

АЛЬГІНАТНІ МІКРОКАПСУЛИ, МОДИФІКОВАНІ ПОЛІЕЛЕКТРОЛІТНИМИ КОМПЛЕКСАМИ НА ОСНОВІ ЗАРЯДЖЕНИХ ПОЛІСАХАРИДІВ

Мікрокапсули з натрій альгінату одержано методом екструзії та вкриті методом "layer-by-layer" поліелектролітними комплексами з протилежно заряджених полісахаридів. Досліджено вплив молекулярної маси та природи функціональних груп полімерів на ефективність капсулювання модельного білкового лікарського засобу та кінетику його вивільнення при рН середовищ шлунка та кишківника.

Ключові слова: натрій альгінат, поліелектролітні комплекси, метод екструзії, метод "layer-by-layer".

Вступ

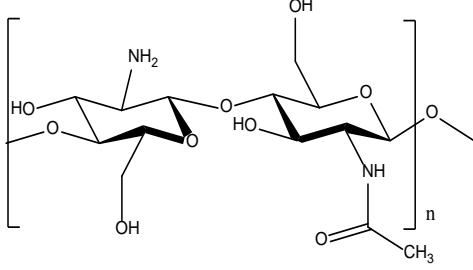
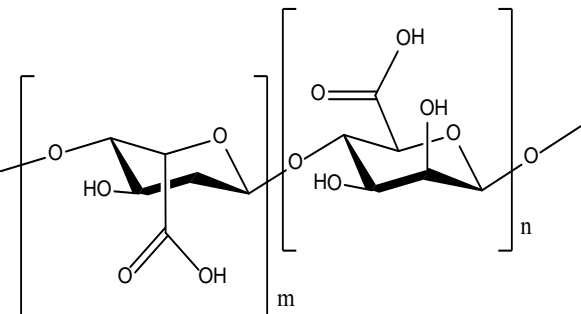
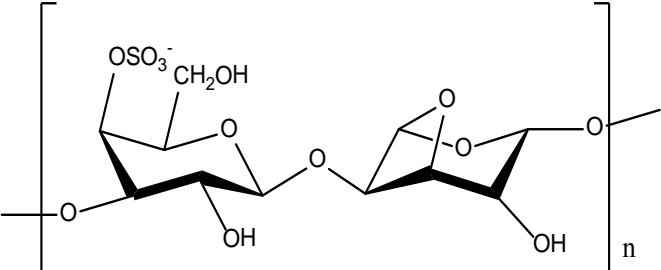
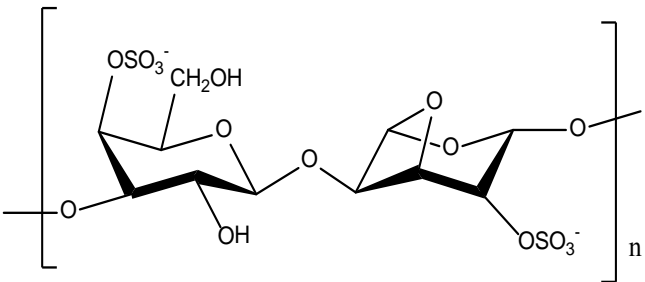
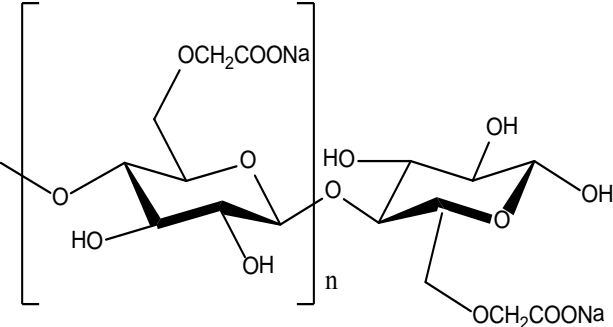
Метод "layer-by-layer" дозволяє отримувати ультратонкі плівки почерговою адсорбцією протилежно заряджених полііонів, наночастинок чи біомолекул [1–5]. Цей метод дає змогу легко варіювати як товщину і морфологію плівки, так і її властивості (проникність, розчинність тощо). Останнім часом велику увагу привертає одержання поліелектролітних мікрокапсул методом "layer-by-layer" на нано- та мікроядрах, наприклад, клітинах, органічних та неорганічних частинках [6–12]. Ядра, діаметром від нанометрів до мікронів, вкривають почергово шарами лінійних полікатионів, поліаніонів та інших матеріалів. Такі мікрокапсули мають регульовану проникність щодо молекул різних розмірів, яка ґрунтується на механізмі «відкривання-закривання» під дією факторів оточуючого середовища [13–16]. Вони мають широку перспективу для капсулювання, цільової та контрольованої доставки лікарських та мінеральних речовин, протеїнів тощо. Зміна значення рН розчину викликає формування нанометрових пор, що дозволяє макромолекулам дифундувати крізь стінки капсул [17; 18]. Ця проникність залежить від умов формування і стабільності поліелектролітних комплексів, які, у свою чергу, обумовлені багатьма факторами, такими як ступінь іонізації кожного з протилежно заряджених поліелектролітів, густиною та розподілом зарядів на полімерному ланцюзі, концентрацією поліелектролітів, їх співвідношенням, порядком та тривалістю нанесення, природою та позицією йонних груп на полімерному ланцюзі, молекулярною масою поліелектролітів та гнучкістю полімеру, температурою, йонною силою та рН реакційного середовища [19–22].

Хітозан належить до серії полімерів, які є деацильованими похідними природного полісахариду хітину з різним ступенем деацильовання (70–95 %) і молекулярною масою від 10 до 1000 кДа [23; 24]. Хітозан високого ступеня очищення використовується у фармацевтиці як засіб, що контролює вивільнення ліків з пероральних препаратів [25]. Хоча він є дуже перспективним біополімером для використання як матеріал-носіє у системах доставки лікарських засобів, хітозан має обмежені можливості для контрольованого вивільнення речовин у зв'язку з його швидким руйнуванням у шлунку [26]. Для подолання цього недоліку застосовують хімічну модифікацію, таку як кополімеризація і одержання похідних хітозану. Однак цей підхід призводить до утворення нових хімічних речовин з невідомим токсикологічним профілем. Отже, фізична модифікація полімеру, а саме – утворення поліелектролітних комплексів за рахунок електростатичних, гідрофобних та донорних взаємодій є більш прийнятною і може забезпечити необхідні властивості для оптимальної доставки ліків. Метою дослідження було одержати альгінатні мікрокапсули, модифіковані різноманітними поліелектролітними комплексами на основі природних полісахаридів та встановити вплив природи полімерів, їхньої молекулярної маси та функціональних груп на капсулювання та кінетику вивільнення модельного білкового лікарського засобу.

Матеріали і методи досліджень

У роботі були використані натрій альгінат з молекулярними масами 250 та 450 кДа (Fluka, Японія), хітозан з молекулярними масами 120, 400 та 750 кДа (Fluka, Японія), к- та j-караганан

Таблиця 1. Хімічна структура і властивості поліелектролітів

Назва	Структура	pKa	ММ, кДа	Поси- лання
Хітозан		6,3	120, 400, 750	[27]
Натрій альгінат		3,3	250, 450	[28]
k-Карагінан		2,9	415	[29]
i-Карагінан		2,0	430	[29]
Карбокси-метилцелюлоза (КМЦ)		4,0	450	[30]

(Fluka, Японія), натрій карбоксиметилцелюлоза (Sigma Aldrich, США), бичачої сироватки альбумін (Sigma Aldrich, США), CaCl₂ (Міранда, Україна).

Одержання мікрокапсул. Мікрокапсули формували за допомогою екструзії формувальної суміші через шприц з голкою діаметром 0,1 мм. Розчин альгінату концентрацією 2 % з БСА по краплях переносили у 0,3 М розчин кальцій хлориду, витримували протягом години і відфільтровували. Промиті водою капсули висушували на повітрі за кімнатної температури. Модифікування альгінатних мікрокапсул здійснювали за допомогою розчинів хітозану та КМЦ певної концентрації. Для нанесення поліелектролітних шарів (хітозану та КМЦ) було використано метод “layer-by-layer”.

Для цього 0,1 г альгінатних мікрокапсул занурювали на визначений час у 20 мл розчину полікатиону, а після промивання дистильованою водою – у 20 мл розчину поліаніону. Потім відмивали і висушували на повітрі за кімнатної температури.

Кінетика вивільнення БСА. Для дослідження кінетики вивільнення білка 0,1 г сухих мікрокапсул занурювали у розчини з рН 1,8 і 6,8 та через певні відрізки часу відбирали проби. Концентрацію БСА вимірювали за допомогою УФ-спектроскопії при довжині хвилі 215 нм.

Ефективність капсулювання розраховували за формулою:

$$E = \frac{C_{\text{практ.}}}{C_{\text{теор.}}} \cdot 100.$$

Результати та обговорення

Морфологію та розподіл за розміром альгінатних мікрокапсул, одержані методом йонотропного гелеутворення у розчині хлориду кальцію, досліджували за допомогою світлової спектроскопії. Отримано мікрокапсули переважно сферичної форми з діаметром від 340 до 725 мкм. Розподіл за розмірами мікрочастинок є Гаусівським розподілом із середнім діаметром 521 мкм ± 96 мкм (рис. 1).

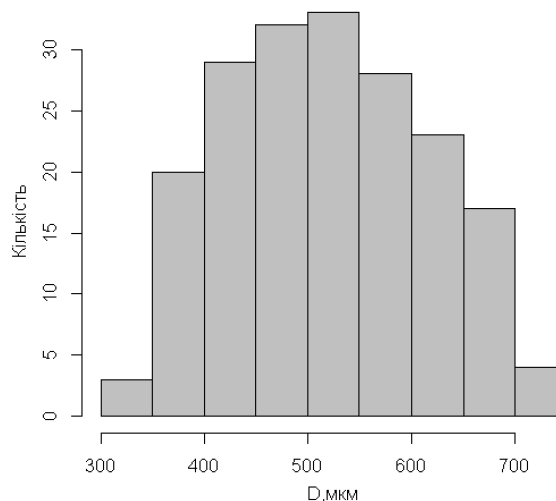


Рис. 1. Розподіл за розміром альгінатних мікрокапсул

Для нанесення поліелектролітних шарів на альгінатні мікрокапсули використовували різні пари катіонних та аніонних поліелектролітів з різним рКа (табл. 1).

Ефективність капсулювання. Для дослідження кінетики вивільнення білків важливо знати вміст біомолекул у мікрокапсулах. Як модельний лікарський засіб використовували бичачий сироватковий альбумін (БСА) з молекулярною масою 65 кДа. Як видно з табл. 2, ефективність капсулювання білка залежить від молекулярної маси полімерів. Так, зі збільшенням молекулярної маси хітозану збільшується вміст БСА у капсулах к-КарХіт. Однак різниця ЕК при використанні середньов'язкісного та високов'язкісного хітозану не значуща, тому було вирішено для подальших досліджень використовувати хітозан з молекулярною масою 400 кДа. Молекулярна маса негативного поліелектроліту також суттєво впливає на ЕК. Використання натрій альгінату з молекулярною масою 250 кДа призводить до зниження ЕК на 10 % порівняно з натрій альгінатом з молекулярною масою 450 кДа. Отже, можна зробити висновок, що використовувати низькомолекулярні поліелектроліти для нанесення шарів є недоцільним.

Таблиця 2. Ефективність капсулювання БСА у мікрокапсули з нанесеними різними поліелектролітними комплексами

Полікатионіт	Поліаніоніт	Умовне позначення	Ефективність капсулювання, %
к-Карагінан	Хітозан, 120 кДа	к-КарХіт(н)	77±2,8
к-Карагінан	Хітозан, 400 кДа	к-КарХіт(с)	83±3,2
к-Карагінан	Хітозан, 750 кДа	к-КарХіт(в)	85±2,9
і-Карагінан	Хітозан, 400 кДа	і-КарХіт(с)	71±1,3
Натрій альгінат, 450 кДа	Хітозан, 400 кДа	Альг(в)Хіт(с)	92±2,5
Натрій альгінат, 250 кДа	Хітозан, 400 кДа	Альг(н)Хіт(с)	83±3,0
Карбоксиметил-целюлоза, 450 кДа	Хітозан, 400 кДа	КмцХіт(с)	95±2,2

Значення ЕК у ряду високомолекулярних поліаніонів зменшується у такому порядку: альгінат > КМЦ > κ-карагінан > ι-карагінан, що добре корелює зі значеннями рКа цих полімерів ($R^2 = 0,9723$). Це можна пояснити тим, аніонні поліелектроліти з вищим значенням рКа (слабкі кислоти) щільніше згорнуті у спіраль, ніж поліаніони з високим значенням рКа (сильні поліелектроліти), які більш жорсткі й витягнуті. Було висунуто припущення, що жорстка структура може створювати топологічні обмеження для утворення електростатичних йонних пар між протилежно зарядженими функціональними групами, що спричинює зменшення електростатичних зв'язків і, відповідно, збільшення розміру пор [31].

Вплив молекулярної маси хітозану на кінетику вивільнення БСА з капсул κ-КарХім. Кінетику вивільнення БСА з капсул, вкритих поліелектролітними шарами, досліджували у модельному середовищі шлунку з рН 1,8 та кишківника з рН 6,8. У кислому середовищі молекулярна маса хітозану не впливає на кінетику вивільнення білка (рис. 2). Відносне вивільнення модельного лікарського засобу не перевищує 20 %, що відповідає вимогам до систем контрольованого вивільнення лікарських засобів.

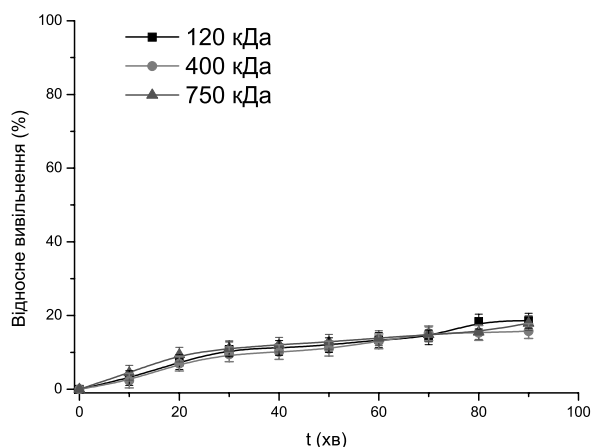


Рис. 2. Кінетика вивільнення БСА з капсул, вкритих поліелектролітними шарами {хітозан різної молекулярної маси – κ-карагінан}2 при рН 1,8

Однак у нейтральному середовищі при рН 6,8 спостерігається суттєва відмінність у профілях кінетики вивільнення (рис. 3). Так, використання низькомолекулярного хітозану призводить до стрімкого вивільнення білка протягом однієї години, що може бути спричинене утворенням нещільного шару поліелектролітного комплексу на поверхні альгінатної матриці. Збільшення молекулярної маси хітозану сповільнює вивільнення БСА до 160 та

210 хв для хітозану з ММ 400 та 750 кДа, відповідно, а також змінює ступінь його вивільнення. Отже, змінюючи молекулярну масу полікатиону можна регулювати кількість вивільненого лікарського засобу і таким чином контролювати його рівень у крові пацієнтів.

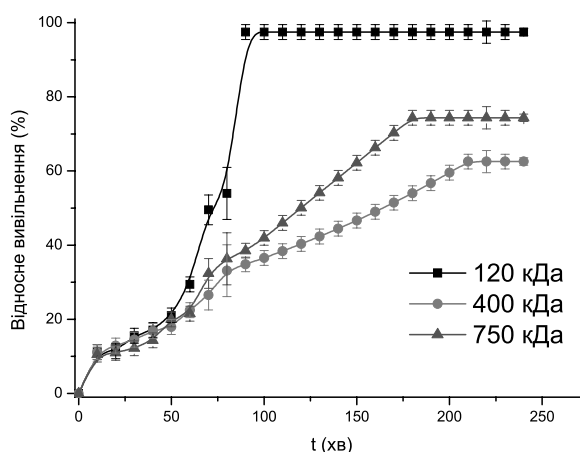


Рис. 3. Кінетика вивільнення БСА з капсул, вкритих поліелектролітними шарами {хітозан різної молекулярної маси – κ-карагінан}2 при 6,8

Залежності відносного вивільнення білка від часу для хітозану 400 та 750 кДа наближаються до лінійних ($R^2=0,9889$ та $R^2=0,9908$, відповідно). Таким чином, кінетика вивільнення відповідає нульовому порядку, що забезпечить рівномірне вивільнення ліків в організмі людини.

Вплив молекулярної маси натрій альгінату на кінетику вивільнення БСА з капсул АльгХім. Молекулярна маса натрій альгінату, як і хітозану, не впливає на ступінь вивільнення білка у кислому середовищі, який становить менше 20 % (рис. 4). Це можна пояснити електростатичними взаємодіями між позитивно зарядженим білком та поліелектролітами матриці капсули.

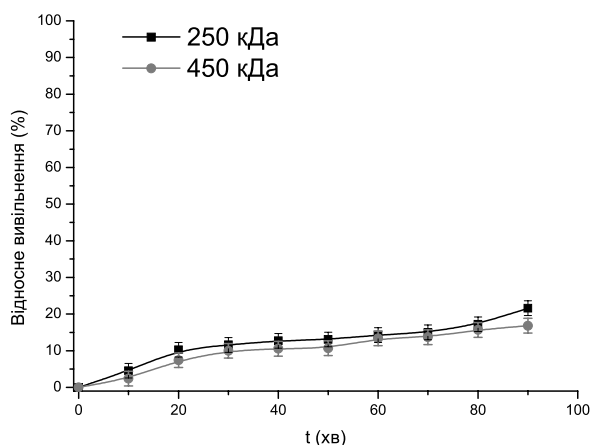


Рис. 4. Кінетика вивільнення БСА з капсул, вкритих поліелектролітними шарами {хітозан 400 кДа – альгінат із різними молекулярними масами}2 при рН 1,8

Кінетика вивільнення БСА з мікрокапсул к-КарХіт(н) має схожий профіль з кінетикою вивільнення з мікрокапсул Альг(н)Хіт(с), що узгоджується з твердженням, що низькомолекулярні поліелектроліти утворюють нещільний шар на поверхні капсул, і це дозволяє легко дифундувати молекулам білка (рис. 5). Для мікрокапсул з ПЕШ з натрій альгінату 450 кДа спостерігається більш рівномірне вивільнення БСА, яке описується рівнянням кінетики вивільнення 0 порядку ($R^2=0,9750$). 90 % модельного лікарського засобу рівномірно вивільнюється за 210 хв.

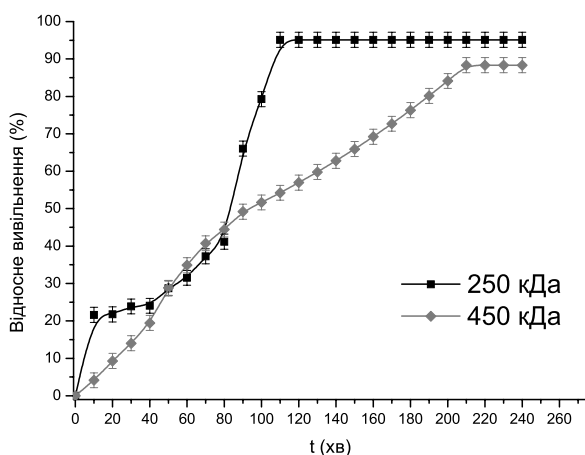


Рис. 5. Кінетика вивільнення БСА з капсул, вкритих поліелектролітними шарами {хітозан 400 кДа – альгінат з різними молекулярними масами} 2 при рН 6,8

Вплив природи поліаніоніту на кінетику вивільнення БСА з капсул. Для капсул, вкритих поліелектролітними комплексами з альгінату та карагінанів, не спостерігається значущою різниці між ступенями вивільнення у кислому середовищі (рис. 6). Проте для капсул, вкритих хітозаном та КМЦ, ступінь вивільнення зменшується у 3,5 раза, що може бути пов'язане з нижчим ступенем набрякання цих капсул при рН 1,8 порівняно з іншими зразками.

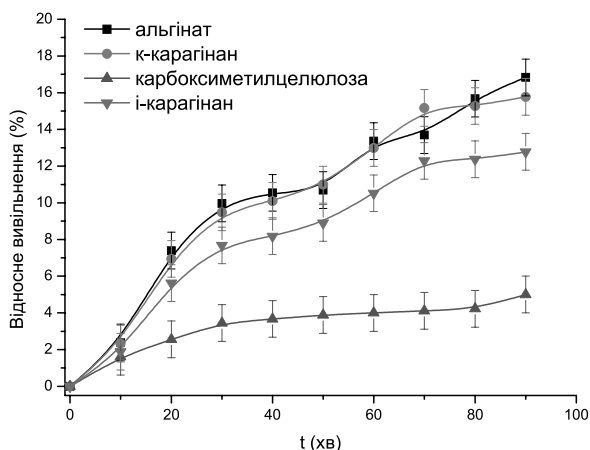


Рис. 6. Кінетика вивільнення БСА з капсул, вкритих поліелектролітними шарами {хітозан 400 кДа – різні поліаніоніти} 2 при рН 1,8

Профілі кінетики вивільнення у нейтральному середовищі відрізняються часом виходу кривої на плато (рис. 7). Так, тривалість вивільнення БСА з капсул КмцХіт(с) становить 150 хв, тоді як для інших зразків – 210–220 хв. Також суттєво відрізняється ступінь вивільнення білка для різних мікрокапсул. Для капсул КмцХіт(с) та Альг(в)Хіт(с) він досягає значення 90 %, тоді як із мікрокапсул, які містять карагінан у своєму складі, вивільняється тільки 60 % ліків. Це можна пояснити наявністю сульфогруп з високою електронегативністю у карагінані, які міцніше утримують білок навіть вище його ізоелектричної точки за рахунок локальних позитивних зарядів у молекулі БСА.

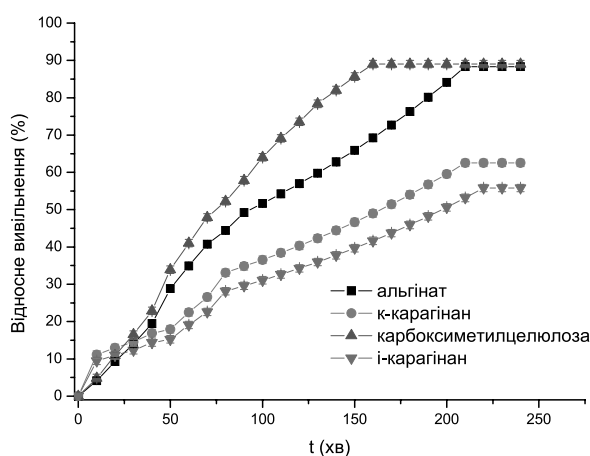


Рис. 7. Кінетика вивільнення БСА з капсул, вкритих поліелектролітними шарами {хітозан 400 кДа – різні поліаніоніти} 2 при рН 6,8

Отже, змінюючи склад поліелектролітного комплексу, можна контролювати як ефективність капсулювання лікарських засобів, так і їхню кінетику вивільнення при різних рН.

Висновки

За допомогою методу екструзії одержано капсули сферичної форми з Гаусівським розподілом частинок за розмірами і середнім діаметром $521 \text{ мкм} \pm 96 \text{ мкм}$. Показано, що використання низькомолекулярних поліелектролітів для модифікування альгінатних капсул знижує ефективність капсулювання модельного білкового лікарського засобу на 15–20 % у порівнянні з використанням високомолекулярних поліелектролітів. Ефективність капсулювання у ряду високомолекулярних поліаніонітів зменшується у такому порядку: альгінат > КМЦ > к-карагінан > і-карагінан, що добре корелює зі значеннями рКа цих полімерів ($R^2 = 0,9723$). Для мікрокапсул, вкритих ПЕК з низькомолекулярними поліе-

лектролітами, характерне стрімке вивільнення модельного білкового лікарського засобу. Встановлено, що залежності відносного вивільнення білка від часу при рН 6,8 для капсул, вкритих ПЕК із хітозаном 400 та 750 кДа, наближаються

до лінійних ($R^2=0,9889$ та $R^2=0,9908$, відповідно). Ступінь вивільнення модельного білкового лікарського засобу з мікрокапсул, вкритих ПЕК, з використанням слабких поліаніонітів становить 90 %; сильних поліаніонітів – 60 %.

Список літератури

- Decher G. Fuzzy Nanoassemblies Toward Layered Polymeric Multicomposites / Decher G. Fuzzy // Science. – 1997. – Vol. 277. – P. 1232–1237.
- Yoo D. Controlling bilayer composition and surface wettability of sequentially absorbed multilayers of weak polyelectrolytes / D. Yoo, S. S. Shiratori, M. F. Rubner // Macromolecules. – 1998. – Vol. 31. – P. 4309–4318.
- Schlenoff J. B. Mechanism of Polyelectrolyte Multilayer Growth: Charge Overcompensation and Distribution / J. B. Schlenoff, S. T. Dubas // Macromolecules. – 2001. – Vol. 34. – P. 139–160.
- Harris J. J. Layered polyelectrolyte films as selective, ultrathin barriers for anion transport / J. J. Harris, J. L. Stair, M. L. Bruening // Chemistry of Materials. – 2000. – Vol. 12. – P. 1941–1946.
- Direct electro chemistry of myoglobin and cytochrome P450 cam in alternate layer-by-layer films of DNA and other polyions / Y. Lvov, Z. Lu, X. Zu, J. B. Schenkman, J. J. Rusling // Journal of the American Chemical Society. – 1998. – Vol. 120. – P. 4073–4080.
- Novel polymer shells via colloid templated assembly of polyelectrolytes / E. Donath, G. B. Sukhorukov, F. Caruso, S. A. Davis, H. Möhwald // Angewandte Chemie International Edition in English. – 1998. – Vol. 37. – P. 2201–2205.
- Sukhorukov G. Novel Methods to Study Interfacial Layers / G. Sukhorukov, D. Mobius, R. Miller. – Elsevier : Amsterdam, 2001. – P. 384–415.
- Fabrication of a novel type of metallized colloids and hollow capsules / A. A. Antipov, G. B. Sukhorukov, Y. A. Fedutik et al. // Langmuir. – 2002. – Vol. 18 (17). – P. 6687–6693.
- Smart Micro- and Nanocontainers for Storage, Transport, and Release / G. Lbarz, L. Dahne, E. Donath, H. Möhwald // Advanced Materials. – 2001. – Vol. 13. – P. 1324–1327.
- Dahne L. Fabrication of Micro Reaction Cages with Tailored Properties / L. Dahne, S. Leporatti, E. Donath, H. Möhwald // Journal of the American Chemical Society. – 2001. – Vol. 123. – P. 5431–5436.
- Ai H. Electrostatic Layer-by-Layer Nanoassembly on Biological Microtemplates: Platelets / H. Ai, M. Fang, S. Jones, Y. Lvov // Biomacromolecules. – 2002. – Vol. 3. – P. 560–564.
- Nano-encapsulation of furosemide microcrystals for controlled drug release / H. Ai, S. Jones, M. De Villiers, J. J. Lvov // Controlled Release. – 2003. – Vol. 86. – P. 59–68.
- Fabrication of Microporous Thin Films from Polyelectrolyte Multilayers / J. Mendelson, C. Barrett, V. Chan et al. // Langmuir. – 2000. – Vol. 16. – P. 5017.
- Polyelectrolyte multilayer capsule permeability control / A. A. Antipov, G. B. Sukhorukov, S. Leporatti et al. // Colloids and Surfaces. – 2002. – Vol. 198–200. – P. 535–541.
- Antipov A. A. Influence of the Ionic Strength on the Polyelectrolyte Multilayers' Permeability / A. A. Antipov, G. B. Sukhorukov, H. Möhwald // Langmuir. – 2003. – Vol. 19. – P. 2444–2448.
- Urease Encapsulation in Nanoorganized Microshells / Y. Lvov, A. Antipov, A. Mamedov et al. // Nano Letters. – 2001. – Vol. 1. – P. 125–128.
- Entrapment of Chymotrypsin into Hollow Polyelectrolyte Microcapsules / O. P. Tiourina, A. A. Antipov, G. B. Sukhorukov et al. // Macromolecular Bioscience. – 2001. – Vol. 1. – P. 209–214.
- pH-Controlled Macromolecule Encapsulation in and Release from Polyelectrolyte Multilayer Nanocapsules / G. B. Sukhorukov, A. A. Antipov, A. Voigt et al. // Macromolecular Rapid Communications. – 2001. – Vol. 22. – P. 44–46.
- Il'ina A. V. Chitosan-based polyelectrolyte complexes: A review / A. V. Il'ina, V. P. Varlamov // Applied Biochemistry and Microbiology. – 2005. – Vol. 41. – P. 5–11.
- Polyelectrolyte complex formation and stability when mixing polyanions and polycations in salted media: A model study related to the case of body fluids / T. Etrych, L. Leclercq, M. Boustta, M. Vert // European Journal of Pharmaceutical Sciences. – 2005. – Vol. 2. – P. 281–288.
- Bhattarai N. Chitosan-based hydrogels for controlled, localized drug delivery / N. Bhattarai, J. J. Gunn, M. Zhang // Advanced Drug Delivery Reviews. – 2010. – Vol. 62. – P. 83–99.
- Targeted delivery of low molecular drugs using chitosan and its derivatives / J. H. Park, G. Saravanakumar, K. Kim, I. C. Kwon // Advanced Drug Delivery Reviews. – 2010. – Vol. 62. – P. 28–41.
- Malafaya P. B. Natural-origin polymers as carriers and scaffolds for biomolecules and cell delivery in tissue engineering applications / P. B. Malafaya, G. A. Silva, R. L. Reis // Advanced Drug Delivery Reviews. – 2007. – Vol. 59. – P. 207–233.
- Progress in chitosan-based vaccine delivery systems / F. Esmaili, S. Heuking, H. E. Junginger, G. Borchard // Journal of Drug Delivery Science and Technology. – 2010. – Vol. 20. – P. 53–61.
- Chitosan and its derivatives as drug penetration enhancers / C. Caramella, F. Ferrari, M. C. Bonferoni et al. // Journal of Drug Delivery Science and Technology. – 2010. – Vol. 20. – P. 5–13.
- Hamman J. H. Chitosan Based Polyelectrolyte Complexes as Potential Carrier Materials in Drug Delivery Systems / J. H. Hamman // Marine Drugs. – 2010. – Vol. 8. – P. 1305–1322.
- Argin-Soysal S. Effect of complexation conditions on xanthan-chitosan polyelectrolyte complex gels / S. Argin-Soysal, P. Kofinas, Y. M. Lo // Food hydrocolloids. – 2009. – Vol. 23. – P. 202–209.
- Shi J. Drug release of pH/temperature-responsive calcium alginate/poly (N-isopropylacrylamide) semi-IPN beads / J. Shi, N. M. Alves, J. F. Mano // Macromolecular Bioscience. – 2006. – Vol. 6. – P. 358–363.
- Sadeghi M. Synthesis, swelling behavior, salt- and pH-sensitivity of cross linked carrageenan-graft-poly (acrylamide-co-itaconic acid) superabsorbent hydrogel / M. Sadeghi, N. Ghasemi, M. Kazemi // Middle-East J. of Sci. Research. – 2012. – Vol. 11, Is. 3. – P. 311–317.
- Jean Luc Wertz. Cellulose science and technology / Jean Luc Wertz, Olivier Bédoué, Jean Pierre Mercier // EPFL Press, 2010 – P. 364.
- Mak W. I. Influence of different polyelectrolytes on layer-by-layer microcapsules properties: encapsulation efficiency and colloidal and temperature stability / W. I. Mak, K. Y. Cheung, D. Trau // Chem. Mater. – 2008. – Vol. 20. – P. 5475–5484.

I. Kolesnyk, O. Voron, D. Bilko, N. Antoniuk, A. Burban

ALGINATE MICROCAPSULES MODIFIED WITH POLYELECTROLYTE COMPLEXES FROM CHARGED POLYSACCHARIDES

Alginate microcapsules were obtained by extrusion method and covered with polyelectrolyte complexes from the oppositely charged polysaccharides by "layer-by-layer" method. The influence of the molecular weight and nature of the polymer functional groups on protein encapsulation efficiency and its release kinetics at simulated gastric medium of pH 1.8 and intestinal media of pH 6.8 was investigated.

Keywords: sodium alginate, polyelectrolyte complexes, extrusion method, "layer-by-layer" method.

Матеріал надійшов 20.06.2013

УДК 542.816:66.081

Бурбан А. Ф.

МЕМБРАННА ДИСТИЛЯЦІЯ В ПРОЦЕСАХ ВОДОПІДГОТОВКИ, ЗНЕСОЛЕННЯ ТА ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД

Розглянуто основні засади та перспективи практичного застосування мембранної дистиляції (МД) в процесах водопідготовки, знесолення та очищення стічних вод. Проведено порівняльний аналіз МД з іншими методами знесолення та очищення води. Охарактеризовано сучасний стан виробництва мембран та обладнання для процесів МД.

Ключові слова: ????

Енергетична криза й забруднення навколишнього середовища стимулюють дослідників шукати можливості зниження енергоспоживання й скорочення шкідливих викидів, особливо в хімічній промисловості. У зв'язку з цим інтерес до процесів із фазовим переходом, зокрема, процесу мембранної дистиляції, сутність якого полягає у проникненні пари рідини крізь пористу мембрану, як до енерго- і ресурсозберігаючого безреагентного процесу розділення, пояснюється широкими технологічними можливостями та економічністю. Постійний інтерес дослідників, до процесу мембранної дистиляції, що виражається у зростаючій кількості публікацій, зумовлений низкою унікальних властивостей цього процесу, а саме: можливістю одержання високо-

чистого дистиляту при незначному впливі осмотичних ефектів, використанням низькоенергетичних теплоносіїв і робочих тисків, близьких до атмосферного [1; 2].

Мембранна дистиляція є одним з термомембранних процесів, перебіг якого відбувається під дією градієнта температури. При його здійсненні два (або принаймні один) розчини розділені мікропористою гідрофобною мембраною і перебувають за різних температур. Рідина не повинні змочувати стінки пор мембрани, а різниця тисків по різні сторони мембрани мусить бути нижче капілярного тиску. За таких умов рідина не буде заповнювати пори мембрани, і крізь мембрану може проходити тільки пар, який випаровується з боку рідини з більш високою тем-