

Jennifer A. Aldana-Mejia – PhD, Research Biologist, Department of Biomolecular Sciences, School of Pharmacy, University of Mississippi, Ted Cochran Research Center, MS 3877-1848, USA; e-mail: jaaldana@olemiss.edu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0736-1899>.

Samir Anis Ross – PhD, Professor of Pharmacognosy in the School of Pharmacy at the University of Mississippi, Distinguished Professor, S.Zh. Asfendiyarova, Professor of Pharmacognosy at the School of Pharmacy, Assiut University; e-mail: sross@olemiss.edu; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3807-1299>.

Сведения об авторах

Гульнур Адильжановна Жумаханова* – докторант PhD, Казахский национальный университет имени аль-Фараби; e-mail: zjumahanova-96@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7139-2478>.

Дженифер А. Алдана-Мехия – PhD, биолог-исследователь кафедры биомолекулярных наук, фармацевтический факультет, университет Миссисипи, Исследовательский центр Тэда Кокрана, MS 3877-1848, США; e-mail: jaaldana@olemiss.edu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0736-1899>.

Самир Анис Росс – PhD, профессор по фармакогнозии в Школе фармации университета Миссисипи, почетный профессор Казахского национального медицинского университета имени С.Ж. Асфендиярова, профессор по фармакогнозии в Школе фармации Асыютского университета; e-mail: sross@olemiss.edu. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3807-1299>.

Поступила в редакцию 30.01.2026

Поступила после доработки 13.03.2026

Принята к публикации 16.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-67](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-67)

MPHTI: 61.31.41; 61.31.51



**Г.М. Сейтмагзимова¹, Ж.С. Серікбаева^{1*}, Е.А. Полтанова², Л.А. Сейтмагзимова³,
Р.Р. Якубова¹**

¹Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова,
160012, Республика Казахстан, г. Шымкент, пр. Тауке хана, 5

²ТФ ТОО «Казфосфат» «Минеральные удобрения»,
Республика Казахстан, г. Тараз, ул. Нияткалиева, 128

³Алматинский технологический университет,
Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Толе би, 100

*e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ КРИСТАЛЛОВ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОСФОГИПСА В ДИГИДРАТНОМ И ПОЛУГИДРАТНОМ СПОСОБАХ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКСТРАКЦИОННОЙ ФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ

Аннотация: Проблема утилизации и хранения фосфогипса, образующегося в производстве экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК), является чрезвычайно актуальной, так как связана с экологическими проблемами загрязнения водоемов, земель и атмосферы. Накопление фосфогипса в огромных масштабах требует разработки эффективных методов его переработки. Основным требованием для химической переработки фосфогипса является его гранулометрический состав, прежде всего - размер и форма кристаллов. В работе изучено влияние режима получения ЭФК и соотношения жидкой и твердой фаз (Ж:Т) на химический состав, размер и габитус кристаллов и фильтрующие свойства фосфогипса. Получение фосфогипса осуществляли дигидратным и полугидратным способами при Ж:Т=2,5:1 и 3:1 в лабораторных условиях и в условиях технологического процесса в Таразском филиале «Минеральные удобрения» компании «Казфосфат». Состав и морфология образцов изучены рентген-флуоресцентным и рентгенофазовым методами и электронной микроскопией. Рентген-дифракционным анализом идентифицировано наличие мелкодисперсного ангидрита, вызывающего снижение фильтруемости осадка фосфогипса, полученного в производственных условиях при температурах

©Г.М. Сейтмагзимова, Ж.С. Серікбаева, Е.А. Полтанова, Л.А. Сейтмагзимова, Р.Р. Якубова, 2026

90-95°C. Установлено, что проведение экстракции в дигидратном режиме при Ж:Т=3:1 способствует образованию более крупных однородных, изометричных кристаллов гипса и обеспечивает максимальную производительность фильтрования. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации производства ЭФК.

Ключевые слова: фосфогипс; экстракционная фосфорная кислота; дигидратный и полугидратный методы; фильтрование; размер кристаллов.

Введение. В XXI веке стремительное расширение современных аграрных технологий и промышленного производства обусловило интенсивное развитие фосфорной химической промышленности, что, в свою очередь, спровоцировало беспрецедентное увеличение масштабов образования фосфогипса (ФГ) как твердого побочного продукта [1]. Образующийся дигидрат или полугидрат сульфата кальция является многотоннажным и весьма обременительным отходом производства удобрений. Мировая промышленность фосфорных удобрений производит более 230 миллионов тонн фосфогипса в год, и ожидается, что это количество увеличится в ответ на растущий спрос на продукты питания. В настоящее время ФГ накоплен в количествах, превышающих 6 миллиардов тонн, что создает серьезные экологические и экономические проблемы [2].

В условиях интенсивного развития химической промышленности Казахстана особое значение приобретает проблема образования и накопления фосфогипса. Основным источником его образования является производство аммофоса в Таразском филиале ТОО «Казфосфат» «Минеральные удобрения», где при производстве около 500 тыс. тонн аммофоса ежегодно образуется порядка 1,3 млн тонн ФГ. Согласно проектным данным, при достижении полной мощности предприятия, составляющей около 1 млн тонн удобрений в год, потенциальный объем побочного продукта возрастает приблизительно до 2,7 млн тонн в год, что демонстрирует масштабность проблемы накопления этого техногенного сырья [3]. До настоящего времени в отвалах, расположенных в зоне промышленного узла Тараза, накоплено более 17 млн тонн фосфогипса (рис. 1, 2), что подтверждается региональными экологическими службами и органами местного самоуправления [4].



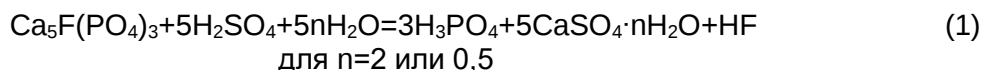
Рисунок 1 – Схема накопленных отвалов ФГ (отвал № 1 – ~25 га; отвал № 2 – ~28 га), расположенные на территории промышленного узла г. Тараз [4].



Рисунок 2 – Фото отвала ФГ №1 на территории промышленного узла г. Тараз, 14 января 2026 г.

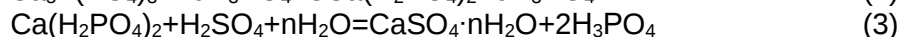
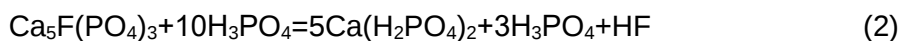
В то же время это обуславливает значительную нагрузку на территорию, степень переработки остается небольшой, примерно около 9% годового образования. Фосфогипс не находит широкого применения, что требует разработки новых технологий его переработки в качестве вторичного минерального ресурса и образования устойчивого рынка его потребления. К основным факторам, ограничивающим применение ФГ, относятся высокая гигроскопичность и содержащиеся в его составе примеси, усложняющие его транспортировку, поскольку находятся в тесной взаимосвязи с условиями окружающей среды – относительной влажностью и температурой воздуха [5].

Экстракционная фосфорная кислота (ЭФК) является важным продуктом химической промышленности. Основная реакция получения ЭФК описывается уравнением:



Сульфат кальция может кристаллизоваться в виде дигидрата $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, полугидрата $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ или безводного ангидрита. В зависимости от этого процесс можно вести дигидратным, полугидратным или ангидритным способами при разных температурах с получением фосфорной кислоты разной концентрации. Ангидритный метод практически не используется ввиду образования мелких нефилтруемых кристаллов и сильной коррозии оборудования при высокой температуре. Объем воды определяется преимущественно требованиями экстракции фосфорной кислоты из сырья и необходимостью обеспечения заданной текучести пульпы и концентрации кислоты, а не только степенью гидратации образующегося сульфата кальция [6, 7].

Для оптимизации процесса серноокислотной экстракции часто применяется разделение стадий разложения фосфатного сырья и кристаллизации сульфата кальция, что способствует существенному повышению степени извлечения P_2O_5 в раствор. В этом случае процесс протекает последовательно через стадии:



Основная доля производимой фосфорной кислоты приходится на дигидратный метод [8-10], позволяющий получать в зависимости от качества перерабатываемого сырья кислоту с содержанием 22-32% P_2O_5 . Также реализуются смешанные режимы дигидратно-полугидратный или полугидратно-дигидратный, предусматривающие последовательное образование одной гидратной формы и её дальнейшую трансформацию в другую с целью оптимизации производительности и улучшения фильтруемости гипса [11, 12].

Экстракция фосфорной кислоты и её отделение от сульфата кальция представляют собой взаимозависимые стадии единой технологической системы, где нарушение одного процесса негативно влияет на другой. Ухудшение кристаллообразования сульфата кальция в экстракторе снижает степень отмывки кислоты из осадка и изменяет концентрацию получаемых фильтратов [6]. Размер и морфология кристаллов ФГ критически влияют на фильтрацию. Образование мелкодисперсных кристаллов ухудшает фильтруемость за счет забивания пор фильтровальной ткани [13]. Существуют различные подходы к контролю размерных и морфологических характеристик частиц ФГ [14, 15].

Фосфогипс, в основном состоящий из дигидрата сульфата кальция ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), содержит более 10% нерастворимого остатка в виде кварцита, а также солей алюминия, железа, фтора, тяжелых металлов, радиоактивных веществ и других примесей, которые могут непредсказуемо влиять на качество продуктов, получаемых утилизацией ФГ [16, 17]. К кристаллическим продуктам, получаемым в промышленных условиях, предъявляются определенные требования, прежде всего по размеру и форме кристаллов и чистоте. Крупные кристаллы легче отфильтровываются, промываются и высушиваются и удерживают меньше влаги [18]. Таким образом, перед использованием ФГ в качестве сырья для получения других продуктов необходимо подробно изучить фильтрующие свойства путем сравнительного анализа морфологии кристаллов гипса и полугидрата сульфата кальция, что и является целью данной работы. Новизной исследования является определение оптимальных условий серноокислотного разложения фосфоритов месторождения Кистас, обеспечивающих высокую производительность фильтрования и образование крупнодисперсного фосфогипса с

минимальным содержанием примесей для возможности использования его при получении других неорганических продуктов.

Материалы и методы исследований

В качестве исходного сырья использована фосфоритная мука месторождения Кистас, предоставленная заводом «Минеральные удобрения». Состав фосфорита, определенный электронной микроскопией и рентген-флуоресцентным методом, демонстрирует практически одинаковые значения. Фосфорит содержит 26,77% P_2O_5 , 44,03% CaO , 15,53% SiO_2 , 1,51% Al_2O_3 , 0,98% Fe_2O_3 и 2,07% MgO ; согласно данного состава фосфатное сырье относится к богатым фосфоритам. Объектами исследования являлись образцы фосфогипса, полученные разложением фосфоритной муки дигидратным и полугидратным способами в лабораторных условиях, а также промышленная пульпа, отобранная в реакторах разложения и дозревания.

Экспериментальная часть

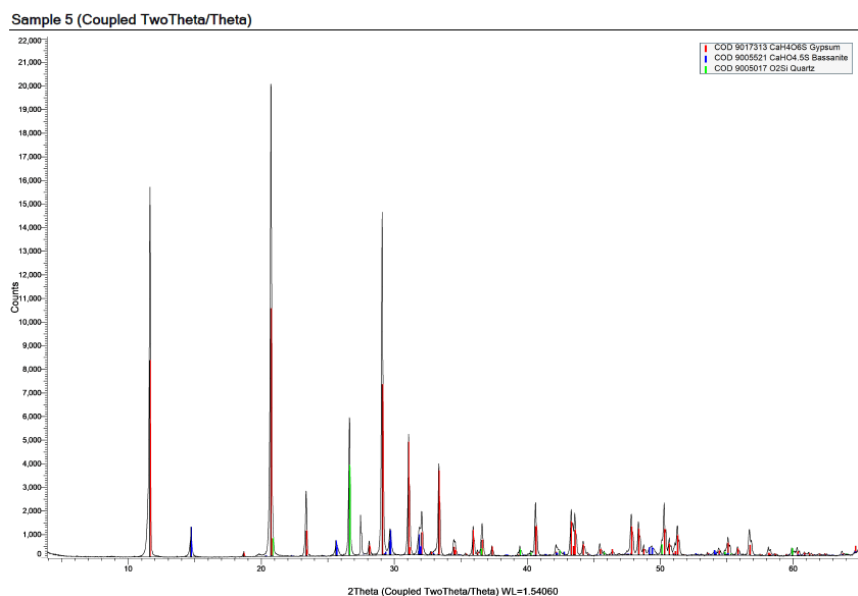
Экспериментальные исследования проводили в соответствии с методикой получения экстракционной фосфорной кислоты, основанной на двухстадийном сернокислотном разложении фосфатного сырья в соответствии с уравнениями реакций (2) и (3) и расходными коэффициентами по сырью сырью [19]. Дигидратный режим поддерживали при температуре 70°C, характерной для данного режима, полугидратный режим - при температуре 90°C, что обеспечивало образование полугидратной формы сульфата кальция. Для обеспечения подвижности экстракционной пульпы и формирования хорошо фильтрующих кристаллов ФГ соотношение жидкой и твердой фаз (Ж:Т) поддерживали в диапазоне 2,5:1-3:1 с использованием раствора разбавления.

Процесс включает стадию предварительного взаимодействия фосфатного сырья с раствором разбавления в течение 30 минут с последующим вводом концентрированной серной кислоты в раствор монокальцийфосфата с образованием фосфорной кислоты и кристаллогидрата сульфата кальция (фосфогипса). Экстракцию осуществляли в течение 3 часов для завершения роста кристаллов ФГ в термостатированном реакторе объемом 500 мл, оснащённом механической мешалкой.

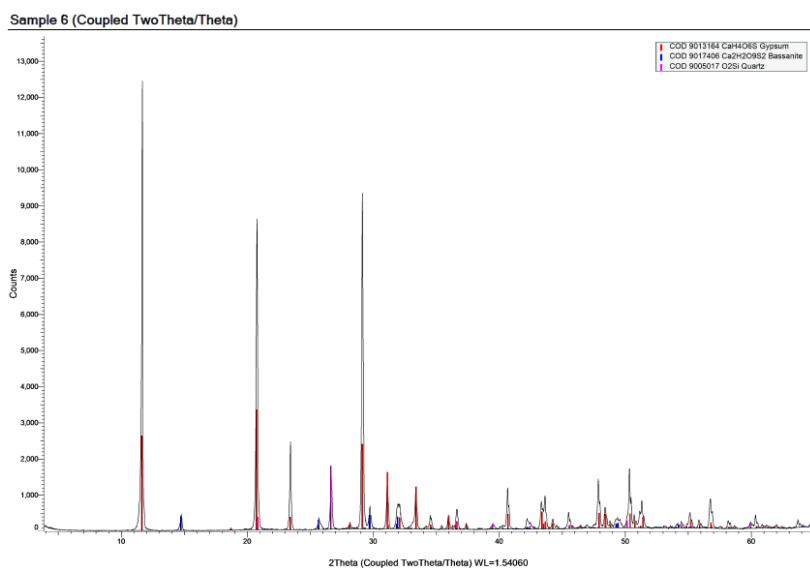
Полученную суспензию разделяли на ЭФК и осадок ФГ на вакуум-фильтровальной установке под вакуумом 0,06 МПа. Твердый побочный продукт отмывали горячей водой от кислоты. Аналогично осуществляли фильтрование промышленных пульп, отобранных в реакторах разложения и дозревания. По результатам фильтрования определяли производительность фильтрования фосфорно-кислотной суспензии по влажному неотмытому осадку и по фильтрату. В процессе исследования получили ряд образцов фосфогипса, состав и структура которых идентифицирована методами рентген-флуоресцентного, рентген-дифракционного, ИК-спектроскопического анализа и сканирующей электронной микроскопии. Достоверность полученных результатов подтверждается применением для анализа дифрактометра XRF Bruker S8 Tiger, XRF PANalytical Axios max и XRD Bruker D8 Endeavor (Германия) с обработкой полученных данных дифрактограмм и расчетом межплоскостных расстояний с помощью программного обеспечения EVA, а также Растрового электронного микроскопа JEOL JSM-6490LV (Япония), ИК-Фурье спектрометра Shimadzu IR-Prestige (Япония), а также рентгено-флуоресцентного спектрометра S8 Tiger и PANalytical Axios (Германия).

Результаты и обсуждение

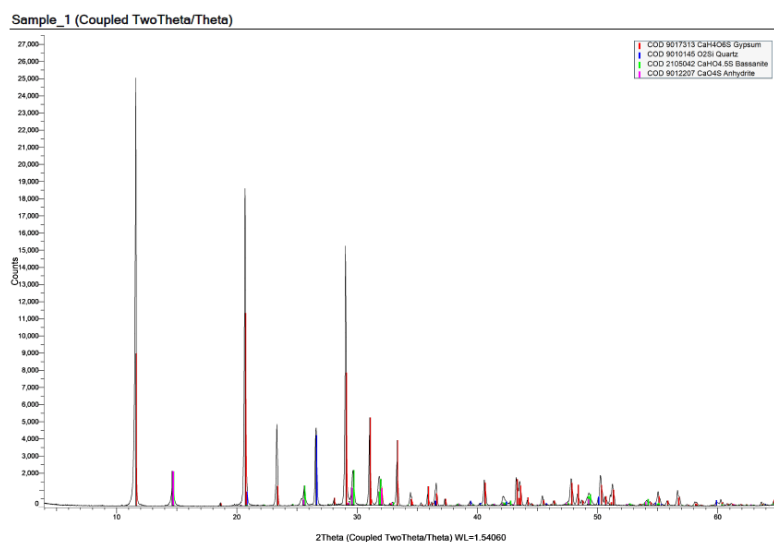
На рисунке 3 представлены дифрактограммы образцов ФГ, сформированных в различных технологических режимах. Рентгенофазовый анализ показал, что все четыре образца фосфогипса имеют близкий минеральный состав. Однако в составе проб, полученных в лабораторных условиях дигидратным и полугидратным методами, присутствуют только минералы гипс (преимущественно) в виде сульфата кальция в дигидратной форме, бассанит (полугидрат) и кварц (рис. 3а, 3б), тогда как в образцах ФГ, полученного фильтрованием пульпы из реакторов разложения и дозревания, присутствует преимущественно минерал ангидрит (рис. 3с, 3д). Наличие данного минерала свидетельствует о высокотемпературном режиме кристаллизации и, как следствие, об образовании мелкодисперсных кристаллов безводного сульфата кальция, которые приводят к забиванию пор фильтроткани и снижению фильтруемости осадка.



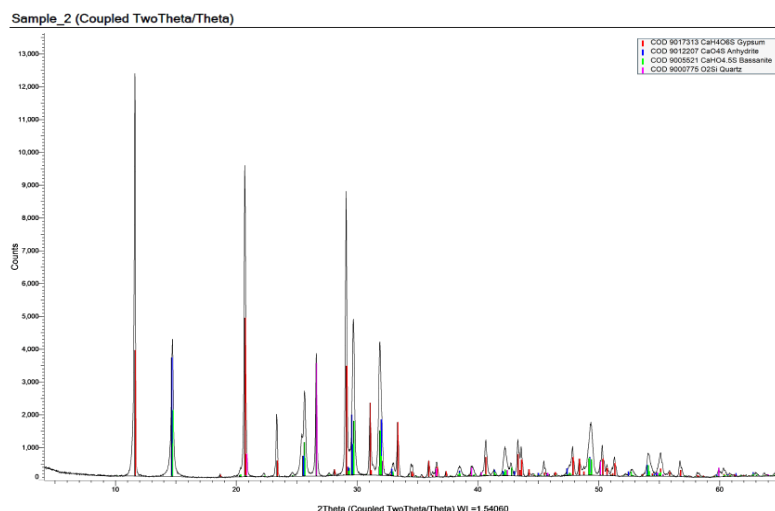
a



b



c



d

Рисунок 3 – Дифрактограммы образцов фосфогипса, полученного:
а – в дигидратном режиме, b – в полугидратном режиме, с – из реактора разложения,
d – из реактора дозревания

В условиях производства процесс получения ЭФК при температурах 90-95°C протекает практически в полугидратном режиме, хотя в документации цеха он классифицируется как дигидратный. Расхождение между фактическими и регламентированными параметрами связано с фазовыми превращениями в процессе кристаллизации ФГ и снижением его фильтруемости. Известно [18], что при проведении экстракции в температурном интервале 90-95°C в слабых фосфорно-кислотных растворах происходит фазовое превращение метастабильного полугидрата сульфата кальция в стабильный мелкодисперсный ангидрит, что и вызывает забивание пор фильтровальной ткани и ухудшение фильтрующих свойств осадка.

Рентген-флуоресцентный анализ образцов ФГ, полученных с реакторов, показал, что содержание основных компонентов находится в интервале 38,9-40,9 % CaO и 43,6-48,2 % SO₃, тогда как для фосфогипса, полученного в лабораторных условиях, эти значения отличаются и составляют 42,4-43,1% CaO и 35,3-33,1 % SO₃ (табл. 1). Такое соотношение связано с проведением разложения в производственных условиях в сульфатном режиме. Низкое содержание P₂O₅ (0,74-0,85 %) во всех образцах указывает на эффективную отмывку ЭФК и минимальный переход фосфора в твёрдую фазу. Нерастворимые примеси SiO₂ (11,0-14,6%), Al₂O₃ (0,22-0,37%) и Fe₂O₃ (0,26-0,20%) обусловлены минеральной составляющей исходной фосфоритной муки. Оксиды MgO, Na₂O и K₂O присутствуют в малых количествах и не оказывают существенного влияния на фазовый состав продукта. Содержание тяжёлых металлов (PbO, ZnO, CuO, NiO) находится на уровне ≤0,01 %, что свидетельствует об их незначительном накоплении в фосфогипсе.

Таблица 1 – Результаты рентген-флуоресцентного анализа образцов фосфогипса

Содержание компонента, %	Фосфоритная мука	Фосфогипс с разложения	Фосфогипс с дозревания	Фосфогипс, полученный в дигидратном режиме (Ж:Т=3:1)	Фосфогипс, полученный в полугидратном режиме (Ж:Т=3:1)
P ₂ O ₅	26,766	0,854	0,742	0,830	0,678
SiO ₂	15,526	13,156	11,015	13,967	14,601
Al ₂ O ₃	1,511	0,373	0,220	0,769	0,948
Fe ₂ O ₃	0,982	0,263	0,195	0,355	0,348
CaO	44,025	40,886	38,957	42,427	43,106
MgO	2,074	0,005	-0,009	0,065	0,085
SO ₃	0,769	43,550	48,159	35,274	33,089
Na ₂ O	0,623	0,056	0,071	0,174	0,190
K ₂ O	0,648	0,310	0,271	0,513	0,438
TiO ₂	0,205	0,353	0,232	0,514	0,286
Mn ₃ O ₄	0,116	0,015	0,014	0,040	0,031

Химический состав образцов фосфогипса подтверждается элементным анализом, определенным на растровом электронном микроскопе (табл. 2). Так, содержание фосфора в пересчете на P_2O_5 также находится в интервале 0,4-0,8%, что свидетельствует о высоком коэффициенте извлечения фосфора в раствор и эффективности отмывки ФГ от кислоты.

Таблица 2 – Элементный анализ образцов фосфогипса

Элемент, %	Ж:Т = 2,5:1		Ж:Т = 3:1		Фосфогипс с разложения	Фосфогипс с дозревания
	дигидратный режим	полугидратный режим	дигидратный режим	полугидратный режим		
C	6,17	2,00	5,13	4,60	5,14	5,49
O	51,87	48,57	52,37	52,93	50,70	48,44
Na	0,11	0	0	0	0,12	0,13
Mg	0,07	0,15	0,07	0	0	0
Al	0,25	0,26	0,39	0,33	0,24	0,11
Si	2,50	3,15	3,37	4,07	3,82	2,88
P	0,37	0,22	0,22	0,82	0,17	0,16
S	16,58	19,85	16,63	15,27	17,04	18,60
K	0,10	0,09	0,17	0,18	0,12	0
Ca	22,00	25,49	21,46	21,55	23,55	24,30
Fe	0	0,23	0,20	0,24	0,15	0

С помощью сканирующего электронного микроскопа изучена структура и морфология полученных образцов фосфогипса (рис. 4). Результаты показывают, что морфология и размеры кристаллов ФГ существенно зависят от режима получения ЭФК и соотношения жидкой и твердой фаз пульпы. В зависимости от режима экстракции формировались различные кристаллогидратные формы сульфата кальция.

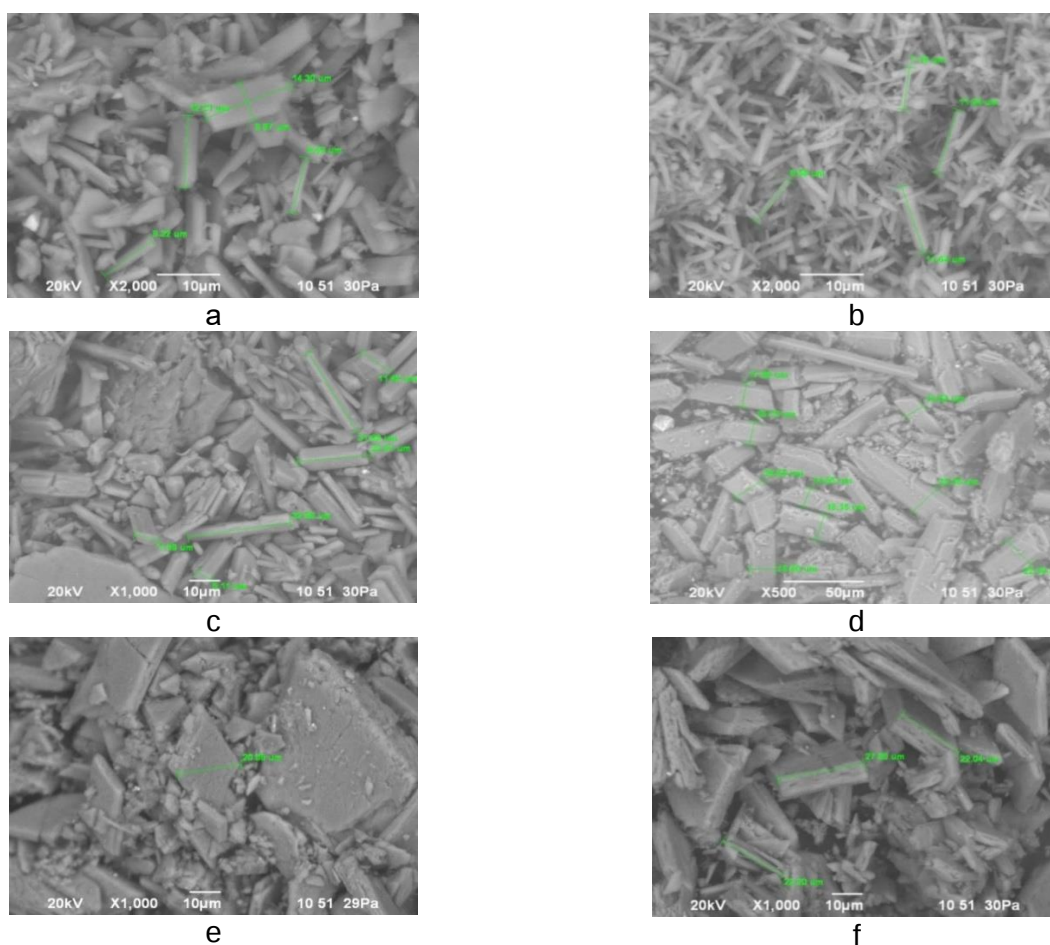


Рисунок 4 – Микрофотографии кристаллов фосфогипса:

а – дигидратный режим, Ж:Т = 2,5:1, б – полугидратный режим, Ж:Т = 2,5:1, с – дигидратный режим, Ж:Т = 3:1, д – полугидратный режим, Ж:Т = 3:1, е – ФГ из реактора разложения, ф – ФГ из реактора дозревания

Для всех исследованных образцов характерно формирование иглообразных и призматических кристаллов сульфата кальция, однако степень их развития и однородность существенно различаются. В дигидратном режиме получения ФГ формируется кристаллическая структура, представленная преимущественно призматическими (пластинчатыми) кристаллами более крупного размера (рис. 4а, с). Кристаллы отличаются хорошей сформированностью и относительной однородностью морфологии. В полугидратном режиме ФГ характеризуется формированием мелких иглообразных кристаллов со средним размером 9,65 мкм при Ж:Т=2,5:1 (табл. 3), более узких по ширине и преимущественно мелкодисперсных, что указывает на иную кинетику кристаллообразования при повышенной температуре процесса. При Ж:Т=2,5:1 наблюдается увеличение доли мелкодисперсных кристаллов, что вызывает ухудшение фильтрующих свойств осадка (Рисунки 6b, d). Повышение Ж:Т до 3:1 способствует направленному росту кристаллов и снижению количества мелкой фракции. Наиболее однородные, крупные и хорошо сформированные призматические кристаллы со средним размером 21,23 мкм получены для фосфогипса, синтезированного дигидратным методом при Ж:Т=3:1, что указывает на более благоприятные условия кристаллизации и лучшие фильтрующие характеристики данного образца (табл. 3). В производственных образцах также сформированы крупные кристаллы размером 20-23 мкм за счет большего времени роста кристаллов (рис. 4е и 4f).

Таблица 3 – Влияние режима разложения фосфорита на фильтрующие свойства фосфогипса

Режим экстракции	Средний размер кристаллов, мкм	Производительность фильтрования по влажному неотмытому осадку (P_f), $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$	Производительность фильтрования по фильтрату (P_f), $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$
Дигидратный, Ж:Т = 2,5:1	11,37	278,77	33,15
Полугидратный, Ж:Т = 2,5:1	9,65	205,525	131,74
Дигидратный, Ж:Т = 3:1	21,23	294,42	411,55
Полугидратный, Ж:Т = 3:1	17,55	185,5	341,9
Полугидратный, из реактора разложения	20,06	81,176	120,08
Полугидратный, из реактора дозревания	23,98	186,75	125,26

Анализ производительности фильтрования (P_f) демонстрирует (Таблица 3) выраженную зависимость производительности фильтрования фосфогипса от режима экстракции и соотношения Ж:Т. Максимальное значение P_f по влажному неотмытому осадку ($294,42 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$) и по фильтрату ($411,55 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$) соответственно зафиксировано для ФГ, полученного дигидратным методом при Ж:Т = 3:1, что коррелирует с формированием наиболее крупных и хорошо оформленных кристаллов. Снижение производительности фильтрования для полугидратных образцов связано с формированием мелкодисперсных кристаллов, ухудшающих проницаемость фильтровального слоя.

Заключение

В работе изучено влияние режима получения ЭФК и соотношения жидкой и твердой фаз (Ж:Т) на химический состав, размер и габитус кристаллов и фильтрующие свойства фосфогипса. В результате проведенных исследований сернокислотного разложения фосфорита месторождения Кистас установлено, что для получения крупных, хорошо фильтрующих кристаллов нерастворимого осадка ФГ оптимальным является дигидратный режим с соотношением Ж:Т=3:1. Установлено, что проведение процесса в полугидратном режиме при температурах 90-95°C, в том числе в производственных условиях, приводит к формированию мелкодисперсного ангидрита, вызывающего снижение фильтруемости осадка фосфогипса, что подтверждается идентификацией образцов ФГ рентген-флуоресцентным и рентген-дифракционным анализом.

Сравнительный анализ показал выраженную зависимость производительности фильтрования фосфогипса от режима экстракции и соотношения Ж:Т. С помощью рентген-дифракционного метода идентифицированы кристаллические фазы и компоненты ФГ и получен однородный, крупнокристаллический продукт, который может быть использован в процессах дальнейшей переработки фосфогипса.

Список литературы

1. The Impurity Removal and Comprehensive Utilization of Phosphogypsum: A Review / Q. Guan et al // *Materials* (Basel). – 2024. – № 17(9). – P. 2067. <https://doi.org/10.3390/ma17092067>.
2. UNECE. From Waste to Opportunity: UNRMS and the Road to 100% Phosphogypsum Utilization [Электрон. ресурс]. – 2025. – URL: <https://unece.org/circular-economy/news/waste-opportunity-unrms-and-road-100-phosphogypsum-utilization> (дата обращения: 09.05.2025).
3. Esoportal.kz. Расширение отвала фосфогипса №2 завода минеральных удобрений ТОО «Казфосфат» в г. Тараз,. – 2024. – URL: <https://share.google/JNAe7YVwPoP6Moyok> (дата обращения: 20.05.2024).
4. Сулейманова А., Бапаев Б., Байдилда Э. Отходы фосфогипса в Таразе впервые начали вывозить за город [Электрон. ресурс]. – 2024. – URL: <https://24.kz/ru/news/social/674816-otkhody-fosfogipsa-v-taraze-vpervye-nachali-vyvozit-za-gorod> (дата обращения: 09.10.2024).
5. Современные направления переработки фосфогипса / В.В. Головнева и др. // *Успехи в химии и химической технологии. ТОМ XXXIV*. – 2020. – № 4. – С. 65-67.
6. Копылев Б.А. Технология экстракционной фосфорной кислоты / Б.А. Копылев. – Л.: Химия, 1981. – 67с.
7. Кислотные методы переработки фосфатного сырья / Е.Л. Яхонтова и др. – М.: Химия, 1988. – 288 с.
8. Soboleva I.V., Lyashenko S.E. Studying the Dihydrate Stage of the Process of Preparation of Extractive Phosphoric Acid by the Dihydrate-Hemihydrate Method from Low-Grade Phosphorites I.V. Soboleva, S.E. Lyashenko // *Theor Found Chem Eng.* – 2023. – № 57. – P. 633-637. <https://doi.org/10.1134/S0040579523040267>.
9. Soboleva I.V. Investigation of reaction kinetics for industrial dihydrate method of P2O5 production / I.V. Soboleva, E. Koltsova // *International Congress of Chemical and Process Engineering*. – 2006. – № 17.
10. Staged purification of phosphogypsum using pH-dependent separation process / H. Chanouri et al // *Environ. Sci. Pollut. Res.* – 2024. № 31(7). – P. 9920-9934.
11. Математическое моделирование полугидратной стадии дигидратно-полугидратного процесса получения экстракционной фосфорной кислоты из фосфоритов / А.С. Егоркин и др. // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 6. – С. 33-37.
12. Becker P. Phosphates and phosphoric acid-raw materials, Technology, and economics of the wet process. – New York: MARCEL DEKKER, INC. 1983.
13. Study on the Properties of Waste Apatite Phosphogypsum as a Raw Material of Prospective Applications / K. Grabas et al // *Waste Biomass Valor.* – 2019. – № 10. – P. 3143-3155 <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0316-8>.
14. Li X. Effect of Molecular Structure of Organic Acids on the Crystal Habit of α -CaSO₄·0.5H₂O from Phosphogypsum / X. Li, Q. Zhang // *Crystals*. – 2020. – № 10(1). – P. 24. <https://doi.org/10.3390/cryst10010024>.
15. Resource utilization and development of phosphogypsum-based materials in civil engineering / X. Qin et al // *J. Clean. Prod.* – 2023. – № 387. – P. 135858. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135858>
16. Production Waste Management: Qualitative and Quantitative Characteristics and the Calculation of the Hazard Class of Phosphogypsum / N. Seraya et al // *Processes* – 2023. – № 11(10). – P. 3033. <https://doi.org/10.3390/pr11103033>.
17. Better filterability and reduced radioactivity of phosphogypsum during phosphoric acid production in Morocco using a fly ash waste and pure silica additive / F.E. Arhouni et al // *J Radioanal Nucl Chem.* – 2022. – № 331. – P. 1609-1617. <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08235-y>.
18. Позин М.Е. Физико-химические основы неорганической технологии / М.Е. Позин, Р.Ю. Зинюк. – Л.: Химия, 1985. – 384 с.

19. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Химическая технология неорганических веществ» / Ш.М. Молдабеков и др. // ЮКГУ им. М. Ауэзова. – Шымкент, 2006. – С. 105.

References

1. The Impurity Removal and Comprehensive Utilization of Phosphogypsum: A Review / Q. Guan et al // Materials (Basel). – 2024. – № 17(9). – R. 2067. <https://doi.org/10.3390/ma17092067>. (In English).
2. UNECE. From Waste to Opportunity: UNRMS and the Road to 100% Phosphogypsum Utilization [Elektron. resurs]. – 2025. – URL: <https://unece.org/circular-economy/news/waste-opportunity-unrms-and-road-100-phosphogypsum-utilization> (data obrashcheniya: 09.05.2025). (In English).
3. Ecoportal.kz. Rasshirenje otvala fosfogipsa №2 zavoda mineral'nykh udobrenii TOO «Kazfosfat» v g. Taraz,. – 2024. – URL: <https://share.google/JNAe7YVwPoP6Moyok> (data obrashcheniya: 20.05.2024). (In Russian).
4. Suleimanova A., Bapaev B., Baidilda Eh. Otkhody fosfogipsa v Taraze v pervye nachali vyvozit' za gorod [Elektron. resurs]. – 2024. – URL: <https://24.kz/ru/news/social/674816-otkhody-fosfogipsa-v-taraze-v-pervye-nachali-vyvozit-za-gorod> (data obrashcheniya: 09.10.2024). (In Russian).
5. Sovremennye napravleniya pererabotki fosfogipsa / V.V. Golovneva i dr. // Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii. TOM XXXIV. – 2020. – № 4. – S. 65-67. (In Russian).
6. Kopylev B.A. Tekhnologiya ehkstraktsionnoi fosfornoj kisloty / B.A. Kopylev. – L.: Khimiya, 1981. – 67s. (In Russian).
7. Kislotnye metody pererabotki fosfatnogo syr'ya / E.L. Yakhontova i dr. – M.: Khimiya, 1988. – 288 s. (In Russian).
8. Soboleva I.V., Lyashenko S.E. Studying the Dihydrate Stage of the Process of Preparation of Extractive Phosphoric Acid by the Dihydrate-Hemihydrate Method from Low-Grade Phosphorites I.V. Soboleva, S.E. Lyashenko // Theor Found Chem Eng. – 2023. – № 57. – R. 633-637. <https://doi.org/10.1134/S0040579523040267>. (In English).
9. Soboleva I.V. Investigation of reaction kinetics for industrial dihydrate method of P2O5 production / I.V. Soboleva, E. Koltsova // International Congress of Chemical and Process Engineering. – 2006. – № 17. (In English).
10. Staged purification of phosphogypsum using pH-dependent separation process / H. Chanouri et al // Environ. Sci. Pollut. Res. – 2024. № 31(7). – R. 9920-9934. (In English).
11. Matematicheskoe modelirovanie polugidratnoi stadii digidratno-polugidratnogo protsessa polucheniya ehkstraktsionnoi fosfornoj kisloty iz fosforitov / A.S. Egorkin i dr. // Fundamental'nye issledovaniya. – 2013. – № 6. – S. 33-37. (In Russian).
12. Becker P. Phosphates and phosphoric acid—raw materials, Technology, and economics of the wet process. – New York: MARCEL DEKKER, INC. 1983. (In English).
13. Study on the Properties of Waste Apatite Phosphogypsum as a Raw Material of Prospective Applications / K. Grabas et al // Waste Biomass Valor. – 2019. – № 10. – R. 3143-3155 <https://doi.org/10.1007/s12649-018-0316-8>. (In English).
14. Li X. Effect of Molecular Structure of Organic Acids on the Crystal Habit of α -CaSO₄·0.5H₂O from Phosphogypsum / X. Li, Q. Zhang // Crystals. – 2020. – № 10(1). – R. 24. <https://doi.org/10.3390/cryst10010024>. (In English).
15. Resource utilization and development of phosphogypsum-based materials in civil engineering / X. Qin et al // J. Clean. Prod. – 2023. – № 387. – R. 135858. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135858> (In English).
16. Production Waste Management: Qualitative and Quantitative Characteristics and the Calculation of the Hazard Class of Phosphogypsum / N. Seraya et al // Processes – 2023. – № 11(10). – R. 3033. <https://doi.org/10.3390/pr11103033>. (In English).
17. Better filterability and reduced radioactivity of phosphogypsum during phosphoric acid production in Morocco using a fly ash waste and pure silica additive / F.E. Arhouni et al // J Radioanal Nucl Chem. – 2022. – № 331. – R. 1609-1617. <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08235-y>. (In English).

18. Pozin M.E. Fiziko-khimicheskie osnovy neorganicheskoi tekhnologii / M.E. Pozin, R.Yu. Zinyuk. – L.: Khimiya, 1985. – 384 s. (In Russian).
19. Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornykh rabot po distsipline «Khimicheskaya tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv» / Sh.M. Moldabekov i dr. // YUKGU im. M. Auehzova. – Shymkent, 2006. – С. 105. (In Russian).

Г.М. Сейтмагзимова¹, Ж.С. Серікбаева^{1*}, Е.А. Полтанова², Л.А. Сейтмагзимова³, Р.Р. Якубова¹

¹М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті,
160012, Қазақстан Республикасы, Шымкент қ., Тауке-хан даңғылы, 5

²«Казфосфат» ЖШС, «Минералды тыңайтқыштар»,
Қазақстан Республикасы, Тараз қаласы, Ниятқалиев көшесі, 128

³Алматы технологиялық университеті,
Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Төле би көшесі, 100

*e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru

ЭКСТРАКЦИЯЛЫҚ ФОСФОР ҚЫШҚЫЛЫН АЛУДЫҢ ДИГИДРАТТЫ ЖӘНЕ ЖАРТЫЛАЙГИДРАТТЫ ӨДІСТЕРІ КЕЗІНДЕГІ ФОСФОГИПС КРИСТАЛДАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫНЫҢ ҚАЛЫПТАСУЫ ЖӘНЕ СҮЗУ СИПАТТАМАЛАРЫ

Экстракциялық фосфор қышқылы (ЭФҚ) өндірісінде түзілетін фосфогипсті кәдеге жарату және сақтау проблемасы өте өзекті болып табылады, өйткені ол су объектілерінің, жердің және атмосфераның ластануының экологиялық проблемаларымен байланысты. Фосфогипстің үлкен көлемде жиналуы оны қайта өңдеудің тиімді әдістерін әзірлеуді қажет етеді. Фосфогипсті химиялық өңдеудің негізгі талаптарының бірі – оның гранулометриялық құрамы, ең алдымен кристалдардың өлшемі мен пішіні. Жұмыста ЭФҚ алу режимінің және сұйық пен қатты фазалардың арақатынасының (С:Қ) фосфогипстің химиялық құрамына, кристалдардың өлшемі мен габитусына, сондай-ақ оның сүзгілеу қасиеттеріне әсері зерттелді. Фосфогипсті алу диgidратты және жартылай гидратты әдістермен С:Қ = 2,5:1 және 3:1 жағдайында зертханалық ортада, сондай-ақ «Қазфосфат» компаниясының «Минералды тыңайтқыштар» Тараз филиалындағы технологиялық процесс жағдайында жүргізілді. Үлгілердің құрамы мен морфологиясы рентген-флуоресцентті және рентгендік фазалық әдістермен және электронды микроскопиямен көмегімен зерттелді. Рентген-дифракциялық талдау арқылы 90-95°C температурада өндірістік жағдайларда алынған фосфогипс тұнбасының сүзілу қабілетінің төмендеуін тудыратын ұсақ дисперсті ангидриттің болуы анықталды. Экстракцияны диgidратты режимде С:Қ = 3:1 қатынасында жүргізу гипстің ірі, біртекті, изометриялық кристалдарының түзілуіне ықпал ететіні және сүзгілеудің ең жоғары өнімділігін қамтамасыз ететіні анықталды. Зерттеу нәтижелері ЭФҚ өндірісін оңтайландыруда пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: фосфогипс; экстракциялық фосфор қышқылы; диgidратты және жартылайгидратты әдістер; сүзгілеу; кристалдар өлшемі.

G. Seitmagzimova¹, Zh. Serikbayeva^{1*}, E. Poltanova², L. Seitmagzimova³, R.R. Yakubova¹

¹M. Auezov South Kazakhstan University,
5 Tauke Khan Avenue, Shymkent, 160012, Republic of Kazakhstan

²Kazphosphate LLP, Mineral Fertilizers,
128 Nietkaliyev Street, Taraz, Republic of Kazakhstan

³Almaty Technological University,
100 Tole Bi Street, Almaty, Republic of Kazakhstan

*e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru

FORMATION OF CRYSTAL STRUCTURE AND FILTRATION CHARACTERISTICS OF PHOSPHOGYPSUM IN DIHYDRATE AND HEMIHYDRATE METHODS OF WET-PROCESS PHOSPHORIC ACID PRODUCTION

The problem of utilization and storage of phosphogypsum generated during the production of wet-process phosphoric acid (WPA) is extremely relevant due to environmental issues associated with the pollution of water bodies, land, and the atmosphere. The large-scale accumulation of phosphogypsum requires the development of effective methods for its processing. A key requirement for the chemical processing of phosphogypsum is its particle-size distribution, primarily the size and shape of crystals. This study investigates the influence of the WPA production mode and the liquid-to-solid ratio (L:S) on the chemical composition, crystal size and habit, and filtration properties of phosphogypsum. Phosphogypsum was produced by dihydrate and hemihydrate methods at L:S ratios of 2.5:1 and 3:1 under laboratory conditions and under industrial

process conditions at the Taraz branch «Mineral Fertilizers» of Kazphosphate. The composition and morphology of the samples were examined using X-ray fluorescence and X-ray diffraction methods, as well as electron microscopy. X-ray diffraction analysis identified the presence of finely dispersed anhydrite, which reduces the filterability of phosphogypsum precipitate obtained under industrial conditions at temperatures of 90-95°C. It was established that extraction in the dihydrate mode at L:S ratio of 3:1 promotes to formation of larger, uniform-size, isometric crystals of gypsum and ensures the maximum filtration productivity. The research results can be used to optimize WPA production.

Key words: phosphogypsum; wet-process phosphoric acid; dihydrate and hemihydrate methods; filtration; crystal size.

Сведения об авторах

Галина Мануиловна Сейтмагзимова – кандидат технических наук, профессор кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: galinaseit@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2357-626X>.

Жүрсінай Садухасқызы Серікбаева* – докторант кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8153-8206>.

Екатерина Андреевна Полтанова – главный технолог ТФ ТОО «Казфосфат» «Минеральные удобрения», г. Тараз, Республика Казахстан; e-mail: Poltanova.Ye@kpp.kz.

Лаззат Адебовна Сейтмагзимова – кандидат технических наук, ассистент-профессор кафедры «Технология химического и фармацевтического производства», Алматинский технологический университет, г. Алматы, Республика Казахстан; e-mail: lseytmag@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5693-2714>.

Раиса Ривкатовна Якубова – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология неорганических и нефтехимических производств», Южно-Казахстанский университет имени М. Ауэзова, г. Шымкент, Республика Казахстан; e-mail: yarr-57@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1813-1933>.

Авторлар туралы мәліметтер

Галина Мануиловна Сейтмагзимова – техника ғылымдарының кандидаты, «Бейорганикалық және мұнай-химия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының профессоры, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: galinaseit@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2357-626X>.

Жүрсінай Садухасқызы Серікбаева* – «Бейорганикалық және мұнай-химия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының докторанты; М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8153-8206>.

Екатерина Андреевна Полтанова – «Казфосфат» ЖШС Тараз филиалы «Минералды тыңайтқыштар» бас технологы, Тараз қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: Poltanova.Ye@kpp.kz.

Лаззат Адебовна Сейтмагзимова – техника ғылымдарының кандидаты, «Химиялық және фармацевтикалық өндіріс технологиясы» кафедрасының ассистент-профессоры; Алматы технологиялық университеті, Алматы қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: lseytmag@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5693-2714>.

Раиса Ривкатовна Якубова – техника ғылымдарының кандидаты, «Бейорганикалық және мұнай-химия өндірістерінің технологиясы» кафедрасының доценті, М. Әуезов атындағы Оңтүстік Қазақстан университеті, Шымкент қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: yarr-57@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1813-1933>.

Information about the authors

Galina Seitmagzimova – Candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Technology of Inorganic and Petrochemical Productions; M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: galinaseit@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2357-626X>.

Zhursinay Serikbaeva* – PhD student of the Department of Technology of Inorganic and Petrochemical Productions, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: Zhursinay.Serikbaeva@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-8153-8206>.

Ekaterina Poltanova – Chief Technologist, Taraz Branch, Kazphosphate LLP, Mineral Fertilizers, Taraz, Republic of Kazakhstan; e-mail: Poltanova.Ye@kpp.kz.

Lazzat Seitmagzimova – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor of the Department of Chemical and Pharmaceutical Production Technology, Almaty Technological University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: lseytmag@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5693-2714>.

Raisa Yakubova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Inorganic and Petrochemical Productions, M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Republic of Kazakhstan; e-mail: yarr-57@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1813-1933>.

Поступила в редакцию 22.01.2026
Поступила после доработки 10.03.2026
Принята к публикации 11.03.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2\(22\)-68](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-2(22)-68)



FTAXP: 61.59.37

**Д.Н. Аширалиева¹, Ж. Тоқтарбай¹, М.С. Кунарбекова¹, Б.У. Рахимова²,
К.К. Құдайбергенов^{1*}**

¹Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық зерттеу техникалық университеті,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Сәтбаев көшесі, 22

²Қазақ ұлттық қыздар педагогикалық университеті,
050000, Қазақстан Республикасы, Алматы қаласы, Гоголь көшесі, 114/8
*e-mail: k.kudaibergenov@satbayev.university

ФУНКЦИОНАЛДАНҒАН НАНОЦЕЛЛЮЛОЗА НЕГІЗІНДЕГІ АДСОРБЕНТТЕР: СУДЫ ОРГАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ БЕЙОРГАНИКАЛЫҚ ЛАСТАУШЫЛАРДАН ТАЗАРТУ

Аңдатпа: Өнеркәсіп секторларының қарқынды дамуымен бірге су ресурстарының ластануы жаһандық экологиялық мәселеге айналды. Осы шолу мақаласында функционалданған наноцеллюлоза негізіндегі адсорбенттердің судағы органикалық (синтетикалық бояғыштар, фенолдар, антибиотиктер, пестицидтер) және бейорганикалық (Pb^{2+} , Cd^{2+} , Hg^{2+} , $Cr(VI)$, Cu^{2+} , As) ластаушыларды жоюдағы тиімділігі жүйелі талданды. Негізгі нәтижелер бойынша, ең жоғары сорбциялық сыйымдылыққа ТЕМРО- тотыққан наноцеллюлоза мен амин-функционализацияланған композиттер қол жеткізеді: метилен көгі үшін 2500 мг/г-ге дейін, қорғасын иондары үшін 2270 мг/г-ге дейін. Наноцеллюлоза негізіндегі молекулалық таңбаланған полимерлер (МТП) бәсекелес қосылыстар болған жағдайда фенолдарды 97% тиімділікпен селективті адсорбциялайды. Адсорбенттердің басым бөлігі 20 циклге дейін регенерацияланғанда 80–90% сыйымдылықты сақтайды. Мақалада наноцеллюлозаның үш негізгі түрі (ЦНК, НФЦ, БНЦ), олардың алу әдістері (қышқылдық гидролиз, ТЕМРО-тотығуы, механикалық және ферменттік өңдеу) және беттік функционалдандыру стратегиялары (изоцианаттық, амин- және тиол-функционализация) қарастырылды. Ауылшаруашылық қалдықтарынан (күріш қауызы, соя қабығы) наноцеллюлоза өндіру тұрақты даму қағидаттарына сәйкес келетіндігі атап өтіледі. Сондай-ақ масштабтау, реальды ағынды суларда тұрақтылық пен экономикалық тиімділік сияқты шешілмеген мәселелер мен болашақ зерттеу бағыттары айқындалды.

Түйін сөздер: наноцеллюлоза, функционализация, адсорбция, ауыр металдар, органикалық ластаушылар, молекулалық таңбаланған полимерлер, су тазарту, нанокмозиттер.

Кіріспе

Өнеркәсіп секторларының жоғары қарқынмен дамуы зиянды қосылыстардың көп мөлшерде қоршаған ортаға таралуына тікелей әсер етеді [1, 2]. Қауіпті шығарындылардың ағын суларға енуі және су қорларының ластануы қазіргі таңда жер бетіндегі күрделі мәселелердің бірі - ауыз су тапшылығына алып келуде [3]. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының соңғы жылдары жиналған статистикалық мәліметтері бойынша, жыл сайын 267,5 млрд м³ ағын су көлемі тұрмыстық және өнеркәсіптік қалдықтармен ластанады. Бұл көлемнің тек 63% (168,8 млрд м³) ғана тазартылу мақсатында жинақталады, бірақ іс жүзінде нақты тазартылуға 146,3 млрд м³ ұшырайды [4].