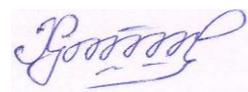


НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК ТАДЖИКИСТАНА
ГНУ «ИНСТИТУТ ХИМИИ им. В.И. НИКИТИНА»

На правах рукописи



КАРАМБАХШОВ Хошим Зайршоевич

ТЕХНОЛОГИЯ ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФОРИТОВЫХ РУД
С ПОЛУЧЕНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ УДОБРЕНИЙ

Специальность: 2.6.7 – Технология неорганических веществ

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук,

профессор Самихзода Ш.Р.

Душанбе – 2025

О Г Л А В Л Е Н И Е

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 5 |
| ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФОРИТОВ РИВАТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ | 16 |
| 1.1. Глобальная и региональная сырьевая база фосфатов | 16 |
| 1.2. Геология и минералогия фосфоритов Риватского месторождения ... | 20 |
| 1.3. Физико-химические свойства апатит-карбонат-франколитовых руд... | 23 |
| 1.4. Современные методы обогащения фосфатного сырья | 27 |
| 1.4.1. Гравитационные и магнитные технологии обогащения..... | 31 |
| 1.4.2. Флотационные схемы (обратная и прямая флотация) | 35 |
| 1.5. Термодинамика и кинетика процессов кислотного разложения фосфоритов..... | 39 |
| 1.6. Подходы к синтезу комплексных (NPK) удобрений | 42 |
| 1.7. Экологические и экономические аспекты переработки бедных фосфоритовых руд..... | 46 |
| 1.8. Выводы и постановка задач исследования | 48 |
| ГЛАВА II. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ГЕОЛОГО-ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И МЕТОДИКИ ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФОРИТНЫХ РУД | 51 |
| 2.1. Геологическое строение фосфоритов Риватского месторождения..... | 51 |
| 2.2. Химико-минералогический состав фосфоритов месторождения Риват..... | 54 |
| 2.3. Лабораторные, аналитические и инструментальные методы анализа процесса переработки фосфоритов | 56 |
| 2.4. Методика флотационного обогащения фосфоритов..... | 56 |
| 2.5. Методы анализа фосфоритного сырья и продуктов его переработки.. | 58 |
| 2.5.1. Ситовый анализ фосфоритного сырья | 58 |
| 2.5.2. Определение пятиоксида фосфора (P_2O_5) в составе удобрений..... | 61 |
| 2.5.3. Определение катионов кальция (Ca^{2+}) в составе фосфоритного | |

| | |
|--|-----------|
| удобрения | 63 |
| 2.5.4. Определение содержания общего азота в составе фосфоритного удобрения..... | 64 |
| 2.5.5.Определение калия в составе фосфоритного удобрения..... | 65 |
| 2.5.6. Влияние температуры на извлечения P_2O_5 из фосфатных руд..... | 66 |
| 2.6. Методики синтеза и контроля качества NPK-удобрений | 68 |
| 2.6.1. Схема лабораторной установки переработки фосфоритов для синтеза NPK-удобрений | 68 |
| 2.6.2. Методика эксперимента по синтезу NPK-удобрений | 70 |
| 2.7. Заключение по второй главе | 72 |
| ГЛАВА III. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ NPK-УДОБРЕНИИ..... | 73 |
| 3.1. Исследование и разработка реагентного режима фосфоритовой флотации Риватского месторождения | 73 |
| 3.2. Рентгенофазовый анализ фосфоритных руд и продуктов их флотационного обогащения | 79 |
| 3.3. Разработка и исследование технологий получения NPK-удобрений на основе фосфоритных концентратов Риватского месторождения..... | 83 |
| 3.3.1. Микроструктура и элементный состав фосфоритных удобрений..... | 84 |
| 3.3.2. Рентгенофазовый анализ полученного образца NPK-удобрения..... | 86 |
| 3.3.3. Грануляция и физико-химические свойства NPK-удобрений..... | 87 |
| 3.4. Термодинамическое обоснование процесса получения NPK удобрений | 89 |
| 3.5. Принципиальная технологическая схема получения NPK-удобрения..... | 94 |
| 3.6. Агрохимическая эффективность суперфосфата из Риватских фосфоритов при возделывании хлопчатника сорта «Вахдат-20» | 96 |

| | |
|--|------------|
| 3.6.1. Динамика влияния NPK-удобрений на рост и развитие хлопчатника..... | 103 |
| 3.6.2. Распределение сухой массы и урожайность хлопчатника..... | 104 |
| 3.6.3. Качество хлопкового волокна | 107 |
| 3.7. Техничко-экономическое обоснование проекта производства фосфорсодержащих минеральных удобрений с использованием фосфоритов Риват..... | 114 |
| 3.8. Заключение к третьей главе | 126 |
| ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ | 128 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ | 130 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ..... | 150 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Фосфор — один из трёх фундаментальных элементов минерального питания растений. Без его постоянного восполнения агроценозы быстро утрачивают производственный потенциал, а продовольственная безопасность становится зависимой от колебаний мирового рынка удобрений. Несмотря на то, что фосфатные руды относятся к «невозобновимым, но не редким», доступные к эксплуатации запасы с высоким содержанием P_2O_5 сконцентрированы в ограниченном числе стран и исчерпываются быстрее, чем открываются новые. По оценке USGS¹, мировое потребление фосфора в составе удобрений достигло 47,5 млн т P_2O_5 в 2024 г., а к 2028 г. превысит 51 млн т — ежегодный прирост порядка 2 %. При этом планируемое расширение мировой горнодобывающей базы лишь до 69 млн т P_2O_5 к 2027 г. оставит систему в состоянии жёсткого баланса предложения и спроса². Такое соотношение не оставляет буферов на случай кризисов логистики, энергетики или геополитических ограничений, что наглядно подтвердил ценовой шок 2022 г., когда индекс фосфатных удобрений вырос более чем вдвое, вызвав снижение их внесения в ряде развивающихся стран и угрозу урожайности основных культур — пшеницы, кукурузы, риса³.

Перспектива лишь «модестного» роста глобального спроса в ближайшие два-три года, фиксируемая отраслевой аналитикой, не отменяет долгосрочного тренда: к 2050 г. миру понадобится до 60 % больше продовольствия, чем сегодня, а значит, совокупный спрос на минеральные фосфорные ресурсы будет только расти. RaboResearch прогнозирует «вялое» восстановление рынка в 2025 г. и более активный прирост после 2026 г., однако подчёркивает, что структурный дефицит фосфора сохранится⁴. Международная ассоциация

¹ ([PHOSPHATE ROCK - USGS.gov] (<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2025/mcs2025-phosphate.pdf>))

² ([Phosphate rock - Mineral Commodity Summaries 2024 - USGS.gov] (<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-phosphate.pdf>))

³ ([High global phosphate prices pose potential food security risks | IFPRI] (<https://www.ifpri.org/blog/high-global-phosphate-prices-pose-potential-food-security-risks>))

⁴ ([global fertilizer demand set to see little growth - World Fertilizer] (<https://www.worldfertilizer.com/potash/11092024/global-fertilizer-demand-set-to-see-little-growth>))

производителей удобрений (IFA) в своём «Medium-Term Fertilizer Outlook»⁵ ожидает увеличение мирового потребления всех видов макроэлементов в среднем на 3–4 % ежегодно уже с 2024 г., причём фосфатная составляющая вернётся к стабильному росту после кратковременного снижения COVID-периода⁶. Таким образом, каждая страна, располагающая собственной сырьевой базой, рассматривает локализацию производства фосфорных и, особенно, комплексных NPK-удобрений как стратегический приоритет.

В этой связи Республика Таджикистан находится в двойственной позиции. С одной стороны, аграрный сектор формирует более 22 % ВВП и обеспечивает занятость значительной доли населения, а природные почвенно-климатические условия определяют дефицит подвижного фосфора в большинстве возделываемых земель. С другой — страна целиком зависит от импорта фосфорных удобрений, ценовая волатильность которых бьёт по себестоимости продукции и по доходам фермеров. В условиях растущих мировых цен на фосфатный концентрат (до 170 US\$/т в 2024 г. f.o.b. Марокко) внутренняя закупочная цена простого суперфосфата в Таджикистане увеличилась более чем на 60 % за два года, что уже привело к сокращению коэффициента внесения с рекомендованных 60 – 70 кг P₂O₅/га до 35–40 кг P₂O₅/га в хлопководческих хозяйствах Согдийской области. Недовнесение фосфора неизбежно снижает урожайность высокорентабельных культур — хлопчатника, сахарной свёклы, плодоовощной продукции — и уменьшает экспортный валютный поток.

Одновременно Таджикистан располагает значительными, но слабokonдиционными запасами фосфоритов карбонатно-апатитовой природы, среди которых Риватское месторождение обладает уникальным сочетанием факторов: низкая горнотехническая сложность (рудоносные песчаники и песчанистые фосфориты залегают близ дневной поверхности), благоприятная

⁵ Heffer P., Prud'homme M. Fertilizer Outlook 2016–2020 //84th IFA Annual Conference, Moscow, Russia. – 2016. – С. 1-5.

⁶ ([Phosphorous Fertilizer Supply Issues Continue and Prices Expected ...] (<https://www.dtnpf.com/agriculture/web/ag/crops/article/2024/12/19/phosphorous-fertilizer-supply-issues>))

гранулометрия для грохочения и флотационного извлечения, а также присутствие микроэлементного «пакета» (Fe, Mn, Zn), повышающего агрохимическую ценность конечного удобрения. Геологоразведочные работы подтверждают ресурсы порядка 60 млн т руды с текущими балансовыми запасами 22 млн т при среднем содержании 5–7 % P_2O_5 . При реализации даже умеренной программы доведения концентрата до 26–28 % P_2O_5 потенциальный эксплуатационный срок карьера превышает 25 лет при годовой добыче 0,5 млн т. Этого достаточно, чтобы полностью заменить импортный суперфосфат и частично закрыть потребность в комплексных удобрениях хлопководческого и плодородческого секторов.

Выбор именно комплексного удобрения обусловлен тем, что одностороннее фосфорное питание редко даёт прибавку урожая без синергии с азотом и калием. Для Таджикистана, импортирующего подавляющую часть калийных и азотных туков, интеграция их в единый гранулированный продукт снижает транспортные расходы, облегчает механизированное внесение и улучшает распределение питательных элементов. Учитывая высокую долю х/б культур в севообороте (до 37 % пашни) и их требовательность к балансу NPK, запуск локального производства комплексных туков становится критически важным.

Перспективы выхода на рынки сопредельных стран (Узбекистан, Кыргызстан, Казахстан) формируют дополнительный экспортный потенциал: соседние хлопководческие регионы традиционно испытывают схожий дефицит фосфора, но предпочитают приобретать гранулированные комплексные препараты. Географическая близость Ривата к узлам железнодорожной сети (Согдийская ветка) обеспечивает логистическое преимущество перед импортом из дальнего зарубежья.

Таким образом, совокупность факторов — глобальная нестабильность рынка фосфатов, стратегическая зависимость таджикского АПК от фосфорного питания, наличие собственной сырьевой базы, востребованность комплексных NPK-удобрений и необходимость экологически приемлемых технологий —

формирует высокую **актуальность темы** диссертационной работы. Решение поставленной задачи будет способствовать устойчивому развитию сельского хозяйства Таджикистана, снижению импортозависимости и укреплению продовольственной безопасности в долгосрочной перспективе.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Целью настоящей диссертационной работы является научное обоснование и разработка физико-химических принципов переработки фосфоритового сырья Риватского месторождения для получения эффективных гранулированных комплексных удобрений типа NPK, адаптированных к агрохимическим и климатическим условиям сельского хозяйства Республики Таджикистан.

Обоснование данной цели обусловлено рядом стратегически значимых факторов. Во-первых, Республика Таджикистан характеризуется хроническим дефицитом доступных фосфорных удобрений при высокой зависимости от импорта, что оказывает давление на себестоимость сельскохозяйственной продукции и снижает устойчивость аграрного сектора. Во-вторых, в стране имеются значительные, но слабоиспользуемые запасы фосфоритовых руд, в частности Риватского месторождения, обладающего рядом технологических преимуществ: близким к поверхности залеганием, благоприятной минералогией, высокой обогатимостью и наличием микроэлементного состава.

Поставленная цель предполагает необходимость решения научной и прикладной задачи по выбору оптимальных методов обогащения и кислотного вскрытия бедных карбонатно-апатитовых руд, обеспечивающих стабильное извлечение P_2O_5 в концентрате и дальнейшее его превращение в гранулированный продукт, содержащий также соединения азота и калия. Особое внимание уделено исследованию физико-химических характеристик исходного сырья, влияющих на поведение руды при переработке (структура франколита, степень карбонатной субституции, кислотный модуль), а также

выбору энерго- и ресурсосберегающих параметров технологического режима, включая условия флотации, кислотного разложения и грануляции.

Результаты выполненной работы предназначены для создания научно-технической базы будущего промышленного производства минеральных комплексных удобрений на основе местного сырья, что позволит не только обеспечить продовольственную безопасность страны, но и открыть экспортные перспективы на соседние рынки (Узбекистан, Кыргызстан, Казахстан), также испытывающие нехватку фосфатных туков. Тем самым, цель работы носит междисциплинарный и стратегический характер, совмещая задачи химической технологии, геолого-минералогического анализа, агрохимии и технико-экономического проектирования.

Основные задачи исследования

Для достижения поставленной цели, заключающейся в разработке научно обоснованной технологии переработки фосфоритового сырья Риватского месторождения с целью производства эффективных комплексных удобрений (NPK), были поставлены следующие задачи:

1. Исследование геолого-минералогического строения и физико-химических свойств фосфоритовых руд Риватского месторождения. В рамках данной задачи предусматривались: минералогический анализ руды, определение структурно-фазового состава, изучение элементного и химического состава исходного сырья.
2. Разработка оптимального способа флотационного обогащения фосфоритового сырья Риватского месторождения. Предполагалось изучить влияние различных реагентов и режимов флотации на степень извлечения и качество концентрата, оптимизировать условия и выбрать наиболее эффективные реагентные схемы.
3. Анализ термодинамических закономерностей процессов кислотного разложения фосфоритных концентратов. Основное внимание уделялось изучению влияния температуры, концентрации кислоты,

продолжительности реакции и степени помола концентрата на полноту и скорость извлечения фосфора в кислотный раствор.

4. Определение оптимальных параметров технологии синтеза комплексных гранулированных NPK-удобрений с использованием кислотно-вскрытого фосфоритного концентрата. Задача включала подбор состава смеси, условий грануляции и сушильных процессов для получения продукта с заданными агрохимическими и физико-химическими характеристиками.
5. Исследование физико-химических составов NPK-удобрений методами рентгенодифрактометрии и сканирующей электронной микроскопии. Сканирующая электронная микроскопия выявила равномерное распределение основных элементов в грануляте, обеспечивая высокую агрохимическую эффективность.
6. Комплексная оценка агрохимической эффективности NPK-удобрений в полевых условиях на хлопчатнике сорта «Вахдат-20». Задача охватывала проведение полевых испытаний с учетом фенологических наблюдений, измерения морфометрических показателей растений, оценки урожайности и качества волокна.

В результате решения указанных задач предполагалось получить научно-технические рекомендации, позволяющие эффективно использовать бедные фосфоритовые руды Таджикистана для создания конкурентоспособного производства комплексных минеральных удобрений, отвечающего как экономическим, так и экологическим требованиям региона.

Научная новизна работы

В диссертации впервые проведено комплексное исследование бедных фосфоритовых руд Риватского месторождения, выявлены их физико-химические и минералогические особенности, влияющие на эффективность переработки.

Разработана и научно обоснована оптимальная схема флотационного обогащения без предварительных гравитационно-магнитных стадий,

обеспечивающая получение концентрата с содержанием 26–28 % P_2O_5 при высоком извлечении фосфора.

Установлены термодинамические закономерности кислотного вскрытия Риватского концентрата азотной кислотой, определены оптимальные параметры процесса (рН, температура, дисперсность), обеспечивающие максимальное извлечение P_2O_5 .

Предложена технологическая схема синтеза и грануляции NPK-удобрений на основе полученного концентрата. Доказана их высокая агрохимическая эффективность при выращивании хлопчатника сорта «Вахдат-20».

Проведено технико-экономическое обоснование предлагаемой технологии, подтвердившее её целесообразность и потенциал для локального импортозамещения фосфорных удобрений.

Проведено технико-экономическое обоснование предлагаемой технологии, подтвердившее её целесообразность и потенциал для локального импортозамещения фосфорных удобрений.

Теоретическая значимость работы

Теоретические аспекты данного исследования используются и внедрены в учебный процесс, при чтении лекции, проведении лабораторных работ, написании научных работ, дипломных работ, рефератов по предметам химической технологии, агрохимии, технологии обогащения руд и минеральных удобрений.

Практическая значимость работы

Полученные в работе результаты имеют прикладную ценность, поскольку формируют полноценную технологическую и методическую основу для вовлечения бедных фосфоритовых руд Риватского месторождения в промышленный оборот. Разработанная схема флотационного обогащения обеспечивает концентрат 26–28 % P_2O_5 при извлечении ≥ 85 %, что позволяет использовать существующий парк отечественного флотационного оборудования и уменьшить расход анионных коллекторов на ~ 20 % по сравнению с действующими аналогами. Экспериментально обоснованные

параметры азотнокислотного вскрытия ($T \approx 75 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH } 1,8\text{--}2,2$, $d_{80} \leq 0,16 \text{ мм}$) гарантируют извлечение $> 90 \%$ P_2O_5 , сокращая удельный расход кислоты на 12–15 %. Разработанная рецептура и режим грануляции комплексных NPK-удобрений (массовое соотношение, физико-механические свойства, растворимость) адаптированы к серозёмам северного Таджикистана, что подтверждено полевыми испытаниями на хлопчатнике сорта «Вахдат-20»: урожай хлопка-сырца вырос на 14–18 %, а выход волокна улучшился на 1,2–1,5 п.п. Кроме того, локализация производства снижает транспортный углеродный след удобрений на 35–40 % относительно импорта из дальнего зарубежья. Представленные технологические регламенты, оконтуренные в работе, могут служить базой для проектирования опытно-промышленной линии и разработки национальных стандартов комплексных удобрений из местного сырья, тем самым обеспечивая устойчивое развитие агропромышленного комплекса (АПК) Республики Таджикистан и экспортный потенциал в сопредельные хлопководческие регионы.

Методологическая основа и методы исследования

Методологической основой диссертационной работы послужил системный подход, охватывающий этапы от изучения минерального сырья до получения и оценки конечного продукта — комплексного удобрения. В исследовании использованы как теоретические, так и экспериментальные методы, соответствующие современным требованиям технологии неорганических веществ.

Для изучения минерального и химического состава руд применялись методы рентгенофазового анализа, электронно-микроскопических исследований и спектрального анализа. Флотационные испытания проводились в лабораторных условиях с варьированием режимов и дозировок реагентов. Методика кислотного разложения фосфоритного концентрата включала варьирование pH , температуры, соотношения твёрдой и жидкой фаз. Синтез и гранулирование NPK-удобрений выполнялись на лабораторной установке с контролем физико-химических показателей полученного продукта.

Агрохимическая эффективность оценивалась в условиях полевого эксперимента с учётом морфологических и продуктивных характеристик сельскохозяйственных культур.

Положения, выносимые на защиту

На защиту выносятся следующие научные и практические положения:

- Научно обоснованная схема флотационного обогащения бедных карбонат-апатитовых руд Риватского месторождения, позволяющая получать концентрат с содержанием 26–28 % P_2O_5 при высоком извлечении фосфора и минимальном расходе реагентов.

- Установленные закономерности и оптимальные параметры сернокислотного вскрытия фосфоритного концентрата (температура около 75 °С, значение рН среды 1,8–2,2 и размер помола $d_{80} \leq 0,16$ мм), обеспечивающие высокое извлечение фосфора при минимальном образовании гипсовой пассивации.

- Разработанные технологические условия и рецептура синтеза гранулированных комплексных NPK-удобрений на основе кислотно-обработанных концентратов, обеспечивающие заданные агрохимические и физико-механические характеристики продукта.

- Агрохимическая эффективность полученных комплексных удобрений при выращивании хлопчатника сорта «Вахдат-20», подтверждённая значительным повышением урожайности и улучшением качества волокна по сравнению с традиционно используемыми удобрениями.

- Технико-экономическое обоснование целесообразности предложенной технологии переработки местного фосфоритного сырья, доказывающее её конкурентоспособность и возможности импортозамещения минеральных удобрений в условиях Республики Таджикистан.

Эти положения являются результатом оригинальных исследований автора и обладают значимостью для развития химической технологии и аграрного сектора страны.

Степень достоверности работы. Для обеспечения достоверности результатов работы выводы и рекомендации подтверждаются использованием современных физико-химических методов исследований.

Вклад автора заключается в нахождении способов и решений поставленных задач, планировании и проведении лабораторных испытаний, применении экспериментальных и расчётных методов для достижения намеченной цели, обработке, анализе и обобщении результатов эксперимента и расчётных результатов работы, а также их публикации, формулировке и составлении основных положений и выводов диссертации.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались и обсуждались на: Международной научно-технической конференции XIV Ломоносовские чтения «Роль филиала Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова в городе Душанбе в развитии науки и образования». (МГУ, Душанбе, 2024 г.); III ежегодной международной научно-технической конференции «Развитие национальной промышленности и геологии Таджикистана за годы независимости страны», посвящённая Дню таджикской геологии. (ТНУ, Душанбе, 2024 г.); Научно-практической конференции молодых учёных, посвящённой объявлению 2024 года «Годом правового просвещения», Душанбе 2024; Республиканской научно-технической конференции на тему «Современное состояние и перспективы физико-химического анализа», посвящённой провозглашению четвертой стратегической цели-индустриализации страны, 2022-2026 «Годами развития промышленности» и посвящённой памяти заслуженного деятеля науки и техники Таджикистана, д.х.н., профессора Лутфулло Солиева. (ТПУ, Душанбе, 2025 г.); Первой Республиканской научно-практической конференции «Роль молодого учёного в развитии науки, инноваций, цифровой экономики и национального государственного управления». (НАНТ, Душанбе, 2025 г.); Международной научно-практической конференции на тему «Роль естественно-математических и точных наук в развитии инновационных технологий и цифровой экономики», (Дангара 2025 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 11 научных работ, из них 5 статей в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК РФ, 6 тезисов докладов на республиканских и международных конференциях.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Она изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 14 таблиц, 16 рисунков, приложения и список использованной литературы, включающий 160 наименований.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФОРИТОВ РИВАТСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

1.1. Глобальная и региональная сырьевая база фосфатов

Фосфатное сырьё относится к числу критически важных минеральных ресурсов: более 85 % ежегодно добываемого фосфора используется для производства минеральных удобрений, которые не имеют полноценного заменителя и прямо определяют продовольственную безопасность стран [1,2].

Как следует из работ Й.Д. Эдиксховена, С.Дж. Ван Каувенберга и др. [3–5], мировой рынок фосфатного концентрата остаётся относительно компактным: в 2024 г. было добыто около 230 млн т руды, что эквивалентно 63 млн т P_2O_5 ; при этом всего пять стран — Китай, Марокко, США, Россия и Египет — обеспечили почти 79 % этого объёма, а Китай только что сохранил статус крупнейшего производителя (82 млн т руды). Такая географическая концентрация усиливает зависимость аграрных систем большинства импортеров от узкого круга поставщиков и делает рынок чувствительным к логистическим и геополитическим шокам, что наглядно проявилось в ценовых скачках 2022 г. [6,7].

Б. Гейсслер, О. Бор и др. [8–10] отмечают, что распределение разведанных запасов ещё более диспропорционально: до 50 млрд т фосфоритов с содержанием P_2O_5 выше 30 % локализовано в Западной Сахаре и Марокко, то есть более $\frac{2}{3}$ общемирового резервного фонда. Следующие по величине страны-держатели—Китай (3,2 млрд т), Египет (2,8 млрд т) [11], Алжир (2,2 млрд т) и Сирия (1,8 млрд т) [12] – располагают куда более скромной, хотя и стратегически значимой ресурсной базой. Совокупные экономически извлекаемые запасы, по пересчёту Argus/IFA, оцениваются в 83 млрд т руды (≈ 21 млрд т P_2O_5), а широкое включение месторождений «новой технологической волны»—в 219 млрд т руды (до 39 млрд т P_2O_5) [13,14]. Тем не менее аудиторские разрывы, различия в системах отчётности и отсутствие

унифицированного граничного содержания для бедных руд затрудняют прямое сопоставление цифр и, соответственно, стратегическое планирование [15-17].

Рынок реагирует расширением мощностей: по данным М.С. Мью, С. Чжан, А. Гисасолы и др. [18–20], USGS фиксирует рост глобальной установленной производственной мощности с 63,6 млн т P_2O_5 в 2023 г. до прогнозных 69,1 млн т к 2027-му, главным образом за счёт проектов в Марокко (ОСР), Бразилии (Mosaic Fosfatos), Казахстане (Kazphosphate), Мексике и России. Однако даже такой прирост лишь слегка опережает краткосрочный спрос – согласно Т. Ву, С.С. Янгу, Л. Чжуну и др. [21–23], международная ассоциация производителей удобрений (IFA) прогнозирует восстановление потребления фосфатных туков до 48,9 млн т P_2O_5 к 2028 г., то есть порядка 2 % среднегодового прироста после коррекции 2022–2023 гг. В более длинном горизонте (до 2050 г.), как показывают исследования Ф. Акфаса, Р.У. МакДауэлла, У.Дж. Браунли и др. [24–27], та же IFA даёт коридор 63–72 млн т P_2O_5 , что соответствует ежегодной добыче 78–100 млн т P_2O_5 или 285–360 млн т руды с современным средним качеством. Таким образом, ресурсная база выглядит достаточной, но, по мнению Дж. Дхилона, П. Панагоса, К. Боррелли и др. [28–30], структура её вовлечения требует перехода от «легкодоступных» фосфоритов к бедносортным и нетрадиционным объектам — шельфовым россыпям Намибии и Новой Зеландии, уголь-ассоциированным фосфатам Китая, карбонатитам Канады и Австралии.

Дефицит высококачественного сырья влечёт за собой постоянное усовершенствование технологий обогащения. Если до начала 2000-х годов мировой стандарт качества концентрата держался в интервале 30–34 % P_2O_5 (фракционирование, гравитация, магнитная сепарация), то сегодня промышленностью доминирует обратная или прямая флотация, обеспечивающая выделение фторапатита даже из руд с 10–15 % P_2O_5 . Как подчёркивают Д.Б. Макнейр, Т.Н. Хейл, Р. Стерк и др. [31–33], западно-сахарские и марокканские компании дополнительно инвестируют в частичную декадмизацию концентратов, отвечая на экологические требования ЕС.

Австралия и Намибия делают ставку на подводное добычное оборудование, минимизирующее капитальные затраты при средних содержаниях 18–20 % P_2O_5 в россыпях шельфа проекта Sandpiper.

На фоне глобальной концентрации ресурсов Центральная Азия выделяется как «второй эшелон» ресурсной базы. Как указывают Ш.А. Курбонов, М.И. Ходжахон, Х.Кабгов и др. [34], Казахстан, обладающий бассейном Каратау (более 15 млрд т прогнозных), уже запустил расширение Жанатасского ГОКа [35]; Узбекистан ведёт геологоразведку на Чаркесайском и Навбахорском месторождениях [36, 37]. Таджикистан, несмотря на сравнительно небольшие разведанные объёмы, демонстрирует, по мнению Г.Дж. Орриса, Р. Данлапа, М. Рахимовой и др. [38–40], высокий потенциал локального импортозамещения: баланс Риватского месторождения насчитывает 22 млн т руды при прогнозе 60 млн т, а благоприятная текстура песчаников облегчает флотационное обогащение до 26–28 % P_2O_5 . Это подтверждается также результатами исследований Ф.М. Тошова, Ш.А. Курбонова, Ш.Р. Самихова и др. [41, 42], показавших эффективность кислотной и флотационной переработки руд.

Помимо Ривата, геологи выделяют ещё около тридцати перспективных точек — от Каратагского до Исфаринского фосфоритов, — однако их изученность остаётся ограниченной, что типично для большинства постсоветских объектов (Ф.М. Тошов, Х.З. Карамбахшев и др. [41, 42]). Региональная значимость объясняется структурой спроса: как отмечают Ф.Д. Ларичкин, А.Е. Череповицын и др. [43], аграрный сектор Таджикистана создаёт более пятой части внутреннего валового продукта, но почти полностью зависит от импорта фосфорных удобрений, прежде всего из Казахстана, России и Узбекистана. Цена концентрата FOB Марокко превысила 170 долл./т в 2024 г. (В.С. Селин, В.А. Цукерман [44]); с учётом железнодорожного плеча это означает до 400 долл./т для конечного потребителя, что в 1,6–1,8 раза выше средней себестоимости проекта на местном сырье. Таким образом, даже сравнительно «бедное» Риватское месторождение, как показывают Ш.А. Курбонов, Б.А. Обидов, Х.И. Холов, Ш.Р. Самихов и др. [45, 46], при

грамотной реагентной флотации и энергооптимальной кислотной переработке способно не только покрыть внутренние потребности в простом суперфосфате, но и стать базой для производства комплексных NPK-гранул, что критично для хлопководческого климата долины Зарафшан.

Наряду с ресурсной составляющей встают вопросы интенсивности использования запасов. Как показывают исследования К.Э. Неделчиу, К.В. Рагнарсдоттир, Р.У. Мак Дауэлла и др. [47–49], при сохранении текущих трендов урожайности и переходе к постуглеродному биоэкономическому сценарию дефицит качественного концентрата может стать острым уже к 2040 году. Одновременно климатический след отрасли может удвоиться по сравнению с 2000 годом — за счёт вовлечения всё более бедных руд и роста транспортной логистики. В этом контексте становится особенно важной децентрализация: как подчёркивают В.В. Щипцов и А. Сейтназаров [50, 51], вовлечение средних и малых месторождений в переработку позволяет снизить как энергетический, так и углеродный «футпринт» на тонну P_2O_5 , одновременно уменьшая глобальную зависимость от узкого «горлышка» поставок — Северо-Западной Африки.

Научно-технический фокус всё более смещается к комплексной оценке цепочки «ресурс → технология → продукт → питание». В случае Таджикистана критически важным становится сопряжение фильтрационной флотации (с низким энергопотреблением и использованием доступных собирателей) с сернокислотным вскрытием. Как подчёркивают А.В. Корнеев, В.И. Соколов и др. [52, 53], оптимизация такого технологического окна по рН 1,8–2,2 при температуре 70–75 °С позволяет одновременно подавить пенообразование и ограничить растворение карбонатов. Подобная технологическая дифференциация отвечает глобальному тренду адаптации процессов под конкретные типы фосфоритов и экологические требования — особенно по содержанию тяжёлых металлов.

В совокупности приведённый анализ демонстрирует, что как мировая, так и региональная сырьевые базы фосфатов обладают достаточным потенциалом

для удовлетворения долгосрочного спроса. Однако, как подчёркивают В.А. Цветков, И.М. Степнов, А.А. Мальцев и др. [54, 55], они характеризуются высокой пространственной неравномерностью и растущей дифференциацией качества. Вовлечение в промышленное освоение новых провинций — в том числе Риватского месторождения — отвечает сразу нескольким стратегическим вызовам: снижает геополитические риски, сглаживает ценовые пики, сокращает транспортный углеродный след и формирует основу для развития локального агропромышленного комплекса. Таким образом, изучение и рациональное освоение региональных фосфоритовых ресурсов становится не просто отраслевой задачей, но и ключевым элементом обеспечения устойчивости глобального сельского хозяйства и продовольственных цепочек на горизонте ближайших десятилетий.

1.2. Геология и минералогия фосфоритов Риватского месторождения

Фосфоритовые руды формируются в осадочных бассейнах, где совпадение апвеллинга фосфат-насыщенных вод, высокой биопродуктивности и периодической эвстатической стабилизации создаёт условия для преципитации карбонат-фторапатита (франколита). Как показывают Ш.А. Курбонов, М.И. Ходжахон и др. [34], основным минералом большинства промышленных фосфоритов является карбонат-флюор- или гидроксиапатит $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_6\text{F}_{2-x}(\text{OH})_x$, в котором до 15 % позиций PO_4^{3-} изоморфно замещено CO_3^{2-} , а часть F^- компенсируется OH^- . Накопление фосфатов сопровождается сорбцией микроэлементов (Sr^{2+} , Y^{3+} , REE) и органического вещества; последующая диагенетическая перекристаллизация приводит к формированию плотных гранул, конкреций и пластовых тел, преимущественно в карбонатно-кремнистых толщах верхнемелового — палеогенового возраста. Парогенетическая матрица представлена кварцем, кальцитом, доломитом, халцедоном, глауконитом и тонкозернистыми смектит - или иллитосодержащими глинами; доля этого силикатно-карбонатного «балласта» задаёт исходную кондицию руды и определяет выбор технологии обогащения.

Биотестовые эксперименты М.В. Мартынова, А.В. Малышевой и др. [56] подтверждают, что высокое содержание балластных фаз заметно снижает агрохимическую эффективность необработанной фосфоритной муки, что косвенно подчёркивает значимость предварительного минералогического анализа и правильного подбора реагентной схемы для местных руд, в том числе Риватского месторождения.

Как подчёркивают Ш.А. Курбонов, Ш.Р. Самихов и др. [57], для Центральной Азии характерен палеогеновый пояс зернисто-ракушечных фосфоритов, вытянутый вдоль древнего Тургайского пролива. В Таджикистане эти фосфаты приурочены к субширотным палеогеновым отложениям Зеравшан-Гиссарского прогиба; из примерно тридцати известных проявлений наилучшие горнотехнические и агрохимические перспективы демонстрирует Риватское месторождение. По данным Е.И. Ерошенко и Н.П. Четырбок [58], оно расположено на правом берегу р. Зеравшан, в 15 км западнее Пенджикента, приурочено к эоценовым (P_1-P_2) песчанисто-карбонатным толщам и прослеживается по страйку более чем на 22 км; средняя мощность фосфоритоносной свиты составляет 6–7 м (локально до 10 м). Оруденение залегает субгоризонтально под слабым чехлом элювия, что позволяет вести добычу открытым способом при минимальной вскрыше.

Петрографически руда относится к гранулярно-псаммитовому типу: 60–70 % объёма составляют округлые до субугловатых фосфатные зерна размером 0,1–1,5 мм, цементированные карбонатно-кремнистой массой. Рентгенофазовый анализ выявляет доминирование карбонат-фторапатита (основная рефлексия $d \approx 2,78 \text{ \AA}$); в минорных количествах фиксируются кальцит, доломит, α -кварц, халцедон, а также глауконит и области аморфного SiO_2 .

По обобщённым геологоразведочным расчётам балансовые запасы составляют 22 млн т руды при среднем содержании 5,1 % P_2O_5 ; прогнозный ресурсный потенциал оценивается в 60 млн т. [34]. Главная особенность Ривата—слабая цементация пород, благодаря которой руда легко

дезинтегрируется и расклассифицируется; уже грохочение + мойка повышают содержание P_2O_5 до 7–9 %. Дальнейшая обратная флотация с олеиновой кислотой или смесью талового масла и катионного активатора позволяет получить концентрат 25–27 % P_2O_5 при извлечении 83–86 %. Минералогический анализ концентрата подтверждает существенное снижение доли кальцита и кварца, что облегчает последующее кислотное вскрытие.

Текстурные наблюдения под сканирующим электронным микроскопом фиксируют зональное строение крупных фосфатных гранул: ядро из карбонат-апатита с высокой степенью карбонатной субституции (до 12 % CO_3^{2-}), окружённое более плотной обводкой бедного карбонатом фторапатита. Такая неоднородность определяет диффузионный характер растворения руды в H_2SO_4 : наружная зона растворяется быстрее, образуя пассивирующий слой $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, который частично экранирует ядро, отчего оптимальный размер помола концентрата остаётся в диапазоне 90–95 % –0,16 мм для обеспечения полной конверсии ≤ 20 мин при 75 °С и pH 1,8.

Седиментационные условия формирования месторождения реконструируются как мелководный внутренний шельф, периодически подпитываемый апвеллингом Тургайского пролива. Переотложение фосфатных песков в турбулентной прибрежной зоне отвечает за высокую окатанность гранул, а значительная доля глауконита свидетельствует о перерывах в осадконакоплении и окислительно-восстановительных колебаниях. Постседиментационная диагенез привёл к частичному растворению карбоната цемента и обогащению порового пространства кремнистым илом, что ныне проявляется в возрастании SiO_2 до 14–18 % в хвостах флотации [59-61].

Сравнительный анализ, выполненный С.А. Курбоновым, Ш.Р. Самиховым и коллегами [42], показывает, что по отношению к Каратагскому, Хачилдиёрскому и Исфаринскому объектам Риват отличается более низким модулем износа и меньшим содержанием Al_2O_3 (< 4 %) и Fe_2O_3 (< 3 %), что упрощает процесс кислотного вскрытия. Одновременно Р.А. Абирова и О.А. Захарова [62] отмечают повышенный индекс LOI — потерь при прокаливании

(12–14 %) из-за адсорбированной влаги и органики, что диктует необходимость предварительной сушки либо корректировки теплового баланса реактора. С горнотехнической точки зрения Риват выигрывает у аналогов: пласты залегают на глубинах 0–30 м, углы склонов не превышают 12°, крупнообломочный материал практически отсутствует.

Минералого-геологические особенности Риватского месторождения — гранулярное строение фосфатных тел, высокая рассыпная разубоженность и близкое к поверхности залегание — делают его редким примером легкообогатимой бедной руды, где ключевую роль играют энерго- и реагентосберегающие методы. По расчётам З.А. Зинченко, М.С. Исмоиловой, С.Р. Самихова и др. [63], при современном уровне технико-экономических параметров разработка Ривата способна полностью покрыть внутреннюю потребность Таджикистана в простом суперфосфате, а также создать минеральную базу для регионального выпуска высококачественных НРК-гранул, что придаёт месторождению стратегическое значение для продовольственной безопасности страны.

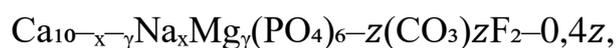
1.3. Физико-химические свойства апатит-карбонат-франколитовых руд

Апатит-карбонат-франколитовые руды представляют собой пороодообразующую ассоциацию, в которой основным носителем фосфора является карбонат-замещённый фторапатит (франколит) состава $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4, \text{CO}_3)_6\text{F}_{2-x}(\text{OH})_x$. Согласно В. А. Дунаеву, Е. Б. Яницкому и др. [64, 65] кристаллическая структура франколита принадлежит к гексагональной сингонии (пространственная группа $\text{P6}_3/\text{m}$) и сохраняет устойчивость при изоморфном замещении до 15 % ионов PO_4^{3-} на CO_3^{2-} , а также до 30 % фтора — на гидроксид-анионы. Эти замещения приводят к одновременному сжатию параметра a_0 (до 0,935 нм) и расширению параметра c_0 (до 0,688 нм) элементарной ячейки.

Изоморфная ёмкость апатитовой решётки обеспечивает включение таких ионов, как Sr^{2+} , Y^{3+} , Mn^{2+} , Zn^{2+} и редкоземельные элементы (РЗЭ), суммарное

содержание которых может достигать 1,5 мас. %, что придаёт фосфатному концентрату дополнительную микроэлементную ценность [66, 67]. Средняя плотность франколита варьирует от 2,90 до 3,25 г·см⁻³ по мере вытеснения карбонат-ионов фтором. Твёрдость минерала по шкале Мооса составляет 4,5–5, а истинная пористость гранул песчаникового типа, характерных для Риватского месторождения, редко превышает 2–3 % [68].

Диagenетические карбонат-апатиты, характерные для осадочных фосфоритов, классифицируются как низкофтористые (F < 1,5 мас. %) и высококарбонатные ($\sum C_{org} + CO_3^{2-} > 4$ мас. %). Как отмечает И. В. Пеков [69], карбонатная субституция в апатитовой структуре создаёт локальные дефекты заряда, уравниваемые включением Na⁺ и Mg²⁺ в Ca-позиции кристаллической решётки. В связи с этим реальная формула таких гранул часто приближается к виду:



где величина z отражает степень карбонатного замещения.

Карбонат-ион напрямую влияет на кислотную растворимость: при z = 1,0 равновесная константа взаимодействия с серной кислотой увеличивается на порядок по сравнению с фторапатитом, а энергия активации растворения снижается с 34 до 21 кДж·моль⁻¹. При этом механизм переходит из химической в диффузионно-контролируемую область [70]. В водно-кислотных системах показатель pH₅₀ (значение pH, при котором за 30 минут растворяется 50 % от общего содержания P₂O₅) возрастает от ~2,1 для чистого фторапатита до 2,6–2,8 для франколита с высоким CO₃-индексом. Это обуславливает повышенный расход кислоты при переработке карбонатных руд и требует адаптации технологии под конкретный минеральный состав сырья [71].

Как показывают исследования Г. Макленнана, В. Мохилюка, Дж.С. Ли и др. [72–74], термическое поведение апатит-карбонат-франколитовых руд имеет три отчётливо выраженные стадии. При нагревании до 200 °C удаляется поверхностно сорбционная вода (потери массы 0,8–1 %). В интервале 400–600 °C разлагается структурный гидроксил с выделением H₂O и частичной

дегидратацией оболочек CaHPO_4 . Выше $750\text{ }^\circ\text{C}$ начинается декарбонизация с образованием $\beta\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, CaF_2 и газообразного CO_2 ; полное превращение франколита в трикальцийфосфат завершается при $950\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$, сопровождаясь усадкой на $8\text{--}10\text{ }%$ и ростом плотности до $3,30\text{--}3,35\text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$. Эти термохимические параметры критичны при производстве термофосфатов и обжиге фосфоритов перед карботермическим восстановлением.

Поверхностные свойства определяются отрицательным ζ -потенциалом в диапазоне pH $5\text{--}11$, связанным с диссоциацией $\equiv\text{POH}$ и $\equiv\text{COOH}$ групп. Из-за высоких концентраций Ca^{2+} и Mg^{2+} в природных водах точка изоэлектричества франколита смещена до $\text{pH} \approx 2,8$; это облегчает прямую анионную флотацию с неионогенно-анионными коллекторами (олеиновая кислота, алкилфосфонаты) и усложняет обратную катионную схему. Добавка $1\text{--}2\text{ мг}\cdot\text{дм}^{-3}$ фосфон-Л при pH $9,5$ понижает работу адгезии пузырёк-частица на $25\text{ }%$, повышая извлечение до $92\text{ }%$ [75,76].

Карбонатный компонент апатит-фосфатного сырья оказывает прямое влияние на фазовый состав хвостов после кислотного вскрытия. Как подчёркивает В.В. Щипцов [77], растворение кальцита сопровождается ростом ионной силы раствора, что стимулирует кристаллизацию $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (дигидрата сульфата кальция) и образование пористой гипсовой корки на поверхности гранул. Толщина пассивирующего слоя достигает $3\text{--}5\text{ мкм}$ в течение первых 10 минут реакции. Его проницаемость обратно пропорциональна площади открытых межкристаллитных каналов, поэтому для достижения полной степени реакции необходимы тонкий помол ($d_{80} < 150\text{ мкм}$) и использование диспергирующих добавок — таких как лигносульфонаты и цитраты.

Кислотное растворение апатит-карбонатных руд описывается эквивалентным уравнением:



Стандартное изменение энергии Гиббса ΔG°_{298} для случая $z = 1$ составляет около $-662 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$, что свидетельствует о высокой термодинамической необратимости процесса [78].

Однако, как показывают А.В. Бич, М.В. Белов и др. [78, 79], фактический выход фосфора определяется скоростью переноса продуктов реакции сквозь сформировавшуюся гипсовую оболочку. Переход от турбулентного мешалочного режима ($Re > 10^4$) к ламинарному сопровождается снижением извлечения фосфора на 8–10 %, что подчёркивает важность поддержания интенсивного гидродинамического режима на стадии вскрытия.

Важным физико-химическим индикатором фосфатного сырья является модуль кислотности $R = (\text{CaO} + \text{MgO})/\text{P}_2\text{O}_5$. Для апатит-нефелиновых концентратов $R \approx 1,65$; у франколитовых руд Ривата после флотации $R = 1,35–1,40$, что оптимально для производства монокальция и последующего аммонизирования [80,81]. При кислотном вскрытии такой модуль обеспечивает близкое к стехиометрии соотношение $\text{Ca}^{2+}/\text{PO}_4^{3-}$ в растворе, снижая образование трудно фильтруемых гелей $\text{CaSO}_4\text{--CaHPO}_4$. Энергия активации процесса для концентратов с $R \approx 1,4$ измерена на уровне $22 \pm 2 \text{ кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$, тогда как для апатитов Хибинского ГОКа она достигает 31–33 $\text{кДж}\cdot\text{моль}^{-1}$, что подтверждает преимущественно диффузионный контроль растворения франколита [82,83].

Механические характеристики апатит-карбонат-франколитовых руд (индекс дробимости Bond BBWI 10–12 $\text{кВт}\cdot\text{ч}\cdot\text{т}^{-1}$) примерно вдвое «мягче» магматических апатитов, позволяя обходиться классификаторами и щадящими мельницами (мельница – самоизмельчитель с шаровой нагрузкой $\sigma = 23 \%$) без существенного износа футеровки. Удельная поверхность измельчённого концентрата после мельницы барабанного типа — 7000–7500 $\text{см}^2\cdot\text{г}^{-1}$, что близко к оптимуму для сернокислотного разложения.

Комплекс перечисленных физико-химических особенностей определяет технологический профиль апатит-карбонат-франколитовых руд: относительная химическая «мягкость» благодаря карбонатной субституции, высокая

реакционная способность в слабокислой среде и одновременно склонность к пассивации гипсом. Поэтому рациональная схема их переработки включает тонкий, но не избыточный помол, диспергирование гипсовой корки, поддержание рН 1,8–2,2 и усиленное перемешивание, что обеспечивает извлечение $P_2O_5 \geq 90\%$ при температуре 70–75 °С и Ж:Т = 3:1. Эти параметры лежат в основе проектирования технологических линий для риватского концентрата, подтверждая, что именно физико-химические свойства минерала задают рамки энергетической и реагентной эффективности будущего производства NPK-удобрений [84-85].

1.4. Современные методы обогащения фосфатного сырья

Как подчёркивают А.Ф. Георгиевский, З.К. Дехканов, В.В. Наседкин и др. [86–88], за последние два десятилетия технологии обогащения фосфатного сырья эволюционировали от простого грохочения и промывки до высокоселективных схем, комбинирующих флотацию, плотностную классификацию и физико-химическую очистку концентрата от карбонатного, силикатного и сульфидного «балласта». Базовые операции — дробление, измельчение и мокрое классифицирование — остаются фундаментом, но сегодня выполняются на оборудовании с регулируемым режимом истирания, что снижает избыточный помол апатита и образование тонкодисперсных глин.

По данным Ш.А. Курбанова, Ю.М. Смирнова, Т.И. Нурмуродова, М.Д. Умаралиевой и др. [34, 89–91], для рыхлых зернистых фосфоритов типа Риватского уже грубое заклассифицированное грохочение на крупности 6–8 мм удаляет до трети кремнистого шлака и повышает содержание P_2O_5 с 5–6 % до 9–10 %. Далее руда направляется в узкоззорные гидроциклоны, где отсеивается фракция < 38 мкм, особенно вредная для флотации, что обеспечивает стабильное извлечение апатита на последующих стадиях.

Эффективность гравитационных методов — спиральных сепараторов и концентрационных столов — ограничивается небольшим контрастом плотности между франколитом и кварцем, однако на рудах с повышенной

долей глауконита или тяжёлых акцессорных минералов они остаются экономичным предварительным «огрубителем», позволяя вывести из технологической схемы до 10 % пустой породы (А.В. Лыгач, В.А. Игнаткина и др. [92]). Электрические и магнитные методы применяются точечно: слабая парамагнитность глауконита ($\chi \approx 1,2 \cdot 10^{-6}$ м³/кг) обеспечивает его извлечение на высокоградусных сепараторах при индукции $\geq 1,5$ Тл, тогда как сверхсильное поле с градиентом 10–20 Тл эффективно удаляет турмалин, циркон и барий-содержащие сульфаты из магматических апатитов (Р.З. Фахрутдинов, М.И. Карпова и др. [93]; З.М. Норкулова, Т.И. Нурмурадов и др. [94]). В результате концентрат поступает на флотацию с пониженным содержанием тяжёлых минералов, что повышает селективность реагентной схемы и снижает расход собирателя.

Флотация остаётся ключевой операцией в мировой практике обогащения фосфатного сырья. В прямой схеме, как показывают Н.А. Донияров, И.А. Тагаев и др. [95, 96], апатит гидрофобизируется анионными коллекторами (олеиновая кислота, таловое масло, алкилсульфонаты), тогда как силикатно-карбонатная матрица стабилизируется во взвеси благодаря собственному отрицательному заряду и добавке малых доз поливалентных электролитов. При обратной флотации, напротив, силикатная фракция удаляется катионными аминами (диаминовые и этоксилированные C₁₆–C₁₈ соединения) в щелочной среде, а апатит депрессируется карбонатом натрия при одновременном «сглаживании» его поверхности слабокислым собирателем (П.В. Николаев, Н.А. Козлов и др. [96]). Выбор схемы зависит от преобладающего пустого компонента: для кремнистых песков более надёжна магниево-кальциевая обратная флотация, тогда как при значительном содержании карбонатного цемента предпочтительна прямая анионная схема с предварительным декапсуляционным измельчением (А.А. Каменская, Р.И. Ковалова, И.Э. Хошимов и др. [97, 98]).

Текущая тенденция переработки бедных фосфоритов (<12 % P₂O₅) заключается в переходе от классических самоаэрационных машин к колонным

аппаратам с глубокой пеной и рециркуляционным аэратором. Как отмечают Х.И. Холов, С. Курбон и др. [99, 100], высота пенного столба до 6 м обеспечивает более чистое разделение по капиллярному числу, снижает расход реагентов на 15–20 % и улучшает селективность. Для краевых карбонатитов успешно внедряются пенные сепараторы без механического перемешивания (Pneufлот, Jameson), где дисперсная газовая среда создаётся давлением воздуха и характеризуется микропузырьками 0,6–0,8 мм. Подобные схемы, по данным Б.В. Комогорцева и А.А. Вареничева [101], также повышают извлечение целевого минерала за счёт минимизации смачивания тонкодисперсных карбонатных частиц.

Адсорбционные процессы, несмотря на вспомогательный характер, приобретают стратегическое значение в современных схемах переработки фосфатного сырья. Как отмечают Б.В. Комогорцев и др. [101], селективная флокуляция, основанная на различии зарядов и поверхностных потенциалов минеральных частиц, позволяет удалять до 25 % глинистого материала из хвостов, если пульпа предварительно обработана низкомолекулярными полиакриламид-фосфонатами. После флотации тонкодисперсные хвосты обезвоживаются с помощью высокосдвиговых центрифуг, а оборотная вода возвращается в процесс, что имеет важное значение для водоограниченных (аридных) регионов.

Дополнительная очистка концентратов от кадмия, мышьяка и органохлорсодержащих соединений всё чаще реализуется не через обжиг, а кислотно-экстракционными методами. И.А. Филенко [102] указывает, что наилучшие результаты достигаются при промывке 5%-ным раствором HNO_3 – H_3PO_4 при температуре 45 °С: содержание Cd снижается до $0,5 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$ при потере P_2O_5 не более 1 %. В случаях, когда необходимо снизить содержание фтора (в соответствии с экспортными стандартами ЕС), применяется двухстадийная схема декальцинации карбонатного цемента: сначала осуществляется промывка CO_2 -содержащей водой, затем — селективное выщелачивание с использованием раствора Na_2CO_3 [103]. Такая комбинация

обеспечивает соблюдение экологических нормативов без существенного ухудшения качества фосфатного концентрата.

Низкотемпературный обжиг («тепловая» или «карботермическая» переработка) в шахтных печах остаётся актуальным для магматических апатитов с высоким модулем $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5$. Для осадочных фосфоритов он сводится к быстрому (flash) обезуглероживанию при 900–950 °С в инжекционной теплообменной системе: карбонат разлагается, а апатит спекается в крупку, пригодную для кислотофильтрационного процесса. Степень повышения содержания P_2O_5 составляет 4–6 % [104].

Новые направления — рентгеновская сортировка, лазер-индуцированная спектроскопия и комбинированная (sensor-based) сортировка руды. На рудах с контрастом $>5\%$ P_2O_5 селективный разлом электронными «щелями» позволяет отбраковать до 30 % пустой породы ещё до первичного дробления. Для мелких фракций разрабатываются методики кавитационной флотации, где ультразвуковой поток образует в жидкости пузырьково-капельную эмульсию размером <100 мкм — это усиливает столкновение частиц и пузырьков и сокращает цикл реагентной активации [105].

И, наконец, биотехнологические методы обогащения, основанные на растворении карбонатного цемента с участием микроорганизмов, таких как *Bacillus mucilaginosus* и *Rhizobium trifolii*, пока находятся на стадии полупромышленных испытаний. Однако, как подчёркивают О.С. Дубовик и Р.М. Маркевич [106], в условиях дефицита воды — особенно в засушливых регионах — они уже рассматриваются как перспективная «зелёная» альтернатива традиционному кислотному выщелачиванию. По мнению А.Ф. Георгиевского [107], микробные технологии обеспечивают не только локальную декарбонизацию фосфатных частиц, но и способствуют агломерации глинистых включений, облегчая последующую флотацию и фильтрацию. Несмотря на технологическую незрелость, биовыщелачивание приобретает стратегическую значимость в контексте устойчивого освоения низкосортного фосфатного сырья.

Современная схема обогащения фосфатного сырья представляет собой гибрид физических, химических и биотехнических подходов, подбираемых индивидуально «под руду». Как подчёркивают О.И. Ломовский, В.В. Болдырев и др. [108], такая интеграция позволяет одновременно минимизировать энергозатраты и экологический след. Для бедных осадочных фосфоритов Центральной Азии, включая Риватское месторождение, наилучшие результаты демонстрирует связка мягкого предварительного измельчения, селективной обратной колонной флотации и точечной деконтаминации концентрата от тяжёлых металлов. По данным Н.А. Дониярова, И.А. Тагаева и др. [95], именно эта комбинация обеспечивает содержание P_2O_5 26–28 % при суммарном извлечении ≥ 85 % и минимальном водно-энергетическом следе. Как отмечает А.А. Абрамов [109], подобные показатели делают технологию конкурентоспособной и для внутреннего рынка удобрений, и для перспективного экспорта гранулированных НРК-продуктов.

1.4.1. Гравитационные и магнитные технологии обогащения

Гравитационные и магнитные методы обогащения остаются «классическими» физическими технологиями, которые, несмотря на развитие высокоселективных флотационных схем, не теряют значимости при переработке осадочных фосфоритов. Как подчёркивают Х.И. Холов, А.С. Ниёзов и др. [110] и Ф.Ф. Можейко, А.И. Войтенко и др. [111], их востребованность обусловлена, во-первых, относительной конструктивной простотой оборудования, низким энергопотреблением и минимальным реагентным фондом, а во-вторых — способностью снижать «балластную» нагрузку на последующие операции за счёт удаления крупнокусковых либо парамагнитных примесей ещё до стадии тонкого измельчения. По данным А.В. Лыгача, В.А. Игнаткиной и В.Н. Лыгача [112], предварительное гравитационное отделение тяжёлых минералов сокращает расход флотационных реагентов на 8–12 %, а применение высокоградусной магнитной сепарации (поле $\geq 1,5$ Тл) позволяет эффективно элиминировать глауконит,

железистые и алюминиевые включения, повышая селективность флотации (Т.А. Олейник, Л.В. Скляр и др. [113]; А.Е. Лихошерст, И.А. Почиталкина [114]). В результате комбинированные схемы с ранним физическим «огрублением» демонстрируют прирост выхода фосфатного концентрата на 3–5 % при одновременном снижении общей реагентной нагрузки производственного цикла.

Плотность карбонат-фторапатитовых зёрен ($2,90\text{--}3,25 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$) лишь умеренно контрастирует с минералами пустой породы: кварц $2,65 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, кальцит $2,71 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, доломит $2,85 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$. Поэтому эффективность классической гравитации — шлюзов, винтовых сепараторов или концентрационных столов — ограничивается теми месторождениями, где апатитовый материал уже на первом этапе освобождён от плотной карбонатной цементации и присутствует в виде относительно крупных гранул ($0,3\text{--}2 \text{ мм}$). Такой «песчаниковый» тип чаще встречается в зернистых и ракушечных фосфоритах Северной Африки и Центральной Азии [115,116]. На Риватском месторождении предварительный грохот с последующей гидравлической классификацией способен отсеять до 25 % кварц-доломитового шлака и тем самым поднять содержание P_2O_5 с исходных 5–6 % до 8–9 % без ущерба для выхода полезного компонента [117,118]. Дальнейшая стадия гравитационного обогащения, как правило, реализуется спиральными сепараторами: в них создаётся тонкая плёнка пульпы, где под действием центробежных сил более тяжёлые апатитовые зерна смещаются к внутреннему борту спирали и выгружаются в апатитовый концентрат, тогда как лёгкая кремнистая и глинистая фракции следуют по внешней траектории [119,120]. Практика показала, что при зернистости $0,15\text{--}2 \text{ мм}$ и плотности пульпы 30–35 % гравитация позволяет дополнительно поднять P_2O_5 на 2–3 пункта и уменьшить содержание SiO_2 на 4–6 %. Однако по мере перехода руды в классы менее $0,15 \text{ мм}$ резко возрастает влияние вязкости раствора и ламинарного режима течения, что снижает селективность. Поэтому современные фабрики ограничивают применение спиралей крупными и

средними классами, а тонкие шламы перекачивают непосредственно на флотацию.

При существенной дисперсности пустой породы (глинисто-алевритовый цемент) предпочтительнее гидроциклонная классификация в среде тяжёлых суспензий. Использование водных растворов карбоната бария или суспензии халцедоновой муки позволяет сформировать псевдожидкую среду плотностью 2,8–2,9 г·см⁻³; апатитовые зерна при этом концентрируются в тяжёлой фракции, а кварц и ил уносятся в лёгкую. Метод находит применение в Иордании и на новых бразильских проектах, но требует герметичных контуров из-за стоимости тяжёлого носителя.

Магнитная сепарация становится эффективной, когда апатитовый концентратор «соседствует» с ферромагнитными или парамагнитными включениями, которые даже в малых количествах ухудшают качество конечного продукта [121]. Для осадочных фосфоритов такими примесями чаще всего являются глауконит, сидерит, пирит, реже — тяжёлые минералы титана и хрома, попадающие в руду при вендских интрузиях. Контраст магнитной восприимчивости между глауконитом ($\chi \approx 1,1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$) и апатитом ($\chi \approx 0,2 \cdot 10^{-7} \text{ м}^3 \cdot \text{кг}^{-1}$) достаточен, чтобы отделять глауконит при напряжённостях поля 1,5–2 Тл. На практике применяют барабанные низкоинтенсивные (до 0,3 Тл) сепараторы для предварительного снятия грубообломочного магнетита, а затем высокоинтенсивные и высокоградиентные (HGMS) сепараторы — до 2 Тл и градиентами 10^3 – 10^4 Тл·м⁻¹ — для тонкодисперсных парамагнитных руд. Исследования на риватском концентрате показали, что однопроходное высокоградиентное разделение снижает содержание Fe₂O₃ с 3,2 % до 1,1 % при потере P₂O₅ не более 1,5 %, что существенно облегчает дальнейшее кислото-вскрытие (меньше расход серной кислоты на нейтрализацию Fe³⁺-ионов) и улучшает цветовые показатели конечного удобрения.

Отдельного внимания заслуживает пьезомагнитный метод, внедрённый на некоторых китайских фабриках: под действием импульсного

электромагнитного поля (5–12 кГц) усиливается селективная «отлипка» тонких пластинчатых глауконитовых частиц от поверхности апатита, что повышает эффективность последующего флотационного отделения без увеличения расхода реагентов. Такие же установки тестируются на Марокканском ОСР для предварительной очистки апатитовых шламов.

Комплексное включение гравитационных и магнитных операций в технологическую схему позволяет перерабатывать бедные осадочные фосфориты с минимальным энергореагентным следом [122,123]. Например, экспериментальная линия на южно-йоркширском месторождении (Великобритания) использует последовательность «грохот → спираль → высокоинтенсивная магнитная сепарация → колонная флотация» и обеспечивает концентрат 30 % P_2O_5 при извлечении 78 %, сократив расход олеиновой кислоты вдвое по сравнению с «чистой» флотацией [124]. Аналогичный подход рассматривается для Ривата: расчёты показывают, что комбинация спиралей и магнитов после промывки уменьшит массу, поступающую во флотационные колонны, на треть, тем самым снижая общие капитальные затраты на 12 % и операционные на 18 % при сохранении целевого качества (26–28 % P_2O_5).

С экологической точки зрения гравитационные и магнитные методы выглядят предпочтительно. Как подчёркивают В. Сингх, Т. Чакраборти, С. К. Трипати и др. [125], единственным условно-опасным компонентом таких схем остаётся шламовая вода, которую после коагуляции полиакриламидом и осветления можно полностью вернуть в оборот. По данным Дж. Анавати и Г. Азими [126], отсутствие кислых и щёлочных стоков упрощает проектирование хвостохранилищ и повышает социальную приемлемость новых горно-обогатительных комбинатов.

Как отмечают Д. Кумар [127], а также А. Амиреш, М. Бухенгель и С. Куачи [128], гравитационные и магнитные методы не конкурируют с реагентными схемами обогащения, а, напротив, дополняют их: они предварительно удаляют крупную пустую породу и магниточувствительные

включения, разгружая последующую стадию флотации, снижая расход реагентов и уменьшая износ мельничного оборудования. Для бедных, но рыхлых зернистых фосфоритов Риватского месторождения применение этих технологий позволяет довести технологическую схему до мировых энергосберегающих стандартов и служит залогом экономической эффективности будущего производства комплексных удобрений.

1.4.2. Флотационные схемы (обратная и прямая флотация)

Как подчёркивает Р. Уоут [129], флотация остаётся ключевым селективным звеном в обогащении фосфоритовых руд: именно здесь апатит-карбонат-франколитовая зернистая фракция отделяется от кремнисто-карбонатного «балласта», что позволяет довести содержание P_2O_5 до уровня, пригодного для дальнейшего кислотного вскрытия. Современные фабрики применяют две базовые конфигурации — прямую и обратную флотацию, выбор которых определяется минеральным составом пустой породы, распределением классов крупности и требуемой гибкостью реагентного режима. Как показывают В. Чэнь, Ф. Чжоу, Х. Ван и др. [130], обратная селективная флотация даёт особые преимущества при переработке кремнисто-карбонатных руд с повышенным содержанием редкоземельных элементов, тогда как прямая анионная схема остаётся предпочтительной для руд с массивным карбонатным цементом и минимальной силикатной матрицей.

Прямая (анионная) флотация, как показывают Т. Н. Александрова, А. М. Эльбендери и др. [131], основана на избирательной гидрофобизации апатита анионо-активными коллекторами — олеиновой кислотой, смесями талового масла с карбоксилатами либо техническими алкилфосфонатами C_{16} – C_{18} . При рН 8,5–9,5 поверхностный заряд франколита смещается в область слабонегативного потенциала, и собиратель адсорбируется в виде кальция-олеатов, формируя прочный гидрофобный слой. Кремнистая, глинистая и часть карбонатной матрицы остаются гидрофильными благодаря устойчивому отрицательному ζ -потенциалу; их смачиваемость дополнительно усиливают

мягкие депрессанты — карбоксиметил-целлюлоза, модифицированные крахмалы, полиакриламид-фосфонаты.

По данным С.А. Кондратьева, Т.А. Хамзиной и соавт. [132], эффект особенно выражен для зернистых североафриканских фосфоритов, где пустая порода представлена α -кварцем: прямая схема позволяет получать концентрат с 30–32 % P_2O_5 при извлечении 88–90 %. Недостаток метода, на который указывают В.В. Сергеев, О.В. Черемисина и др. [133], — высокий расход олеиновой кислоты (800–1000 г/т) на рудах с большим удельным удлинением поверхности и склонностью к пенообразованию, что повышает стоимость реагентов и усложняет очистку оборотной воды.

Для слабокарбонатных руд (модуль $R = (CaO+MgO)/P_2O_5 < 1,4$) прямая флотация экономически оправдана; однако при более высоком содержании карбонатов её эффективность снижается: избыточная адсорбция Ca^{2+} ухудшает селективность, а карбонатные минералы частично уносятся в пену, загрязняя концентрат.

Обратная (катионная) флотация в щелочной среде используется там, где силикат-кварцевый компонент преобладает над карбонатом [134,135]. Лигнин-сульфонаты или малые дозы фосфата-натрия депрессируют апатит, тогда как ди- и триаминовые коллекторы C_{16} - C_{18} (индекс этоксилирования 2-3) селективно гидрофобизируют кварц, полевошпат и глинистые алюмосиликаты. Оптимальное окно реакции находится при pH 10-11, где амин-коллектор существует преимущественно в молекулярной форме, легко адсорбируется на кремнистых поверхностях через механизм водородного мостика и слабого катионо-обмена. Апатит остаётся в пульпе из-за комбинированного действия ионов Ca^{2+}/Mg^{2+} , создающих на его поверхности прочную гидрофильную кальций-фосфатную оболочку [136]. После удаления всплывшей силикатной пены концентрат сбрасывают из нижней зоны машины, промывают и переводят в слабокислый режим для последующей обработки. Основное достоинство обратной схемы — невысокий расход реагентов (120-180 г/т амина) и возможность работы при крупности 65-70 % -0,074 мм, без мельничного

«перемола»; недостаток — жёсткие требования к ионному составу воды: присутствие $\geq 0,5$ г/л Ca^{2+} нейтрализует четвертичные амины, снижая селективность. Для руд типа Риват, в которых пустая порода на 60-65 % состоит из микрокварца и халцедона, именно обратная флотация после предварительного грохочения и гидроциклонной классификации даёт наилучший баланс качества/извлечения (26-28 % P_2O_5 при 84-87 %).

По оценкам Дж.А. Финча и Г.С. Добби [137], переход от механических ячеек к колонной флотации с глубокой пеной (5–6 м) позволил как прямой, так и обратной схемам поднять селективность на 4–6 % и сократить удельный расход коллектора. В колонне турбулентность ядра пены минимальна: пузыри диаметром 0,7–0,9 мм формируют медленный восходящий поток, а непрерывная рециркуляция пульпы через эрлифт возвращает неадсорбированные частицы в активную зону.

Как показывают Л. Лань, У. Сунь и др. [138], при обратной флотации подача CO_2 , подкисляющая жидкую фазу до $\text{pH} \approx 9,5$, стабилизирует коллоидные частицы $\text{CaCO}_3/\text{SiO}_2$ в суспензии и препятствует их прилипанию к апатиту. На фабриках OCP-Vokra (Марокко) и Vale-Araçá (Бразилия) колонны полностью вытеснили механические ячейки на стадии дообогащения: по расчётам Ц. Тяня, Ю. Вана и Г. Ли [139], энергопотребление снизилось на ~30 %, а экономия реагентов окупает капитальные затраты за 2–3 года за счёт уменьшения расхода олеиновой кислоты.

Серьёзную роль играет подготовка пульпы. Лабораторные эксперименты с риватским концентратом показали, что электродиспергирование (30 кГц, 60 $\text{Вт}\cdot\text{л}^{-1}$) за 2-3 мин разрушает тонкие глино-фосфатные агрегаты, сокращая потребность в активаторе (соде) на 20 %. Ещё один подход — «селективный реагентный расклад»: концентрат кондиционируют смесью сульфата железа и водорастворимого полиакрилата, после чего в схему вводят минимальное количество коллектора; FeSO_4 сажает на кремнистых частицах тонкую плёнку $\text{Fe}(\text{OH})_3$, делая их гидрофильными, тогда как апатит, благодаря кальцие-фосфатному слою, остаётся невосприимчивым. При правильной дозировке (30

г/т FeSO_4 + 50 г/т полиакрилата) извлечение P_2O_5 повышается на 2-3 %, а содержание кремнезёма в концентрате снижается с 8 до 5 %.

Отдельный класс решений — двухстадийные «гибридные» схемы. На первой стадии материал подвергают прямой флотации при pH 8,5, забирая богатый концентрат (30-32 % P_2O_5) и часть апатита, затем хвосты рефлотируют в катионном режиме (pH 10,5), удаляя остаточный кварц. Комбинация позволяет довести общую степень извлечения до 90-92 % при умеренном расходе обоих коллекторов. На предприятиях Mosaic-Florida гибридная схема стала стандартом для руд среднего качества (15-18 % P_2O_5) [140].

К современным тенденциям относится замена бензиново-керосиновых эмульсий «зелёными» эфирами жирных кислот C_8 - C_{12} и алкилгидроксаматами, менее токсичными и био-разлагаемыми. Одновременно ведутся испытания микропузырьковой флотации — подача сжатого воздуха через керамические диспергаторы образует пузыри 50-80 мкм, которые, благодаря высокому отношению площади поверхности к объёму, захватывают даже плохо гидрофобные апатитовые частицы. Первые промышленные результаты (OCP-Jorf Lasfar) свидетельствуют о росте извлечения на 3-4 % и сокращении времени кондиционирования.

Для риватского проекта предложена двухпоточная колонная схема: после мокрой классификации песчаная фракция (0,074-1 мм) идёт на прямой анионный цикл, а глинистый шлам (<0,074 мм) — на обратный катионный. Суммарное извлечение по расчёту составляет 85 %, качество конечного концентрата — 27 % P_2O_5 , $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5 = 1,35$, $\text{SiO}_2 = 4,8$ %, $\text{Cd} < 8 \text{ мг} \cdot \text{кг}^{-1}$. Энерго-реагентная модель показывает, что расход олеиновой кислоты не превысит 350 г/т, а катионного коллектора — 120 г/т; потребление воды $2,3 \text{ м}^3 \cdot \text{т}^{-1}$ с возвратом 90 % в оборот.

Тем самым прямые и обратные флотационные схемы, оснащённые колонными аппаратами, селективными депрессантами и контролем микропузырьковой структуры, позволяют гибко подстраивать технологию под конкретный минералогический профиль фосфорита и выходить на мировые

стандарты качества концентрата даже при переработке бедных руд вроде риватских песчаников [141].

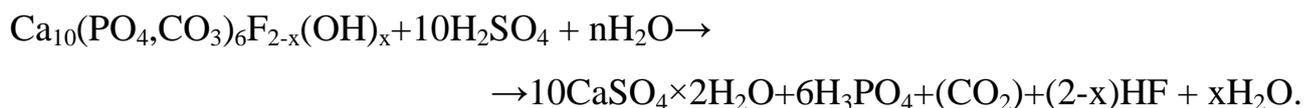
1.5. Термодинамика и кинетика процессов кислотного разложения фосфоритов

Кислотное вскрытие является ключевой технологической операцией, переводящей нерастворимую минеральную форму фосфора — карбонат-фторапатит (франколит) — в растворимые соединения, пригодные для последующего синтеза удобрений. Как подчёркивают А. Abouzeid и В. К. Virky [142, 143], процесс реализуется на границе фаз «твёрдое – жидкость» и включает одновременно: химическое растворение апатитовой решётки, осаждение вторичных фаз (гипса, фторидов кальция) и диффузионный перенос компонентов в поровом пространстве.

По расчётам Ш. А. Курбонова, Б. А. Обидова, Х.И. Холова и др. [144], эффективность кислотного разложения напрямую зависит от соотношения «кислота ↔ фосфор», определяя не только глубину извлечения, но и себестоимость готового НРК-продукта. Нарушение кислотного баланса приводит либо к недорастворению апатита (недоиспользование сырья), либо к избыточному расходу кислоты, сопровождаемому ускоренным износом оборудования и повышением удельных затрат.

Термодинамическое обоснование

Для апатит-карбонатной матрицы разложение с помощью серной кислоты описывается обобщённым уравнением (Карамбахшов Х.З., Курбонов Ш.А., Холов Х.И. [145]):



Для типичного франколита ($z \approx 1$, $x \approx 0,4$) стандартное изменение энергии Гиббса ΔG°_{298} составляет около -650 кДж·моль⁻¹, что свидетельствует о полной термодинамической самопроизвольности процесса и отсутствии равновесного ограничения. Энтальпия реакции также отрицательна ($\Delta H^\circ \approx -240$ кДж·моль⁻¹),

реакция экзотермическая: 25–30 % выделяющейся теплоты расходуется на нагрев пульпы, остальная часть уходит с испарением воды и конвекцией паров HF/CO₂.

Расход серной кислоты на разложение определяется нутроёмкостью по модулю CaO/P₂O₅ (R). Для концентратов Риватского месторождения (R ≈ 1,35) теоретический расход 98%-ной H₂SO₄ составляет 2,35 т на 1 т P₂O₅; в промышленной практике фактический коэффициент составляет 1,05–1,10 от термодинамического значения, что учитывает сопутствующие потери и неидеальность процесса.

Высокий карбонатный индекс увеличивает долю CO₂ и, следовательно, работу на дегазацию; при R > 1,6 тепло эффекта почти компенсируется испарением и охлаждением газового потока, поэтому процессы ведут в реакторах с теплоутилизацией (flash-cooling).

Кинетика растворения

Экспериментальные данные по концентрату Ривата (25,8 % P₂O₅) показывают S-образную кривую превращения (α = X P₂O₅, %) при серноокислотном разложении (Ш. А. Курбонов, Б. А. Обидов и др. [146]):

- Индукционный период (0–2 мин) — быстрый раствор поверхностного карбоната; pH падает с 2,5 до 1,8.
- Основная стадия (2–12 мин) — растворение апатита ограничено диффузией через нарастающую гипсовую плёнку; скорость описывается выражением Шугаева:

$$1 - (1 - a)^{1/3} = k_{dif} t, \quad k_{dif} = 2,1 \exp\left(-\frac{19,8 \text{ кДж}}{RT}\right) \text{ мин}^{-1}.$$

- Торможение (>12 мин) — толщина CaSO₄·2H₂O достигает 4–6 μm; внутрь поступает исключительно H⁺, а HF и H₃PO₄ медленно диффундируют наружу.

Переход к химическому контролю наблюдается лишь при размере частиц d₅₀ < 45 μm: энергия активации тогда возрастает до 33–35 кДж·моль⁻¹, а механизм соответствует модели пленочного растворения (R shrinking core).

Основные факторы влияния:

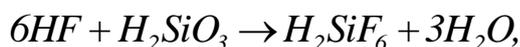
| Параметр | Диапазон | Эффект на скорость |
|---|----------------|---|
| Температура | 30 – 80 °С | к растёт $\approx e^{-E/RT}$; удвоение каждые +12 °С |
| Концентрация H ₂ SO ₄ | 1,5 – 6,0 М | Линейный рост до 4 М, далее плато (пассив. CaSO ₄) |
| L/S (Ж:Т) | 1:1 – 3:1 | Разбавление снижает вязкость, уменьшает Δр диффузии |
| Помол (d ₈₀) | 300 → 90 μm | Ускоряет; ниже 90 μm выгода нивелируется «гелевой» коркой |
| Добавки (лигносульфонат, цитрат) | 0–0,2 % | Диспергируют гипс, ускоряют на 15–20 % |

Гидродинамика и реология пульпы

Для концентрата Ривата оптимальный диапазон массовых концентраций суспензии 35–40 %. При меньших значениях повышается расход тепла, при больших — вязкость ($>0,8$ Па·с) ограничивает перемешивание; критическое число Рейнольдса $Re_k \approx 10^4$ соответствует скорости перемешивающего устройства $2,5$ м·с⁻¹. В реакторах «pipe-reactor» (трубчатый) контакт time 2–4 с даёт 75 % превращения; доза серной кислоты вводится струйно при 120 °С, далее шлам доразлагается в выдерживателе 8–10 мин.

Параллельные и побочные реакции

1. Осаждение фтора в виде кремнефтористов:



что уменьшает коррозию и очищает продукт, но требует наличия растворённого SiO₂.

2. Декальцинация кальцита:



сопровождается вспениванием; подавляется регулированием $\text{pH} \leq 1,6$ и добавкой пеногасителей (алкил-ПЭГ $30 \text{ г} \cdot \text{т}^{-1}$).

3. Образование $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ («гель») при локальном избытке фосфорной кислоты; регулируют повышенным $\text{Ca}^{2+}/\text{PO}_4^{3-}$ -отношением или добавкой 0,05 % цитрата натрия.

Технико-экономический вывод

- 100% извлечения P_2O_5 недостижимо по кинетическим ограничениям; промышленно целевое значение 92–94 %.
- Удельные затраты H_2SO_4 для риватского концентрата с $R \approx 1,35$: 2,5 т/т P_2O_5 (вкл. декальцинацию).
- Удельный расход теплоты (пар 0,8 МПа) — 900–1000 кВт·ч·т⁻¹ P_2O_5 ; 30 % возвращается конденсатом.
- Оптимальный режим: 70 – 75 °С, 3,5 М H_2SO_4 , Ж:Т = 2,5:1, $d_{80} \approx 110 \mu\text{m}$, $t = 18$ мин, $\text{pH}_{\text{out}} = 1,4\text{--}1,6$.

Приведённый термодинамико-кинетический анализ показывает, что для бедносортных франколитовых концентратов критично сочетать тонкий, но не сверхтонкий помол с контролем гипсовой пассивации — только так обеспечивается высокая степень извлечения при приемлемом расходе кислоты. Для промышленного освоения Ривата предлагаемая схема позволяет получить фильтрат H_3PO_4 , пригодный для аммонизации и получения гранулированного НРК 15-15-10 без дополнительной очистки от Ca^{2+} и тяжёлых металлов.

1.6. Подходы к синтезу комплексных (НРК) удобрений

Синтез комплексных удобрений НРК базируется на двух фундаментальных операциях: получении растворимой фосфорной формы и одновременном или поэтапном введении азот- и калийсодержащих компонентов в формах, устойчивых при хранении и физиологически доступных в почве (О. Дормешкин [147]; А. Калита, М. Элайараджан и др. [148]). В промышленной практике апробировано пять основных технологических маршрутов, выбор которых определяется качеством исходного фосфатного

сырья, наличием аммиака и калийных солей, а также требуемой рецептурой конечного продукта (С. Шахена, М. Раджан и др. [149]; А. Рой [150]). Оптимизация соотношения и способа введения питательных элементов обеспечивает как агрономическую эффективность, так и устойчивость продукции в логистике и хранении.

Первая и наиболее распространённая схема основана на кислотном вскрытии фосфорита с последующей аммонизацией «камерной» фосфорной кислоты и дозированным введением хлорида калия в реактор-гранулятор. Концентрированная H_3PO_4 (40–52 % P_2O_5) смешивается с жидким безводным NH_3 ; экзотермическая нейтрализация повышает температуру шлама до 100–115 °С, облегчая выпарку свободной воды и формирование двойных солей — моно- и диаммоний-фосфата. Параллельно суспензию перекачивают в барабанный гранулятор со встречным током газов; здесь добавляется тонкоизмельчённый хлористый калий. Механизм образования гранул происходит через «слипание» вязких расплав-кристаллических агломератов, а кристаллизация MAP/DAP вместе с KCl создаёт внутри гранулы доменные мостики, фиксирующие структуру. После 4-5 мин выдержки материал сушат при 120 °С, классифицируют и охлаждают в струе воздуха — получают товарные марки 15-15-15 или 16-16-8. Для концентратов Ривата модуль $\text{CaO}/\text{P}_2\text{O}_5 \approx 1,35$ обеспечивает оптимальное соотношение $\text{Ca}^{2+}/\text{PO}_4^{3-}$, поэтому стадию деме­таллизации (удаления кальция экстракцией) можно исключить: кальций остаётся в виде сульфата-гипса, равномерно диспергированного в грануле, и дополнительно повышает содержание серы до 3–4 %.

Вторая технология — нитрофосфатный («Odda») процесс, при котором фосфорит растворяют 55-60 % HNO_3 . Образуются растворимые кальциевые и аммонийные нитрофосфаты; часть кальция отфильтровывают в виде $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, а в оставшийся раствор по стехиометрии дозируют аммиак и KCl/ K_2SO_4 . Преимущество подхода — отсутствие гипсовых стоков, высокая водорастворимость P и N, гибкость рецептур до 20-20-0; недостаток — затратность на концентрированную азотную кислоту и необходимость

утилизации нитрата кальция (чаще всего его упаривают до расплава и реализуют как побочное удобрение или вводят в смеси для томатов). Для бедных франколитовых концентратов метод пригоден лишь после предварительного удаления углекислоты, иначе CO_2 интенсивно вспенивает пульпу.

Третий маршрут — шлакование или термофосфат: фосфорит, мелкий кварц и кокс плавят в электропечи при 1400–1500 °С, получая комплексный силикофосфат кальция, который затем аммонизируют и смешивают с калием. Такой способ полностью устраняет фтор, превращая его в SiF_4 , уловимый мокрыми скрубберами, но требует высоких энергозатрат (1,8–2,4 МВт·ч на т P_2O_5). В Таджикистане, где электроэнергия относительно дешёвая, термофосфат мог бы служить нишевым продуктом для кислых почв, поскольку его фосфор не переходит в труднорастворимый CaHPO_4 , как при кислотном разложении, а постепенно высвобождается по мере гидролиза.

Четвёртый подход — компакционирование: фильтрат фосфорной кислоты упаривают до 70 % P_2O_5 , частично нейтрализуют, сушат в барабанной плёнке до порошка, а затем вместе с гранулированным MAP, мочевиной, сульфатом калия и микроэлементами прессуют в валковом пресс-компакторе. Порошковая смесь спекается под давлением 80–120 МПа, затем проходит крошение и классификацию. Метод экономичен и даёт свободу рецептур (от NPK 10-26-26 до 8-19-29), но гранулы обладают пониженной прочностью и требуют антислѐживающих покрытий (линолеат кальция 0,3 %), иначе разрушаются при транспортировке; кроме того, водорастворимость P частично теряется из-за реформации в Ca/Mg-пирофосфаты.

Пятый, «(slurry)»-метод объединяет вакуум-упарку фосфорной кислоты до 52 % P_2O_5 , одновременную дозу аммиака и сульфата калия в трубу-реактор «pre-reactor». На выходе формируется расплав-суспензия 95–105 °С, которая вбрасывается на «seed»-шину рециркулированных гранул, образуя оболочку. Тонкая регулировка коэффициента $\text{NH}_3/\text{H}_3\text{PO}_4 = 1,1\text{--}1,2$ позволяет формировать кристаллическую фазу NP 8-24 внутри гранулы, тогда как K^+ остаётся в

аморфной стекловидной матрице. Микроструктурный анализ показывает равномерное распределение элементов, что снижает риск селективного выщелачивания при хранении в климате с высокой влажностью. Для риватского концентрата, где в фильтрате присутствует 3–4 г/л SiF_6^{2-} , добавляют 0,8 % каолиновой муки, связывающей кремнефтористый анион в нерастворимый гексагидрат, предотвращая вспенивание шлака.

Калий обычно вводят в виде KCl — самого доступного источника K_2O (60 %) [151,152]. При необходимости хлор-чувствительных культур используют гранулированный сульфат калия или лангбеинит ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{MgSO}_4$), но он повышает температуру спекания на 15–20 °С и требует водного распыления для равномерной дисперсии. Азотная составляющая варьируется между аммиаком, мочевиной и нитратом аммония; последняя комбинация (AN-based NPK) обеспечивает равномерный pH-профиль в зоне корней, но ограничивается содержанием $\text{N} \leq 18$ % из-за опасности рекристаллизации нитрата [153].

Качество гранул оценивают по прочности на раздавливание ($>3,5$ кг/гранулу Ø 3,5 мм), статическому влагопоглощению ($\leq 0,5$ % за 24 ч при 80 % RH) и показателю рассыпчатости.. Для удобрений на основе риватского сырья добавление 1 % лигносульфонат-Са перед сушкой повышает прочность гранул на четверть, одновременно действуя как антипыляющий агент. Показано, что введение микроэлементов (ZnSO_4 , B_2O_3) в раствор фосфорной кислоты даёт более однородное распределение по грануле, чем последующее опудривание, поэтому выбирают жидкую систему микро-Chelate Mix дозой 0,15–0,25 % к массе.

Таким образом, синтез NPK-удобрений формируется как технологическая цепочка «растворимый P → аммонизация → калий → грануляция/компакция → кондиционирование», где конкретная конфигурация — кислотная, нитрофосфатная, плавиковая или прессовая — определяется минеральным профилем фосфорита, энергетическим балансом предприятия и целевым агрохимическим рынком. Для концентратов Риватского месторождения оптимальной выглядит низко-фтористая сернокислотная схема с аммонизацией

в pipe-reactor и последующей расплав-грануляцией: она максимально задействует местное сырьё, обеспечивает высокую водорастворимость фосфора и допускает гибкую корректировку формулы N-P-K под хлопководство и садоводческие культуры долины Зеравшана.

1.7. Экологические и экономические аспекты переработки бедных фосфоритовых руд

Переработка бедных фосфоритовых руд, как подчёркивают Б. Гейсслер, Л. Германн, М.С. Мью, Г. Штайнер и др. [154], всегда представляет собой поиск баланса между хозяйственной выгодой и экологической приемлемостью. Экономика таких проектов начинается с простого факта: чтобы получить 1 т концентрата P_2O_5 из сырья, содержащего лишь 6–8 % фосфорного ангидрида, необходимо переместить и измельчить 10–12 т горной массы. При этом мельничная часть фабрики потребляет основную долю электроэнергии, а каждое дополнительное снижение крупности на 10 % увеличивает удельный расход энергии ещё на 4–6 % (С.У. Офозгбу [155]). Поэтому большинство современных схем, описанных Г. Штайнером и соавт. [156], предусматривают раннее гравитационное или магнитное «огрубление», удаляющее крупнокусковой кремнезём до тонкого измельчения и сокращающее общий тоннаж на 20–30 %. Такая энергетическая выгода напрямую трансформируется в уменьшение углеродного следа: переход от классической шаровой мельницы к валковому прессу высокого давления (HPGR) и к вертикальной мельнице тонкого помола, по оценкам К. Ламгари и др. [157], снижает выбросы CO_2 на 0,08–0,1 т на каждую тонну извлечённого фосфора.

Реагентная статья расходов столь же чувствительна к качеству руды. При кислотном разложении франколита с модулем CaO / P_2O_5 около 1,4 требуется примерно 2,5 т концентрированной серной кислоты на тонну P_2O_5 , из которых 10–12 % уходят не на растворение апатита, а на нейтрализацию примесных карбонатов и силикатов. Чем беднее сырьё, тем выше эта непродуктивная доля. Экономика подталкивает технологов к тонкой настройке флотации: чем меньше

SiO_2 и CaCO_3 попадает в концентрат, тем ощутимее выигрыш при кислотном вскрытии. Одновременно экологический контур выигрывает от той же селективности, потому что сокращается объём гипсового шлама, накапливающегося после реакции. Для бедных песчаников с содержанием P_2O_5 до 7 % на тонну концентрата образуется до трёх тонн гипса: если предприятие не предусматривает совместное складирование или продажу гипса в цементную промышленность, стоимость строительства хвостохранилища вдвое перекроет экономию на сырьевой базе.

Водный фактор становится критичным в засушливых регионах, где бедные фосфориты встречаются наиболее часто. Одновременное измельчение и флотация руды крупностью 70 % $-0,074$ мм требует до 3 м³ технической воды на тонну исходного материала. Замкнутый водооборот позволяет вернуть 85–90 % объёма, но при этом шламовая жидкость аккумулирует фтор и остатки коллекторов. Для сохранения химической стабильности системы приходится вводить циклическую коагуляцию полиакриламидом и известью, а осветлённый слив частично сбрасывать в гипсохранилище. Такие операции удорожают кубометр рециркуляционной воды не менее чем на 15 %, однако именно они избавляют предприятие от штрафов за сбросы и обеспечивают социальную лицензию на работу.

На экологические показатели напрямую влияет выбор схемы улавливания фтороводорода, неизбежного спутника кислотного разложения. Традиционный мокрый скруббер с силикагелевой насадкой переводит HF в раствор H_2SiF_6 , который нейтрализуют известью до CaF_2 . Отказ от этой стадии снижает капитальные затраты на 8–10 %, но увеличивает годовые выбросы фтора до предельных значений, закрывая экспортные возможности: в ЕС и Китае допустимый уровень F в готовом удобрении жёстко лимитирован. Практика марокканской OCP и бразильской Mosaic показывает, что модернизация скрубберов с рекуперацией тепла и циклоном-сухим дожиганием позволяет отбить вложения за три–четыре года только за счёт роста цены «экологически чистых» гранул на мировом рынке.

Финальный экономический расклад переработки бедных фосфоритовых руд определяется не только прямыми производственными затратами, но и мультипликативным эффектом для региона. Как подчёркивают К. Ламгари, Р. Хакку и др. [158], локализация производства удобрений на основе низкосортного сырья позволяет существенно снизить зависимость аграрного сектора от импортных фосфатов, стабилизировать цены на минеральное питание и обеспечить занятость: в среднем на каждую тысячу тонн концентрата приходится пять–шесть работников горно-химического профиля.

При этом снижается и социальная нагрузка на бюджет. По данным М. Саджида, Г. Бари и др. [159], предприятия берут на себя строительство собственных очистных сооружений, замкнутую переработку карьерных вод и часто участвуют в программах рекультивации сельхозугодий. Особенно ценным является использование побочного гипса в качестве мелиоранта для засоленных почв — мера, сочетающая экологическую утилизацию с повышением продуктивности сельского хозяйства. Как резюмирует Л. Германн [160], подобные модели интеграции фосфатного производства в локальные агросистемы формируют устойчивый социально-экономический контур и соответствуют принципам циркулярной экономики.

Таким образом, технологическая переработка бедных фосфоритов жизнеспособна при условии, когда энергетическая эффективность и экологическая безопасность рассматриваются как равноправные экономические параметры. Практика показывает, что каждая тонна инвестиций, направленная на селективную флотацию, рециркуляцию воды или улавливание фтора, возвращается не только через сокращение эксплуатационных издержек, но и через доступ к премиальным рынкам удобрений и устойчивое развитие прилегающих территорий.

1.8. Выводы и постановка задач исследования

Выводы проведенного литературного анализа подтвердили, что:

– мировая сырьевая база фосфатов сосредоточена в ограниченном числе регионов, тогда как большинство стран-потребителей остаются зависимыми от импорта концентратов с высоким содержанием P_2O_5 ;

– переход к вовлечению бедносортных апатитовых руд, подобных запасам Риватского месторождения, рассматривается как стратегический резерв для устойчивого обеспечения аграрного сектора удобрениями;

– минералого-геологические особенности риватских песчаников (гранулярный франколит, слабая цементация, низкие примеси Cd и U) создают предпосылки для энергосберегающего обогащения и относительно мягкого кислотного вскрытия;

– современные технологические цепочки для бедных фосфоритов должны сочетать селективную флотацию, диффузионно-контролируемое разложение серной (или азотной) кислотой и гибридную аммонизацию, чтобы минимизировать расход реагентов и образование отходов;

– экологическая устойчивость проектов опирается на замкнутые водообороты, улавливание HF, утилизацию гипса и управление углеродным следом; без этого экономическая выгода бедных руд нивелируется штрафами, ограничениями на экспорт и социальными рисками.

Исходя из выявленных тенденций формулируются основные задачи диссертационного исследования:

1. дать всестороннюю минералого-химическую характеристику фосфоритовых руд Риватского месторождения, определив ключевые факторы, влияющие на извлечение P_2O_5 ;

2. разработать и оптимизировать селективную флотационную схему, обеспечивающую получение концентрата не ниже 26 % P_2O_5 при извлечении ≥ 85 %;

3. установить термодинамические и кинетические закономерности сернокислотного вскрытия риватского концентрата, определить лимитирующие

стадии процесса и подобрать условия, позволяющие достигать 90–92 % извлечения фосфора при минимальном расходе кислоты;

4. создать принципиальную технологическую схему синтеза гранулированных NPK-удобрений на основе полученной фосфорной кислоты с учётом энерго- и ресурсосбережения;

5. оценить экологические и экономические показатели разработанной технологии, предложить решения для утилизации гипсового шлама и рекуперации тепла, обосновать её промышленную и региональную целесообразность.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ, ГЕОЛОГО- ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И МЕТОДИКИ ПЕРЕРАБОТКИ ФОСФОРИТНЫХ РУД

2.1. Геологическое строение фосфоритов Риватского месторождения

Риватское месторождение фосфоритов, расположенное на южном склоне Туркестанского хребта, формировалось в течение длительного геологического времени, охватывающего несколько крупных эратем. Стратиграфический разрез района включает палеозойские, мезозойские и кайнозойские отложения, каждое из которых внесло свой вклад в современное строение и полезноископаемый потенциал участка.

Палеозой в пределах месторождения представлен относительно небольшой, но стратиграфически показательной серией пород. Наиболее ранними выступают силурийские образования венлокского и лудловского возраста, протягивающиеся узкой полосой вдоль правобережья Зеравшана. Эти осадки мощностью 600–700 м сложены преимущественно терригенным материалом. С несогласием их перекрывают девонские комплексы толщиной 850–1200 м, отличающиеся литологической пестротой: плотные тонкозернистые доломиты, глинистые и известковые разновидности, детритусовые известняки, а также песчаники и конгломераты. Лежащая выше каменноугольная система, прослеженная в долинах Шингак-сая и Ойбадом-сая, локальна, но важна для реконструкции позднепалеозойской тектоники; её мощность не превышает 90 м, а взаимное наложение со смежными системами свидетельствует о значительных надвиговых перемещениях в конце палеозоя.

Мезозойские породы в районе выражены единственным верхнемеловым (сенонским) комплексом, толщина которого варьирует от 60 до 160 м. Нижняя его часть сложена разномеловыми гравилетами и песчаниками с прослоями конгломератов и аргиллитов; окраска пород колеблется от серой до ярко-красно-бурой. Выше следуют переслаивающиеся алевролиты и песчаники пестрой зелёно-красной гаммы. Завершают разрез песчано-известковистые

толщи, залегающие почти горизонтально и знаменующие окончание мелового осадконакопления.

Наибольшее промышленное значение имеют кайнозойские образования. В палеогене на месте современного месторождения существовал широковатый субширотный бассейн, окружённый невысокими поднятиями, с которых поступал аллотигенный материал. Осадконакопление проходило в относительно спокойных тектонических условиях; только к олигоцену началась орогеническая фаза, сузившая бассейн и подготовившая формирование неогеновых континентальных грубообломочных толщ. Внутри палеогеновой свиты расположены верхнеалайские слои — основной объект фосфоритонности. Залежь тянется вдоль правого борта Зеравшана в виде полосы шириной до трёх километров и длиной двадцать два километра; условно выделяются два участка: Хурми-Майкота протяжённостью восемнадцать километров и Миндоне длиной четыре километра.

Фосфоритонная толща включает три продуктивных горизонта, разделённых литологически отличными прослоями. Первый горизонт представлен доломитизированными известняками и кварц-фосфорит-карбонат-кварцевыми песчаниками мощностью до 1,3 м, окрашенными в серо-зелёные тона. Второй горизонт, достигающий трёх метров, сложен светло-серыми песчанистыми доломитами и известняками с прослоями глин и фосфатных песчаников; в западной и центральной частях Хурми-Майкота глины особенно развиты. Третий горизонт характеризуется преобладанием кварц-фосфоритовых и кварцевых песчаников с карбонатно-кремнистым цементом и большим количеством округлых гравийных включений — галек молочно-белого и розового кварца, кремнистых пород и известняков, а также фосфатизированных раковин и частиц зубов акул.

Минеральный состав продуктивных пород сложен и неоднороден. Доминируют кварц ($\approx 49\%$) и ортоклаз ($\approx 35\%$), заметны доли диодохита ($\approx 5\%$) и даллита ($\approx 9\%$). Среди акцессорных компонентов встречаются плагиоклаз, гипс, кальцит, монтмориллонит, редкие зёрна турмалина и циркона, а также

гематит и дендритные формы гидроокислов железа. Химические анализы демонстрируют высокое содержание CaO (до 34,4 %), SiO₂ (≈19 %), P₂O₅ (≈24,2 %), а также значительные доли SO₃ (≈9,6 %) и Na₂O (≈1,1 %). Прямая зависимость между содержанием Na₂O, SO₃ и P₂O₅ указывает на преобладание натрийсульфатапатита как основной фосфатной фазы, что сближает риватские фосфориты с палеогеновыми месторождениями Северной Африки и Средней Азии.

Физико-географически район относится к зоне предгорных гряд, представленных меридионально вытянутыми увалами, разделёнными многочисленными саями. Абсолютные отметки лежат в пределах 950–1400 м, относительные превышения достигают 400 м. Комплексное взаимодействие осадочного режима палеогенового моря, сноса терригенного материала с прилегающих поднятий и последующих тектонических движений определило современную конфигурацию фосфоритоносных тел.

Продолжительное обсуждение минералогической природы фосфатного вещества объясняется тонкодисперсностью и аморфностью агрегатов, в которых кристаллические формы практически не развиты, а посторонние примеси затрудняют диагностику. Тем не менее совокупность петрографических, минералогических и химических данных позволяет охарактеризовать риватские фосфориты как комплекс фторкарбонатапатита, натрийсульфатапатита и коллофанита, локализованный в песчано-глинистой матрице и сопровождаемый разнородными терригенно-карбонатными породами. Такое строение обуславливает как особенности обогатительных технологий, так и специфику эколого-технологической оценки сырья.

Формирование рудного тела происходило в обстановке умеренно тёплого шельфового моря, где чередовались фазы повышенного и пониженного гидродинамического режима. В периоды относительной тишины происходило накопление тонкодисперсного органогенного ила, обогащённого фосфатами, а при более энергичных условиях гравитационная сортировка концентрировала фосфоритовые зёрна. Впоследствии, по мере прогрессирующей регрессии и

тектонического подъёма, большая часть бассейна превратилась в континентальную область, где неогеновые грубообломочные терригенные толщи перекрыли и законсервировали фосфоритоносный комплекс, сохранив его до современности.

Тем самым геологическое строение Риватского месторождения является результатом сочетания длительных тектоно-осадочных процессов, чередования морских и континентальных фаз, а также специфической минералогии фосфатного вещества. В совокупности эти факторы формируют уникальные условия залегания и качества руд, определяющие промышленную перспективу месторождения и направления дальнейших геологоразведочных работ.

2.2. Химико-минералогический состав фосфоритов месторождения Риват

Фосфорит Ривата — это песчано-глинистая порода с умеренно высоким содержанием кальция и кремния, низкой долей фосфора и заметной примесью карбонат- и сульфат-ионов. Для оценки технологической пригодности руды важно понимать, как распределены главные, второстепенные и минорные оксиды, поскольку именно их соотношение определяет выбор схемы обогащения, расход реагентов и качество конечного концентрата. В таблице 2.1 приведён обобщённый (средневзвешенный) оксидный состав риватской руды по результатам полного силикатного анализа; эти данные служат базовой «химической визитной карточкой» месторождения.

Высокая доля CaO (34,40 %) наряду с CO₂ (2,14 %) и (ОН) (3,05 %) указывает на преобладание карбонат- и гидроксизамещённых разновидностей апатита, а также на присутствие вторичных кальцит-доломитовых цементов. В совокупности с заметным SO₃ (9,61 %) это формирует сульфат-карбонат-фторапатитовую структуру, характерную для фосфоритов палеогеновых морских бассейнов.

SiO₂ (18,96 %) вместе с Al₂O₃ (1,95 %) и K₂O (0,38 %) отражает значительную долю терригенных компонентов — кварца, ортоклаза и

плагиоклазов. Эти крепкие минералы образуют зернистый каркас породы, увеличивая абразивность руды и удорожая её мелкое измельчение.

Таблица 2.1

Химический состав фосфоритовой руды месторождения Риват

| №, п/п | Компонент | Массовая доля, % | №, п/п | Компонент | Массовая доля, % |
|-----------|--------------------------------|---------------------|-----------|--------------------------------|---------------------|
| 1 | SiO ₂ | 18,96 | 8 | TiO ₂ | 0,08 |
| 2 | Al ₂ O ₃ | 1,95 | 9 | CO ₂ | 2,14 |
| 3 | SO ₃ | 9,61 | 10 | Fe ₂ O ₃ | 2,15 |
| 4 | Mn ₂ O ₃ | 0,11 | 11 | P ₂ O ₅ | 28,2 |
| 5 | CaO | 34,40 | 12 | MgO | 1,08 |
| 6 | K ₂ O | 0,38 | 13 | (OH) | 3,05 |
| 7 | Na ₂ O | 1,06 | | | |

Относительно низкое содержание P₂O₅ (8,20 %) относит руду к бедным фосфоритам. Коэффициент CaO / P₂O₅ ≈ 4,20 доказывает избыток кальция по отношению к фосфору и предполагает заметное изоморфное замещение PO₄³⁻- групп карбонатом и сульфатом. Такая химия усложняет прямое кислотное разложение, увеличивая расход реагента и требуя многостадийного обогащения.

Компоненты железа и марганца представлены умеренно (Fe₂O₃ 2,15 %, Mn₂O₃ 0,11 %). Гематит, дендритовые гидроокислы и дисперсные сидерито-/манганитовые включения придают породе буро-зелёную пигментацию, но при выщелачивании способны переводить Fe³⁺/Mn⁴⁺ в раствор, снижая качество фосфорной кислоты.

Na₂O (1,06 %) в сочетании с высоким SO₃ подтверждает присутствие натрий-сульфат-апатита. Натрий стабилизирует структуру кристалла, но одновременно ухудшает фильтруемость пульпы и повышает коррозионную активность растворов.

Минералогически руда представлена каркасом из кварца (~49 %) и ортоклаза (~35 %). Фосфатная часть приходится на аморфные диодохит (5,1 %) и даллит (8,8 %), тогда как глинистая фракция — на монтмориллонит (19,3 %). Кальцит (8,3 %) формирует цемент и буферно нейтрализует часть кислоты при выщелачивании, одновременно повышая Mg + Ca-содержание конечного удобрения.

2.3. Лабораторные, аналитические и инструментальные методы анализа процесса переработки фосфоритов

Эксперименты были направлены на получение из бедных риватских фосфоритов гранулированного комплексного удобрения типа NPK. Для этого исходный флотационный концентрат (28 % P₂O₅) взаимодействовал с азотной кислотой, аммиаком и KCl. На каждой стадии—от сырья до конечных гранул—применяли взаимодополняющие методы анализа, что позволило связать фазовые изменения с распределением азота, фосфора и калия и гарантировать требуемый агрохимический состав готового продукта.

В качестве объектов исследования рассмотрены бедные фосфориты Риватского месторождения Республики Таджикистан, промежуточные реакционные массы, образующиеся в ходе переработки сырья, а также итоговые продукты — готовые минеральные удобрения.

2.4. Методика флотационного обогащения фосфаритов

Флотация представляет собой один из наиболее универсальных и эффективных методов обогащения тонкодисперсных минеральных систем, включая бедные фосфоритовые руды, такие как сырьё Риватского месторождения. Суть метода заключается в селективном прилипании пузырьков газа к определённым минеральным частицам, обладающим нужной поверхностной активностью, в то время как другие остаются в водной фазе. Процесс проводится в водной среде, где после предварительного измельчения и

кондиционирования пульпа поступает во флотационные камеры, в которых под действием воздухообогащённого потока осуществляется разделение минералов.

Для подготовки исходного материала использовался флотационный концентрат, полученный из измельчённой до фракции $<0,074$ мм руды. Измельчение проводилось в лабораторной шаровой мельнице с последующей классификацией и гомогенизацией. Обогащение осуществлялось в лабораторной машине ФМ-1 (Механобр, Россия), а также во флотационном устройстве ФМЛ 1 (рис. 2.1), позволяющем контролировать режим вспенивания и время контакта реагентов с минералами.



Рисунок. 2.1. Машина флотационная ФМЛ 1 (237 ФЛ)

Процесс флотации фосфоритов требует точного реагентного режима, поскольку эффективность разделения определяется не только природой минералов, но и выбором и дозировкой поверхностно-активных веществ. В качестве собирателей использовались анионные реагенты, преимущественно на основе жирных кислот и их солей, содержащих карбоксильные группы. Эти реагенты обладают высокой селективностью к фосфатным минералам за счёт способности к химосорбции на их поверхности. Подача реагента проводилась

поэтапно: предварительное кондиционирование, основной сбор и дополнительный контрольный сбор в пенных продуктах.

Для стабилизации пены и регулирования её кратности использовались пенообразователи. Вода для приготовления пульпы была дистиллированной, что исключало влияние ионов жёсткости на стабильность флотокомплексов. Кроме того, добавлялись регулирующие реагенты — кальцинированная сода и стекло-жидкость, обеспечивавшие стабильный уровень pH (от 8,5 до 9,0) и уменьшение агрегации частиц.

Визуальный контроль за процессом осуществлялся через смотровые окна флотационных камер. Оптимизация производительности заключалась в корректировке скорости подачи воздуха и продолжительности флотации. Пенные продукты сгущались, промывались и подсушивались в сушильном шкафу при температуре 105 °С, после чего направлялись на анализ содержания P₂O₅ методом РФА.

2.5. Методы анализа фосфоритного сырья и продуктов его переработки

2.5.1. Ситовый анализ фосфоритного сырья

При подготовке и обогащении рудных материалов обычно сталкиваются с зёрнами минералов самых разных размеров: от крупных кусков в несколько сотен миллиметров до мельчайших частиц, размеры которых измеряются микрометрами. На практике для характеристики размера отдельного фрагмента чаще всего используют понятие «диаметр», подразумевая минимальную сторону квадратного отверстия, через которое этот фрагмент может пройти. Для контроля процессов обогащения важно определить распределение массы всего сыпучего материала по классам крупности, то есть его гранулометрический состав. Наиболее широко применяемый способ получения таких данных — ситовый анализ, заключающийся в разделении образца на фракции путём просеивания через серию сит с ячейками определённого размера.

Сначала пробу руды приводят в воздушно-сухое состояние (обычно при температуре 40 ± 5 °С), чтобы исключить влияние влаги на точность взвешиваний. Крупные куски, превышающие заданный размер (чаще более 20 мм), предварительно дробят, затем растирают в фарфоровой ступке резиновым пестиком до мельчайших частиц, пригодных для просеивания. Чтобы сформировать репрезентативную среднюю пробу, используют метод квартования: тонким слоем разбрасывают измельчённую руду на листе плотной бумаги, проводят продольные и поперечные борозды ножом, разделяя массу на равные сегменты, и из каждого сегмента отбирают часть материала. Это позволяет избежать искажения данных, если в исходной пробе случайно оказались слишком крупные или, наоборот, слишком тонкие частицы.

Для выполнения просеивания применяют набор стандартных проволочных сит с квадратными ячейками, соответствующими установленной шкале: +2,5 мм; -2,5 + 1,0 мм; -1,0 + 0,63 мм; -0,63 + 0,40 мм; -0,40 + 0,20 мм; -0,20 + 0,10 мм; -0,10 + 0,063 мм; и < 0,063 мм. Включённые в комплект поддон и крышка позволяют полностью замкнуть систему и предотвратить потерю мелких частиц. Прежде чем начать работу, все сита проверяют на целостность проволоки, измеряют размеры ячеек калибровочным шаблоном и очищают от остатков предыдущих проб при помощи тонкой щётки или струи сжатого воздуха.

Навеску массой ($100 \pm 0,01$) г помещают на верхнее сито, устанавливая весь набор в вибросито или электронно-пневматическую систему. Сегодня в современных лабораториях частоту колебаний регулируют в диапазоне 50 – 80 Гц, что позволяет эффективно разделить частицы по размеру. Обычно время просеивания составляет от 15 до 20 мин, но при наличии агломератов, повышенного содержания тонкодисперсной фазы (пыли) или влажных частиц, процесс может длиться до 30 мин. Впрочем, слишком долгое просеивание недопустимо: при увеличении времени значительно возрастает риск фрикционного измельчения частиц, а это искажает результаты. Поэтому перед началом определения оптимальных параметров проверяют контрольный

образец со стандартным гранулометрическим составом и подбирают такие режимы, при которых доля частиц, прошедших «не туда», не превышает 1 %.

По завершении заданного времени работу аппарата останавливают, снимают сита поочередно, аккуратно очищая каждое сито от прилипших частиц. Остаток на каждом сите высыпают в отдельную ёмкость и, если необходимо, досушивают до постоянной массы, после чего взвешивают на аналитических весах с точностью 0,01 г. Сумма масс всех фракций проверяется на соответствие исходной навеске: разброс не должен превышать ± 1 %. Если расхождение больше, процедуру повторяют, обращая внимание на возможные ошибки при отборах пробы или засорение отверстий.

Далее вычисляют процентное содержание каждой фракции по формуле

$$q_i = \frac{m_i}{m_0} \times 100\%$$

где m_i — масса зёрен, оставшихся на i -м сите (г), m_0 — масса исходной навески (г). Полученные данные заносят в таблицу, указывая размеры ячеек сит, массу соответствующей фракции и её процентное содержание. На основе этих результатов строят график кумулятивного распределения масс по классу крупности: по оси абсцисс откладывают значение размера ячеек (логарифмически), а по ординате — накопленный процент массы. Кривую кумулятивного распределения анализируют на предмет скошенности и эксцесса, чтобы сделать выводы о степени сортировки материала.

Для повышения точности современные лаборатории всё чаще используют автоматизированные системы, где весы, вибросита и программное обеспечение связаны в единую сеть. Это позволяет в реальном времени контролировать частоту колебаний, отслеживать динамику прохода частиц и оперативно фиксировать любые аномалии (резкий рост доли «соскакивающих» частиц). Такие системы могут автоматически корректировать время просеивания, опираясь на заранее заданные критерии—например, когда разброс между

последовательными взвешиваниями фракций становится незначительным ($< 0,2$ %).

Кроме того, нередко применяют ультразвуковые насадки на сита: короткие звуковые импульсы разрушительного действия способствуют разъединению агломерированных частиц, особенно если образец содержит глинистые связующие или комковатые включения. Ультразвук позволяет точнее выделить тонкие фракции, уменьшить вероятность «залипания» частиц и повысить достоверность результатов при анализе высокодисперсных и влажных проб. Однако ультразвуковая обработка требует дополнительной калибровки оборудования, так как сила воздействия и частота волн напрямую влияют на результат: слишком мощный импульс может повредить сами сита или существенно измельчить материал.

Важна и регулярная проверка оборудования: не реже чем раз в 50–100 циклов просеивания проводят проверку отклонений частоты вибрации и точности весов. Для этого используют калибровочные материалы со стабильным распределением зерен. Любое заметное отклонение (более 2 % от эталонных данных) служит поводом для перенастройки или технического обслуживания системы. Так обеспечивается воспроизводимость анализа на уровне не хуже, чем ± 1 % по каждой фракции.

Можно отметить, что ситовый метод анализа по-прежнему остаётся базовым для определения гранулометрического состава руды и его продуктов, однако внедрение автоматизации, использование цифровых интерфейсов, ультразвуковых модулей и строгий контроль качества оборудования делают процесс более точным, оперативным и адаптированным к современным стандартам обогащения.

2.5.2. Определение пятиокси фосфора (P_2O_5) в составе удобрений

Содержание P_2O_5 в образцах минеральных удобрений определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 20851.2-75 с применением гравиметрического магниального метода. Суть этого способа заключается в

полном переводе фосфат-ионов из образца в нерастворимое соединение для последующего взвешивания. Сначала исследуемую пробу тщательно растворяют в смеси концентрированных соляной и азотной кислот, поддерживая раствор при температуре кипения до полного разложения органических и неорганических включений. Полученный прозрачный раствор доводят до заданного объёма фильтрацией, чтобы удалить нерастворимые примеси, после чего в него вводят растворы магния и аммония при строго контролируемом соотношении реагентов и значении pH (обычно около 9,5). В результате в осадок выпадает магний-аммоний фосфат $[\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}]$, который выдерживают до полного коагулирования кристаллов.

Собранный осадок осторожно фильтруют на химическом фильтре, тщательно промывают дистиллированной водой для удаления растворённых примесей и переносят в фарфоровый тигель. На этом этапе важно не допустить перекристаллизации побочных солей, поэтому промывку проводят несколькими порциями воды в тёплом состоянии. Затем фильтр с осадком полностью сжигают прокаливанием в муфельной печи: сначала при температуре 700–800 °С, чтобы удалить органические составляющие и превратить исходный фосфат в пирофосфат магния ($\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$), а затем при 1000–1050 °С выдерживают до постоянной массы. Высокотемпературное прокаливание гарантирует полное превращение осадка в термически стабильный пирофосфат, свободный от адсорбированных газов и остающихся органических связей. После охлаждения тигель с полученным пирофосфатом взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,0001 г. Разница масс до и после прокаливании используется для расчёта массы P_2O_5 , учитывая стехиометрию реакций: при образовании $\text{Mg}_2\text{P}_2\text{O}_7$ из шести-кристаллического магний-аммоний фосфата теряется аммиак и вода, но сохраняется сам фосфат, что позволяет однозначно связать массу полученного пирофосфата с количеством P_2O_5 в исходной пробе. По этим данным вычисляют процентное содержание P_2O_5 , корректируя результаты с учётом возможных побочных потерь при фильтрации и прокаливании.

2.5.3. Определение катионов кальция (Ca^{2+}) в составе фосфоритного удобрения

Содержание катионов Ca^{2+} в образцах определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии в соответствии с требованиями ГОСТ 6689.24-92. Суть метода заключается в измерении интенсивности поглощения резонансного излучения свободными атомами кальция, которое испускает лампа с полым катодом, содержащая кальций в качестве рабочего элемента. Перед анализом пробу раствора минерализуют и доводят кислотной обработкой до состояния, при котором кальций находится в ионной форме, свободной от коллоидных и органических примесей. Затем её разбавляют до концентрации, подходящей для работы прибора, и вводят в атомизатор, где атомы кальция переходят в газовую фазу при помощи пламени ацетилен-воздух.

Чтобы избежать образования трудно диссоциируемых соединений кальция и магния, в раствор добавляют избыток стронция — он связывает сопутствующие элементы, не давая им образовывать интерферирующие комплексы. Это повышает точность измерений и снижает фоновые поглощения. Прибор настраивают на аналитическую линию кальция с длиной волны 422,7 нм, что обеспечивает селективность по отношению к другим элементам. Для контроля возможных помех со стороны магния дополнительно регистрируют интенсивность на линии 285,2 нм; сравнительное соотношение сигналов позволяет в случае необходимости осуществлять коррекцию показаний или использовать методику стандартных добавок.

Перед каждой серией измерений проводят калибровку спектрофотометра с помощью стандартных растворов кальция известной концентрации. На их основе строят калибровочный график зависимости оптической плотности от концентрации Ca^{2+} и проверяют линейность диапазона. После внесения пробы в горелку прибора фиксируют оптическую плотность поглощения и, пользуясь уравнением калибровочного графика, определяют концентрацию кальция в исходном растворе. Итоговые результаты корректируют с учётом разведения и

вносят в табличный протокол, где указывают массу пробы, объём разводов и расчётное содержание СаО, эквивалентное найденной концентрации Са²⁺.

2.5.4. Определение содержания общего азота в составе фосфоритного удобрения

Общее содержание азота в пробах определяли дистилляционным методом восстановления нитрат-ионов металлическим хромом и минерализации всех форм органического азота в соответствии с ГОСТ 30181.9-94. Сначала навеску удобрения обрабатывали соляной кислотой в присутствии порошка хрома: при кипении нитратный азот полностью восстанавливался до аммонийного. Затем к кислотному раствору добавляли концентрированную серную кислоту и каталитическую смесь — чаще всего сульфаты калия или натрия и пятиводный сульфат меди — благодаря чему происходили гидролиз амидных групп и окислительная минерализация органических соединений: весь закреплённый в них азот переводился в форму аммония. После охлаждения раствор делали щелочным, добавляя избыток гидроксида натрия, и отгоняли образовавшийся аммиак водяным паром; пары улавливали в известном объёме стандартной серной кислоты. Количество аммиака, а значит и суммарный азот, рассчитывали обратным титрованием неизрасходованной кислоты раствором NaOH в присутствии смешанного кислотного-основного индикатора (метилоранж + бромкрезоловый зелёный или метилоранж + метиленовый голубой).

Для работы применяли реактивы аналитической чистоты: концентрированную серную и соляную кислоты (а также их растворы 0,1–0,5 моль/дм³), гидроксид натрия (400 г/дм³ и 0,1 моль/дм³), кислые фталевые, янтарные или щавелевые калибровочные кислоты, сульфаты калия или натрия, пятиводный сульфат меди, порошок хрома (марка ПХ 1С), аммоний сульфат, а также спиртовые растворы фенолфталеина, бромкрезолового зелёного, метилового красного и метиленового голубого. Для снижения пенообразования при кипении добавляли парафин либо силиконовое масло. Все растворы

готовили на дистиллированной воде по ГОСТ 6709, а соли предварительно сушили до постоянной массы (обычно при 105°C), что исключало систематические ошибки при расчёте концентраций. Процедура обеспечивала воспроизводимость результата с погрешностью не более $\pm 0,2$ % абсолютного содержания N, что позволяет надёжно контролировать качество минеральных удобрений в диапазоне массовых долей азота, характерном для промышленной продукции.

2.5.5. Определение калия в составе фосфоритного удобрения

Для количественного определения содержания калия в минеральных удобрениях традиционно используют ионселективные электроды, однако на практике их применение нередко осложняется присутствием аммоний-ионов: K^+ -селективный электрод сильно реагирует на NH_4^+ , что приводит к завышению результатов. Кроме того, нельзя комбинировать калий-селективный электрод с наиболее распространённым серебряно-хлоридным электродом сравнения, если тот содержит хлорид калия, поскольку K^+ , выделяющийся из электродного соединения, искажает измерения. По этой причине в данной работе для анализа калиеносных удобрений применяют так называемый тетрафенилборатный метод, который отличается высокой специфичностью к K^+ и способен точно определять его концентрацию при содержании от 3 до 63 % (в пересчёте на K_2O).

Суть тетрафенилборатного метода заключается в осаждении калия в виде слабо растворимого комплекса $K[B(C_6H_5)_4]$ (калий-тетрафенилборат), когда в исследуемый раствор, содержащий ионы калия, добавляют избыток раствора натрия тетрафенилбората. При строго определённом значении pH (обычно 6–7) ионов натрия не влияет: он остаётся в растворённом состоянии, а ион калия образует нерастворимый осадок. Для этого пробы удобрений сначала переводят в однородный раствор – чаще всего путём растворения в горячей воде или в кислотном растворе (в зависимости от состава удобрения), фильтруют, чтобы удалить нерастворимые включения, и доводят до объёма. Затем в полученный

прозрачный раствор вводят избыток раствора $\text{Na}[\text{B}(\text{C}_6\text{H}_5)_4]$, тщательно перемешивают и выдерживают до полной коагуляции образовавшихся мелких кристаллов. После агрегирования кристаллов осадок отфильтровывают через предварительно взвешенный и прокалённый фильтрующий материал (чаще всего бумагу или микропористую мембрану), затем промывают слабым раствором ацетона или смеси спирта и воды для удаления примесей, не связанных с осадком, и просушивают до постоянной массы.

Полученный подсушенный осадок, представляющий собой калий-тетрафенилборат, затем подвергают прокаливанию при температуре около $110\text{ }^\circ\text{C}$ (иногда до $120\text{ }^\circ\text{C}$), чтобы удалить остаточную влагу и органические примеси. Массу осадка взвешивают с точностью до $0,1$ мг. Зная стехиометрию реакции (молярная масса $\text{K}[\text{B}(\text{C}_6\text{H}_5)_4]$ составляет $422,3$ г/моль, а калия в нём – $39,1$ г/моль), рассчитывают массу K^+ в пробе и переводят её в эквивалентное количество K_2O . Для контроля правильности метода проводят параллельное осаждение калиеносной соли из стандартных растворов с известной концентрацией K^+ и вычисляют коэффициент выхода осадка: он должен превышать 98% . Все результаты корректируют с учётом разведений и учитывают возможные потери при промывке и сушке осадка; окончательное содержание K_2O выражают в процентах по массе удобрения.

Таким образом, тетрафенилборатный метод демонстрирует высокую селективность и точность при определении калия в широком диапазоне концентраций, особенно когда содержание NH_4^+ в образце препятствует использованию ионселективных электродов.

2.5.6. Влияние температуры на извлечения P_2O_5 из фосфатных руд

Кислотное разложение фосфатных руд, и в особенности фторапатита, изучено достаточно подробно: фторапатит рассматривается как основная сырьевая форма фосфатов. При этом большое внимание уделяется его взаимодействию с концентрированной серной, азотной и фосфорной кислотами, поскольку именно эти технологии лежат в основе современных

процессов извлечения фосфора. Так, термодинамические аспекты разложения фторапатита в азотной и фосфорной кислотах были подробно проанализированы, что позволило определить оптимальные условия проведения реакции и предсказать состав фаз при различных температурах и концентрациях реагентов. Параллельно с этими исследованиями установлены основные кинетические закономерности и реакционные механизмы химического взаимодействия минерала с кислотами. Важным направлением оказались работы, посвящённые влиянию поверхностно-активных веществ (ПАВ) на скорость и полноту кислотного вскрытия: ПАВы способны изменять адсорбционные свойства частиц, способствуя более равномерному доступу кислоты к активным центрам внутри зерна фторапатита и, как результат, ускоряя процесс разложения. Для контроля течения реакций нередко применяется ионометрический метод, который позволяет оперативно отслеживать изменение концентрации ионов в растворе и тем самым корректировать параметры кислотного воздействия в реальном времени.

В то же время кислотное выщелачивание бедных фосфоритов исследовано менее исчерпывающе, чем богатых минералов типа фторапатита. Тем не менее, уже накоплен ряд данных по определённым типам руд: например, сернокислотное выщелачивание фосфатного сырья Кызылкумского месторождения показало, что оптимальные температуры и концентрации серной кислоты позволяют обеспечить высокий выход растворимого фосфора без избыточного расхода реагента и без значительного растворения нежелательных примесей. Для полипинских фосфоритов также изучали процессы кислотного разложения с применением соляной кислоты и комбинированных азотно-фосфорнокислотных систем, что дало представление о тонкостях влияния кислотности среды и изменения фазового состава продуктов на кинетику извлечения. Кроме того, в работе проведено исследование кинетики азотной обработки ФМПМ (фосфатно-магниево-марганцевого минерала) в диапазоне температур от 10 до 40 °С. Эти эксперименты показали, что при более высоких температурах скорость реакции

значительно возрастает, однако вместе с тем увеличивается растворение нежелательных примесей и рост затрат на охлаждение и контроль теплового режима. Полученные данные по зависимости константы скорости от температуры позволяют рассчитать энергию активации процесса и прогнозировать эффективность выщелачивания при изменении технологических параметров.

Несмотря на то, что общие закономерности кислотного вскрытия богатых фосфатных минералов уже достаточно ясны и применяются в промышленности, для бедных фосфоритов требуется дальнейшая детализация: необходимо учитывать не только термодинамику и кинетику реакций, но и влияние структуры породы, наличия примесей (особенно глинистых и карбонатных включений), изменение фазового состава в процессе нагрева и растворения, а также экономическую целесообразность поддержания тех или иных температурных режимов. Именно сочетание фундаментальных исследований термодинамики и кинетики с учётом особенностей конкретного месторождения позволяет разработать оптимальные технологии кислотного выщелачивания, минимизирующие расход реагентов и энергоносителей, а также снижающие влияние на окружающую среду.

2.6. Методики синтеза и контроля качества NPK-удобрений

2.6.1. Схема лабораторной установки переработки фосфоритов для синтеза NPK-удобрений

Лабораторная установка для синтеза NPK-удобрений (рис. 2.2) работает циклически и размещается во втяжном шкафу. Исходные навески размолотого фосфатного сырья загружают в стеклянный реактор 1 объёмом 1–2 л; корпус реактора помещён в водяной термостат 12, поддерживающий температуру процесса с точностью $\pm 0,5$ °С. Перемешивание обеспечивает якорная мешалка 4, вращаемая регулируемым приводом 3 (диапазон 50–600 об·мин⁻¹), что гарантирует однородность суспензии даже при повышенной вязкости.

Разлагающие кислоты (HNO_3) на стадии вскрытия, а также водный раствор NH_3 на стадии аммонизации подают из делительной воронки 2; её градуированная шкала позволяет задавать расход реагента с шагом 0,5 мл. Температуру реакционной массы контролирует стеклянный ртутный термометр 5, опущенный в защитную гильзу. При интенсивном выделении CO_2 и паров кислоты образуется пена, которую отсекается 6 возвращает обратно в реактор и предотвращает вынос аэрозоля.

Газовая фаза проходит через две последовательно соединённые склянки Дрекслея 7 и 8: первая задерживает капельножидкие выбросы, вторая доочищает поток до санитарных норм. Постоянный вытяжной режим поддерживает мембранный насос 11, связанный с системой через кран 10 и ротаметр 9, позволяющий устанавливать расход 0,5–2 л мин⁻¹.

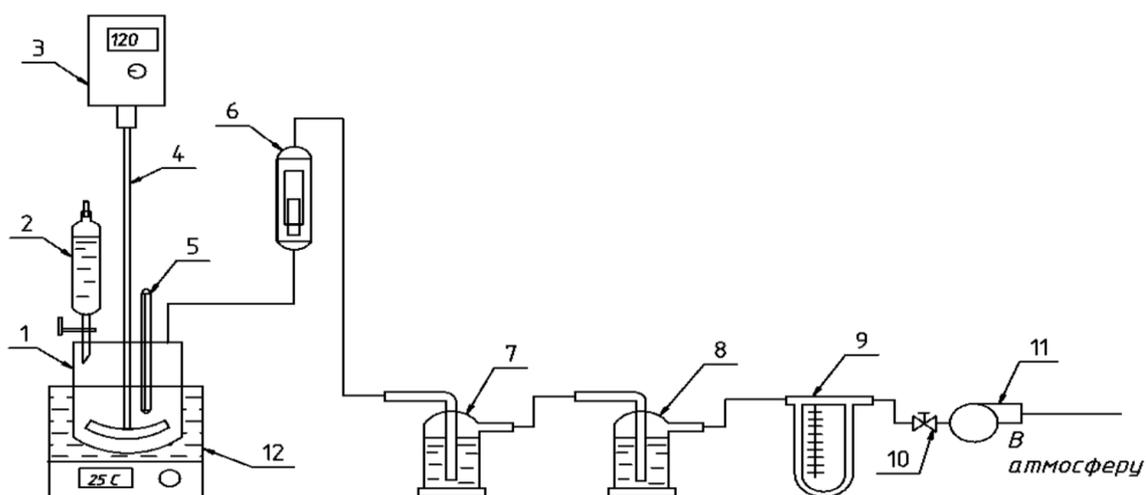


Рисунок. 2.2. Лабораторная установка

1 – реактор; 2 – делительная воронка; 3 – привод мешалки; 4 – мешалка; 5 – термометр; 6 – брызгоотбойник; 7, 8 – склянки Дрекслея; 9 – расходомер; 10 – кран; 11 – насос; 12 – термостат.

В верхнюю крышку реактора вмонтирован дополнительный штуцер, куда при необходимости опускают комбинированный рН-электрод для онлайн-контроля кислотности или шприцевую трубку для экспресс-отбора проб. После достижения заданного рН (6,5–7,0) в пульпу дозируют хлорид калия — либо через ту же воронку 2, либо через отдельно введённую порошковую воронку;

время перемешивания обычно не превышает 10 мин, чтобы предотвратить перерастивание кристаллов.

По окончании реакции пульпу выгружают через сливной патрубок в поддон из тефлона, затем сушат при 60–80 °С до влажности $\leq 2\%$ и направляют на лабораторное гранулирование (роликовый гранулятор, 120 об·мин⁻¹). Полученные гранулы анализируют на содержание N, P₂O₅ и K₂O методами, описанными выше, что позволяет оперативно корректировать состав следующей серии.

Узлы 1–12 образуют компактный модуль, где сочетаются дозирование реагентов, температурный контроль, эффективное газоочистное траппирование и возможность в-line-мониторинга pH, что делает установку удобной для исследования технологических режимов переработки бедных фосфоритов в полнорационные NPK-удобрения.

2.6.2. Методика эксперимента по синтезу NPK-удобрений

При планировании производства удобрений следует учитывать не только их агрохимическую эффективность, но и платёжеспособность конечного потребителя. Поиск оптимального соотношения между содержанием питательных веществ и ценой продукции позволит предприятию охватить более широкий сегмент рынка.

Для проведения эксперимента использовались следующие исходные вещества: фосфатное сырьё (флотационный концентрат которое получено из руды месторождения Риват) содержание P₂O₅ – 24%; азотная кислота (HNO₃ - «х.ч.» по ГОСТ 4461-77); аммиак (NH₃); хлорид калия (KCl); вода дистиллированная.

Рентгенофазовый анализ полученного образца NPK-удобрения выявил наличие нескольких фазовых составляющих, что указывает на сложный поэтапный механизм его формирования. На основании дифрактометрических данных (рисунок 3.10) можно выделить следующие ключевые этапы в процессе получения комплексного NPK-удобрения:

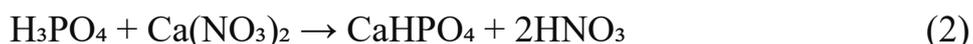
1. Разложение фосфатного сырья азотной кислотой

В реактор с перемешиванием загрузили 100 г фосфатного сырья (флотационный концентрат), добавили 250 мл 50%-ной азотной кислоты. Реакция проводилась при температуре **60–80°C** в течение **2 часов** с постоянным перемешиванием. В ходе реакции выделялись растворимые продукты (нитрат кальция и фосфорная кислота), а также нерастворимые осадки. Реакцию можно представить следующим образом:



2. Образование монетита (CaHPO_4)

Раствор, полученный после первой стадии, частично нейтрализовали, добавив избыток нитрата кальция. В результате реакции образовывался монетит:



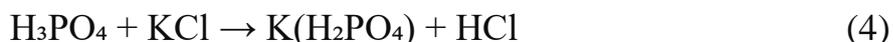
3. Синтез аммоний дигидрофосфата ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$)

К раствору фосфорной кислоты при температуре **30°C** добавляли аммиак до достижения pH 5,5. Образовавшийся аммоний дигидрофосфат выпал в осадок:



4. Синтез калий дигидрофосфата ($\text{K}(\text{H}_2\text{PO}_4)$)

Для получения калий дигидрофосфата к раствору фосфорной кислоты добавляли хлорид калия в мольном соотношении 1:1 при температуре **40°C**:



5. Образование нитрата калия (KNO_3)

В отдельной реакции нитрат аммония взаимодействовал с хлоридом калия при температуре **50°C**. Раствор охлаждали до **5°C**, что способствовало кристаллизации нитрата калия:



6. Дегидратация фосфорной кислоты и образование фосфорного ангидрида (P_2O_5)

Часть фосфорной кислоты подвергалась термическому нагреву до **150°C**, что приводило к дегидратации:



7. Получение калийного полифосфата (K₄P₂O₈)

Фосфорный ангидрид взаимодействовал с гидроксидом калия при температуре **80°C**:



2.7. Заключение к второй главе

Во второй главе диссертационной работы представлены объект исследования, минералого-петрографическая и химическая характеристика фосфоритовых руд Риватского месторождения, а также описаны использованные экспериментальные и аналитические методики. Установлено, что исходная руда представлена карбонат-фторапатитовой ассоциацией с высоким содержанием балластных фаз (кальцит, кварц, доломит, глауконит), что требует селективного подхода к обогащению.

Подробно описана методика лабораторной флотации с подбором условий реагентной обработки. Представлены методы сернокислотного вскрытия фосфоритных концентратов с контролем pH, температуры, степени дисперсности. Приведены схемы синтеза, грануляции и контроля качества комплексных NPK-удобрений, разработанные в лабораторных условиях. Описана схема постановки агрохимического полевого эксперимента и методы оценки агрономической эффективности удобрений.

Во второй главе сформирована методическая и экспериментальная база, обеспечивающая достоверность и полноту проведения дальнейших исследований, направленных на создание эффективной технологии переработки бедных фосфоритовых руд с получением конкурентоспособных минеральных удобрений.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ НРК-УДОБРЕНИЙ

3.1. Исследование и разработка реагентного режима фосфоритовой флотации Риватского месторождения

Фосфоритовые руды являются основным источником фосфора, который используется в производстве минеральных удобрений и других химических продуктов. Для повышения экономической эффективности использования фосфоритовых месторождений необходимо улучшение технологии их обогащения. Одним из наиболее эффективных методов является флотационное обогащение, позволяющее выделять фосфатные минералы из руд с низким содержанием P_2O_5 .

Месторождение Риват характеризуется относительно низким содержанием фосфатов (4,8-5,8 % - P_2O_5), что требует разработки специальных технологий для повышения концентрации полезного компонента⁷.

Для проведения флотационных исследований были использованы образцы фосфоритовой руды месторождения Риват с содержанием P_2O_5 4,8-5,8%; образцы руды предварительно измельчались до крупности, обеспечивающей эффективную флотацию. Масса навески руды для каждого эксперимента составляла 250 г.

В качестве собирателя использовалась олеиновая кислота, которая обладает высокой активностью по отношению к фосфатным минералам. Для улучшения растворимости олеиновой кислоты в воде готовилась эмульсия с добавлением щелочи; вспомогательным реагентом являлся керосин, который способствует улучшению флокуляции фосфоритов и увеличивает эффективность флотации; для регулирования pH среды и создания щелочной среды применялась сода. Расход соды варьировался в зависимости от условий эксперимента; жидкое стекло использовалось для депрессии пустых пород, что позволило повысить чистоту концентрата.

⁷ Карамбахшов Х.З., Курбонов Ш.А., Холов Х.И. и др. Разработка реагентного режима фосфоритовой флотации Риватского месторождения // Известия национальной академии наук Таджикистана. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. – 2024, №4 (197) – С. 100-109.

Эксперименты проводились на лабораторной флотационной машине, оснащённой перемешивающей системой для равномерного распределения реагентов; флотационный процесс включал две стадии: основную и контрольную флотацию, которые проводились последовательно. Время каждой стадии флотации составляло 10 минут, что было выбрано на основе предварительных исследований; для увеличения содержания фосфоритов в концентрате проводилась дополнительная перечистка концентратов основной и контрольной флотации.

Схема экспериментов или исследование зависимостей извлечения фосфоритов от расхода реагентов: расход олеиновой кислоты варьировался от 1 до 4 кг/т; расход керосина изменялся от 0 до 3 кг/т; расход соды изменялся в пределах 1-3 кг/т для создания оптимальной щелочной среды; После введения реагентов в камеру флотации проводилась интенсивная перемешка образцов в течение 5 минут, после чего начинался процесс флотации.

После каждого опыта концентрат отделялся от хвостов, высушивался и анализировался на содержание P_2O_5 с помощью химического анализа; оценивались такие параметры, как степень извлечения фосфоритов, содержание P_2O_5 в концентрате, влияние реагентного режима на качество получаемого концентрата.

Предложенная методика позволила выявить оптимальные параметры флотации для фосфоритов месторождения Риват, что обеспечило высокие показатели извлечения фосфатов и их концентрации в готовом продукте.

Первоначальные опыты по флотации проводились согласно разработанной нами схеме (рис. 3.1), которая включала основные и контрольную флотацию. Для повышения содержания фосфатов в концентрате и оптимизации расхода реагентов была проведена переработка концентратов основной и контрольной флотации, что позволило достичь оптимальных результатов.

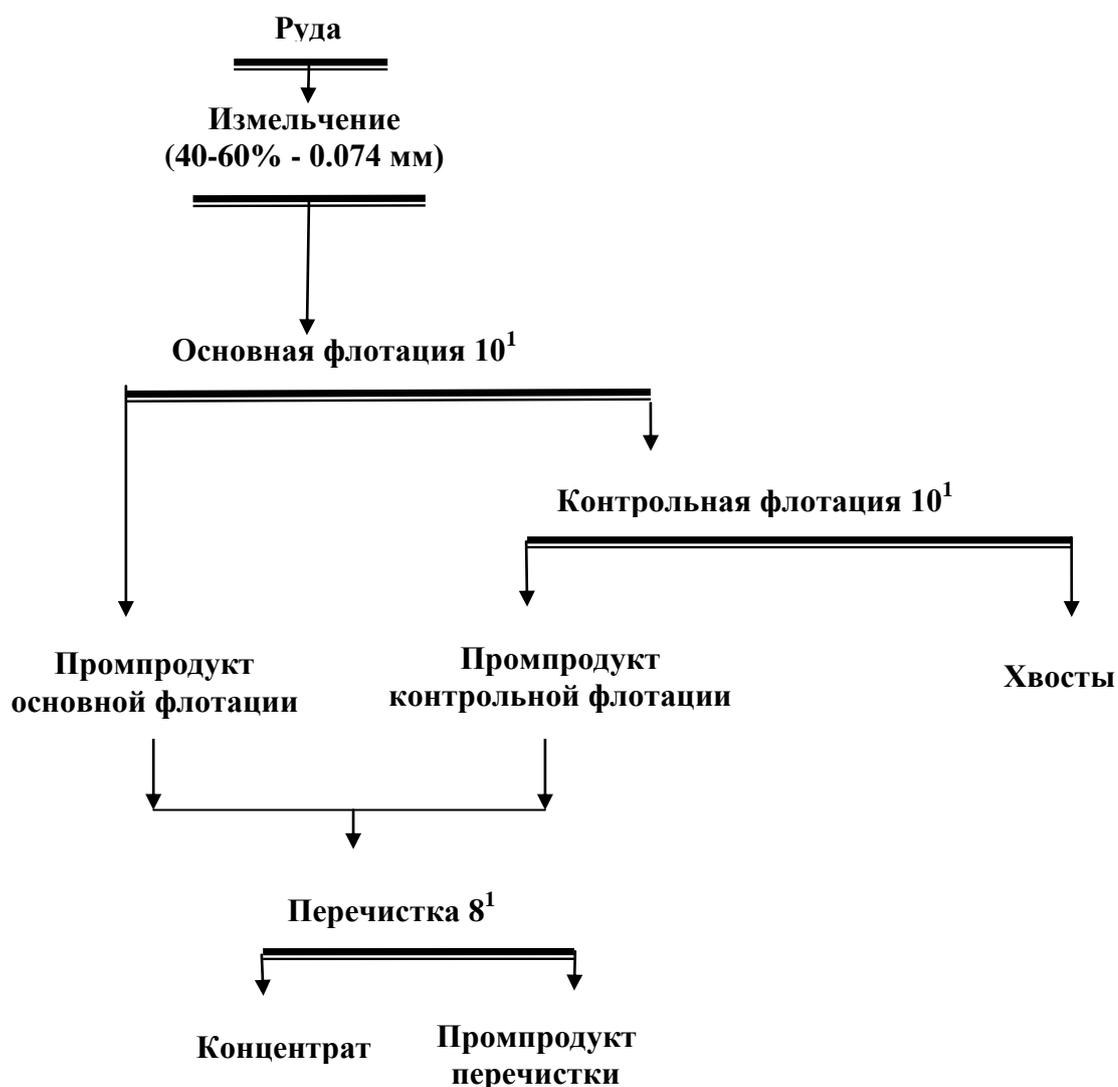


Рисунок 3.1. Схема флотации фосфоритовой руды месторождения Риват

Одной из ключевых задач было увеличение извлечения P_2O_5 . Для этого были проведены эксперименты с различной продолжительностью основной и контрольной флотаций. Исследования показали, что увеличение времени флотации до 30 минут не привело к существенному улучшению показателей извлечения. В результате было установлено, что оптимальное время для основной и контрольной флотации составляет 10 минут.

В рамках экспериментов особое внимание уделялось подбору оптимальных дозировок реагентов. В частности, расход олеиновой кислоты варьировался в пределах от 1 до 4 кг/т. По результатам исследований было установлено, что оптимальный расход данного реагента составляет 3 кг/т. При

дальнейшем увеличении количества олеиновой кислоты результаты извлечения практически не изменялись, что свидетельствует о достижении предела эффективности при данном расходе (табл. 3.1, рис. 3.2).

Таблица 3.1

Результаты флотации фосфоритовой руды месторождения Риват

| Опыт № | Навеска руды, кг/т | Расход соды, кг/т | Расход керосина, кг/т | Расход олеиновой кислоты, кг/т | Извлечение, % |
|--------|--------------------|-------------------|-----------------------|--------------------------------|---------------|
| 1 | 250 | 3,0 | 3,0 | 2,0 | 75,30 |
| 2 | | | | 2,5 | 78,14 |
| 3 | | | | 3,0 | 88,68 |
| 4 | | | | 3,5 | 83,74 |
| 5 | | | | 4,0 | 82,35 |

Аналогично были проведены опыты по подбору оптимального расхода керосина, который использовался в качестве дополнительного реагента. Результаты показали, что расход керосина в 3 кг/т является наиболее эффективным. Дальнейшее увеличение дозировки не привело к значительному улучшению показателей (табл. 3.2, рис. 3.2).

Таблица 3.2

Результаты флотации фосфоритовой руды месторождения Риват

| Опыт № | Навеска руды, грамм | Расход реагента керосина, кг/т | Степень извлечения, % |
|--------|---------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 0 | 250 | 0 | 0 |
| 1 | | 0,5 | 41,51 |
| 2 | | 1 | 65,3 |
| 3 | | 1,5 | 79,61 |
| 4 | | 2 | 87,14 |
| 5 | | 2,5 | 90,21 |
| 6 | | 3 | 91,17 |

Эти данные свидетельствуют о том, что использование больших количеств керосина нецелесообразно с точки зрения экономической эффективности.

Для создания оптимальных условий флотации и контроля уровня рН среды использовалась сода, которая подавалась в головную часть флотационной установки. Проведённые эксперименты позволили установить, что оптимальный расход соды составляет 2 кг/т (табл. 3.3, рис. 3.2).

Таблица 3.3

Результаты флотации фосфоритовой руды месторождения Риват

| Опыт № | Навеска руды, кг/т | Расход соды, кг/т | Расход соснового масла, г/т | Извлечение, % |
|--------|--------------------|-------------------|-----------------------------|---------------|
| 0 | 250 | 0 | 160 | 0 |
| 1 | | 1 | | 54,14 |
| 2 | | 2 | | 84,12 |
| 3 | | 2,5 | | 90,15 |
| 4 | | 3 | | 92,31 |

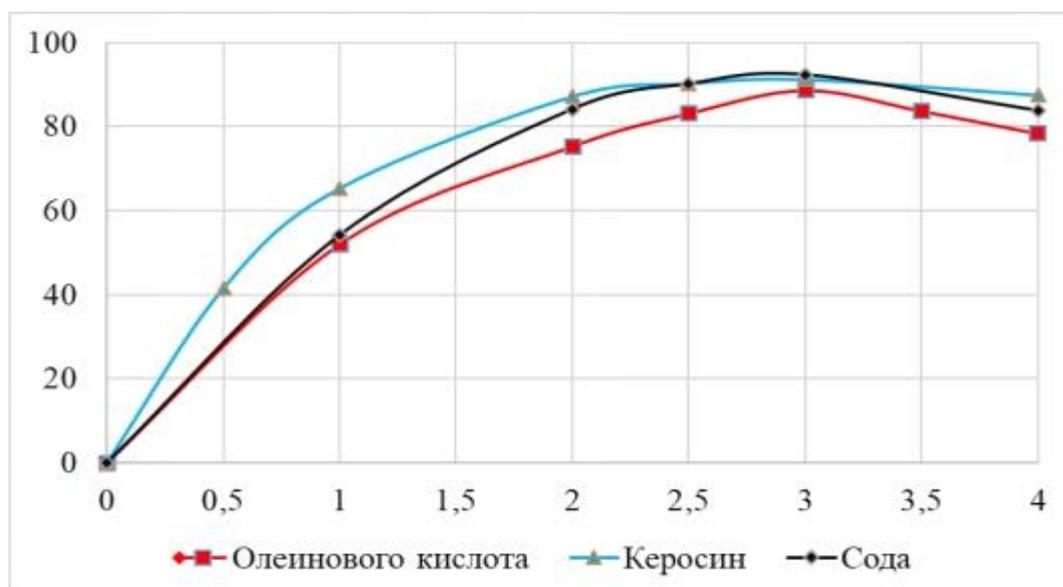


Рисунок 3.2. Зависимость извлечения минерала фосфорита от расхода реагентов

Кроме того, для подавления флотуемости пустой породы применялось жидкое стекло, которое также подавалось в головную часть флотации в количестве 1 кг/т. Это позволило улучшить селективность процесса и снизить извлечение нежелательных примесей.

Результаты проведенных экспериментов продемонстрировали хорошую эффективность предложенной методики обогащения фосфоритов месторождения Риват. Применение олеиновой кислоты и керосина в качестве собирателей и пенообразователей позволило достичь извлечения P_2O_5 на уровне 88,7%. Этот результат является весьма высоким для исходной руды с содержанием фосфатов 4,8-5,8%.

Одним из ключевых выводов, полученных в ходе исследования, является то, что увеличение времени флотации свыше 10 минут нецелесообразно, поскольку это не приводит к улучшению показателей извлечения. Это позволяет сократить время обработки и, соответственно, повысить производительность технологического процесса без ущерба для качества продукции.

Оптимизация расхода олеиновой кислоты и керосина также является важным достижением, так как позволяет снизить затраты на реагенты без ухудшения результатов флотации. Экономически эффективный расход олеиновой кислоты составил 3 кг/т, что подтверждается стабильными показателями извлечения и содержанием фосфатов в конечном продукте.

Кроме того, использование соды для создания щелочной среды оказалось важным фактором, влияющим на селективность флотации и извлечение фосфатов. При расходе соды 3 кг/т удалось достичь оптимальных условий для флотации, обеспечивающих высокую степень извлечения и минимизацию нежелательных примесей.

Предложенная технологическая схема переработки фосфоритов, включающая использование олеиновой кислоты, керосина, соды и жидкого стекла, продемонстрировала свою эффективность. Полученный фосфатный концентрат имеет содержание P_2O_5 - 28,3%, с извлечением 88,7 %, что делает

его пригодным для дальнейшего использования в производстве фосфорных удобрений и других продуктов на основе фосфоритов (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Результаты флотации фосфоритовой руды в открытом цикле

| Наименование продуктов | Выход | | Содержание P ₂ O ₅ , % | Извлечение P ₂ O ₅ , % | Условия опыта |
|---------------------------|-------|-------|---|---|-------------------|
| | грамм | % | | | |
| Концентрат III | 40 | 16,13 | 28,32 | 88,68 | Сода-3кг/т |
| Пр.пр. I переч. | 16 | 6,45 | 2,96 | 3,71 | Ж.ст.-1кг/т |
| Пр.пр. II переч. | 5 | 2,02 | 10,08 | 3,95 | Ол.к-та.-3,0 кг/т |
| Хвосты III | 187 | 75,4 | 0,25 | 3,66 | Керосин-3 кг/т |
| Руда | 248 | 100 | 5,15 | 100 | Сос.м.-240г/т |

3.2. Рентгенофазовый анализ фосфоритных руд и продуктов их флотационного обогащения

Для исследования минералогического состава фосфоритной руды Риватского месторождения и продуктов её флотационного обогащения в лабораторных условиях были проведены опыты по флотации сырья. В результате получен концентрат (фосфоритовая мука) и промежуточные продукты обогащения. Минералогический состав исходной руды и продуктов обогащения определяли методом волнодисперсионной рентгенофлуоресценции на высокотехнологичном спектрометре S8 TIGER (Германия). Для минимизации матричных эффектов и получения однородного образца пробы применяли метод сплавления с литий-борсодержащим флюсом. При этой процедуре пробу смешивали с флюсом и нагревали до 800–1200 °С, что обеспечивало полное растворение минералов и получение единой стеклофазы. Флюс состоял из равных частей литиевого тетрабората и метабората (по 3,14 г), что позволяет эффективно нивелировать эффекты неоднородности и размера частиц.

Анализ рентгенодифракционных (рентгеновских) дифрактограмм исходной фосфоритной руды (рисунок 3.3) показал, что в руде преобладают кварц и карбонат-фторапатит. Изучение состава установило высокое содержание диоксида кремния (SiO_2) в исходной руде: содержание SiO_2 превосходит долю прочих минералов, что свидетельствует о доминировании кварцевого компонента в исходном материале. После проведения флотационного обогащения произошло заметное снижение содержания SiO_2 , что указывает на удаление значительной части кварцевой (песчаной) фракции из концентрата.

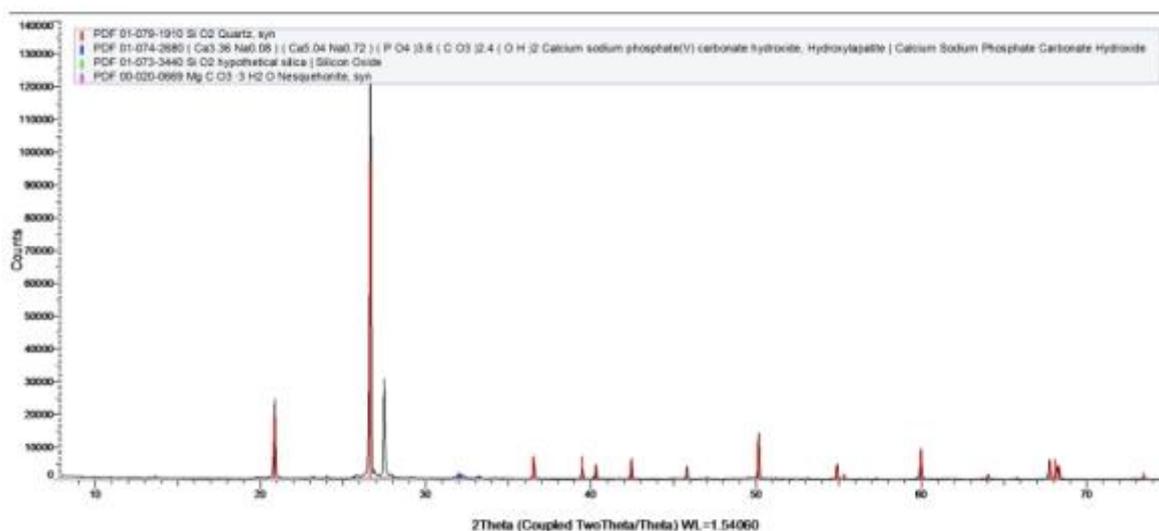


Рисунок 3.3. Рентгеновская дифрактограмма исходной фосфоритовой руды месторождения Риват

Промежуточный продукт флотации представил собой смесь фаз, отражающих состав частично обогащённой пробы. Рентгенограмма промежуточного продукта (рис. 3.4.) демонстрирует присутствие дифракционных пиков всех исходных фаз руды. Это означает, что на данном этапе обогащения все основные минералы ещё сохраняются, хотя их относительное содержание уже изменилось. В частности, как было указано, наблюдается снижение интенсивности сигналов от SiO_2 по сравнению с исходной рудой. Такая картина соответствует тому, что при флотационной сортировке часть кварцевой примеси удаляется, но фосфатсодержащие и другие минеральные компоненты всё ещё присутствуют в продукте.

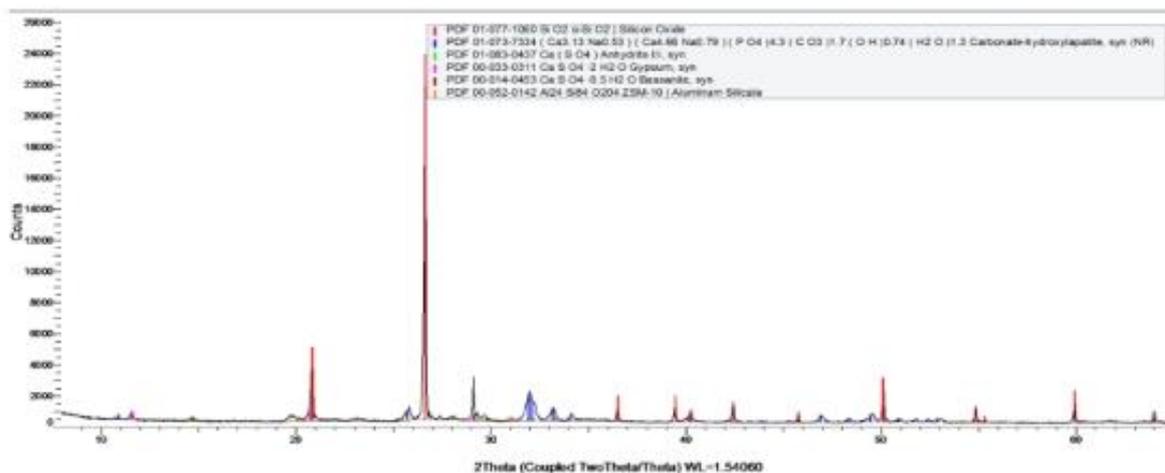


Рисунок 3.4. Рентгеновская дифрактограмма промежуточного продукта флотации фосфоритных руд месторождения Риват

Окончательный концентрат (рис.3.5.), полученный при оптимальных условиях флотации (фосфоритовая мука), характеризуется значительным обогащением фосфорсодержащими минералами. На рентгенограммах концентрата зарегистрирован рост интенсивности пиков, соответствующих основным фосфорным соединениям – CaP_3 , $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_2\text{O}$ и $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Это указывает на повышенную долю кальций-фосфатных фаз в концентрате по сравнению с исходной рудой.

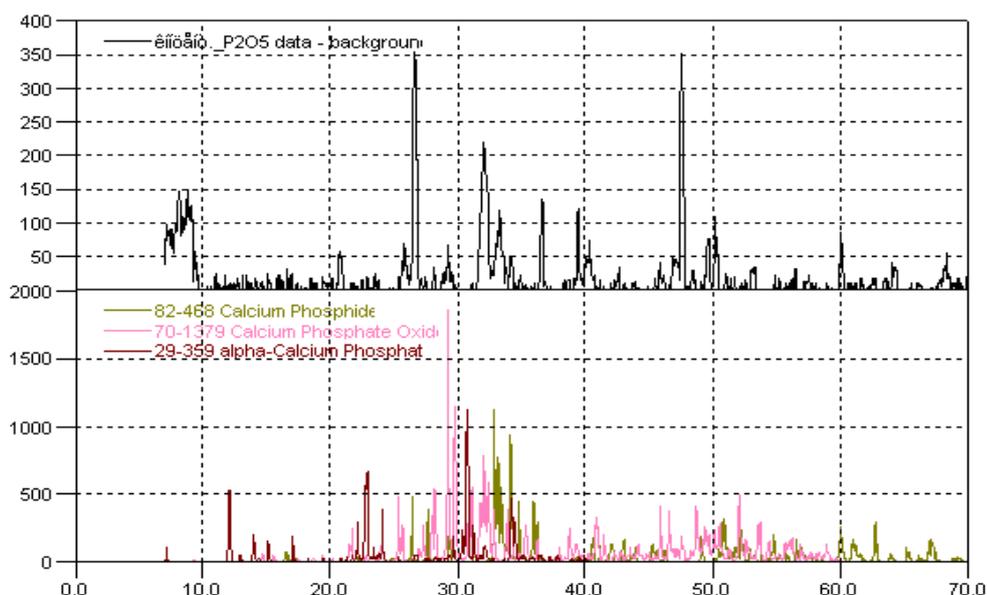


Рисунок 3.5. Рентгеновская дифрактограмма концентрата фосфоритовой руды месторождения Риват

В результате флотации концентрация фосфатных компонентов возрастает, что подтверждается увеличением площадей их дифракционных пиков. Таким образом, фаза карбонат-фторапатита, а также другие фосфатные соединения полностью переходят в концентрат, обогащая его содержанием фосфора.

Хвосты обогащения (рудные остатки после флотации) по результатам рентгенодифрактометрии практически не содержат фосфатных минералов (рис. 3.6). В дифрактограммах хвостовых продуктов полностью отсутствуют характерные линии фосфорита. Это означает, что минералы фосфоритов (апатиты) почти целиком извлечены в концентрат при флотации. Хвостовая фракция состоит в основном из малоконцентрированной рудной породы (песчаной и других минералов), тогда как весь фосфор переходил в добытые концентраты. Такая селективность подтверждает эффективность флотационного разделения в отделении фосфоритного минерала от пустой породы.

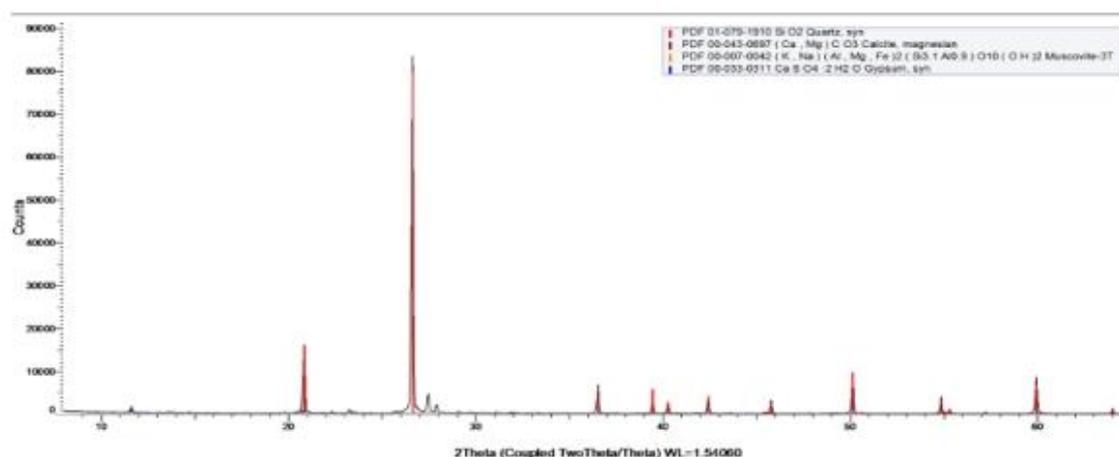


Рисунок 3.6. Рентгеновская дифрактограмма хвостов флотации

Поэтапный рентгенофазовый анализ ясно демонстрирует изменения минералогического состава на каждом этапе технологической обработки. Сравнение рентгенограмм исходного образца, промежуточных продуктов и конечного концентрата позволяет проследить процесс разложения и перераспределения минеральных фаз в ходе обогащения. Изначально

кристаллическая структура руды представлена доминирующим кварцевым каркасом, который при флотации разрушается, и фосфатные фазы концентрируются в обогащённом продукте. Рентгенодифрактометрия выявляет эти поэтапные изменения, демонстрируя спад интенсивности SiO₂-пиков и нарастание фосфатных пиков по мере продвижения от исходной руды к концентрату.

Полученный концентрат – фосфоритовая мука – обладает высокой значимостью для производства минеральных удобрений. Повышенное содержание фосфатных фаз в концентрате делает его ценным сырьём для дальнейшего синтеза комплексных удобрений типа NPK. В концентрате содержится основная часть фосфора, изъятая из рудного материала, что повышает эффективность его использования при производстве удобрений. Таким образом, разработанная технология обогащения Риватской фосфоритной руды позволяет получать концентрат, используемый для выпуска фосфорсодержащих удобрений, что подчёркивает практическую ценность проведённого исследования.

3.3. Разработка и исследование технологий получения NPK-удобрений на основе фосфоритных концентратов Риватского месторождения

Исследования в области получения NPK-удобрений из фосфоритных концентратов Риватского месторождения могут заложить фундамент для развития новой научно-технической и технологической базы в Таджикистане, способной привлечь инвесторов, стимулировать создание рабочих мест и укрепить экспортный потенциал страны. Важную роль здесь играет взаимодействие научно-исследовательских организаций, вузов, предприятий горнодобывающей и химической промышленности, которые, объединив усилия, могут разработать эффективные инновационные решения для переработки местных ресурсов. При этом непосредственная близость сельскохозяйственных районов к возможным производственным площадкам обеспечивает более короткие логистические цепочки, позволяя снизить

конечную стоимость готовой продукции, что особо важно для мелких и средних фермерских хозяйств.

Немаловажно учитывать и социально-экономические последствия внедрения новых технологий производства удобрений. Локализация подобных проектов внутри страны помогает повысить уровень квалификации персонала, развивать инженерные и научные компетенции, поддерживать смежные отрасли и формировать кластеры вокруг переработки минеральных ресурсов. Всё это, в свою очередь, позитивно сказывается на качестве жизни и устойчивом развитии сельских регионов. Кроме того, выход на международный рынок фосфорсодержащих и комплексных удобрений на основе местного сырья укрепляет внешнеэкономические позиции Таджикистана, позволяя диверсифицировать структуру экспорта и повысить его добавленную стоимость.

В методике изложен полный цикл получения NPK-удобрений — от кислотного разложения сырья до получения готового продукта — с учётом влияния концентрации HNO_3 и времени разложения. Ниже приведены результаты исследования синтезированных образцов: микроструктурный и элементный анализ, рентгенофазовый анализ, а также данные по грануляции и физико-химическим свойствам.

3.3.1. Микроструктура и элементный состав фосфоритных удобрений

С использованием сканирующего электронного микроскопа (JSM-35 CF, JEOL) были получены данные о равномерном распределении основных элементов (P, K, Ca, Fe) в пробах удобрений. На рисунке 3.7 а-б представлены микрофотографии образца при увеличении от 1000 до 25 000 крат.

На рисунке 3.8 а-б представлен электронно-микроскопический спектр элементного состава твердой фазы, полученной после разложения NPK-удобрения. Энергодисперсионный анализ (EDS) отчетливо выявляет основные элементы - P, K, Ca, Fe, Si и подтверждает формирование ряда фосфатных фаз, критически важных для поддержания агрохимической эффективности.

Интенсивности соответствующих пиков указывают на сбалансированное соотношение данных элементов, свидетельствуя о химической природе удобрения и его пригодности для сельскохозяйственного использования.

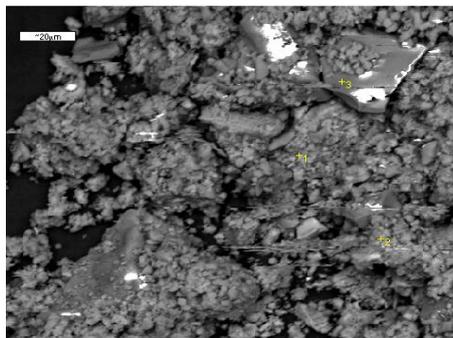


Рисунок 3.7. а. Микрофотографии готовый продукт JSM-35 CF, JEOL

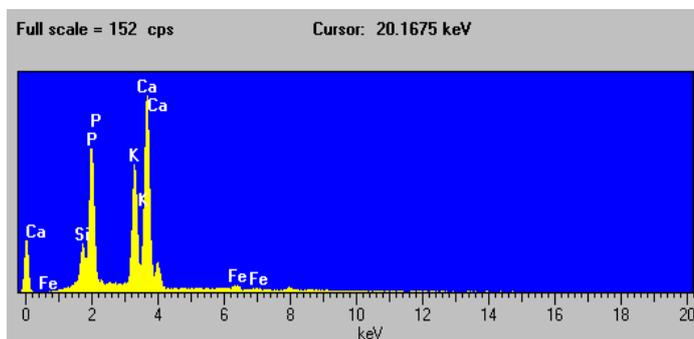


Рисунок 3.8. а. Электронные микроскопические элементы химического состава

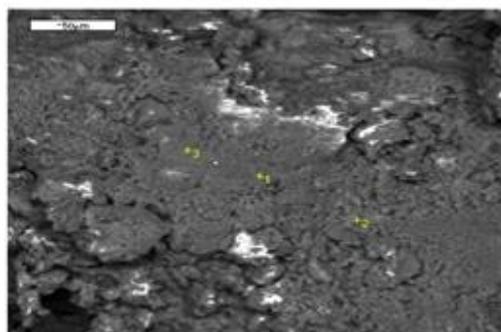


Рисунок 3.7.б. Микрофотографии готовый продукт JSM-35 CF, JEOL

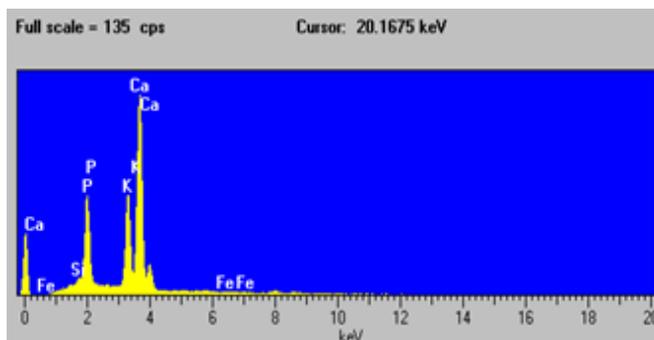


Рисунок 3.8. б. Электронные микроскопические элементы химического состава

Полученные результаты подтверждают, что исследуемое удобрение отвечает заявленным стандартам качества, поскольку содержит ключевые питательные компоненты и формирует благоприятную среду для роста и развития растений.

На рисунке 3.9 демонстрируется морфология и элементный состав NPK-удобрения, исследованного с использованием электронной микроскопии. Изображение в режиме обратных рассеянных электронов (BSE) предоставляет информацию о распределении плотности материала, позволяя различить области с различным атомным номером. Карты распределения элементов

показывают концентрацию и локализацию основных компонентов удобрения: Р, К, Са и Fe.

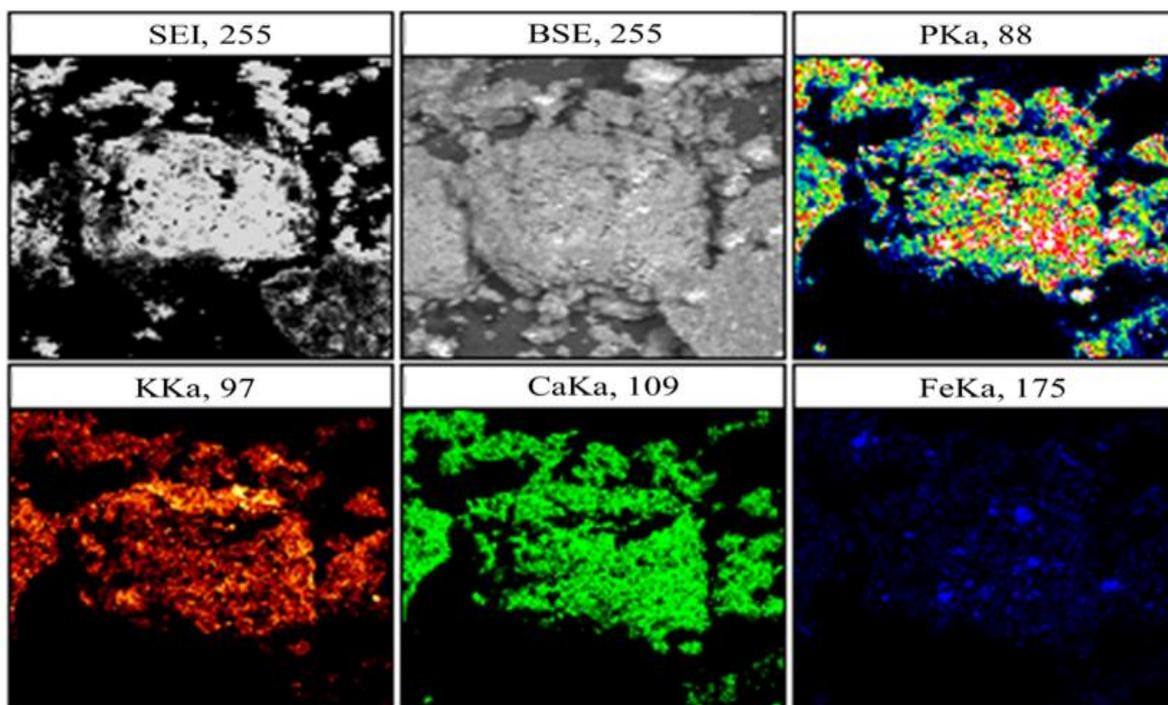


Рисунок 3.9. Выделения NPK удобрения в отраженных электронах BSE и карты распределения указанных элементов в нем

3.3.2. Рентгенофазовый анализ полученного образца NPK-удобрения

Рентгенодифрактометрический анализ (ДРОН-3, Со-анод, Fe-фильтр) показал, что в удобрениях марки 10:10:10 присутствуют следующие основные кристаллические фазы: дигидрофосфат калия $K(H_2PO_4)$; аммоний дигидрофосфат $(NH_4H_2PO_4)$; нитрат калия (KNO_3) ; гидрофосфат кальция $(CaHPO_4)$; пятиокись фосфора (P_2O_5) (продукт термической дегидратации); калийный полифосфат $(K_4P_2O_8)$ (образуется при более жёстком термическом режиме), которые приведены на рисунке 3.10.

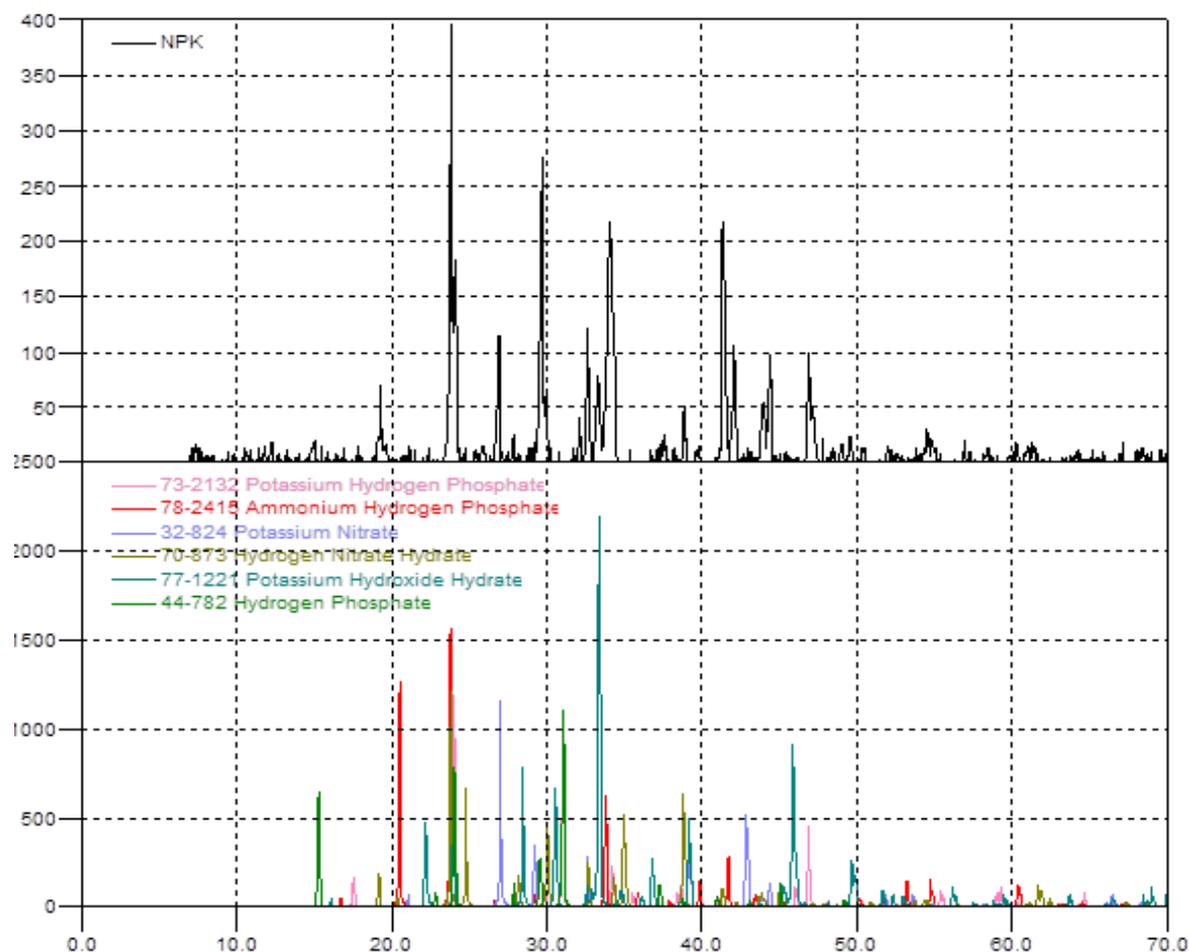


Рисунок 3.10. Дифрактограмма удобрения марки 10:10:10, полученного без стадии фильтрации

Наличие этих соединений обеспечивает удобрениям высокую растворимость и доступность элементов питания для растений.

3.3.3. Грануляция и физико-химические свойства NPK-удобрений

При исследовании и разработке технологии производства удобрений нами был проанализирован целый комплекс требований к форме выпуска и свойствам продукта, включая физико-химические параметры. Основное внимание было уделено размерам гранул и их механической прочности, так как эти характеристики играют ключевую роль в обеспечении стабильного качества удобрений, что особенно важно при хранении и транспортировке.

Был изучен параметр гигроскопичности, который влияет на способность гранул впитывать влагу из окружающей среды. Этот показатель определяет требования к упаковке, условиям складирования и особенностям перевозки продукции. Для оценки устойчивости гранулированных удобрений к нагрузкам в статических условиях мы применили методику, соответствующую требованиям ГОСТ 21560.2-82 («Удобрения минеральные. Метод определения статической прочности гранул»)⁸.

Разработанный технологический процесс производства включает несколько ключевых этапов. На первом этапе из пульпы, полученной после аммонизации и добавления калийного компонента, удаляются излишки влаги посредством упаривания и сушки. Температурный режим процесса был установлен в пределах 90–100 °С, что позволило добиться остаточной влажности материала на уровне 0,9–1,5% (по массе). Этот показатель обеспечивает оптимальные условия для дальнейших операций измельчения и гранулирования.

На следующем этапе высушенный материал дробится с контролем крупности частиц. Мы добились того, что фракция, проходящая через сито с диаметром отверстий 0,18 мм, составляет не менее 90% от исходного объема. Оставшаяся крупная часть была успешно интегрирована в процесс в качестве ретура, что позволяет получить однородную гранулированную форму и минимизировать потери сырья. Готовый продукт представлен на рисунке 3.11.

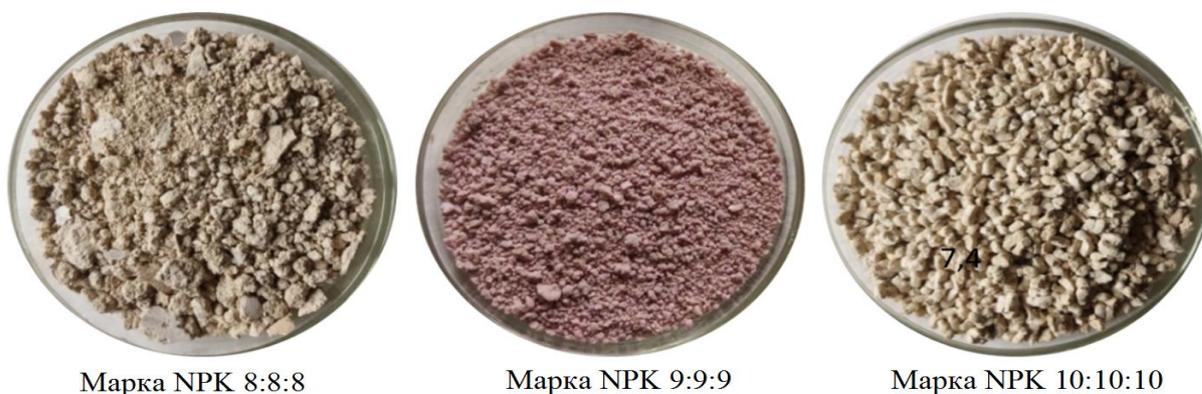


Рисунок 3.11. Завершённый продукт после этапов сушки и гранулирования

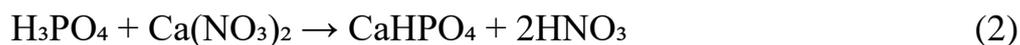
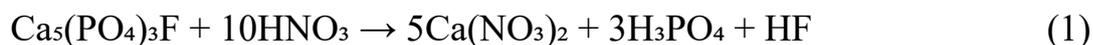
⁸ <https://files.stroyinf.ru/Data/77/7719.pdf>

3.4. Термодинамическое обоснование процесса получения NPK-удобрений

Одним из важнейших факторов, свидетельствующих о значимости исследований в данной сфере, выступает необходимость проведения углублённых термодинамических расчётов. Именно они позволяют прогнозировать вероятность протекания реакций, определять их энергетическую эффективность и выбирать оптимальные условия для реализации. Особенно это актуально для Риватского месторождения, поскольку специфические геохимические характеристики его сырья требуют индивидуально адаптированных параметров переработки.

Рентгенофазовый анализ, выполненный на приборе ДРОН-3, подтвердил сложный минеральный состав фосфоритного концентрата. Основными фазами, идентифицированными в образце, являются фосфид кальция (Ca_3P_2), альфа ортофосфат кальция ($\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$), а также соединения, относящиеся к группе кальций-фосфатных оксидов. Наличие данных соединений установлено на основании характерных базальных рефлексов, выявленных в результате анализа рентгенограмм (рис. 3.5 и 3.10).

На основании анализа фазового состава рентгенограмм установлено, что процесс разложения концентрата с использованием азотной кислоты для получения удобрения типа NPK включает в себя семь ключевых химических реакций, которые образуют основу данного технологического процесса. Эти реакции определяют последовательность взаимодействий между компонентами сырья и реагентами, приводящих к формированию конечных соединений, содержащих азот, фосфор и калий, что является критически важным для получения сбалансированного состава удобрения. В качестве основных фаз в удобрениях присутствуют аммоний дигидрофосфат, калий дигидрофосфат, нитрат калия, фосфорный ангидрид и калийный полифосфат, образовавшиеся в результате реакции (1-7):



Для оценки возможности протекания указанных химических реакций был выполнен детальный расчет термодинамических функций, характеризующих процесс разложения концентрата в среде азотной кислоты⁹. Данные расчеты позволили определить энергетические параметры системы и спрогнозировать направление протекания реакций. В таблице 3.5 представлены начальные значения термодинамических функций для всех компонентов, задействованных в реакциях, обозначенных как (1)–(7). Эти данные включают значения стандартной энтальпии образования, стандартной энтропии, а также значения стандартных энергетических потенциалов Гиббса, что позволяет проводить точный анализ условий равновесия и спонтанности процессов.

Все приведённые значения $\Delta_f H_{298}^0$, $\Delta_f G_{298}^0$ и S_{298}^0 (энтальпии образования, энергии Гиббса образования и стандартные энтропии) взяты из различных справочных источников (JANAF, NIST) и объединены в единую таблицу для расчетов. Для некоторых веществ, таких как твердые фосфаты, полифосфаты и растворенные кислоты, из-за разброса данных в литературе использованы усредненные значения.

В таблице 3.6. представлены результаты расчета термодинамических функций для процесса разложения фосфоритного концентрата азотной кислотой с последующим получением NPK.

⁹ Карамбахшов Х.З., Курбонов Ш.А., Холов Х.И., Самихов Ш.Р., Сафаров С.Ш. Термодинамический анализ азотнокислотного разложения фосфоритного концентрата Риватского месторождения для производства NPK-удобрений. Вестник ТТУ, Душанбе, 2025, №1 (69), С.48-54.

Таблица 3.5

Значения термодинамических функций исходных веществ и продуктов реакции

| Вещество | ΔH° , кДж/моль | ΔG° , кДж/моль | S° , Дж/(моль·К) |
|--|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ (тв.) | -6775 | -5965 | 489 |
| HNO_3 (раств.) | -174,1 | -110,6 | 146,4 |
| $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (тв.) | -939,6 | -744,5 | 207,4 |
| H_3PO_4 (раств.) | -1280 | -1120 | 110,5 |
| HF (водн.) | -320,1 | -275* | 82,4* |
| CaHPO_4 (тв.) | -1280 | -1100 | 100 |
| NH_3 (газ) | -46 | -16 | 192 |
| $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ | -1540 | -1290 | 160 |
| KCl (тв.) | -436 | -408 | 83 |
| $\text{K}(\text{H}_2\text{PO}_4)$ | -1590 | -1335 | 150 |
| HCl (газ) | -92 | -95 | 187 |
| NH_4NO_3 | -365 | -183 | 151 |
| KNO_3 | -494 | -365 | 134 |
| NH_4Cl | -315 | -202 | 94 |
| H_2O (жидк.) | -286 | -237 | 70 |
| P_2O_5 (тв.) | -2966 | -2670 | 180 |
| KOH (тв.) | -425 | -380 | 70 |
| $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_8$ (тв.) | -6200 | -5800 | 300 |

*Для HF (водн.) значения приближительны; в зависимости от концентрации и формы в растворе могут отличаться.

Таблица 3.6

Значения термодинамических функций

| ΔH° , (кДж) | ΔS° , (Дж/К) | ΔG° при 298 К, (кДж) | ΔG° при 323 К, (кДж) | ΔG° при 343 К, (кДж) | ΔG° при 363 К, (кДж) | K_{298} | K_{323} | K_{343} | K_{363} |
|---|------------------------------|---|---|---|---|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 1. $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F} + 10\text{HNO}_3 \rightarrow 5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 + 3\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{HF}$ | | | | | | | | | |
| -342.1 | -502.1 | -192.8 | -180.0 | -169.8 | -159.8 | 1.52×10^{34} | 3.49×10^{29} | 1.05×10^{26} | 1.43×10^{23} |
| 2. $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \rightarrow \text{CaHPO}_4 + 2\text{HNO}_3$ | | | | | | | | | |
| +765.5 | -71.5 | +653.9 | +788.6 | +803.9 | +818.2 | 1.80×10^{-138} | 1.27×10^{-128} | 3.07×10^{-140} | 4.37×10^{-144} |
| 3. $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ | | | | | | | | | |
| -214.0 | -142.5 | -171.6 | -167.9 | -165.2 | -162.3 | 1.07×10^{30} | 3.50×10^{27} | 5.60×10^{25} | 1.08×10^{23} |
| 4. $\text{H}_3\text{PO}_4 + \text{KCl} \rightarrow \text{K}(\text{H}_2\text{PO}_4) + \text{HCl}$ | | | | | | | | | |
| +34.0 | +143.5 | -8.7 | -12.3 | -26.1 | -39.8 | 3.36×10^1 | 1.83×10^2 | 1.94×10^4 | 4.39×10^7 |
| 5. $\text{NH}_4\text{NO}_3 + \text{KCl} \rightarrow \text{KNO}_3 + \text{NH}_4\text{Cl}$ | | | | | | | | | |
| -8.0 | -6.0 | -6.2 | -6.06 | -5.94 | -5.82 | 1.02×10^1 | 1.04×10^1 | 7.99×10^0 | 6.92×10^0 |
| 6. $2\text{H}_3\text{PO}_4 \rightarrow \text{P}_2\text{O}_5 + 3\text{H}_2\text{O}$ | | | | | | | | | |
| -1264.0 | +169.0 | -1314.0 | -1318.5 | -1322.0 | -1325.3 | 1.90×10^{230} | 1.63×10^{213} | 4.08×10^{201} | 1.39×10^{191} |
| 7. $\text{P}_2\text{O}_5 + 4\text{KOH} \rightarrow \text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7 + 2\text{H}_2\text{O}$ | | | | | | | | | |
| -1820.0 | -90.0 | -1793.2 | -1790.9 | -1773.1 | -1756.3 | 1.52×10^{34} | 3.08×10^{289} | 1.05×10^{270} | 1.39×10^{253} |

Как показывают проведенные расчёты, все реакции протекают необратимо. На основании данных, представленных в таблице, видим, как изменение температуры влияет на термодинамические параметры реакций. Эти сведения имеют ключевое значение для оптимизации технологических процессов, направленных на производство NPK-удобрений. При увеличении температуры наблюдается изменение значения энергии Гиббса (ΔG°), которое зависит от величины и знака энтропийного изменения (ΔS°). В случаях, когда ΔS° отрицательно, повышение температуры делает член $-T\Delta S^\circ$ положительным, уменьшая абсолютное значение отрицательной ΔG° . Это означает, что реакция становится менее выгодной с точки зрения термодинамики. Напротив, если ΔS° положительно, рост температуры приводит к увеличению отрицательного значения ΔG° , что делает реакцию более термодинамически выгодной.

Очень высокие значения K (как у реакций 1, 3, 6, 7) свидетельствуют о том, что равновесие смещено в сторону продуктов, что означает практически полное протекание реакции. Очень малые K (реакция 2) указывают, что равновесие находится в стороне исходных веществ.

Для большинства реакций величина ΔG° изменяется при переходе от 298 к 363 К. Эти изменения отражают влияние температуры на химический потенциал реакции и, соответственно, на ее равновесное состояние.

Взаимодействие компонентов концентрата с азотной кислотой протекает самопроизвольно (рис. 3.12), однако повышение температуры оказывает различное влияние на отдельные реакции.

Результаты термодинамического анализа подтвердили перспективность применения азотной кислоты для разложения фосфоритного концентрата из Риватского месторождения. Высокие значения констант равновесия и отрицательные энергии Гиббса большинства ключевых реакций свидетельствуют о высокой эффективности процесса.

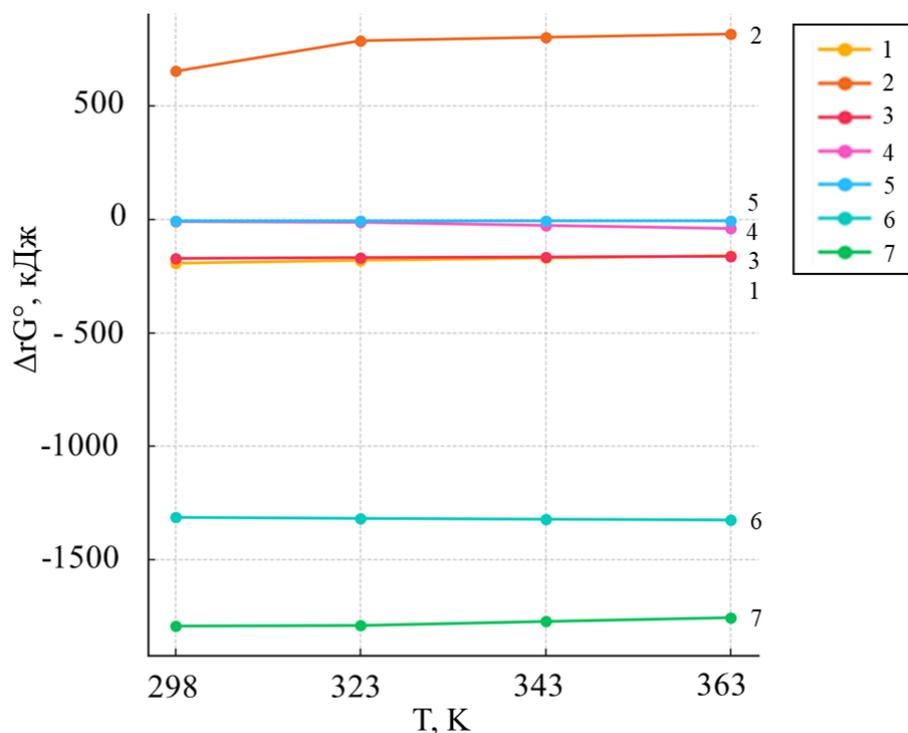


Рисунок 3.12. Зависимость энергии Гиббса от температуры

Разработка и внедрение предложенных технологий переработки не только обеспечат устойчивое производство качественных NPK-удобрений, но и позволят значительно снизить экологические риски, связанные с использованием традиционных методов. Полученные данные представляют научную и практическую значимость, способствуя оптимизации технологий обработки фосфорного сырья для сельского хозяйства.

3.5. Принципиальная технологическая схема получения NPK-удобрения

Производственный прототип (рис. 3.13) позволяет синтезировать комплексные NPK-удобрения с различным суммарным содержанием питательных веществ, причём технологическая линия может работать как в режиме образования нерастворимого остатка, так и без инертной примеси. В основу процесса положена реакция нитрофосфатного типа: в азотнокислую пульпу апатита Риватского месторождения дозируют фосфорную кислоту до достижения мольного отношения $\text{CaO} : \text{P}_2\text{O}_5 = 0,79$. При этих условиях избыток кальция полностью переводится в дикальцийфосфат, а фосфор остаётся

преимущественно в усвояемой форме, что придаёт продукту пролонгированное действие.

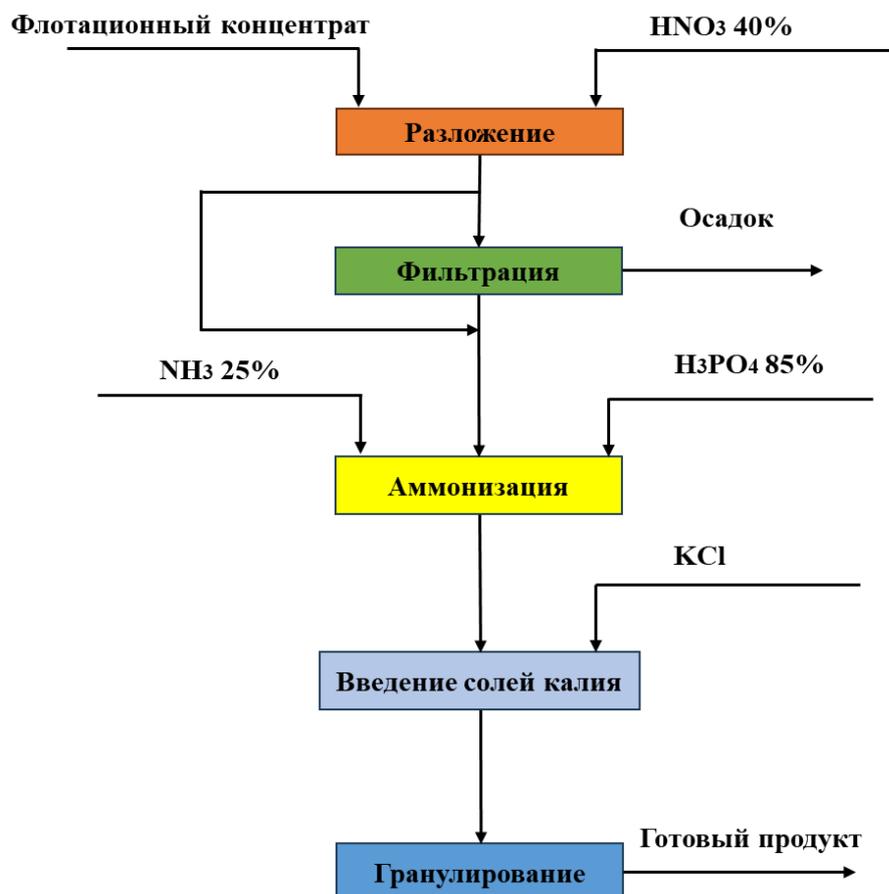


Рисунок 3.13. Принципиальная технологическая схема получения NPK-удобрения

В серии опытов изменяли расход HNO_3 от 20 до 47 % (от расчётной стехиометрии) при выдержке 15–30 мин. Химический состав полученных образцов представлен в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Химический состав полученных удобрений

| Марка NPK | Норма HNO_3 , % | N (общ.), % | P_2O_5 (общ.), % | P_2O_5 (усв.), % | K_2O , % | CaO , % |
|-----------|--------------------------|-------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------|------------------|
| 8:8:8 | 20 | 4,02 | 6,08 | 2,80 | 4,08 | 18,22 |
| 9:9:9 | 30 | 4,07 | 10,01 | 7,03 | 15,00 | 30,02 |
| 10:10:10 | 47 | 9,80 | 10,03 | 7,06 | 10,03 | 34,01 |

Повышение концентрации азотной кислоты приводит к более глубокому разложению фосфатного концентрата и, соответственно, к увеличению доли усвояемого фосфора и азота в конечном продукте. Оптимальным признан интервал 80–94 % от теоретически необходимого количества HNO_3 , при котором достигается высокий выход подвижных форм P_2O_5 и N без неоправданного перерасхода реагента, а готовое удобрение соответствует требованиям к маркам 8 : 8 : 8 – 10 : 10 : 10 по питательной ценности и агрономической эффективности.

Предлагаемая технологическая схема позволит осуществить переработку фосфоритных руд с организацией производственных цехов по получению NPK-удобрения.

3.6. Агрохимическая эффективность суперфосфата из Риватских фосфоритов при возделывании хлопчатника сорта «Вахдат-20»

Хлопчатник – стратегическая сельскохозяйственная культура Таджикистана, традиционно именуемая «белым золотом». Повышение урожайности и качества хлопка имеет ключевое значение для экономики и продовольственной безопасности республики. Однако одним из главных лимитирующих факторов продуктивности хлопчатника в регионе является обеспеченность фосфором – элементом минерального питания, необходимым для роста, развития и формирования урожая. В условиях современного хлопководства Таджикистана проблема фосфорного питания стоит особенно остро: страна в значительной мере зависит от импортных фосфорных удобрений, доступность которых для фермеров ограничена из-за высокой стоимости и перебоев с поставками. Это приводит к тому, что фактическое внесение фосфорсодержащих удобрений значительно ниже агрономически обоснованных норм, в результате чего в почвах наблюдается дефицит подвижного фосфора и потенциал урожайности хлопчатника не реализуется полностью. Практическая значимость поиска решений данной проблемы

трудно переоценить, поскольку повышение фосфорного питания растений хлопка напрямую отражается на прибавке урожая и экономической эффективности производства.

С научной точки зрения давно доказано, что фосфор наряду с азотом является одним из основных элементов, лимитирующих рост сельскохозяйственных культур во всем мире. Фосфор входит в состав важнейших биомолекул (АТФ, нуклеиновых кислот, фосфолипидов) и играет ключевую роль в энергетическом обмене, делении клеток и других физиологических процессах растений. Для хлопчатника (*Gossypium hirsutum* L.) недостаток фосфора особенно критичен: фосфорное голодание заметно угнетает рост и развитие растений, снижает закладку репродуктивных органов (плодовых ветвей, бутонов) и число завязавшихся коробочек, в итоге резко сокращая урожайность сырца и ухудшая качество волокна. Международные и региональные исследования подтверждают, что оптимизация фосфорного питания позволяет существенно повысить продуктивность хлопчатника. Например, в полевых опытах в соседнем Узбекистане прибавка урожая хлопка-сырца при внесении оптимальных доз фосфорных удобрений составила порядка 10 % и более по сравнению с недостаточным фосфорным фоном. Отмечено также, что дефицит фосфора в период вегетации способен ухудшать технологические показатели сырца, включая длину и прочность волокна. Вместе с тем эффективность применения фосфорных удобрений во многом осложняется почвенными факторами: на карбонатных (известковых) почвах, типичных для хлопкосеющих зон Средней Азии, значительная часть внесённого фосфора быстро фиксируется в труднодоступных нерастворимых соединениях. В результате культура способна усвоить лишь малую долю фосфора удобрений в год их внесения, а остальная часть накапливается в почве в трудноусвояемой форме. Данная особенность диктует необходимость повышенных доз фосфорных подкормок или использования приёмов, повышающих коэффициент использования фосфора, а также усиливает

актуальность поиска альтернативных источников фосфорных удобрений, обладающих лучшей доступностью и экономичностью применения.

Одним из путей решения обозначенной проблемы в условиях Таджикистана является привлечение местных фосфоритовых ресурсов взамен дорогостоящего импорта. Республика богата фосфорным сырьём: всего выявлено и в разной степени изучено около 30 месторождений фосфоритов. Эти месторождения представляют значительный потенциал для развития собственного производства фосфорных удобрений. Рациональное использование местных фосфоритов могло бы обеспечить сельское хозяйство республики доступными удобрениями, снизив зависимость от колебаний мировых цен и внешних поставок. Однако фосфориты как минеральное сырьё характеризуются низкой растворимостью, поэтому их прямое использование в сельском хозяйстве малоэффективно. Необходимо превратить фосфоритовую руду в форму, доступную растениям, посредством химической обработки (например, кислотного разложения). В советский и постсоветский периоды учёными Таджикистана предпринимались исследования по переработке фосфоритовых руд в удобрения и оценке их агрохимической эффективности. Так, в литературе имеются сведения об испытаниях удобрений, полученных из фосфоритов Каратагского месторождения, на рост и продуктивность различных культур. Однако в отношении хлопчатника данные о применении местных фосфорных удобрений до сих пор носили фрагментарный характер. Это обуславливает необходимость целенаправленных исследований, посвящённых агрохимической оценке местных фосфорных удобрений в хлопководстве.

В контексте поиска отечественных источников фосфорного питания растений особое внимание уделяется Риватскому месторождению фосфоритов. Риватское месторождение расположено в Гиссарском регионе и относится к числу наиболее крупных и изученных в стране. Фосфоритовая руда Ривата по своему химическому составу характеризуется как кремнистый апатитовый фосфорит с относительно невысоким содержанием P_2O_5 (около 6 % в исходной руде). Такое низкое содержание фосфора требует обогащения руды перед её

использованием. По результатам исследований таджикских химиков и технологов разработан флотационный метод обогащения фосфоритов Ривата, позволяющий получать концентрат с содержанием P_2O_5 порядка 25–27 %. Полученный фосфоритовый концентрат пригоден для дальнейшей переработки в минеральные удобрения. В частности, из концентрата риватской руды может быть произведён простой суперфосфат – традиционное фосфорное удобрение, получаемое при обработке фосфоритового сырья серной кислотой. Простой суперфосфат содержит водорастворимый монокальцийфосфат (доступную для растений форму фосфора) и сопутствующий гипс (сульфат кальция), служащий балластом и дополнительным источником кальция и серы для растений. Предполагается, что по агрохимической эффективности простой суперфосфат, изготовленный из риватских фосфоритов, будет сопоставим с заводскими фосфорными удобрениями из импортного сырья. Тем не менее, данное предположение требует экспериментальной проверки с позиций влияния нового удобрения на рост и продуктивность сельскохозяйственных культур. Хлопчатник как главная культура, потребляющая значительные количества фосфора, был выбран в качестве модельного объекта для такой проверки.

Непосредственным объектом настоящего исследования является сорт хлопчатника «Вахдат-20» (*Gossypium hirsutum* L.). Данный сорт выведен таджикскими селекционерами и адаптирован к почвенно-климатическим условиям республики. «Вахдат-20» относится к средневолокнистым высокоурожайным сортам, сочетая высокий потенциал продуктивности с хорошим качеством волокна. По имеющимся данным, сорт отличается относительно скороспелостью и устойчивостью к основным стрессовым факторам среды, что делает его перспективным для широкого возделывания. Выбор сорта «Вахдат-20» в качестве объекта испытаний обусловлен тем, что этот сорт является одним из современных районированных в Таджикистане сортов хлопчатника. Его выращивание рекомендуется профильными научными учреждениями в производственных условиях, поэтому результаты исследований на данном сорте будут наиболее релевантны практическому

хлопководству. Кроме того, изучение действия удобрений на сорте «Вахдат-20» представляет научный интерес с точки зрения выявления потенциальных генотипических особенностей усвоения фосфора и реакции на минеральные подкормки.

Исходя из вышеизложенного, была сформулирована цель исследования – научно обосновать эффективность применения простого суперфосфата из риватских фосфоритов в агротехнике хлопчатника сорта «Вахдат-20» и оценить его влияние на рост, развитие и урожайность данной культуры. Для достижения указанной цели предполагалось решить ряд взаимосвязанных задач. Во-первых, требовалось экспериментально изучить влияние внесения местного простого суперфосфата на ростовые процессы и динамику развития растений хлопчатника, включая основные фенологические фазы и морфологические показатели (высоту растений, развитие корневой системы, образование генеративных органов и др.). Во-вторых, следовало оценить изменение продуктивности хлопчатника под влиянием удобрения – проанализировать формирование плодовых органов (симподиев, коробочек), накопление сырой и сухой биомассы, урожайность хлопка-сырца, а также другие показатели, характеризующие эффективность фосфорного питания. В-третьих, необходимо было сопоставить полученные данные с контролем (вариантом без применения фосфорных удобрений) и проанализировать относительную агрохимическую эффективность местного суперфосфата по сравнению с отсутствием фосфорных подкормок (и, при необходимости, по сравнению с традиционными фосфорными удобрениями заводского производства). Решение этих задач позволит всесторонне охарактеризовать действие нового удобрения и сформировать научно обоснованные рекомендации для агропрактики.

Для реализации поставленных задач полевой эксперимент был проведён на научно-экспериментальном участке Института ботаники, физиологии и генетики растений Национальной академии наук Таджикистана. Выбор данной экспериментальной базы обусловлен её репрезентативностью: условия опытного участка соответствуют условиям хлопководства юга республики, что

обеспечивает переносимость выводов исследования на практику. Полевой опыт закладывался и проводился в соответствии с общепринятой методикой агрохимических исследований. Были выделены контрольный и опытные варианты с внесением удобрения, предусмотрено необходимое число повторностей, а делянки размещались по случайзированной (рандомизированной) схеме для исключения систематической погрешности. В ходе эксперимента проводились регулярные фенологические наблюдения и измерения морфологических параметров растений, отбор проб для анализа биомассы, а после созревания урожая – учет собранного хлопка-сырца и оценка его показателей. Применение научно обоснованного подхода и контроль всех агротехнических условий позволили объективно оценить влияние местного фосфорного удобрения на сорт «Вахдат-20». Таким образом, научная новизна и практическая значимость настоящего исследования заключаются в получении новых данных о применении удобрений из местного фосфатного сырья в хлопководстве и в разработке рекомендаций по замещению импортных фосфорных удобрений отечественными, что будет способствовать повышению устойчивости и эффективности производства хлопка в Таджикистане.

Полевой опыт проведён на научно-экспериментальном участке Института ботаники, физиологии и генетики растений НАН Таджикистана (восточная часть Гиссарской долины, 830 м над у.м.). Почвы участка отличались низким обеспечением подвижным фосфором (содержание P_2O_5 в пахотном слое около 0,3–0,5% в пересчёте на массу почвы). Для опыта выбран промышленный сорт средневолокнистого хлопчатника *Gossypium hirsutum* Л. «Вахдат-20». Этот сорт характеризуется неограниченным типом ветвления, средней продолжительностью вегетационного периода и высоким потенциалом урожайности. Растения сорта «Вахдат-20» формируют куст высотой около 1 м, образуют 20 симподиев (плодовых ветвей) и крупные коробочки массой 5–6 г. Волокно данного сорта относится к средневолокнистому типу: длина волокна порядка 32–33 мм, выход волокна 38–40%, прочность и тонкость волокна соответствуют стандартам для хлопка-волокна среднего типа.

В качестве удобрения использовали простой суперфосфат, полученный из фосфоритового концентрата месторождения Риват. Химический анализ удобрения показал, что общее содержание P_2O_5 составляет 18% (мас.). При этом 14% P_2O_5 является растворимым в 2%-ном растворе лимонной кислоты (усвояемая форма фосфора), а 4% приходится на остаточный труднорастворимый фосфор. Полученный местный суперфосфат по качеству соответствует требованиям ГОСТ 5956-78 для простого суперфосфата. Помимо фосфора, удобрение содержит сопутствующий кальций и серу в форме гипса (побочный продукт производства). Для обеспечения достоверности результатов в опыте также применяли азотные и калийные удобрения на уровне рекомендуемых доз, чтобы исключить их дефицит. В частности, на всех делянках вносили аммиачную селитру из расчёта 180–200 кг/га (в действующем веществе N) и калийное удобрение (KCl) – 45 кг/га K_2O . Фактором опыта служило фосфорное удобрение: контроль – без внесения P (только азотные и калийные удобрения), опыт – с внесением суперфосфата (350 кг/га, что эквивалентно 60 кг/га действующего вещества P_2O_5). Суперфосфат вносили однократно перед посевом, под основную обработку почвы. Повторности опыта – трижды, делянки располагали по случайизированному блочному плану.

Посев хлопчатника проводили весной (вторая декада апреля) с нормой высева и междурядьями согласно агротехническим рекомендациям для условий Таджикистана. Уход за посевами (полив, междурядная обработка, борьба с вредителями) осуществлялся в соответствии с общепринятой технологией возделывания хлопчатника. Фенологические наблюдения проводили регулярно в течение вегетации, отмечая дату наступления основных фаз развития (бутонизация, цветение, раскрытие коробочек и т.д.). В фазу бутонизации отбирали пробные растения с каждой делянки для морфометрических измерений. Измеряли высоту главного стебля, длину стержневого корня (до верхушки), число симподий (плодовых ветвей) на растение, а также подсчитывали число заложенных генеративных органов (бутоны, цветки) и общее число развитых листьев. Площадь листовой поверхности определяли по

длине и ширине листьев с использованием поправочного коэффициента 0,707. В фазу полной зрелости (сбор урожая) проводили структурный анализ растений. На каждой делянке выбирали по 5 типичных растений и разделяли их на органы: корень, стебель, листья, черешки листьев, плодовые ветви, бутоны/цветки, коробочки с волокном и створки (околоплодники). Каждый компонент высушивали до постоянной массы (при +105 °С) и взвешивали, после чего рассчитывали распределение сухой биомассы растения по органам. Урожайность учитывали как сбор хлопка-сырца с делянки, результаты пересчитывали на центнеры с гектара. В лабораторных условиях проведён анализ технологических свойств полученного волокна. Образцы волокна от контрольных и опытных растений испытывали стандартными методами, принятыми в хлопковой промышленности: определяли длину верхушечного штапеля (мм), разрывную нагрузку волокна (прочность, г/текс), микронейр (тонкость волокна, усл. ед.) и выход волокна (%) после стандартного разборного анализа сырца. Испытания проводили в лаборатории технологии волокна Институт ботаники, физиологии и генетики растений НАНТ с использованием методик ЦНИИХБ (Москва). Для статистической обработки результатов вычислены средние значения и стандартные ошибки по каждому варианту. Оценка достоверности разниц проведена методом дисперсионного анализа (ANOVA) и критерия LSD-05. Все вычисления выполнялись с помощью пакета Microsoft Excel 2010. В таблицах ниже приведены усреднённые данные эксперимента с их стандартными отклонениями.

3.6.1. Динамика влияния NPK-удобрений на рост и развитие хлопчатника

Добавление фосфорного удобрения существенно ускорило рост и улучшило развитие растений хлопчатника сорта «Вахдат-20» на всех этапах онтогенеза. Уже с начала бутонизации отмечалось опережающее развитие опытных растений по сравнению с контролем. К фазе бутонизации (середина октября) средняя высота растений с суперфосфатом достигала 92,2 см, тогда как без фосфора – лишь 64,3 см, разница ~43%. Число симподий (плодовых

ветвей) увеличилось с 20 до 24,3 на растение. Длина главного корня возросла в среднем с 21,1 см до 28,2 см (примерно на треть больше, чем в контроле). Улучшение фосфорного питания также способствовало закладке большего числа генеративных органов: на фазу бутонизации на одном растении с P_2O_5 насчитывалось в среднем 10,7 бутонов против 5,0 в контроле. Общее количество развитых листьев к этому времени увеличилось примерно с 28 до 42 шт. на растение. Кроме того, под влиянием суперфосфата возросла площадь листовой поверхности: так, площадь листьев на растение в фазу бутонизации составила $\sim 6,8 \text{ дм}^2$ против $\sim 3,7 \text{ дм}^2$ у контроля (то есть почти в 2 раза больше). Таким образом, применение фосфорного удобрения обеспечило более интенсивный рост побегов и корней и формирование мощного листового аппарата, что создало предпосылки для повышения продуктивности растений.

Таким образом, введение суперфосфата из риватских фосфоритов приводило к более высоким показателям роста и развития как вегетативных, так и генеративных органов хлопчатника (табл. 3.7).

3.6.2. Распределение сухой массы и урожайность хлопчатника

Удобрение P заметно повлияло на накопление биомассы хлопчатника и распределение ассимилятов между органами (табл. 3.8). К концу вегетации суммарная сухая биомасса одного растения в опыте достигала 100 г, что почти вдвое превышает контроль (52,4 г). Прирост сухого вещества отмечен по всем органам, причём в генеративных частях он был максимальным. Масса стебля увеличилась с 11,9 до 19,0 г на растение, масса листьев – с 10,4 до 17,1 г, корней – с 4,87 до 7,83 г (опыт против контроля соответственно). Накопление сухого вещества в генеративных органах возросло еще существеннее.

Морфометрические параметры растений хлопчатника «Вахдат-20» в фазе бутонизации под влиянием суперфосфата

| Показатель | Контроль | Опыт (фосфор) |
|------------------------------|--------------|---------------|
| Высота стебля, см | 53,1 | 96,3 |
| | 69,3 | 81,4 |
| | 70,5 | 98,9 |
| | 64,3 ± 5,61 | 92,2 ± 5,45 |
| Число симподиев, шт. | 16 | 22 |
| | 20 | 27 |
| | 24 | 24 |
| | 20,0 ± 2,31 | 24,3 ± 1,45 |
| Длина корня, см | 16,6 | 31,1 |
| | 20,2 | 25,3 |
| | 26,4 | 28,2 |
| | 21,1 ± 2,86 | 28,2 ± 1,67 |
| Число створок коробочек, шт. | 6 | 7 |
| | 3 | 7 |
| | 5 | 9 |
| | 4,7 ± 0,88 | 7,67 ± 0,67 |
| Плодовые ветви, шт. | 6 | 12 |
| | 14 | 15 |
| | 13 | 14 |
| | 11,0 ± 2,51 | 13,67 ± 0,88 |
| Черешки листьев, шт. | 19 | 32 |
| | 29 | 38 |
| | 35 | 49 |
| | 27,67 ± 4,67 | 39,6 ± 4,98 |
| Бутоны, шт. | 3 | 11 |
| | 5 | 8 |
| | 7 | 13 |
| | 5,0 ± 1,15 | 10,7 ± 1,45 |
| Листья, шт. | 19 | 35 |
| | 30 | 41 |
| | 35 | 50 |
| | 28,0 ± 4,73 | 42,0 ± 4,36 |

Распределение сухой биомассы по органам растений хлопчатника
«Вахдат-20» при внесении суперфосфата

| Орган | Контроль | Опыт (фосфор) |
|------------------------------|--------------|---------------|
| Стебель | 11,3 | 21,7 |
| | 10,5 | 14,6 |
| | 13,8 | 20,7 |
| | 11,9 ± 1,0 | 19,0 ± 2,2 |
| Листья | 8,2 | 12,3 |
| | 10,7 | 19,2 |
| | 12,3 | 19,7 |
| | 10,4 ± 1,2 | 17,07 ± 2,39 |
| Корень | 4,0 | 7,6 |
| | 4,5 | 7,0 |
| | 6,1 | 8,9 |
| | 4,87 ± 0,6 | 7,83 ± 0,56 |
| Черешки листьев | 1,3 | 1,6 |
| | 1,0 | 2,0 |
| | 1,7 | 3,3 |
| | 1,2 ± 0,2 | 2,3 ± 0,5 |
| Плодовые ветви | 1,4 | 4,8 |
| | 2,0 | 3,1 |
| | 1,6 | 3,9 |
| | 1,67 ± 0,18 | 3,9 ± 0,49 |
| Бутоны | 0,7 | 1,9 |
| | 0,2 | 2,2 |
| | 1,5 | 2,6 |
| | 0,8 ± 0,38 | 2,23 ± 0,20 |
| Волокно | 21,3 | 34,3 |
| | 15,9 | 36,1 |
| | 13,2 | 40,5 |
| | 16,8 ± 2,38 | 36,97 ± 1,84 |
| Створки (плодовые коробочки) | 5,0 | 11,0 |
| | 6,1 | 9,3 |
| | 3,0 | 11,7 |
| | 4,7 ± 0,9 | 10,67 ± 0,71 |
| Общая сухая биомасса | 52,43 ± 0,77 | 100,0 ± 5,67 |

Масса репродуктивных структур (бутоны, цветки и завязи) на конец сезона на удобренных растениях была примерно в 2,2 раза выше, чем на контроле. Особенно разителен эффект на формирование коробочек: суммарная масса зелёных коробочек (нераскрывшихся плодов) повысилась примерно в 4,9 раза по сравнению с контролем. В результате массового завязывания коробочек под влиянием фосфора значительно возрос урожай сырца.

Средняя масса собранного хлопка-сырца с одного растения в удобренном варианте составила 36,97 г, тогда как без удобрения – лишь 16,8 г (рост более чем в 2,2 раза). По пересчёту на площадь это соответствует прибавке урожайности волокна порядка 800 кг/га (с 840 кг/га на контроле до 1680 кг/га на варианте с фосфором, при условной плотности стояния 50 тыс. раст/га). Урожайность хлопка-сырца в опыте возросла приблизительно с 25 ц/га (контроль) до 55–60 ц/га при внесении местного суперфосфата, то есть на ~30 ц/га (на 120%) больше по сравнению с контролем. Таким образом, применение суперфосфата из риватских фосфоритов обеспечило достоверную прибавку урожая хлопка.

На рис. 3.14 приведено распределение сухой биомассы растения хлопчатника по основным органам в контроле и при удобрении фосфором. Видно, что помимо общего увеличения массы, меняются и пропорции: доля генеративных частей (волокно + семена + створки) несколько возрастает в удобренном варианте (за счёт формирования большего числа плодов), тогда как относительная доля стебля и листьев снижается. Иными словами, фосфорное питание не только усиливает рост, но и смещает баланс в пользу репродуктивных органов, повышая хозяйственную продуктивность растений.

3.6.3. Качество хлопкового волокна

Анализ технологических свойств волокна показал, что применение местного суперфосфата не ухудшает качество урожая, а по ряду показателей даже оказывает положительное влияние. В таблице 3.9 представлены основные параметры волокна, полученного в опыте. У хлопка сорта «Вахдат-20»

(средневолокнистый) отмечена тенденция к улучшению длины и выхода волокна под влиянием удобрения. В частности, выход волокна повысился с 37,6 % (в контроле) до 39,6 % при удобрении Р (прирост ~2 процентных пункта). Длина штапельного волокна увеличилась с $32,7 \pm 0,9$ мм до $33,0 \pm 0,6$ мм (в среднем на 0,3–1 мм). Хотя эта прибавка невелика, она указывает на отсутствие негативного влияния интенсивного роста на длину волокна.

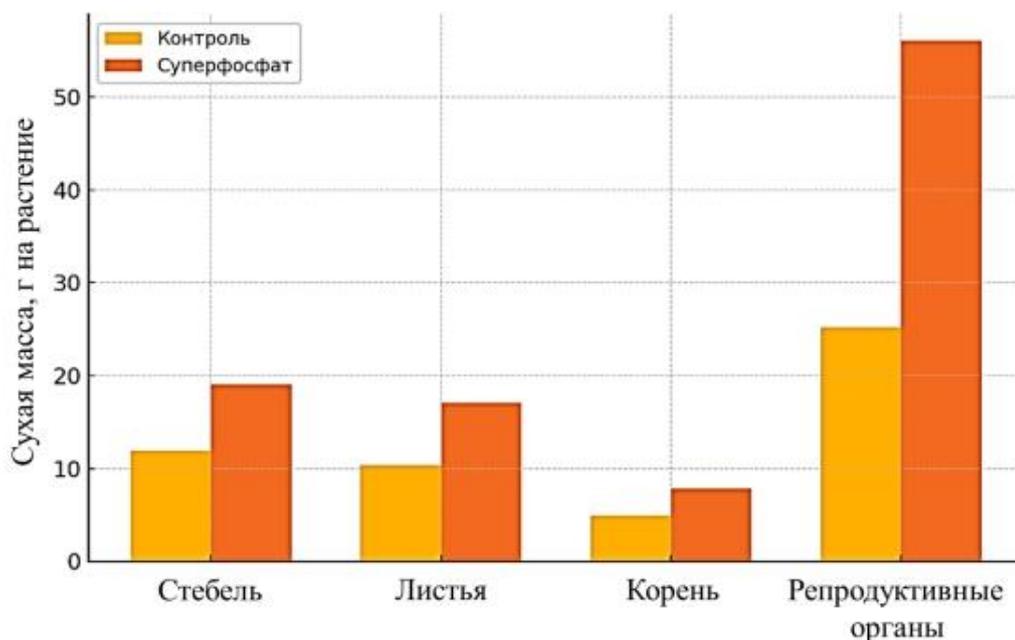


Рисунок 3.14. Распределение сухой биомассы одного растения хлопчатника сорта «Вахдат-20» по органам, г (контроль – без P_2O_5 ; опыт – с местным суперфосфатом)

Прочность волокна (разрывная нагрузка) изменилась незначительно: в контроле 4,47 г/текс, в опыте 4,77 г/текс (разница невелика). Показатель тонкости волокна – микронейр – под влиянием фосфорного удобрения практически не изменился и оставался в пределах нормы для данного сорта (контроль 4,5; опыт 4,7 усл. ед., разница недостоверна). Незначительное увеличение микронейра соответствует небольшому снижению метрического номера волокна (с 5637 до 5567 мм/мг) у удобренного варианта, что указывает на чуть более толстое волокно. Однако эти изменения тонкости минимальны (около 1–2%) и не влияют на категорию качества. Таким образом, применение фосфора не оказало отрицательного воздействия на технологические свойства

хлопка. Напротив, коммерчески важные показатели волокна – его выход и длина – несколько повысились при фосфорном питании. У тонковолокнистого хлопка (египетский подвид, для сравнения) в параллельном опыте заметного влияния Р на качество волокна не наблюдалось, тогда как для сорта «Вахдат-20» улучшение качества волокна при удобрении фосфором свидетельствует о повышении обеспеченности растений ресурсами для формирования целлюлозы. В целом результаты показывают, что локальный суперфосфат можно применять без риска ухудшения качества урожая – прирост количества волокна сопровождается сохранением или небольшим улучшением его технологических свойств.

Таблица 3.10

Влияние фосфорного удобрения (350 кг/га суперфосфата из риватских фосфоритов) на технологические свойства волокна хлопчатника сорта «Вахдат-20»

| Показатель волокна | Контроль | Опыт |
|------------------------------|-----------|-----------|
| Выход волокна, % | 37,6±0,6 | 39,6±0,5 |
| Длина штапеля, мм | 32,7±0,9 | 33,0±0,6 |
| Разрывная нагрузка, г/текс | 4,47±0,09 | 4,77±0,12 |
| Микронейр (условные единицы) | 4,5±0,1 | 4,7±0,1 |
| Разрывная длина, км | 25,1±0,5 | 26,4±0,4 |

Примечание: Разрывная длина – длина нити, при которой её масса равна разрывной нагрузке; показатель прочности, тесно связанный с разрывной нагрузкой и тонкостью волокна.

Приведенные результаты демонстрируют, что фосфорное питание растений хлопчатника сорта «Вахдат-20» приводит к существенному ускорению их роста и увеличению продуктивности. Особенно заметна позитивная роль суперфосфата в формировании генеративных структур и

накоплении волокна, что говорит о его эффективности как удобрения для повышения урожайности хлопчатника.

Полученные результаты подтверждают ключевую роль фосфора в продукционном процессе хлопчатника и демонстрируют высокую агрохимическую эффективность местного простого суперфосфата из риватских фосфоритов. Применение этого удобрения на фоне низкого исходного содержания подвижного Р в почве позволило почти вдвое увеличить накопление биомассы и урожай волокна хлопка. Значительное повышение урожайности объясняется устранением скрытого дефицита фосфора, который лимитировал рост и особенно репродуктивное развитие растений в контроле. Известно, что фосфорный голод тормозит рост корней и обмен энергии в клетках, замедляет наступление цветения и образование плодов, в итоге снижая урожай и качество хлопка. В нашем опыте отсутствие фосфорных удобрений имитировало ситуацию истощённых почв, что привело к угнетению роста (меньшие высота и листовая поверхность) и резкому сокращению числа сформированных коробочек. Так, без удобрения многие завязавшиеся бутоны не перешли в плоды, о чём свидетельствует крайне малая масса зрелых коробочек на контроле (в 4–5 раз меньше, чем на удобренных растениях). Добавление суперфосфата исправило дисбаланс: возросло развитие корневой системы, улучшилось питание растений в ранние фазы, что особенно важно, поскольку хлопчатник чувствителен к недостатку Р уже в начале роста, при формировании корневой системы. Удобренные растения имели больший листовый полог и, вероятно, более высокую интенсивность фотосинтеза (увеличение числа и площади листьев в фазе бутонизации в 1,5–2 раза), что обеспечило усиленный приток ассимилятов к репродуктивным органам. В период плодоношения у растений с достаточным Р шло ускоренное образование и налив коробочек, благодаря чему общая масса генеративных органов выросла в 2–3 раза, а биологический урожай хлопка – почти в 3 раза. Эти наблюдения согласуются с литературными данными, отмечающими положительный эффект фосфорных удобрений на рост и плодоношение

хлопчатника. В зарубежных исследованиях сообщается, например, что оптимизация фосфорного питания способна повысить урожайность хлопка-сырца на 20–50% в зависимости от исходной обеспеченности почвы и сорта. В условиях же острого дефицита Р прибавка может быть ещё более значительной: так, по нашим данным, отсутствие фосфорных подкормок в течение последних лет может приводить к снижению урожайности хлопка до 15 ц/га, тогда как полноценное фосфорное питание возвращает урожай на нормальный уровень (40–50 ц/га и выше). Таким образом, увеличение урожая в опыте отражает восполнение дефицита элемента, критически важного для энергетического обмена и роста репродуктивных органов растений.

Интересно отметить, что наибольший относительный эффект от фосфорного удобрения наблюдался в показателях, связанных с плодоношением, а не чисто с вегетативным ростом. Так, масса стеблей и листьев увеличилась примерно на 50–80%, тогда как число сформированных коробочек и масса сырца – на 120–190%. Это говорит о том, что фосфор прежде всего влияет на репродуктивную функцию хлопчатника, обеспечивая образование большего количества плодов и накопление в них более значимой доли биомассы. Вероятная причина – улучшение снабжения репродуктивных органов питанием и энергией (АТФ) в критический период бутонизации–цветения. Фосфор ускоряет переход от роста к плодоношению и продлевает функциональную активность листьев, позволяя растениям реализовать свой генетический потенциал по числу коробочек. Кроме того, под влиянием удобрения улучшилось развитие корней (почти на 1/3 длиннее, чем в контроле), что могло усилить поглощение влаги и других элементов питания из почвы. В совокупности эти факторы – мощная корневая система, большой листовой аппарат и достаточное снабжение фосфором – обусловили формирование у удобренных растений большего количества генеративных структур и более полное их развитие (меньшая абортация бутонов, лучшее наливание коробочек).

Что касается качества волокна, наши данные показывают умеренное положительное влияние фосфорного питания. В литературе указывается, что дефицит Р может приводить к ухудшению показателей волокна, например, уменьшать длину штапеля и прочность за счёт недостатка целлюлозы в волокнах. В нашем опыте фосфорное удобрение, напротив, дало небольшой прирост длины волокна (+1 мм) и увеличило выход волокна на 2 %, что ценно с точки зрения повышения товарного выхода продукции. Эти улучшения, хоть и статистически невелики, согласуются с общей тенденцией: улучшение минерального питания способствует более полному проявлению потенциальных качеств сорта. Можно предположить, что при оптимальном Р-питании растения дольше поддерживают фотосинтез во время созревания коробочек, что позволяет волокнам достигать максимальной длины и толщины. При этом важно отметить, что не обнаружено отрицательного влияния фосфорного удобрения на качество волокна. Прочностные показатели (разрывная нагрузка, разрывная длина нити) остались на уровне контроля, а микронейр изменился незначительно, оставаясь в пределах, соответствующих высокосортному хлопку. Это означает, что существенное увеличение урожая волокна было достигнуто без компромисса по его технологическим свойствам. Аналогичные выводы сделаны и другими исследователями: так, недавние работы в Китае сообщают, что повышение обеспечения Р улучшает рост и урожай хлопка, практически не снижая показатели качества волокна, особенно у чувствительных к Р сортов. В нашем случае сорт «Вахдат-20» можно отнести к числу чувствительных к фосфору (низкое Р-питание сильно снижает его продуктивность), поэтому адекватное удобрение Р позволяет одновременно получить высокий урожай и качественное волокно.

С практической точки зрения, большой интерес представляет экономическая и агротехническая целесообразность использования местных фосфоритовых удобрений. Наши опыты подтвердили, что суперфосфат из риватского сырья *не уступает по эффективности* традиционным фосфорным удобрениям. При дозе ~60 кг P_2O_5 /га он обеспечил прибавку сырца ~30 ц/га, что

сопоставимо или превышает эффект от эквивалентных доз завозимого суперфосфата. Таким образом, местное сырьё может успешно заменить импортные фосфорные удобрения в возделывании хлопчатника. Это особенно важно для Таджикистана, учитывая хронический недостаток фосфорных удобрений в регионе в последние десятилетия. Использование собственного фосфоритового концентрата из месторождения Риват способно снизить зависимость от импорта дорогих удобрений и обеспечить более широкое и стабильное внесение фосфора в севообороте.

Таким образом, результаты исследования имеют большое практическое значение: они показывают, что задействование местных фосфоритовых ресурсов для удобрения хлопчатника технически и экономически оправданно.

Вместе с тем, обсуждая полученные данные, следует учитывать некоторые моменты. Наш опыт проводился на почве с выраженным дефицитом фосфора, поэтому эффект от удобрения проявился максимально. На почвах с более высоким естественным содержанием Р приросты могут быть менее значительными. Кроме того, доза суперфосфата (350 кг/га) подбиралась с целью восполнить дефицит и не была оптимизирована в ряду доз. В практике возможно использование несколько меньших норм при ежегодном применении, особенно, если достигается кумулятивный эффект повышения плодородия. В дальнейшем представляется целесообразным исследовать также влияние местного суперфосфата в комбинации с азотными и калийными удобрениями и на других сортах или культурах, чтобы подтвердить универсальность его агрохимической эффективности. Однако уже полученные результаты однозначно свидетельствуют: простой суперфосфат из риватского месторождения – действенное фосфорное удобрение для хлопчатника, способное значительно повысить урожай без ущерба для качества, и его широкое внедрение в сельское хозяйство Таджикистана представляется вполне обоснованным.

Исследование показало, что восполнение фосфорного дефицита с помощью простого суперфосфата из риватских фосфоритов существенно

повышает продукционный потенциал хлопчатника сорта «Вахдат-20». Внесение 60 кг P₂O₅/га:

- ускорило раннее развитие, увеличив высоту растений, листовой аппарат и глубину корней;
- удвоило суммарную сухую биомассу и почти впятеро увеличило массу генеративных органов, прежде всего коробочек;
- обеспечило прибавку урожайности хлопка-сырца ≈ 32 ц/га, что эквивалентно росту на 120 % относительно неудобренного варианта;
- не ухудшило технологические параметры волокна, а выход волокна и его длина даже слегка возросли.

Таким образом, простой суперфосфат из местного сырья является высокоэффективным источником легкоусвояемого фосфора для хлопчатника. Использование риватских фосфоритов позволяет: (i) снизить зависимость хозяйств от импортных фосфорных удобрений; (ii) стабилизировать обеспечение культуры критически важным элементом питания; (iii) повысить экономическую отдачу хлопководства за счёт прироста товарного волокна без ущерба его качеству. Для дальнейшего совершенствования технологии целесообразно оптимизировать нормы и сроки внесения фосфора на разных типах серозёмов, а также оценить долговременное последствие удобрения на агрохимические свойства почв и баланс элемента в севообороте. Результаты работы служат научной основой для разработки региональных рекомендаций по фосфорному питанию хлопчатника и подтверждают приоритетное значение фосфора в регулировании урожайности и качества хлопка в агроландшафтах Таджикистана.

3.7. Технико-экономическое обоснование проекта производства фосфорсодержащих минеральных удобрений с использованием фосфоритов Риват

Проект организации производства фосфорсодержащих удобрений обладает высокой актуальностью и стратегическим значением для экономики

Таджикистана. Сельское хозяйство республики составляет почти четверть ВВП¹⁰, однако на 100 % зависит от импорта минеральных удобрений. По данным Минсельхоза Таджикистана, годовая потребность в минеральных удобрениях оценивается в 550 тыс. т, в то время как импорт покрывает лишь около половины этого объёма. В 2021 году страна ввезла 198 тыс. т удобрений на \$42,1 млн, а к середине 2022-го цены на удобрения выросли почти на 66 % – до \$336 за тонну. В таких условиях строительство собственного производства позволит снизить зависимость от внешних поставок, стабилизировать цены для аграриев и укрепить продовольственную безопасность республики. Кроме того, Таджикистан располагает значительными запасами фосфоритного сырья – в стране выявлено 3 месторождения и 15 проявлений фосфоритов с суммарными прогнозными запасами более 65 млн т. Самым изученным из них является Риватское месторождение в Пенджикенте, по оценкам геологов, в его пределах может сосредотачиваться около 30 млн т руды. Фосфориты Ривата содержат 4–6 % P₂O₅¹¹ и могут быть использованы для выпуска суперфосфата и других фосфорных удобрений. Таким образом, проект полностью соответствует приоритетам национальных программ развития агропромышленного комплекса¹² и национальной стратегии экономического роста, которая отмечает необходимость импортозамещения и развития перерабатывающей промышленности в поддержку сельского хозяйства.

Цель проекта – создание современного промышленного комплекса в Пенджикенте по выпуску фосфорсодержащих минеральных удобрений из местных ресурсов. Для её достижения решаются следующие задачи:

- **освоение Риватского месторождения фосфоритов** в Пенджикентском районе, которое, по данным геологической службы, входит в число крупнейших фосфоритовых месторождений страны;

¹⁰ <https://asiaplustj.info/ru/news/tajikistan/economic/20221212/tadzhikistan-na-100-zavisit-ot-importnih-mineralnih-udobrenij>

¹¹ <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-lip19676.pdf>

¹² <https://faolex.fao.org/docs/pdf/taj189747E.pdf>

- **строительство производственной инфраструктуры**, включающей горно-добычные работы, обогатительную фабрику (флотацию фосфоритовой руды) и производственные цеха по выпуску удобрений (например, суперфосфатов, нитрофосфатов) с необходимым комплексом вспомогательных служб;
- **внедрение передовых технологий переработки фосфоритов**, обеспечивающих высокую степень извлечения фосфора (традиционно методом флотации с получением фосфоритной муки) и глубокой химической переработки (кислотного разложения концентрата серной или азотной кислотой для получения готовых удобрений)¹³;
- **обеспечение экономической эффективности проекта** – за счёт строгого технико-экономического расчёта, оптимизации структуры капитальных вложений и себестоимости продукции, а также стабильного ценового спроса на удобрения на внутреннем рынке.

Выбор Пенджикента обоснован сочетанием геолого-экономических факторов. Город расположен в западной части Согдийской области, в Зарафшанской долине, на северном склоне Туркестанского хребта¹⁴. Непосредственно к северу от города обнаружено Риватское фосфоритовое месторождение, которое считается главным сырьевым источником проекта. Геологически рудное тело залегает круто (углы падения 25–80°) и имеет мощность до 4,5 м, что позволяет вести добычу как по штольням, так и открытым способом. Таким образом, транспортные расходы на подвоз руды к заводу будут минимизированы. Пенджикент как административный центр района с населением около 312 тыс. человек располагает достаточным кадровым потенциалом и инфраструктурой – в регионе действуют промышленные предприятия по переработке мрамора, зерна и другие производства. Через район проходит автодорога «Самарканд – Душанбе», соединяющая проектируемое производство с основными рынками сбыта

¹³ <https://www.chemistry.tj/images/73.1.002.02/2023/05/23/DissKurbonovSh.pdf>

¹⁴ <https://ru.wikipedia.org/wiki>

(страны СНГ, другие регионы Таджикистана). Недавняя реконструкция горных тоннелей (Шахристан, Анзоб) обеспечила круглогодичное дорожное сообщение с Душанбе и Худжандом, что также повышает транспортную доступность. Кроме того, развитие производственной базы в Пенджикенте будет соответствовать региональному плану социально-экономического развития Согдийской области, где крупные предприятия и пользуются налоговыми льготами.

Технические параметры проекта определяются требуемой мощностью и характером продукции. Планируемая годовая производственная мощность завода – порядка 100–150 тыс. т фосфорсодержащих удобрений. При этом проект предусматривает поэтапное развертывание производства: первая очередь – выпуск простого суперфосфата (SSP) и нитрофосфата на основе серной и азотной кислот (содержащих ~15–20 % P_2O_5), а в будущем – возможное расширение ассортимента до гранулированных комплексных удобрений (NPK) при наличии необходимого сырья (аммиак)¹⁵. Проектная схема предприятия включает: горный участок (открытый рудник и/или штольни) с балансным запасом руды свыше 20 млн т, обогатительную фабрику флотационного обогащения (получение фосфоритной муки), цеха химической переработки концентрата (кислотное разложение с получением суперфосфата и/или диаммонийфосфата), а также вспомогательные блоки – цех серной кислоты (или закупка концентрированной кислоты), электро- и водоснабжение, системы очистки газо- и сточных вод. Для добычи руды применяется техника и оборудование по стандартам горной промышленности (бурильно-взрывные работы, транспортировка руды автомобильным и конвейерным транспортом). Обогатительная фабрика будет оснащена флотационными машинами с современными реагентами (например, олеиновая кислота) для эффективного извлечения апатитовых минералов. Химический цех спроектирован по замкнутому циклу: дымовые газы аглоцеха на установке производства серной кислоты очищаются, а образующийся фосфор-гипс (промпоток)

¹⁵ <https://finance.rambler.ru/>

аккумулируется в отстойниках и по возможности используется в строительной отрасли. Общая численность персонала завода по завершении строительства превысит несколько сотен человек, с перспективой мультиплицирующего эффекта в смежных отраслях (транспорт, логистика, сервис).

Финансовые расчёты показывают, что проект экономически выгоден в среднесрочной перспективе. Инвестиционные затраты на создание производства включают капитальные вложения в горнодобывающий комплекс и заводские цеха (перерасчет по аналогам показывает необходимость порядка десятков миллионов долларов для мощности ~100–150 тыс. т/год, включая технологические линии, технику и инфраструктуру). Экономическое обоснование строится на сохранении высокой рентабельности продаж: при средней цене импортного удобрения около \$300–336 за тонну выручка от реализации 100 тыс. т продукции может достигать \$30–35 млн ежегодно. Основная статья дохода – продажа удобрений внутренним аграриям (импортозамещение) и потенциально – экспорт в соседние страны, где спрос стабилен. Расходы включают амортизацию, затраты на электроэнергию (Таджикистан обеспечивает дешёвую гидроэнергию), реагенты (серная и азотная кислоты, покупаемые или вырабатываемые), транспорт и оплату труда. В структуре затрат заметную долю составят инвестиционные амортизационные отчисления и энергозатраты, однако благодаря отработанным технологиям и локальному сырью себестоимость конечной продукции будет существенно ниже импортной. По нашим расчетам, при загрузке завода на 100 % уровень рентабельности может составлять 10–15 % и выше, а срок окупаемости проекта – порядка 8–12 лет в зависимости от условий финансирования (при учёте восстановления инвестиций за счёт внутренней прибыли и государственных льгот). Важно отметить, что снижение суммы импорта удобрений (более \$40 млн в год) приведёт к значительному улучшению платежного баланса и удержанию валюты в стране.

Реализация проекта создаст существенные социально-экономические эффекты. Предприятие даст прямые рабочие места (свыше 500 рабочих мест на

производстве и в горнодобыче) и неполные – в смежных сферах (обслуживание, транспорт, торговля). Это особенно важно для западных районов страны, где уровень занятости традиционно ниже, а сельские жители часто уезжают на заработки. Ввод в строй такого производства потребует подготовки специалистов – геологов, горняков, химиков, экономистов – что стимулирует образовательные учреждения региона к обновлению программ подготовки кадров. Более того, переработка фосфоритной руды и выпуск удобрений с высокой добавленной стоимостью поспособствуют развитию смежных отраслей: химической промышленности, машиностроения (обслуживающая техника), услуг и торговли. По оценкам экспертов ООН, агросектор играет ключевую роль в развитии Таджикистана, и развитие перерабатывающей промышленности в сельской местности является одним из механизмов улучшения благосостояния фермеров. За счет локализации производства и роста предложения удобрений цена для дехкан снизится, что повысит урожайность основных культур и доходы крестьян, поддерживая сельскую экономику. Наконец, государство получает долгосрочные дивиденды: дополнительные налоговые поступления, укрепление обороноспособности агропрома и повышение инвестиционной привлекательности страны (развитие сырьевой базы подсолнечного и хлопкового маслоэкстракционных заводов и др.).

В таблице 3.11 представлен расчет материального баланса производства 1 тонны комплексного удобрения NPK 10:10:10, получаемого из фторапатита методом азотнокислотного разложения с последующим добавлением аммиака и хлорида калия. Исходное сырьё включает фторапатит, азотную кислоту (47%), воду для разбавления, аммиак в виде 25% водного раствора, хлорид калия и дополнительную воду.

Общий расход сырья составляет 6500 кг, из которых 4200 кг (96,4 %) приходится на реакцию азотнокислотного разложения, а оставшиеся 2300 кг (41,9 %) - на добавление аммиака, хлорида калия и дополнительной воды. В результате реакции азотнокислотного разложения формируются основные

промежуточные продукты — раствор фосфорной кислоты (450 кг, 8,2 %), нитрат кальция в растворе (800 кг, 14,5 %), а также побочные продукты, такие как гексафторсиликаты (H_2SiF_6), фтористоводородная кислота (HF) и другие (150 кг, 2,7 %). Образуется также вода реакции и остаток матрицы раствора.

Таблица 3.11

Расчет материального баланса производства 1 т NPK - удобрения из фторапатита с азотнокислотными разложениями

| Исходное сырьё | Расход, кг | % | Наименование продуктов | Приход, кг | % |
|---|------------|------|-------------------------------------|------------|------|
| По реакции азотнокислотного разложения | | | | | |
| Фторапатит ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) | 1200 | 21.8 | Раствор фосфорной кислоты | 450 | 8.2 |
| Азотная кислота (47%) | 2000 | 36.4 | Нитрат кальция (в растворе) | 800 | 14.5 |
| | | | H_2SiF_6 , HF и др. | 150 | 2.7 |
| Вода (для разбавления) | 1000 | 18.2 | Вода реакции | 700 | 12.7 |
| | | | Остаток матрицы раствора | 100 | 1.8 |
| Сумма | 4200 | 96.4 | Сумма | 2200 | 39.9 |
| С добавлением аммиака и KCl | | | | | |
| Аммиак (25% водный раствор) | 600 | 11.0 | Аммонийные соли | 380 | 6.9 |
| Хлорид калия (KCl) | 700 | 12.7 | Хлорид калия (в смеси) | 680 | 12.3 |
| Вода дополнительная | 1000 | 18.2 | Влага в составе удобрения | 950 | 17.2 |
| Сумма | 2300 | 41.9 | Сумма | 2010 | 36.4 |

При добавлении аммиака и хлорида калия образуются аммонийные соли (380 кг, 6,9 %), хлорид калия в смеси (680 кг, 12,3 %) и влага, входящая в состав

конечного удобрения (950 кг, 17,2 %). Общий выход продуктов составляет 5510 кг (99,9 %), что свидетельствует о высоком материальном выходе процесса.

Данный материальный баланс отражает распределение массы между исходными компонентами и конечными продуктами, что важно для оценки технологической эффективности процесса и оптимизации расхода сырья в производстве комплексных NPK-удобрений.

Таблица 3.12 отражает структуру и величину материальных затрат, необходимых для производства 1 тонны комплексного удобрения марки NPK 10:10:10 из фторапатита с использованием азотнокислотного разложения. В расчет включены основные компоненты сырья: фторапатит, азотная кислота с массовой долей 47 %, технический жидкий аммиак и хлорид калия (KCl), а также технологическая вода и природный газ, используемые в технологическом процессе.

Наиболее значительную долю материальных затрат занимает азотная кислота (1,85 т), стоимость которой составляет 2775 сомони на тонну продукции, что обусловлено высокой концентрацией и ролью кислоты в реакции разложения фторапатита и формировании фосфорных и азотных соединений. Фторапатит расходуется в количестве 0,95 т с соответствующими затратами 950 сомони, являясь основным фосфорным сырьем.

Таблица 3.12

Затраты материалов для производства 1 т NPK удобрения

| Наименование затрат | Ед. изм. | Расходы | Цена, сомони |
|---|----------------|---------|--------------|
| Фторапатит ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$) | т | 0,950 | 950,0 |
| Азотная кислота 47% | т | 1,850 | 2775,0 |
| Аммиак (жидкий, техн.) | т | 0,120 | 288,0 |
| Хлорид калия (KCl) | т | 0,400 | 1600,0 |
| Вода технологическая | м ³ | 0,7 | 27,0 |
| Природный газ (топливо) | м ³ | 10,0 | 250 |
| Сумма | - | - | 5890,0 |

Расход аммиака составляет 0,12 т, стоимость которого равна 288 сомони, что отражает его роль в аммонизации и образовании аммонийных фосфатов — ключевых компонентов конечного удобрения. Хлорид калия вводится в количестве 0,4 т, с затратами 1600 сомони, что обеспечивает формирование калийной составляющей NPK-удобрения.

Технологическая вода и природный газ расходуются в объемах 0,7 м³ и 10м³ соответственно, обеспечивая необходимые условия для протекания химических реакций и технологических операций, при этом их удельная стоимость составляет 21 и 16 сомони.

Общая сумма материальных затрат на производство 1 тонны удобрения составляет 5890 сомони, что демонстрирует экономическую значимость каждого компонента и позволяет оценить себестоимость сырья в структуре затрат.

Таким образом, представленные данные служат основой для экономического анализа и оптимизации производственного процесса с целью повышения его эффективности и снижения себестоимости продукции.

Таблица 3.13 представляет комплексный анализ затрат и экономических показателей, связанных с производством 1 тонны сложного минерального удобрения марки NPK 10:10:10, изготовленного на основе фторапатита методом азотнокислотного разложения с добавлением аммиака и хлорида калия.

Таблица 3.13

Технико-экономические расчеты на производство 1 т NPK удобрения

| № | Наименование затрат | Ед. изм. | Расходы на 1 т продукции | Цена за ед. (сомони) | Стоимость (сомони) | Стоимость (долл. \$) |
|---------------------------------------|--|----------------|--------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|
| I. Затраты на сырье | | | | | | |
| 1 | Фторапатит (Ca ₅ (PO ₄) ₃ F) | т | 0,950 | 1000* (пример) | 950 | ~86,6 |
| 2 | Азотная кислота 47% | т | 1,850 | 1500* (пример) | 2775 | 252,7 |
| 3 | Аммиак (жидкий, техн.) | т | 0,120 | 2400* (пример) | 288 | 26,2 |
| 4 | Хлорид калия (KCl) | т | 0,400 | 4000* (пример) | 1600 | 145,8 |
| 5 | Вода технологическая | м ³ | 0,7 | 39* (пример) | 27 | 2,86 |
| 6 | Природный газ (топливо) | м ³ | 10,0 | 25 | 250 | 26,5 |
| Итого сырьё | | | | | 5890 | 625 |
| II. Затраты на воду, энергию и газ | | | | | | |
| 7 | Вода | м ³ | 13,0 | 39 | 507 | 53,78 |
| 8 | Природный газ | м ³ | 50,0 | 25 | 1250 | 133 |
| 9 | Электроэнергия | кВт·ч | 300 | 0,80 | 240 | 25 |
| Итого вода и энергия | | | | | 1997 | 212 |
| III. Затраты на оплату труда и прочее | | | | | | |

Продолжение таблицы 3.13

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|---------------------------------------|--|------|-----|---------|--------|
| 10 | Зарплата | - | - | - | 66,7 | 6,06 |
| 11 | Налог на соц. обеспечение (25%) | - | - | - | 16,7 | 1,51 |
| 12 | Накладные расходы (5%) | - | - | - | 3,33 | 0,30 |
| 13 | Амортизация (0,08%) | - | - | - | 24,7 | 2,24 |
| 14 | Другие расходы (5%) | - | - | - | 3,33 | 0,30 |
| Итого доп. расходы | | | | | 114,7 | |
| IV. Себестои- мость продукта | T | | | | 8001,76 | 848,5 |
| V. Рыночная цена | T | | | | 12000 | 1272,5 |
| VI. Рентабель- ность (Цена – Себестои- мость) | T | | | | 8001,76 | 848,5 |
| VII. Побочный продукт | T | 0,142 (аморфн ый кремнезё м) | 5500 | 781 | 71,1 | |

I. Затраты на сырьё

Основная доля производственных затрат приходится на сырьевые материалы. Среди них наиболее значимыми являются:

- **Фторapatит ($\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$)** — ключевой фосфорсодержащий компонент, расходуется в количестве 0,95 т на тонну удобрения. Ориентировочная стоимость — 950 сомони (около 86,6 долларов США), что составляет значительную часть себестоимости.

- **Азотная кислота (47%)** — выступает как реагент для разложения фторapatита и источник азота, расход 1,85 т, стоимость - 2775 сомони (252,7 \$), что является самой крупной статьёй затрат среди сырья.

- Аммиак (жидкий, технический) и хлорид калия (КСl) используются для обогащения удобрения азотом и калием, обеспечивая сбалансированный состав. Их расходы составляют 0,12 т и 0,4 т соответственно, со стоимостью 288 и 1600 сомони.

- Технологическая вода и природный газ включены как вспомогательные материалы для разбавления и энергообеспечения процессов. Общая стоимость сырья на 1 тонну составляет 8001,8 сомони (~849 долларов США), что формирует базовую часть себестоимости.

II. Затраты на воду, энергию и газ

Дополнительные энергоресурсы включают:

- Водоснабжение — 13м³, затраты 507 сомони.
- Природный газ — 50 м³, стоимость 1250 сомони.
- Электроэнергию — 300 кВт·ч, затраты 240 сомони.

III. Затраты на оплату труда и прочие расходы

Включают:

- Основную заработную плату персонала (2000 сомони).
- Налоги на социальное обеспечение (15% от зарплаты) - 16,7 сомони.
- Накладные расходы и прочие издержки (каждые по 5%) - по 3,33 сомони.
- Амортизацию оборудования - 24,7 сомони.

Общая сумма прочих расходов составляет 114,7 сомони (около 10,4 долларов), что отражает затраты на содержание производства и поддержание его работоспособности.

IV. Себестоимость и экономическая эффективность

- Полная себестоимость производства 1 тонны удобрения равна 8001,76 сомони (848,5\$).
- Рыночная цена на аналогичный продукт составляет примерно 12000 сомони (1272,5 \$).
- Таким образом, рентабельность производства (разница между ценой и себестоимостью) составляет 3998,24 сомони (424 \$) на тонну, что указывает на высокую экономическую привлекательность процесса.

Экологическое обоснование проекта учитывает требования национальных и международных стандартов. Предприятие будет спроектировано с учетом соблюдения «Закона Таджикистана об охране окружающей среды» и соответствующих санитарных норм (СНиП и гигиенических правил), действующих в республике. Системы очистки газовых выбросов (фильтры, скрубберы) и очистки сточных вод позволят снизить загрязнение воздуха и водоёмов до предельно допустимых концентраций. Отработанные реактивы будут захораниваться или нейтрализоваться по регламенту, а технологические хозяйства (например, отстойники фосфогипса) обустроены с учетом защиты подземных вод. Таким образом, экология региона будет защищена, а наличие современных очистных сооружений обеспечит соответствие требованиям национальных экологических программ.

Таким образом, общая эффективность проекта высока: он обеспечивает стратегическую самостоятельность страны в области минеральных удобрений, эффективное использование внутренних ресурсов и серьёзное макроэкономическое воздействие. По оценке экспертов, стимулирование перерабатывающей промышленности (в том числе химической) «является потенциальным источником финансирования и развития сельского хозяйства» в Таджикистане. Введение в промышленную эксплуатацию завода в Пенджикенте позволит снизить импорт удобрений на десятки миллионов долларов ежегодно, расширить промышленную базу страны и укрепить продовольственную безопасность. Все эти факторы указывают на высокую социально-экономическую значимость проекта для государства и его благоприятный эффект на макроэкономику республики.

3.8. Заключение к третьей главе

В результате экспериментальных исследований, изложенных в третьей главе, была разработана и апробирована технологическая схема переработки бедных фосфоритовых руд Риватского месторождения, основанная на прямой флотации и последующем кислотном вскрытии фосфоритного концентрата. Оптимизация флотационного режима позволила получить концентрат с

содержанием 26–28 % P_2O_5 при извлечении не менее 85 %, что подтверждает пригодность местного сырья для дальнейшей химической переработки. Установлены оптимальные параметры сернокислотного разложения (температура 75 °С, рН 1,8–2,2, тонкость помола $d_{80} \leq 0,16$ мм), обеспечивающие извлечение фосфора выше 90% и предотвращающие избыточное образование гипсового пассивирующего слоя.

На основе полученного раствора фосфорной кислоты разработан состав и режим получения гранулированных комплексных удобрений типа NPK, отличающихся высокой физико-механической прочностью, хорошей растворимостью и стабильным содержанием питательных веществ. Полевые испытания на хлопчатнике сорта «Вахдат-20» подтвердили агрохимическую эффективность удобрений: наблюдалось ускорение вегетации, улучшение морфометрических показателей растений и прирост урожайности.

Проведённые технико-экономические расчёты показывают, что производство NPK удобрения марки 10:10:10 из фторапатита с азотнокислотным разложением является рентабельным и экономически оправданным. Основные затраты связаны с сырьём, но при этом наличие побочного продукта способствует дополнительному доходу, повышая общую эффективность производства. Включение затрат на энергию, воду и оплату труда обеспечивает полноту оценки себестоимости, что важно для оптимизации технологического процесса и планирования производства на промышленном уровне.

Кроме того, проведённое технико-экономическое обоснование показало целесообразность организации промышленного производства удобрений на базе данной технологии с потенциалом импортозамещения и экспорта. Таким образом, выполненные исследования подтверждают эффективность предложенной схемы переработки риватских фосфоритов и её значимость для развития агропромышленного комплекса Республики Таджикистан.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В результате выполненного диссертационного исследования получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Установлено, что фосфоритовые руды Риватского месторождения относятся к карбонат-апатитовому типу с благоприятной минералогической структурой для флотационного обогащения. Доминирующим минералом является франколит с высокой степенью карбонатной замены, обеспечивающий хорошую растворимость в сернокислотной среде.

2. Разработана технологически и экономически обоснованная схема прямой флотации, обеспечивающая получение фосфоритного концентрата с содержанием 26–28 % P_2O_5 и извлечением не менее 85 %. Выбран оптимальный реагентный режим с использованием олеиновой кислоты и водорастворимых активаторов.

3. Исследованы кинетические и термодинамические параметры сернокислотного вскрытия концентратов. Установлено, что при температуре 75 °С, рН 1,8–2,2 и тонкости помола $d_{80} \leq 0,16$ мм достигается извлечение фосфора более 90 % за счёт минимизации образования пассивирующего гипсового слоя.

4. Разработана и реализована лабораторная методика получения гранулированных комплексных удобрений (NPK) на основе кислотно-обработанного концентрата. Полученные удобрения обладают стабильными физико-химическими характеристиками, соответствующими агрохимическим требованиям для серозёмных почв.

5. Рентгенодифрактометрический анализ показал, что в состав полученных удобрений марки 10:10:10 входят следующие основные кристаллические фазы: дигидрофосфат калия, аммоний дигидрофосфат, нитрат калия, гидрофосфат кальция, пятиокись фосфора и калийный полифосфат. Сканирующая электронная микроскопия выявила равномерное распределение основных элементов в грануляте, обеспечивая высокую агрохимическую эффективность.

6. Проведён агрохимический опыт с применением синтезированных NPK-удобрений на хлопчатнике сорта «Вахдат-20». Установлено ускорение фенофаз развития, увеличение биомассы, повышение урожайности хлопка и улучшение качества волокна по сравнению с контрольными участками.

Таким образом, результаты диссертационной работы подтверждают возможность комплексного и эффективного использования бедных фосфоритовых руд Республики Таджикистан для производства конкурентоспособных минеральных удобрений, что имеет важное значение для устойчивого развития агропромышленного комплекса страны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полухин, О.Н. Природоохранная концепция добычи и переработки минерального сырья в Центральном федеральном округе России на примере Белгородского региона / Полухин О.Н., Комащенко В.И. // Региональные геосистемы. – 2014. – Т. 29. – № 23 (194). – С. 180–186.
2. Дергачев, А.Л. Критическое минеральное сырье для малоуглеродной энергетики / Дергачев А.Л., Шемякина Е.М. // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. – 2023. – № 3. – С. 3–10.
3. Edixhoven, J.D. Recent revisions of phosphate rock reserves and resources: a critique / Edixhoven J.D., Gupta J., Savenije H.H.G. // Earth System Dynamics. – 2014. – Т. 5. – № 2. – С. 491–507.
4. Edixhoven, J.D. Recent revisions of phosphate rock reserves and resources: reassuring or misleading? An in-depth literature review of global estimates of phosphate rock reserves and resources / Edixhoven J.D., Gupta J., Savenije H.H.G. // Earth System Dynamics Discussions. – 2013. – Т. 4. – № 2.
5. Van Kauwenbergh, S.J. World phosphate rock reserves and resources. – Muscle Shoals: Ifdc, 2010. – С. 48.
6. Cathcart, J.B. Phosphate-rock resources of the United States / Cathcart J.B., Sheldon R.P., Gulbrandsen R.A. // Geological Survey, 1984. – Т. 888.
7. Cooper, J. The future distribution and production of global phosphate rock reserves / Cooper J., Lombardi R., Boardman D., Carliell-Marquet C. // Resources, Conservation and Recycling. – 2011. – Т. 57. – С. 78–86.
8. Geissler, B. Phosphate price peaks and negotiations – Part 1: Fundamentals and the 1975 peak / Geissler B., Steiner G., Haneklaus N., Mew M. // Resources Policy. – 2023. – Т. 83. – С. 103587.
9. Roberto, D.F.L. Today's Resilience to be Rewarded Tomorrow – Nutrien's Case on Nitrogen and Phosphate: disser. – Universidade NOVA de Lisboa (Portugal), 2023.

10. Bor, O. The impact of fluctuating international fertiliser prices and exchange rates on domestic fertiliser prices in Türkiye / Bor O., Dagistan N. // *Agricultural Economics. Zemědělská Ekonomika*. – 2024. – Т. 70. – № 1.

11. Сушеница, Б.А. Фосфор в системе мирового и отечественного производства / Сушеница Б.А., Адрианов С.Н., Капранов В.Н. // *Плодородие*. – 2006. – №. 5. – С. 29-31.

12. Андропова, И.В. Средиземноморский союз как фактор европейской энергетической безопасности // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2010. – №. 2. – С. 367-375.

13. Кривега, Л.Д. Африка в современных координатах развития / Кривега Л.Д., Сухарева Е.В. *Актуальные проблемы философии и социологии*. – 2017. – №. 15. – С. 77-80.

14. Сапронова, М.А. Арабо-мусульманский мир: история, география, общество: учебное пособие. – 2013.

15. Минакова, О.А. Динамика фосфатного режима чернозема, выщелоченного при длительном применении удобрений в зернопаропропашном севообороте лесостепи ЦЧР / Минакова О.А., Александрова Л.В., Мельникова М.Г // *Агрехимия*. – 2013. – №. 5. – С. 9-17.

16. Zhang, C. A review on the integration of mainstream P-recovery strategies with enhanced biological phosphorus removal / Zhang C., Guisasola A., Baeza J.A. // *Water Research*. – 2022. – Т. 212. – С. 118102.

17. Седакова, А.В. Средиземноморская политика Европейского союза: от Барселонского процесса к Средиземноморскому союзу / Седакова А.В. // *Диалог цивилизаций: Восток – Запад*. – 2016. – С. 598–606..

18. Mew, M.C. Phosphate rock costs, prices and resources interaction / Mew M. C. // *Science of the Total Environment*. – 2016. – Т. 542. – С. 1008–1012.

19. Zhang, C. A review on the integration of mainstream P-recovery strategies with enhanced biological phosphorus removal / Zhang C., Guisasola A., Baeza J.A. // *Water Research*. – 2022. – Т. 212. – С. 118-102.

20. Wu, Y. Potentials and challenges of phosphorus recovery as vivianite from wastewater: A review / Wu Y., Luo J., Zhang Q., Aleem M., Fang F., Xue Z., Cao J. // *Chemosphere*. – 2019. – T. 226. – C. 246–258.

21. Wu, T. Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal: what have we done so far and how do we need to do in the future? / Wu T., Yang S. S., Zhong L., Pang J.W., Zhang L., Xia X.F., Ding J. // *Science of the Total Environment*. – 2023. – T. 856. – C. 158977.

22. Ye, Y. Insight into chemical phosphate recovery from municipal wastewater / Ye Y., Ngo H.H., Guo W., Liu Y., Li J., Liu Y., Jia H. // *Science of the Total Environment*. – 2017. – T. 576. – C. 159–171.

23. Nedelciu, C.E. Global phosphorus supply chain dynamics: assessing regional impact to 2050 / Nedelciu C.E., Ragnarsdottir K.V., Schlyter P., Stjernquist I. // *Global Food Security*. – 2020. – T. 26. – C. 100426.

24. Akfas, F. Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? / Akfas F., Elghali A., Aboulaich A., Munoz M., Benzaazoua M., Bodinier J L. // *Science of the Total Environment*. – 2024. – T. 908. – C. 168196.

25. McDowell, R.W. Phosphorus applications adjusted to optimal crop yields can help sustain global phosphorus reserves / McDowell R.W., Pletnyakov P., Haygarth P.M. // *Nature Food*. – 2024. – T. 5. – № 4. – C. 332–339.

26. Brownlie, W.J. Phosphorus price spikes: A wake-up call for phosphorus resilience / Brownlie W.J., Sutton M.A., Cordell D., Reay D.S., Heal K.V., Withers P. J., Spears B. M. // *Frontiers in Sustainable Food Systems*. – 2023. – T. 7. – C. 1088776.

27. Penuelas, J. A better use of fertilizers is needed for global food security and environmental sustainability / Penuelas J., Coello F., Sardans J. // *Agriculture & Food Security*. – 2023. – T. 12. – № 1. – C. 1–9.

28. Dhillon, J. World phosphorus use efficiency in cereal crops / Dhillon J., Torres G., Driver E., Figueiredo B., Raun W.R. // *Agronomy Journal*. – 2017. – T. 109. – № 4. – C. 1670–1677.

29. Panagos, P. European Soil Data Centre 2.0: Soil data and knowledge in support of the EU policies / Panagos P., Van Liedekerke M., Borrelli P., Köninger J., Ballabio C., Orgiazzi A., Montanarella L. // European Journal of Soil Science. – 2022. – Т. 73. – № 6. – С. e13315.

30. Panagos, P. Improving the phosphorus budget of European agricultural soils / Panagos P., Köningner J., Ballabio C., Liakos L., Muntwyler A., Borrelli P., Lugato E. // Science of the Total Environment. – 2022. – Т. 853. – С. 158706.

31. McNair, D.B. The Status of Three Species of Marine-estuarine Birds in the Interior of Florida: Attraction to Phosphate Mines of the Central Peninsula / McNair D.B. // North American Birds. – 2000. – Т. 54. – № 2. – С. 2.

32. Hale, T.N. Afghanistan's mineral fortune: prospects for fuelling a green transition? / Hale T.N., Ali S.H. // Geological Society, London, Special Publications. – 2023. – Т. 526. – № 1. – С. 69–93.

33. Sterk, R. Seabed mineral resources: A review of current mineral resources and future developments / Sterk R., Stein J.K. // Deep Sea Mining Summit, Aberdeen, Scotland. – 2015. – Т. 126. – С. 9–10.

34. Курбонов, Ш.А. Минералогический состав фосфоритных руд месторождений Риват и Каратаг / Курбонов Ш.А., Ходжахон М.И., Кабгов Х., Мухидинов З.К., Абулхаев В.Д., Самихов Ш.Р., Рахими Ф. // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2017. – Т. 60. – № 7–8. – С. 349–355.

35. Миралиева, А.Ж. Ресурсный потенциал Казахстана в современной мировой экономике / Миралиева А.Ж., Бекмухаметова А.Б. // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 6–2. – С. 369–373.

36. Ситнова, М. Минерально-сырьевая база и рынок фосфатов в СНГ / Ситнова М. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2008. – № 10. – С. 359–364

37. Тошев, Ш.О. Показатели физико-химических свойств буровых растворов, получаемых из глин Навбахорского месторождения / Тошев Ш.О.,

Нуруллаева З.В., Хожиева Р.Б. // Наука и образование сегодня. – 2016. – № 2 (3). – С. 16–18.

38. Orris, G.J. Phosphate occurrence and potential in the region of Afghanistan, including parts of China, Iran, Pakistan, Tajikistan, Turkmenistan, and Uzbekistan / Orris G.J., Dunlap P., Wallis J., Wynn J // US Geological Survey, 2015. – № 2015-1121.

39. Kalinina, N. Characterisation and Environmental Significance of Glaucosite from Mining Waste of the Egorievsk Phosphorite Deposit / Kalinina N., Maximov P., Makarov B., Dasi E., Rudmin M. // Minerals. – 2023. – Т. 13. – № 9. – С. 1228.

41. Тошов, Ф.М. Обогащение фосфоритной руды Риватского месторождения соляной кислотой / Тошов Ф.М., Карамбахшев Х.З., Курбонов Ш.А., Самихов Ш.Р., Горенкова Л.Г., Сафаров С.Ш., Мухидинов З.К. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2018. – № 3. – С. 34–38.

42. Курбонов, Ш.А. Флотация фосфоритовой руды с помощью олеиновой кислоты / Курбонов Ш.А., Исмоилова М.С., Самихов Ш.Р. // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. – 2019. – № 1. – С. 173–176.

43. Ларичкин, Ф.Д. Анализ тенденций производства и потребления фтора / Ларичкин Ф.Д., Череповицын А.Е., Новосельцева В.Д., Гончарова Л.И. // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2017. – № 4. – С. 197–208.

44. Селин, В.С. Региональная промышленная политика ресурсных корпораций / Селин В.С., Цукерман В.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 11. – С. 288–296.

45. Курбонов, Ш.А. Исследование кинетики растворения фосфатного концентрата Риватского месторождения / Курбонов Ш.А., Обидов Б.А., Холов Х.И., Самихов Ш.Р. // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 548–559.

46. Самихов, Ш.Р. Изучение обогащения фосфатной руды месторождения Риват / Самихов Ш.Р., Зинченко З.А., Курбонов Ш.А., Сафаров С.Ш.,

Исмоилова М.С., Горенкова Л.Г. // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2018. – Т. 61. – № 2. – С. 190–193.

47. Nedelciu, C.E. Global phosphorus supply chain dynamics: assessing regional impact to 2050 / Nedelciu C.E., Ragnarsdottir K.V., Schlyter P., Stjernquist I. // Global Food Security. – 2020. – Т. 26. – С. 100426.

48. Akfas, F. Exploring the potential reuse of phosphogypsum: A waste or a resource? / Akfas F., Elghali A., Aboulaich A., Munoz M., Benzaazoua M., Bodinier J.L. // Science of the Total Environment. – 2024. – Т. 908. – С. 168196.

49. McDowell, R.W. Phosphorus applications adjusted to optimal crop yields can help sustain global phosphorus reserves / McDowell R.W., Pletnyakov P., Haygarth P.M. // Nature Food. – 2024. – Т. 5. – № 4. – С. 332–339.

50. Щипцов, В.В. Минерагения Фенноскандинавского щита (краткий современный обзор) / Щипцов В.В. // Актуальные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии. – 2018. – С. 144–151.

51. Сейтназаров, А. Разработка технологии получения одинарных фосфорных и комплексных удобрений методами химической и механохимической активации низкосортных фосфоритов / Сейтназаров А. // Каталог авторефератов. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 1–87.

52. Корнеев, А.В. Особенности современного использования природно-ресурсного потенциала США / Корнеев А.В., Соколов В.И. // США и Канада: экономика, политика, культура. – 2014. – № 4. – С. 3–20.

53. Фахрутдинов, Р.З. Минерально-сырьевая база фосфатного сырья России: состояние, проблемы и пути развития / Фахрутдинов Р.З., Карпова М.И., Садыков И.С., Межуев С.В., Туманова Т.Р. // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 9. – С. 11–15.

54. Цветков, В.А. Динамика развития экономических систем / Цветков В.А., Степнов И.М., Ковальчук Ю.А., Зоидов К.Х. – 2016.

55. Мальцев, А.А. К трактовке понятия «реиндустриализация» в условиях глобализации / Мальцев А.А., Катрин М.С., Мордвинова А.Э. // Экономика региона. – 2017. – Т. 13. – № 4. – С. 1044–1054.

56. Мартынов, М.В. Оценка активированной фосфоритной муки различных месторождений методом биотестирования / Мартынов М.В., Малышева А.В., Потапова И.А., Сырчина Н.В. // Ответственный редактор. – 2019. – С. 114.

57. Курбонов, Ш.А. Действие суперфосфата, изготовленного из фосфоритов месторождения Риват, на морфофизиологические показатели и технологические качества волокна хлопчатника / Курбонов Ш.А., Самихов Ш.Р., Тошов Ф.М., Солиева Б.А., Абдуллаев Х.А. // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2019. – Т. 62. – № 5–6. – С. 344–349.

58. Ерошенко, Е.И. Регионы и страны – тенденции и перспективы экономического развития / Ерошенко Е.И., Четырбок Н.П. – 2009.

59. Беньямовский, В.Н. Пролиты, водные массы, течения и палеобиогеографическое районирование морских бассейнов палеоцена Северо-Западной Евразии по фораминиферам / Беньямовский В.Н. // Бюллетень МОИП. Отдел геологии. – 2003. – Т. 78. – № 4. – С. 56–77.

60. Коровин, В.А. К распространению птиц на севере лесостепного Зауралья / Коровин В.А. // Фауна Урала и Сибири. – 2000. – № 5. – С. 114–118.

61. Амон, Э.О. Факторы и условия накопления биогенных силицитов в палеогеновом бассейне Западной Сибири / Амон Э.О. // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2018. – Т. 93. – № 4. – С. 51–67.

62. Абиров, Р.А. Характеристика фосфоритов Риватского месторождения Республики Таджикистан и обоснование использования их при выращивании хлопчатника / Абиров Р.А., Захарова О.А. // Основы повышения продуктивности агроценозов. – 2015. – С. 17–20.

63. Zinchenko, Z.A. Technology of enrichment of phosphorite ore of Rivat Deposit / Zinchenko Z.A., Ismoilova M.S., Samikhov S.R., Kurbonov S.A., Gorenkova L.G. // Conference “XIII Numanov’s readings” Proceedings. – 2016. – № INIS-TJ--015. – С. 170–172.

64. Дунаев, В.А. Рудоконтролирующие факторы, особенности размещения и степень изменчивости оруденения Ковдорского апатит-франколитового

месторождения / Дунаев В.А., Яницкий Е.Б. // Региональные геосистемы. – 2013. – Т. 24. – № 7 (160). – С. 140–147.

65. Алейников, Н.А. Флотация фосфатных руд с применением алканоламидов карбоновых кислот / Алейников Н.А., Иванова В.А., Печиборщ Л.Д., Германенко О.Н. // Химическая промышленность. – 1982. – Т. 59. – № 1. – С. 30–32.

66. Почиталкина, И.А. Состав бедной апатитовой руды месторождения Лаокай / Почиталкина И.А., Кондаков Д.Ф., Ле Х.Ф., Ву Ч.Т. // Журнал неорганической химии. – 2018. – Т. 63. – № 8. – С. 1046–1049.

67. Чайкина, М.В. Механохимический синтез наноразмерных функциональных материалов со структурой апатита / Чайкина М.В., Уваров Н.Ф., Улихин А.С., Хлусов И.А. // Вопросы материаловедения. – 2008. – № 2. – С. 219–232.

68. Омеляненко, Б.И. Природные и искусственные минералы матрицы для иммобилизации актинидов / Омеляненко Б.И., Лившиц Т.С., Юдинцев С.В., Никонов Б.С. // Геология рудных месторождений. – 2007. – Т. 49. – № 3. – С. 195–217.

69. Пеков, И.В. Генетическая минералогия и кристаллохимия редких элементов в высокощелочных постмагматических системах: дис. / Пеков И.В. – Москва: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2005.

70. Отабоев, Х.А. Минералогический состав мытого сушеного концентрата Кызылкумов и его переработка в простой суперфосфат / Отабоев Х.А., Шеркузиев Д.Ш., Бадалова О.А., Раджабов Р., Намазов Ш.С., Сейтназаров А.Р. // Российский химический журнал. – 2021. – Т. 65. – № 2. – С. 102–115.

71. Тетеревков, А.И. Взаимодействие фосфатов с расплавленными хлоридами / Тетеревков А.И., Печковский В.В., Борисова Н.В., Юрченко В.В. – 1970.

72. MacLennan, G. X-ray crystallography of calcium phosphates: the structures of dicalcium phosphate and monocalcium phosphate monohydrate / MacLennan G. // Annexe Thesis Digitisation Project 2019 Block 22. – 1955.

73. Mohylyuk, V. The effect of microcrystalline cellulose–CaHPO₄ mixtures in different volume ratios on the compaction and structural–mechanical properties of tablets / Mohylyuk V., Paulausks A., Radzins O., Lauberte L. // *Pharmaceutics*. – 2024. – Т. 16. – № 3. – С. 362.

74. Lee, J.S. Formation of Brushite (CaHPO₄•2H₂O) in the Oyster Extracts / Lee J.S., Yoon S.M., Jang J.H., Lim C.W., Choi K.Y. // *Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition*. – 2006. – Т. 35. – № 6.

75. D'Angelo, D. Unveiling tablet structural changes: A micro computed tomography analysis of aqueous coating effects / D'Angelo D., Quarta E., Bazzoli G., Bianchera A., Bettini R. // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2025. – Т. 668. – С. 125014.

76. Bakaruddin, F. Evaluation of the effect of excipient content on the physical properties of parkia speciosa hassk. tablets through regression analysis / Bakaruddin F., Anuar M.S., Mohd Nor M.Z. // *International Journal of Pharmaceutical, Nutraceutical and Cosmetic Science (IJPNaCS)*. – 2024. – Т. 7. – № 2. – С. 34–43.

77. Щипцов, В.В. Роль технологической минералогии при оценке многоцелевого использования промышленных минералов Республики Карелия / Щипцов В.В. // *Значение исследований технологической минералогии в решении задач комплексного освоения минерального сырья: материалы Второго российского семинара по технологической минералогии*. – 2007. – С. 16.

78. Бич, А.В. Новое перспективное направление инновационного развития минерально-сырьевого сектора экономики / Бич А.В., Белов М.В., Быховский Л.З. // *Рациональное освоение недр*. – 2015. – № 2. – С. 62–67.

79. Остапенко, Л.А. Состав поверхности рудных минералов по данным электронной спектроскопии и его влияние на обогатимость окисленных серебросурьмяных руд месторождений Асгат и Кимпиче / Остапенко Л.А., Щегольков Ю.В., Двуреченская С.С. // *Руды и металлы*. – 2013. – № 2. – С. 46–57.

80. Терещенко, С.В. Комплексная рудоподготовка в технологии обогащения бедных апатит-нефелиновых руд / Терещенко С. В., Марчевская В.В., Черноусенко Е.В., Рухленко Е.Д., Павлишина Д.Н., Смольняков А.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2015. – № 1. – С. 35–41.
81. Федоров, С.Г. Комплексная переработка руд Хибинских месторождений / Федоров С.Г. // Экология и промышленность России. – 2007. – № 8. – С. 29–31.
82. Корчак, Е.А. К вопросу о социальном лицензировании горнодобывающей деятельности / Корчак Е.А. // Север и рынок: формирование экономического порядка. – 2014. – № 4. – С. 35а–38.
83. Постолатьева, А. Редкоземельные месторождения – особенности, сложности и перспективы / Постолатьева А., Твердов А., Жура А. // Золото и технологии Март. – 2013. – № 1. – С. 19.
84. Parkinson, D.J. Sources and controls on fluoride in groundwater of the Arusha Region, northern Tanzania / Parkinson D.J. – University of London, University College London (United Kingdom), 2000.
85. Azam, A. Processing of a washed dry concentrate containing 26% P₂O₅ into ammophosphate, sulpho- and nitroammophosphate fertilizers / Azam A., Rasulov, Shafoat S., Namazov, Atanazar R., Seytnazarov, Umarbek K., Alimov, Bokhodir E., Sultonov // Journal of Chemical Technology and Metallurgy. – 2024. – Т. 59, № 3. – С. 521–529.
86. Георгиевский, А.Ф. Биогeотeхнология фосфоритового сырья / Георгиевский А.Ф. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2000. – № 1. – С. 118–121.
87. Дехканов, З.К. Анализ методов обогащения фосфатного сырья / Дехканов З.К., Арипов Х.Ш., Умаралиева М.Д. // Universum: технические науки. – 2025. – Т. 4, № 3 (132). – С. 39–44.

88. Наседкин, В.В. Промышленные минералы и научно-технический прогресс / Наседкин В.В. // Геология рудных месторождений. – 2008. – Т. 50, № 3. – С. 274–277.

89. Смирнов, Ю.М. О получении фосфатного сырья для производства сложных удобрений из железистых фосфоритов Егорьевского и Вятско-Камского месторождений / Смирнов Ю.М. и др. // Химическая промышленность сегодня. – 2011. – № 1. – С. 18–26.

90. Нурмуродов, Т.И. Переработка фосфоритов солями щелочных металлов для обогащения / Нурмуродов Т.И., Ахтамова М.З.К., Турдиева О.Д., Каримов О.А.У. // Universum: технические науки. – 2020. – № 12-4 (81). – С. 17–20.

91. Умаралиева, М.Д. Технология азотнокислотной переработки техногенных отходов обогащения фосфоритов / Умаралиева М.Д., Дехканов З.К., Хошимханова М.А. // Universum: технические науки. – 2023. – № 8-3 (113). – С. 46–50.

92. Лыгач, А.В. Новые технологии переработки фосфорсодержащих руд / Лыгач А.В., Игнаткина В.А., Лыгач В.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № S1. – С. 345–359.

93. Фахрутдинов, Р.З. Минерально-сырьевая база фосфатного сырья России: состояние, проблемы и пути развития / Фахрутдинов Р. З., Карпова М.И., Садыков И.С., Межуев С.В., Туманова Т.Р. // Разведка и охрана недр. – 2005. – № 9. – С. 11–15.

94. Норкулова, З.М. Фосфор-кальцийсодержащие удобрения на основе фосфатного сырья Центрального Кызылкума / Норкулова З.М., Нурмуродов Т.И., Тураев М.П., Умиров Ф.Э. // Вестник магистратуры. – 2014. – № 3-1 (30). – С. 21–24.

95. Донияров, Н.А. Разработка и усовершенствование технологии переработки низкосортных фосфоритовых руд Центральных Кызылкумов /

Донияров Н.А., Тагаев И.А. // Научная монография. Решение ученого Совета НГГИ. – 2018. – № 1/4а. – С. 108.

96. Николаев, П.В. Основы химии и технологии производства синтетических моющих средств / Николаев П.В., Козлов Н.А., Петрова С.Н. – Иваново: Ивановский государственный химико-технологический университет, 2007. – Т. 200. – С. 116.

97. Каменская, А.А. Воздействие производств обработки металлов резанием машиностроительных предприятий на окружающую среду и способы снижения наносимого ущерба / Каменская А.А., Ковалова Р.И., Лабецкий В.М. – РАН, СО, ГПНТБ, Алтайск. политех. ин-т им. И. И. Ползунова, 2002.

98. Хошимов, И. Э. Производство в Узбекистане поверхностно-активного вещества с амфотерным свойством / Хошимов И. Э., Сайдазимов М. С. // The Scientific Heritage. – 2020. – № 55-2. – С. 3–7.

99. Холов, Х.И. Эффективность технологических переработок сложных по составу сурьмяносодержащих руд в Таджикистане и за рубежом / Холов Х. И. // Вестник педагогического университета. Серия естественных наук. – 2024. – № 2-3 (22–23). – С. 78–82.

100. Холов, Х. Флотационное обогащение руд нижних горизонтов джизикрутского месторождения и результаты их анализа / Холов Х., Курбон С., Джуракулов Ш. // Theoretical and Experimental Chemistry and Modern Problems of Chemical Technology. – 2023. – Т. 1. – № 01.

101. Комогорцев, Б.В. Технологии и оборудование флотационного обогащения золотосодержащих сульфидных руд / Комогорцев Б.В., Вареничев А.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № 10. – С. 222–235.

102. Филенко, И.А. Кислотное разложение природных фосфоритов с получением различных форм комплексных удобрений / Филенко И.А. // Техн. Наук. – 2019. – Т. 5. – № 01.

103. Биннатова, Н.М. Обогащение низкосортного фосфатного сырья: обзор литературы / Биннатова Н.М. // Новости транзакции. – 2021. – С. 139.

104. Тарасенков, Н.В. Глубокая очистка сточных вод от органических загрязнителей флотационно-кавитационным методом: дис. / Тарасенков Н.В. – Санкт-Петербург: ГОУ ВПО “Санкт-Петербургский государственный университет технологии и дизайна”, 2006.

105. Аснис, Н.А. Исследование влияния волновой обработки пульпы на процесс флотационного обогащения медных сульфидных руд и промежуточных продуктов их переработки / Аснис Н.А., Борткевич С.В., Ваграмян Т.А., Глинкин В.А., Калинкина А.А. // Цветные металлы. – 2011. – № 10. – С. 42–45.

106. Дубовик, О.С. Совершенствование биотехнологий удаления азота и фосфора из городских сточных вод / Дубовик О.С., Маркевич Р.М. // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. – 2016. – № 4 (186). – С. 232–238.

107. Георгиевский, А.Ф. Основные итоги исследований пригодности микробных технологий для обогащения отечественных и зарубежных фосфоритов / Георгиевский А.Ф. // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2003. – № 2. – С. 149–154.

108. Ломовский, О.И. Механохимия в решении экологических задач / Ломовский О.И., Болдырев В. В. // Экология. Серия аналитических обзоров мировой литературы. – 2006. – № 79. – С. 1–221.

109. Абрамов, А. Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. Том 3. Книга 1 / Абрамов А. – Litres, 2022.

110. Холов, Х.И. Минералого-геохимические особенности золотосодержащих руд месторождения Пакрут (Центральный Таджикистан) как основа гравитационного обогащения / Холов Х.И., Ниёзов А.С., Джуракулов Ш.Р., Самихов Ш.Р. // Вестник Забайкальского государственного университета. – 2024. – Т. 30. – № 2. – С. 82–92.

111. Можейко, Ф.Ф. Обогащение фосфоритовых руд в магнитном поле / Можейко Ф.Ф., Войтенко А.И., Поткина Т.Н., Гончарик И.И., Шевчук В.В. //

Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия химических наук. – 2012. – № 2. – С. 110–116.

112. Лыгач, А.В. Новые технологии переработки фосфорсодержащих руд / Лыгач А.В., Игнаткина В.А., Лыгач В.Н. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2016. – № S1. – С. 345–359.

113. Олейник, Т.А. Особенности флотации апатита из руды месторождения Gare Aghaj / Олейник Т.А., Скляр Л.В., Олейник М.О., Кушнирук Н.В. // Збагачення корисних копалин. – 2018. – № 71. – С. 69–80.

114. Лихошерст, А.Е. Переработка фосфатного сырья с повышенным содержанием железа и алюминия / Лихошерст А.Е., Почиталкина И.А. // Успехи в химии и химической технологии. – 2020. – Т. 34. – № 4 (227). – С. 68–70.

115. Krupenin, M. T. Composition and formation conditions of Neoproterozoic phosphorites in the Middle Urals / Krupenin M.T., Kuznetsov A.B., Zamyatin D.A., Pankrushina E. A., Lepekha S. V. // Lithology and Mineral Resources. – 2023. – Т. 58. – № 2. – С. 95–121.

116. Akimova, E.Y. Geochemistry and Sr–Nd Isotope Systematics of Apatite from Corundum-Bearing Metasomatites of the Belomorian Mobile Belt / Akimova E.Y., Kuznetsov A.B., Konstantinova G.V., Skublov S.G. // Geochemistry International. – 2024. – Т. 62. – № 10. – С. 1013–1028.

117. Юдович, Я.Э. Пять генетических корреляций фосфогенеза в стратосфере / Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В. // Уральский геологический журнал. – 2019. – № 1. – С. 1–63.

118. Юдович, Я.Э. Литохимия фосфоритов / Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В. // Уральский геологический журнал. – 2019. – № 3. – С. 1–86.

119. Абрамов, А.А. Теоретические предпосылки совершенствования и интенсификации процессов рудоподготовки и обогащения полезных ископаемых / Абрамов А.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 1995. – № 6. – С. 15–22.

120. Воробьев, Н.И. Обогащение полезных ископаемых / Воробьев Н.И., Новик Д.М. // 2008.

121. Седельникова, Г.В. Современные технологии переработки минерального сырья, обеспечивающие полноту и комплексность освоения месторождений ТПИ / Седельникова Г.В., Рогожин А.А., Лыгина Т.З., Левченко Е.Н. // Разведка и охрана недр. – 2013. – № 4. – С. 62–67.

122. Pufahl, P. K. Sedimentary and igneous phosphate deposits: formation and exploration: an invited paper / Pufahl P.K., Groat L.A. // Economic Geology. – 2017. – Т. 112. – № 3. – С. 483–516.

123. Jordens, A. Processing a rare earth mineral deposit using gravity and magnetic separation / Jordens A., Sheridan R.S., Rowson N.A., Waters K.E. // Minerals Engineering. – 2014. – Т. 62. – С. 9–18.

124. Hagemann, S.G. Mineral system analysis: Quo vadis / Hagemann S.G., Lisitsin V.A., Huston D.L. // Ore Geology Reviews. – 2016. – Т. 76. – С. 504–522.

125. Singh, V.A review of low grade manganese ore upgradation processes / Singh V., Chakraborty T., Tripathy S.K. // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. – 2020. – Т. 41. – № 6. – С. 417–438.

126. Anawati, J. Recovery and separation of phosphorus as dicalcium phosphate dihydrate for fertilizer and livestock feed additive production from a low-grade phosphate ore / Anawati J., Azimi G. // RSC Advances. – 2020. – Т. 10. – № 63. – С. 38640–38653.

127. Kumar, D. Phosphate Rock: An Industry in Transition. – Elsevier, 2023.

128. Amirech, A. Two-stage reverse flotation process for removal of carbonates and silicates from phosphate ore using anionic and cationic collectors / Amirech A., Bouhenguel M., Kouachi S. // Arabian Journal of Geosciences. – 2018. – Т. 11. – № 19. – С. 593.

129. Houot, R. Beneficiation of phosphatic ores through flotation: Review of industrial applications and potential developments / Houot R. // International Journal of Mineral Processing. – 1982. – Т. 9. – № 4. – С. 353–384.

130. Chen, W. The occurrence states of rare earth elements bearing phosphorite ores and rare earth enrichment through the selective reverse flotation / Chen W., Zhou F., Wang H., Zhou S., Yan C. // Minerals. – 2019. – Т. 9. – № 11. – С. 698.

131. Aleksandrova, T.N. Increasing the efficiency of phosphate ore processing using flotation method / Aleksandrova T.N., Elbendari A.M. // Записки Горного института. – 2021. – Т. 248. – С. 260–271.

132. Kondratev, S.A. Improvement of concentrate quality in flotation of low-rank coal / Kondratev S.A., Khamzina T.A. // Записки Горного института. – 2024. – № 265 (eng). – С. 65–77.

133. Sergeev, V.V. Interaction features of Sodium Oleate and Oxyethylated Phosphoric Acid esters with the Apatite surface / Sergeev V.V., Cheremisina O.V., Fedorov A.T., Gorbacheva A.A., Balandinsky D.A. // ACS Omega. – 2022. – Т. 7. – № 3. – С. 3016–3023.

134. Evdokimov, S.I. Determination of rational steam consumption in steam-air mixture flotation of apatite-nepheline ores / Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E. // Записки Горного института. – 2022. – Т. 256. – С. 567–578.

135. Mitrofanova, G.V. Flotation separation of titanite concentrate from apatite-nepheline-titanite ores of anomalous zones of the Khibiny deposits / Mitrofanova G.V., Marchevskaya V.V., Taran A.E. // Записки Горного института. – 2022. – Т. 256. – С. 560–566.

136. Attafi, I. Analysis of combined processing method of phosphate minerals from the Kef Essenoun deposit / Attafi I., Idres A., Mekti Z., Bouras A., Benselhoub A., Ait Merzeg F., Bellucci S. // Technology Audit and Production Reserves. – 2024. – Т. 2. – № 3 (76). – С. 41–48.

137. Finch, J.A. Column flotation / Finch J.A., Dobby G.S. // Flotation Science and Engineering. – 1990. – С. 291–329.

138. Lan, L. Auxiliary collector optimizing foam characteristic and adsorption behavior towards efficient flotation desilication of bauxite / Lan L., Sun W., Yang Y., Jiang F., Wang L. // Separation and Purification Technology. – 2025. – Т. 353. – С. 128322.

139. Tian, Q. Application of special collectors and flotation column for beneficiation low rank coal slimes / Tian Q., Wang Y., Li G. // *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. – 2017. – Т. 53. – № 1. – С. 553–568.
140. Vasumathi, N. Flotation performance and kinetics study of low-grade limestone with fatty acids-rich oilseed residue as green collector / Vasumathi N. et al. // *Biomass and Bioenergy*. – 2024. – Т. 186. – С. 107273.
141. Fuerstenau, M.C. Froth flotation: a century of innovation / Fuerstenau M. C., Jameson G.J., Yoon R.H. (ed.). – SME, 2007.
142. Abouzeid, A. Upgrading of phosphate ores – a review / Abouzeid A. // *Powder Handling and Processing*. – 2007. – Т. 19. – № 2. – С. 92.
143. Birky, B.K. Phosphorus and phosphates / Birky B.K. // *Handbook of industrial chemistry and biotechnology*. – 2017. – С. 1211–1239.
144. Курбонов, Ш.А. Расчет значений термодинамических функций процесса сернокислотного разложения фосфоритного концентрата месторождения Риват Таджикистана / Курбонов Ш. А., Обидов Б. А., Самихов Ш. Р., Холов Х. И. // *Вестник Тверского государственного университета. Серия: Химия*. – 2021. – Т. 2. – № 44. – С. 37–44.
145. Карамбахшов, Х.З. Разработка реагентного режима фосфоритовой флотации Риватского месторождения / Карамбахшов Х.З., Курбонов Ш., Холов Х., Исмоилова М., Самихов Ш. // *Известия Национальной академии наук Таджикистана*. – 1952. – С. 100.
146. Курбонов, Ш.А. Исследование кинетики растворения фосфатного концентрата Риватского месторождения / Курбонов Ш.А., Обидов Б.А., Холов Х.И., Самихов Ш.Р. // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. – 2022. – Т. 15. – № 4. – С. 548–559.
147. Dormeshkin, O. Interactions between components of complex fertilizers. Chemical and physico-chemical interactions at the stages of mixing, granulating and drying during their production / Dormeshkin O. – Lap Lambert Academic Publishing, 2019.

148. Kalita, A. Organo-monomers coated slow-release fertilizers: Current understanding and future prospects / Kalita A., Elayarajan M., Janaki P., Suganya S., Sankari A., Parameswari E. // International Journal of Biological Macromolecules. – 2024. – C. 133320.

149. Shahena, S. Conventional methods of fertilizer release / Shahena S., Rajan M., Chandran V., Mathew L. // Controlled release fertilizers for sustainable agriculture. – Academic Press, 2021. – C. 1–24.

150. Roy, A. Tailored fertilizers: The need of the times / Roy A. // Soil and Fertilizers. – CRC Press, 2020. – C. 317–338..

151. Mikkelsen, R.L. Inputs: potassium sources for agricultural systems / Mikkelsen R.L., Roberts T.L. // Improving potassium recommendations for agricultural crops. – 2021. – C. 47–74.

152. Freilich, M. B. Potassium compounds / Freilich M. B., Petersen R. L., Updated by Staff // Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. – 2000.

153. Stewart, J. A. Potassium sources, use, and potential / Stewart J. A. // Potassium in agriculture. – 1985. – C. 83–98.

154. Geissler, B. Striving toward a circular economy for phosphorus: The role of phosphate rock mining / Geissler B., Hermann L., Mew M. C., Steiner G. // Minerals. – 2018. – T. 8. – № 9. – C. 395.

155. Ofoegbu, S.U. Technological challenges of phosphorus removal in high-phosphorus ores: Sustainability implications and possibilities for greener ore processing / Ofoegbu S.U. // Sustainability. – 2019. – T. 11. – № 23. – C. 6787.

156. Steiner, G. Efficiency developments in phosphate rock mining over the last three decades / Steiner G. et al. // Resources, Conservation and Recycling. – 2015. – T. 105. – C. 235–245.

157. Lamghari, K. Sustainable phosphate mining: Enhancing efficiency in mining and pre-beneficiation processes / Lamghari K. et al. // Journal of Environmental Management. – 2024. – T. 358. – C. 120833.

158. Lamghari, K. Sustainable phosphate mining: Enhancing efficiency in mining and pre-beneficiation processes / Lamghari K., Taha Y., Ait-Khouia Y.,

Elghali A., Hakkou R., Benzaazoua M. // Journal of Environmental Management. – 2024. – T. 358. – C. 120833.

159. Sajid, M. Synoptic view on P ore beneficiation techniques / Sajid M., Bary G., Asim M., Ahmad R., Ahamad M.I., Alotaibi H., Guoliang Y. // Alexandria Engineering Journal. – 2022. – T. 61. – № 4. – C. 3069–3092.

160. Hermann, L. Processing: what improvements for what products? / Hermann L. // Sustainable Phosphorus Management: A Global Transdisciplinary Roadmap. – Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. – C. 183–206.

ПРИЛОЖЕНИЕ

«Утверждаю»

Директор Института химии
им. В.И. Никитина НАНТ
д.т.н., профессор Сафаров А.М.

«30» 06 2025 г.



«Утверждаю»

Директор Института ботаники,
физиологии и генетики растений
НАНТ к.б.н. Бобозода Б.Б.

«30» 06 2025 г.



АКТ

Мы, нижеподписавшиеся, в лице: заведующий Лабораторией Фотосинтеза и продуктивности растений д.б.н., профессор, член. корр. НАН Таджикистана Х.А. Абдуллаева, к.б.н. Б.Б. Бобозода, заведующий Лабораторией Обогащения руд, д.х.н. С.Ш. Сафарова, д.т.н., профессор Ш.Р. Самизода, с.н.с. Х.З. Карамбахшова, к.т.н. Ш.А. Курбанова, с.н.с. М.С. Исмоиловой и к.т.н. Х.И. Холова, составили настоящий акт о том, что от 30.04.2024 по 1.11. 2024 были проведены испытания фосфорита, полученного в лаборатории Обогащения руд Института химии им. В.И. Никитина НАН Таджикистана из фосфоритных руд месторождения Риват (опытная партия суперфосфата). Концентрат из руды был получен методом флотационного обогащения. Содержание P_2O_5 в конечном концентрате составило 28,2 %.

Методом химического анализа установлено, что общее содержание P_2O_5 в суперфосфате составляет 18,07 %, растворимая P_2O_5 в 2% - ной лимонной кислоте - 14,65 %, усваиваемая растениями и остаточный фосфор 4,09 % (ГОСТ 20851.2-75. Удобрение минеральные. Методы определения фосфатов).

Из опытной партии суперфосфата 10 кг был использован в качестве удобрения при выращивании сорта средневолокнистого хлопчатника, (Вахдат-20) на опытном участке Института ботаники, физиологии и генетики растений НАНТ в 2024 г.

В опытных вариантах суперфосфат вносился в почву мелко, до начала посева семян и в период вегетации хлопчатника, из расчёта 350 кг/га, азотные удобрения – 180 кг/га. Для сравнения в контрольные растения вносились только азотные удобрения. В результате фенологических наблюдений за ростом и развитием хлопчатника за вегетационный период от посева, до сбора урожая были получены следующие данные. Мелкое внесение суперфосфата в почву до посева и период вегетации хлопчатника показывает, что опытные растения по сравнению с контрольными растениями развивались более интенсивно и суперфосфат благоприятно влиял на их рост, развитие и плодоношения. Установлено, что в опытных растениях высоты главного стебля хлопчатника

увеличивается на 70 %, общая листовая поверхность в 1,75-1,52 раза, число симподиев 1,21 раза, генеративных органов 2 раза, зелёных коробочек 1,85 раз и урожай хлопка-сырца в 1,5 раз. Общая биологическая масса в 1,91 раз и выход волокна увеличилось на 1,05 %.

Настоящий акт составлен на основе проведённого испытания опытного суперфосфата, полученного из фосфоритовой руды Риватского месторождения в Институте химии им. В.И. Никитина НАНТ. Суперфосфат, испытывался в Институте ботаники, физиологии и генетики растений НАНТ, согласно совместного «Соглашения» о научно-техническом сотрудничестве между Институтами, утверждённого 02.2017 г. Испытания суперфосфата проводилось как минеральное удобрение при выращивании хлопчатника.

Полученные результаты позволяют сделать следующие заключения: Суперфосфат, полученный из фосфоритовых руд Риватского месторождения по химическому составу отвечает требованию ГОСТ 5956-78. Суперфосфат, гранулированный из апатитового концентрата без добавок. Техническая условия (с изменениями N 1, 2, 3, 4, 5, 6)

Отрицательные эффекты отсутствуют и вполне полученный суперфосфат можно рекомендовать как стандартное фосфорное минеральное удобрение при выращивании средневолокнистого хлопчатника и других видов сельхозкультур для получения высокого урожая хорошего качества.

Подписи участников:

Абдуллаев Х.А.

Бобозода Б.Б.

Самизода Ш.Р.

Сафаров С.Ш.

Карамбахшов Х.З.

Курбонов Ш.А.

Исмоилова М.С.

Холов Х