

Статья поступила в редакцию: 13.07.2026

Статья принята к публикации: 24.07.2026

Статья опубликована: 28.08.2026

УДК 661.52+631.8

DOI: 10.32743/UniTech.2026.149.8.23298

Получение сложных удобрений из низкосортных фосфоритов с использованием фосфогипса и глауконита

Джумабаев Расулбек Фарход угли

базовый докторант

Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

Республика Узбекистан, Нукус

E-mail: jumabaev_r@karsu.uz

Реймов Ахмед Мамбеткаримович

д-р техн. наук, проф.

акад., Академия Наук Республики Узбекистан, Каракалпакское Отделение

Республика Узбекистан, г. Нукус

Курбаниязов Рашид Калбаевич

д-р. техн. наук, доц., Каракалпакский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Нукус

Кыстаубаева Молдир Артыкбаевна

базовый докторант

Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

Республика Узбекистан, Нукус

Ережепова Бибинур Курбаназар кизи

магистрант

Каракалпакский государственный университет

Республика Узбекистан, г. Нукус

Production of complex fertilizers from low-grade phosphorites using phosphogypsum and glauconite

Jumaboyev Rasulbek

Basic doctoral student

Karakalpak State University named after Berdakh

Republic of Uzbekistan, Nukus

Reymov Akhmed

doctor of Technical Sciences

Prof., Academician, Karakalpak Branch of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

Republic of Uzbekistan, Nukus

Kurbaniyazov Rashid

doctor of Technical Sciences, Associate Professor

Karakalpak State University

Republic of Uzbekistan, Nukus

Kistaubaeva Moldir

Basic doctoral student

Karakalpak State University named after Berdakh

Republic of Uzbekistan, Nukus

Erejepova Bibinyr

master's student

Karakalpak State University

Republic of Uzbekistan, Nukus

Аннотация

Основной целью исследования является перевод низкосортных фосфоритов Центральных Кызылкумов в усвояемую форму с низкой нормой экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК), утилизация промышленных отходов фосфогипса и одновременное использование его в виде мелиоранта для засоленных земель, обогащение состава сложного удобрения на основе глауконитовых песков микроэлементами, а также снижение расхода аммиака, используемого при традиционном методе нейтрализации, путём добавления фосфогипса и глауконита в кислотную среду, образуемую ЭФК. Содержание P_2O_5 в составе сложного удобрения определяли спектрофотометрическим методом, содержание CaO — потенциометрическим титрованием, pH — ионометром, а прочность гранул — приборе для измерения прочности гранул. Глауконит способствует реакции нейтрализации кислой среды сложных удобрений, фосфогипс способствует относительной нейтрализации удобрений в кислой среде, что приводит к снижению расхода аммиака. В составе сложных удобрений, полученных из принятой оптимальной нормы ЭФК, содержатся в достаточном количестве усвояемые растениями формы P_2O_5 и CaO . Механическая прочность гранул сложных удобрений полностью соответствует требованиям ГОСТ, установленным для фосфорных удобрений. В целом, такая технология производства позволяет эффективно использовать низкосортные фосфориты и промышленные отходы, получать гранулированные сложные удобрения, отвечающие требованиям ГОСТа, со снижением нормы ЭФК и расхода аммиака.

Библиографическое описание: Получение сложных удобрений из низкосортных фосфоритов с использованием фосфогипса и глауконита // Universum: технические науки : электрон. научн. журн. Джумабаев Р.Ф.У. [и др.]. 2026. 8(149). URL: <https://7universum.com/ru/tech/archive/item/23298>

Abstract

The main objective of this study is to convert low-grade phosphorites from the Central Kyzylkum deposit into a plant-available form using a reduced dosage of extraction phosphoric acid (EPA), to utilize phosphogypsum industrial waste while simultaneously employing it as a soil amendment for saline soils, to enrich the composition of complex fertilizers based on glauconite sands with micronutrients, and to reduce the consumption of ammonia used in the conventional neutralization process by introducing phosphogypsum and glauconite into the acidic medium generated by EPA. The P_2O_5 content in the complex fertilizer was determined by the spectrophotometric method, the CaO content by potentiometric titration, the pH using an ionometer, and the mechanical strength of the granules using a granule strength testing instrument. Glauconite promotes the neutralization reaction of the acidic medium of complex fertilizers, while phosphogypsum contributes to the partial neutralization of fertilizers in the acidic medium, thereby reducing ammonia consumption. The complex fertilizers produced using the adopted optimum dosage of EPA contain sufficient amounts of plant-available forms of P_2O_5 and CaO. The mechanical strength of the complex fertilizer granules fully complies with the requirements of the GOST standard established for phosphate fertilizers. Overall, this production technology enables the efficient utilization of low-grade phosphorites and industrial waste, making it possible to produce granular complex fertilizers that comply with GOST requirements while reducing both the dosage of EPA and ammonia consumption.

Ключевые слова: сложное удобрение, низкосортный фосфорит, экстракция фосфорной кислоты, фосфогипс, глауконит, активация, нейтрализация.

Keywords: complex fertilizer, low-grade phosphorite, phosphoric acid extraction, phosphogypsum, glauconite, activation, neutralization.

Введение

По мнению учёных, важным условием обеспечения производства достаточных, безопасных и питательных продуктов питания для удовлетворения потребностей населения мира, которое, по прогнозам, достигнет 10 миллиардов к 2050 году, является постоянная модернизация сельскохозяйственного сектора [8,5]. В исследованиях отмечается, что хотя эти цифры ещё больше выросли в результате пандемии COVID-19, мировое сообщество ещё до пандемии сбилось с пути достижения цели по снижению голода до нуля к 2030 году. Из-за изменения потребления и предпочтений в отношении продуктов питания, для удовлетворения растущего спроса на продукты питания к 2050 году необходимо увеличить объём промышленности по производству продуктов питания примерно на 50 процентов [3]. Фосфатные породы по-прежнему являются основным источником фосфора для удобрений, но это ограниченный ресурс, который не будет сохраняться вечно. Основным местным источником фосфора в Узбекистане является фосфорит Центральных Кызылкумов. Однако этот фосфорит в основном состоит из низкокачественных руд с высоким содержанием солей кальция и минералов, похожих на апатит. Когда эти фосфориты используются непосредственно в почве, они работают не очень хорошо, так как фосфор удерживается в формах, которые растениям трудно использовать, и выделяется только медленно. Это

означает, что фосфор легко недоступен для растений, что может ограничить их рост и развитие. В результате фермерам может потребоваться использовать больше этих фосфоритов для достижения того же эффекта, что может быть неэффективным и дорогостоящим [6,10]. Чтобы фосфор был пригоден для использования растениями, сырьё обычно обрабатывают кислотой. Сильные кислоты могут разлагать карбонатный материал, но они также повреждают фосфатные части и расходуют много кислоты, что увеличивает затраты и снижает количество полезного фосфора. Таким образом, при работе с низкосортными рудами лучше использовать меньше кислоты, но при этом убедиться, что большая часть фосфора пригодна для использования в конечном продукте. Такой подход технически и экономически обоснован [7].

Производство фосфорной кислоты с использованием влажного процесса создаёт большую проблему — это приводит к образованию большого количества фосфогипса в качестве побочного продукта. Этот фосфогипс занимает много места для хранения, наносит вред окружающей среде и увеличивает стоимость производства фосфорной кислоты. Таким образом, поиск полезных и ценных способов использования фосфогипса является ключевой целью современной циркулярной экономики [4,11]. С другой стороны, фосфогипс богат кальцием, что делает его отличным материалом для улучшения качества почвы, особенно для солёных почв, распространённых во многих районах [1].

Глауконит — ещё один очень полезный ресурс. Это тип слоистого силиката, богатый калием и железом, и имеет особую структуру, которая помогает медленно выделять питательные вещества, делая их более доступными для растений. Было доказано, что при активации глауконит улучшает плодородие почвы, что очень важно для роста растений. Это связано с тем, что он может обмениваться ионами и помогать растениям усваивать необходимые им питательные вещества, что делает его отличным естественным способом повышения качества почвы [2,9].

В научной литературе предложен ряд принципиальных технологических схем кислотной активации низкосортных фосфоритов. В качестве примера переработки фосфатного сырья методом кислотной активации приведены технологии с использованием серной (H_2SO_4), азотной (HNO_3), соляной (HCl) и экстракционной фосфорной кислоты (H_3PO_4). Среди основных технологий активация серной и азотной кислотами является наиболее эффективной для высокосортных фосфоритов, однако имеет ряд недостатков, связанных с образованием в процессе реакции определённого количества сульфата кальция (гипса).

При использовании экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) в реакционную систему не вводятся посторонние компоненты, а наличие фосфора непосредственно в составе кислоты обеспечивает более высокое содержание P_2O_5 по сравнению с активацией другими минеральными кислотами. Кроме того, в большинстве литературных источников фосфорит, фосфогипс и глауконит изучались отдельно, тогда как их совместная переработка в рамках единой технологической схемы исследована недостаточно.

При активации высококонцентрированными кислотами происходит растворение не только реакционноспособной части, но и минералов фосфорита, что может привести к потерям P_2O_5 . В связи с этим для переработки низкосортных фосфоритов целесообразно

использовать кислоты в пониженных нормах. Исходя из вышеизложенного, в настоящей работе в качестве основы была принята технологическая схема, предусматривающая активацию низкосортного фосфорита пониженной нормой экстракционной фосфорной кислоты с последующим введением фосфогипса и глауконита.

Целью данной статьи является получение особого вида сложного удобрения, объединяющего эти три компонента с меньшим использованием кислоты и аммиака, и налаживание использования промышленных отходов.

Объекты и методы исследования

Фосфатные породы Центральных Кызылкумов были основным источником фосфора. Он состоит в среднем из 21 % P_2O_5 , 46 % CaO, 1,24 % Al_2O_3 , 1,05 % Fe_2O_3 , 1,75 % MgO, 2 % F и 11,42 % CO_2 . Состав фосфогипса, являющегося побочным продуктом производства фосфорной кислоты на АО «Аммофос-Максам», был иным: 1,15 % общего P_2O_5 , 0,12 % водорастворимого P_2O_5 , 12,38 % H_2O , 51,17 % SO_3 и 36,84 % CaO. Кроме того, использовался глауконит месторождения Крантау, являющийся разновидностью алюмосиликата калия-железа. Комбинация этих трёх компонентов совместно перерабатывалась для получения сложных удобрений.

Эксперимент проводили в лабораторных условиях в три этапа: подготовка сырья, кислотная активация фосфорита и анализ полученного продукта. После доставки фосфорита с месторождения его высушивали на открытом воздухе при комнатной температуре с целью удаления поверхностной влаги. Высушенные образцы измельчали в лабораторной щековой дробилке (Retsch BB 250) до размера частиц менее 5 мм. Затем материал подвергали дополнительному измельчению в шаровой мельнице (Retsch PM 200) до получения однородного порошка. Полученный порошок просеивали с использованием лабораторного анализатора сит (Retsch AS 200 control B) для получения фракции с заданным размером частиц. Перед кислотной активацией образцы высушивали в сушильном шкафу с принудительной циркуляцией воздуха (FAITHFUL Drying Oven 101-1AB) при температуре 80 °C в течение 2–3 часов. После сушки образцы охлаждали в эксикаторе до комнатной температуры для предотвращения повторного поглощения влаги, после чего направляли на стадию кислотной активации. На следующем этапе рассчитанные количества фосфорита и кислоты взвешивали на аналитических весах (HERMES ZEC 21) и помещали в термостатируемый стеклянный контейнер.

Эта кислота содержит 16—16,5 % P_2O_5 , которую добавляют в фосфоритную муку в количестве 5—50 % от обычной потребности. Кислоту постепенно вливают в фосфоритную муку, расположенную под вытяжным шкафом, потому что в результате реакции выделяются углекислый газ и фтористый водород, а температура может повыситься до 80—90 градусов. Весь процесс занимает около 30 минут. Затем в смесь добавляют немного глауконита и фосфогипса и тщательно перемешивают. После этого, если полученная смесь очень кислая, её нейтрализуют жидким аммиаком. Наконец, смесь измельчают в мелкие гранулы с помощью дискового гранулятора и водяного распылителя, а затем сушат в сушилке при температуре 80 градусов до достижения постоянного веса.

Содержание P_2O_5 определяли спектрофотометрическим методом (UV-5100 UV-VIS, согласно EN 15959), а CaO — потенциометрическим титрованием (автоматический титратор HI901, Hanna Instruments). В 10 %-ной водной суспензии pH измеряли на ионометре ПХСЖ-216Ф, а прочность гранул на дробление — на приборе УНКС-3А.

Согласно требованиям ГОСТ 21560.2 – 82, гигроскопические свойства фосфоритовой муки и гранулированных сложных удобрений размером 2 – 3 мм определяли эксикаторным методом при температуре 25°C.

Каждый эксперимент проводили в трёх повторностях ($n = 3$), а полученные результаты представляли в виде среднего значения $\pm$ стандартного отклонения ($\text{mean} \pm \text{SD}$). Статистическую оценку влияния нормы кислоты на показатели удобрения (содержание усвояемых форм P_2O_5 и CaO, значение pH и механическую прочность гранул) проводили с использованием однофакторного дисперсионного анализа (one-way ANOVA). Различия считали статистически значимыми при $p < 0,05$. Полосы погрешностей (error bars), представленные на рисунках, соответствуют стандартному отклонению ($\pm \text{SD}$), рассчитанному по результатам трёх параллельных измерений.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные результаты представлены в таблице 1. Как видно из таблицы 1, с увеличением нормы экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) и добавлением минерала глауконита общее содержание P_2O_5 в полученных продуктах значительно возрастает, тогда как общее содержание CaO существенно снижается. Это явление объясняется тем, что экстракционная фосфорная кислота (ЭФК) содержит 16–16,5 % P_2O_5 . При активации фосфорита с использованием 5 %-ной нормы экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) и последующем добавлении фосфогипса и глауконита с увеличением их доли наблюдается снижение общего содержания P_2O_5 с 13,54 % до 8,5 %. При этом общее содержание CaO также уменьшается с 33,91 % до 24,17 %. Аналогичные изменения наблюдались при использовании экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) в нормах 10, 20, 30 и 50 %.

Таблица 1.

Химические составы сложных удобрений на основе Кызылкумского фосфорита, фосфогипса и глауконита

№	Сотношения ком- понентов	Расход Н ₂ О От- нос. от общ. Мас. сис. %	Содержания компанентов %						рН 10% ный сусп.	Проч. гра- нул, МПа	Гигр. точ, %
	ФМ : ЭФК : ФГ : Г		P ₂ O ₅ общ	P ₂ O ₅ общ	P ₂ O ₅ усв	CaO усв	P ₂ O ₅ вод	CaO вод			
5% нормы экстракции фосфорной кислоты (норма применения ЭФК)											
1	2,5 : 1 : 1,3 : 0	0,72	13,54	33,91	5,9	16,03	1,30	8,97	6,85	2,31	76,61
2	2,5 : 1 : 2,5 : 0	1	12,39	37,74	5,5	18,16	1,31	10,25	6,79	1,66	79,48
3	2,5 : 1 : 1,3 : 1,3	1,2	12,32	28,66	5,56	14,2	1,37	8,01	6,86	1,94	74,85
4	2,5 : 1 : 2,5 : 2,5	1,45	8,504	24,17	4,03	12,4	1,14	7,12	6,83	1,73	72,41
10% нормы экстракции фосфорной кислоты (норма применения ЭФК)											
5	1,3 : 1 : 0,6 : 0	0,2	18,98	32,66	9,46	16,94	2,87	10,09	6,01	2,68	75,23
6	1,3 : 1 : 1,3 : 0	0,3	14,63	34,75	7,45	18,34	2,30	11,09	6,1	2,14	78,08

№	Сотношения ком- понентов	Расход H ₂ O От- нос. от общ. Мас. сис. %	Содержания компонентов %						рН 10% ный сусп.	Проч. гра- нул, МПа	Гигр. точ, %
	ФМ : ЭФК : ФГ : Г		P ₂ O ₅ общ	P ₂ O ₅ общ	P ₂ O ₅ усв	CaO усв	P ₂ O ₅ вод	CaO вод			
7	1,3 : 1 : 0,6 : 0,6	0,2	14,66	27,45	7,57	14,79	2,36	9,07	6,14	2,27	73,45
8	1,3 : 1 : 1,3 : 1,3	0,33	10,91	23,22	5,86	12,81	1,89	8,12	6,17	1,96	71,01
20% нормы экстракции фосфорной кислоты (норма применения ЭФК)											
9	0,6 : 1 : 0,3 : 0	-	22,31	31,13	12,65	18,41	4,27	11,34	3,96	3,14	69,71
10	0,6 : 1 : 0,6 : 0	-	17,98	31,65	10,36	19,01	3,60	11,96	4,21	2,7	72,55
11	0,6 : 1 : 0,3 : 0,3	-	18,16	25,91	10,6	15,69	3,74	10,01	4,27	2,61	67,92
12	0,6 : 1 : 0,6 : 0,6	-	13,28	22,57	8	14,01	2,93	9,18	4,25	2,46	65,50
30% нормы экстракции фосфорной кислоты (норма применения ЭФК)											
13	0,4 : 1 : 0,2 : 0	-	23,55	26,39	14,96	18,7	5,68	11,4	2,6	2,8	63,75
14	0,4 : 1 : 0,4 : 0	-	18,99	28,31	12,2	20,36	4,73	12,49	3,19	3,6	66,62
15	0,4 : 1 : 0,2 : 0,2	-	19,81	22,82	12,9	16,55	5,06	10,2	3,2	4,1	62,01
16	0,4 : 1 : 0,4 : 0,4	-	16,41	21,16	11,28	15,69	4,45	9,98	3,38	4,5	59,55
50% нормы экстракции фосфорной кислоты (норма применения ЭФК)											
17	0,3 : 1 : 0,1 : 0	-	28,16	23,61	20,8	18,5	8,40	11,88	2,58	5,1	59,37
18	0,3 : 1 : 0,3 : 0	-	23,03	23,82	17,22	18,85	7,13	12,2	2,61	5,68	62,23
19	0,3 : 1 : 0,1 : 0,1	-	23,19	19,46	17,6	15,63	7,40	10,13	2,64	5,91	57,60
20	0,3 : 1 : 0,3 : 0,3	-	18,81	19,01	14,8	15,7	6,37	10,3	2,76	4,75	55,16

При производстве фосфорных удобрений одним из основных показателей качества является содержание усвояемых растениями и водорастворимых форм фосфора и кальция. Поэтому в настоящем исследовании были определены усвояемые растениями и водорастворимые формы фосфора и кальция. Полученные результаты представлены на рисунке 1.

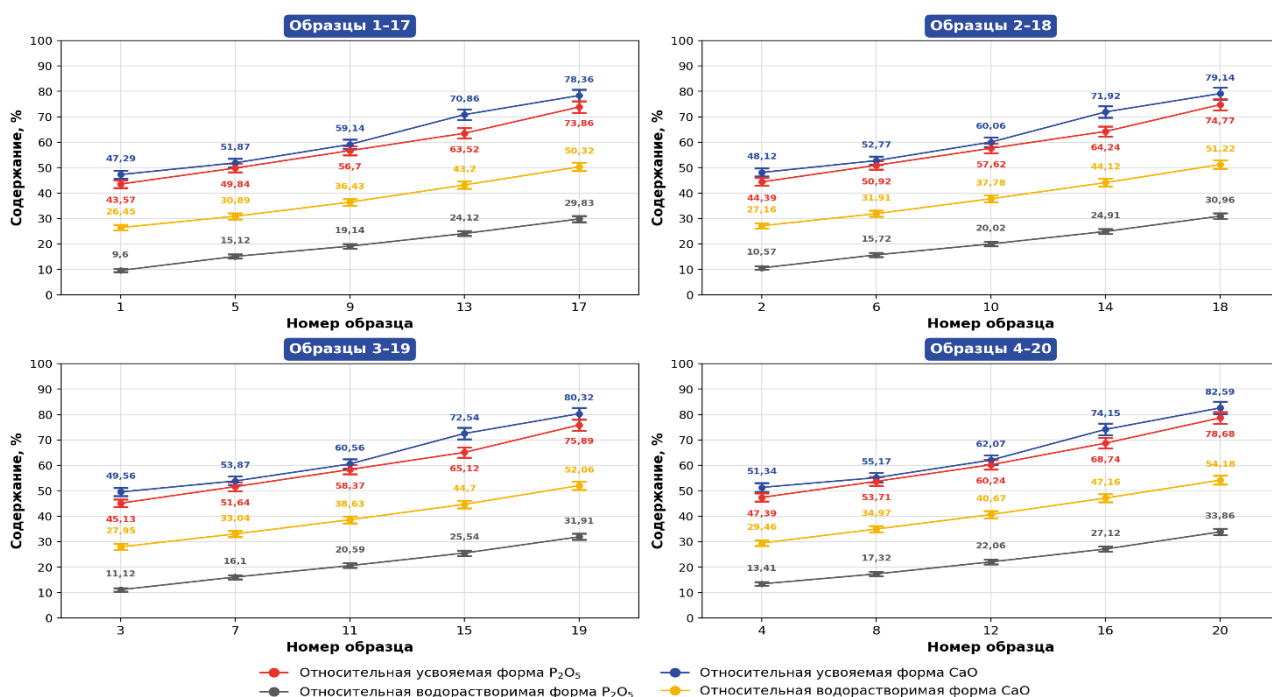


Рисунок 1. Изменение относительного содержания усвояемых и водорастворимых форм фосфора и кальция в зависимости от нормы ЭФК

Как показано на рисунке 1, полученные удобрения содержат определённое количество водорастворимого фосфора. В частности, при активации фосфорита с использованием 5 %-ной нормы экстракционной фосфорной кислоты (ЭФК) содержание водорастворимого P_2O_5 в удобрениях составляет 9,60–13,41 %, тогда как содержание CaO находится в пределах 26,45–29,46 %. При увеличении нормы ЭФК до 50 % эти показатели значительно возрастают, достигая 29,83–33,86 % для P_2O_5 и 50,32–54,18 % для CaO. Полученные результаты свидетельствуют об образовании определённого количества монокальцийфосфата в процессе активации.

При увеличении нормы ЭФК с 5 до 50 % относительное содержание усвояемого растениями фосфора возрастает с 43,57 % до 78,68 %. Одновременно относительное содержание усвояемого CaO увеличивается с 47,29 % до 82,59 %.

Различия между нормами по активационному дисперсионному анализу при норме кислоты от 5 % до 50 % были статистически значимыми ($p < 0,05$). Повышение доли добавляемого фосфогипса приводит к заметному увеличению доли усвояемых форм фосфора. Это можно объяснить наличием в составе фосфогипса остаточной фосфорной кислоты и связанных с ней примесей.

Исследования условий хранения продукции показывают, что образец (12-образец), выбранный как оптимальный, может храниться в стандартных обычных мешках при относительной влажности воздуха ниже 65,5 %.

Глауконит и фосфогипс обладают нейтрализующим действием. При высоком содержании кислоты, таком как 30 или 50 %, смесь становится очень кислой. Если обработка не проводится, для её балансировки потребуется много аммиака, что также может повредить оборудование. Начальная точка каждого компонента различна: pH 10 %-ной фосфоритовой смеси около 11, глауконита около 9, фосфогипса 4,91 и экстракционная кислота очень низкая, от 1,5 до 2. Поскольку глауконит и фосфогипс близки к нейтральным или слегка щелочны,

они помогают сбалансировать кислотность при добавлении в смесь. Они выполняют функцию мягкого буфера, снижая кислотность смеси. Это важно, так как высокая кислотность может вызвать такие проблемы, как повреждение оборудования. Добавление глауконита и фосфогипса снижает кислотность и делает работу со смесью более безопасной.

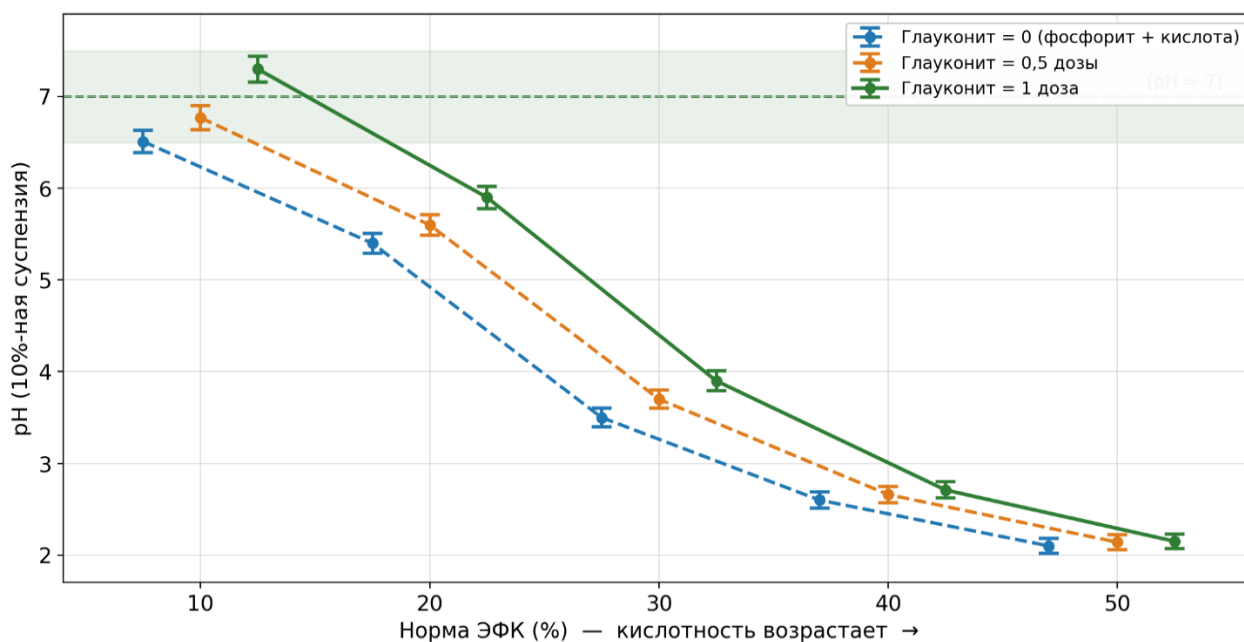


Рисунок 2. Изменение показателя pH удобрения путём добавления глауконита Крантау к продуктам переработки фосфорита Центральных Кызылкумов с неполной нормой ЭФК (планки погрешностей — $\pm SD$, $n = 3$)

Из рисунка 2 видно, что при добавлении большего количества глауконита смесь становится менее кислой и приближается к нейтральному состоянию. Например, смесь фосфорита и глауконита в соотношении 1: 0,5 имеет значительно меньшую кислотность. При соотношении 1: 1 этот эффект становится ещё более заметным. Аналогичное действие оказывает и фосфогипс. К сведению, для нейтрализации смеси требуется меньше аммиака, что является большим преимуществом. Чем больше используется глауконита и фосфогипса, тем меньше аммиака требуется. Это не только экономит средства на реагенты, но и снижает износ оборудования. В то же время мы используем два промышленных побочных продукта, которые должны храниться в другом месте, что является отличным способом переработки и сокращения отходов.

Качество удобрения во многом зависит от того, насколько хорошо устойчивы его зёрна. Для фосфорных удобрений очень важна механическая прочность гранул. При увеличении нормы ЭФК с 5 до 50 % прочность гранул при измельчении увеличилась с 1,66 до 8,1 МПа. Это значительно выше нормы 2 МПа, установленной для фосфорных удобрений, то есть удобрение может выдерживать транспортировку и хранение без разложения. Гранулированное удобрение представляет собой однородный, свободно текучий материал, который очень удобно вносить в почву перед осенней вспашкой. Он также содержит фосфогипс, что помогает улучшить состояние засоленных почв.

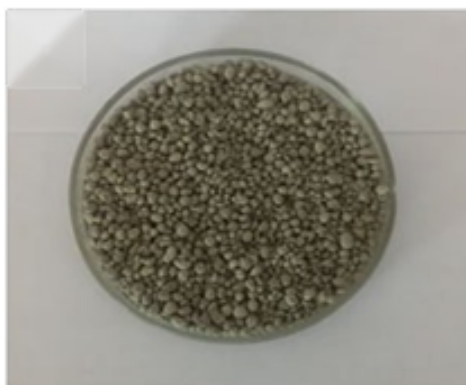


Рисунок 3. Внешний вид полученного гранулированного сложного смешанного удобрения

По результатам этих экспериментов была составлена основная технологическая схема переработки низкосортного фосфорита Центральных Кызылкумов. В этой схеме низкосортный фосфорит активируют ЭФК в малых дозах, затем смешивают с фосфогипсом и глауконитом Крантау (рис. 4).

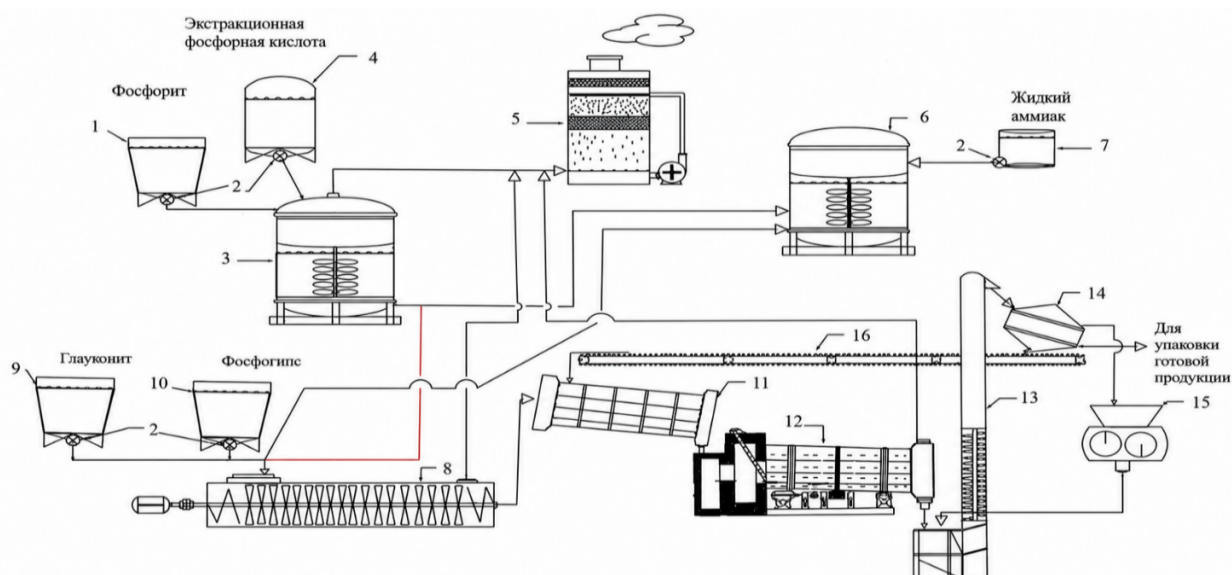


Рисунок 4. Основная технологическая схема получения сложных удобрений путём переработки низкосортных фосфоритов Центральных Кызылкумов экстракционной фосфорной кислотой с добавлением фосфогипса и глауконита

Схема состоит из следующих устройств: 1 — бункер фосфорита; 2 — дозатор; 3, 6 — реактор-экстрактор / реактор-нейтрализатор; 4 — ёмкость ЭФК; 5 — абсорбционная колонна; 7 — бункер жидкого аммиака; 8 — шнековый смеситель; 9 — бункер глауконита; 10 — бункер фосфогипса; 11 — гранулятор; 12 — сушилка; 13 — элеватор; 14 — двухэкранный инверсионный классификатор; 15 — дробилка; 16 — ленточный конвейер.

Первый этап — кислотная активация. Для начала этого процесса измельчённый фосфорит из ёмкости 1 взвешивается в установке 2 и выводится в специальный реактор-экстрактор 3. Одновременно из ёмкости 4 через дозатор 2 добавляется фосфорная кислота. Эта химическая реакция длится около 30 минут и выделяет много тепла, что делает смесь очень кислой и подверженной коррозии. Для предотвращения повреждений реактор обычно

покрывают специальными легированными сталями. Выделяющиеся в этом процессе газы, такие как углекислый газ и фтористые соединения, поглощаются в специальных абсорберах 5, чтобы они не выделялись в воздух. Это важный шаг к охране окружающей среды.

Процесс переходит к следующему этапу — нейтрализации. Переход реакционной смеси к нейтрализатору 6 зависит от того, насколько она кислая. Если смесь очень кислая, её направляют в нейтрализующий реактор 6, а жидкий аммиак из аммиачного бункера 7 через дозатор 2 — в реактор 6. Это происходит при очень быстром перемешивании смеси, так как при встрече аммиака с кислотной смесью он сразу начинает образовывать твёрдое вещество. Однако, если смесь не очень кислая, т.е. pH от 3,5 до 4, она пропускает этап нейтрализации и переходит непосредственно в смеситель, т.е. не нейтрализуется. Для этого есть две хорошие причины: во-первых, слишком кислые удобрения не хороши для солончаковой почвы в этом районе, а во-вторых, они могут быстрее разрушить оборудование. Аммиак, используемый на этом этапе, находится в жидкой, а не газообразной форме, так как его легче транспортировать и хранить, а также его можно добавлять в нейтрализатор без введения воздуха.

На третьем этапе все продукты смешиваются с дополнительными ингредиентами. Нейтрализованная или непосредственно пропущенная смесь поступает в смеситель 8. При этом Крантауский глауконит добавляется из бункера 9 и фосфогипс из бункера 10, каждый со своим специальным дозатором 2. Если в процессе перемешивания выделяются какие-либо газы, они перед удалением вновь улавливаются в абсорбционной колонне 5.

На четвёртом этапе процесс протекает следующим образом. Здесь смесь гранулируется, высушивается, а затем сортируется по размеру. Гранулятор 11 разделяет смесь на мелкие кусочки, которые затем сушат в специальной сушилке 12. После этого конвейерная лента 13 подаёт их на классификатор 14, который сортирует по размеру. Именно нужные размеры — от 1 мм до 4 мм — отправляются на упаковку и хранение. Но очень крупные — более 5 мм — направляют на измельчение в измельчитель 15, а затем снова в классификатор 14. Мелкие, порошкообразные кусочки возвращаются в гранулятор 11 через ленточный конвейер 16 для превращения в более крупные кусочки. Всё это происходит в большом цикле: мелкие и крупные фракции постоянно возвращаются для воспроизводства в нужном размере. Таким образом, промышленное внедрение подобных технологических схем играет важную роль в утилизации фосфогипса, который в настоящее время является крупнотоннажным отходом.

Технико-экономические показатели в основном связаны с активацией низкосортного фосфорита малой нормой кислоты. При этом для оптимально выбранного образца (образец № 12) соотношение фосфорит: ЭФК: фосфогипс: глауконит = (0,6: 1: 0,6: 0,6). Использование отхода производства — фосфогипса, а также местного сырья — глауконита, в количестве, сопоставимом с количеством фосфорита, обусловлено тем, что при меньшем расходе кислоты на активацию фосфорита обеспечивается получение большего количества комплексного удобрения. Начальный материальный баланс производства комплексного удобрения в расчёте на 1000 кг фосфоритной муки составляет: фосфоритная мука — 1000 кг, экстракционная фосфорная кислота (ЭФК, 16,5 % P_2O_5) — 1600,0 кг, фосфогипс — 1000 кг, глауконит — 1000 кг. В процессе грануляции дополнительная вода не расходуется, поскольку

влажность реакционной массы является достаточной. Количество выделившегося CO_2 составляет 1,34 %, а масса готового комплексного удобрения составляет приблизительно 3245 кг.

Готовый продукт сушат в сушильном аппарате при температуре 80–90 °С до достижения остаточной влажности 1–3 %. Данные показатели способствуют снижению себестоимости продукции и обеспечивают экономическую устойчивость технологии. Экономические показатели данного исследования — сметные затраты и рентабельность — должны быть рассчитаны на последующих этапах проведения исследований в более крупном масштабе.

Агрохимические показатели предлагаемого комплексного удобрения имеют важное значение благодаря объединению в составе одного продукта необходимых для питания растений элементов — фосфора (P), кальция (Ca), калия (K), азота (N), серы (S), а также микроэлементов (Zn, Mn, Cu, Mo, B). Более глубокое изучение агрохимических показателей должно быть проведено в более широком масштабе. В предлагаемом комплексном удобрении выявлен ряд отличий по сравнению с традиционными промышленными технологиями производства. При традиционных способах (например, при производстве суперфосфата и аммофоса путём полного разложения фосфорита серной кислотой (H_2SO_4) и азотной кислотой (HNO_3)) требуется активация высокосортного фосфорита полной нормой кислоты. Кроме того, при производстве аммофоса в значительных количествах образуется фосфогипс. В предлагаемой технологии комплексного удобрения предусмотрена переработка низкосортного фосфорита неполной нормой кислоты (20 %), использование фосфогипса в качестве сырья, а также совместное применение глауконита как местного сырья. Дополнительно следует отметить, что основное технологическое оборудование, применяемое в предложенной схеме (смеситель, гранулятор, сушильный барабан, грохот), относится к стандартному оборудованию, широко используемому на предприятиях по производству фосфорных удобрений, что обеспечивает возможность внедрения технологии без значительных дополнительных капитальных затрат. Настоящая работа выполнена в лабораторном масштабе. Основной целью исследования является определение химических и физико-механических показателей процесса получения комплексного удобрения путём активации низкосортного фосфорита малыми нормами кислот с последующим введением фосфогипса и глауконита. Проведение процесса в промышленном масштабе, выполнение опытно-промышленных испытаний, изучение агрохимических показателей в полевых условиях, проведение технико-экономических расчётов, а также определение содержания тяжёлых металлов и вредных примесей в составе готового продукта являются следующим этапом данного исследования.

Заключение

Результаты испытаний показывают, что можно приготовить особый вид удобрения, смешав фосфоритовую муку Центрального Кызылкума с определённым количеством фосфорной кислоты, а затем добавив фосфогипс и глауконит. Это привело к разработке четырёхэтапного процесса, который может повторяться в цикле. Добавленные ингредиенты не только улучшают способность удобрения восстанавливать почву, но и увеличивают

количество полезного фосфора и кальция, снижают кислотность смеси, что в свою очередь снижает потребность в аммиаке и защищает оборудование от повреждений. Новый метод снижает потребность в сильных кислотах и использует два крупных промышленных побочных продукта — фосфогипс и глауконит — для создания сложного удобрения, которое одновременно полезно для окружающей среды и эффективно использует ресурсы.

Список литературы

1. Bello, S.K. Mitigating soil salinity stress with gypsum and bio-organic amendments: A review / S.K. Bello, A.H. Alayafi, S.G. Al-Solaimani, K.A. M. Abo-Elyousr // *Agronomy*. – 2021. – Т. 11, № 9. – DOI: 10.3390/agronomy11091735.
2. Dasi, E. Glauconite applications in agriculture: A review of recent advances / E. Dasi, M. Rudmin, S. Banerjee // *Applied Clay Science*. – 2024. – Т. 253. – DOI: 10.1016/j.clay.2024.107368.
3. Dimkpa, C. Fertilizers for food and nutrition security in sub-Saharan Africa: An overview of soil health implications / C. Dimkpa, W. Adzawla, R. Pandey, W.K. Atakora, A.K. Kouame, M. Jemo, P.S. Bindraban // *Frontiers in Soil Science*. – 2023. – Т. 3. – DOI: 10.3389/fsoil.2023.1123931.
4. Guan, Q. The impurity removal and comprehensive utilization of phosphogypsum: A review / Q. Guan, Z. Wang, F. Zhou, W. Yu, Z. Yin, Z. Zhang, R. Chi, J. Zhou // *Materials*. – 2024. – Т. 17, № 9. – DOI: 10.3390/ma17092067.
5. Habib, M. The future of the future foods: understandings from the past towards SDG-2 / M. Habib, S. Singh, S. Jan, K. Jan, K. Bashir // *Npj Science of Food*. – 2025. – Т. 9, № 1. – DOI: 10.1038/s41538-025-00484-x.
6. Otaboev, K.A. Mineralogical composition of kyzylkum washed dry concentrate and its processing into simple superphosphate / K.A. Otaboev, D.S. Sherkuziev, O.A. Badalova [et al.] // *Russian Journal of General Chemistry*. – 2022. – Т. 92, № 3. – P. 505–517. – DOI: 10.1134/S1070363222030203.
7. Raiymbekov, Y. Enrichment of low-grade phosphorites by the selective leaching method / Y. Raiymbekov, P. Abdurazova, U. Nazarbek // *Green Processing and Synthesis*. – 2023. – Т. 12, № 1. – DOI: 10.1515/gps-2022-8150.
8. Sakrabani, R. Opportunities and challenges organo-mineral fertiliser can play in enabling food security / R. Sakrabani // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. – 2024. – Т. 8. – DOI: 10.3389/fsufs.2024.1296351.
9. Shabana, M.M. A. Utilizing glauconite extracts to enhance soil health and sugar beet (*Beta Vulgaris* L.) performance in salt-affected soil / M.M. A. Shabana, H. a. S. Alhaithloul, M.F. Alaida, M.K. ElGhannam, A.E. El-Sherief, A.F. M. Badawy, M. Shokr, N.Y. Rebouh, M. El-Sharkawy // *PLoS ONE*. – 2026. – Т. 21, № 2. – DOI: 10.1371/journal.pone.0337492.
10. Shaymardanova, M. Studying of the process of obtaining Monocalcium phosphate based on extraction phosphoric acid from phosphorites of Central Kyzylkum / M. Shaymardanova, Kh. Mirzakulov, G. Melikulova, S. Khodjamkulov, A. Nomozov, O. Toshmamatov // *Baghdad Science Journal*. – 2024. – Т. 21, № 12. – DOI: 10.21123/bsj.2024.9836.

-
11. Younes, H.H. Exploring phosphorus dissociation kinetics in HCl-leached moderate-grade phosphate ores: Towards high-quality dicalcium phosphate production / H.H. Younes, L. Qin, A.S. Ahmed, F. Jia, S. Song, W. Zhan // Minerals Engineering. – 2025. – Т. 231. – DOI: 10.1016/j.mineng.2025.109480.