

Полиакрил қышқылымен тұрақтандырылған магнетит-опока композиті

Г. Құрманғажы^{1*}, С.М. Тәжібаева¹,
Қ.Б. Мұсабеков¹, С.А. Сыдықбаева²,
Б.Е. Жақыпбаев³

¹Жаңа химиялық технологиялар және материалдар ҒЗИ, Алматы, Қазақстан

²І. Жансүгіров атындағы Жетісу мемлекеттік университеті, Талдықорған, Қазақстан

³М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан
*E-mail: gulnarkhank@gmail.com

Магнитті сорбенттерді еріткіште агрегациядан және ауадағы оттегімен тотығудан қорғау үшін және қасиеттері ерекше бірнеше компоненттерді бір материалда біріктіру үшін оларды беттік активті заттармен тұрақтандырады. Сонымен қатар олардың сорбциялық сыйымдылықтарын арттыру мақсатында полиэлектролиттерді қолданады.

Жұмыста Элмор әдісімен синтезделген магнетит-опока композиті аниондық полиэлектролит полиакрил қышқылымен тұрақтандырылып, полимерлі композит синтезделіп алынды. Тұрақтандырылған магнетит-опока композитін трансмиссиялық электрондық микроскопия әдісімен зерттеуде саздың кеңістік құрлымындағы магнетит бөлшектерінің пішіні мен өлшемдерінің өзгеретіні байқалды. Полиакрил қышқылымен тұрақтандыру композиттің ζ -потенциалының -18,5 мВ-тен -19,9 мВ-ке төмендетеді. Композит және тұрақтандырылған композиттің ζ -потенциалына орта рН әсері опока-магнетит композитте -4,2 мВ дан -32,6 мВ-ға, тұрақтандырылған композитте -11,9 мВ-тан -35,5 мВ аралығында ауысу байқалды. Композитті тұрақтандырудың адсорбцияға әсері метилен көгімен сипатталды және сорбция мөлшерін арттыратындығы байқалды. Адсорбция шамасы бояудың бастапқы және адсорбциядан кейінгі концентрацияларының айырымының адсорбент массасына қатынасы бойынша есептелді. Адсорбцияны Лэнгмюр және Фрейндлих бойынша өңдеу тұрақтандырудың тиімділігін көрсетті. Лэнгмюр бойынша метилен көгінің максималды адсорбциясы 152,73 мг/г құрайды. Фрейндлих тұрақтысы $1/n$ мәндері бойынша адсорбат пен адсорбент арасында жақсы үйлесімділік бар екенін көрсетеді.

Түйін сөздер: магнетит; опока; магнетит-опока композиті; полиакрил қышқылы; метилен көгі; адсорбция.

Композит магнетит-опока, стабилизированный полиакриловой кислотой

Г. Курмангажи^{1*}, С.М. Тажібаева¹,
К.Б. Мұсабеков¹, С.А. Сыдықбаева²,
Б.Е. Жақыпбаев³

¹НИИ Новых химических технологий и материалов, Алматы, Казахстан

²Жетысуский государственный университет имени И. Жансугурова, Талдықорған, Казахстан

³Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауэзова, Шымкент, Казахстан
*E-mail: gulnarkhank@gmail.com

Для предотвращения агрегации магнетитовых сорбентов в растворителе, защиты их от окисления кислородом в воздухе и соединения нескольких компонентов с их специфическими свойствами в одном материале проводят их стабилизацию поверхностно-активными веществами. Также в целях увеличения сорбционной емкости применяют полиэлектролиты.

В работе методом Элмора синтезирован композит магнетит-опока, стабилизированный анионным полиэлектролитом-полиакриловой кислотой. При исследовании стабилизированного композита магнетит-опока методом трансмиссионной электронной микроскопии обнаружено изменение размеров частиц магнетита в структуре глины. Стабилизация полиакриловой кислотой снижает величину ζ -потенциала композитов от -18,5 мВ до -19,9 мВ. С повышением рН среды ζ -потенциал композита опока – магнетит снижается от 4,2 мВ до -32,6 мВ, а в случае стабилизированного композита – от 11,9 мВ до -35,5 мВ. Показано, что стабилизация композита полимером повышает его сорбционную способность по отношению к метиленовому голубому. Величину адсорбции рассчитывали как отношение разности между начальной концентрацией красителя и концентрацией красителя после адсорбции к массе адсорбента. Обработка данных адсорбции по Лэнгмюру и Фрейндлиху подтверждает эффективность стабилизации. Максимальная адсорбция метиленового голубого по Лэнгмюру составляет 152,73 мг/г. Значение постоянной $1/n$ показывает совместимость между адсорбатом и адсорбентом.

Ключевые слова: магнетит; опока; композит магнетит-опока; полиакриловая кислота; метиленовый голубой; адсорбция.

Magnetite-gaize composite stabilized with polyacrylic acid

G. Kurmangazhy^{1*}, S.M. Tazhibayeva¹,
K.B. Musabekov¹, S.A. Sydykbayeva²,
B.E. Zhakipbaev³

¹Scientific Research Institute for New Chemical Technologies and Materials, Almaty, Kazakhstan

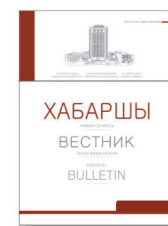
²Zhetysu state University named after I. Zhansugurov, Taldykorgan, Kazakhstan

³South-Kazakhstan State University named after M. Auezov, Shymkent, Kazakhstan
*E-mail: gulnarkhank@gmail.com

The surface-active substances stabilization are used to prevent aggregation of magnetite sorbents in the solvent, to protect against oxygen oxidation in the air as well as to combine several components with their specific properties in one material.

In this work, the Elmore method synthesized a composite of magnetite-gaize stabilized with polyelectrolyte - anionic polymer polyacrylic acid. The stabilized gaize-magnetite composite is considered by physical and chemical methods. When studying a stabilized magnetite-gaize composite using transmission electron microscopy, a change in the size of magnetite particles in the structure of a clay space with a molding form is observed. Stabilization with polyacrylic acid reduces the value of the ζ -potential of composites from -18.5 mV to -19.9 mV. The effect of medium pH on the potential work of the magnetite-gaize composite and stabilized composite was observed. Increasing of the pH value leads to decreasing of the ζ -potential of gaize-magnetite composite from 4.2 mV to -32.6 mV and from 11.9 mV to -35.5 mV in the cause of stabilized composite. The effect of the stabilization of the composite on the adsorption was characterized using methylene blue was observed. Processing of adsorption by Langmuir and Freundlich models shows the effectiveness of stabilization. The maximum adsorption of methylene blue by Langmuir is 152.73 mg/g. The Freundlich constant $1/n$ shows that there is high compatibility between the adsorbate and the adsorbent.

Keywords: magnetite; gaize; magnetite-gaize composite; polyacrylic acid; methylene blue; adsorption.



Полиакрил қышқылымен тұрақтандырылған магнетит-опока композиті

Г. Құрманғажы^{1*}, С.М. Тәжібаева¹, Қ.Б. Мұсабеков¹,
С.А. Сыдықбаева², Б.Е. Жақыпбаев³

¹Жаңа химиялық технологиялар және материалдар ҒЗИ, Алматы, Қазақстан

²І. Жансүгіров атындағы Жетісу мемлекеттік университеті, Талдықорған, Қазақстан

³М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент, Қазақстан

*E-mail: gulnarkhank@gmail.com

1. Кіріспе

Магниттік заттардың сорбенттер ретінде қолданылуы әдебиетте көп кездеседі, бірақ олардың практикада қолданылуы олардың агрегацияға бейімділігімен шектеледі [1,2]. Магнитті сорбенттердің сұйық ортада агрегациясын тежеу үшін оларды беттік активті заттармен тұрақтандырады [3-5]. Беттік активті заттар ретінде органикалық қосылыстар және синтетикалық немесе табиғи полимерлер қолданылады [4-9], сонымен қатар полимерлермен тұрақтандыру адсорбенттердің сорбциялық қасиеттеріне айтарлықтай әсерін тигізеді [10]. Соңғы жылдары биотехнология және медицина үшін магнитті полимерлі нанокомпозиттерді алу әдістері бойынша көптеген мәліметтер жарияланған [5-10]. Негізгі әдістер: біріншіден, нанобөлшектерді синтездеу үрдісіне полимер қосу арқылы тұрақтандыру [11,12], екінші тәсіл – жаңадан синтезделген магнетиттік бөлшектердің бетіне полимерді егуден тұрады [13]. Нанобөлшектерді сулы ерітінділерде полиэлектролиттермен тұрақтандыру органикалық макромолекулалардың функционалдық топтарының нанобөлшектер бетімен өзара әрекеттесу есебінен жүзеге асады. Мысалы, [10,14,15] жұмыстарда магнетитті полистирол, полиакрилқышқылы және α -аминонитрилмен тұрақтандырып, оның сорбциялық қасиетін зерттеген. Осыған орай жұмыс мақсаты опока-магнетит композитін (ОМК) полиакрил қышқылымен (ПАҚ) тұрақтандыру және адсорбциялық қасиеттерін зерттеу.

2. Тәжірибелік бөлім

Жұмыста Элмордың тұнбаға түсіру әдісі бойынша

Қыңырақ кенорны опокаларының суспензиясында жұмсақ жағдайда FeSO_4 және FeCl_3 тұздарының массалық қатынасы 1:2 мөлшерінде 13% аммиак суы (рН 9,5-11) қатысында жаңа синтезделген опока-магнетит суспензиясынаанионды полимер - полиакрил қышқылы (0,01 М, 50 мл) қосылып, 30 мин механикалық араластырып, 70°C температурада кептіріліп, қара қоңыр түсті композит бөлшектері синтезделді.

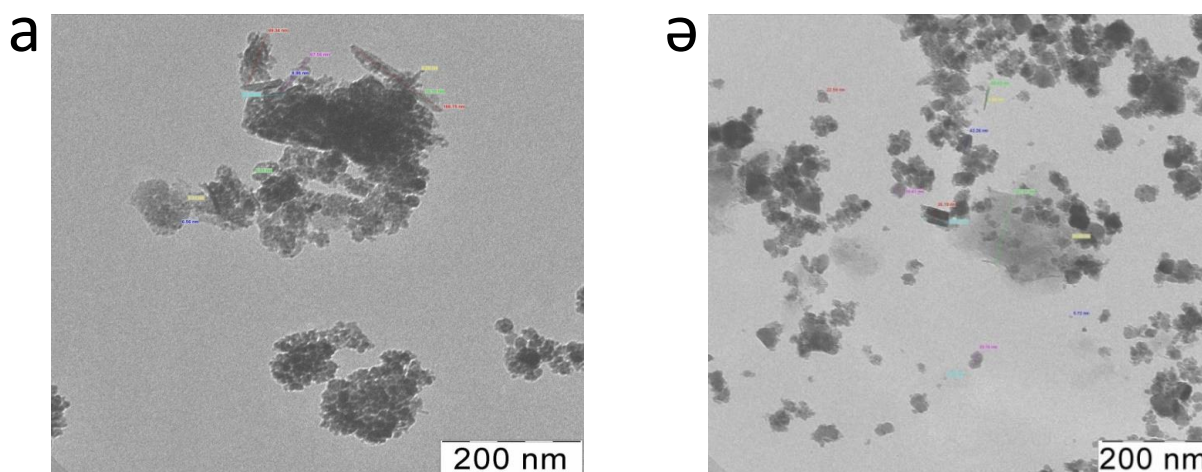
Тұрақтандырылған композит трансмиссиялық электронды микроскопия (LEO912 AB OMEGA), Фурье инфрақызыл (ИК) спектроскопия, спектрофотометрия (LEKI SS-1104), ZetasizerNano ZS лазерлік спектрометрия (Ұлыбритания) әдістерімен зерттелді.

Опока-магнетит және тұрақтандырылған опока-магнетит композиті бетінде метилен көгінің адсорбциясы анықталды. Адсорбция шамасы бояудың бастапқы және адсорбциядан кейінгі концентрацияларының айырымының адсорбент массасына қатынасы бойынша бойынша есептеліп, адсорбция мәліметтері Лэнгмюр және Фрейндлих модельдері бойынша өңделді [8,16,18,19].

3. Алынған нәтижелерді талдау

Опока-магнетит композитінің алыну ерекшеліктері [16,17] жұмыстарда толық сипатталған. Жаңадан синтезделген магнетит-опока композитіне 0,01% полиакрил қышқылын (ПАҚ) қосып, араластыру оларды агрегациядан сақтап, тұрақтандырылған бөлшектер алуға мүмкіндік берді.

Алынған магнетит-опока композиті трансмиссиялық электронды микроскопия (ТЭМ) әдісімен зерттелді (1-сурет). Опоканың қатпарланған құрылымындағы

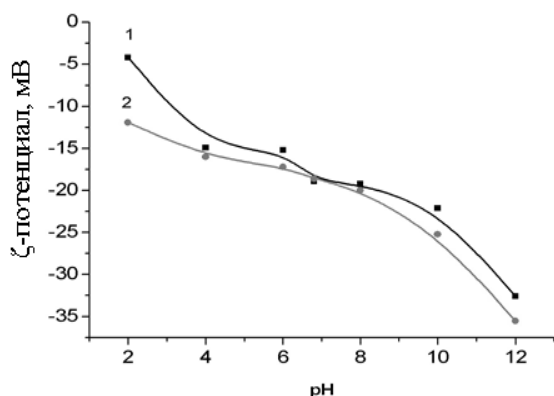
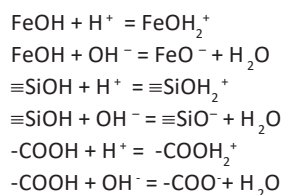


1-сурет – Опока-магнетит (а) және опока-магнетит-ПАҚ композитінің (ә) электронды микроскопиялық түсірілімдері

парақша аралық кеңістікте магнетит бөлшектерінің орналасуы 1-суретте (а) анық байқалады. Магнетит бөлшектерінің жеке жүргені байқалмайды, тек саз құрылымдарында иммобилизацияланғаны анық көрінеді. Ал полиакрил қышқылымен тұрақтандырылған магнетиттік композитінің (1-сурет, ә) бөлшектері бір-бірінен алшақ орналасады, олардың сфералық пішіндерінің бұзылғаны, сонымен қатар беткі қабатының полимермен қапталғаны көрініп тұр.

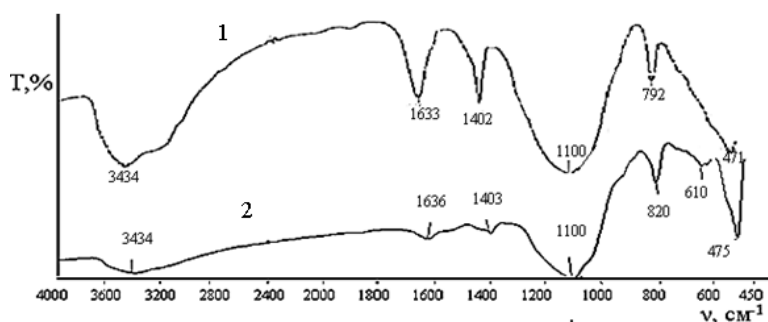
Опока-магнетит композитін полимермен тұрақтандырудың олардың ζ -потенциалына әсері зерттелді (2-сурет). ПАҚ-пен тұрақтандыру нәтижесінде опока-магнетит композитінің ζ -потенциалы -18,5 мВ-тан -19,9 мВ-ке дейін өзгереді. Орта рН-ын 2-ден 12-ге дейін көтеру олардың ζ -потенциал мәндерінің едәуір өзгеретіндігін көрсетті. рН мәнінің артуына байланысты ζ -потенциал магнетит-опока композитінде -4,2 мВ-тен -32,6 мВ-ке, ал

тұрақтандырылған композитте -11,9 мВ-тен -35,5 мВ-ке дейін өзгереді. [2,3] жұмысы бойынша хитозанмен тұрақтандырылған магнетитте рН-тың артуымен ζ -потенциалы теріс мәнінің артуына қарай өзгерген. Опока-магнетит композиттерінің зарядының терістігін саз құрамындағы $\equiv\text{SiOH}$ топтарының диссоциациясымен негіздеуге болады, ал ПАҚ-мен тұрақтандырылған композиттің ζ -потенциалының теріс мәнінің көбеюі -COOH функционал топтарының композит бетінде шоғырлануынан болуы мүмкін, яғни композитте теріс зарядты функционалдық топтардың саны артады. Сонымен қатар оң зарядты магнетит бөлшектерінің және теріс зарядты саз бетінің топтары көбейген сайын электростатикалық тартылысты күшейтуі композитті тұрақтандырады деп болжауға болады. Композит бетінде орта рН-ының өзгеруі ондағы зарядтардың мынадай өзгеруіне апарады:



2-сурет – Опока-магнетит (1) және опока-магнетит-ПАҚ композиттерінің (2) электрокинетикалық потенциалына орта рН-ның әсері

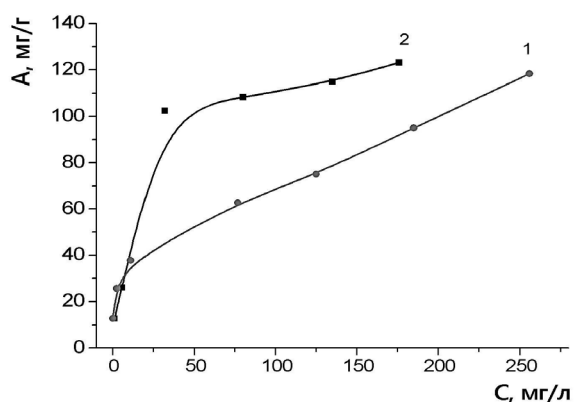
Тұрақтандырылған магнетит-опока композиті ИҚ-спектроскопия әдісімен зерттелді (3-сурет). Магнетит-опока композитінің 1-қисығында 3434 см^{-1} және 1636 см^{-1} аймағында судың және силикат топтарының О-Н байланыстарына сәйкес тербеліс шыңдары [17], сонымен қатар 2-қисықта 1402 см^{-1} жиілігінде Fe-O байланысының көрсететін көрнекі шыңдардың қарқындылығы қатты төмендеген. Опока минералындағы металл оксидтеріне Al-O тән 792 см^{-1} тербеліс жиілігі жойылып, оның орнына пәрменділігі төмен ПАҚ-на тән 820 және 610 см^{-1} тербеліс жиіліктері пайда болды, бұл тербеліс жиіліктері C-H және



3-сурет – Опока-магнетит (1) және опока-магнетит-ПАҚ композиттерінің (2) ИҚ-спектрлері

С-С байланыстарына сәйкес [17,20], яғни композиттің полиакрил қышқылымен байланысқанын көрсетеді. Полиакрил қышқылы композиттегі О-Н және Fe-O топтарымен сүтектік не электростатикалық тартылыс арқылы байланысуы мүмкін.

Опока-магнетиткомпозитін ПАҚ-мен тұрақтандыру композиттің сорбциялық қасиетін арттырып отыр (4-сурет). Метилен көгінің жоғарғы концентрациясында адсорбция мөлшері опока-магнетит композитінде (1-қисық) 118,34 мг/г және тұрақтандырылған композитте (2-қисық) 123,14 мг/г құрайды, яғни тұрақтандыру адсорбция мәнін 92,17%-



4-сурет – Метилен көгінің опока-магнетит (1) және опока- магнетит-ПАҚ композиттері бетіндегі (2) адсорбция изотермалары. T=298K

дан 95,91%-ға дейін арттырып отыр (4-сурет). [10] жұмыста осылай гумин қышқылымен тұрақтандырылған магнетитте метилен көгінің сорбциясы айтарлықтай жоғарылаған. Сонымен қатар тұрақтандырылған композитте адсорбция изотермасы магнетит-опока композитіне қарағанда дөңес, бұл сорбцияның еш қиындықсыз жүретіндігін және микрокеуекті адсорбенттерге тән мономолекулалық адсорбция механизмі бойынша өтетіндігін көрсетеді. Ал композиттегі изотерманың сүйір болып келуі адсорбцияда белгілі бір қиындықтар бар екендігін көрсетеді [21]. Оны бентониттің силикаттық топтарының магнетит бөлшектерімен тосқауылданып, адсорбциялық сайттар санының азаюымен негіздеуге болады. Бұндай композиттер бетінде полиэлектролит макромолекулаларының отыруы оларды ион алмасу реакцияларына қабілетті карбоксил функционал топтарымен байытады. Бұл жайт, өз кезегінде, беттің адсорбциялық қабілетін жоғарылатады, сол себепті 2-ші изотерманың басында адсорбция мәні күрт жоғарылайды.

Опока-магнетит және опока-магнетит-ПАҚ композитінің беттерінде метилен көгі адсорбциясы нәтижелерінен Лэнгмюр және Фрейндлих модельдері бойынша адсорбция параметрлері анықталды (1-кесте) [8,17]. Лэнгмюр мәліметтері эксперименттік мәліметтермен жақсы үйлеседі және метилен көгінің максималды адсорбциясы опока-магнетит композитінде 131,92 мг/г, ал тұрақтандырылған композитте 152,73 мг/г құрайды. Лэнгмюр бойынша адсорбциялық тепе-теңдіктің константасы тұрақтандырылған композитте жоғары, бұл

1-кесте – Метилен көгінің опока-магнетит композиттеріндегі адсорбция параметрлерін Лэнгмюр және Фрейндлих модельдері бойынша есептеу нәтижелері

Адсорбент	Лэнгмюр бойынша			Фрейндлих бойынша		
	A_{∞} , мг/г	K, л/мг	R^2	K, мг/г	1/n	R^2
Опока-магнетит	131,92	0,0299	0,912	11,22	0,59	0,934
Опока- магнетит-ПАҚ	152,73	0,035	0,969	4,75	0,67	0,936

адсорбциялық ынтықтылықтың тұрақтандырылған композитте әлдеқайда жоғары екенін көрсетеді. Фрейндлих тұрақтысы 1/n мәндері бойынша екі композиттеде метилен көгінің сорбциясы оңай жүретінін және адсорбатпен адсорбент арасында жақсы үйлесімділік бар екенін көруге болады [8,12,17]. Лэнгмюр бойынша есептелінген адсорбциялық сыйымдылықпен адсорбциялық тепе-теңдіктің константасының полимерлік қышқылмен тұрақтандырылған композитте жоғары болуы тұрақтандырудың тиімділігін көрсетеді.

4. Қорытынды

Опока-магнетит композитін полиакрил қышқылымен тұрақтандыру әрекеті жасалынды және алынған композит

физика-химиялық әдістермен зерттелді. Тұрақтандырудың адсорбцияға әсерін метилен көгімен зерттеу адсорбция мөлшерінің жоғарылайтындығын анықтады. Адсорбция мәліметтерін Лэнгмюр және Фрейндлих модельдері бойынша өңдеу тұрақтандырудың тиімділігін көрсетті.

Алғыс білдіру

Бұл жұмыс «Практикалық қолданылу мүмкіндігі кеңейтілген функционалдандырылған органикалық заттар мен материалдар жасау» атты БҒМ мақсатты қаржыландыру бағдарламасы шеңберінде орындалды, жобаның ЖТН: BR05236419.

Әдебиеттер

- Zhang W.-B., Deng M., Sun C.-X., Wang S.-B. Ultrasound-enhanced adsorption of chromium (VI) on Fe₃O₄ magnetic particles // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2014. – Vol.53. – P.333-339.
- Лютов А.А., Смирнов Ю.Г. Разработка технологической схемы очистки сточных вод от нефтяных загрязнений с использованием магнитных наночастиц // *Нефтегазовое дело: электронный научный журнал*. – 2013. – №4. – С.424-435.
- Казмирова К.О., Штыков С.Н. Синтез и функционализация магнитных наночастиц магнетита хитозаном // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*. – 2018. – №2. – С.126-133.
- Туранская С.П., Каминский А.Н., Кусяк Н.В., Туров В.В., Горбик П.П. Синтез, свойства и применение магнитоуправляемых адсорбентов // *Поверхность*. – 2012. – №4. – С.266-292.
- Gao Q., Luo D., Bai M., Chen Z.W., Feng Y.Q. Rapid determination of estrogens in milk samples based on magnetite nanoparticles/polypyrrole-magnetic solid-phase extraction coupled with liquid chromatography-tandem mass spectrometry // *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. – 2011. – Vol.59. – P.8543-8549.
- Wei X.L., Mo Z.H. Modified magnetite nanoparticles for colorimetric sensing of anionic surfactants in water // *Micro & Nano Letters*. – 2014. – Vol.9. – P.239-242.
- Pan J., Yao H., Li X., Wang B., Huo P., et al. Synthesis of chitosan/γ-Fe₂O₃/fly-ash-cenospheres composites for the fast removal of bisphenol A and 2,4,6-trichlorophenol from aqueous solutions // *Journal of Hazardous Materials*. – 2011. – Vol.190. – P.276-284.
- Jiang R., Fu Y.Q., Zhu H.Y., Yao J., Xiao L. Removal of methyl orange from aqueous solutions by magnetic magnetite/chitosan nanocomposite films: adsorption kinetics and equilibrium // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2012. – Vol.125. – P.540-549.
- Fang C., Xiong Z., Qin H., Huang G., Liu J., Ye M., Feng S., Zou H. One-pot synthesis of magnetic colloidal nanocrystal clusters coated with chitosan for selective enrichment of glycopeptides // *Analytica Chimica Acta*. – 2014. – Vol.841. – P.99-105.
- Zhang X., Zhang P., Wu Z., Zhang L., Zeng G., Zhou C. Adsorption of methylene blue onto humic acid-coated Fe₃O₄ nanoparticles // *Colloids and Surfaces A*. – 2013. – Vol.435. – P.85-90.
- Reddy D.H.K., Lee S.M. Application of magnetic chitosan composites for the removal of toxic metal and dyes from aqueous solutions // *Advances in Colloid and Interface Science*. – 2013. – Vol.201. – P.68-93.
- Akbar Mobaraki, Barahman Movassagh, and Babak Karimi. Magnetic solid sulfonic acid decorated with hydrophobic regulators: A combinatorial and magnetically separable catalyst for the synthesis of α-aminonitriles // *ACS Combinatorial Science*. – 2014. – Vol.16. – P.352-360.
- Cho D.-W., Jeon B.-H., Chon C.-M., Schwartz F.W. Magnetic chitosan composite for adsorption of cationic and anionic dyes in aqueous solution // *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. – 2015. – Vol.28. – P.60-68.
- Yu Z., Zhang X., Huang Y. Magnetic chitosan-iron(III) hydrogel as a fast and reusable adsorbent for chromium (VI) removal // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2013. – Vol.34. – P.11956-11966.
- Iijima M., Yonemochi Y., Tsukada M., Kamiya H. Microstructure control of iron hydroxide nanoparticles using surfactants with different molecular structures // *Journal of Colloid and Interface Science*. – 2006. – Vol.298. – P.202-208.
- Курмангажи Г., Сыдыкова А.И., Жакипбаев Б.Е., Тажикаева С.М., Мусабеков К.Б. Сорбционные свойства опок и их магнитных композитов // *Известия НАН РК*. – 2017. – №4. – С.51-55.
- Құрманғажы Г., Тажикаева С.М., Мусабеков Қ.Б., Жақыпбаев Б.Е. Метилен көгінің магнетит-опока композитінің бетіндегі адсорбциясының параметрлері // *ҚазҰУ хабаршысы. Химия сериясы*. – 2018. – №1. – Б.11-16.

- 18 Құрманғажы Г., Тәжібаева С.М., Мұсабеков Қ.Б., Жақыпбаев Б.Е. Сыдықбаева С.А. Опока сазының адсорбциялық қасиеттері // I. Жансүгіров атындағы Жетісу мемлекеттік университетінің хабаршысы. – 2019. – №4. – С.23-28.
- 19 Chen B., Zhao H., Chen S., Long F., Huang B., et al. A magnetically recyclable chitosan composite adsorbent functionalized with EDTA for simultaneous capture of anionic dye and heavy metals in complex wastewater // *Chemical Engineering Journal*. – 2019. – Vol.356. – P.69-80.
- 20 Тарасевич Б.Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. – М.: МГУ, 2012. – 55 с.
- 21 Никифоров И.А. Адсорбционные методы в экологии. Учебное пособие. – Саратов: СГУ, 2011. – 45 с.

References

- 1 Zhang WB, Deng M, Sun CX, Wang SB (2014) *Ind Eng Chem Res* 53:333-339. <http://doi.org/10.1021/ie401497k>
- 2 Lutoyev AA, Smirnov YG (2013) *Oil and Gas Business: electronic scientific journal* [Neftegazovoye delo: elektronnyy nauchnyy zhurnal] 4:424-435. (In Russian)
- 3 Kazimirova KO, Shtykov SN (2018) *Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Chemistry. Biology. Ecology* [Izvestiya Saratovskogo Universiteta. Novaya Seriya. Seriya: Khimiya. Biologiya. Ekologiya] 2:126-133. (In Russian)
- 4 Turanskaya SP, Kaminsky AN, Kuyak NV, Turov VV, Gorbik PP (2012) *Surface* [Poverkhnost'] 4:266-292. (In Russian)
- 5 Gao Q, Luo D, Bai M, Chen ZW, Feng YQ (2011) *J Agric Food Chem* 59:8543-8549. <https://doi.org/10.1021/jf201372r>
- 6 Wei XL, Mo ZH (2014) *Micro Nano Lett* 9:239-242. <https://doi.org/10.1049/mnl.2014.0037>
- 7 Pan J, Yao H, Li X, Wang B, Huo P, et al (2011) *J Hazard Mater* 190:276-284. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.03.046>
- 8 Jiang R, Fu YQ, Zhu HY, Yao J, Xiao L (2012) *J Appl Polym Sci* 125:540-549. <https://doi.org/10.1002/app.37003>
- 9 Fang C, Xiong Z, Qin H, Huang G, Liu J, et al (2014) *Anal Chim Acta* 84:99-105. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2014.05.037>
- 10 Zhang X, Zhang P, Wu Z, Zhang L, Zeng G, Zhou C (2013) *Colloid Surface A* 435:85-90. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2012.12.056>
- 11 Reddy DH, Lee SM (2013) *Adv Colloid Interfac* 202:68-93. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.10.002>
- 12 Akbar Mobaraki, Barahman Movassagh, Babak Karimi (2014) *ACS Comb Sci* 16:352-360. <https://doi.org/10.1021/co500022g>
- 13 Cho DW, Jeon BH, Chon CM, Schwartz FW (2015) *J Ind Eng Chem* 28:60-68. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2015.01.023>
- 14 Yu Z, Zhang X, Huang Y (2013) *Ind Eng Chem Res* 52:11956-11966. <https://doi.org/10.1021/ie400781n>
- 15 Iijima M, Yonemochi Y, Tsukada M, Kamiya H (2006) *J Colloid Interf Sci* 298:202-208. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2005.11.061>
- 16 Kurmangazy G, Sadykov A, Zhakipbayev E, Tazhibayeva S, Musabekov K (2017) *News of the NAS RK* [Izvestiya NAN RK] 4:51-55. (In Russian)
- 17 Kurmangazy G, Tazhibayeva SM, Musabekov K (2018) *Chem Bull Kaz Nat Univ* 1:10-15. (In Kazakh). <https://doi.org/10.15328/cb1002>
- 18 Kurmangazy G, Tazhibayeva S, Musabekov K, Zhakipbaev B, Sydykbayeva S (2019) *Bulletin of Zhansugurov Zhetysu State University* [I. Jansügirov atındaғы Jetisw memlekettik wniwersitetiniñ xabarşisi] 4:23-28. (In Kazakh)
- 19 Chen B, Zhao H, Chen S, Long F, Huang B, et al (2019) *Chem Eng J* 356:69-80. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.222>
- 20 Tarasevich BN (2012) IR spectra of the main classes of organic compounds. Resource materials. [ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы]. MSU, Moscow, Russia. (In Russian)
- 21 Nikiforov IA (2011) Adsorption methods in ecology. Textbook [Adsorbtsionnyye metody v ekologii. Uchebnoye posobiye]. SSU, Saratov, Russia. (In Russian)