Вестник ВГУИТ/ Proceedings of VSUET ISSN 2226-910X E-ISSN 2310-1202
DOI: http://doi.org/10.20914/2310-1202-2026-3-389-403 Оригинальная статья/Research article
УДК 66.023.2 Open Access Available online at vestnik-vsuet.ru

Разработка конструкции аппарата для электродеионизационной очистки растворов в производстве минерального удобрения и оценка экономической эффективности его использования

Дмитрий Н. Коновалов [1] kdn1979dom@mail.ru 0000-0002-9366-8661
Сергей И. Лазарев [1] sergey.lazarev.1962@mail.ru 0000-0003-0746-5161
Анна Г. Сысоева [1] asus1301201@gmail.com 0009-0007-4805-1586
Константин К. Полянский [2,3] kaf-kit@vfreu.ru 0000-0002-7333-4816
Кирилл А. Горденков [1] kirillgorden@gmail.com Место для ввода текста.

1 Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия
2 Воронежский филиал Российского экономического университета им. Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия
3 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

Аннотация. На основе проведенного комплексного анализа электромембранного оборудования для очистки промышленных растворов и сточных вод разработана новая конструкция электроионитного аппарата. Оптимизация направляющих-держателей позволяет ликвидировать застойные зоны и повысить свободное пространство внутри прокладок-спейсеров, что приводит к существенному увеличению производительности устройства. Модернизация прокладок-спейсеров улучшает эффективность охлаждения и качество разделяемых растворов, что делает данный аппарат перспективным для применения в различных отраслях промышленности, где требуется высокоэффективная очистка, разделение и концентрирование растворов. Внедрение электробаромембранного и электроионитного аппаратов в процесс производства калимагнезии ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4$) на этапе очистки представляет собой важный шаг к современным технологиям, решающим основные задачи: ресурсосбережение, снижение содержания хлоридов, экологизация производства. Эти аппараты преобразуют линейное производство в циклическое, позволяя избирательно удалять хлор и возвращать сульфатный концентрат калия и магния в кристаллизаторы, а очищенная вода повторно используется в цикле без применения вредных химикатов. Для запуска новой технологической схемы очистки сточных вод в производстве гранулированной калимагнезии потребуется около 9,9 миллионов рублей. Эти финансовые затраты пойдут на покупку специального оборудования и комплектующих, а также на обслуживание машин, оплату электроэнергии и её компенсацию. Установка рассчитана на 20 лет работы, что позволяет оценить её надежность и экономическую эффективность. Финансовые расчеты показывают, что проект окупится за 2,5 года, что говорит о его высокой рентабельности.

Ключевые слова: *Аппарат, мембрана, электродеионизация, очистка, раствор, минеральное удобрение*.

Development of a device design for electrodeionization purification of solutions in the production of mineral fertilizers and assessment of the economic efficiency of its use

Dmitry N. Konovalov [1] kdn1979dom@mail.ru 0000-0002-9366-8661
Sergey I. Lazarev [1] sergey.lazarev.1962@mail.ru 0000-0003-0746-5161
Anna G. Sysoeva [1] asus1301201@gmail.com 0009-0007-4805-1586
Konstantin K. Polyansky [2,3] kaf-kit@vfreu.ru 0000-0002-7333-4816
Kirill A. Gordenkov [1] kirillgorden@gmail.com Место для ввода текста.

1 Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000 Russia
2 Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia
3 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

Abstract. Based on a comprehensive analysis of electromembrane equipment for the treatment of industrial solutions and wastewater, a new design of an electroionite apparatus has been developed. Optimization of the guide holders makes it possible to eliminate stagnant zones and increase the free space inside the spacer pads, which leads to a significant increase in device performance. The modernization of spacer gaskets improves the cooling efficiency and the quality of the separated solutions, which makes this device promising for use in various industries where highly efficient cleaning, separation and concentration of solutions is required. The introduction of electrobaromembrane and electroionite devices into the production process of kalimagnesia ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4$) at the purification stage is an important step towards modern technologies that solve the main tasks: resource conservation, reduction of chloride content, greening of production. These devices transform linear production into cyclic production, allowing the selective removal of chlorine and the return of potassium and magnesium sulfate concentrate to the crystallizers, and the purified water is reused in the cycle without the use of harmful chemicals. It will take about 9.9 million rubles to launch a new technological scheme for wastewater treatment in the production of granular kalimagnesia. These financial expenses will be spent on the purchase of special equipment and components, as well as on machine maintenance, payment for electricity and its compensation. The installation is designed for 20 years of operation, which makes it possible to assess its reliability and economic efficiency. Financial calculations show that the project will pay off in 2.5 years, which indicates its high profitability.

Keywords: *Apparatus, membrane, electrodeionization, purification, solution, mineral fertilizer*.

Для цитирования
Коновалов Д.Н., Лазарев С.И., Сысоева А.Г., Полянский К.К., Горденков К.А. Разработка конструкции аппарата для электродеионизационной очистки растворов в производстве минерального удобрения и оценка экономической эффективности его использования // Вестник ВГУИТ. 2026. Т. 88. № 3. С. 389–403. doi:10.20914/2310-1202-2026-3-389-403

For citation
Konovalov D.N., Lazarev S.I., Sysoeva A.G., Polyansky K.K. Gordenkov K.A. Development of a device design for electrodeionization purification of solutions in the production of mineral fertilizers and assessment of the economic efficiency of its use. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2026. vol. 88. no. 3. pp. 389–403. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2026-3-389-403

© 2026, Коновалов Д.Н. и др. / Konovalov D.N. et al.
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

Мембранные технологии представляют собой передовой и высокоэффективный метод обработки жидкостей и газов, основанный на применении полупроницаемых мембран. Эти мембраны обладают избирательной проницаемостью, что позволяет эффективно отделять целевые компоненты от нежелательных примесей. Мембранные технологии демонстрируют исключительную универсальность и точность, что обуславливает их широкое применение в различных отраслях промышленности [1].

Классификация мембранных процессов включает микрофильтрацию, ультрафильтрацию, нанофильтрацию, обратный осмос, электродиализ (ED) и мембранную дистилляцию. Выбор оптимального метода зависит от физико-химических параметров обрабатываемого раствора и требований к качеству конечного продукта. Каждый из этих методов характеризуется специфическими механизмами разделения и применяется в зависимости от характеристик очищаемой среды [2].

Электродеионизация (EDI) представляет собой инновационный подход к получению сверхчистой воды, который сочетает в себе электродиализ, ионный обмен и мембранное разделение. В процессе электродеионизации применяются электрическое поле и ионообменные смолы для удаления ионов солей из водных растворов без использования химических реагентов. Это обеспечивает высокую экологическую безопасность и экономическую эффективность метода. Вода, полученная с помощью электродеионизации, соответствует строгим стандартам чистоты и находит широкое применение в таких критически важных отраслях, как фармацевтика, микроэлектроника и энергетика [3].

Электродеионизация характеризуется высокой степенью очистки благодаря использованию ионообменных смол с высокой селективностью и мембран с контролируемой проницаемостью. Эти компоненты позволяют эффективно удалять ионы металлов даже из сложных многокомпонентных растворов. В отличие от традиционного электродиализа, который не обеспечивает подобного уровня очистки, электродеионизация позволяет достигать значительно более высоких показателей качества воды [4].

Электродеионизационная ячейка представляет собой высокотехнологичное устройство, интегрирующее процессы мембранного разделения и ионного обмена. Это устройство позволяет получать воду с исключительно высокой степенью чистоты без применения химических реагентов, что обеспечивает надежность, безопасность и эффективность процесса [5].

Электродеионизационные аппараты широко используются в промышленности благодаря своей способности обеспечивать стабильное качество воды при минимальных эксплуатационных затратах.

Отдельно стоит отметить, что помимо мембранного метода отчистки воды сейчас активно разрабатываются электроионитные аппараты, основывающиеся на безмембранном методе.

Так, например, в работах [6] и [7] представлены безмембранные деионизаторы. Рассмотрим их совместно, так как устройство из источника [7] представляет собой улучшенную версию девайса из источника [6].

В статьях [6, 7] рассматривается безмембранный электродиализный процесс (MFEDI), разработанный авторами с целью повышения эффективности и надежности данного метода. Исследователи адаптировали конструкцию MFEDI для обработки кислых сред, включая пермеат обратного осмоса. В ходе экспериментов было продемонстрировано, что регенерация сильноосновных смол может быть осуществлена непосредственно в процессе электродиализа, без применения химических реагентов и изменения полярности электродов. Эффективность метода электрохимической регенерации для сильнокислотных и сильноосновных смол в процессе множественной фильтрации и деминерализации (MFEDI) расширяет перспективы использования данной технологии при обработке кислых растворов. В рамках усовершенствования предыдущей модели была решена проблема обратной миграции ионов при регенерации, что ранее требовало изменения полярности электродов и приводило к усложнению технологического процесса, а также к ускоренному износу оборудования. После оптимизации система функционировала стабильно без изменения полярности. Удельная электропроводность очищенной воды уменьшилась до диапазона 0.060–0.063 мкСм/см. Энергозатраты составили 0.24 кВт • ч/м³, при этом выход воды достиг 96.1%. Система выдержала 40 последовательных циклов испытаний.

Цель настоящей работы заключается в проведении анализа устройств для электродеионизационной очистки растворов, разработка конструкции аппарата и его внедрение в производственный процесс производства минерального удобрения, а также экономическое обоснование применения в технологической схеме.

Анализ существующих конструкций электроионитных аппаратов

Стандартный модуль системы EDI из работы [8] включает несколько основных компонентов: анод, чаще всего изготовленный из титана с покрытием, и катод – из нержавеющей стали; мембраны для ионного обмена, представляющие собой тонкие полимерные листы, которые действуют как селективные барьеры для ионов; наполнитель для ионного обмена, состоящий из высококачественной смеси катионита и анионита; а также проставки-спейсеры), которые формируют каналы для циркуляции воды. Принцип функционирования ячейки электродеионизации базируется на процессах ионного обмена, электродиализа и электролиза. Внутри ячейки слой ионообменной смолы осуществляет захват растворенных солей, пропуская их ионы. Под воздействием постоянного электрического тока эти ионы мигрируют через селективные мембраны, которые пропускают только катионы или анионы, в соседствующие камеры концентрационного раствора. Из этих камер ионы удаляются в дренажную систему. Одновременно электрический ток вызывает диссоциацию молекул воды на ион водорода (H+) и гидроксид-ион (OH–), которые непрерывно регенерируют ионообменную смолу. Благодаря этому система может функционировать в течение неограниченного времени без необходимости периодической остановки для проведения химической промывки реагентами.

В работе [9] описывается устройство и принцип функционирования электроионитной установки, предназначенной для углубленного обессоливания слабоминерализованных растворов с целью получения солевых концентратов. Основное техническое решение направлено на упрощение процесса монтажа и снижение эксплуатационных затрат путем оптимизации загрузки и выгрузки ионообменной смолы. Установка включает электроионитный аппарат, репульпатор, гидроэлеватор, фильтр, баки и насосы.

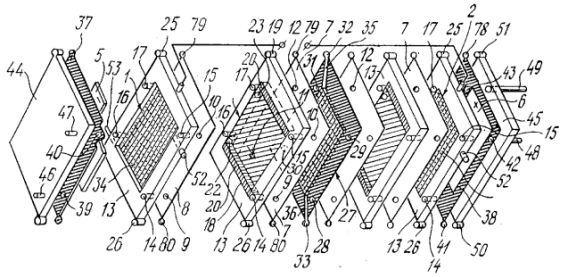


Рисунок 1. Электроионитный аппарат [9]
Figure 1. Electrolytic ionizer [9]

Электроионитный аппарат, рисунок 1, представляет собой многокамерный фильтр-пресс с электродными камерами. В камерах 15, 16 размещены катод 19 и анод 20, заполненные гофрированно-перфорированной поливинилхлоридной пленкой 48. Камеры отделены от прижимных плит резиновыми прокладками. Для циркуляции электролита служат патрубки 51, 52.

Камеры обессоливания 17 между анионо- и катионообменными мембранами заполнены ионообменной смолой (КУ-2, АВ-17). В верхней и нижней стенках рамок расположены углубления с пористым материалом, формирующие дренажные каналы.

Камеры концентрирования 18 также между мембранами, содержат гофрированную пленку с капиллярными свойствами. В мембранах, рамках и прокладках имеются сквозные отверстия для распределения потоков: обессоленного раствора, концентрата, пульпы смолы и электролита. Пакет элементов скреплен прижимными плитами.

Репульпатор – емкость для приготовления и обработки суспензии ионообменной смолы с перемешивающей трубой для однородности пульпы. Соединяется с шаровым краном и гидроэлеватором, имеет переливной патрубок для отвода промывной воды.

Гидроэлеватор – струйный насос, использующий энергию потока рабочей жидкости (обессоленной воды) для перемещения суспензии. Подключен к репульпатору и электроионитному аппарату. Вода подается насосом из бака.

Фильтрующий элемент находится в линии возврата воды из репульпатора в бак транспортирующей обессоленной водой. Насосы 3, 5 осуществляют цикруляцию обессоленного раствора и концентрата, в то время как третий насос 12 подает обессоленную воду в репульпатор и гидроэлеватор.

Баки 2, 4 и 11 предназначены для хранения исходного раствора, накопленного концентрата и обессоленной воды соответственно.

Исследование, представленное в источнике [10], посвящено разработке инновационной технологии электролиза на полимерной подложке (Resin Wafer Electrolyzer, RWE) с использованием биполярных пластин типа «Янус». Эти мембраны предназначены для повышения эффективности процесса электролиза воды на границе между катионопроводящим и анионопроводящим слоями, что достигается за счет оптимизации массопереноса и минимизации омических потерь. Авторы исследования предложили внедрение твердого катализатора на основе наночастиц гидроксида алюминия, что значительно ускоряет реакцию разложения воды на ионы H + и OH–. Это, в свою очередь, способствует повышению степени диссоциации воды и общей производительности электролизного процесса. Кроме того, данная технология демонстрирует повышенную эффективность регенерации ионообменных материалов и улучшает удаление трудноудаляемых

примесей, таких как кремний, благодаря применению передовых методов обработки и модификации мембран. Таким образом, предложенное решение представляет собой значительный шаг вперед в области высокоэффективного электролиза воды, открывая новые перспективы для развития возобновляемых источников энергии и улучшения экологической устойчивости технологий водоочистки.

Аппарат [11] представляет собой инновационное техническое решение в области деминерализации водных растворов, основанное на методе электродиализа. Конструкция данного устройства характеризуется высокой степенью конструктивной простоты, что существенно упрощает процессы его установки и эксплуатации. Модульная архитектура системы обеспечивает возможность оперативного замещения ионообменной смолы через специально разработанные коллекторные и дренажные каналы, функционирующие в режиме суспензии. Это позволяет осуществлять замену смолы без необходимости демонтажа всего оборудования, что значительно повышает эксплуатационную эффективность и снижает время простоя системы. Камеры концентрирования оснащены специальной плоской эластичной сеткой-турбулизатором, установленной на гофрированной опорной пластине. Данная конфигурация снижает локальные электрические напряжения в местах контакта, что способствует повышению общей эффективности и долговечности системы. Электродеионизатор, рисунок 2, характеризуется оригинальной конструкцией, обеспечивающей его функционирование как в вертикальном, так и в горизонтальном положении. Эта конструктивная особенность способствует его высокой адаптивности и универсальности при интеграции в разнообразные технологические системы, что подчеркивает его значимость в процессах деминерализации и деионизации водных растворов.

Технический результат конструкции заключается в снижении непроизводительных потерь электроэнергии в электродиализаторе. Этого удается достичь благодаря кольцевым выступам из диэлектрического материала в прокладках, которые прерывают контур паразитных токов. В традиционных аппаратах такие токи вызывают значительные потери энергии. Использование выступов существенно уменьшает утечки тока через распределительные и сборные коллекторы. Это предотвращает локальный перегрев и прожог стенок коллекторов, мембран и прокладок – распространенную проблему в известных электродиализаторах. Особенно это актуально при высоких концентрациях солей. В результате снижается расход электроэнергии на единицу объема обессоленного раствора. При этом конструкция устройства остается простой и технологически эффективной. Для отвода диализата и концентрата не требуются сложные решения. Таким образом, аппарат повышает энергоэффективность и надежность электродиализатора [11].

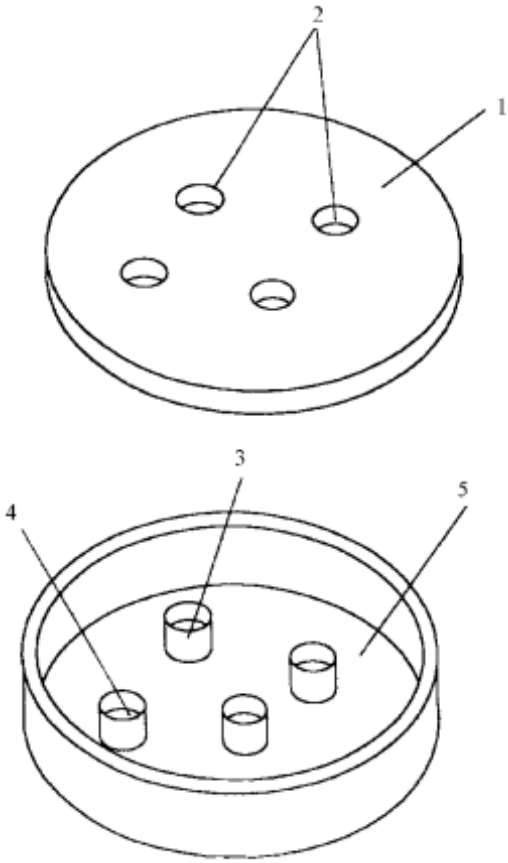


Рисунок 2. Электродеионизатор, пред-ставленный в работе [11]

Figure 2. The electrodeionizer presented in the paper [11]

В работе [12] отмечается передовой метод электродеионизации для получения чистой и сверхчистой воды с высокой степенью деминерализации. Принцип работы основан на воздействии электрического поля на ионы в воде, что заставляет их проходить через ионообменные мембраны. Примеси собираются в отдельных ёмкостях, обеспечивая их эффективное удаление. Ключевой элемент концепции – гидравлическая схема с многоступенчатой циркуляцией концентрата. Она включает минимум две камеры концентрирования, расположенные последовательно. В последнюю камеру поступает разбавленный концентрат очищенной воды. Эта фракция рециркулируется через предыдущие камеры, что равномерно распределяет примеси и снижает их концентрацию в камерах обессоливания. Новая схема циркуляции демонстрирует высокую эффективность в управлении распределением трудноудаляемых примесей, таких как кремний и бор, в двухкамерной системе. Это достигается путем минимизации градиента их концентрации, что предотвращает обратную диффузию. Технология

обеспечивает достижение рекордно низкого уровня содержания кремния – всего 0,1 мкг/л, что соответствует самым строгим стандартам качества сверхчистой воды. Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности и надежности метода, а также о его потенциале для применения в высокотехнологичных процессах, требующих исключительной чистоты воды.

Конструкция из патента [13] направлена на решение актуальной проблемы, связанной с недостаточной эффективностью традиционных установок электродеионизации (EDI) в процессе удаления кремния (silica) из водных растворов. В стандартных системах концентрированный раствор подвергается циркуляции и смешению в специализированных камерах, что приводит к образованию высокой концентрации кремниевых ионов. Вследствие этого происходит диффузия кремния обратно в камеры обессоливания, что, в свою очередь, приводит к несоответствию качества получаемой воды установленным стандартам чистоты.

Схема аппарата представлена на рисунке 3.

Полученный технический результат обладает высокой значимостью не столько в инновационности конструкции мембранной ячейки, сколько в разработке принципиально нового метода управления гидравлическими потоками в электродиализных аппаратах (ЭДИ). Ключевая концепция заключается в реализации многоступенчатой противоточной рециркуляции концентрата, дополненной подачей очищенной воды на завершающем этапе технологического процесса. Это инновационное решение представляет собой значительный прорыв в области технологии, обеспечивая достижение ультравысокого качества очищенной воды с минимальным содержанием трудноудаляемых примесей, таких как кремний и бор [13].

В главе 4 источника [5] представлена дополнительная информация о различных типах электродеионизаторов. В частности, особое внимание уделяется физической конструкции традиционного EDI-модуля и его ключевым компонентам. В этой главе подробно анализируются типы ионообменных смол, включая катиониты и аниониты, а также характеристики ионообменных мембран, материалы и конфигурации электродов. Особое значение уделяется объяснению химического процесса, происходящего в EDI-системе. Подробно описывается, как под воздействием постоянного электрического тока ионы перемещаются из камеры обессоливания в камеру концентрирования через селективные мембраны. Эта информация представляет значительную ценность, так как она систематизирует базовые знания о классической конструкции EDI-ячейки, что является фундаментальной основой для понимания всех последующих модификаций и усовершенствований в данной области.

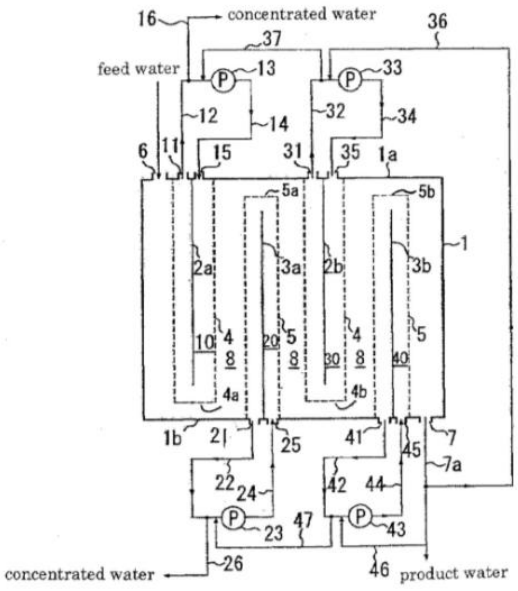


Рисунок 3. Электродеионизатор, представленный в патенте [13]

Figure 3. The electrodeionizer described in patent [13]

Статья [14] представляет собой подробный обзор, охватывающий более полувековую историю развития электродеионизации (EDI). В работе рассматриваются как ранние экспериментальные исследования, так и современные промышленные системы, демонстрируя прогресс и достижения в этой области. Авторы систематизируют ключевые конфигурации оборудования, стратегии повышения производительности и разнообразные области применения. Методологическая классификация, представленная в обзоре, является его главной ценностью, а не описанием новых инноваций. Авторы проводят тщательный сравнительный анализ различных архитектур, включая мембранные и безмембранные системы, а также аппараты с загрузкой ионитов. Это позволяет определить их место в контексте эволюции EDI. Такой подход способствует более глубокому пониманию тенденций развития и перспектив технологии.

Модернизированная конструкция электроионитного аппарата

Электроионитный аппарат разделяет растворы на очищенный дилюат и концентрированный поток с помощью ионообменных смол и селективных мембран.

Разработанное устройство [15] принадлежит к классу электроионитных аппаратов, функционирующих на основе ионопроводящих материалов. Эти устройства предназначены для выполнения специализированных

операций, таких как разделение, концентрация и очистка жидкостей с низкой минерализацией. Область применения данных аппаратов охватывает широкий спектр промышленных секторов, включая химическую, машиностроительную, пищевую и фармацевтическую отрасли, а также сельское хозяйство.

Электроионитный аппарат, рисунок 4, состоит из корпуса с герметичной нижней частью 1, разделенного перегородкой, и крышки 2 с выступами и приспособлениями для фиксации мембран 3. На противоположных боковых поверхностях корпуса расположены штуцеры для подачи исходного раствора и отвода концентрированного раствора 4 и 5. В корпусе предусмотрены каналы для подачи раствора в камеру концентрирования 6 и 7, а также каналы для отвода концентрированного раствора 8 и 9. Для формирования турбулентных потоков и предотвращения выноса ионообменной смолы используется сопло 10. В корпусе имеется паз 11 для размещения мембранодержателя 3 и уплотнительная прокладка 12 крышки 2.

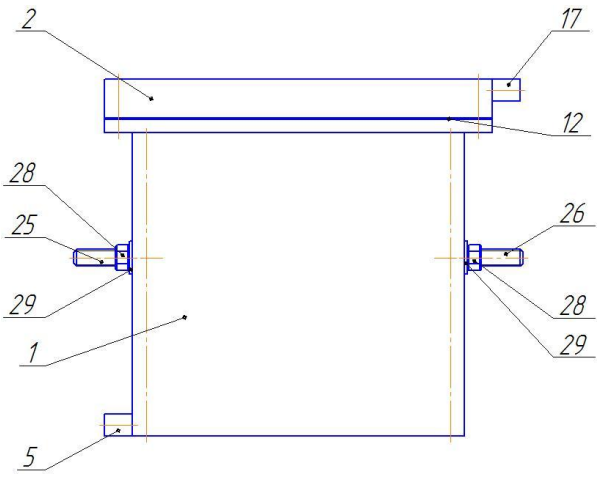


Рисунок 4. Основной вид электроионитного аппарата: 1 – корпус; 2 – крышка; 5 – штуцер отвода концентрата; 12 – уплотнительная прокладка крышки; 17 – штуцер отвода дилюата; 25 – катод; 26 – анод; 28 – прижимная гайка; 29 – прижимная шайба

Figure 4. The primary type of electrolytic ionizer: 1 – housing; 2 – cover; 5 – concentrate outlet fitting; 12 – cover gasket; 17 – diluent outlet fitting; 25 – cathode; 26 – anode; 28 – clamping nut; 29 – clamping washer

Для обеспечения эффективного перетока дилюата в системе используются специализированные переточные каналы 13 и 15, а также сопла 14 и 24, рисунок 5. Штуцеры, предназначенные для подачи исходного раствора и отвода дилюата 16 и 17, размещены на противоположных боковых сторонах крышки 2, что обеспечивает симметричное распределение потоков. Подача исходного раствора в камеры разделения осуществляется через каналы 18 и 19, что способствует равномерному распределению реагентов. Каналы 21 и 22 выполняют функцию отвода дилюата из камеры обессоливания, обеспечивая его эффективное удаление. Для предотвращения уноса смолы из камеры обессоливания используется сопло 23, которое играет ключевую роль в поддержании целостности и эффективности процесса.

На рисунке 5 показан основной вид электроионитного аппарата.

Катод 25 и анод 26 интегрированы в систему камер концентрирования и обессоливания, что обеспечивает эффективное разделение и очистку водных растворов. Камера концентрирования 27 оснащена ионообменной смолой, которая функционирует как селективный сорбент, удерживающий ионы и концентрирующий раствор. Для обеспечения герметичности выводов электродов в корпусе 1 снабжен прижимной гайкой 28 и шайбой 29, что предотвращает утечку электролитов и поддерживает оптимальные условия для протекания электрохимических процессов.

Камера обессоливания 31 аналогичным образом заполнена ионообменной смолой, однако её основная функция заключается в удалении нежелательных ионов из раствора, что достигается за счёт электродиализа. Между камерами концентрирования и обессоливания установлены катионообменная мембрана 32 и анионообменная мембрана 33, которые селективно пропускают ионы в зависимости от их заряда, обеспечивая высокую степень разделения.

Дополнительно конструкция аппарата, рисунок 6, включает вторую камеру обессоливания 34 и вторую камеру концентрирования 35, что позволяет реализовать многоступенчатые процессы очистки и концентрирования, повышая эффективность и качество конечного продукта. Таким образом, система демонстрирует высокую технологическую надёжность и гибкость, что делает её пригодной для применения в различных областях, в том числе химической промышленности, где требуется глубокая очистка и концентрация водных растворов.

Корпус 1 и крышка 2, оснащенные мембранодержателями 3, могут быть изготовлены из диэлектрических полимерных материалов. Электродные элементы производятся из оксида индия-олова (ОИОТ).

Аппарат работает следующим образом. Исходный раствор поступает через штуцер подачи 16 в каналы 19 камер разделения. Затем, через сопло 20, он турбулентным потоком направляется в первую камеру обессоливания 31. Ионы оседают на ионообменной смоле и перемещаются к мембранам под действием электрического тока: катионообменной 32 и анионообменной 33. Их транспорт через мембраны происходит благодаря избирательной способности.

Обессоленный раствор выводится через сопло 14 в каналы дилюата, предотвращая унос смолы. Затем он попадает в канал 14 и вторую камеру обессоливания 34, удаляя оставшиеся ионы. После этого раствор проходит через сопло 23, предотвращая унос смолы, и по каналам 21 и 22 направляется к штуцеру 17.

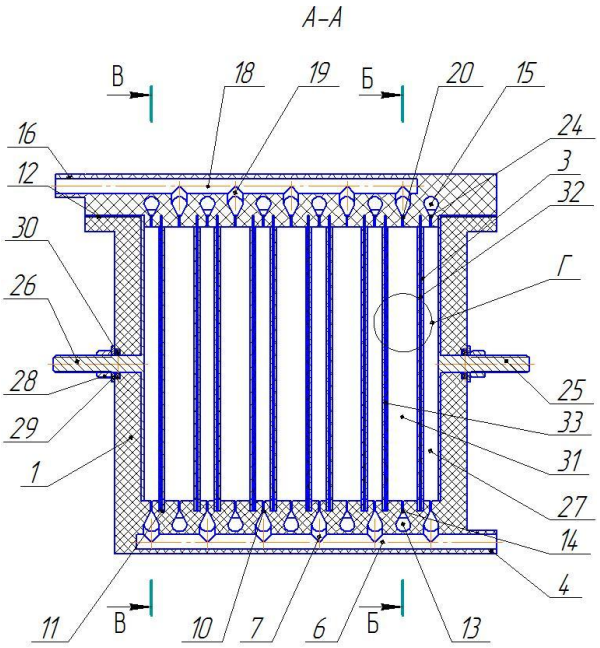


Рисунок 5. Фронтальный разрез электроионитного аппарата: 1 – корпус; 3 – мембранодержатели; 4 – штуцер подачи раствора для концентрирования; 6 – канал подачи раствора для концентрирования; 7 – канал подачи раствора для концентрирования в камеры разделения; 10 – сопло каналов раствора концентрата; 11 – паз для мембранодержателя; 12 – уплотнительная прокладка крышки; 13 – переточный канал дилюата; 14 – сопло переточных каналов дилюата; 15 – переточный канал концентрата; 16 – штуцер подачи исходного раствора; 18 – канал подачи исходного раствора; 19 – канал подачи исходного раствора в камеры разделения; 20 – сопло каналов дилюата; 24 – сопло переточного канала концентрата; 25 – катод; 26 – анод; 27 – первая камера концентрирования; 28 – прижимная гайка; 29 – прижимная шайба; 30 – уплотнительное кольцо; 31 – первая камера обессоливания; 32 – катионообменная мембрана; 33 – анионообменная мембрана

Figure 5. Internal structure of an electroion exchange apparatus: 1 – housing; 3 – membrane holders; 4 – inlet fitting for the solution to be concentrated; 6 – solution inlet channel for concentration; 7 – channel for feeding the solution for concentration into the separation chambers; 10 – nozzle for the concentrate solution channels; 11 – groove for membrane holder; 12 – cover gasket; 13 – diluent overflow channel; 14 – diluent overflow channel nozzle; 15 – concentrate overflow channel; 16 – feed fitting for starting solution; 18 – feed channel for the initial solution; 19 – feed channel for the initial solution to the separation chambers; 20 – diluent channel nozzle; 24 – concentrate overflow channel nozzle; 25 – cathode; 26 – anode; 27 – first concentration chamber; 28 – clamping nut; 29 – clamping washer; 30 – sealing ring; 31 – first desalination chamber; 32 – cation-exchange membrane; 33 – anion-exchange membrane.

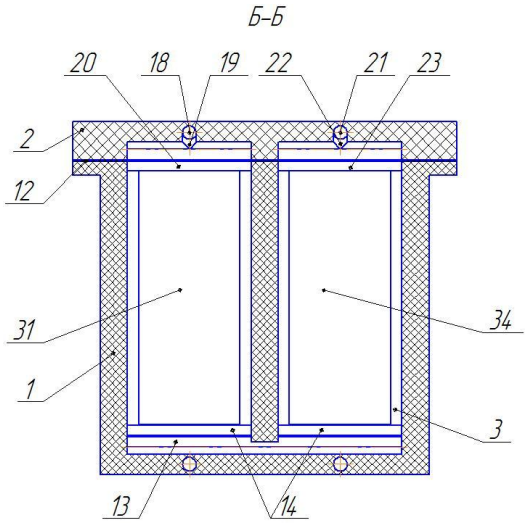


Рисунок 6. Электроионитный аппарат, поперечный разрез: 1 – корпус; 2 – крышка; 3 – мембранодержатели; 12 – уплотнительная прокладка крышки; 13 – переточный канал дилюата; 14 – сопло переточных каналов дилюата; 18 – канал подачи исходного раствора; 19 – канал подачи исходного раствора в камеры разделения; 20 – сопло каналов дилюата; 21 – канал отвода дилюата; 22 – канал отвода дилюата; 23 – сопло отвода и предотвращения уноса смолы; 31 – первая камера обессоливания; 34 – вторая камера обессоливания

Figure 6. Electroion exchange unit. 1 – housing; 2 – cover; 3 – membrane holders; 12 – cover gasket; 13 – diluent flow channel; 14 – diluent flow channel nozzle; 18 – feed channel for the initial solution; 19 – feed channel for the initial solution to the separation chambers; 20 – diluent channel nozzle; 21 – diluent discharge channel; 22 – diluent discharge channel; 23 – nozzle for discharge and prevention of resin carryover; 31 – first desalination chamber; 34 – second desalination chamber

Вместе с исходным раствором в штуцер 4 подаётся концентрирующий раствор. По каналам 6 и 7 он поступает в сопло 10, где турбулентные потоки предотвращают унос смолы. Раствор распределяется по первой камере концентрирования 27. Концентрат первой ступени направляется через сопла 24 и 15 во вторую камеру концентрирования 35 и выводится через сопло 10 и каналы 8 и 9 к штуцеру 5.

Принцип работы электроионитного аппарата схематично изображен на рисунке 7.

Этот аппарат обладает рядом преимуществ по сравнению с ранее рассмотренными конструкциями. Он отличается меньшей материалоемкостью в единицу объем аппарата, простотой изготовления, сборки и обслуживания. Это достигается благодаря глухим перегородкам в нижней части корпуса с пазами для мембранных держателей.

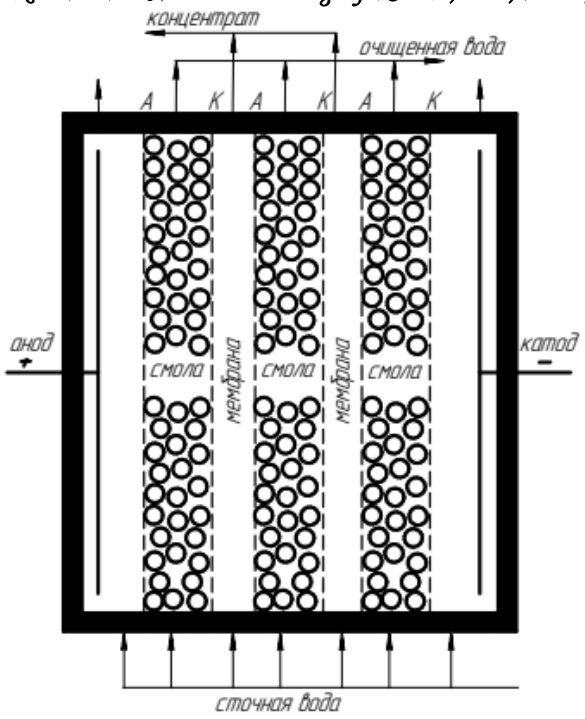


Рисунок 7. Принцип работы электроионитного аппарата

Figure 7. Principle of operation of an electro-ionization device.

Улучшенная гидродинамика и равномерное распределение потока при подаче раствора и отводе концентрата и дилюата достигаются благодаря расположению штуцеров на противоположных сторонах корпуса и крышки. Штуцеры для подачи концентрирующего раствора и отвода концентрата находятся на одной боковой стороне, а штуцеры для подачи исходного раствора и отвода дилюата – на другой.

Принцип функционирования и механизм действия электроионитного аппарата предоставляют широкие возможности для его интеграции в производственные процессы. Особенно перспективной представляется его внедрение в технологические схемы, требующие очистки и регенерации сточных вод. Это может быть востребовано в гальванических процессах, сельском хозяйстве, химической промышленности и т. п.

Интеграция аппарата в технологическую схему производства калимагнезии

В качестве примера для использования приведенного выше электроионитного аппарата рассмотрим производство минеральных удобрений.

Минеральные удобрения являются важнейшим компонентом современного агропромышленного комплекса, обеспечивая значительное повышение урожайности сельскохозяйственных культур. Промышленные предприятия выпускают широкий спектр минеральных и органоминеральных удобрений, препаратов, содержащих микроэлементы, а также стимуляторов роста растений. Однако продукция не всегда соответствует заявленным производителем характеристикам, что особенно актуально для микроудобрений. Качество новых удобрений, впервые представленных на рынке, также нередко вызывает вопросы [16].

Наиболее часто использующиеся минеральные удобрения: нитрат аммония, азофоска, аммофос, мочевина, суперфосфат, хлористый калий и калимагнезия. Рассмотрим подробнее последнее удобрение и то, как оно производится, выявив наиболее эффективное место внедрения расположение разработанного аппарата.

Калимагнезия (сульфат калия-магния, $K_2SO_4 \cdot MgSO_4$) – это калийно-магниевое удобрение без хлора. Оно слабо гигроскопично, не слеживается и хорошо рассеивается. Благодаря растворимым в воде солям – сернокислому калию и сульфату магния калимагнезия хорошо растворяется. В её составе может быть небольшой осадок из нерастворимых примесей [17].

Каинит ($KCl \bullet MgSO_4 \cdot 3H_2O$) и калимагнезия ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4$) дают хорошо выраженную реакцию на ион SO_4^{2-}. Однако в отличие от сернокислого калия последнее обнаруживают заметную реакцию и на ион Cl^-. При этом образуется муть в растворе калимагнезии и белый творожистый осадок в растворе каинита.

Минеральное удобрение выпускается в виде гранул и порошка серо-кирпичного цвета. Соотношение сернокислого калия и магния может немного варьироваться. В сухом веществе содержится 26–30% K_2O и 4–6% Mg.

Классическая схема производства калимагнезии включает в себя следующие основные этапы: подготовка сырья, очистка, химическая конверсия, кристаллизация, разделение, нейтрализация и грануляция [18].

На этапе предварительной обработки сырья, рисунок 8, карналлит подвергается растворению в рассоле в подготовительной емкости сырья 1. Полученный насыщенный раствор затем перекачивается посредством насоса 2 в осветлитель 3. В осветлительной установке осуществляется сепарация гетерогенной смеси на шлам и осветленный раствор. Шлам, содержащий механические примеси, подвергается дополнительной очистке на фильтр-прессе 5. Осветленный раствор, обогащенный необходимыми реагентами, направляется в дифферизационный резервуар 4 для дальнейшей переработки.

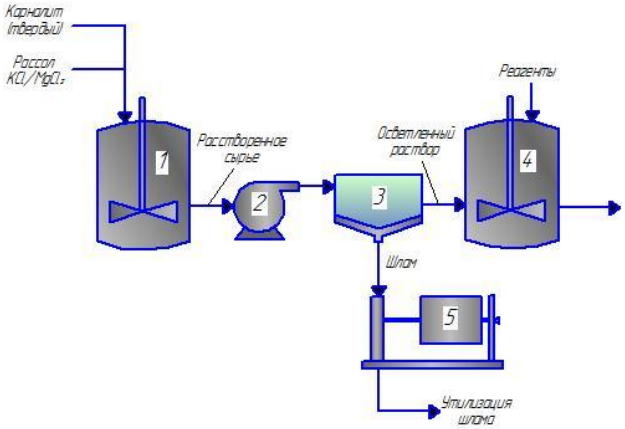


Рисунок 8. Начальный этап производства калимагнезии: 1 – подготовительная емкость сырья; 2 – насос сырья; 3 – осветлитель; 4 – дифферезационный резервуар; 5 – фильтр-пресс

Figure 8. Initial stage of production of kalimagnesia: 1 – raw material preparation; 2 – raw material pump; 3 – clarifier; 4 – differential tank; 5 – filter press

После завершения стадии дефиризации, рисунок 9, раствор транспортируется в резервуар 6, предназначенный для проведения процесса сульфатизации. В этот резервуар 6 добавляется серная кислота, что инициирует химическую реакцию, в результате которой образуется хлороводород. Полученный хлороводород подвергается очистке с использованием специализированного оборудования, такого как скруббер 8, что позволяет достичь требуемого уровня чистоты.

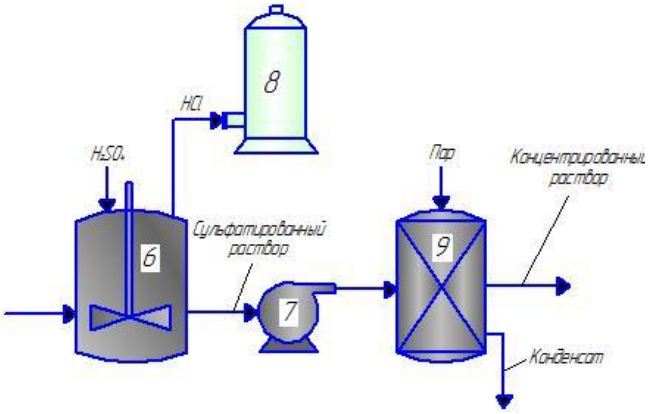


Рисунок 9. Получение сульфатизированного раствора и хлороводорода: 6 – резервуар сульфатизации; 7 – насос; 8 – скруббер; 9 – выпарной аппарат

Figure 9. Production of a sulfated solution and hydrogen chloride: 6 – sulfation tank; 7 – pump; 8 – scrubber; 9 – evaporator

Сульфатированный раствор далее подвергается процессу концентрирования посредством насоса 7, который перекачивает его в выпарной аппарат 9. В данном аппарате 9 под воздействием пара происходит термическое испарение воды, что приводит к увеличению концентрации раствора. В процессе испарения образуется побочный продукт в виде конденсата, который собирается и затем подвергается дополнительной очистке для удаления возможных примесей.

Концентрированный раствор подвергается процедуре охлаждения в кристаллизаторе 10 посредством системы проточной воды с пониженной температурой, рисунок 10. Данная химическая реакция приводит к образованию пульпы, которая затем направляется в центрифугу 11. В процессе центрифугации пульпа сепарируется на влажные кристаллы и отработанный хлоридный раствор.

Отработанный хлоридный раствор транспортируется в резервуар для нейтрализации и последующей утилизации, что обеспечивает эффективное управление отходами и минимизацию экологического воздействия.

В процессе производства калимагнезии происходит дегидратация влажных кристаллов. Для достижения этой цели используется ленточная сушилка 12, в которой осуществляется принудительная подача горячего воздуха через теплообменник 13, что обеспечивает эффективное удаление влаги. После завершения дегидратационного процесса дегидратированные кристаллы посредствам насоса 14 подвергаются транспортировке в смесительный резервуар 15, где осуществляется введение необходимых добавок.

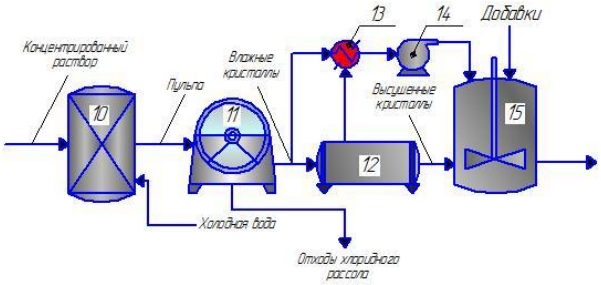


Рисунок 10. Получение кристаллов: 10 – кристаллизатор; 11 – центрифуга; 12 – ленточная сушилка; 13 – теплообменник; 14 – насос; 15 – смесительный резервуар

Figure 10. Obtaining crystals: 10 – crystallizer; 11 – centrifuge; 12 – belt dryer; 13 – heat exchanger; 14 – pump; 15 – mixing tank.

В результате данной процедуры формируется однородная смесь, которая затем подвергается гранулированию в грануляторе 16, рисунок 11. Полученные гранулы упаковываются в конечный продукт (калимагнезию) в упаковщике 17, который направляется на склад 18 для последующего хранения и реализации.

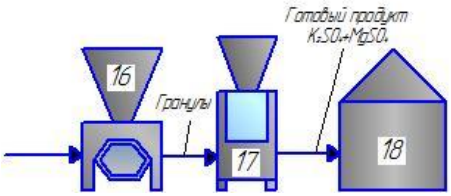


Рисунок 11. Финальный этап производства: 16 – гранулятор; 17 – упаковка; 18 – хранение продукции

Figure 11. The final stages of production: 16 – granulator; 17 – packaging; 18 – product storage

При анализе технологического процесса производства калимагнезии было выявлено два оптимальных места для интеграции электроионитного аппарата, рисунок 12: доочистка конденсата из выпарного аппарата и утилизация хлоридного рассола.

Выпарной аппарат 9 концентрирует раствор, увеличивая содержание целевых солей. Однако в нем могут оставаться примеси, такие как не полностью удаленные соли с низкой степенью кристаллизации. Эти примеси попадают в раствор на стадиях деферизации и сульфатизации.

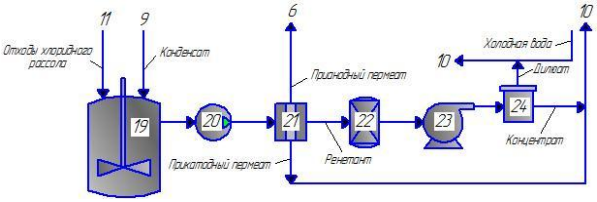


Рисунок 12. Интеграция электроионитного аппарата в технологическую схему: 19 – резервуар конденсата; 20 – дозировочный насос; 21 – электробаромембранный аппарат; 22 – накопитель ренетата; 23 – циркуляционный насос; 24 – электроионитный апппарат

Figure 12. Integration of the electro-ion exchange apparatus into the technological scheme: 19 – condensate tank; 20 – dosing pump; 21 – electro-baromembrane apparatus; 22 – rennet storage tank; 23 – circulation pump; 24 – electro-ion exchange apparatus

Концентрат, полученный после выпарного аппарата 9, проходит дальнейшую обработку в кристаллизаторе 10 и центрифуге 11. Примеси могут ухудшить качество конечного продукта или усложнить кристаллизацию.

Раствор хлоридов, образующийся после извлечения основного продукта, часто считается отходами. Для экологической безопасности его необходимо нейтрализовать и утилизировать по нормативам. В этом растворе могут содержаться ценные компоненты, такие как хлориды калия и магния, которые можно повторно использовать в производстве. Кроме того, раствор требует уменьшения объема или очистки из-за большого количества жидкости.

Процесс очистки начинается с подачи слабоминерализованного конденсата и хлоридного рассола, полученного из выпарного аппарата 9 и центрифуги 11 соответственно, в резервуар 19. Лопастная мешалка обеспечивает непрерывное перемешивание жидкости, что способствует равномерному распределению температуры и концентрации солей. Подготовленный раствор затем перекачивается дозировочным насосом 20 на первую стадию разделения.

Одним из элементом данного этапа является электробаромембранный аппарат 21, где под действием высокого давления и электрического тока исходный поток разделяется на три компонента. Первый компонент – прианодный пермеат, содержащий кислые компоненты, направляется в резервуар сульфатизации 6 для поддержания баланса химических реакций. Второй компонент – ретентат, содержащий оставшиеся соли, направляется в промежуточный накопитель 22 для последующей переработки.

После этого ретентат подвергается дополнительному разделению. Циркуляционный насос 23 перекачивает жидкость в электроионитный аппарат 24 [15], где селективные мембраны и электрическое поле обеспечивают финальную стадию деминерализации.

Обессоленная вода (дилюат) возвращается в кристаллизатор 10, объединяясь с потоком холодной воды, обеспечивая наименьшее ее потребление, а высококонцентрированный раствор солей (концентрат), объединенный с прикатодным потоком (третий компонент электробаромембранного разделения), поступает в кристаллизатор 10 для финального этапа формирования целевого продукта, что обеспечивает его высокое качество и однородность.

Таким образом, предприятие по производству минерального удобрения может реализовать замкнутую и устойчивую производственную цепочку, минимизирующую вредные стоки, возвращающую ценные компоненты в производственный цикл и обеспечивающую получение высококачественных минеральных кристаллов.

Экономическая оценка технологической схемы

Проведем детальный анализ затрат предприятия на эксплуатацию модернизированной технологической схемы [19–22].

В рамках внедрения новой технологии осуществляется процесс переработки побочных продуктов с целью их последующего повторного использования в производственном цикле. Для реализации данной задачи необходимы следующие компоненты: резервуар для

сбора отходов 19, дозировочный насос 20, электробаромембранная установка 21, дополнительный резервуар для хранения 22, циркуляционный насос 23 и электроионитная установка 24. Все указанные элементы функционируют в интегрированной системе, обеспечивая эффективное управление потоками отходов и их повторное вовлечение в производственный процесс. Это позволяет минимизировать негативное воздействие на окружающую среду и оптимизировать производственные операции.

Для проведения точного расчета затрат на приобретение оборудования необходимо произвести оценку объемов производственного процесса и побочных продуктов, требующих очистки.

В рамках анализа рынка калийных удобрений в Российской Федерации необходимо выделить ПАО «Уралкалий», базирующееся в Пермском крае, как одного из ведущих производителей в данной отрасли. Географическое положение региона предоставляет значительные конкурентные преимущества, обусловленные наличием крупных месторождений сильвинита и карналлита. Это позволяет осуществлять высокоэффективную добычу и переработку сырья, оптимизируя логистические затраты. Согласно информации, опубликованной в открытых источниках, средний объем производства на предприятиях данного сегмента составляет приблизительно 150 000 тонн в год, что указывает на значительные масштабы производственной деятельности и высокий уровень технологического развития процессов.

В процессе вакуум-кристаллизации происходят значительные изменения в составе и объеме циркулирующих растворов, обусловленные фазовыми переходами и химическими реакциями. Конденсация, составляющая от 0,5 до 3% от общего объема, является ключевым этапом данного процесса. Кроме того, наблюдаются потери хлоридного раствора, связанные с выносом отходов, варьирующиеся в диапазоне от 5 до 15% от начального объема. Таким образом, в среднем 1,75% раствора расходуется на конденсацию, а 10% – идет на образование хлоридных отходов.

Экстраполируя эти результаты на годовую производительность можно сделать вывод, что годовой объем конденсата составляет примерно 400 м³, а хлоридных отходов – около 1800 м³. Суммарный годовой объем образующихся сточных вод, таким образом, достигает 2200 м³, что требует комплексного подхода к их утилизации и очистке для обеспечения экологической безопасности и устойчивого функционирования производственного процесса.

Рассмотрим два резервуара различной вместимости: первый объемом 75 м³ и второй объемом 25 м³. Согласно рыночным данным, средняя стоимость таких резервуаров составляет 2 миллиона рублей. Для обеспечения эффективного функционирования этих резервуаров необходимо предусмотреть насосное оборудование, включающее дозировочный насос стоимостью 350 тысяч рублей и циркуляционный насос стоимостью 50 тысяч рублей.

Дополнительно требуется оборудование для мембранного разделения. Электробаромембранный аппарат с производительностью 1 м³/ч оценивается в 4,5 миллиона рублей, тогда как электроионитный аппарат аналогичной производительности стоит 2 миллиона рублей.

Таким образом, совокупные затраты на приобретение оборудования для дополнительного оборудования можно рассчитать следующим образом:

$$\Sigma = 4\,500\,000 + 2\,000\,000 + 2\,000\,000 + 350\,000 + 50\,000 = 8\,900\,000 \text{ рублей}$$

В дополнение к первоначальным затратам на приобретение необходимо предусмотреть финансирование на техническое обслуживание каждого компонента системы. Согласно традиционным подходам на эти цели выделяется от 8% до 10% от общего объема капитальных вложений (CAPEX). В рамках общепринятых практик средний показатель составляет 9%, что эквивалентно 801 000 рублей ежегодно.

В результате детального анализа технических параметров электробаромембранного и электроионитного оборудования было установлено, что в среднем за один час эксплуатации их энергопотребление составляет 4 кВт для первого типа устройств и 2,5 кВт для второго.

Проанализируем объем воды, который предстоит обработать за год. Это позволит определить, сколько времени потребуется для эффективного удаления примесей.

На электробаромембранный аппарат поступают все побочные растворы, требующие полной очистки. Для обеспечения данного процесса потребуется следующее энергопотребление:

$$П_{эбм} = 4 \cdot 2\,200 = 8\,800 \text{ кВт/год.}$$

После проведения электробаромембранной очистки сточных вод 65% объема концентрируется в прикатодном и прианодном пермеате. Оставшиеся 35% выводятся в виде ретенанта, который подвергается дальнейшей обработке. Учитывая производственные масштабы в резервуар для сбора ретентата ежегодно поступает приблизительно 770 м³ сточных вод. Для эффективной очистки такого объема электроионитному аппарату требуется около 1 925 кВт электроэнергии в год.

Таким образом, совокупное энергопотребление электробаромембранного

и электроионитного аппаратов составляет примерно 10 725 кВт в год, что соответствует 893,75 кВт в месяц.

В контексте анализа энергопотребления систем, необходимо учитывать не только энергозатраты аппаратов, но и эффективность работы насосного оборудования. Результаты исследования показывают, что дозировочный насос потребляет 1,5 кВт в час, тогда как циркуляционный насос демонстрирует потребление в размере 0,55 кВт в час.

Для проведения комплексной оценки годового энергопотребления насосного оборудования необходимо учитывать их интеграцию в технологическую схему и функциональную значимость. Таким образом, дозировочный насос потребует 3300 кВт в год, в то время как циркуляционный насос – 423,5 кВт в год. Суммарное энергопотребление данных насосов составляет 3723,5 кВт в год, что эквивалентно 310,3 кВт в месяц.

Учитывая совокупное энергопотребление аппаратов и насосного оборудования общий показатель энергопотребления достигает 1204 кВт в месяц. При тарифе на электроэнергию, составляющем 6 рублей за кВт (данные на I квартал 2026 года) годовые затраты на электроэнергию составят 86 691 рубль, а ежемесячные расходы – 7224 рубля.

В данном контексте совокупная стоимость, включающая затраты на рабочую силу и техническое обслуживание оборудования для модернизации в течение одного года составляет 887 691 рубль.

Для комплексной оценки общих расходов необходимо также учитывать первоначальные капитальные затраты на приобретение оборудования. Таким образом, совокупные расходы, учитывающие как операционные, так и капитальные затраты, составят:

$$З = 8\,900\,000 + 887\,691\ n;$$

где n – количество лет использования.

Для целей сравнительного анализа и оценки экономической целесообразности рассмотрим стоимость утилизации производственных отходов, исключая затраты на модернизацию и предполагая привлечение сторонних организаций для выполнения данных услуг. На основании анализа текущих рыночных условий тарифные ставки за утилизацию промышленных отходов варьируются в диапазоне от 1 500 до 2 500 рублей за 1 $м^3$ отходов.

С учетом данного диапазона ежегодные затраты на утилизацию отходов производственного характера составят приблизительно 4 400 000 рублей. Этот расчет произведен на основе предположения о среднем объеме производственных отходов, подлежащих утилизации.

В таком случае, получаем, что:

$$4\,400\,000 \cdot n_o = 8\,900\,000 + 887\,691 \cdot n_o;$$

где n_o – срок окупаемости в годах.

Экономические расчеты показали, что проект окупится через 2,5 года, даже с учетом всех затрат. На третий год доходы превысят расходы, что подтверждает его экономическую выгоду. Оборудование прослужит более 20 лет, что делает проект выгодным и привлекательным для долгосрочной финансовой стратегии.

Заключение

На основании результатов комплексного анализа аппаратно-конструктивных характеристик разработанного электромембранного оборудования для утилизации промышленных сточных вод, а также оптимизации технологической схемы производственного процесса и проведения детальной экономической оценки модернизационных мероприятий, можно сформулировать следующие выводы:

1. Разработанный электроионитный аппарат представляет собой значительное усовершенствование в области электромембранных технологий. Оптимизация направляющих-держателей в электроионитном аппарате позволила ликвидировать застойные зоны и повысить свободное пространство внутри прокладок-спейсеров, что привело к существенному увеличению производительности устройства. Инновационные конструктивные решения в области прокладок-спейсеров улучшили эффективность охлаждения и качество разделяемых растворов, что делает данный аппарат перспективным для применения в различных отраслях промышленности, где требуется высокоэффективная очистка, разделение и концентрирование растворов.

2. Калимагнезия – важное бесхлорное удобрение, в котором содержание хлора должно быть минимальным – обычно не более 1–1,5%. Однако исходное сырье, такое как карналлит и сильвинит, часто содержит избыток хлоридов, таких как NaCl, $MgCl_2$ и KCl. Основная технологическая сложность заключается в отделении хлорид-ионов от сульфат-ионов.

Внедрение электробаромембранного и электроионитного аппаратов в процесс производства калимагнезии ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4$) представляет собой важный шаг к современным технологиям. Это решает три ключевых задачи: ресурсосбережение – вода и соли повторно используются в производственном цикле; повышение качества продукта – снижение содержания хлоридов; экологизация производства – уменьшение вредного воздействия на окружающую среду.

Эти аппараты преобразуют линейное производство в циклическое, позволяя избирательно удалять хлор и возвращать сульфатный концентрат калия и магния в кристаллизаторы. Очищенная вода повторно используется в цикле без применения вредных химикатов.

3. Для запуска новой технологической схемы для производства гранулированной калимагнезии потребуется около 9,9 миллионов рублей. Эти финансовые затраты пойдут на покупку специального оборудования и комплектующих, а также на обслуживание машин, оплату электроэнергии и её компенсацию. Установка рассчитана на 20 лет работы, что позволяет оценить её надежность и экономическую эффективность.

Финансовые расчеты показывают, что проект окупится за 2,5 года, что говорит о его высокой рентабельности. Учитывая долгий срок службы оборудования такой инвестиционный план выглядит экономически обоснованным и стратегически выгодным. Он обеспечит устойчивое развитие предприятия и его конкурентоспособность на рынке удобрений.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках проекта «Теоретические и экспериментальные исследования электрокинетических и структурных характеристик полимерных мембран посредством применения искусственных нейронных сетей в процессах электромембранной очистки промышленных растворов, содержащих ионы металлов» (FEMU-2024–0011).

Литература

1 Gao, W. Comprehensive assessment of membrane technology for typical water treatment processes: A critical review / W. Gao, Z. Wang, F. Duan [et al.] // Desalination. – 2025. – Vol. 570.

2 Агеев, Е.П. Мембранные процессы разделения / Е.П. Агеев // Критические технологии. Мембраны. – 2001. – № 9. – С. 42–56.

3 Simdianov, D. Analysis of challenges and problems in the application of electrodeionisation for demineralized water production // Water and Water Purification Technologies. – 2025. – Vol. 1, No. 31.

4 Яковлева, М.Р. и др. Сравнительная оценка процессов электродиализа и электродеионизации // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2023. – Т. 16, № 3. – С. 115–125.

5 Kumar, P.S. Electrodeionization: Fundamentals, Methods and Applications / P.S. Kumar, B.S. Rathi. – Elsevier, 2024. – 350 p.

6 Hu, J. Membrane-free electrodeionization using strong-type resins for high purity water production / J. Hu, Z. Fang, X. Jiang, T. Li, X. Chen // Separation and Purification Technology. – 2015. – Vol. 144. – P. 90–96.

7 Pan, S.Y. Development of a resin wafer electrodeionization process for impaired water desalination with high energy efficiency and productivity // ACS Sustainable Chemistry and Engineering. – 2017. – Vol. 5, No. 4. – P. 2942–2948.

8 Gallagher, C.J. Fundamentals of Electrodeionization (EDI) Technology / C.J. Gallagher // Water Conditioning & Purification International Magazine. – 2007.

9 Пат. 2090251 C1 Российская Федерация, МПК B01D 61/48. Электроионитная установка / Л.Г. Стариковский, А.Д. Рябцев. – № 93041086/26; заявл. 17.08.1993; опубл. 20.09.1997.

10 Jordan, M.L. et al. Promoting water-splitting in Janus bipolar ion-exchange resin wafers for electrodeionization // Molecular Systems Design and Engineering. – 2020. – Vol. 5, No. 5. – P. 922–935.

11 Пат. 2201793 C1 Российская Федерация, МПК B01D 61/48. Электродеионизатор / Э.Н. Компаниец, А.И. Потапов, Л.Г. Стариковский. – № 2001120672/12; заявл. 23.07.2001; опубл. 10.04.2003.

12 Пат. US 2010/0108521 A1 США. Methods and apparatus for electrodeionization / J.D. Gifford, D.E. Dillinger; Ionics Inc. – Заявл. 06.11.2008; опубл. 06.05.2010.

13 Пат. 1172145 A2 ЕПВ, МПК B01J 47/08, B01D 61/48. Способ и устройство для подготовки воды методом электродеионизации / Сато Шин (Sato Shin); патентообладатель – Курита Уотер Индастриз Лтд. (Kurita Water Ind. Ltd.). – № 01306005.8; заявл. 12.07.2001; опубл. 16.01.2002.

14 Alvarado, L. Electrodeionization: principles, strategies and applications / L. Alvarado, A. Chen // Electrochimica Acta. – 2014. – Vol. 132. – P. 583–597.

15 Пат. 2848666 C1 Российская Федерация, МПК B01D 61/48. Электроионитный аппарат / С.И. Лазарев, Д.Н. Коновалов, П.М. Малин; Заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-т. – № 2025107578; заявл. 28.03.2025; опубл. 21.10.2025.

16 Позин, М.Е. Технология минеральных удобрений: учебник для вузов / М.Е. Позин. – 6-е изд., перераб. – Л.: Химия, 1989. – 352 с.

17 Технология калийных удобрений / под ред. В.В. Печковского. – Минск: Высшая школа, 1978. – 304 с.

18 $K_2SO_4 \cdot MgSO_4$ – Phase Equilibria and Industrial Production // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2000. – Vol. 39, No. 3. – P. 712–718.

19 Волкова, О.И. Экономика предприятия: практикум / под ред. О.И. Волкова, В.Я. Позднякова. – М.: ИНФРА-М, 2005. – 331 с.

20 Чечевицына, И.Н. Экономика предприятия: учебник / под ред. И.Н. Чуева. – М.: Дашков и КО, 2004. – 416 с.

21 Приказ Минфина РФ от 13.10.2003 № 91н (ред. от 24.12.2010, с изм. от 23.01.2020) «Об утверждении Методических указаний по бухгалтерскому учету основных средств» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 21.11.2003 № 5252).

22 Клочкова, Е.Н. Экономика предприятия: учебник для вузов / Е.Н. Клочкова, В.И. Кузнецов, Т.Е. Платонова, Е.С. Дарда; под ред. Е.Н. Клочковой. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Юрайт, 2026. – 370 с.

References

1 Gao, W. Comprehensive assessment of membrane technology for typical water treatment processes: A critical review / W. Gao, Z. Wang, F. Duan [et al.] // Desalination. – 2025. – Vol. 570.

1. Ageev, E.P. Membrane separation processes // Critical technologies. Membranes. – 2001. – No. 9. – p. 42–56.
2. Simdianov, D. Analysis of challenges and problems in the application of electrodeionisation for demineralized water production // Water and Water Purification Technologies. – 2025. – Vol. 1, No. 31.
3. Yakovleva, M.R. Comparative Evaluation of Electrodialysis and Electrodeionization Processes // Food Industry: Science and Technology. – 2023. – Vol. 16, No. 3. – p. 115–125.
4. Kumar, P.S. Electrodeionization: Fundamentals, Methods and Applications / P.S. Kumar, B.S. Rathi. – Elsevier, 2024. – 350 p
5. Hu, J. Membrane-free electrodeionization using strong-type resins for high purity water production / J. Hu, Z. Fang, X. Jiang, T. Li, X. Chen // Separation and Purification Technology. – 2015. – Vol. 144. – P. 90–96.
6. Pan, S.Y. Development of a resin wafer electrodeionization process for impaired water desalination with high energy efficiency and productivity / S.Y. Pan, S.W. Snyder, Y.J. Lin, P.C. Chiang // ACS Sustainable Chemistry and Engineering. – 2017. – Vol. 5, No. 4. – P. 2942–2948.
7. Gallagher, C.J. Fundamentals of Electrodeionization (EDI) Technology / C.J. Gallagher // Water Conditioning & Purification International Magazine. – 2007.
8. Pat. 2090251 C1 Russian Federation, IPC B01D 61/48. Electroionite installation / L.G. Starikovsky, A.D. Ryabtsev. No. 93041086/26; applied on 17.08.1993; published on 20.09.1997.
9. Jordan, M.L. Promoting water-splitting in Janus bipolar ion-exchange resin wafers for electrodeionization / M.L. Jordan, L. Valentino, N. Nazyrynbekova, V.M. Palakkal, S. Kole, D. Bhattacharya, Y.J. Lin, C.G. Arges // Molecular Systems Design and Engineering. – 2020. – Vol. 5, No. 5. – P. 922–935.
10. Pat. 2201793 C1 Russian Federation, IPC B01D 61/48. Electrodeionizer / E.N. Kompaniets, A.I. Potapov, and L.G. Starikovsky. – No. 2001120672/12; filed on July 23, 2001; published on April 10, 2003.
11. Pat. US 2010/0108521 A1 USA. Methods and machines for electrodeionization / J.D. Gifford, D.E. Dillinger; Ionics Inc. – Appl. 06.11.2008; publ. 06.05.2010.
12. Patent 1172145 A2 EPO, IPC B01J 47/08, B01D 61/48. Method and device for water treatment by electrodeionization / Sato Shin; patent holder – Kurita Water Industries Ltd. (Kurita Water Ind. Ltd.). – No. 01306005.8; application. 12.07.2001; published. 16.01.2002.
13. Alvarado, L. Electrodeionization: principles, strategies and applications / L. Alvarado, A. Chen // Electrochimica Acta. – 2014. – Vol. 132. – P. 583–597.
14. Pat. 2848666 C1 Russian Federation, IPC B01D 61/48. Electroionite Apparatus / S.I. Lazarev, D.N. Konovalov, P.M. Malin; Applicant and Patent Holder Tamb. State Tech. Univ. – No. 2025107578; filed on March 28, 2025; published on October 21, 2025.
15. Pozin, M.E. Technology of Mineral Fertilizers: Textbook for Higher Education Institutions / M.E. Pozin. – 6th edition, revised. – Leningrad: Khimiya, 1989. – 352 p.
16. Technology of Potassium Fertilizers / edited by V.V. Pechkovsky. – Minsk: Vysshaya Shkola, 1978. – 304 p.
17. $K_2SO_4 \cdot MgSO_4$ – Phase Equilibria and Industrial Production // Industrial & Engineering Chemistry Research. – 2000. – Vol. 39, No. 3. – P. 712–718.
18. Volkova, O.I. Enterprise Economics.: a practical guide / O.I. Volkova; edited by O.I. Volkova, V. Ya. Pozdnyakov. – Moscow: INFRA-M, 2005. – 331 p.
19. Chechevitsyna, I.N. Enterprise Economics: a textbook / I.N. Chechevitsyna, L.N. Chuev; edited by I.N. Chuev. – Moscow: Dashkov & Co., 2004. – 416 p.
20. Order of the Ministry of Finance of the Russian Federation No. 91n of 13.10.2003 (as amended on 24.12.2010, rev. of 23.01.2020) "On Approval of the Methodological Guidelines for Accounting of Fixed Assets" (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 21.11.2003, No. 5252).
21. Klochkova, E.N. Enterprise Economics: a textbook for universities / E.N. Klochkova, V.I. Kuznetsov, T.E. Platonova, E.S. Darda; edited by E.N. Klochkova. – 3rd ed., revised and enlarged. – Moscow: Yurait, 2026. – 370 p

.

Сведения об авторах

Дмитрий Н. Коновалов д.т.н., доцент, кафедра «Техника и технологии автомобильного транспорта», Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, kdn1979dom@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9366-8661

Сергей И. Лазарев д.т.н., заведующий кафедрой, кафедра «Механика и инженерная графика», Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, sergey.lazarev.1962@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0746-5161

Information about authors

Dmitry N. Konovalov Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Department of "Engineering and Technology of Motor Transport", Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, kdn1979dom@mail.ru
https://orcid.org/0000-0002-9366-8661

Sergey I. Lazarev Doctor of Technical Sciences, Head of the Department, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, sergey.lazarev.1962@mail.ru
https://orcid.org/0000-0003-0746-5161

Анна Г. Сысоева аспирант, кафедра «Механика и инженерная графика», Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, asus1301201@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-4805-1586

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра «Коммерции и товароведения», Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия, профессор-консультант, кафедра технологии продуктов животного происхождения, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036 kaf-kit@vfreu.ru
https://orcid.org/0000-0002-7333-4816

Кирилл А. Горденков магистрант, институт Архитектуры, строительства и транспорта, Тамбовский государственный технический университет, Советская, 106, Тамбов, 392000, Россия, kirillgorden@gmail.comМесто для ввода текста.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Anna G. Sysoeva graduate student, Department of Mechanics and Engineering Graphics, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, asus1301201@gmail.com
https://orcid.org/0009-0007-4805-1586

Konstantin K. Polyansky Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of "Commerce and commodity science", Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karl Marx, 67A, Voronezh, 394030, Russia, consulting professor, technology of animal products depart-ment, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, kaf-kit@vfreu.ru
https://orcid.org/0000-0002-7333-4816

Kirill A. Gordenkov Master's student, Institute of Architecture, Construction and Transport, Tambov State Technical University, Sovetskaya 106, Tambov, 392000, Russia, kirillgorden@gmail.comМесто для ввода текста.

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 08/06/2026	После редакции 22/06/2026	Принята в печать 23/07/2026
Received 08/06/2026	**Accepted in revised** 22/06/2026	Accepted 23/07/2026