Вывод. Прокладка инженерных сетей из отдельных труб позволяет еще на стадии проектирования оптимизировать параметры машин и оборудования, реализовать на практике систему автоматизированного оперативного управления строительством при ограниченных материальных и трудовых ресурсах. Основываясь на исследованиях, можно сказать, что большую роль в защите окружающей среды играет выбор метода прокладки трубопровода, а также выбор материала труб.

Список литературы

1 **Орлов, В. А.** Строительство, реконструкция и ремонт водопроводных и водоотводящих сетей бестраншейными методами : учеб. пособие / В. А. Орлов, Е. В. Орлов. – М. : ИНФРА-М, 2015. – 222 с.

2 **Орлов В. А.** Стратегия и методы восстановления подземных трубопроводов / В. А. Орлов, В. А. Харькин. – М. : Стройиздат, 2001. – 220 с.

3 **Храменков С. В.** Бестраншейные методы восстановления трубопроводов / С. В. Храменков, О. Г. Примин, В. А. Орлов. – М. : Прима-Пресс-М, 2003. – 245 с.

УДК 661.832.532:504.06(575.4)

РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ ГИДРОМИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ КАСПИЙСКОГО РЕГИОНА С ПОЛУЧЕНИЕМ ВЫСОКОЧИСТОГО СУЛЬФАТА КАЛИЯ

Р. О. БОРДЖАКОВ, Э. А. БЕРДЫЕВА
Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана, г. Ашхабад

Актуальность. Современная стратегия индустриального развития Туркменистана ориентирована на глубокую переработку природных богатств с соблюдением международных стандартов экологической безопасности. Залив Гарабогазгол является уникальным природным резервуаром сульфатно-магниевых солей, промышленное освоение которых позволяет создавать продукты с высокой добавленной стоимостью.

Производство сульфата калия (K_2SO_4) – стратегическая задача для химической отрасли. В отличие от традиционного хлорида калия, сульфатные удобрения не вызывают вторичного засоления почв и являются критически важными для повышения урожайности в условиях аридного климата. Однако традиционные методы переработки рапы сопряжены с высокими энергозатратами и образованием значительных объемов сточных рассолов. Ресурсосберегающий подход требует внедрения технологий, позволяющих минимизировать потребление пресной воды и энергии.

1 **Физико-химический анализ сырьевой базы.** Гидроминеральное сырье Гарабогазгола представляет сложную пятикомпонентную систему $Na^+, K^+, Mg^{2+} \,||\, Cl^-, SO_4^{2-} - H_2O$. Главная технологическая сложность заключается в необходимости отделения ионов калия от избыточных ионов магния, которые в процессе испарения формируют трудноразделяемые двойные соли.

Научными исследованиями [1, 2] установлено, что оптимальным путем переработки является выделение промежуточного продукта – шёнита ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$). Фазовые превращения в системе при температурах 20–35 °С показывают, что именно шёнитовая ветвь кристаллизации является наиболее устойчивой для получения качественного сырья для дальнейшей конверсии.

2 **Технологические инновации и интенсификация процесса.** Для достижения высокого уровня ресурсосбережения предлагается внедрение гибридной технологической схемы, состоящей из двух инновационных этапов.

2.1 ***Предварительная мембранная сепарация.*** Применение нанофильтрационных (NF) мембран позволяет на этапе подготовки рапы избирательно концентрировать двухзарядные сульфат-ионы (SO_4^{2-}), отделяя их от хлорида натрия.

Экологический эффект: снижение расхода пресной воды на промывку готовых солей на 25–30 %.

Технологический эффект: повышение селективности кристаллизации шёнита и сокращение времени нахождения рассола в испарительных бассейнах [3].

2.2 ***Ультразвуковая интенсификация конверсии.*** Процесс получения сульфата калия протекает по реакции взаимодействия шёнита с хлоридом калия:

$$K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O + 2KCl \rightarrow 2K_2SO_4 \downarrow + MgCl_2 + 6H_2O.$$

Для предотвращения образования крупных конгломератов и захвата примесей (инклюзии) в кристаллическую решетку предлагается использование *ультразвуковых излучателей* в реакционной зоне. Кавитационное воздействие способствует равномерному распределению частиц и получению мелкодисперсного продукта с чистотой более 98,5 % [4].

3 **Прикладная экология и концепция «Zero Liquid Discharge».** В условиях Каспийского региона защита водной среды и рациональное водоснабжение являются приоритетными. Ресурсосберегающая модель производства базируется на принципе «нулевого сброса» (ZLD).

Все маточные растворы после отделения сульфата калия, обогащенные магнием, направляются в блок получения бишофита ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$) и эпсомита ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$).

Это не только предотвращает загрязнение акватории залива техногенными стоками, но и позволяет получать дополнительную товарную продукцию для строительной и медицинской отраслей Туркменистана [3, 6, 7]. Более того, замена хлоридных удобрений сульфатными в сельском хозяйстве является важным элементом прикладной экологии, замедляющим деградацию пахотных земель.

4 **Автоматизация и микропроцессорное управление.** Современное химическое производство невозможно без прецизионного мониторинга. Высокотехнологичный комплекс должен включать автоматизированную систему управления (АСУ ТП), построенную на базе микропроцессорных контроллеров. Система в режиме реального времени отслеживает:

– плотность и фазовый состав пульпы;

– температурные градиенты в вакуум-кристаллизационных установках;

– качество очистки оборотных вод.

Интеграция датчиков контроля позволяет снизить энергопотребление завода на 10–15 % и исключить человеческий фактор при проведении критических химических реакций [5].

Заключение. Разработка и внедрение ресурсосберегающей технологии производства сульфата калия на базе ресурсов залива Гарабогазгол является ключом к инновационному развитию химической промышленности региона. Комбинация мембранных методов очистки, ультразвуковой обработки и интеллектуальных систем управления позволяет создать экологически безопасное, высокорентабельное производство, соответствующее принципам «зеленой» химии.

Список литературы

1 **Аллаков, А.** Химическая технология комплексной переработки рапы залива Кара-Богаз-Гол / А. Аллаков. – Ашхабад: Ылым, 2021. – 210 с.

2 **Курбанов, М. Т.** Перспективы развития калийной промышленности Туркменистана / М. Т. Курбанов // Вестник государственного университета. – 2024. – № 2. – С. 88–95

3 **Березин, И. В.** Мембранные процессы в технологии неорганических веществ: учеб. пособие / И. В. Березин. – М. : Академкнига, 2023. – 185 с.

4 **Овчинников, С. П.** Интенсификация массообменных процессов в солевых системах / С. П. Овчинников, Д. А. Петров // Журнал прикладной химии. – 2022. – Т. 95, № 8. – С. 1102–1115.

5 **Семенов, В. В.** Автоматизация химических производств в аридной зоне / В. В. Семенов. – СПб. : Химиздат, 2023. – 320 с.

6 Туркменистан: стратегия социально-экономического развития до 2030 года. – Ашхабад : Государственная издательская служба, 2022. – 145 с.

7 **Zhao, Y.** Global trends in potash fertilizer production and soil sustainability / Y. Zhao, L. Chen // Journal of Agricultural Chemistry. – 2023. – Vol. 71, № 3. – Pp. 442–456.