

ХІМІЧНІ НАУКИ

УДК 66.023.2

DOI: 10.15587/2313-8416.2014.30735

МОДЕЛЮВАННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ (РІДИНА-РІДИНА) У МІКРОРЕАКТОРАХ

© Ю. А. Мірошніченко, Ю. О. Безносик

В даній роботі було розглянуто представлені в літературі математичні моделі гетерогенних систем (рідина-рідина) в середовищі мікроканалів. На основі узагальнених даних обґрунтовано доцільність застосування мікрореактора для проведення процесу функціоналізації поверхні кремнезему і синтезу інноваційних матеріалів. Наступним етапом даного дослідження є розробка математичної моделі процесу та її реалізації в спеціальному програмному середовищі

Ключові слова: мікрореактор, мікроканал, процес функціоналізації, поверхня кремнезему, CFD-моделювання, гетерогенна система, мініатюризація

In this paper the published mathematical models of heterogeneous systems (liquid-liquid) in microchannels was considered, and the feasibility of microreactor application for the process of silica surface functionalization and synthesis of innovative materials was proved. The next stage is to develop a mathematical model of the process and its implementation by means of special software

Keywords: microreactor, microchannel, functionalization process, silica surface, CFD-modelling, heterogeneous system, miniaturization

1. Вступ

Актуальним напрямком хіміко-технологічної науки в наш час є максимальна мініатюризація апаратного обладнання для проведення складних хімічних процесів з метою оптимізації існуючого виробництва та впровадження інноваційних технологій та матеріалів. Серйозну зацікавленість вчених та дослідників в даній області привертають мікроструктурні реактори – хімічні реакційні пристрої, розміри яких знаходяться у субміліметровому діапазоні. Процеси в мікрореакторі відбуваються в одному або в кількох паралельних каналах, лінійні параметри яких лежать в межах від мікрметра до міліметра. Такі апарати мають вагомні переваги у порівнянні з класичним хімічним обладнанням: інтенсифікація масо- та теплопереносу; велика питома поверхня контакту фаз; ламінарний режим потоку (і, як наслідок, зниження затрат енергії та збільшення часу перебування); високий коефіцієнт радіальної дифузії; простота масштабування; покращення селективності; можливість точного контролю технологічних умов процесу; безпечність та екологічність. Широкий спектр покращених характеристик дозволяє успішно застосовувати мікрореактори для проведення різнотипних реакцій.

2. Аналіз літературних даних

За оцінками експертів в області хімічного синтезу до 70 % всіх хімічних реакцій доцільно проводити в неперервному режимі в мікроструктурних реакторах [1]. На сьогодні існує серйозний

багаж експериментальних даних по дослідженню гомогенних реакцій в системі рідина-рідина, що є найпростішими для проведення в мікрореакторах [1]. Інтенсивно проводиться вивчення гетерогенних систем [2], таких як рідинна екстракція, нітрування, полімеризація і ін., а також каталітичних процесів та твердофазних (порошкоподібних) речовин [3].

Одним із перспективних, але маловивчених, прикладних напрямків хімічної технології є синтез функціоналізованих матеріалів. В Інституті хімії поверхні ім. О. О. Чуйка командою дослідників під керівництвом Зуба Ю. Л. було розроблено загальний підхід до синтезу полісилоксанових ксерогелів та мезопоруватих кремнеземів з поліфункціональним поверхневим шаром, що містить комплексуючі групи (амінні, тіольні, карбоксильні, (тіо)сечовинні, (тіо)фосфорильні функціональні групи) [4, 5]. Такі матеріали можуть бути використані в хроматографії органічних і неорганічних речовин, каталізі, як носії лікарських засобів, а також як високоселективні, високоємні сорбенти нового покоління. Практична реалізація дослідів в лабораторних умовах підтверджує корисні властивості отриманих сполук [4, 5]. Але проведення даного експерименту ускладнюється за рахунок значних затрат часу і, крім того, вимагає дотримання певних технологічних умов. Тому доцільним є пошук альтернативних методів проведення процесу функціоналізації поверхні кремнезему.

На основі наведених переваг мікрореакторів можна припустити, що завдяки інтенсифікації

процесу в мікроканалах і можливості повного управління параметрами реакції реалізація процесу функціоналізації в мікрореакторі дозволить отримати нові матеріали з наперед заданими властивостями. Варто відмітити, що на даний час в літературі не представлено жодних спроб теоретичного чи практичного вивчення даного процесу з використанням мікрореакційної техніки. Першочерговим етапом перевірки висунутого припущення є створення адекватної математичної моделі для опису схеми перетворення речовин у капілярах і виконання теоретичного експерименту з допомогою сучасних засобів моделювання. Джерела [6–8] підтверджують достовірність комп'ютерних розрахунків. Слід зауважити, що запропоновані у ранніх роботах [9–11] математичні моделі процесів для систем рідина-рідина не описували утворення плівки рідини на стінках мікрокапілярів. У [12] було проведено обчислення гідродинаміки потоків з урахуванням тертя між стінкою каналу та рідиною, а результати моделювання узгоджуються з експериментальними даними. Так, детальне вивчення системи у віртуальному середовищі дозволить створити наукові засади спрямованого синтезу нових сорбційних матеріалів.

3. Постановка задачі

Метою даної роботи є вивчення теоретичних і практичних досліджень застосування мікрореакторів для проведення гетерогенних реакцій (рідина-рідина), огляд підходів до моделювання процесів у мікроканалах і оцінка можливості проведення процесу функціоналізації поверхні кремнезему в мікроструктурному реакторі.

4. Режими течії потоків у мікрореакторі

У літературних джерелах представлено різні підходи до опису, відтворення та візуалізації режиму руху речовин в мікрореакторі [2, 13, 14]. Розглянуті схеми переміщення потоків у каналах включають складну взаємодію між поверхневими, гравітаційними, в'язкісними та інерційними силами. При цьому важливим аспектом є геометрія мікроканалів, фізичні властивості реагуючих речовин, умови проведення реакції. Так, у роботі [2] досліджено рух двох рідин, що не змішуються, і проведено порівняння снарядного та рівнобіжного (паралельного) режимів переміщення речовин. У висновку було підтверджено, що формування в капілярах снарядного режиму течії спричиняє покращення селективності процесу завдяки конвекції (циркуляції кожного снаряду) та дифузії між сусідніми снарядами. Більш детальну класифікацію було запропоновано в [13], де розглянуто бульбашковий, снарядний, бульбашково-снарядний, кільцевий, рівнобіжний (паралельний) режими течії, а також дисперсний потік та деформований потік рідини (рис. 1).

На основі відомостей про режими течії робочих середовищ в об'ємі мікроканалів можна підібрати оптимальні умови перебігу процесу і, як наслідок, підвищити селективність хімічних реакцій. Слід відмітити, що режим переміщення потоків

всередині капілярів мікрореактора обумовлює змішування речовин. В результаті зменшення лінійних розмірів мікропристроїв спостерігається утворення ламінарного потоку руху рідин та газів, що характеризується малим числом Рейнольдса. Тому застосування капілярів дозволяє досягти практично ідеального перемішування реагентів за рахунок повторного циркуляційного перемішування крапель рідини під впливом тертя сегментованої рідини об стінки мікроканалів [1].

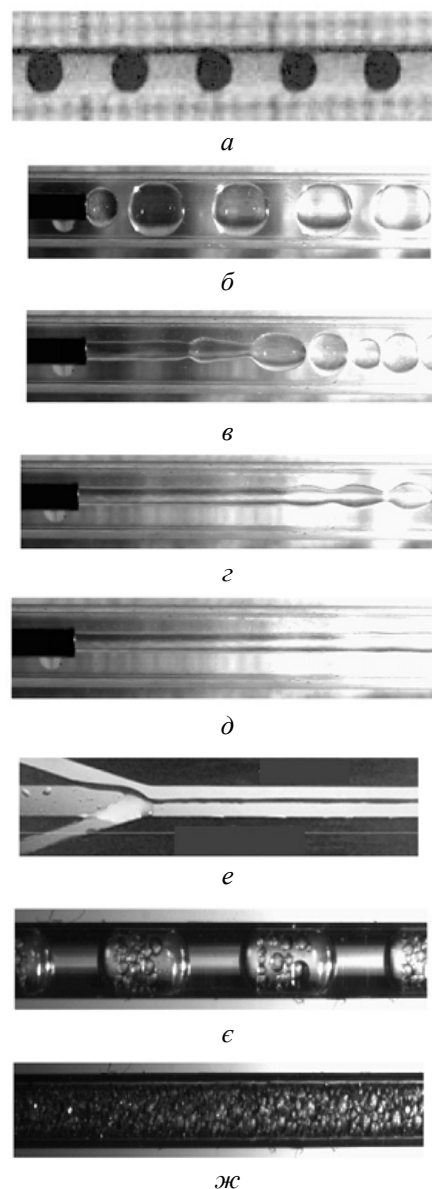


Рис. 1. Режими течії потоку в системах рідина-рідина та газ-рідина у мікрореакторі: *a* – бульбашковий; *б* – снарядний (пробковий); *в* – бульбашково-снарядний; *г* – течія потоку із деформованим інтерфейсом; *д* – кільцевий; *е* – рівнобіжний (паралельний); *є* – снарядно-дисперсний; *жс* – дисперсний [13]

Змішування в мікрореакторі зазвичай відбувається шляхом багаторазового повторення контакту робочих середовищ з подальшим розділенням утвореного потоку на два потоки вздовж

лінії, перпендикулярної до поверхні змішування. Як наслідок, прогнозування процесу в мікрозмішувачі вимагає врахування таких параметрів, як швидкість змішування, перепад тиску, об'ємна витрата потоків, а також гнучкість мікроелемента та його сумісність з аналітичними приладами для контролю системи.

5. Підходи до моделювання процесів у мікрореакторі

Моделювання процесу в мікрореакторі є першочерговою стадією дослідження, що дозволяє адекватно спрогнозувати хід перетворень реагентів у каналах та сформулювати чіткі рекомендації щодо інтеграції розробленої моделі в практичний експеримент лабораторного чи промислового масштабу. Крім того, попередній розрахунок з використанням сучасних програмних засобів дозволяє передбачити умови проведення дослідів, виконати планування експерименту і, таким чином, значно зменшити об'єм експериментальних робіт, витрату матеріалів та часу.

Моделювання включає такі ключові аспекти: визначення рівнянь переносу маси, тепла, імпульсу та початкових і граничних умов для конкретного процесу чи реакції; перетворення визначених рівнянь у числовий код відповідно до обраного середовища обчислень; проведення серії теоретичних експериментів з метою отримання набору даних і їх подальшої інтерпретації, обробки і візуалізації; вивчення впливу різних параметрів на продуктивність системи; обґрунтування доцільності

проведення процесу в мікрореакторі для оптимізації роботи окремих елементів чи всього виробництва [3].

Згідно до представлених в літературі даних ефективними числовими методами вирішення рівнянь математичної моделі мікрореактора, що включає рівняння матеріального та теплового балансів для прогнозованої системи, базові рівняння для фізичних параметрів перетворення реагентів, кінетичні рівняння для реакцій, що відбуваються в системі, а також рівняння гідродинаміки потоків (CFD – Computational Fluid Dynamics), є:

- метод кінцевих елементів (The finite-volume method);
- рівняння Нав'є-Стокса (The Navier-Stokes Equation);
- метод побудови розрахункових сіток (Computational Grids);
- методи розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь (Methods for linear algebraic systems).

Сьогодні існує широкий спектр програмних засобів для дослідження складних процесів шляхом підбору вбудованих математичних моделей для добре вивчених процесів і реакцій, а також шляхом програмування нових процесів на основі розроблених користувачем моделей. Найбільш відомими пакетами, що дозволяють виконати такі обчислення, є Fluent, CFD-ACE+, COMSOL Multiphysics, CoventorWare, Aspen HYSYS, Aspen Plus, ANSYS, CHEMCAD, Mathcad. У табл. 1 наведено приклади застосування різних програмних середовищ для дослідження хімічних процесів у мікрореакторах.

Таблиця 1

Моделювання хімічних реакцій у мікрореакторі

Об'єкт моделювання	Тип мікрореактора	Опис моделі	Програмний пакет	Посилання
Реакція (конденсація) Кневенагеля	Мембранний мікрореактор (Membrane microreactor)	Диференціальні рівняння матеріального балансу для руху ідеальних речовин в мікроканалах та при проходженні через шар каталізатора	Femlab™	[7]
Селективне каталітичне відновлення (SCR) NOx	Мікроструктурний реактор (Microstructured reactor)	Метод кінцевих елементів для опису профілів концентрації реагентів (C ₁₆ H ₃₄ , NO) і продуктів (CO ₂ , N ₂) реакції.	Comsol Multiphysics 3.5	[6]
Формування снарядного режиму течії потоку	Мікроструктурний реактор (Microstructured reactor)	CFD-моделювання для дослідження змішування в T-реакторі з урахуванням утворення плівки на стінках мікроканалів	FLUENT (ANSYS Inc.)	[14]
Гідродинаміка потоку	Мікрореактор із сітками (Mesh microreactor)	Дисперсійна модель для аналізу осьової дисперсії потоку рідини	gPROMS©-3.0.2	[15]
Реакція омилення етилацетату	T-подібний мікрореактор (T-microreactor)	Метод кінцевих елементів для розрахунку поля швидкостей та концентрацій	ANSYS CFX	[16]

Таким чином, застосування математичного опису, числових методів та програмних засобів для теоретичного аналізу складних процесів дозволяє отримати детальну характеристику досліджуваної системи і сформулювати чіткі рекомендації для синтезу нових матеріалів. На основі розглянутих

прикладів реалізації теоретичного та практичного експериментів у мікропристроях можна зробити висновок про доцільність вивчення процесу функціоналізації поверхні кремнезему в мікроструктурному реакторі. Завдяки новому підходу до проведення синтезу та можливості дотримання

оптимальних умов відкривається перспектива виробництва інноваційних сорбційних матеріалів на основі кремнезему, що знайдуть широке застосування в медицині, харчовій промисловості, біохімії, екології і т. д.

6. Висновки

Мікрореакторна техніка виводить хімічну технологію на новий рівень розвитку, відкриваючи широкі можливості для оптимізації існуючих підприємств та організації нових виробничих процесів. В даній роботі було проведено системний огляд теоретичних і практичних здобутків в області застосування мікрореакторів для проведення різнотипних реакцій, виконано аналіз підходів до моделювання реакцій в системі рідина-рідина, вивчено результати перевірки різних числових методів і засобів комп'ютерного експерименту та проведено оцінку їх узгодженості з емпіричними дослідженнями. На базі представлених в літературі математичних моделей для опису хімічних трансформацій у мікроканалах було визначено, що CFD-моделювання процесу функціоналізації поверхні кремнезему в мікрореакторі дозволить детально описати схему перетворення та встановити оптимальні технологічні умови процесу. Створення математичної моделі та її реалізація в спеціальному програмному середовищі буде наступним кроком даного дослідження. Коректні результати вивчення процесу дозволять провести синтез інноваційних матеріалів з наперед заданими корисними властивостями.

Література

1. Ярулін, Р. Непрерывные проточные микрореакторы [Текст] / Р. Яруллин, А. Гербст // Микрореакторы и нанотехнологии. – 2012. – С. 44–49.
2. Kashid, M. N. Numbering-up and mass transfer studies of liquid-liquid two-phase microstructured reactors [Text] / M. N. Kashid, A. Gupta, A. Renken, L. Kiwi-Minsker // Chemical Engineering Journal. – 2010. – Vol. 158, Issue 2. – P. 233–240. doi: 10.1016/j.cej.2010.01.020
3. Patrick, L. Mills. Microreactor technology and process miniaturization for catalytic reactions – A perspective on recent developments and emerging technologies [Text] / L. Mills Patrick, David J. Quiram, James F. Ryley // Chemical Engineering Science. – 2007. – Vol. 62, Issue 24. – P. 6992–7010. doi: 10.1016/j.ces.2007.09.021
4. Design of Functionalized Polysiloxane Adsorbents and their Environmental Applications [Text] / P. Innocenzi, Yu. L. Zub, V. G. Kessler (Eds.). – Proc. of ARW NATO, 2008. – 29 p.
5. Зуб, Ю. Л. Функціоналізовані органокремнеземи: синтез, будова, фізико-хімічні властивості [Текст] : дис. ... докт. хім. наук / Ю. Л. Зуб. – Харків, 2010. – 603 с.
6. Hernandez Carucci, J. R. Experimental and modelling aspects in microstructured reactors applied to environmental catalysis [Text] / J. R. Hernandez Carucci, K. Eränen, D. Yu. Murzin, T. O. Salmi // Catalysis Today – 2009. – Vol. 147. – P. 149–150. doi: 10.1016/j.cattod.2009.07.034
7. Yeung, K. L. Experiments and modeling of membrane microreactors [Text] / K. L. Yeung, X. Zhang, W. N. Lau, R. Martin-Aranda // Catalysis Today – 2005. – Vol. 110, Issue 1-2. – P. 26–37. doi: 10.1016/j.cattod.2005.09.020
8. Yang, B. Multi-scale modeling of microstructured reactors for the oxidative dehydrogenation of ethane to ethylene

[Text] / B. Yang, T. Yuschak, T. Mazanec, A. Lee Tonkovich, S. Perry // Chemical Engineering Journal. – 2008. – Vol. 135. – P. 147–152. doi: 10.1016/j.cej.2007.07.050

9. Kashid, M. N. CFD-modelling of mass transfer with and without chemical reaction in the liquid-liquid slug flow microreactor [Text] / M. N. Kashid, D. W. Agar, S. Turek // Chemical Engineering Science. – 2007. – Vol. 62, Issue 18-20. – P. 5102–5109. doi: 10.1016/j.ces.2007.01.068

10. Qian, D. Numerical study on gas and liquid slugs for Taylor flow in a T-junction microchannel [Text] / D. Qian, A. Lawal // Chemical Engineering Science. – 2006. – Vol. 61, Issue 23. – P. 7609–7625. doi: 10.1016/j.ces.2006.08.073

11. Kumar, V. Slug flow in curved microreactors: hydrodynamic study [Text] / V. Kumar, S. Vashisth, Y. Hoarau, K. D. P. Nigam // Chemical Engineering Science. – 2007. – Vol. 62, Issue 24. – P. 7494–7504. doi: 10.1016/j.ces.2007.06.026

12. Gupta, R. On the CFD-modelling of Taylor flow in microchannels [Text] / R. Gupta, D. F. Fletcher, B. S. Haynes // Chemical Engineering Science. – 2009. – Vol. 64, Issue 12. – P. 2941–2950. doi: 10.1016/j.ces.2009.03.018

13. Kashid, M. N. Gas-liquid and liquid-liquid mass transfer in microstructured reactors [Text] / M. N. Kashid, A. Renken, L. Kiwi-Minsker // Chemical Engineering Science. – 2011. – Vol. 66, Issue 17. – P. 3876–3897. doi: 10.1016/j.ces.2011.05.015

14. Kashid, M. N. CFD-modelling of liquid-liquid multiphase microstructured reactor: Slug flow generation [Text] / M. N. Kashid, A. Renken, L. Kiwi-Minsker // Chemical Engineering Research and Design. – 2010. – Vol. 88, Issue 3. – P. 362–368. doi: 10.1016/j.cherd.2009.11.017

15. Kulkarni, A. A. Hydrodynamics and liquid phase residence time distribution in mesh microreactor [Text] / A. A. Kulkarni, A. K. Gorasia, V. V. Ranade // Chemical Engineering Science. – 2007. – Vol. 62, Issue 24. – P. 7484–7493. doi: 10.1016/j.ces.2007.08.063

16. Хайдаров, В. Г. Моделирование реакции омыления этилацетата и изопропилацетата с учетом гидродинамики и трехмерной модели реактора в Ansys Fluent [Текст] / В. Г. Хайдаров, Е. С. Боровинская, А. Томас, В. А. Холоднов, В. П. Решетиловский // Известия СПб гос. технол. ин-та (техн. ун-та). – 2013. – Т. 44. – С. 93–96.

References

1. Iarylin, R., Herbst A. (2012). Nepreryvnye protochnye mikroreaktory [Continuous flow microreactors]. Microreactors and nanotechnology, 44–49.
2. Kashid, M. N., Gupta, A., Renken, A., Kiwi-Minsker, L. (2010). Numbering-up and mass transfer studies of liquid-liquid two-phase microstructured reactors. Chemical Engineering Journal, 158 (2), 233–240. doi: 10.1016/j.cej.2010.01.020
3. Mills, P. L., Quiram, D. J., Ryley, J. F. (2007). Microreactor technology and process miniaturization for catalytic reactions – A perspective on recent developments and emerging technologies. Chemical Engineering Science, 62 (24), 6992–7010. doi: 10.1016/j.ces.2007.09.021
4. Zub, Yu. L., Kessler, V. G. (2008). Design of Functionalized Polysiloxane Adsorbents and their Environmental Applications. Proceeding of ARW NATO, 29.
5. Zub, Yu. L. (2010). Funkcionalizovani orhanokremnezemy: syntez, bydova, fizyko-himichni vlastyvoli [Functionalized organosilicas: synthesis, structure and physicochemical properties]. Kharkiv, 603.
6. Hernandez Carucci, J. R., Eränen, K., Murzin, D. Yu., Salmi, T. O. (2009). Experimental and modelling aspects in microstructured reactors applied to environmental

catalysis. *Catalysis Today*, 147, 149–150. doi: 10.1016/j.cattod.2009.07.034

7. Yeung, K. L., Zhang, X., Wai, N. L., Martin-Aranda, R. (2005). Experiments and modeling of membrane microreactors. *Catalysis Today*, 110 (1-2), 26–37. doi: 10.1016/j.cattod.2005.09.020

8. Yang, B., Yuschak, T., Mazanec T., Lee Tonkovich, A., Perry, S. (2008). Multi-scale modeling of microstructured reactors for the oxidative dehydrogenation of ethane to ethylene. *Chemical Engineering Journal*, 135, 147–152. doi: 10.1016/j.cej.2007.07.050

9. Kashid, M. N., Agar, D. W., Turek, S. (2007). CFD-modelling of mass transfer with and without chemical reaction in the liquid–liquid slug flow microreactor. *Chemical Engineering Science*, 62 (18-20), 5102–5109. doi: 10.1016/j.ces.2007.01.068

10. Qian, D., Lawal, A. (2006). Numerical study on gas and liquid slugs for Taylor flow in a T-junction microchannel. *Chemical Engineering Science*, 61(23), 7609–7625. doi: 10.1016/j.ces.2006.08.073

11. Kumar, V., Vashisth, S., Hoarau, Y., Nigam, K. D. P. (2007). Slug flow in curved microreactors: hydrodynamic study. *Chemical Engineering Science*, 62 (24), 7494–7504. doi: 10.1016/j.ces.2007.06.026

12. Gupta, R., Fletcher, D. F., Haynes, B. S. (2009). On

the CFD-modelling of Taylor flow in microchannels. *Chemical Engineering Science*, 64 (12), 2941–2950. doi: 10.1016/j.ces.2009.03.018

13. Kashid, M. N., Renken, A., Kiwi-Minsker, L. (2011). Gas-liquid and liquid-liquid mass transfer in microstructured reactors. *Chemical Engineering Science*, 66 (17), 3876–3897. doi: 10.1016/j.ces.2011.05.015

14. Kashid, M. N., Renken, A., Kiwi-Minsker, L. (2010). CFD-modelling of liquid–liquid multiphase microstructured reactor: Slug flow generation. *Chemical Engineering Research and Design*, 88 (3), 362–368. doi: 10.1016/j.cherd.2009.11.017

15. Kulkarni, A. A., Gorasia, A. K., Ranade, V. V. (2007). Hydrodynamics and liquid phase residence time distribution in mesh microreactor. *Chemical Engineering Science*, 62 (24), 7484–7493. doi: 10.1016/j.ces.2007.08.063

16. Haidarov, V. H., Borovinskaya, E. S., Tomas, A., Holodniv, V. A., Reshetilovskii, V. P. (2013). Modelirovanie reakcii omyleniia etilacetata i izopropilacetata s uchetom hidrodinamiki i trohmernoy modeli reaktora v Ansys Fluent [Simulation of the saponification reaction of ethyl acetate and isopropyl acetate, considering hydrodynamics and three-dimensional model of reactor in Ansys Fluent]. *Proceedings of the St. Petersburg State Technological Institute (technical university)*, 44, 93–96.

Рекомендовано до публікації д-р техн. наук Астрелін І. М.
Дата надходження рукопису 19.11.2014

Мірошніченко Юлія Анатоліївна, аспірант, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: Juliana@ukr.net

Безносик Юрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент, кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
E-mail: yu_beznosyk@ukr.net

UDC 678.746.744

DOI: 10.15587/2313-8416.2014.33235

THE POLYVINYLPIRROLIDONE GRAFT COPOLYMERS AND SOFT CONTACT LENSES ON THEIR BASIS

© O. Suberlyak, V. Skorokhoda, N. Kozlova, Yu. Melnyk, N. Semenyuk, N. Chopyk

The graft polymerization of 2-hydroxyethyl methacrylate in presence of polyvinylpyrrolidone, which occurs through a stage of complex formation between the reactants, was investigated. The basic performance properties of hydrogel copolymers depending on their composition were investigated. A hydrogel polymeric material “Akrylan-LPI” for soft contact lenses was developed. Clinical testing confirmed the effectiveness of using of such lenses for vision correction as well as for eye injuries and burns treating

Keywords: polyvinylpyrrolidone, 2-hydroxyethyl methacrylate, cross-linked copolymer, hydrogel, permeability, contact lenses, eye trauma

Досліджено прищеплену полімеризацію 2-гідроксіетилметакрилату у присутності полівінілпіролідону, яка відбувається через стадію комплексоутворення між реагентами. Досліджено основні експлуатаційні властивості гідрогелів залежно від їхнього складу. Розроблено гідрогелевий полімерний матеріал “Акریان-ЛПІ” для м'яких контактних лінз. Клінічні випробування підтвердили ефективність використання таких лінз для корекції зору, а також для лікування травм і опіків ока

Ключові слова: полівінілпіролідон, 2-гідроксіетилметакрилат, рідко зшитий кополімер, гідрогель, проникність, контактні лінзи, травма ока