

- Altan, Afsar Studies on the degreasing of skin by using enzyme in liming process [Text] / Altan Afsar, Fatma Cetinkaya // Indian Journal of Chemical Technology. - 2008. - Vol. 15. - P. 507–510.
- Суховеркова, А. М. Современные методы получения обезвоженных шкурок кролика [Текст] / А. М. Суховеркова, Л. В. Антипова, И. С. Косенко, О. А. Василенко // Современные проблемы науки и образования. - 2009. - № 3, Ч. 2. - С. 74–75.
- Антипова, Л. В. Ферментная технология обезволаживания шкурок кролика [Текст] : матер. III междунар. науч.-практ. конф. / Л. В. Антипова, О. А. Василенко, И. С. Косенко, А. М. Суховеркова // Пищевая и морская биотехнология: проблемы и перспективы – 2008. Вестник Воронежской государственной технологической академии. - 2008. - № 3 (37). - С. 61–65.
- Choundhary, R. V. Enzyme technology applications in leather processing [Text] / R. V. Choundhary, A. K. Jana, M. K. Jha // Indian Journal of Chemical Technology. - 2004. - Vol. 11. - P. 659–671.
- Единая технология обработки шкурок кролика [Текст] / утв. И. Г. Гриценко. - М. : ЦНИИТЭИлегрпром, 1990. - 45 с.
- Технология обработки меховых овчин [Текст] / утв. А. А. Бирюков. - М. : ЦНИИТЭИлегрпром, 1990. - 197 с.
- Технология обработки шубных овчин [Текст] / утв. А. А. Бирюков. - М. : ЦНИИТЭИлегрпром, 1982. - 82 с.
- Taylor, M. Enzymes assist recovery of chrome and high-value protein from shavings [Text] / M. Taylor // World Leather. - 1994. - November. - P. 38.
- Данилкович, А. Г. Формирование пористой структуры кожи под воздействием электроактивированных растворов протеолитических ферментов [Текст] : матер. IX междунар. науч.-практ. конф. / А. Г. Данилкович, О. А. Романюк, Д. В. Стаценко // Кожа и мех в XXI веке: технология, качество, экология, образование. – Улан-Удэ: Изд-во ВСГУТУ, 2013. - С. 42–48.
- Данилкович, А. Г. Практикум з хімії і технології шкіри та хутра [Текст] : навч. посібник / А. Г. Данилкович; 2 вид., перероб. і доп. – К. : Фенікс, 2006. – 340 с.
- Бабакина, В. Г. Применение ферментов в производстве кожи [Текст] / В. Г. Бабакина. - М. : Ростехиздат, 1962. - 239 с.

Розглянуто кількісний та якісний вплив бінарних каталітичних систем до складу яких входить нафтенат кобальту та спирти різної природи на рідиннофазне гомогенно-каталітичне окиснення циклогексану. Встановлено залежності швидкості та якості накопичення продуктів від природи добавки. Виконане порівняння впливу каталізаторів, та здійснено вибір оптимальних каталітичних систем для даного процесу

Ключові слова: циклогексан, окиснення, каталіз, каталітичні системи

Рассмотрено количественное и качественное влияние бинарных каталитических систем состоящих из нафтената кобальта и спиртов разной природы на жидкофазное гомогенно-каталитическое окисление циклогексана. Установлено зависимости скорости и качества накопления продуктов от природы добавок. Выполнено сравнение влияния катализаторов, и совершен выбор оптимальных каталитических систем для данного процесса

Ключевые слова: циклогексан, циклогексанол, циклогексанон, окисление, катализ, каталитические системы

УДК 661.7:547.2/4

КАТАЛІТИЧНЕ ОКИСНЕННЯ ЦИКЛОГЕКСАНУ В ПРИСУТНОСТІ СПИРТІВ РІЗНОЇ ПРИРОДИ

О. О. Супрун

Аспірант*

E-mail: terick-zol@rambler.ru

В. В. Реутський

Доктор технічних наук, професор*

E-mail: reutskyu@yahoo.com

О. С. Іващук

Кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник*

E-mail: ivaschuk@polynet.lviv.ua

С. О. Мудрий

Кандидат технічних наук,
молодший науковий співробітник*

E-mail: mso1984tm@mail.ru

*Кафедра технології органічних продуктів
Національний університет «Львівська політехніка»
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

1. Вступ

На сьогоднішній день, незважаючи на багаточисленні дослідження, залишається актуальною проблема пошуку нових (або модифікація існуючих) ефективні-

ших каталітичних систем для окиснення вуглеводнів. Дана робота спрямована на модифікацію каталітичних систем, шляхом використання добавок до промислового каталізатора, у процесі окиснення циклогексану (ЦГ). Дія цих органічних модифікаторів проявляється

після утворення певної кількості кисневмісних сполук в процесі реакції, що свідчить про їх участь в утворенні каталітичного комплексу. Це робить актуальним дослідження по впливу спиртів різної природи на процес гомогенно-каталітичного окиснення циклогексану.

2. Постановка проблеми

Одним з основних напрямків регулювання активності та селективності гомогенно-каталітичного окиснення вуглеводнів є використання органічних сполук різної природи, спільною рисою яких є здатність до утворення проміжних комплексів з каталізатором, чим вони і забезпечують свій вплив на перебіг процесу [1]. При цьому до цих проміжних комплексів входять не тільки сіль металу змінної валентності і органічна складова, але й кисневмісні сполуки, що утворюються в процесі окиснення [2]. Як свідчать попередні дослідження, суттєву роль в існуванні цих комплексів відіграють спирти, одержані при окисненні [3]. З огляду на це, доцільно було дослідити попередньо створені каталітичні суміші, до складу яких входять спирти різної природи.

3. Літературний огляд

Для інтенсифікації окиснення циклогексану досліджувались фізико-хімічні та хімічні методи. До першої групи відноситься ультразвук, який не набув використання у промисловості, через ускладнення апаратурного оформлення [1]. Оптимальний спосіб, який і зараз використовується у промисловості – окиснення циклогексану солями металів змінної валентності, переважно кобальту. Але невисокі показники конверсії і селективності вимагали пошук нових рішень., яким стало розробка бінарних каталітичних систем на основі промислових каталізаторів [1]. Також відбувається пошук нових каталізаторів для інтенсифікації процесу (окиснення ЦГ третбутил гідрпероксидом в присутності оксиду платини [4], окиснення ЦГ в присутності оксидів металів змінної валентності нанесених на цеоліти [5], окиснення ЦГ нітратною кислотою пропущеними через Co/Mn кластерний комплекс [6].

Гомогенні каталізатори приймають участь у всіх стадіях окиснення (механізм гомогенного окиснення [4]). Вони виконують роль ініціатора та впливають на склад продуктів діючи на комплекс. При цьому відрізняється дія йону металу в окисненій та відновленій формі. Органічні модифікатори, які використовуються для інтенсифікації процесу проявляють свою активність після досягнення певної конверсії (вищої за 1 %) [1], що свідчить про утворення кисневмісних сполук, серед яких є спирти різної природи. Як відомо спирти є уловлювачами радикалів і вступають інгібіторами окиснення, проте їх використання у малих кількостях дає змогу регулювати селективності процесу [7]. Систематичні дослідження

по впливу спиртів на процес окиснення вуглеводнів у літературі відсутні.

Метою досліджень є створення селективних каталітичних систем для процесу окиснення циклогексану за участі спиртів.

Для її досягнення необхідно визначити закономірності впливу будови спирту, довжини його ланцюга та кількість ОН груп на ефективність дії каталітичної системи.

4. Результати досліджень окиснення циклогексану та їх обговорення

Було проаналізовано вплив на процес гомогенно-каталітичного окиснення циклогексану бінарних каталітичних систем, що складались з нафтенату кобальту (НК) та спиртів різної природи – гліцерину (ГЛ), етиленгліколю (ЕГ), етанолу (ЕТ), пропанолу (ПР) та пентанолу (ПН).

4.1. Умови проведення процесу

Окиснення циклогексану в присутності бінарних каталітичних систем проводилось при температурі 413 К та тиску P=1,0 МПа в реакторі барботажного типу.

4.2. Дослідження впливу багатоатомних спиртів

При аналізі одержаних експериментальних даних найбільш важливими є показники процесу при конверсії циклогексану, близькі до 2 % та 4 % – критичної конверсії, при якій можливо спостерігати практичний ефект застосування каталізатора процесу та значення, що є найближчим до параметрів виробничого процесу окиснення циклогексану відповідно [8, 9]. Результати порівнювались із даними, одержаними при окисненні ЦГ з індивідуальним промисловим каталізатором – НК (табл. 1).

Таблиця 1

Показники окиснення циклогексану при значеннях конверсії X = 2 %, X = 4 % T = 413 К, P = 1,0 МПа, C_{НК} = 5,0 × 10⁻⁴ моль/л

Каталізатор	S(ГП-ЦГ*), %	S(K), %	S(EC), %	S(ЦОЛ), %	S(ЦОН), %	[ЦОЛ/ЦОН]	v _{сер} , ×10 ⁻⁴ моль/с
Конверсія X ~ 2 %							
НК	7,14	6,73	0,00	60,14	25,99	2,31	0,65
НК+ГЛ	4,09	3,37	30,67	47,24	14,62	3,23	0,51
НК+ЕГ	5,45	5,49	54,47	31,77	2,81	11,29	0,77
Конверсія X ~ 4 %							
НК	1,77	6,04	10,63	47,25	34,32	1,38	1,12
НК+ГЛ	2,84	6,03	24,38	42,17	24,58	1,72	1,44
НК+ЕГ	2,20	8,46	27,45	37,70	24,19	1,56	1,68

* – ГПЦГ – гідрпероксид циклогексилу, К – дикарбонові кислоти, ЕС – естери, ЦОЛ – циклогексанол, ЦОН – циклогексанон, v_{сер} – середня швидкість накопичення продуктів.

Дослідження окиснення циклогексану у присутності бінарних каталітичних систем до складу яких входили гліцерин та етиленгліколь, засвідчили, що використання спиртів в процесі окиснення призводить до зниження селективності за ЦОЛ та ЦОН, як на початкових стадіях окиснення (X ~ 2 %), так і в

розвинутому окисненні ($X \sim 4\%$), у порівнянні з НК. Добавки впливають на швидкість накопичення продуктів, а саме ГЛ при $X \sim 2\%$ інгібує окиснення, а вже при $X \sim 4\%$ прискорює реакцію. Максимальне значення $v_{сер}$ досягається при використанні ЕГ і становить $1,68 \times 10^{-4}$ моль/с, що є у 1,5 рази більше ніж за використання НК. Також добавки мають суттєвий вплив на співвідношення ЦОЛ/ЦОН в оксидаті. В усіх випадках спостерігається зростання значення співвідношення цільових продуктів, а найбільше зміщення у сторону накопичення спирту відбувається при низьких значеннях X за участю ЕГ – ЦОЛ/ЦОН=11,29. Хоча при розвинутому окисненні максимальне значення ЦОЛ/ЦОН =1,72 досягається з використанням ГЛ. На обох стадіях окиснення добавки спиртів мали суттєвий вплив на вміст у продуктах естерів, основну частину яких складає дициклогексиладипінат, який в свою чергу є сировиною для отримання ЦОЛ. При використанні ЕГ досягалось зростання селективності за естером, при $X \sim 2\%$ на 54 %, а при $X \sim 4$ близько 17 %, що дає змогу, в процесі виробництва, підвищити селективність за ЦОЛ, тим самим ще більше змістити співвідношення ЦОЛ/ЦОН. Також, добавка ЕГ при розвинутому окисненні збільшує вміст дикарбонових кислот, більшу частину яких складає адипінова кислота, на 2,4 %. Даний аспект може бути використаний при одержанні адипінової кислоти.

Попередні дослідження засвідчили, що вплив добавок на процес гомогенно-каталітичного окиснення залежить від співвідношення компонентів в складі каталітичної системи [10], тому були проведені дослідження процесу при різному співвідношенні добавок з НК. Вміст НК в реакційній суміші залишався сталим ($C_{НК} = 5,0 \times 10^{-4}$ моль/л).

З графічних залежностей (рис. 1, 2) видно, що добавки до НК багатоатомних спиртів інгібують процес, на початкових стадіях окиснення, проте після накопичення достатньої кількості кисневмісних сполук прискорюють реакцію. Наочним прикладом є порівняння швидкостей накопичення продуктів (табл. 2).

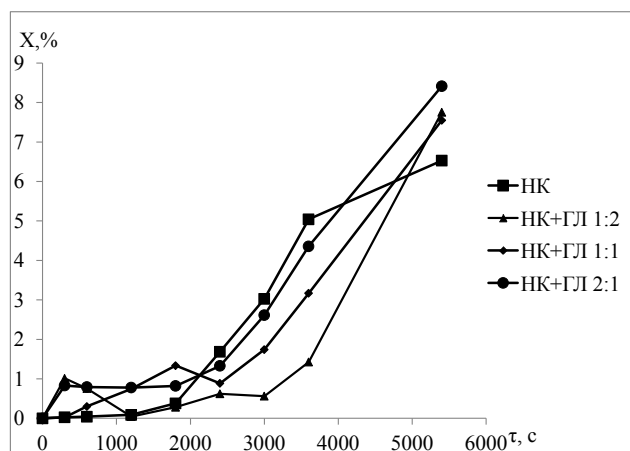


Рис. 1. Залежність ступеня перетворення ЦГ від тривалості проведення окиснення при використанні добавки ГЛ

Експериментальні дані свідчать про зростання $v_{сер}$ та v_x (v_x відповідає швидкості накопичення продуктів після 3600 с проведення реакції) в усіх випадках використання добавок спиртів порівняно з НК. Най-

вищі значення середньої швидкості було досягнуто з використанням ЕГ у співвідношенні 1:1 з НК – $1,68 \times 10^{-4}$ моль/с, а швидкості розвинутого окиснення при використанні НК+ГЛ 1:2 – $3,25 \times 10^{-4}$ моль/с. Слід відмітити, що збільшення частки добавки підвищує швидкість накопичення продуктів розвинутого окиснення, цей фактор вимагає глибшого дослідження.

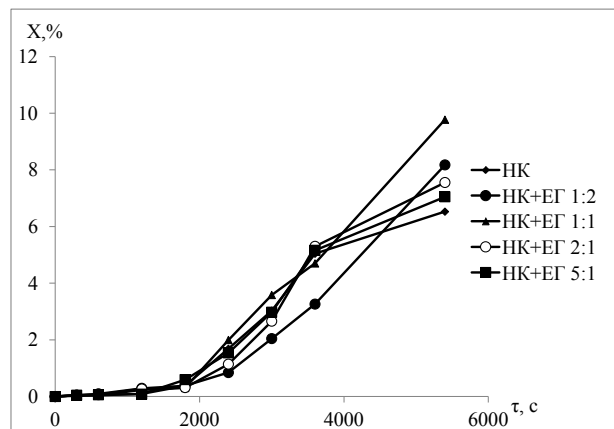


Рис. 2. Залежність ступеня перетворення ЦГ від тривалості проведення окиснення при використанні добавки ЕГ

Таблиця 2

Значення швидкості накопичення продуктів бінарних каталітичних систем

Каталізатор	$v_{сер}^{**}, \times 10^{-4}$ моль/с	$v_x, \times 10^{-4}$ моль/с	Каталізатор	$v_{сер}, \times 10^{-4}$ моль/с	$v_x, \times 10^{-4}$ моль/с
НК	1,12	0,764	НК+ЕГ 1:2	1,4	2,53
НК+ГЛ 1:2	1,33	3,25	НК+ЕГ 1:1	1,68	2,61
НК+ГЛ 1:1	1,29	2,25	НК+ЕГ 2:1	1,29	1,16
НК+ГЛ 2:1	1,44	2,09	НК+ЕГ 5:1	1,21	0,97

** – $v_{сер}$ – середня швидкість накопичення продуктів, v_x – швидкість накопичення продуктів розвинутого окиснення

4. 3. Дослідження впливу одноатомних спиртів

Аналогічно були проведені дослідження каталітичних систем, що містили у своєму складі одноатомні спирти. Розглядалися показники процесу при значеннях конверсії близьких до 2 % та 4 %. Аналізувались добавки до НК – етанолу, пропанолу та пентанолу. Експериментальні дані досліджень порівнюються із НК та добавками багатоатомних спиртів (табл. 3).

Одержані результати свідчать, що одноатомні спирти в процесі окиснення впливають на значення селективностей усіх складових оксидату та на швидкість накопичення продуктів. Одноатомні спирти прискорюють реакцію, при чому із зменшенням вуглецевого ланцюга – збільшується швидкість накопичення продуктів, максимальне значення якої досягається з використанням ЕГ – $2,08 \times 10^{-4}$ моль/с. Для каталітичних систем до складу яких входили одноатомні спирти характерне зростання селективності за ЦОЛ (найбільші значення досягаються з використанням ЕГ – 56,52 % та ПР – 55,63 %) та її пониження за ЦОН, що в свою чергу призводить до збільшення співвідношення ЦОЛ/ЦОН, максимальне значення якого становить

2,39 при додаванні ПР. У дослідах з використанням ЕТ та ПР суттєво знижується селективність за К та ЕС. Найнижчий показник селективності за кислотами має добавка ПР – 4,13 %, що є більш ніж у 1,4 рази менші у порівнянні з НК та добавками багатоатомних спиртів. Використання ЕТ дозволило максимально знизити селективність за ЕС. Добавки ЕТ та ПР призводять до зростання селективності за ГПЦГ, максимальне значення якої досягається з використанням ЕТ – 11,78 %, коли використання ПН призводить до пониження селективності до 1 %. Слід відмітити, що одноатомні спиртів, так само як і багатоатомні, призводять до зростання співвідношення ЦОЛ/ЦОН, але на відміну від багатоатомних знижують селективність за ЕС.

ідентичний якісний вплив на накопичення продуктів в оксидаті, окрім значення селективності за ЦОН, при різних їх кількісних співвідношеннях. Швидкість накопичення продуктів залежить як від довжини вуглецевого ланцюга, так і від кількості ОН груп у спирті. Збільшення ланцюга і ОН груп призводить до зниження швидкості.

З технологічної точки зору найкращі результати були отримані при використанні одноатомних спиртів. Найвища селективність за ЦОЛ (56,52 %) зафіксована при додаванні ЕТ, максимальне значення співвідношення ЦОЛ/ЦОН (2,39) досягаються при використанні добавки ПР.

Показники окиснення циклогексану при значеннях конверсії X = 2 %, X = 4 % T = 413 K, P = 1,0 МПа, C_{НК} = 5,0×10⁻⁴ моль/л

Каталізатор	S(ГПЦГ*), %	S(K), %	S(ЕС), %	S(ЦОЛ), %	S(ЦОН), %	[ЦОЛ/ЦОН]	v _{сер.} ×10 ⁻⁴ моль/с
Конверсія X ~ 2 %							
НК	7,14	6,73	0,00	60,14	25,99	2,31	0,65
НК+ЕТ	21,19	3,63	0,00	55,47	19,70	2,82	1,67
НК+ПР	13,35	3,56	10,68	54,68	17,73	3,08	1,78
НК+ПН	2,13	4,27	12,80	50,17	30,63	1,64	1,56
Конверсія X ~ 4 %							
НК	1,77	6,04	10,63	47,25	34,32	1,38	1,12
НК+ЕТ	11,78	4,30	0,00	56,52	27,40	2,06	2,08
НК+ПР	9,71	4,13	7,28	55,63	23,25	2,39	1,88
НК+ПН	1,00	6,00	12,00	49,44	31,56	1,57	1,66

4. 4. Порівняння впливу спиртів різної природи

Із наведених даних видно, що із ростом молекулярної маси спирту зменшується вміст ГПЦГ, зростає кількість естерів та зменшується кількість ЦОЛ в оксидаті, за іншими показниками характерна залежність не спостерігається. Окрім довжини ланцюга важливий вплив на співвідношення продуктів має основність спирту (табл. 4).

Показники окиснення циклогексану при значеннях конверсії X = 4 % T = 413 K, P = 1,0 МПа, C_{НК} = 5,0×10⁻⁴ моль/л

Каталізатор	S(ГПЦГ*), %	S(K), %	S(ЕС), %	S(ЦОЛ), %	S(ЦОН), %	[ЦОЛ/ЦОН]	v _{сер.} ×10 ⁻⁴ моль/с
Конверсія X ~ 4 %							
НК	1,77	6,04	10,63	47,25	34,32	1,38	1,12
НК+ЕТ	11,78	4,30	0,00	56,52	27,40	2,06	2,08
НК+ЕГ	2,20	8,46	27,45	37,70	24,19	1,56	1,68
НК+ПР	9,71	4,13	7,28	55,63	23,25	2,39	1,88
НК+ГЛ	2,84	6,03	24,38	42,17	24,58	1,72	1,44

Із порівняння використання добавок ЕГ та ЕТ видно, що застосування ЕТ дозволяє збільшити виходи ГПЦГ, ЦОЛ та ЦОН і збільшити значення співвідношення ЦОЛ/ЦОН та відповідно зменшити кількість кислот, та естерів. За участі ПР та ГЛ спостерігається

5. Висновки

- У процесі дослідження встановлено, що:
1. Вплив спиртів на процес гомогенно-каталітичного окиснення циклогексану залежить від природи спирту та від співвідношення каталізатор-спирт.
 2. Використання всіх досліджуваних спиртів призводить до зсуву співвідношення ЦОЛ/ЦОН в сторону накопичення спирту.
 3. Збільшення довжини ланцюга спирту призводить до зменшення швидкості накопичення продуктів, пониження значення селективності за ГПЦГ ЕС та ЦОЛ.
 4. Збільшення кількості ОН груп в молекулі спирту призводить до підвищення вмісту кислот і естерів в оксидаті, а також зменшує швидкість накопичення продуктів, значення співвідношення ЦОЛ/ЦОН та вміст ГПЦГ і ЦОЛ.

Література

1. Іващук, О. С. Інтенсифікація каталітичного окиснення циклогексану [Текст] / О. С. Іващук // Вісник НУ „Львівська політехніка”. Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2012. – № 726. – С. 172–176.
2. Ivashchuk, O. Cyclohexane oxidation in the presence of variable valency metals chelates [Text] / O. Ivashchuk, V. Reutsky, S. Mudryy, O. Zaichenko, N. Mitina // Chemistry & Chemical Technology. – 2012. – Vol. 6, № 3. – P. 339–343.
3. Реутський, В. В. Окиснення циклогексану в присутності багатоатомних спиртів [Текст] / В. В. Реутський, О. С. Іващук, С. О. Мудрий, О. О. Супрун // тез. доп. міжнар. наук. конф. (2012) / Львів: АРСТОС, 2012. – С. 24.
4. Rekkab-Hammoumraoui, I. Catalytic oxidation of cyclohexane to cyclohexanone and cyclohexanol by tert-butyl hydroperoxide over Pt/oxide catalysts [Text] / I. Rekkab-Hammoumraoui, A. Choukchou-Braham, L. Pirault-Roy, C. Kappenstein // Bulletin of Materials Science. – 2011. – Vol. 34, № 5. – P. 1127–1135.
5. Christopher, R. Oxidation of Cyclohexane by Transition Metal Oxides on Zeolites [Text] / R. Christopher, R. Riley, E. Nancy Montgomery, N. Nada Megally, A. Jessica Gunn, L. Shannon Davis // The Open Catalysis Journal. – 2012. – Vol. 5. – P. 8–13.

- Chavan, S. A. Oxidation of Cyclohexane, Cyclohexanone, and Cyclohexanol to Adipic Acid by a Non- HNO_3 Route over Co/Mn Cluster Complexes [Text] / S. A. Chavan, D. Srinivas, P. Ratnasamy // Journal of Catalysis. – 2002. – № 212. – P. 39–45.
- Денисов, Е. Т. Механизм жидкофазного окисления кислородсодержащих соединений [Текст] : пособие / Е. Т. Денисов, Н. И. Мицкевич, В. Е. Агабеков; Минск: Наука и техника, –1975.– С. 334.
- Oei-Suk Park. Gif-KRICT Biomimetic Oxidation of Cyclohexane The Influence of Metal Oxides [Text] / Oei-Suk Park, Sang-Sung Nam, Seong-Bo Kim, Kyu-Wan Lee // Bull. Korean Chem. Soc. – 1999 – Vol. 20, №. 1. – P. 49-52.
- Amin Ebadi. Aerobic oxidation of cyclohexane with g-alumina supported metallophthalocyanines in the gas phase [Text] / Amin Ebadi, Nasser Safari, Mohammad Hassan Peyrovi // Applied Catalysis A: General 321 – 2007 – P. 135–139.
- Ivashchuk, O. Chelates in the oxidation process of cyclohexane [Text] / O. Ivashchuk, V. Reutsky, S. Mudryy // Materials of 14th International Symposium of Students and Young Mechanical Engineers “Advances in Chemical and Mechanical Engineering” – Gdansk, Poland. – 2011. – Vol. 1 – P. 238-241.

УДК 533.723:577.352.4(086.48)

МОЛЕКУЛЯРНЫЙ НАСОС, ФУНКЦИОНИРУЮЩИЙ ВСЛЕДСТВИЕ ФЛУКТУАЦИЙ ВНУТРИМЕМБРАННОГО ПОТЕНЦИАЛА

Розглянуто модель молекулярного насосу, який внаслідок флуктуацій потенціалу створює направлений рух частинок через мембрану із заданими концентраціями на границях. Отримано чисельний розв'язок рівнянь для потоку частинок при стохастичному перемиканні двох пилоподібних потенціалів. Отримано низькочастотну асимптотику, що дозволила порівняти механізми роботи молекулярного насоса та мотору, які функціонують в аналогічних режимах флуктуацій

Ключові слова: наномашини, наномеханізми, броунівські мотори, молекулярні насоси, приповерхнева дифузія, нерівноважні флуктуації

Рассмотрена модель молекулярного насоса, который вследствие флуктуаций внутримембранного потенциала создает направленное движение частиц через мембрану с заданными концентрациями на границах. Получено численное решение уравнений для потока частиц при стохастическом переключении двух пилообразных потенциалов. Также получена низкочастотная асимптотика, позволившая сравнить механизмы работы молекулярного насоса и мотора, функционирующего в аналогичных режимах флуктуаций

Ключевые слова: наномашини, наномеханизмы, броуновские моторы, молекулярные насосы, приповерхностная диффузия, неравновесные флуктуации

Т. Е. Корочкова

Кандидат физико-математических наук,
научный сотрудник*

E-mail: taiscrust@mail.ru

В. А. Машира

Младший научный сотрудник
Отдел кристаллизации

Институт металлофизики им. Г. В. Курдюмова
ул. Вернадского, 36, г. Киев, Украина, 03164

E-mail: mashira@mail.ru

Н. Г. Шкода

Кандидат физико-математических наук
Научный сотрудник*

E-mail: n_shkoda@ukr.net

В. М. Розенбаум

Доктор физико-математических наук,
заведующий отделом*

E-mail: vik-roz@mail.ru

*Отдел теории наноструктурных систем

Институт химии поверхности
им. А. А. Чуйко НАН Украины

ул. Генерала Наумова, 17, г. Киев, Украина, 03164

1. Введение

Известно, что флуктуации потенциальной энергии, являющейся периодической функцией координаты, могут приводить к направленному транспорту наноча-

стиц. Исследования в данной области стимулируются необходимостью объяснить рабочие механизмы белковых моторов и ионных насосов, выполняющих различные физиологические функции. В данной статье приводятся результаты численных расчетов модели