

РОМАНКЕВИЧ О.В.¹, РЕДЬКО Я.В.²

¹Миколаївський національний університет ім.
В.А. Сухомлинського

²Київський національний університет технологій і дизайну

САМООРГАНІЗАЦІЯ НАНОЧАСТИНОК ПОЛІАНІЛІНУ З УТВОРЕННЯМ ПОШАРОВОЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОЇ СТРУКТУРИ НА ВОЛОКНИСТОМУ МАТЕРІАЛІ

У роботі охарактеризовано процес самоорганізації електропровідного шару наночастинок в процесі гетерокоагуляції на прикладі системи поліамідне волокно – поліанілін, а також розглянуто процес багатошарової зворотної гетерокоагуляції наночастинок на поверхні підложки із застосуванням підходу БЕТ.

Ключові слова: волокнистий матеріал, наночастинок поліаніліну, електропровідність, гетерокоагуляція, самоорганізація.

SELF-ORGANIZATION PROCESSES OF CONDUCTIVE LAYER OF POLYANILINE NANOPARTICLES IN HETEROCOAGULATION ON POLYAMIDE FIBER

ROMANKEVICH O.V.¹, REDKO Ja.V.²

¹ Mykolaiv National University after V.O.Sukhomlynsky

² Kyiv National University of Technologies and Design

The process of a heterocoagulation of polyaniline particles on the polyamide fiber is described by the quasi-chemical reaction model. It has been shown that in these conditions the structures with a limited lifetime and with following self-organization are emerged.

Keywords: conductive fiber materials, polyaniline, heterocoagulation, self-organization of nanoparticles.

Електропровідні наноструктуровані матеріали, що не містять метали, становлять інтерес у ряді областей їх використання [1–3]. При цьому можливе утворення різних структур, зокрема, кристалічних за рахунок самоорганізації наночасток. Характер утворених структур, можливість управління їх утворенням становить інтерес як з наукової [1–7], так і з практичної точки зору, враховуючи вплив на властивості наносистем.

Одним із широко використовуваних електропровідних полімерів є поліанілін – жорстколанцюговий лінійний полімер зі спряженими подвійними зв'язками вздовж ланцюга. У науковій праці [8] показана можливість отримання електропровідних волокон за рахунок осадження на їх поверхні за механізмом гетерокоагуляції (у роботі використовується термін по [9, 10]) шару наночастинок поліаніліну.

Мета даної роботи: охарактеризувати процес самоорганізації електропровідного шару наночастинок в процесі гетерокоагуляції на прикладі системи поліамідне волокно – поліанілін.

В роботі використовувалося трикотажне поліамідне волокно і комплексна поліамідна нитка. Дисперсію поліаніліну отримували шляхом окислювальної конденсації аніліну в присутності ПАР в фарбувальній ванні [8]. У якості ПАР застосовувалися: 1) неіоногенна ПАР – препарат ОС-20 – моноалкіловий ефір поліетиленгліколю на основі первинних жирних спиртів $C_nH_{(2n+1)}O(C_2H_4O)_t$, де n близько 18, $t \approx 20$; 2) аніоноактивна ПАР – сульфанола – алкілбензолсульфонат і катіоноактивна ПАР – Алкамон ОС-2 [11].

Для визначення розподілу частинок за розмірами використовувався лазерний седиментограф Mastersizer 2000 (Malvern, UK) Для вирішення поставлених завдань застосовувалися методи технології текстильних матеріалів, методи визначення електрофізичних характеристик комплексних ниток. При визначенні кількості поліаніліну на волокні використовувалася фотокolorиметрія розчинів отриманих волокон. Концентрація поліаніліну у ванні приймалася пропорційною концентрації аніліну до синтезу [8]. На рис. 1 наведена крива розподілу частинок поліаніліну за розмірами

в дисперсії у вигляді залежності числової частки частинок від їх розмірів. До наночастинок належать за формальною ознакою частинки, один із розмірів яких, менше 100 нм [12]. По суті, більш вірним є підхід С. Ліпатова: частинка відноситься до колоїдних (до наночастинок), якщо при зменшенні розмірів з'являються якісно нові властивості [13]. У наносистемах можливий широкий розподіл за розмірами: при багаторазових диспергуванні або зворотному процесі агрегування реалізується логарифмічно нормальний розподіл за розмірами частинок [14].

У багатьох випадках сукупності частинок із середнім розміром між 100 і 1000

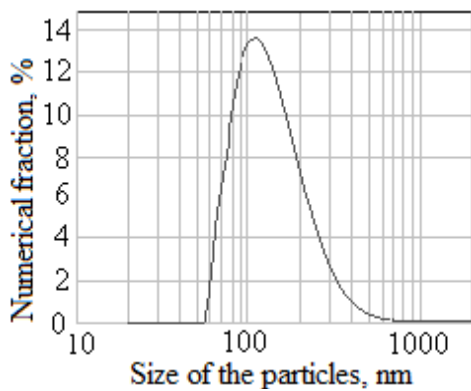
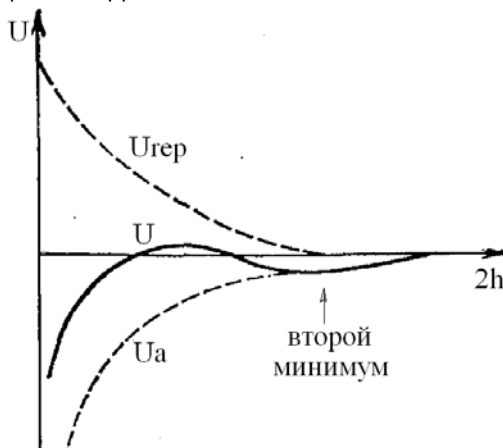


Рис. 1 Диференційна крива розподілу частинок за розмірами.

Рівняння Ленгмюра виведено і використовується для описання адсорбції, наприклад, молекул на поверхні у вигляді мономолекулярного шару [15]. Відомо [16, 17], що осадження наночастинок на



нм також розглядають в якості наночастинок, тому що частина частинок потрапляє в область розмірів менше 100 нм, а частина частинок може бути динамічними агрегатами, що складаються з частинок з розміром менше 100 нм. Як наслідок, досліджувані в роботі дисперсії поліаніліну розглядаються в якості наносистем.

На рис. 2 наведена в координатах рівняння Ленгмюра залежність оптичної густини розчинів волокнистих матеріалів, що містять поліанілін (D), від концентрації поліаніліну у ванні (C) у присутності: 1) препарату ОС-20 і 2) алкамону ОС-2.

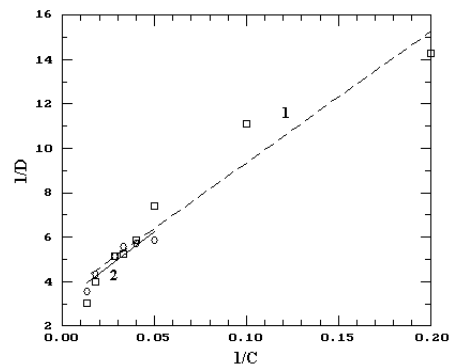


Рис. 2 Залежність оптичної густини розчинів забарвлених волокнистих матеріалів (D) від концентрації поліаніліну у ванні (C) у присутності: 1) ОС-20 і 2) алкамону ОС-2.

поверхню може відбуватися у вигляді моношарів за рахунок самоорганізації, зокрема, можливий синтез моношарів поліаніліну на плівках [18].

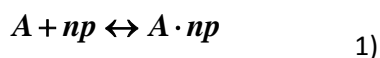
Рис. 3 Криві потенціальної енергії в залежності від відстані між пластинами ($2h$) [19]. U_{rep} – енергія відштовхування, U_a – енергія тяжіння, $U = U_{rep} + U_a$.

На рис. 3 показана залежність потенціальної енергії взаємодії від відстані між двома пластинами у відповідності з теорією ДЛФО [19, 20]. Подальший розвиток цієї теорії призвів, в принципі, до схожих виразів для взаємодії між сферичними частинками [21]. Процес дезагрегації при коагуляційній рівновазі стає можливим при невеликій глибині другого мінімуму і агрегати колоїдних частинок, що виникають в результаті дальньої взаємодії, можуть розпадатися [10,19]. Наявність адсорбційно-сольватного бар'єру не виключає можливості рівноваги процесів агрегації – дезагрегації (сорбція – десорбція наночастинок при гетерокоагуляції) в колоїдних системах [19, 21]

Ми розглядаємо тільки рівноважний зворотній процес коагуляції, незалежно від причин подібної взаємодії поверхні підкладки і наночастинок дисперсії. Уявімо рівновагу між процесами гетерокоагуляції і пептизації (сорбція – десорбція) колоїдних частинок на поверхні у вигляді квазіхімічної зворотної реакції.

Використання зворотної квазіхімічної реакції прийнято при виведенні рівняння Ленгмюра при дослідженні процесів молекулярної адсорбції [15].

Рівновага між поверхневими «активними» центрами A , наночастинами дисперсії np і тимчасово осілими на поверхні наночастинами $A \cdot np$ визначається квазіхімічним рівнянням зворотної реакції:



Якщо максимальна концентрація A (активних центрів поверхні), потенційно здатних утворювати сполуки з наночастинами у співвідношенні 1:1 дорівнює $C_{A,\infty}$, то концентрація активних центрів, які залишилися вільними, визначається величиною $(C_{A,\infty} - C_{A \cdot np})$.

При концентрації наночастинок в дисперсії C_{np} константа рівноваги для реакції (1):

$$K = \frac{C_{A \cdot np}}{C_{np}(C_{A,\infty} - C_{A \cdot np})} \quad (2)$$

В координатах $1/C_{A \cdot np} = f(1/C_{np})$ рівняння (2) перетворюється в рівняння прямої:

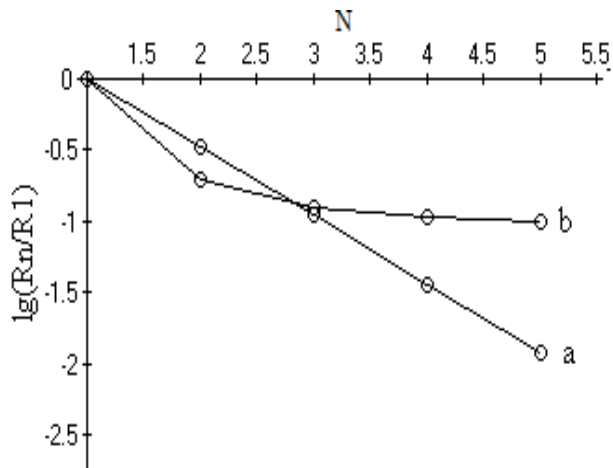
$$\frac{1}{C_{A \cdot np}} = \frac{1}{C_{A,\infty}} + \frac{1}{KC_{A,\infty}} \cdot \frac{1}{C_{np}} \quad (3)$$

Аналіз рівнянь (2) і (3) показує, що при утворенні моношару частинок дисперсної фази в зворотному процесі гетерокоагуляції ізотерма сорбції аналогічна за формою рівнянню Ленгмюра для мономолекулярної адсорбції на міжфазній поверхні. Співпадіння виду рівнянь для мономолекулярної адсорбції [15,19], для розчинення з утворенням сольватів [22], для гетерокоагуляції наночастинок на поверхні волокна обумовлено реалізацією ситуації, коли утворюється сполука з обмеженим часом життя (процес зворотний), що створює умови для здійснення процесу самоорганізації наночастинок із створенням впорядкованої структури, зокрема, моношару наночастинок на поверхні волокна – підложки.

Поліамідне волокно в кислих середовищах (при pH <5) має позитивний заряд поверхні [23], наночастинок поліаніліну, синтезовані в присутності аніоноактивної ПАР – сульфанола, володіють негативним зарядом, як наслідок, гетерокоагуляція в даному випадку протікає за класичним механізмом [9], як взаємодія частинок з протилежним зарядом. Електростатична взаємодія частинок в даному випадку достатньо інтенсивна для незворотності процесу. Як наслідок, при використанні сульфанола, як стабілізатора, залежність кількості барвника на волокні від концентрації поліаніліну в ванні не описується рівнянням, що збігається за формою з рівнянням Ленгмюра. Відсутність можливості перебудови осажденного шару, мабуть, може призводити до структури шару подібного фрактальній структурі при агрегації, обмеженої дифузією.

Відомо пошарове осадження (layer-by-layer) електролітів, білків, колоїдних частинок на підложку [16–18, 24]. Метод layer-by-layer може бути застосований для збільшення електропровідності, по суті,

композиційного матеріалу волокно – шар електропровідного полімеру на поверхні. У методі layer-by-layer однойменність або різнойменність зарядів поверхні і осаджених частинок різної природи відіграє важливу роль [16–18, 24]. У роботі проводився багатостадійний синтез електропровідного шару аніліну з використанням на кожній стадії дисперсій, стабілізованих ПАР, створюючих міцели із зарядом протилежним



Таким чином, в процесі пошарового осадження здійснювався процес класичної гетерокоагуляції [9, 10], коли в процесі гетерокоагуляції беруть участь різнойменно заряджені поверхні (у нашому випадку поверхні частинок поліаніліну і волокнистого матеріалу). Зі збільшенням кількості стадій осадження істотно змінювався опір матеріалу (на два порядки). Характер електростатичної взаємодії забезпечував регулярність у зменшенні опору при проведенні кожної наступної стадії (\approx в 3 рази). Залежність від описується емпіричним рівнянням .

Інший характер має залежність зміни опору волокнистого матеріалу від кількості стадій осадження поліаніліну при реалізації процесу багатостадійного осадження, якщо при синтезі дисперсії поліаніліну на кожній стадії використовувалася одна й та сама ПАР. На рис. 4b охарактеризовано зміну опору при здійсненні 5 стадій осадження поліаніліну в присутності аніоноактивної ПАР – сульфонулу. Незмінність знаку заряду частинок поліаніліну на кожній стадії сприяє ефективній гетерокоагуляції на першій стадії осадження (позитивний ζ -потенціал волокна і

заряду поверхні волокнистого матеріалу. На рис. 4a наведена залежність зміни опору волокнистого матеріалу від кількості стадій осадження поліаніліну при реалізації процесу багатостадійної гетерокоагуляції наночастинок поліаніліну. Кожна наступна стадія осадження проводилася з зміною типу ПАР, і як наслідок, зі зміною заряду поверхні наночастинок поліаніліну.

Рис. 4 Зміна опору волокнистого матеріалу від кількості стадій осадження поліаніліну при реалізації процесу багатостадійної гетерокоагуляції наночастинок поліаніліну. R_n / R_1 – відношення опору при n послідовних стадій осадження поліаніліну до опору при одному осажденні. **a** – осадження з зміною типу ПАР, **b** – осадження при незмінності типу ПАР, використаного при отриманні дисперсії поліаніліну.

негативний через адсорбцію на поверхні наночастинок поліаніліну сульфонулу ζ -потенціал наночастинок). При проведенні наступних стадій осадження відбувається уповільнення зменшення опору зі збільшенням кількості стадій при негативному ζ -потенціалі наночастинок і поверхні волокна (і, мабуть, з прогресуючим зменшенням кількості сорбованого поліаніліну).

Зміна опору при багатостадійному нанесенні наночастинок поліаніліну з незмінним використанням аніоноактивної ПАР (рис. 4b) подібна адсорбції по БЕТ [25–27] – енергія взаємодії першого шару адсорбованих молекул достатньо більша, ніж енергія взаємодії між кожним наступним шаром.

При розгляданні полімолекулярної адсорбції в рамках рівняння БЕТ використовується модель виникаючої структури адсорбційного шару, що представлена на рис. 5. Відповідно до цієї моделі процес адсорбції полягає в одночасній адсорбції на поверхні твердого тіла і на раніше адсорбованих молекулах

першого, другого, третього або інших шарів [25–27]. При нанесенні наступного шару наночастинок поліаніліну, синтезованих у присутності сульфанола, триває «добудовування» існуючого шару або шарів осаджених частинок на підложці і виникнення нового шару в процесі зворотної гетерокоагуляції частинок на поверхні підложки. У зв'язку з цим модель будови шару БЕТ застосовна із заміною молекул на наночастинок.

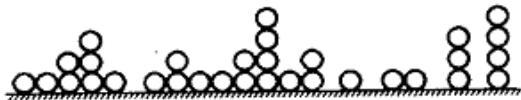


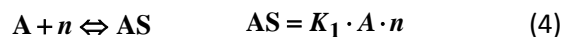
Рис. 5 Модель структури адсорбційного шару фізичної адсорбції за БЕТ на поверхні твердого тіла [27].

При виведенні рівняння БЕТ для адсорбції, рівняння, що збігається за формою з рівнянням БЕТ, для процесів, пов'язаних з абсорбцією низькомолекулярних речовин, часто використовується квазіхімічний підхід [27–32]. Оскільки модель БЕТ застосовна для процесу багат шарової зворотної гетерокоагуляції наночастинок на поверхні підложки, то алгоритм виведення рівняння прийнятий у роботах [30–32], використаний для описання подібного процесу гетерокоагуляції.

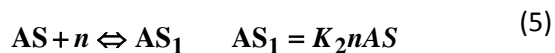
Якщо перший шар осаджений на поверхню за рахунок гетерокоагуляції, то згодом на кожній наночастиці першого шару можуть осідати нові наночастинок. Якщо прийняти, що система монодисперсна і кожна частинка має тільки дві «функціональні» групи, то ми отримуємо статистичний набір наночастинок у вигляді «ланцюгів» різної довжини з наночастинок на активних центрах підложки, які вже містять наночастинок першого шару.

Розглянемо гетерокоагуляцію монодисперсних наночастинок на 1 молі активних центрів A , яка супроводжується зворотнім багат шаровим осадженням наночастинок на поверхню підложки. У роботі приймається: координаційне число активного центру підложки рівним 1. Першим актом є взаємодія n наночастинок з

підложкою з утворенням AS (перша координаційна сфера відповідно до моделі БЕТ [25–27]) з константою рівноваги K_1 :



Визначимо середньочисленну довжину ланцюга наночастинок в моделі БЕТ, які приєднані до першого шару частинок. Приєднання частинки до AS в ході зворотного процесу взаємодії наночастинок у другому шарі з константою рівноваги K_2 :



Наступна стадія:



$$AS_2 = K_2 AS_1 n = K_2^2 \cdot n^2 AS$$

Для стадії взаємодії наночастинок приймається:

$$K_2 \cong K_3 \cong \dots \cong K_i$$

Аналогічний підхід використовується при розгляданні ланцюга зворотних реакцій при поліконденсації в припущенні незалежності реакційної здатності кінцевих груп від ступеня полімеризації [33–36]. Для i -тої стадії (i -того шару) кількості наночастинок в ланцюгу (при $\alpha = K_2 n$, $\beta = AS$):



$$AS_i = AS \cdot K_2^i \cdot n^i = \beta \alpha^i$$

Для i -тої стадії (кожен наступний шар заповнюється менш щільно, рис. 5):

$$\alpha = n K_2 = n \frac{AS_i}{n AS_{i-1}} = \frac{AS_i}{AS_{i-1}} < 1 \quad (8)$$

Сумарне число ланцюгів різної довжини, утворених взаємодіючими наночастинок (модель БЕТ, рис. 5), які починаються в першому шарі наночастинок, що осіли на поверхню при зворотній гетерокоагуляції, визначається сумою $\sum_{i=1}^{\infty} AS_i = \beta \sum_{i=1}^{\infty} \alpha^i$, яка при $\alpha < 1$ дорівнює [37]:

$$\beta \sum_{i=1}^{\infty} \alpha^i = \beta \left(\sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i - 1 \right) = \beta \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (9)$$

Сумарна кількість наночастинок a , що осажені на поверхні у вигляді ланцюгів різної довжини (в ланцюг не входять наночастинок, які безпосередньо контактують з поверхнею) при багат шаровій зворотній гетерокоагуляції визначається

$$\beta \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot \alpha^i$$

сумою, яка при $\alpha < 1$ дорівнює [37]:

$$a = \beta \sum_{i=1}^{\infty} i \cdot \alpha^i = \beta \sum_{i=0}^{\infty} i \cdot \alpha^i = \beta \frac{\alpha}{(1-\alpha)^2} \quad (10)$$

У моделі БЕТ довжина «ланцюга» молекул адсорбованої речовини у активного центра, статистично змінюється (рис. 5) від одного активного центру до іншого [25–27]. У роботі приймається, що при зворотній гетерокоагуляції на активному центрі ситуація аналогічна. Середньочисленна кількість наночастинок N_n , що входить до послідовності (ланцюга) наночастинок:

$$N_n = \beta \sum_{i=1}^{\infty} i \alpha^i / \beta \sum_{i=1}^{\infty} \alpha^i = 1/(1-\alpha) \quad (11)$$

Отриманий вище вираз для середньочисленної кількості наночастинок в ланцюзі збігається з аналогічним за смыслом рівнянням для визначення середньочисленного ступеня полімеризації при поліконденсації [33, 34]. В даному випадку поверхня, утворена наночастинами, що осіли за механізмом гетерокоагуляції, не буде «гладкою», самоорганізація наночастинок призведе до утворення поверхні з виступами довільної довжини.

Через статистичний розподіл наночастинок за розмірами в реальній дисперсії шорсткість поверхні буде додатково збільшуватися. Існує істотна відмінність між коагуляцією в об'ємі дисперсії однорідних частинок і гетерокоагуляцією на поверхні [21]. Різні умови стійкості в об'ємі дисперсії (аналогічні за природою, наприклад, за знаком і величиною константи Гамакера, за знаком і величиною ζ -потенціалу) і поблизу поверхні – підложки (різні за природою, наприклад, за знаком і величиною константи Гамакера, за знаком і величиною ζ -потенціалу). Звідси потенційно різна стійкість до агрегації наночастинок в об'ємі і стійкість до осідання при гетерокоагуляції на поверхню підложки.

На підставі цієї відмінності можна зробити два висновки. *Перший* – структурний, при зневажаючи низькій швидкості коагуляції в об'ємі через високу агрегативну стійкість в об'ємі дисперсії утворення багат шарової коагуляційної структури на поверхні підложки малоймовірно, тому що, по суті, багат шаровість визначається можливістю агрегування наночастинок одна з одною з утворенням просторової коагуляційної структури на підложці (перший шар – взаємодія наночастинок безпосередньо з підложкою). *Другий* – технологічний. Відомі золі стійкі до коагуляції протягом десятків років, проте, збільшення концентрації частинок дисперсної фази, присутність електролітів у колоїдному розчині зменшує агрегативну стійкість частинок в об'ємі дисперсії. Ступінь агрегативної стійкості в об'ємі дисперсії повинна бути достатньою для технологічної стійкості: система стійка протягом часу достатнього для здійснення нанотехнології (фарбування, покриття, виробництво датчиків, елементів електронних схем тощо): отримання нанодисперсії і її гетерокоагуляція на поверхні з реалізацією заданої структури. Таким чином, приклад системи ПКА – поліанілін [38] показує, що зміна балансу сил тяжіння і відштовхування наночастинок за рахунок зміни умов коагуляції в об'ємі і гетерокоагуляції (осадження) на поверхні підложки може сприяти отриманню різних структур у процесі самоорганізації наночастинок і, відповідно, утворенню наносистем з різними властивостями.

Список використаних джерел:

1. Аксіментьєва О.І. Електрохімічні методи синтезу та провідність спряжених полімерів. – Львів: Світ, 1998. – 154 С.
2. Conductive electroactive polymers: intelligent materials systems.-2nd ed. / Ed. Gordon G. et al. // London, CRC Press LLC, 2003.
3. Nanostructured conductive polymers / ed. Ali Eftekhari // Wiltshire, Great Britain: - John Wiley & Sons Ltd, 2010. – 810 p.
4. Nanoparticle assemblies and superstructures / ed. N.A. Kotov // - Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. – 614 p.
5. Yoon Seob. Self-assembly and nanotechnology: a force balance approach / Yoon Seob Lee.Y. S. Lee // New Jersey. – John Wiley & Sons, Inc., 2008. – 361 p.

6. Leite E.R. Crystallization and Growth of Colloidal Nanocrystals / E.R. Leite, C. Ribeiro // N.Y.: Springer, 2012. – 101 p.
7. Born P. G. Crystallization of Nanoscaled Colloids. – N.Y.: Springer, 2013. – 138 p.
8. Редько Я.В. Отримання електропровідних властивостей текстильних матеріалів в процесі опорядження [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук : 05.18.19. / Редько Яна Володимирівна. – К., 2008. – 158 с.
9. Песков Н. П. Физико-химические основы коллоидной науки. – М.: ОНТИ, 1934. – 325 с.
10. Зонтаг Г. Коагуляция и устойчивость дисперсных систем / Г. Зонтаг, К. Штрэнге // Л.: Химия, 1973. – 152 с.
11. Поверхностно-активные вещества: Справочник / А.А. Абрамзон, В.В. Бочаров, Г. М. Гаевой и др. // Л.: Химия, 1979. – 376 с.
12. Nanofibers and nanotechnology in textiles / Ed. P. J. Brown and K. Stevens // Cambridge, England: Woodhead Publishing Limited, 2007. – 518 p.
13. Липатов С.М. Физико-химия коллоидов.– Л.: ГНТИ, 1948. – 372 с.
14. Колмогоров А.Н. О логарифмически-нормальном законе распределения частиц при дроблении. – АН СССР. – 1941. – Т.31. – №2. – С. 99–101.
15. Герасимов Я. И. Курс физической химии, т. 1. / Я.И. Герасимов, В.П. Древинг, Е.Н. Еремин, А.В. Киселев, В.П. Лебедев, Г.М. Панченков, А.И. Шлыгин // М.: Химия, 1964. – 624 с.
16. Colloidal Particles at Liquid Interfaces // Ed. V.P. Binks, T.S. Horozov. – Cambridge: Cambridge University Press, 2006. – 503 p.
17. Self-Organized Morphology in Nanostructured Materials // Ed. K. Al-Shamery, J. Parisi. – Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. – 175 p.
18. Travas-Sejdic J. Self-assembled polyaniline thin films: Comparison of poly(styrene sulphonate) and oligonucleotide as a polyanion / J. Travas-Sejdic, R. Soman, H. Peng // Thin Solid Films. – 2006. – Vol. 497. – P. 96–102.
19. Фридрихсберг Д. А. Курс коллоидной химии. – Л.: Химия, 1984. – 368 с.
20. Kralchevsky P.A. Chemical physics of colloid systems and interface / P.A. Kralchevsky, K.D. Danov, N.D. Denkov // Handbook of Surface and Colloid Chemistry. – New York – CRC Press, 2002. – Chapter 5. – P. 137–344.
21. Дерягин Б.В. Стабильность коллоидных систем (Теоретические аспекты) / Успехи химии. – 1979. – Т.48. – №4. – С. 675–721.
22. Романкевич О.В. Изотерма абсорбции при образовании сольватов сорбат-полимер // Доп. НАН України. – 2006. – №4. – С.148–151.
23. Кричевский Г.Е. Химическая технология текстильных материалов / Г.Е. Кричевский, М.В. Корчагин, А.В. Сенахов // М.: Легпромбытиздат, 1985. – 640 с.
24. Multilayer Thin Films / Ed. G. Decher, J. V. Schlenoff // Weinheim. – Wiley–VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., 2003. – 524 p.
25. Брунауэр С. Адсорбция газов и паров. Т.1. Физическая адсорбция. – М.: Издательский центр «ИЗДАТЕЛЬСТВО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК», 1948. – 781 с.
26. Gregg S.J. Adsorption, surface area and porosity / S.J. Gregg, K.S.W. Sing // London: Academic Press, Inc., 1982. – 303 p.
27. Карнаузов А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. – Новосибирск: Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. – 470 с.
28. Laatikainen M. General sorbtion isotherm for swelling materials / M. Laatikainen, M. Lindström // Acta Polytechn. Scand. Chem. Technol. and Met. Ser. – 1987. – N. 178. – P. 105–116.
29. Ключев Л.Е. Квазихимическая модель сорбционного равновесия в системах с набухающими полимерными сорбентами / Л.Е.Ключев, С.Ф.Гребенников //Журн. физ. химии. 1996. – Т.70. – №11. – С. 2053–2058.
30. Романкевич О.В. Уравнение абсорбции паров низкомолекулярных веществ их растворами // Доп. НАН України. – 2007. – №1. – С.152–156.
31. Романкевич О.В. Абсорбция паров аморфными полимерами // Химические волокна. – 2008. – №5 – С. 28–30.
32. Романкевич О.В. Сорбция в гетерогенных полимерных системах // Фазовые процессы в гетерогенных полимерных системах. – Киев: Наукова думка, 2012. – С. 108–131.
33. Коршак В.В. Синтез и исследование высокомолекулярных соединений / В.В. Коршак, С.Р. Рафиков // Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1949. – 446 с.
34. Бреслер С.Е. Физика и химия макромолекул / С.Е. Бреслер, Б.Л. Ерусалимский // М. – Л.: Наука, 1965. – 509 с.
35. Соколов Л.Б. Основы синтеза полимеров методом поликонденсации. – М.: Химия, 1979. – 263 с.
36. Романкевич О.В. Равновесие капролактамп-поликапроамид. // Вісник КНУТД – 2003. – №1. – С. 59–62
37. Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм рядов и произведений. М.: ОГИЗ, 1948. – 400 с.
38. Пат. 102413 (UA), МПК D06M 15/00. Спосіб отримання електропровідного волокнистого матеріалу / Редько Я.В., Романкевич О.В. – № а201106310; заявл. 19.05.2011; опубл. 10.07.2013, Бюл. № 13. – 6 с.