



УДК 541.64

DOI <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.10.2024.7>

ВПЛИВ МІНЕРАЛЬНОГО НАПОВНЮВАЧА СИЛІЦІЙ(IV) ОКСИДУ, МОДИФІКОВАНОГО НЕОРГАНІЧНИМИ СПОЛУКАМИ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЇХ КОМПЗИТІВ З ПОЛІАНІЛІНОМ

Г. В. Мартинюк¹, О. І. Аксіментьєва²

Вивчено фізико-хімічні закономірності формування і синтезовано методом полімеризації *in situ* зразки поліфункціональних органо-неорганічних нанокмпозитів на основі полімерної матриці – спряженого поліаміноарену (поліаніліну) і наночастинок SiO₂, (марка АЕ-300) модифікованих сполуками титан(IV) оксиду (марка ТАС-7) і фосфор(III) хлориду (Ф-2.1).

З'ясовано, що використання модифікованих неорганічними сполуками наночастинок силіцій(IV) оксиду у складі органо-неорганічних нанокмпозицій на основі поліаніліну може не тільки змінити їх структуру, але й спричинити покращення їх фізико-хімічних характеристик.

Методом оптичної мікроскопії (мікроскоп «Microted» з цифровою фотокамерою «Nicon-2500»), досліджено особливості морфологічної будови дисперсії модифікованого силіцій(IV) оксиду та композиту ПАН/НСІ- SiO₂. Питому електропровідність досліджуваних композитів у пресованих зразках визначали за стандартним 2-х контактним методом при температурі T = 293 К, а також встановлено зв'язок електричних властивостей зі структурою композитів.

Встановлено оптимальний склад модифікованих неорганічними сполуками нанокластерів SiO₂ (1–4 % мас.) для отримання нанокмпозитів з прогнозованими електричними властивостями. Показано, що при вмісті силіцій(IV) оксиду в межах 1–4 мас. % відбувається збільшення питомої електропровідності композитів, при цьому введення модифікованих наночастинок SiO₂ сприяє стабілізації питомого опору поліаніліну

Підвищення електропровідності поліаніліну за наявності модифікованого неорганічними сполуками силіцій(IV) оксиду може бути зумовлено процесами структурування колоїдної дисперсії SiO₂ з утворенням просторової трьохмірної сітки, в яку включаються ланцюги електропровідного полімеру.

Ключові слова: органо-неорганічні нанокмпозити, нанокластери, полімеризація *in situ*, наночастинок силіцій(IV) оксиду, фізико-хімічні характеристики.

¹ доктор хімічних наук, доцент,
професор кафедри природничих наук
(Рівненський державний гуманітарний університет, м. Рівне)
e-mail: galmart@ukr.net
ORCID: 0000-0001-6842-5601

² доктор хімічних наук, професор,
професор кафедри фізичної та колоїдної хімії
(Львівський національний університет імені Івана Франка, м. Львів)
e-mail: aksimen@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3836-9607

EFFECT OF MINERAL FILLER SILICA (IV) OXIDE MODIFIED WITH INORGANIC COMPOUNDS ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF THEIR COMPOSITES WITH POLYANILINE

G. V. Martyniuk, O. I. Aksimentyeva

The physico-chemical laws of formation were studied and samples of multifunctional organic-inorganic nanocomposites based on a polymer matrix – conjugated polyaminoarene (polyaniline) and SiO₂ (brand AE-300) nanoparticles modified with compounds of titanium(IV) oxide (brand TAS-7) and phosphorus(III) chloride (brand F-2.1) were synthesized by the in situ polymerization method.

It was found that the use of silicon(IV) oxide nanoparticles modified by inorganic compounds in the composition of organic-inorganic nanocomposites based on polyaniline can not only change their structure, but also cause an improvement in their physico-chemical characteristics.

The peculiarities of the morphological structure of the dispersion of modified silicon(IV) oxide and PANi/HCl-SiO₂ composite were investigated using the method of optical microscopy («Micromed» microscope with a digital camera «Nikon-2500»). The specific electrical conductivity of the studied composites in pressed samples was determined according to the standard 2-x by the contact method at a temperature of T = 293 K, and the relationship between the electrical properties and the structure of the composites was established.

The optimal composition of SiO₂ nanoclusters modified with inorganic compounds (1–4% by mass) for obtaining nanocomposites with predicted electrical properties was established.

It is shown that the silica content of 1–4% causes an increasing of composite conductivity; moreover the introduction of silica contributes to the stabilization of the polyaniline

An increase in the electrical conductivity of polyaniline in the presence of silicon(IV) oxide modified with inorganic compounds can be due to the processes of structuring the SiO₂ colloidal dispersion with the formation of a spatial three-dimensional network, which includes the chains of the conductive polymer.

Key words: organic-inorganic nanocomposites, nanoclusters, in situ polymerization, silicon(IV) oxide nanoparticles, physical and chemical characteristics.

Вступ

Стрімкий розвиток науки і техніки призвів до появи «інтелектуальних», або «розумних», полімерних матеріалів, які, завдяки багатофункціональним властивостям, простоті обробки чутливості до зовнішніх впливів, є надзвичайно перспективними для сучасних технологій (Мартинюк, 2024).

Важливого значення набувають розробка та дослідження нових високодисперсних композиційних матеріалів на основі полімерів, легованих або наповнених органічними і неорганічними компонентами, зокрема, сполуками перехідних металів або їх оксидами (Опайнич та ін., 2012; Phan-Ayisigi & Yesil-Celiktas, 2018; Aksimentyeva et al., 2020a; Aksimentyeva et al., 2020b).

Тому серед полімерних композитів, особливо в останні роки, великого значення набули наногібридні полімер-неорганічні композити (Park et al., 2013), тобто гібридні органо-неорганічні нанокompозитні структури на основі електропровідних полімерів та напівпровідникових мінеральних наповнювачів оксидного типу, а саме нанокластери кремнеземів або силіцій-оксидні матеріалів (Філоненко і Лобанов, 2010; Аксіментьєва та ін., 2017).

Введення нанорозмірних наповнювачів до складу композитів з електропровідними полімерами дає змогу керувати електричними властивостями цих полімерів, їх сенсорною чутливістю та іншими фізико-хімічними характеристиками (Liberman et al., 2014; Meer et al., 2015).

Матеріал і методи

Досліджено вплив наночастинок силіцій(IV) оксиду, модифікованих неорганічними сполуками на електричні властивості (питомий опір та провідність, активаційні параметри провідності їх композитів з поліаніліном (ПАН)) з метою створення нових наноматеріалів з прогнозованими характеристиками.

Для вивчення електричних властивостей композитів на основі ПАНу з силіцій(IV) оксидом було використано аеросил – 300, модифікований титан(IV) оксидом (марка ТАС-7) та фосфор(III) хлоридом (марка Ф-2.1) (Li et al., 2005; Bogatyrev et al., 2010; Аксіментьєва та ін., 2015; Vapat et al., 2016).

Аналогічно до композитів, наповнених полімерними наповнювачами, методом окисної полімеризації *in situ* було сформовано гібридні композити поліаніліну з немодифікованими та модифікованими наночастинами силіцій(IV) оксиду (рис. 1)

(Остапович і Семенюк, 2008; Paul & Robeson, 2008; Liu, 2008; Аксіментьєва та ін., 2015).

Результати та їх обговорення

Морфологічну структуру утвореної полімерної дисперсії силіцій(IV) оксиду в хлоридній кислоті та композиту ПАН-ТАС-7 досліджено методом оптичної мікроскопії (мікроскоп «Micromed» з цифровою фотокамерою «Nicon-2500»). Модифікована оксидом титану(IV) дисперсія SiO_2 осаджена на тверду поверхню, має вигляд рівномірного щільного покриття (рис. 1, а) без окремих структурних утворень. А при формуванні органо-неорганічного композиту ПАН- SiO_2 утворюється переважно глобулярна структура, в якій частинки силіцій(IV) оксиду ніби обгорнуті полімерною оболонкою ПАН (рис. 1, б) (Аксіментьєва та ін., 2015). Сформований композитний матеріал має темно-зелене забарвлення, властиве для легованої хлоридною кислотою емераральдинової солі ПАН (Liu, 2008).

Отримані результати добре узгоджуються з даними спектрального аналізу, які подано в (Зарко та ін., 1988), згідно яких утворений композит ПАН- SiO_2 не є простою сумішшю ПАН з частинками нанодисперсного SiO_2 . Наночастинки SiO_2 виступають як ядро реакції, а взаємодія відбувається на межі поділу цих частинок і макромолекули поліаніліну.

Для вивчення впливу мінерального наповнювача на електричні властивості утворених композитів було синтезовано зразки кремнезему, з різним умістом SiO_2 з модифікованою та немодифікованою поверхнею.

Авторами (Bogatyrev et al., 1984; Li et al., 2005) було запропоновано механізм взаємодії пари фосфор(III) хлориду з пірогенною формою дисперсного кремнезему – аеро-

силом в інтервалі температур 200–300°C за умови, коли на поверхні SiO_2 присутні різні форми сорбованої води. Гідратована поверхня SiO_2 передбачає координаційне насичення атома Силіцію за рахунок утворення донорно-акцепторного зв'язку з Оксигеном міцно сорбованими молекулами води. В такому положенні сорбована вода може перешкоджати перебігу реакції згідно механізму $\text{SN}_1\text{-Si}$ з утворенням хлорсилільних груп і процес взаємодії повинен зміститися в сторону утворення групи Si-O-P (Bogatyrev et al., 1984).

Отримані результати дають можливість описувати процес взаємодії фосфор(III) хлориду з гідратованим дисперсним SiO_2 наступним чином: присутність на кремнеземі деякої кількості води, яка координувана атомом Силіцію, зміщує процес взаємодії в сторону утворення зв'язків Si-O-P з одночасним прискоренням даного процесу. Деяка кількість води може взаємодіяти з частиною груп P-Cl , утворюючи похідні фосфористої кислоти в гідрофосфорильній формі. Подальший процес гідролізу додатковою кількістю води повністю руйнує всі зв'язки, що залишилися. Процеси, які відбуваються можна представити у вигляді схеми 1 (Bogatyrev et al., 1984).

Фосфорилування поверхні SiO_2 та утворення хлорсиланольних груп можливо відбувається в результаті перебігу двох паралельних реакцій – нуклеофільне заміщення водню силанольної групи атомом Фосфору (1) та електрофільне заміщення гідроксиду силанольної групи атомом Хлору (2). В результаті внутрімолекулярного перегрупування (3) утворюється сполука складу $\text{O} = \text{P} - \text{Cl}$. Утворені продукти подано на схемі 2 (Bogatyrev et al., 1984; Мартинюк, 2024).

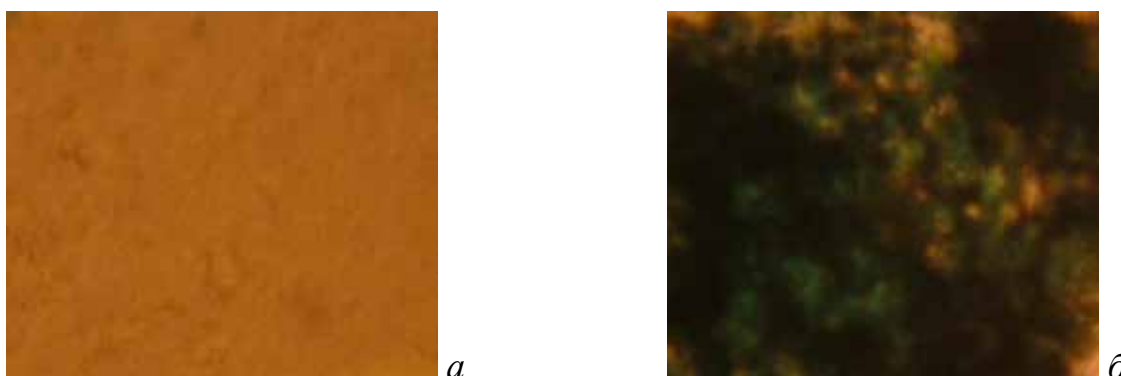


Рис. 1. Світлини колоїдної дисперсії модифікованого SiO_2 марки ТАС-7 (а) та композиту ПАН-ТАС-7 (б). Вміст SiO_2 – 4% (мас). Збільшення 150

Схема 1

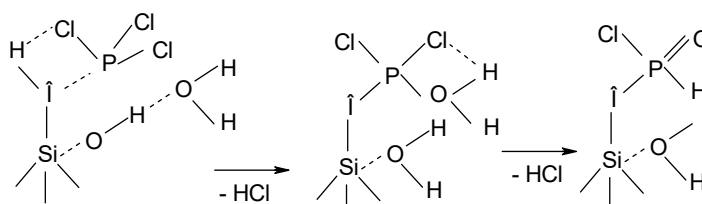
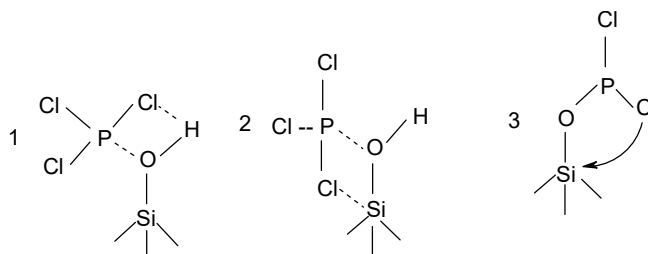


Схема 2



При вимірюванні питомого опору (ρ) при $T = 293 \text{ K}$ встановлено, що при 0,8–2,4 мас. % вмісті силіцій(IV) оксиду в композитах відбувається його зменшення, а при 2,4–4,0 мас. % – зростання порівняно з ненаповненим полімером (ПАН/НСІ) ($\rho = 107 \pm 2 \text{ Ом} \cdot \text{м}$). Аналогічні залежності спостерігалися при використанні модифікованих форм силіцій(IV) оксиду. Залежність питомого опору від вмісту різних форм SiO_2 подано в таблиці 1 (Аксiментьєва та ін., 2015).

За даними таблиці 1 встановлено, що зменшення питомого опору наповне-

ного композиту є більш помітним порівняно з ненаповненим. Так, при 2,4% (мас.) наповнені для композиту ПАН/НСІ- SiO_2 опір зменшується у 4 рази, для ПАН/НСІ- SiO_2 - TiO_2 – у 6 разів і близько 47 разів для ПАН/НСІ- SiO_2 - PCl_3 . Результати визначень наведено в таблиці 2.

Можна припустити, що суттєвий вплив наповнювача кремнезему модифікованих титан(IV) оксидом та фосфор(III) хлоридом SiO_2 , зумовлений їхніми електрофізичними властивостями (Zarko et al., 1983; Vogatyrev et al., 2010; Аксiментьєва та ін., 2015) і,

Таблиця 1

Електричні властивості гібридних композитів ПАН/НСІ- SiO_2

Вміст SiO_2 , мас. %	Питомий опір, $\rho_{293} \text{ Ом} \cdot \text{м}$		
	ПАН/НСІ- SiO_2 (АЕ -300)	ПАН/НСІ- SiO_2 - TiO_2 (ТАС-7)	ПАН/НСІ- SiO_2 - PCl_3 (Ф -2,1)
0,8	58,7	39,6	14,0
2,4	25,4	17,3	2,3
3,2	34,4	23,0	5,8
4,0	41,5	29,2	9,3
10,0	$1,5 \cdot 10^6$	$9,8 \cdot 10^5$	$1,1 \cdot 10^5$

*Похибка 1%

Таблиця 2

Параметри провідності гібридних композитів ПАН/НСІ- SiO_2 за вмісту наповнювача 2,4% (Аксiментьєва та ін., 2015)

Зразок	ρ_{293} , $\text{Ом} \cdot \text{м}$	ρ_0 , $\text{Ом} \cdot \text{м}$	E , еВ
ПАН-НСІ	107,1	9,07	$0,127 \pm 0,005$
ПАН-НСІ-АЕ (НАЕ)	25,4	3,82	$0,124 \pm 0,005$
ПАН-НСІ-(ТАС-7)	17,3	1,03	$0,132 \pm 0,005$
ПАН-НСІ-(Ф-2,1)	2,3	0,29	$0,107 \pm 0,004$

Таблиця 3

Залежність опору композиту ПАН–HCl/SiO₂ від температури.
Вміст SiO₂ становить 0,8% мас.

T, K	296	306	316	326	336	346	356	366	376	386
R, кОм	0,58	0,57	0,57	0,56	0,54	0,52	0,51	0,49	0,47	0,45

*Похибка 1%

відповідно, меншим питомим опором (ρ), порівняно з немодифікованим силіцій(IV) оксидом.

Встановлено, що отримані гібридні композити складу ПАН–HCl/SiO₂ поведуть себе як типові напівпровідники, а саме – зі збільшенням температури опір зменшується (табл. 3).

На основі лінійних ділянок залежностей, представлених в координатах $\ln(R/R_0) - 1/T$ було розраховано енергії активації перенесення заряду. Згідно з даними, поданими в таблиці 2, значення енергії активації перенесення заряду в композитах ($\epsilon_{ov} = 0,117-0,132\text{eV}$) незначно змінюється порівняно з ненаповненою композицією ПАН–HCl ($\epsilon_{ov} = 0,127\pm 0,005\text{ eV}$).

З'ясовано, що введення наповнювача модифікованого неорганічними сполуками SiO₂ у кількості 1–4% мас. призводить до зростання електропровідності, незважаючи на високий власний питомий опір, який становить (400–1000 Ом·м), а потім – її стабілізації. Стабілізація електропровідності відбувається в результаті зв'язування надлишкової вологи, модифікованим SiO₂, завдяки гідрофільним поверхневим функціональним групам, таким як Si–OH (Zhang et al., 2006; Філоненко і Лобанов, 2010). Це, в свою чергу, виключає участь молекул води в процесах протонування

емеральдинхлориду, і, відповідно, зміни електропровідності. Ймовірно, що наявність таких наповнювачів у структурі композиту з полімером ймовірно спричиняє зростання електропровідності внаслідок підвищеної адсорбції вологи (Bogatyrev & Chuiko, 1984).

З'ясовано, що модифікований неорганічними частинками силіцій(IV) оксид зумовлює зростання електропровідності композитів ПАН–HCl/SiO₂, ймовірно, за рахунок процесів структурування колоїдної дисперсії силіцій(IV) оксиду з утворенням просторової трьохмірної сітки Si–O зв'язків, утвореної SiO₄ – тетраедрами, в яку включені ланцюги електропровідного полімеру (Гончарук та ін., 2010).

Висновки

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що високодисперсні наповнювачі оксидного типу (SiO₂, NiO, TiO₂ та інші) модифіковані або немодифіковані неорганічними сполуками, введені до складу органо-неорганічних систем на основі поліаміноаренів, проявляють здатність впливати на фізико-хімічні параметри утворених композитів в результаті змін у структурі утворених композитів, тому їх можна рекомендувати як основу для створення чутливих елементів газових сенсорів для різноманітного застосування.

Список використаної літератури

- Аксіментьєва О., Богатирьов В., Мартинюк Г. та ін. Синтез і електричні властивості композитів поліаніліну з наночастинками силіцій(IV) оксиду. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія Хімія*. 2015. № 22. С. 11–14.
- Аксіментьєва О., Ціж Б., Чохань М. Сенсори контролю газових середовищ у харчовій промисловості та довіклі: монограф. Львів : Піраміда. 2017. 284 с.
- Гончарук О.В., Малишева М.А., Зарко В.І., Гриценко В.Ф. Структурування в дисперсіях пірогенного кремнезему в присутності неіндиферентних електролітів. *Наноструктурне матеріалознавство*. 2010. № 2. С. 16–23.
- Зарко В., Козуб Г., Сивалов Е. та ін. Кислотні центри поверхні пірогенного титано-кремнезему. *Український хімічний журнал*. 1988. № 54(11). С. 1144–1146.
- Мартинюк Г.В. Фізико-хімія полімер-полімерних композитів з контрольованими функціональними властивостями: дис...д-ра хім. наук: 02.00.04. Львів. 2024. 378 с.
- Опайнич І.Є., Аксіментьєва О.І., Дьяконов В.П., Пехота С., Уланський Я., Демченко П.Ю., Українець А.М. Структура і термодформаційні властивості гібридних композитів полімер-магнетит. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2012. № 1. С. 89–94. [Електронний ресурс]. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/138407> (дата звернення 31.08.2024).

- Остапович Б., Семенюк Ю. Полімеризація аніліну на поверхні дисперсного оксиду кремнію. *Вісник Львівського Університету. Сер. хім.* 2008. Вип. 49(2). С. 112–117.
- Філоненко О.В., Лобанов В.В. Структура та властивості нанокластерів кремнезему (Огляд). *Фізика і хімія твердого тіла.* 2010. Т. 11. № 1. С. 138–149.
- Aksimentyeva O., Martyniuk G., Horbenko Yu., Malynych S., Filipsonov R. Polymer-magnetite thermosetting composites with protective and antiradar functions. Special issue of the journal «Physical and chemical mechanics of materials», L.: 2020. P. 137–140.
- Aksimentyeva O.I., Chepkov I.B., Filipsonov R.V., Malynych S.Z. et al. Hybrid Composites with Low Reflection of IR Radiation. *Physics and chemistry of solid state.* 2020. Vol. 21. №. 4. P. 764–770. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.764-770>.
- Bapat G. Labade, Chaudhari A., Zinjarde S. Silica nanoparticle based techniques for extraction, detection, and degradation of pesticides. *Advances in Colloid and Interface Science.* 2016. № 237. P. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.06.001>.
- Bogatyrev V.M., Borisenko L.I., Oranskaya E.I. et al. Influence of synthesis conditions on the structural characteristics of NiO/SiO₂ oxide nanocomposites. *Surface.* 2010. Vol. 2. № 17. P. 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.06.044>.
- Bogatyrev V.M., Chuiko A.A. Interaction of phosphorus trichloride with dehydrated aerosil on its surface. *Ukrainian Chemistry Journal.* 1984. Vol. 50. № 8. P. 831–835.
- Horbenko Yu.Yu., Tsizh B.R., Aksimentyeva O.I., Olenych I.B., Bogatyrev V.M., Dzeryn M.R. Effect of the modified silica on the conductivity and sensory properties of polyaniline nanocomposites. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies.* 2019. Vol. 21. № 91. P. 29–37. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9106>.
- Ilhan-Ayisigi E., Yesil-Celiktas O. Silica-based organic-inorganic hybrid nanoparticles and nanoconjugates for improved anticancer drug delivery. *Engineering in Life Sciences.* 2018. Vol. 18. №. 12. P. 882–892. <https://doi.org/10.1002/elsc.201800038>.
- Li X., Wang G., Lib X. Surface modification of nano-SiO₂ particles using polyaniline. *Surface and Coatings Technology.* 2005. Vol. 197. P. 56–60. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.11.021>.
- Lieberman A., Mendez N., Trogler W.C., Kummel A.C. Synthesis and surface functionalization of silica nanoparticles for nanomedicine. *Surface Science Reports.* 2014. Vol. 69. № 5. P. 132–158. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2014.07.001>.
- Liu P. Preparation and characterization of conducting polyaniline/silica nanosheet composites, *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* 2008. Vol. 12. P. 9–13. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v47i3.13055>.
- Meer S., Kausar A., Iqbal T. Attributes of polymer and silica nanoparticle composites: A review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering.* 2015. Vol. 55. №. 8. P. 826–861. <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1103267>.
- Paul D.R., Robeson L.M. Polymer Nanotechnology: Nanocomposites, *Polymer.* 2008. № 49. P. 3187–3204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2008.04.017>.
- Park D.H., Hwang S.J., Oh J.M., et al. 2013. Polymer-inorganic supramolecular nanohybrids for red, white, green, and blue applications. *Progress in Polymer Science.* 2013. Vol. 38. № 10–11. P. 1442–1486. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.007>.
- Roosz N., Euvrard M., Lakard B., Cédric C., et al. Synthesis and characterization of polyaniline-silica composites: Raspberry vs core-shell structures. Where do we stand? *Journal of Colloid and Interface Science.* 2017. Vol. 502. P. 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.04.092>.
- Zhang D., Wu J., Zhang R.Q., Liu C. A family of stable silica fullerenes with fully coordinated structures, *The Journal of Physical Chemistry B.* 2006. Vol. 110. № 36. P. 17757–17762. <https://doi.org/10.1021/jp060204n>.

References

- Aksimentyeva, O., Boghatyrjov, V., & Martynjuk, G., et al. (2015). Syntez i elektrychni vlastyivosti kompozytiv polianilinu z nanochastynkami silicij(IV) oksydu [Synthesis and electrical properties of polyaniline composites with silicon(IV) oxide nanoparticles]. *Naukovi zapysky Ternopil'skogo nacional'nogho pedagoghichnogho universytetu imeni Volodymyra Ghnatjuka, Serija Khimija [Scientific notes of Ternopil National Pedagogical University named after Volodymyr Hnatyuk. Chemistry Series]*, 22, 11–14 [in Ukrainian].

Aksimentieva, O., Cizh, B., & Chokhanj M. (2017). Sensory kontrolju ghazovykh seredovyshh u kharchovij promyslovosti ta dovkilli: monohraf. [Gas environment control sensors in the food industry and the environment: monograph]. Lviv : Piramida [in Ukrainian].

Ghoncharuk, O.V., Malysheva, M.L., Zarko, V.I., & Ghrycenko, V.F. (2010). Strukturoutvorennja v dyspersijakh piroghennogho kremnezemu v prysutnosti neindyferentnykh elektrolitiv [Structure formation in pyrogenic silica dispersions in the presence of non-indifferent electrolytes]. *Nanostrukturne materialoznavstvo [Nanostructural materials science]*, 2, 16–23 [in Ukrainian].

Zarko, V., Kozub, Gh., & Syvalov, E., et al. (1988). Kyslotni centry poverkhni piroghennogho tytanokremnezemu [Acid centers of the surface of pyrogenic titano-silica]. *Ukrainskij Khimicheskij Zhurnal [Ukrainian Chemistry Journal]*, 54(11), 1144–1146 [in Ukrainian].

Martyniuk, G.V. (2024). Fyzyko-khimija polimer-polimernykh kompozytiv z kontroljovanyj funkcionalnymy vlastyvjamy [Physico-chemistry of polymer-polymer composites with controlled functional properties]. *Doctor's thesis*. Lviv. 378 p. [in Ukrainian].

Opainych, I.Ye., Aksimentieva, O.I., Diakonov, V.P., Piekhota, S., Ulanskyi, Ya., Demchenko, P. Yu., & Ukrainets, A.M. (2012). Struktura i termodeformatsiini vlastyvjosti hibrydnykh kompozytiv polimer-mahnetyt [Structure and thermal deformation properties of polymer-magnetite hybrid composites]. *Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv [Physico-chemical mechanics of materials]*, 1, 89–94. [Electronic resource] URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/138407> (access date 31.08.2024) [in Ukrainian].

Ostapovych, B., & Semenjuk, Ju. (2008). Polimeryzacija anilinu na poverkhni dyspers-nogho oksydu kremniju [Polymerization of aniline on the surface of dispersed silicon oxide]. *Visnyk Ljviv. Un-tu. Serija khim [Visnyk Lviv. Univ. Chem.]*, 49 (2), 112–117 [in Ukrainian].

Filonenko, O.V., & Lobanov, V.V. (2010). Ctruktura ta vlastyvjosti nanoklasteriv kremnezemu (Oghljad) [Structure and Properties of Silica Nanoclusters (Review)]. *Fyzyka i khimija tverdogho tila [Solid state physics and chemistry]*, 11 (1), 138–149 [in Ukrainian].

Aksimentyeva, O., Martyniuk, G., Horbenko, Yu., Malynych, S., & Filipsonov R. (2020). Polymer-magnetite thermosetting composites with protective and antiradar functions. *Special issue of the journal «Physical and chemical mechanics of materials»*. L.: pp. 137–140 [in English].

Aksimentyeva, O.I., Chepkov, I.B., Filipsonov, R.V., Malynych, S.Z., Gamernyk, R.V., Martyniuk, G.V., & Horbenko Yu.Yu. (2020). Hybrid Composites with Low Reflection of IR Radiation. *Physics and chemistry of solid state*, 21 (4), P. 764–770. <https://doi.org/10.15330/pcss.21.4.764-770> [in English].

Bapat, G., Labade, C., Chaudhari, A., & Zinjarde, S. (2016). Silica nanoparticle based techniques for extraction, detection, and degradation of pesticides. *Advances in Colloid and Interface Science*, 237, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.06.001> [in English].

Bogatyrev, V.M., Borisenko, L.I., & Oranskaya, E.I., et al. (2010). Influence of synthesis conditions on the structural characteristics of NiO/SiO₂ oxide nanocomposites. *Surface*, 2 (17), 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.06.044> [in English].

Bogatyrev, V.M., & Chuiko, A.A. (1984). Interaction of phosphorus trichloride with dehydrated aerosil on its surface. *Ukrainian Chemistry Journal*, 50 (8), 831–835 [in English].

Horbenko, Yu.Yu., Tsizh, B.R., Aksimentyeva, O.I., Olenych, I.B., Bogatyrev, V.M., & Dzeryn, M.R. (2019). Effect of the modified silica on the conductivity and sensory properties of polyaniline nanocomposites. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 21 (91), 29–37. <https://doi.org/10.32718/nvlvet-f9106> [in English].

Ilhan-Ayisigi, E., & Yesil-Celiktas, O. (2018). Silica-based organic-inorganic hybrid nanoparticles and nanoconjugates for improved anticancer drug delivery. *Engineering in Life Sciences*, 18 (2), 882–892. <https://doi.org/10.1002/elsc.201800038> [in English].

Li, X., Wang, G., & Lib, X. (2005). Surface modification of nano-SiO₂ particles using polyaniline. *Surface and Coatings Technology*, 197, 56–60. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v47i3.13055> [in English].

Liberman, A., Mendez, N., Trogler, W.C., & Kummel, A.C. (2014). Synthesis and surface functionalization of silica nanoparticles for nanomedicine. *Surface Science Reports*, 69 (5), 132–158. <https://doi.org/10.1016/j.surfrep.2014.07.001> [in English].

Liu, P. (2008). Preparation and characterization of conducting polyaniline/silica nanosheet composites, *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 12, 9–13. <https://doi.org/10.3329/bjsir.v47i3.13055> [in English].

Meer, S., Kausar, A., & Iqbal, T. (2015). Attributes of polymer and silica nanoparticle composites: A review. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55 (8), 826–861. <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1103267> [in English].

Paul, D.R., & Robeson, L.M. (2008). Polymer Nanotechnology: Nanocomposites, *Polymer*. 49, 3187–3204. <http://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2008.04.017> [in English].

Park, D.H., Hwang, S.J., & Oh, J.M., et al. (2013). Polymer-inorganic supramolecular nano-hybrids for red, white, green, and blue applications. *Progress in Polymer Science*, 8 (10–11), 1442–1486. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2013.05.007> [in English].

Roosz, N., Euvrard M., Lakard, B., & Cédric, et al. (2017). Synthesis and characterization of poly-aniline-silica composites: Raspberry vs core-shell structures. Where do we stand? *Journal of Colloid and Interface Science*, 502, 184–192. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2017.04.092> [in English].

Zhang, D., Wu, J., Zhang, R.Q., & Liu, C. (2006). A family of stable silica fullerenes with fully coordinated structures, *The Journal of Physical Chemistry B*, 110 (36), 17757–17762. <https://doi.org/10.1021/jp060204n> [in English].

Отримано: 18.10.2024

Прийнято: 18.11.2024