. *Adv. Mater.* 2009. **21**. P. 743–756.
7. Lake G., Thomas A. The strength of highly elastic materials. *Proc. R. Soc. A.* 1967. **300**. P. 108–119.
8. Jing G., Wang Li, Yu H., Amer W. A., Zhang L. Recent progress on study of hybrid hydrogels for water treatment. *Colloids and Surfaces A.* 2013. **416**. P. 86–89.
9. Liu Y.D., Choi H.J. Recent progress in smart polymer composite particles in electric and magnetic fields. *Polym. Int.* 2013. **62**. P. 147–151.
10. Rao P., Lo I., Yin K., Tang S.C. Removal of natural organic matter by cationic hydrogel with magnetic properties. *J. Environ. Manage.* 2011. **92**. P. 1690–1695.
11. Yun J., Jin D., Lee Y., Kim H. Photocatalytic treatment of acidic waste water by electrospun composite nanofibers of pH-sensitive hydrogel and TiO<sub>2</sub>. *Mater. Lett.* 2010. **64**. P. 2431–2434.
12. Malaviya P., Singh A. Physicochemical technologies for remediation of chromium-containing waters and wastewaters. *Crit. Rev. Env. Sci. Tech.* 2011. **41**. P. 1111–1172.
13. Крикля С.О., Самченко Ю.М., Коновалова В.В., Полторацька Т.П., Пасмурцева Н.О., Ульберг З.Р. Гібридні рН- та термочутливі гідрогелі на основі полівінілового спирту та акрилових мономерів. *Мазиметриум. Хім. науки.* 2016. Вип. 63. С. 20–28.
14. Samchenko Yu., Ulberg Z., Korotych O. Multipurpose smart hydrogel systems. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2011. **168**, № 1–2. P. 247–262.
15. Haraguchi K., Takehisa T., Fan S. Effects of Clay Content on the Properties of Nanocomposite Hydrogels Composed of Poly(*N*-isopropylacrylamide) and Clay. *Macromolecules.* 2002. **35**. P. 10162–10171.

Надійшло до редакції 26.12.2016

#### REFERENCES

1. Lee, K. & Mooney, D. (2001). Hydrogels for tissue engineering. *Chem. Rev.*, 101, pp. 1869-1879
2. Qiu, Y. & Park, K. (2001). Environment-sensitive hydrogels for drug delivery. *Adv. Drug Deliv. Rev.*, 53, pp. 321-339.
3. Dong, L., Agarwal, A., Beebe, D. & Jiang, H. (2006). Adaptive liquid microlenses activated by stimuli responsive hydrogels. *Nature*, 442, pp. 551-554.
4. Discher D., Mooney D. & Zandstra P. (2009). Growth factors, matrices, and forces combine and control stem cells. *Science*, 324, pp. 1673-1677.
5. Balakrishnan, B. & Banerjee, R. (2011). Biopolymer-based hydrogels for cartilage tissue engineering. *Chem. Rev.*, 111, pp. 4453-4457.
6. Calvert, P. (2009). Hydrogels for soft machines. *Adv. Mater.*, 21, pp. 743-756.
7. Lake, G. & Thomas, A. (1967). The strength of highly elastic materials. *Proc. R. Soc. A.*, 300, pp. 108-119.

8. Jing, G., Wang, Li, Yu, H., Amer, W. A. & Zhang, L. (2013). Recent progress on study of hybrid hydrogels for water treatment. *Colloid. Surfaces A*, 416, pp. 86-89.
9. Liu, Y. & Choi, H. (2013). Recent progress in smart polymer composite particles in electric and magnetic fields. *Polym. Int.*, 62, pp. 147-151.
10. Rao, P., Lo, I. M., Yin, K. & Tang, S. C. (2011). Removal of natural organic matter by cationic hydrogel with magnetic properties. *J. Environ. Manage*, 92, pp. 1690-1695.
11. Yun, J., Jin, D., Lee, Y. & Kim, H. (2010). Photocatalytic treatment of acidic waste water by electrospun composite nanofibers of pH-sensitive hydrogel and TiO<sub>2</sub>. *Mater. Lett.*, 64, pp. 2431-2434.
12. Malaviya, P. & Singh, A. (2011). Physicochemical technologies for remediation of chromium-containing waters and wastewaters. *Crit. Rev. Env. Sci. Tech.*, 41, pp. 1111-1172.
13. Kryklya, S., Samchenko, Yu., Konovalova, V., Poltoratsky, T., Pasmurtseva, N. & Ulberg, Z. (2016). Hybrid pH and thermosensitive hydrogels based on polyvinyl alcohol and acrylic monomers. *Magisterium. Chem. Sci.*, 63, pp. 20-28.
14. Samchenko, Yu., Ulberg, Z. & Korotych, O. (2011). Multipurpose smart hydrogel systems. *Adv. Colloid Interface Sci.*, 168, No. 1-2, pp. 247-262
15. Haraguchi, K., Takehisa, T. & Fan, S. (2002). Effects of Clay Content on the Properties of Nanocomposite Hydrogels Composed of Poly(N-isopropylacrylamide) and Clay. *Macromolecules*, 35, pp. 10162-10171.

Received 26.12.2016

Ю.М. Самченко, Л.А. Керносенко, С.А. Крикля, Н.А. Пасмурцева, Т.П. Полторацька

Институт биocolлоидной химии им. Ф.Д. Овчаренко НАН Украины, Киев

E-mail: kernosenko@ukr.net

#### ГИБРИДНЫЕ ПОРИСТЫЕ ПОЛИМЕРЫ НА ОСНОВЕ ПРОИЗВОДНЫХ ПОЛИВИНИЛОВОГО СПИРТА И АКРИЛОВЫХ ГИДРОГЕЛЕЙ

Разработаны методы синтеза и исследованы физико-химические свойства (прочность и эластичность, степень и скорость набухания, сорбционная способность) гибридных материалов на основе губчатых ацеталей поливинилового спирта с поровым пространством, частично пропитанным функциональными рН- и термочувствительными гидрогелями (на основе акриловой кислоты и *N*-изопропилакриламида). Продемонстрировано синергетическое улучшение свойств гибридных гидрогелей по сравнению с компонентами, из которых они сконструированы, и показана перспективность этих материалов для разделения, удаления и концентрирования красителей из загрязненных сточных вод.

**Ключевые слова:** гибридные полимеры, гидрогели функциональные, поливиниловый спирт, акриловая кислота, *N*-изопропилакриламид, сорбция, красители, очистка сточных вод.

Yu.M. Samchenko, L.O. Kernosenko, S.O. Kryklya, N.O. Pasmurtseva, T.P. Poltoratska

F.D. Ovcharenko Institute of Biocolloidal Chemistry of the NAS of Ukraine, Kiev

E-mail: kernosenko@ukr.net

#### HYBRID POROUS POLYMERS BASED ON DERIVATIVES OF POLYVINYL ALCOHOL AND ACRYLIC HYDROGELS

Methods of synthesis of hybrid materials based on the sponge-like acetals of polyvinyl alcohol with the pore space which are partially impregnated by functional pH- and temperature-sensitive hydrogels (based on acrylic acid and *N*-isopropylacrylamide) have been developed, and their physicochemical properties (tensile strength and elasticity, sorption capacity, degree and rate of swelling) have been investigated. The synergistic improvement of properties of hybrid hydrogels in comparison with the components, from which they are constructed, is demonstrated, and the possibility of using these materials for the separation, removal, and concentration of dyes from polluted wastewaters is shown.

**Keywords:** hybrid polymers, functional hydrogels, polyvinyl alcohol, acrylic acid, *N*-isopropylacrylamide, sorption, dyes, wastewater treatment.