

Күріш қауызынан алынған кремний оксидінің Cd^{2+} иондары бойынша сорбциялық қасиеттері мен адсорбция кинетикасы

І. Қуаныш^{1*}, Л.К. Мылтыкбаева¹, Н.В. Идрисов^{2,3}, Ч.Б. Даулбаев², Г.Е. Ергазиева¹

¹Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

²Ядролық физика институты, Ибрагимов к., 1, Алматы, Қазақстан

³Қ.И. Сәтбаев ат. Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, ұл. Сатпаев к., 22, Алматы, Қазақстан

МАҚАЛА ТУРАЛЫ АҚПАРАТ

Алынған
15.10.2025

Түзетілген түрде алынды
03.11.2025

Қабылданды
28.11.2025

Түйін сөздер:

кадмий иондары; адсорбция;
сорбент; күріш қауызы;
кремний диоксиді; ауыр
металдар; су тазалау;
кинетикалық модель

АҢДАТПА

Бұл зерттеуде күріш қауызынан алынған кремний диоксиді (SiO_2) сорбенттерінің Cd^{2+} иондарын адсорбциялау тиімділігі мен құрылымдық ерекшеліктері салыстырмалы түрде талданды. Зерттеу барысында екі түрлі сорбент үлгісі қолданылды: термиялық әдіспен алынған SiO_2 (650) үлгісі және сілтілі-тұндыру әдісі арқылы тазартылған SiO_2 таза (650) үлгісі қолданылды. Элементтік анализ талдау нәтижелері бойынша термиялық әдіспен алынған үлгіде 85,7% SiO_2 , ал сілтілі-тұндыру әдісі арқылы тазартылғанда 100% SiO_2 бар екені анықталды. Эксперимент нәтижесі бұл сорбенттердің SiO_2 (650) үлгісі 7,38 мг/г, ал SiO_2 таза (650) үлгісінің сорбциялық сыйымдылығы 7,46 мг/г екендігін көрсетті. Екі үлгі де 10-30 мин ішінде тепе-теңдікке жетіп, сорбция дәрежесі сәйкесінше 96,7% және 97,7% құрады. Кинетикалық талдау Cd^{2+} иондарының адсорбция процесі псевдо-екінші ретті модельге толық сәйкес келетінін айқындап, $R^2 > 0,999$ мәні хемосорбциялық механизмнің басым жүретіндігін дәлелдеді. Алынған нәтижелер SiO_2 (650) таза үлгісінің белсенді орталықтары көбірек болғандықтан, Cd^{2+} иондарын сорбциялау тиімділігі жоғары екендігін көрсетті. Жалпы алғанда, күріш қауызы негізінде синтезделген кремний диоксиді сорбенттері ауыр металдармен ластанған суларды тазалау үшін экологиялық қауіпсіз, қолжетімді әрі экономикалық жағынан тиімді материал болып саналады. Бұл зерттеудің нәтижелері болашақта күріш қауызынан алынған сорбенттердің құрылымын жетілдіру, олардың адсорбциялық мүмкіндігін арттыру және өнеркәсіптік жағдайда қолдану бағытындағы қосымша зерттеулерге негіз бола алады.

1. Кіріспе

Қазіргі таңда қоршаған ортаның, соның ішінде судың ауыр металдармен ластануы – өзекті экологиялық қауіп түрлерінің бірі. Жыл өткен сайын қоршаған ортаның ластануы артуда. Соның ішінде су экожүйені сақтауда үлкен рөл атқарады және сарқылатын ресурс болып табылады. Сол себепті, суды тазалайтын жаңа технологияны ойлап табу өзектілігін жоймайды. Кадмий (Cd^{2+}) суда өте кең таралған ластаушылардың бірі болып табылады. Оның жоғары биологиялық уыттылығы және жинақталу мүмкіндігі адам өміріне және қоршаған ортаға айтарлықтай қауіп төндіреді [1-3]. АҚШ Қоршаған ортаны қорғау агенттігінің мәліметінше, кадмийдің ауыз судағы рұқсат етілген дең-

гейі бір литрге 0.005 мг-ді құрайды [4-6]. Сорбция әдісін қолдану ауыз суды тазалап қана қоймай, өндіріс қалдықтарынан металды бөліп алуға да қажет. Ауыр металдардың органикалық ластаушы заттардан айырмашылығы, биологиялық ыдырамайды және қоршаған ортадан ағзаға өткенде жиналуға бейім. Бұл өсімдік, жануар және адам денсаулығына теріс әсерін тигізеді [7-10].

Қазіргі таңда суды ауыр металдардан тазалау үшін түрлі әдістер қолданылады. Келесі кестеде ол әдістердің артықшылықтары мен кемшіліктері берілген (1-кесте) [11-14].

Суды ауыр металдардың иондарынан тазалау әдістерінің ішінде кадмий ионын адсорбция әдісімен тазалау экономикалық тиімді әдіс болып табылады [15].

*Corresponding author: I. Kuanysh; E-mail address: inzhu.2017@gmail.com

Кесте 1. Ауыр металдардың иондарынан суды тазалау әдістері [11-14]

Әдістер	Артықшылығы	Кемшілігі
Фотокатализ	Ауыр металдардың комплекстерін ыдырата алады	Жабдықта қымбат инвестиция қажет
Фиторемедиация	Қоршаған ортаға зиянсыз	Баяу процесс, үлкен жерді қажет етеді
Химиялық тұндыру	Көптеген ауыр металдарды тиімді жояды, экономикалық тиімді	Тұнбаның пайда болуы
Электрохимиялық өңдеу	Химиялық заттарды аз қолдана отырып, тиімді өңдеу	Экономикалық қымбат
Коагуляция	Қалдықты ластағыштан оңай бөледі	Қосымша ластану туғызуы мүмкін
Мембраналық сүзу	Төмен қысымда тиімді және селективті бөлу	Экономикалық қымбат
Адсорбция	Кең pH аралығында қолдануға болады, жоғары тазалау тиімділігі, үнемді	Адсорбентті қайта қалпына келтіру қажет

Жұмыстың мақсаты – үлгінің құрамындағы кремний оксиді мөлшерінің оның Cd^{2+} иондары бойынша сорбциялық сыйымдылығына және адсорбция кинетикасына әсерін зерттеу.

2. Эксперименттік бөлім

Бұл үшін эксперименттік бөлімде екі адсорбент дайындалып, салыстырылды. Шикізат ретінде Алматы облысынан алынған күріш қауыздары таңдалды. Оны таңдау себебі, құрамында кремний диоксидінің мөлшері көп [16]. Жұмыста екі жолмен алынған кремний оксиді зерттелді. Алу әдістемесі төменде келтірілген.

1-ші әдістеме. Термиялық әдіс арқылы күріш қауызынан кремний диоксидін синтездеу үш кезеңнен тұрады: күріш қауызын тазалау, оны күйдіру және ұнтақтау.

1. Тазалау кезеңі – сорбенттерді шаң мен басқа ұсақ бөлшектерден тазарту болып табылады.

Алдымен, қауыз ірі бөлшектерден механикалық жолмен тазартылды. Содан кейін ағын сумен, кейіннен бірнеше рет дистилденген сумен жуылды. Бұл кезеңде қауыз ерігіш заттардан және органикалық қоспалардан тазартылды.

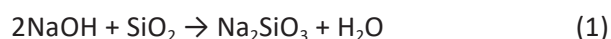
2. Күйдіру кезеңі – органикалық қосылыстарды жою мақсатында жасалатын кезең болып табылады.

Күйдіру процесі муфель пешінде жүргізілді. Бұл органикалық заттардың толық жанып кетуіне және аморфты кремнеземнің түзілуіне мүмкіндік береді. Алдымен тазартылған 50 г күріш қауызы $7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ жылдамдықта $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ температураға дейін қыздырылды. Сол температурада 240 мин ұсталды, кейін табиғи түрде бөлме температурасына дейін салқындатылды.

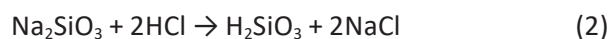
3. Ұнтақтау кезеңі – біртекті масса алу кезеңі болып табылады.

Күйдіруден алынған өнім 30 мин бойы шарлы диірменде ұнтақталды. Бұл арқылы бөлшектер біркелкі ұсақталады. Нәтижесінде өнімнің құрамындағы аморфты кремний диоксидінің үлесі 80-85%. Үлгінің белгіленуі SiO_2 (650).

2-ші әдістеме. Таза кремний диоксидін алу үшін сілтілі-тұндыру әдісі қолданылды. Ол үшін 20 г күйдірілген материал 200 мл 2М натрий гидроксидінің ерітіндісінде ерітіліп, $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ температурада магнитті араластырғышта 120 мин бойы араластырылды. Бұл кезеңде кремний диоксиді мен сілтінің әрекеттесуінен натрий силикаты түзілді (1-теңдеу). Өнім кеуектілігі 0.45 мкм болатын сүзгі қағазы арқылы сүзілді.



Алынған натрий силикаты ерітіндісіне біртіндеп 2М тұз қышқылының (HCl) ерітіндісі қосылды. pH мәні бейтарап 7-ге жеткенде, ақ түсті силикагель түзілді. Ерітінділердің pH мәні көп параметрлі су сапасын талдағыш PH-900 (BIOBASE, Қытай) көмегімен өлшенді. Алынған масса бірнеше сағатқа қалдырылды. Реакция 2-3 теңдеулермен сипатталады.



Соңғы кезеңде силикагель тұз қалдықтарынан толық тазарту үшін бірнеше рет дистилденген сумен жуылып, $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ -та толық құрғағанша кептірілді. Алынған үлгінің белгіленуі SiO_2 (650) таза.

Алынған үлгілердің судағы Cd^{2+} иондарын сорбциялауын зерттеу эксперименттері жүргізілді. Алдымен 5 мл фондық ерітінді құйылды, фондық ерітінді ретінде 0.05 М HCl ерітіндісіне 1 г/л сынап (II) нитратының ерітіндісінен 3-4 тамшы қосылды. Алдымен осы ерітіндінің потенциалы өлшенді. Одан кейін осы фондық ерітіндіге 0.1 мл үлгі ерітіндісі құйылып, өлшенді. Содан кейін стандартты 10 мг/л ерітіндіден 0.1 мл құйылып тағы потенциалы өлшенді. Бұл өлшеулер арқылы үлгідегі Cd^{2+} ионының концентрациясы есептелді. Эксперименттер сорбентті ерітіндіге әртүрлі уақытқа салу арқылы статикалық жағдайда жүргізілді. Эксперимент жүргізу жағдайы 2-кестеде көрсетілген.

Кесте 2. Эксперимент жүргізу жағдайы

Бастапқы концентрация Cd^{2+}	8,4 мг/л
Ерітіндінің көлемі	5 мл
Сорбенттің массасы	5,5 мг
Уақыт аралығы	10-40 мин
SiO_2 синтез температурасы	650 °C

Адсорбциядан кейінгі ерітіндідегі ионның концентрацияларын ескере отырып, сорбция тиімділігі формула (1) бойынша есептелді [17]:

$$R(\%) = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

мұндағы, R – сорбция дәрежесі, C_0 – бастапқы концентрация, C_t – соңғы концентрация.

3. Нәтижелер және оларды талқылау

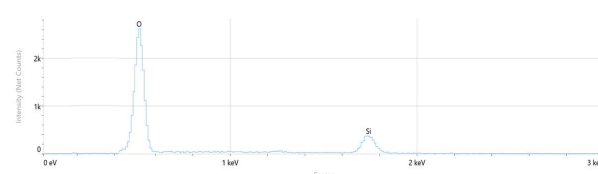
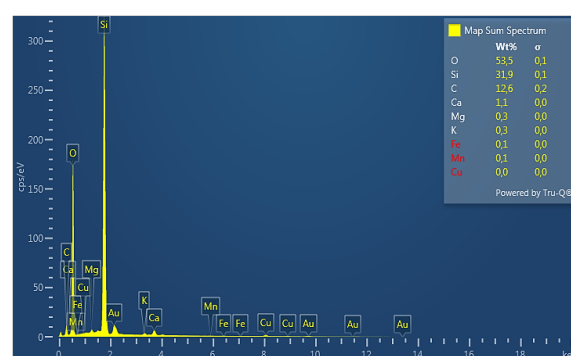
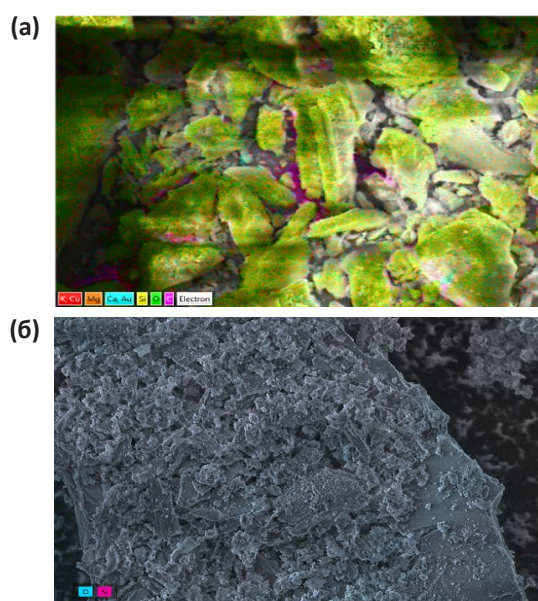
Термиялық әдіспен алынған SiO_2 (650) үлгісі және сілтілі-тұндыру әдісі арқылы тазартылған SiO_2 таза (650) үлгілері элементтік талдау (EDX) әдісімен зерттелді. Түсірілген фотосуреттер 1-суретте көрсетілген.

Элементтік талдау әдісінің нәтижелері бойынша SiO_2 (650) үлгісінде негізгі компонент SiO_2 -тан басқа, көміртек (12,6 салмақтық%), кальций (1,1 салмақтық%), калий (0,3 салмақтық%), магний (0,3 салмақтық%) және аз мөлшерде басқа қоспалар бар екенін көрсетті, яғни кремний оксидінің мөлшері 85,7%, ал, SiO_2 таза (650) үлгісінде бөгде элементтер анықталмай, 100% кремний оксидінің бар екенін көруге болады.

Келесі кезекте аталған үлгілердің кадмий ионы бойынша адсорбциялық қасиеттері зерттелді. Cd^{2+} ионының бастапқы концентрациясы 8,4 мг/л болатын 5 мл ерітіндіге 5,5 мг сорбент салынып, 10-40 мин арасында олардың адсорбциялық қасиеттері анықталды. Кадмийдің қалған концентрациясын анықтау нәтижелері мен есептелген сорбциялық сыйымдылық мәндері 3-кестеде көрсетілген. Сорбциялық сыйымдылықты формула (2) бойынша есептейміз [18].

$$q = \frac{(C_0 - C_e) \cdot V}{m} \quad (2)$$

мұндағы, q – сорбциялық сыйымдылық, C_0 мен C_e – Cd^{2+} бастапқы және соңғы концентрациялары (мг/л), V – ерітінді көлемі (л), m – сорбенттің массасы (г).



Сурет 1. SiO_2 үлгілерінің элементтік талдауы (EDX): (а) термиялық әдіспен алынған SiO_2 (650), (б) сілтілі-тұндыру әдісі арқылы тазартылған SiO_2 таза (650).

Кесте 3. Күріш қауызынан алынған SiO₂ (650 °C) кремний диоксидіндегі Cd²⁺ иондарының адсорбция нәтижесі

Сорбенттің ерітіндідегі уақыты (мин)	C ₀ (мг/л)	C _e (мг/л)	Адсорбцияланды (мг/л)	q (мг/г)	Сорбция дәрежесі (%)
10	8,4	0,28	8,12	7,38	96,7
30	8,4	0,31	8,09	7,35	96,3
35	8,4	0,315	8,09	7,35	96,3
40	8,4	0,52	7,88	7,16	93,8

Кесте 4. Күріш қауызынан алынған SiO₂ (650°C, таза) кремний диоксидіндегі Cd²⁺ иондарының адсорбция нәтижесі

Сорбенттің ерітіндідегі уақыты (мин)	C ₀ (мг/л)	C _e (мг/л)	Адсорбцияланды (мг/л)	q (мг/г)	Сорбция дәрежесі (%)
10	8,4	0,20	8,2	7,45	97,6
30	8,4	0,19	8,21	7,46	97,7
35	8,4	0,21	8,19	7,45	97,5
40	8,4	0,35	8,05	7,32	95,8

Осылайша, күріш қауызынан синтезделген кремний диоксидінің кадмий иондарын адсорбциялау тиімділігі анықталды зерттеу нәтижелері 3-4-кестелерде көрсетілген. Зерттеу нәтижелері бойынша SiO₂ (650) үлгісінде максималды сорбциялық сыйымдылық 7.38 мг/г құрады, сондай-ақ үлгідегі сорбция дәрежесі 10 минутта 96.7% мәнді көрсетті. Ал, SiO₂ (650, таза) үлгісінде максималды сорбциялық сыйымдылық 7.46 мг/г құрады, және үлгінің сорбция дәрежесі 30 мин 97.7% көрсетті.

Екі сорбентте де тепе-теңдік шамамен 10-30 мин аралығында орнайды, бұл сорбент бетінде белсенді орталықтардың көптігін және Cd²⁺ иондарының тиімді диффузиясын көрсетеді.

Байланысу уақытын 40 мин дейін ұзартқанда, сорбциялық сыйымдылықтың біртіндеп төмендеуі байқалады. Бұл құбылыс иондардың жартылай десорбциясымен немесе сорбент бетінде жүретін бәсекелі процестермен байланысты болуы мүмкін.

Алынған сорбциялық сыйымдылық мәндері (7,16-7,46 мг/г) күріш қауызы негізіндегі модификацияланбаған сорбенттерге арналған әдеби деректермен сәйкес келеді [19]. Зерттеулерге сәйкес [20], модификацияланбаған күріш қауызы мен одан алынған кремний диоксиді Cd²⁺ иондары бойынша 4,95-18,69 мг/г аралығындағы сорбциялық сыйымдылық көрсетеді, бұл синтез және алдын ала өңдеу жағдайларына байланысты өзгереді. Химиялық жолмен модификацияланған күріш қауызы (NaOH, ксанттармен, амин топтарымен өңдеу) айтарлықтай жоғары сыйымдылық

мәндерін көрсетеді – 11-139 мг/г, бұл алынған SiO₂-нің адсорбциялық қабілетін арттыру үшін оны әрі қарай модификациялаудың болашағы зор екенін дәлелдейді [21].

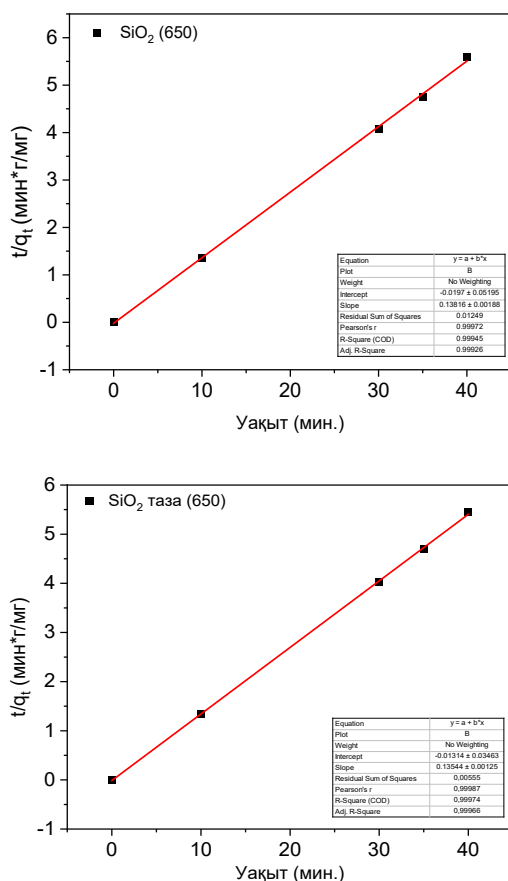
Cd²⁺ иондарының адсорбция кинетикасы. Адсорбция механизмін анықтау үшін тәжірибелік деректер псевдо-бірінші және псевдо-екінші ретті модельдерді пайдалана отырып өңделді. Псевдо-екінші ретті модель келесі теңдеумен сипатталады [22]:

$$t/q_t = 1/(k_2 \cdot q_e^2) + t/q_e$$

мұндағы, k_2 – адсорбция жылдамдығының константасы (г/(мг·мин)), q_e – тепе-теңдік сорбциялық сыйымдылық (мг/г).

Есептеу нәтижелері (2а және 2б суреттер) Cd²⁺ иондарының екі сорбентте де адсорбциясы псевдо-екінші ретті модельмен ең дәл сипатталатынын көрсетті және мұндағы корреляция коэффициенттері $R^2 > 0.999$. Бұл адсорбция процесінің шектеуші кезеңі химиялық адсорбция (хемосорбция) екенін, яғни кадмий иондары мен кремний оксиді бетінде орналасқан функционалдық топтар арасында ковалентті байланыстардың түзілуі арқылы жүретінін дәлелдейді [23].

Алынған деректер әдебиетпен сәйкес келеді [24, 25] SiO₂ таза (650) үшін адсорбция жылдамдығының константасы ($k_2 = 0.508$ г/(мг·мин)) SiO₂ (650) үлгісіне қарағанда жоғары ($k_2 = 0.318$ г/(мг·мин)), бұл тазартылған үлгіде тепе-теңдікке жылдамырақ жететінін көрсетеді.



Сурет 2. Әртүрлі SiO₂ мөлшері бар кремний оксидіндегі Cd²⁺ адсорбция реакциясының реттілігін анықтау t/qt мәнінің уақытқа тәуелділік графигі.

4. Қорытынды

Қорыта келгенде, элементтік талдау әдісінің нәтижелері бойынша SiO₂ (650) үлгісінде кремний оксидінің мөлшері 85,7%, ал, SiO₂ таза (650) үлгісінде бөгде элементтер анықталмай, 100% кремний оксидінің бар екені анықталды. 5 мл көлемдегі кадмий иондарына (Cd²⁺) қатысты екі түрлі кремний диоксидінің үлгісінің – SiO₂ (650) және SiO₂ таза (650) 5,5 мг алынып олардың адсорбциялық қасиеттері 10-30 мин аралығында зерттелді. Максималды сорбциялық сыйымдылық SiO₂ (650) сорбентінде 10 мин 7,38 мг/г және SiO₂ таза (650) сорбентінде 30 мин 7,46 мг/г құрап, сәйкесінше 96,7% және 97,7% сорбция дәрежесімен сипатталады.

Кинетикалық талдау нәтижелері Cd²⁺ иондарының екі сорбентте де адсорбциясы псевдо-екінші ретті модельге ($R^2 > 0,999$) сәйкес келетінін көрсетті, бұл кадмий иондары мен кремний диоксиді бетінде орналасқан силанол топтары ($\equiv\text{Si-OH}$) арасында коваленттік әрекеттесулердің қатысуымен жүретін хемосорбциялық механизмді білдіреді.

Адсорбция жылдамдығының константалары $k_1 = 0,318$ г/(мг·мин) SiO₂ (650) үшін және $k_2 = 0,508$ г/(мг·мин) SiO₂ таза (650) үшін болды, бұл тазартылған үлгінің тепе-теңдікке тезірек жететінін дәлелдейді.

SiO₂ таза (650) үлгісі жоғары сорбциялық сыйымдылық пен адсорбция кинетикасының жылдамдығын көрсетті. Бұл таза SiO₂ мөлшерінің жоғары болуымен және адсорбция үшін белсенді орталықтардың көбірек болуымен түсіндіріледі.

Алынған сорбциялық сыйымдылық мәндері (7,16-7,46 мг/г) күріш қауызы негізіндегі модификацияланбаған сорбенттерге арналған әдеби деректер диапазонында орналасқан және бетті функционалдық топтармен химиялық жолмен модификациялау арқылы едәуір арттырылуы мүмкін. Күріш қауызынан алынған SiO₂ сорбенттерді арзан және экологиялық таза адсорбент ретінде ауыр металдарды ауыз су құрамынан тазарту үшін қолдану экономикалық және экологиялық тұрғысынан өте маңызды болып табылады.

Алғыс

Зерттеу Қазақстан Республикасы Білім және ғылым министрлігінің Ғылым комитетінің №BR28712957 бағдарламасы шеңберінде жүзеге асырылды.

Әдебиеттер тізімі (ГОСТ)

- [1]. Feng J., Lang G., Li T., et al. Enhanced removal performance of zero-valent iron towards heavy metal ions by assembling Fe-tannin coating // J. Environ. Manage. – 2022. – Vol. 319. – P. 115619.
- [2]. Omid F., Behbahani M., Bojdi M.K., et al. Solid phase extraction and trace monitoring of cadmium ions in environmental water and food samples based on modified magnetic nanoporous silica // J. Magn. Mater. – 2015. – Vol. 395. – P. 213-220.
- [3]. Борисков Д.Е., Ефремова С.Ю., Комарова Н.А. Изучение адсорбции ионов кадмия из растворов на природном и модифицированных диатомитах // Известия Саратовского университета. Новая серия. С. Химия. Биология. Экология. – 2023. – Т. 23. – № 1. – С. 70-76.
- [4]. Aziz K.H.H., Mustafa F.S., Omer K.M., et al. Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review // RSC Adv. – 2023. – Vol. 13(26). – P. 17595-17610.
- [5]. Qasem N.A.A., Mohammed R.H., Lawal D.U.

- Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review // *NPJ Clean Water*. – 2021. – Vol. 4(1). – P. 36.
- [6]. Wang X., Wang B., Liu Y., et al. A highly efficient adsorbent adapting to low pH condition for Pb(II) sequestration from aqueous solution – marine diatom: Laboratory and pilot scale tests // *Sep. Purif. Technol.* – 2025. – Vol. 353. – P. 128321.
- [7]. de Jesus J.R., de Sousa Pereira M.V., Ribeiro I.S., et al. Advances in chemical analysis: Microporous metal–organic frameworks as eco-friendly solutions for selective separations of (bio) molecules // *Microchem. J.* – 2024. – Vol. 203. – P. 110951.
- [8]. Kausar A., Ahmad I. Graphene quantum dots – Nascent adsorbent nanomaterials for water treatment // *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.* – 2024. – Vol. 21. – P. 100943.
- [9]. Moradi E., Salehi M.M., Maleki A. Highly stable mesoporous Co/Ni mixed metal-organic framework $[\text{Co}/\text{Ni}(\mu_3\text{-tp})_2(\mu_2\text{-pyz})_2]$ for Co(II) heavy metal ions remediation // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. – P. 35044.
- [10]. Mir D.H., Rather M.A. Kinetic and biosorption analysis of ammonia-nitrogen ($\text{NH}_3\text{-N}$) by *Bacillus subtilis* strain ON358108, isolated from eutrophicated Dal Lake waters in Srinagar, India // *Bioresource Technology Reports*. – 2024. – Vol. 26. – P. 101857.
- [11]. Senila M., Cadar O. Modification of natural zeolites and their applications for heavy metal removal from polluted environments: Challenges, recent advances, and perspectives // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. – P. 25303.
- [12]. Jasem-Feisal A., Amiripour F., Ghasemi S. MOF-derived Co-Al layered double hydroxide modified rice husk biochar nanohybrid for efficient removal of Cu(II) from wastewater // *J. Water Process Eng.* – 2024. – Vol. 64. – P. 105612.
- [13]. Premathilake D.S., Colombi F., Junio A.B.B., et al. Recycling lithium-ion battery graphite: Synthesis of adsorbent materials for highly efficient removal of dye and metal ions from wastewater // *Results Eng.* – 2024. – Vol. 22. – P. 102232.
- [14]. Li J., Lin G., Liang H., et al. Recent advances in the synthesis of MOF-based composites for heavy-metal ion adsorption // *Coord. Chem. Rev.* – 2025. – Vol. 545. – P. 217010.
- [15]. Yusuf B.O., Aliyu M., Azeez M.O., et al. Comprehensive technologies for heavy metal remediation: Adsorption, membrane processes, photocatalysis, and AI-driven design // *Desalination*. – 2025. – Vol. 615. – P. 119261.
- [16]. Nzereogu P.U., Omah A.D., Ezema F.I., et al. Silica extraction from rice husk: Comprehensive review and applications // *Hybrid Adv.* – 2023. – Vol. 4. – P. 100111.
- [17]. Padmavathy K.S., Madhu G., Haseena P.V. A study on effects of pH, adsorbent dosage, time, initial concentration and adsorption isotherm for removal of hexavalent chromium (Cr(VI)) from wastewater by magnetite nanoparticles // *Procedia Technol.* – 2016. – Vol. 24. – P. 585-594.
- [18]. Yang X., Zhang H., Cheng S., et al. Optimization of the adsorption and removal of Sb(III) by MIL-53(Fe)/GO using response surface methodology // *RSC Adv.* – 2022. – Vol. 12(7). – P. 4101-4112.
- [19]. Yefremova S., Kablanbekov A., Satbaev B., et al. Rice husk-based adsorbents for removal of metals from aqueous solutions // *Materials*. – 2023. – Vol. 16(23). – P. 7353.
- [20]. Saeed S., Arshad M.Y., Raza A., et al. Influence of thermal and chemical treatment on biosorbent from rice husk and its application in removal of resorcinol from industrial wastewater // *Processes*. – 2023. – Vol. 11(12). – P. 3344.
- [21]. Qu J., Meng X., Jiang X., et al. Enhanced removal of Cd(II) from water using sulfur-functionalized rice husk: characterization and mechanism exploration // *J. Clean. Prod.* – 2018. – Vol. 183. – P. 880-886.
- [22]. Tran H.N. Applying linear forms of pseudo-second-order kinetic model for identifying errors in time-dependent adsorption datasets // *Water*. – 2023. – Vol. 15(6). – P. 1231.
- [23]. Okoro H.K., Alao S.M., Pandey S., et al. Recent potential application of rice husk as an eco-friendly adsorbent for removal of heavy metals // *Appl. Water Sci.* – 2022. – Vol. 12(12). – P. 259.
- [24]. Melo D.Q., Neto V.O.S., Oliveira J.T., et al. Adsorption equilibria of Cu^{2+} , Zn^{2+} , and Cd^{2+} on EDTA-functionalized silica spheres // *J. Chem. Eng. Data* – 2013. – Vol. 58(3). – P. 798-806.
- [25]. Chen W., Zhang H., Liang Y., et al. Adsorption properties and mechanism of Cd^{2+} in water by Zr-containing silica residue purification // *Front. Chem.* – 2018. – Vol. 6. – P. 556.

References

- [1]. J. Feng, G. Lang, T. Li, et al. Enhanced removal performance of zero-valent iron towards heavy metal ions by assembling Fe-tannin coating, *J. Environ. Manage.*, 319 (2022) 115619. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115619>.
- [2]. F. Omid, M. Behbahani, M.K. Bojdi, et al.

- Solid phase extraction and trace monitoring of cadmium ions in environmental water and food samples based on modified magnetic nanoporous silica, *J. Magn. Magn. Mater.*, 395 (2015) 213-220. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.07.093>.
- [3]. D.E. Boriskov, S.Yu. Efremova, N.A. Komarova. Study of cadmium ion adsorption from solutions on natural and modified diatomites, *Izvestiya Saratov Univ. Ser. Khim. Biol. Ekol.*, 23 (2023) 70-76. <https://doi.org/10.18500/1816-9775-2023-23-1-70-76>. (In Russian).
 - [4]. K.H.H. Aziz, F.S. Mustafa, K.M. Omer, et al. Heavy metal pollution in the aquatic environment: efficient and low-cost removal approaches to eliminate their toxicity: a review, *RSC Adv.*, 13 (2023) 17595-17610. <https://doi.org/10.1039/D3RA00723E>.
 - [5]. N.A.A. Qasem, R.H. Mohammed, D.U. Lawal. Removal of heavy metal ions from wastewater: a comprehensive and critical review, *NPJ Clean Water*, 4 (2021) 36. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00127-0>.
 - [6]. X. Wang, B. Wang, Y. Liu, et al. A highly efficient adsorbent adapting to low pH condition for Pb(II) sequestration – marine diatom, *Sep. Purif. Technol.*, 353 (2025) 128321. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.128321>.
 - [7]. J.R. de Jesus, M.V. de Sousa Pereira, I.S. Ribeiro, et al. Advances in chemical analysis: microporous MOFs as eco-friendly solutions for selective separations of (bio)molecules, *Microchem. J.*, 203 (2024) 110951. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2024.110951>.
 - [8]. A. Kausar, I. Ahmad. Graphene quantum dots – nascent adsorbent nanomaterials for water treatment, *Environ. Nanotechnol. Monit. Manag.*, 21 (2024) 100943. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2024.100943>.
 - [9]. E. Moradi, M.M. Salehi, A. Maleki. Highly stable mesoporous Co/Ni MOF for Co(II) remediation, *Heliyon*, 10 (2024) 35044. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e35044>.
 - [10]. D.H. Mir, M.A. Rather. Kinetic and biosorption analysis of ammonia-nitrogen (NH₃-N) by *Bacillus subtilis* strain ON358108, isolated from eutrophicated Dal Lake waters in Srinagar, India, *Bioresour. Technol. Rep.*, 26 (2024) 101857. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101857>.
 - [11]. M. Senila, O. Cadar. Modification of natural zeolites and their applications for heavy metal removal, *Heliyon*, 10 (2024) 25303. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25303>.
 - [12]. A. Jasem-Feisal, F. Amiripour, S. Ghasemi. MOF-derived Co-Al LDH modified rice husk biochar for Cu(II) removal, *J. Water Process Eng.*, 64 (2024) 105612. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105612>.
 - [13]. D.S. Premathilake, F. Colombi, A.B.B. Junio, et al. Recycling lithium-ion battery graphite for adsorbent synthesis, *Results Eng.*, 22 (2024) 102232. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102232>.
 - [14]. J. Li, G. Lin, H. Liang, et al. Recent advances in MOF-based composites for heavy-metal ion adsorption, *Coord. Chem. Rev.*, 545 (2025) 217010. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2025.217010>.
 - [15]. B.O. Yusuf, M. Aliyu, M.O. Azeez, et al. Comprehensive technologies for heavy metal remediation, *Desalination*, 615 (2025) 119261. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2025.119261>.
 - [16]. P.U. Nzereogu, A.D. Omah, F.I. Ezema, et al. Silica extraction from rice husk: review and applications, *Hybrid Adv.*, 4 (2023) 100111. <https://doi.org/10.1016/j.hybadv.2023.100111>.
 - [17]. K.S. Padmavathy, G. Madhu, P.V. Haseena. Effects of pH, dosage, time and isotherm on Cr(VI) removal using magnetite nanoparticles, *Procedia Technol.*, 24 (2016) 585-594. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.127>.
 - [18]. X. Yang, H. Zhang, S. Cheng, et al. Optimization of Sb(III) adsorption by MIL-53(Fe)/GO, *RSC Adv.*, 12 (2022) 4101-4112. <https://doi.org/10.1039/D1RA08169A>.
 - [19]. S. Yefremova, A. Kablanbekov, B. Satbaev, et al. Rice husk-based adsorbents for metal removal, *Materials*, 16 (2023) 7353. <https://doi.org/10.3390/ma16237353>.
 - [20]. S. Saeed, M.Y. Arshad, A. Raza, et al. Influence of Thermal and Chemical Treatment on Biosorbent from Rice Husk and Its Application in Removal of Resorcinol from Industrial Wastewater, *Processes*, 11 (2023) 3344. <https://doi.org/10.3390/pr11123344>.
 - [21]. J. Qu, X. Meng, X. Jiang, et al. Enhanced removal of Cd(II) using sulfur-functionalized rice husk, *J. Clean. Prod.*, 183 (2018) 880-886. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.208>.
 - [22]. H.N. Tran. Applying Linear Forms of Pseudo-Second-Order Kinetic Model for Feasibly Identifying Errors in the Initial Periods of Time-Dependent Adsorption Datasets, *Water*, 15 (2023) 1231. <https://doi.org/10.3390/w15061231>.
 - [23]. H.K. Okoro, S.M. Alao, S. Pandey, et al. Recent potential application of rice husk as an eco-friendly adsorbent for removal of heavy metals, *Appl. Water Sci.*, 12 (2022) 259. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01778-1>.

- [24]. D.Q. Melo, V.O.S. Neto, J.T. Oliveira, et al. Adsorption equilibria of Cu^{2+} , Zn^{2+} and Cd^{2+} on EDTA-functionalized silica spheres, J. Chem. Eng. Data, 58 (2013) 798-806. <https://doi.org/10.1021/je3013364>.
- [25]. W. Chen, H. Zhang, Y. Liang, et al. Adsorption properties and mechanism of Cd^{2+} by Zr-containing silica residue purification, Front. Chem., 6 (2018) 556. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00556>.

Авторлар туралы мәліметтер

І. Қуаныш – инженер, Жану проблемалары институты, Алматы, Қазақстан
E-mail: inzhu.2017@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1773-2405>

Л.К. Мылтыкбаева – PhD, әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, жалпы және бейорганикалық химия кафедрасының аға оқытушысы, Алматы, Қазақстан
E-mail: laura.kaden@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0322-0135>

Н. Идрисов – ғылыми қызметкер, Ядролық физика институты, PhD докторант, Қ.И. Сатпаев ат. университеті, Алматы, Қазақстан
E-mail: kantsevich.n.v@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2393-1102>

Ч. Даулбаев – зертхана меңгерушісі, Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
E-mail: ch.daulbayev@inp.kz
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7860-7799>

Г.Е. Ергазиева – х.ғ.к., профессор, Жану проблемалары институты, каталитикалық процестер зертханасының меңгерушісі, Алматы, Қазақстан
E-mail: ergazieva_g@mail.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9464-5317>

Sorption Properties and Adsorption Kinetics of Cd²⁺ Ions on Silica Derived from Rice Husk**I. Kuanysh^{1*}, L.K. Myltykbayeva¹, N.V. Idrisov^{2,3}, Ch.B. Daulbaev², G.E. Yergazieva¹**¹Institute of Combustion Problems, Bogenbai Batyr st., 172, Almaty, Kazakhstan²Institute of Nuclear Physics, Ibragimov st., 1, Almaty, Kazakhstan³Satbayev University, Satpayev st., 22, Almaty, Kazakhstan**ABSTRACT**

This study provides a comparative analysis of the adsorption efficiency and structural characteristics of silica (SiO₂) sorbents derived from rice husk for the removal of Cd²⁺ ions. Two types of sorbents were examined: the thermally synthesized SiO₂ (650) sample and the purified SiO₂ clean (650) sample obtained through an alkali-precipitation method. According to the results of elemental analysis, the sample obtained by the thermal method contained 85.7% SiO₂, and when purified by the alkaline precipitation method, it contained 100% SiO₂. Experimental findings revealed that the sorption capacity of SiO₂ (650) was 7.38 mg/g, while that of SiO₂ clean (650) reached 7.46 mg/g. Both sorbents achieved equilibrium within 10-30 min, with removal efficiencies of 96.7% and 97.7%, respectively. Kinetic analysis demonstrated that the adsorption behavior of Cd²⁺ ions follows the pseudo-second-order model ($R^2 > 0,999$), indicating a predominant chemisorption mechanism. The enhanced performance of the SiO₂ clean (650) sorbent is attributed to its higher number of active surface sites. Overall, silica sorbents synthesized from rice husk represent environmentally safe, accessible, and economically efficient materials for the purification of heavy-metal-contaminated water. The outcomes of this research provide a foundation for further improvement of rice-husk-derived sorbents, enhancement of their adsorption capacity, and potential expansion into industrial-scale applications.

Keywords: cadmium ions, adsorption, sorbent, rice husk, silicon dioxide (SiO₂), heavy metals, water purification, kinetic model.

Сорбционные свойства и кинетика адсорбции ионов Cd²⁺ на оксиде кремния, полученном из рисовой шелухи**I. Қуаныш^{1*}, Л.К. Мылтыкбаева¹, Н.В. Идрисов^{2,3}, Ч.Б. Даулбаев², Г.Е. Ергазиева¹**¹Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан²Институт ядерной физики, ул. Ибрагимова, 1, Алматы, Казахстан³Казахский национальный исследовательский технический университет им. К.И. Сатпаева, ул. Сатпаева, 22, Алматы, Казахстан**АННОТАЦИЯ**

В данном исследовании сравнительно проанализирована эффективность адсорбции и структурные особенности сорбентов диоксида кремния (SiO₂), полученных из рисовой шелухи, при удалении ионов Cd²⁺. В работе использованы два типа сорбентов: образец SiO₂ (650), полученный термическим методом, и очищенный образец SiO₂ чистый (650), синтезированный с применением щелочно-осадительной технологии. По результатам элементного анализа образец, полученный термическим методом, содержал 85,7% SiO₂, а при очистке методом щелочного осаждения – 100% SiO₂. Экспериментальные результаты показали, что сорбционная емкость SiO₂ (650) составляет 7,38 мг/г, тогда как у SiO₂ чистый (650) данный показатель достигает 7,46 мг/г. Оба сорбента достигали равновесия в течение 10-30 мин, при этом степень удаления кадмия составила соответственно 96,7% и 97,7%. Кинетический анализ установил, что процесс адсорбции Cd²⁺ полностью соответствует модели псевдо-второго порядка ($R^2 > 0,999$), что подтверждает преобладание хемосорбционного механизма. Полученные данные демонстрируют, что высокая эффективность SiO₂ чистый (650) связана с большим количеством активных центров. В целом сорбенты на основе рисовой шелухи являются экологически безопасными, доступными и экономически эффективными материалами для очистки сточных вод от тяжёлых металлов. Результаты исследования могут служить основой для дальнейшего совершенствования структуры сорбентов и расширения их промышленного применения.

Ключевые слова: ионы кадмия, адсорбция, сорбент, рисовая шелуха, диоксид кремния (SiO₂), тяжёлые металлы, очистка воды, кинетическая модель.