

УДК 541.183

DOI <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-7>

Наталія СТЕЦЕНКО

кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри технології оздоровчих продуктів, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0000-0001-6710-024X

Наталія БУБЛІЄНКО

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0000-0003-0299-4646

Scopus Author ID: 55683913900

Оксана САЛАВОР

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0000-0002-5784-3127

Scopus Author ID: 57219904957

Оксана НИЧИК

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0000-0002-4679-8607

Scopus Author ID: 57219905601

Ольга ТОГАЧИНСЬКА

кандидат сільськогосподарських наук, доцент, доцент кафедри екології та екоменеджменту, Національний університет харчових технологій, вул. Володимирська, 68, м. Київ, Україна, 01601

ORCID: 0000-0002-6672-6539

Бібліографічний опис статті: Стеценко, Н., Бублієнко, Н., Салавор, О., Ничик, О., Тогачинська, О. (2025). Адсорбційне очищення напівпродуктів цукрового виробництва палигорськітом та глауконітом. *Проблеми хімії та сталого розвитку*, 2, 51–56, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-7>

АДСОРБЦІЙНЕ ОЧИЩЕННЯ НАПІВПРОДУКТІВ ЦУКРОВОГО ВИРОБНИЦТВА ПАЛИГОРСЬКІТОМ ТА ГЛАУКОНІТОМ

Метою роботи є визначення адсорбційних властивостей природних дисперсних мінералів України палигорськіту та глауконіту у процесах видалення барвних речовин при виробництві цукру.

Досліджували ефективність адсорбційного очищення технологічних розчинів бурякоцукрового виробництва та модельних розчинів меляси з різною концентрацією барвних речовин при їх взаємодії з природними дисперсними мінералами України, а саме палигорськітом та глауконітом. Також визначали адсорбційні характеристики карбонату кальцію, який традиційно використовують для очищення напівпродуктів цукрового виробництва. Підготовку природних дисперсних мінералів здійснювали шляхом відмучування їх водних суспензій концентрацією 5 %. Відмиті зразки адсорбентів підсушували та встановлювали їх вологість. Адсорбційну рівновагу вивчали у діапазоні температур 20...80 °С. Значення вихідних та рівноважних концентрацій барвних речовин визначали спектрофотометричним методом. Ефективність видалення барвних речовин оцінювали за значеннями питомої адсорбції барвників та ефектом знебарвлення розчинів.

Встановлено, що ізотерми адсорбції барвних речовин природними дисперсними мінералами описуються рівнянням мономолекулярної адсорбції Ленгмюра. Силу сорбційної взаємодії оцінювали за значенням стандартного зменшення вільної енергії сорбції. Найкращі характеристики притаманні палигорськіту, децю гіршими є показники глауконіту сепарованого, глауконіту природного та карбонату кальцію. Було встановлено, що при підвищен-

ні температури спостерігається зменшення кількості адсорбованих барвних речовин, що вказує на переважно фізичний характер адсорбції. На підставі аналізу температурних залежностей були встановлені термодинамічні параметри процесів очищення. Вільна енергія Гіббса мало залежить від температури, а зміна ентропії має від'ємні значення, що вказує на упорядкування у системі під дією поля адсорбентів. Встановлено, що ефективність вилучення барвних речовин палігорськітом та глауконітом залежить від pH середовища і децю зменшується при зростанні лужності.

Ключові слова: адсорбція, природні дисперсні мінерали, барвні речовини, адсорбційне очищення, харчова промисловість, навколишнє середовище.

Natalia STETSENKO

Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Health Products Technology, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601
ORCID: 0000-0001-6710-024X

Natalia BUBLIENKO

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Eco-Management, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601
ORCID: 0000-0003-0299-4646
Scopus Author ID: 55683913900

Oksana SALAVOR

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Eco-Management, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601
ORCID: 0000-0002-5784-3127
Scopus Author ID: 57219904957

Oksana NYCHYK

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Eco-Management, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601
ORCID: 0000-0002-4679-8607
Scopus Author ID: 57219905601

Olga TOGACHYNSKA

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Ecology and Eco-Management, National University of Food Technologies, 68 Volodymyrska str., Kyiv, Ukraine, 01601
ORCID: 0000-0002-6672-6539

To cite this article: Stetsenko, N., Bublienko, N., Salavor, O., Nychyk, O., Togachynska, O. (2025). Adsorbtsiine ochyshchennia napivproduktiv tsukrovoho vyrobnytstva palyhorskitom ta hlaukonitom [Adsorption purification of sugar production intermediates with palygorskite and glauconite]. *Problems of chemistry and sustainable development*, 2, 51–56, doi: <https://doi.org/10.32782/pcsd-2025-2-7>

ADSORPTION PURIFICATION OF SUGAR PRODUCTION INTERMEDIATES WITH PLYGORSKITE AND GLAUCONITE

The aim of the work is to determine the adsorption properties of natural dispersed minerals of Ukraine, palygorskite and glauconite, in the processes of removing coloring substances in sugar production.

The efficiency of adsorption purification of technological solutions of beet sugar production, namely juice II saturation and model molasses solutions with different concentrations of coloring substances in their interaction with natural dispersed minerals of Ukraine, namely palygorskite and glauconite, was studied. The adsorption characteristics of calcium carbonate, which is traditionally used for the purification of intermediate products of sugar production, were also determined. The preparation of natural dispersed minerals was carried out by macerating their aqueous suspensions with a concentration of 5 %. The washed samples of adsorbents were dried and their humidity was determined. The adsorption equilibrium was studied in the temperature range of 20...80 °C. The values of the initial and equilibrium concentrations of

coloring substances were determined by spectrophotometric method. The efficiency of dye removal was estimated by the values of specific adsorption of dyes and the decolorization effect of solutions.

It was established that the adsorption isotherms of dyes by natural dispersed minerals are described by the Langmuir equation of monomolecular adsorption. The strength of the sorption interaction was estimated by the value of the standard decrease in the free energy of sorption. The best characteristics are inherent in palygorskite, the indicators of separated glauconite, calcium carbonate and natural glauconite are somewhat worse. It was found that with increasing temperature, a decrease in the amount of adsorbed dyes is observed, which indicates a predominantly physical nature of adsorption. Based on the analysis of temperature dependences, the thermodynamic parameters of the purification processes were established. The Gibbs free energy depends little on temperature, and the change in entropy had negative values, which indicates ordering in the system under the action of the adsorbent field. It has been established that the efficiency of extracting dyes by palygorskite and glauconite depends on the pH of the medium and decreases slightly with increasing alkalinity.

Key words: adsorption, natural dispersed minerals, dyes, adsorption purification, food industry, environment.

Актуальність проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій. Природні глинисті мінерали тривалий час вивчаються як сорбенти для очищення питних, технологічних та стічних вод (Kang et al, 2022), а також як ефективні біоіндикатори (Gonzalez & Pokrovsky, 2014), що є чутливими до екологічної чистоти літосфери, гідросфери та атмосфери. Важливими перевагами використання природних мінеральних сорбентів є невисока вартість, доступність та поширеність на території України. Зокрема, на балансі Державного комітету запасів України знаходиться і розробляється 5 родовищ глинистих природних мінералів із загальним запасом понад 100 млн. т (Фіалковська, 2021). Серед них найбільш відомим є Черкаське родовище (104,7 млн. т.), а також Горбське (6,8 млн. т), Кунцевське (0,55 млн. т), Пиживське (0,113 млн. т) та Бережанське (0,426 млн. т).

Природні дисперсні мінерали належать до групи шаруватих алюмосилікатів, які складають близько 75 % осадової частини земної кори (Фролова & Шунькін, 2021). Вони володіють низкою унікальних властивостей, таких як термостійкість, розвинена поверхня, здатність до іонного обміну, наявність поверхневих активних центрів різної природи, мікропоровата структура, хороші фільтраційні властивості. Завдяки таким характеристикам вони знаходять широке застосування у харчових технологіях для відокремлення сполук різної природи, очищення соків (Матко, Костенко, Мельник & Марценюк, 2008), спирту та водно-спиртових розчинів (Мельник, Манк & Марцін, 2004), рослинних олій (Фіалковська, 2021) та інших середовищ.

Процес адсорбції має велике практичне значення у цукровій галузі. Якість білого кристалічного цукру, його чистота та забарвленість

суттєво залежать від ефективності адсорбційного видалення барвних речовин та інших нецукрів. Тому актуальним завданням є вивчення перспектив застосування природних дисперсних мінералів України у технології цукру.

Метою досліджень є визначення адсорбційних властивостей природних дисперсних мінералів України палигорськіту та глауконіту у процесах видалення барвних речовин при виробництві цукру.

Виклад основного матеріалу дослідження. У роботі досліджували ефективність адсорбційного очищення технологічних розчинів буряко-цукрового виробництва та модельних розчинів меляси з різною концентрацією барвних речовин при їх взаємодії з природними дисперсними мінералами України, а саме палигорськітом та глауконітом. Для порівняння визначали адсорбційні характеристики карбонату кальцію, який традиційно використовують для очищення напівпродуктів цукрового виробництва. Підготовку природних дисперсних мінералів здійснювали шляхом відмучування їх водних суспензій концентрацією 5 %. Відмиті зразки адсорбентів підсушували та встановлювали їх вологість. Адсорбційну рівновагу вивчали у діапазоні температур 20...80 °С. Значення вихідних та рівноважних концентрацій барвних речовин визначали спектрофотометричним методом. Ефективність видалення барвних речовин оцінювали за значеннями питомої адсорбції барвників та ефектом знебарвлення розчинів.

Ізотерми адсорбції барвних речовин природними дисперсними мінералами та карбонатом кальцію представлені на рис. 1. Оскільки вони представляють собою криві, які є опуклими стосовно вісі рівноважних концентрацій, можна зробити висновок про високу спорідненість

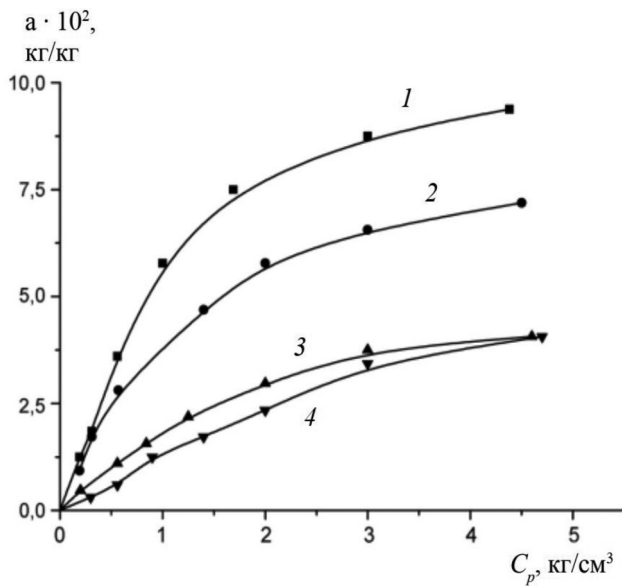


Рис. 1. Ізотерми адсорбції барвних речовин цукрового виробництва природними дисперсними мінералами: 1 – палигорськіт, 2 – глауконіт сепарований, 3 – глауконіт природний, 4 – карбонат кальцію

барвних речовин до сорбентів та можливість їх ефективного видалення (Kalam, Abu-Khamsin & Patil, 2021). Встановлено, що ізотерми адсорбції барвних речовин природними дисперсними мінералами описуються рівнянням мономолекулярної адсорбції Ленгмюра (1):

$$\frac{C_p}{a} = \frac{1}{a_{\infty} \cdot b} + \frac{1}{a_{\infty}} \cdot C, \quad (1)$$

де C та C_p – концентрація барвних речовин у розчині та їх рівноважна концентрація відповідно, $\text{кг}/\text{м}^3$; b – параметр, що описує адсорбційний процес, $\text{м}^3/\text{кг}$; a – кількість адсорбованих барвних речовин, $\text{кг}/\text{кг}$; a_{∞} – максимальна кількість барвних речовин, що здатні поглинутися до певного часу, $\text{кг}/\text{кг}$.

Значення параметрів сорбційної рівноваги a_{∞} та b , які були розраховані за допомогою методу найменших квадратів, представлені у табл. 1.

Силу сорбційної взаємодії оцінювали за значенням стандартного зменшення вільної енергії сорбції $-\Delta F$ (Tran et al, 2021), яку розраховували за рівнянням (2). Отримані результати наведені у табл. 1.

$$-\Delta F = RT \cdot \ln K, \quad (2)$$

де K – константа сорбційної рівноваги, що визначалася за рівнянням (3):

$$K = b \cdot a_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (3)$$

де $a_{\text{H}_2\text{O}}$ – активність розчинника у воді.

Для розбавлених розчинів мольна доля розчинника (води) дорівнює 1, тоді й коефіцієнт активності розчинника буде дорівнювати 1 (Gonella et al, 2021). У такому випадку значення $a_{\text{H}_2\text{O}}$ можна замінити на концентрацію води, яка дорівнює 55,55 моль/л.

Встановлено, що найбільше значення a_{∞} характерне для палигорськіту, що можна пояснити будовою мінералу як представника шарувато-ланцюгових мінералів. Для них адсорбційні властивості визначаються типом пористості, а саме наявністю як первинних пор у вигляді цеолітних каналів у структурі, так і вторинної пористості, яка утворюється за рахунок агрегації частинок дисперсного мінералу у пористий простір пачок. Глауконіт має лише зовнішню адсорбційну поверхню, а його пористість зумовлена лише щільностями, які утворюються між частинками, що контактують. Тому його адсорбційна здатність менша, ніж у палигорськіту. Для всіх сорбентів значення стандартного зменшення вільної енергії сорбції знаходяться у межах $-13 \dots -14$ кДж/кг. Значення ефекту очищення підтверджують, що найбільш ефективно видалення барвних речовин відбувається при використанні палигорськіту, дещо гірше – при застосуванні сепарованого, природного глауконіту та карбонату кальцію.

Було досліджено температурну залежність адсорбційного видалення розчинених барвних речовин палигорськітом та глауконітом

Таблиця 1

Параметри адсорбції барвних речовин природними дисперсними мінералами та карбонатом кальцію

Адсорбент	a_{∞} , $\text{кг}/\text{кг}$	b , $\text{м}^3/\text{кг}$	$-\Delta F \times 10^3$, $\text{кДж}/\text{кг}$	Ефект знебарвлення, %
Палигорськіт	0,151	320,9	14,06	48,5
Глауконіт сепарований	0,120	246,7	13,52	38,2
Глауконіт природний	0,080	208,4	13,01	36,1
Карбонат кальцію	0,065	227,5	13,22	34,2

у діапазоні температур від 293 до 373 К та встановлено, що з підвищенням температури спостерігається зменшення кількості адсорбованих барвних речовини, що вказує на переважно фізичний характер адсорбції. При визначенні термодинамічних характеристик процесу використовували рівняння Гіббса–Гельмгольца (4):

$$\Delta G^0 = -Q + T \cdot \Delta S^0, \quad (4)$$

де ΔG^0 – стандартне зменшення вільної енергії адсорбції, кДж/кг; Q – теплота адсорбції, кДж /кг; T – температура, К; ΔS^0 – зміна ентропії, кДж/(кг · К).

Ізостеричні теплоти адсорбції визначали за рівнянням Клаузіуса–Клапейрона (5):

$$Q = R \left[\frac{\partial(\ln C)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \right]_a. \quad (5)$$

Зміну ентропії адсорбції розраховували за рівнянням (6):

$$\Delta S^0 = -Q^0/T + R \cdot \ln K. \quad (6)$$

Результати розрахунків представлені у табл. 2.

Отримані дані свідчать, що значення вільної енергії Гіббса не значно залежить від температури. Зміна ентропії адсорбції в усіх випадках

має від'ємне значення, що вказує на часткове упорядкування в адсорбованій фазі під дією поля адсорбенту.

Оскільки в технології цукру видалення барвних речовин відбувається у лужному середовищі, було досліджено вплив рН на ефективність вилучення барвних речовин палигорськітом та глауконітом, результати якого представлені у табл. 3.

При підвищенні лужності розчинів ефективність видалення барвних речовин цукрового виробництва зменшується. Це можна пояснити значенням електрокінетичного потенціалу барвних речовин, який набуває найбільших значень при рН понад 9 одиниць (Оляньська & Цирульнікова, 2016). За таких умов барвні речовини мають найбільшу стійкість, що негативно впливає на їх адсорбційне видалення природними сорбентами.

Висновки і перспективи подальших досліджень. При проведенні досліджень було встановлено, що палигорськіт та глауконіт є ефективними адсорбентами для видалення барвних речовин із напівпродуктів цукрового виробництва. Адсорбція переважно має фізичний характер та описується рівнянням Ленгмюра. Підвищення температури та висока

Таблиця 2

Термодинамічні параметри адсорбції барвних речовин цукрового виробництва палигорськітом та глауконітом

Адсорбент	Температура, К	$-\Delta G^0$, кДж/кг	$-\Delta S^0$, кДж/(кг · К)	Q , кДж /кг
Палигорськіт	293	6,34	0,05	8,35
	353	8,30	0,05	
	373	9,30	0,05	
Глауконіт сепарований	293	4,03	0,04	7,84
	353	5,63	0,04	
	373	6,28	0,04	
Глауконіт природний	293	3,88	0,04	7,69
	353	5,48	0,04	
	373	6,28	0,04	

Таблиця 3

Вплив рН середовища на питому адсорбцію та ефект знебарвлення розчинів

Адсорбент	рН 20	Питома адсорбція, $a \cdot 10^2$, кг/кг	Ефект знебарвлення, %
Палигорськіт	6,5	1,19	48,5
	9,0	1,09	39,5
	11,2	0,99	32,3
Глауконіт сепарований	6,5	0,99	38,2
	9,0	0,95	32,0
	11,2	0,85	27,7
Глауконіт природний	6,5	0,71	36,1
	9,0	0,69	22,6
	11,2	0,60	19,4

лужність середовища негативно впливають на кількість вилучених барвних речовин, що потрібно враховувати при виборі місця введення сорбентів у технологічному процесі виробництва цукру.

Подальші дослідження будуть спрямовані на визначення можливості застосування природних дисперсних мінералів України для очищення стічних вод цукрових заводів, що є важливим завданням захисту навколишнього середовища.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Kang N., Zhou W., Qi Z., Li Y., Wang Z., Li Q., Lv K. Recent progress of natural mineral materials in environmental remediation. *Catalysts*. 2022. 12(9). P. 996.
2. Gonzalez A. G., Pokrovsky O. S. Metal adsorption on mosses: Toward a universal absorption model. *J. Coll. Interface Sci.* 2014. 415. P. 169–178.
3. Фіалковська Л. В. Ефективні способи очищення соняшникової олії від домішок. *Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету: електронне наукове фахове видання*. 2021. 11(2). С. 299–309.
4. Фролова Л. А., Шунькін І. С. Характеристика глинистих порід Полозького родовища. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2021. (3). С. 116–123.
5. Матко С. В., Костенко Є. Є., Мельник Л. М., Марценюк О. М. Сорбенти різних типів. *Харчова і переробна промисловість*. 2008. (8–9). С. 16–17.
6. Мельник Л. М., Манк В. В., Марцін І. І. Ефективність дії природних дисперсних мінералів в очищенні водно-спиртових розчинів. *Наукові праці НУХТ*. 2004. (15). С. 23–25.
7. Kalam S., Abu-Khamsin S. A., Kamal M. S., Patil S. Surfactant adsorption isotherms: A review. *ACS omega*. 2021. 6(48). P. 32342–32348.
8. Tran H. N., Lima E. C., Juang R. S., Bollinger J. C., Chao H. P. Thermodynamic parameters of liquid–phase adsorption process calculated from different equilibrium constants related to adsorption isotherms: A comparison study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2021. 9(6). P. 106674.
9. Gonella G., Backus E. H., Nagata Y., Bonthuis D. J., Loche P., Schlaich A., ... Bonn M. Water at charged interfaces. *Nature Reviews Chemistry*. 2021. 5(7). P. 466–485.
10. Оляньська С. П., Цирульнікова В. В. Використання флокулянтів як спосіб підвищення ефективності очищення дифузійного соку. *Цукор України*. 2016. (6–7). С. 18–26.

REFERENCES:

1. Kang, N., Zhou, W., Qi, Z., Li, Y., Wang, Z., Li, Q., & Lv, K. (2022). Recent progress of natural mineral materials in environmental remediation. *Catalysts*, 12(9), 996.
2. Gonzalez, A. G., & Pokrovsky, O. S. (2014). Metal adsorption on mosses: Toward a universal absorption model. *J. Coll. Interface Sci.*, (415), 169–178.
3. Fialkovska, L. V. (2021). Efektyvni sposoby ochyshchennia soniashnykovoi olii vid domishok [Effective ways to purify sunflower oil from impurities]. *Naukovyi visnyk Tavriiskoho derzhavnoho ahrotekhnolohichnoho universytetu: elektronne naukove fakhove vydannia – Scientific Bulletin of the Tavria State Agrotechnological University: electronic scientific professional publication*, 11(2), 299–309. [in Ukrainian].
4. Frolova, L. A., & Shunkin, I. S. (2021). Kharakterystyka hlynystykh porid Polozkoho rodovyscha [Characteristics of clay rocks of the Polog deposit]. *Tavriiskyi naukovyi visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky – Tavria Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences*, (3), 116–123. [in Ukrainian].
5. Matko, S. V., Kostenko Ye. Ye., Melnyk L. M., & Martseniuk O. M. (2008). Sorbenty riznykh typiv [Sorbents of various types]. *Kharchova i pererobna promyslovist – Food and processing industry*, (8–9), 16–17. [in Ukrainian].
6. Melnyk, L. M., Mank V. V., Martsin I. I. (2004). Efektyvnist dii pryrodnykh dyspersnykh mineraliv v ochyshchenni vodno-spyrtovykh rozchyniv [The effectiveness of natural dispersed minerals in the purification of aqueous-alcoholic solutions]. *Naukovi pratsi NUKhT – Scientific works of the NUFT*, (15), 23–25. [in Ukrainian].
7. `Kalam, S., Abu-Khamsin, S. A., Kamal, M. S., & Patil, S. (2021). Surfactant adsorption isotherms: A review. *ACS omega*, 6(48), 32342–32348.
8. Tran, H. N., Lima, E. C., Juang, R. S., Bollinger, J. C., & Chao, H. P. (2021). Thermodynamic parameters of liquid–phase adsorption process calculated from different equilibrium constants related to adsorption isotherms: A comparison study. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106674.
9. Gonella, G., Backus, E. H., Nagata, Y., Bonthuis, D. J., Loche, P., Schlaich, A.,... & Bonn, M. (2021). Water at charged interfaces. *Nature Reviews Chemistry*, 5(7), 466–485.
10. Olianska, S. P., & Tsyrułnikova, V. V. (2016). Vykorystannia flokuliantiv yak sposib pidvyshchennia efektyvnosti ochyshchennia dyfuziinoho souk [Using flocculants as a way to improve the efficiency of diffusion juice purification]. *Tsukor Ukrainy – Sugar of Ukraine*, (6–7), 18–26. [in Ukrainian].