

О. К. Никулина¹, О. В. Колоскова¹, М. Р. Яковлева¹, О. В. Дымар²

¹РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию»,
г. Минск, Республика Беларусь

²Представительство АО «МЕГА» в Республике Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗА ДЛЯ ОЧИСТКИ ДИФФУЗИОННОГО СОКА В САХАРНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Аннотация. Проведен анализ основных производственных процессов, используемых в сахарной отрасли, и способов повышения эффективности производства. В сахарной промышленности Республики Беларусь используется в основном экстенсивный путь повышения эффективности производства — совершенствование существующей технологической схемы преимущественно без внедрения новых технологий. Этот путь несет низкие риски, но имеет естественные ограничения. В работе рассмотрен альтернативный вариант повышения эффективности сахарного производства, который основан на использовании новых электромембранных технологий, дополняющих традиционную технологическую схему или частично заменяющих ее стадии. Наиболее перспективным и малоисследованным способом обработки продуктов переработки сахарной свеклы с целью повышения эффективности производства является электродиализ. Целью исследования является изучение влияния электромембранной обработки диффузионного сока различной степени очистки на повышение эффективности переработки сахарной свеклы. Приведены результаты модельных испытаний процесса электродиализа в условиях реального производства при установившемся режиме получения сахара на пилотной мембранной установке с катионно-анионным набором мембран. Представлены результаты расчетов, подтверждающие эффективность применения электромембранной обработки в технологии переработки сахарной свеклы.

Ключевые слова: очистка диффузионного сока, мелассообразователи, полупродукты сахарного производства, деминерализация, электродиализ, электромембранные технологии

O. K. Nikulina¹, O. V. Koloskova¹, M. R. Yakovleva¹, O. V. Dymar²

¹RUE “Scientific and Practical Centre for Foodstuffs of the National Academy
of Sciences of Belarus”, Minsk, Republic of Belarus

²Representative of MEGA a.s. in Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

APPLICATION OF ELECTRODIALYSIS FOR PURIFICATION OF DIFFUSION JUICE IN SUGAR PRODUCTION

Abstract. An analysis of the main production processes used in the sugar industry and ways to improve production efficiency is presented. In the sugar industry of the Republic of Belarus, an extensive way of increasing production efficiency is mainly used — improving the existing technological scheme mainly without introducing new technologies. This path carries low risks, but has natural limitations. The paper considers an alternative option for increasing the efficiency of sugar production, which is based on the use of new electromembrane technologies that complement the traditional technological scheme or partially replace its stages. The most promising and little-studied method of processing sugar beet processing products in order to increase production efficiency is electro dialysis. The aim of the study is to study the effect of electromembrane treatment of diffusion juice of various degrees of purification on improving the efficiency of sugar beet processing. The results of model tests of the electro dialysis process in real production conditions with a steady-state sugar production mode on a pilot membrane installation with a cation-anionic set of membranes are presented. The results of calculations confirming the effectiveness of the use of electromembrane processing in the technology of sugar beet processing are presented.

Keywords: purification of diffusion juice, molasses-forming agents, sugar production intermediates, demineralization, electro dialysis, electromembrane technologies

Введение. Получаемый из свежесочной стружки диффузионный сок содержит помимо сахарозы различные несахара, которые затрудняют проведение технологических процессов. Для снижения количества несахаров, т.е. очистки диффузионного сока, его обрабатывают известью (проводят предварительную и основную дефекацию), диоксидом углерода (процессы I и II сатурации) и диоксидом серы (сульфитация) [1–7].

В настоящее время известно более 100 вариантов схемы углекислотной очистки диффузионного сока. Они отличаются как технологическим, так и аппаратным оформлением. Единой рациональной схемы до сих пор не существует. В этой связи поиск способов оптимизации схемы очистки диффузионного сока — актуальное направление научной работы с целью повышения выхода сахара из единицы сырья, так как позволяет снизить его потери в мелассе [1 — 7].

Базовая схема известково-углекислотной очистки должна включать этапы, позволяющие решить следующие задачи [3]:

1. Обеспечить максимально возможное осаждение высокомолекулярных соединений (ВМС).
2. Обеспечить максимально возможное осаждение анионов кислот, образующих с ионами Ca^{2+} трудно растворимые соли, не удаляемые в процессе очистки и снижающие производительность теплообменной аппаратуры.

Особенностью технологии является то, что чем больше осаждаются указанных ионов из сока, тем больше в нем избыток щелочных металлов калия и натрия. Содержание этих элементов определяет величину натуральной щелочности сока II сатурации — это важный показатель технологических свойств сока, который показывает наличие в нем избыточного реактива, осаждающего Ca^{2+} . Чем выше натуральная щелочность, тем полнее удаление солей кальция из сока [3, 8, 9].

Негативным моментом такого технологического решения является повышение содержания сахара в мелассе и, следовательно, снижение его выхода. Это происходит из-за повышения растворимости сахарозы в присутствии ионов калия и натрия — их высокого мелассообразующего коэффициента [6, 9].

Исходя из вышеописанного, актуальным является поиск способа, позволяющего не только удалять соли кальция, но и снижать содержание мелассообразующих элементов — калия и натрия.

В сахарной отрасли Республики Беларусь используется в основном экстенсивный путь повышения эффективности производства — усовершенствование существующей технологической схемы преимущественно без внедрения новых технологий. Альтернативным путем повышения эффективности сахарного производства является внедрение новых технологий, дополняющих традиционную технологическую схему и/или частично заменяющих ее стадии.

На рис. 1 представлены основные производственные процессы, используемые в Республике Беларусь, и основные производственные процессы, используемые в передовой зарубежной практике [10].

Как видно из рис. 1, за рубежом не применяют сульфитацию растворов, а используют для обесцвечивания сока (сиропа) ионообмен либо ультрафильтрацию. Обработку сока известковым молоком и диоксидом углерода применяют только в качестве предварительной очистки. В некоторых схемах они полностью исключены и заменены мембранными процессами микро- и ультрафильтрации. Как правило, в сахарном производстве зарубежных стран всегда присутствует стадия умягчения и деминерализации сока ионообменом [10].

Сгущение (концентрирование) сока осуществляется либо традиционным выпариванием, либо с помощью более совершенных мембранных процессов — высокоселективной нанофильтрации или обратного осмоса. Кристаллизацию сахара проводят традиционным методом уваривания под разрежением. Для обработки оттеков utfелей II и III кристаллизации иногда используют процесс Квентина, или ионообменное обесцвечивание. На многих зарубежных сахарных заводах из мелассы методом хроматографии извлекают дополнительную сахарозу. По нашей технологии данный сахар учитывается как потери целевого продукта в мелассе [10].

За рубежом широко распространены ионообменные технологии. Их используют для самых разнообразных целей [10]:

1. С помощью ионитов удаляют соли кальция из соков перед их выпариванием для предотвращения накипобразования.

Применение флокулянтов и ингибиторов накипобразования на стадии очистки соков отрицательно влияет на фильтрование сиропов и ухудшает показатели качества сахара. Повсеместное использование антинакипинов препятствует снижению содержания кальциевых солей и способствует увеличению мутности сахара [11].

Образующиеся микрокристаллы карбоната кальция в результате дефлокулирующего действия антинакипинов теряют способность к укрупнению и находятся в сиропе в диспергированном виде, что затрудняет их отфильтровывание и тем самым обуславливает мутность товарного сахара. Альтернативой использования антинакипинов является декальцинация (умягчение) сока II сатурации, которая решает сразу две задачи: предотвращает накипобразование при выпаривании и снижает мутность белого сахара. Одним из способов декальцинации (умягчения) сока является применение ионного обмена по схеме NRS-процесса. Данный способ основан на обмене ионов кальция и магния

5. Дополнительно извлекают сахар из мелассы с помощью ее деионизации или хроматографического разделения.

Метод разделения сахаросодержащих растворов хроматографией относительно новый, но уже широко применяется для извлечения сахарозы из мелассы. Используется специально разработанная компанией Almagamated Sugar (США) технология хроматографии в псевдодвижущемся слое сорбента. Процесс протекает в сорбционных колоннах с неподвижным слоем сорбента (одновалентной ионообменной смолы). Потoki исходного сахаросодержащего раствора и растворителя для элюирования вводят с различных точек. Они двигаются по профилю колонн, создавая профиль концентраций. Процесс совмещает в себе жидкостную экстракцию и хроматографию. Сахароза переходит в экстракт, несахара — в рафинат. Процесс хроматографии наиболее широко используют для обессахаривания мелассы, но существует и технология прямой очистки сахарного сиропа. В процессе разделения удаляется 75–85 % несахаров, 80–95 % ионов, 95 % красящих веществ [10].

Наряду с высоким положительным эффектом существуют и определенные сложности, связанные с применением данной технологии [10]:

- ♦ из раствора должны быть удалены взвешенные вещества и проведена дегазификация во избежание окисления смолы растворенным кислородом;
- ♦ сахаросодержащий раствор должен быть предварительно умягчен, т.к. двухвалентные катионы снижают эффективность разделения.

С целью увеличения выхода сахара в результате снижения его содержания в мелассе были предложены комбинированные схемы, сочетающие известково-углекислотную очистку сока с дальнейшей его обработкой ионообменными смолами [14], которые позволяют значительно увеличить эффект очистки сока, но имеют определенные недостатки [7, 10]:

- ♦ высокий расход реагентов;
- ♦ необходимость частых регенераций ионитов, после которых образуется большое количество агрессивных сточных вод.

Перспективной для изучения является технология, основанная на свойствах мембран, имеющих пористую структуру. Эффективность такой очистки в значительной степени зависит от пор мембраны. Для разделения сахаросодержащих растворов можно использовать четыре основных баромембранных процесса: микрофильтрацию, ультрафильтрацию, нанофильтрацию и обратный осмос. Также интерес для пищевой промышленности представляют ионообменные технологии и, в частности, электродиализ как безреагентная технология снижения концентрации ионов [15 — 17].

Существует два основных направления применения мембранных процессов в производстве сахара [10]:

- ♦ очистка сахаросодержащих растворов (диффузионного сока и сахарного сиропа) от различных примесей;
- ♦ концентрирование очищенного сока, заменяющее процесс выпаривания.

В первом случае для очистки сахаросодержащих растворов используют мембраны с крупным размером пор (микро- и ультрафильтрационные). Во втором случае для концентрирования сока применяют нанофильтрационные и обратноосмотические мембраны с малым размером пор. Микро- и ультрафильтрацию наиболее часто предлагают использовать для осветления и очистки диффузионного сока. При этом, как правило, мутность снижается на 99 %, высокомолекулярные полисахариды (крахмал, декстран) удаляются приблизительно на 50 %. Степень удаления красящих веществ зависит от размера пор мембран и характеристик красящих веществ [2, 10].

Мембранное разделение проводят в режиме тангенциального, т.е. касательного к поверхности мембраны потока фильтруемого раствора. Поток исходного раствора разделяется на два: проходящий через мембрану — фильтрат (пермеат) и текущий над мембраной — концентрат. В каждом из этих потоков в связи с селективностью мембран изменяется состав смеси. Движущая сила мембранных процессов разделения — градиент давления, поэтому их называют баромембранными. Между размерами пор мембраны и градиентом давления существует определенная взаимосвязь: уменьшение размера пор в мембране, приводящее к способности задерживать более мелкие частицы, обуславливает необходимость использования все более высокого давления [10, 18]. При разработке технологий на базе нанофильтрации и обратного осмоса необходимо учитывать собственное высокое осмотическое давление сахарных растворов.

Обработка растворов с помощью мембранных методов позволяет снизить расход реагентов по сравнению с ионообменной подготовкой, однако, требует тщательной подготовки исходного раствора [19].

Схемы, применяющиеся для опреснения морской воды, не применимы для технологии свекло-сахарного производства, так как продукты сахарного производства являются сложными поликомпонентными системами с высоким риском выпадения осадка в виде нерастворимых солей. При фильтровании через мембраны таких растворов на поверхности мембраны образуется осадок или пленка высокомолекулярного вещества, что снижает скорость фильтрования. Кроме того, высокомолекулярные вещества, проникая в поры мембран, закупоривают их, что приводит к снижению скорости

фильтрации и производительности установки. Данные факты являются основными причинами, по которым проведенные в 60-е годы исследования по применению методов мембранной обработки продуктов сахарного производства не нашли применения [2].

Дальнейшие исследования применения мембранных технологий совместно с другими известными методами (известково-углекислотная очистка, иониты) дали определенный положительный результат, однако, повсеместного распространения не получили [2].

В 90-е годы основным объектом исследований очистки мембранной технологией был диффузионный сок, так как именно его очистка мембранными методами представляется наиболее целесообразной. Определенные успехи в этом направлении достигнуты итальянской фирмой Tekchimont, разработавшей способ получения сахара кристаллизацией очищенного при помощи мембранной технологии диффузионного сока [2]. Тем не менее данная технология имеет свои недостатки: энергетические затраты на проведение процесса выше в сравнении с общепринятой технологией, так как предварительно применяется подготовка диффузионного сока, которая включает ультрафильтрацию и обратный осмос [15 — 17].

В последние десятилетия проводились исследования по выявлению возможности использования мембранной технологии для очистки других продуктов сахарного производства: диффузионного сока, очищенного сока, сиропа, растворов мелассы. Интерес к данной технологии состоит в том, что она проводится без добавления химических реагентов [3].

Электродиализная очистка диффузионного сока с помощью ионитовых мембран является прогрессивным и в то же время малоисследованным способом, позволяющим увеличить выход сахара вследствие дополнительной его очистки. При этом используется доступный и экологичный способ регенерации ионообменных частиц — электрическим током. К тому же применение электродиализа в технологии сахарного производства способствует решению задачи безотходной технологии [7].

Электродиализ — процесс переноса ионов через полупроницаемую мембрану под действием электрического поля, который может проходить как по градиенту концентрации, так и против него [20].

Процесс электродиализа представляет собой движение катионов к катоду, а анионов к аноду под действием постоянного электрического тока в растворе [19]. На пути движения ионов устанавливаются ионообменные мембраны, катионная и анионная, пропускающие только один вид ионов, и через поры мембран перемещаются только соответствующие ионы электролитов, а сахароза, являясь электронейтральным веществом, остается в растворе, из которого происходит удаление солей и за счет этого достигается его очистка [3].

Эффективность переноса может изменяться подбором типа мембран и рабочего напряжения [21].

Основными критериями, характеризующими качество полупроницаемых мембран, являются селективность и проницаемость. Возможность задерживать различные ионы пропорциональна величине селективности мембран, а электропроводность зависит от электрических характеристик противоионов и находится в обратно пропорциональной зависимости от толщины мембран [19].

Электродиализ обеспечивает получение продукта высокого качества путем регулирования минерального состава и кислотности до требуемых значений за счет удаления ионогенных соединений. Электродиализ не только обеспечивает корректировку физико-химических показателей, но и значительно улучшает органолептические и технологические характеристики, что облегчает дальнейшие операции вакуумного сгущения, кристаллизации и сушки [22].

Электродиализная очистка может быть включена в классическую технологию производства сахара на одном или нескольких этапах: для первичной очистки сока, для дополнительной очистки сока II сатурации, полусиропа после III корпуса выпарной станции, для обработки клеровки I оттока утфеля I или II кристаллизации и даже клеровки мелассы. С технологической точки зрения целесообразнее удалять несахара в начале технологической схемы, т.е. проводить электродиализную очистку сока, что интенсифицирует работу выпарной установки и продуктового отделения сахарного завода [7].

Исследования в данной области позволяют не только усовершенствовать технологию получения сахара путем использования процесса электродиализа, но и решить ряд технологических проблем и разработать нормативную документацию на ведение процесса деминерализации в сахарном производстве.

Цели и задачи исследования. Целью исследования является изучение влияния электромембранной обработки диффузионного сока различной степени очистки на его химический состав с целью повышения эффективности переработки сахарной свеклы.

Основные задачи исследования:

1) изучить изменение содержания ионов калия и натрия, которые являются основными мелассообразователями и увеличивают потери сахарозы и ионов кальция при электромембранной обработке соков;

2) изучить изменение технологического качества полупродуктов в процессе электромембранной обработки;

3) рассчитать технологические показатели и провести сравнительную оценку технологических схем переработки сахарной свеклы с применением электродиализа.

Методы исследований. Для получения данных о фактических пределах изменения содержания катионов, анионов в полупродуктах сахарного производства и их технологического качества были проведены модельные испытания процесса электродиализа в условиях реального производства при установившемся режиме получения сахара на пилотной мембранной установке с катионно-анионным набором мембран на диффузионных соках, соках I сатурации и сульфитированных соках.

Модельные испытания производились на пилотной мембранной установке ED(R) — Y производства MEGA a.s., Чехия (рис. 1) с катионно-анионным набором мембран.



Рис. 2. Пилотная электродиализная установка ED(R) — Y
Fig. 2. Pilot electro-dialysis unit ED(R) - Y

Расчет материальных потоков сахарного производства в соответствии с [23].

Расчет мелассообразующих коэффициентов и ожидаемых производственных показателей, таких как выход сахара, потери сахара в мелассе, чистота и выход условной мелассы по уравнениям из классического метода П.М. Силина для очищенного сока [24 — 26].

Результаты и их обсуждение. В результате исследований, проведенных научно-исследовательской лабораторией сахарного производства, установлено, что по традиционной технологии содержание зольных элементов диффузионного сока почти не снижается в процессе его очистки, и увеличивается к концу процесса за счет вносимых в сок вспомогательных средств. Минеральные вещества сахарной свеклы в большей степени представлены калием, который составляет 24,5 — 34,7 % зольности полупродуктов, не удаляется в процессе очистки и накапливается в межкристалльных оттеках и мелассе. Содержание натрия в диффузионном соке незначительно, по сравнению с другими катионами, но уже в сульфитированном соке оно увеличивается за счет добавления подщелачивающих реагентов и достигает более 5 %. Катионы кальция составляют 1,5 % от зольности диффузионного сока. Они увеличиваются в соке I сатурации за счет добавления извести на очистку сока и удаляются до получения сульфитированного сока, но их количество остается значительным и влияет на работу теплообменной аппаратуры за счет образования малорастворимых солей с органическими кислотами [27].

Среднеарифметические значения массовых долей щелочных и щелочноземельных металлов, общей зольности до и после деминерализации с использованием электродиализа представлены в табл. 1.

Анализ данных табл. 1 показывает, что после электродиализа определяемая методом сжигания общая зола в полупродуктах сахарного производства ниже предела чувствительности метода определения.

Определенное с помощью атомно-эмиссионного спектрометра остаточное количество катионов калия, натрия и кальция в полупродуктах после электродиализа составляет 0,002–0,006 % к массе полупродуктов (с пределом удаления 0,002 %) и в сумме не превышает 0,015 % к их массе или 4 % к массе исходной зольности. Поэтому при небольшом количестве катионов в исходном полупродукте изменение их содержания в процессе электродиализа не столь значительно, в связи со значениями близкими к пределу обнаружения.

Таблица 1. Изменение минерального состава полупродуктов сахарного производства в процессе электродиализа
Table 1. The change of mineral composition of semi-products of sugar production in the process of electrodiagnosis

Полупродукт сахарного производства	зола, %	калий, %	натрий, %	кальций, %
Диффузионный сок				
Сок	0,4	0,108	0,004	0,007
Дилуат	0,0	0,006	0,002	0,007
Δ	0,4	0,102	0,002	0,000
Сок I сатурации				
Сок	0,4	0,100	0,004	0,055
Дилуат	0,0	0,005	0,002	0,004
Δ	0,4	0,095	0,002	0,051
Сульфитированный сок				
Сок	0,4	0,100	0,016	0,006
Дилуат	0,0	0,002	0,002	0,002
Δ	0,4	0,098	0,014	0,004
Удаление катионов в процессе электродиализа, % к исходному количеству				
Диффузионный сок	100	94,4	50,0	0,0
Сок I сатурации	100	95,0	50,0	93,6
Сульфитированный сок	100	98,5	90,3	66,7

Из табл. 2 следует, что чистота всех соков в результате деминерализации значительно повышается. Снижение содержания сухих веществ происходит в основном за счет снижения количества несахаров, потери же сахарозы в процессе незначительны и наблюдаются при работе с сульфитированным соком. Также наблюдается значительное снижение солей кальция и α -аминного азота в соке I сатурации (93,5 и 95,8 % соответственно) и в меньшей степени в сульфитированном соке (76,5 и 43,8 %). В диффузионном соке снижение содержания α -аминного азота составляет всего 11,9 %, снижения солей кальция не наблюдается, снижение общего количества несахаров 29,3 %, что дает основание считать его обработку малоэффективной по сравнению с другими полупродуктами. Такие результаты делают возможным сделать предположение о том, что кальций в диффузионном соке находится в виде слабодиссоциирующих соединений. Эта гипотеза будет проверена в следующих исследованиях.

Таблица 2. Изменение технологических показателей полупродуктов сахарного производства
Table 2. The change of technological parameters of semi-products of sugar production

Полупродукт сахарного производства	СВ, %	СХ, %	Ч, %	pH	НСХ, %	соли кальция, %	α -аминный азот, %
Диффузионный сок							
Сок	17,75	16,28	91,75	6,6	1,47	0,050	0,042
Дилуат	17,14	16,16	94,32	3,5	0,98	0,050	0,037
Δ	0,61	0,12	+2,57	3,1	0,49	0,000	0,005
Сок I сатурации							
Сок	17,43	15,97	91,60	10,9	1,47	0,077	0,024
Дилуат	16,40	15,88	96,83	8,0	0,52	0,005	0,001
Δ	1,04	0,09	+5,24	2,9	0,95	0,072	0,023
Сульфитированный сок							
Сок	17,44	16,14	92,53	8,9	1,30	0,009	0,016
Дилуат	16,05	15,51	96,66	4,5	0,54	0,002	0,009
Δ	1,39	0,63	+4,13	4,4	0,77	0,007	0,007
Изменение показателей в процессе электродиализа, % к исходному качеству							
Диффузионный сок					29,3	0,0	11,9
Сок I сатурации					64,5	93,5	95,8
Сульфитированный сок					58,8	76,5	43,8

Полученные данные свидетельствуют, что в процессе электродиализа из полупродуктов сахарного производства на 94,4–98,5 % удаляются катионы калия. Катионы натрия на 90,3 % удаляются из сульфитированного сока, вследствие того, что их количество в нем значительно выше, чем в других исследуемых соках. В ходе данных исследований не установлено удаление катионов кальция из диффузионного сока. Из сока I сатурации катионы кальция удаляются на 93,6 %. Эффект декальцикации сульфитированного сока при использовании электродиализа составляет 66,7 %.

Изменения технологических показателей в процессе деминерализации при использовании электродиализа представлены в табл. 2.

Для оценки влияния электромембранной обработки на основании данных табл. 1 и 2 по уравнениям из классического метода П.М. Силина для очищенного сока рассчитаны основные технологические показатели переработки сахарной свеклы. Результаты расчета технологических показателей переработки сахарной свеклы приведены в табл. 3.

Таблица 3. Расчетные технологические показатели переработки
Table 3. The estimated technological parameters of processing

Полупродукт сахарного производства	Мелассотворный коэффициент, т	Выход сахара, % к м.св.	Содержание сахара в мелассе, % к м.св.	Чистота мелассы, %	Выход условной мелассы, % к м.св.
Сок I сатурации					
Сок	1,00	14,62	1,48	48,5	3,5
Дилуат	0,63	15,77	0,33	37,4	1,0
Δ	0,37	1,15	1,15	11,1	2,5
Сульфитированный сок					
Сок	1,13	14,63	1,47	51,3	3,3
Дилуат	0,58	15,78	0,32	35,9	1,0
Δ	0,55	1,15	1,15	15,4	2,3

Из табл. 3 можно сделать вывод, что применение электродиализа на соке I сатурации и на сульфитированном соке дает одинаковый расчетный эффект снижения содержания сахара в мелассе и повышения выхода сахара за счет этого.

Для проверки данного утверждения был произведен расчет материальных потоков сахарного производства с применением электромембранной обработки сока I сатурации и сульфитированного сока по сравнению с традиционной схемой. Сравнительная оценка основных показателей переработки по результатам расчета материальных потоков в разрезе технологических схем представлена в табл. 4.

Данные табл. 4 согласуются с данными табл. 3: разбежка в значениях составила 0,15 и менее. Из табл. 4 также следует, что схема с применением электродиализа сока I сатурации позволяет снизить расход извести в пересчете на СаО на 0,3 % к массе свеклы, а расход сатурационного газа на 2,14 % к массе свеклы.

Таблица 4. Сравнительная оценка технологических схем переработки
Table 4. Comparative evaluation of technological processing schemes

Технологическая схема	Расход извести (СаО), % к м.св.	Расход сатурационного газа, % к м.св.	Выход сахара, % к м.св.	Содержание сахара в мелассе, % к м.св.	Выход условной мелассы, % к м.св.
Традиционная схема	2,34	9,94	14,57	1,37	3,3
Схема с применением электродиализа сока I сатурации	2,04	7,80	15,62	0,32	1,0
Схема с применением электродиализа сульфитированного сока	2,34	9,94	15,63	0,31	1,1

Заключение. На основании результатов проведения модельных испытаний процесса электродиализа в условиях реального производства при установившемся режиме получения сахара на пилотной мембранной установке с катионно-анионным набором мембран на диффузионных соках, соках I сатурации и сульфитированных соках, расчета прогнозных технологических показателей переработки можно сделать вывод об эффективности применения электромембранной обработки для очистки сока I сатурации и сульфитированного сока: чистота полупродуктов повышается на 4–5 процентных пункта; расчетное содержание сахара в мелассе снижается и, соответственно, расчетный выход сахара повышается более чем на 1 % к массе свеклы; расчетный выход условной мелассы снижается на 1 % к массе свеклы, а ее чистота на 11–15 %.

Произведенные расчеты материальных потоков сахарного производства также свидетельствуют, что схемы с применением электродиализа сока I сатурации или сульфитированного сока являются эффективными, а схема с применением электродиализа сока I сатурации позволяет также снизить расход извести в пересчете на СаО на 0,3 % к массе свеклы, а расход сатурационного газа на 2,14 % к массе свеклы, по сравнению с традиционной схемой очистки диффузионного сока.

Список использованных источников

1. Бугаенко, И.Ф. Общая технология отрасли: Научные основы технологии сахара: Учебник для студентов вузов / И.Ф. Бугаенко, В.И. Тужилкин. Ч.1. — СПб.: ГИОРД, 2007. — 512 с.
2. Бугаенко, И.Ф. Основы сахарного производства / И.Ф. Бугаенко — М.: Международная Сахарная Компания, 2002. — 357 с.
3. Бугаенко, И.Ф. Принципы эффективного сахарного производства / И.Ф. Бугаенко — М.: ООО «Инмашпроект», 2003. — 285 с.
4. Очистка диффузионного сока в сахарном производстве / З.В. Ловкис [и др.]; под общ. ред. З.В. Ловкиса. — Минск: Беларус. навука, 2013. — 232 с. — (Настольная книга производителя).
5. Сапронов, А.Р. Технология сахара песка и сахара рафинада / А.Р. Сапронов, Л.А. Сапронова. — М.: Колос, 1996. — 367 с.
6. Сапронов, А.Р. Технология сахарного производства / А.Р. Сапронов — М.: Колос, 1999. — 494 с.
7. Физико-химические процессы сахарного производства / И.С. Гулый и [др.]. — М.: Агропромиздат, 1987. — 264 с.
8. Bertuzzi, S. Determinazione a: K, Na, azoto alfa-amminico in zueche-rificio, implecazioni tecnologiche / S. Bertuzzi, N. Zurlecla // Ind saccorif. iral. — 1988. Vol. 81, №4. — P. 135–138.
9. Beziehungen zwieschen den Verhdlnissen einiger Kationen und Anionen in der Zuckergbbe und deren grundlegenden qualitativen Merkmalen / A. Dandar [et al.] // C.I.T.S. — 1996. — S. 931–934.
10. Поворов, А.А. Мембранная технология в сахарной промышленности / А.А. Поворов, Р.Г. Давыдова, Ю.В. Фомин // Сахар. — 2003. — №1. — С. 36–43.
11. Савостин, А.В. Эффективность антинакипинов при выпаривании соков свеклосахарного производства / А.В. Савостин, В.О. Городецкий // Сахар. — 2014. — №10. — С. 47–50.
12. Повышение качества свекловичного сахара до экспортного уровня / С.М. Петров [и др.] // Сахар. — 2017. — №5. — С. 30–33.
13. Бобровник, Л.Д. Роль гидратации в мелассообразовании / Л.Д. Бобровник // Сахар. — 2015. — №6. — С. 54–58.
14. Иониты для глубокой деминерализации и обесцвечивания сока II сатурации / С.Л. Филатов [и др.] // Сахар. — 2011. — №2. — С. 47–49.
15. Hakimzadeh, V. The potential of microfiltration and ultrafiltration process in purification of raw sugar beet juice / V. Hakimzadeh, M.A. Razavi Seyed, K. Piroozifard, M. Shahidi // Desalination. — 2006. — № 200 (1-3). — P. 520–522.
16. Hinkova, A. Membrane filtration in the sugar industry / A. Hinkova, Z. Bubnik, P. Kadlec, V. Pour, H. Ъtarhova // Pap. 27th Conference of the Slovak Society of Chemical Engineering, Tatranske Matliare, May 22–26, 2000 Chem. Pap. — 2000. — Vol. 54, № 6a. — P. 375–382.
17. Hinkova, A. Potentials of separation membranes in the sugar industry / A. Hinkova, Z. Bubnik, P. Kadlec, J. Pridal // Journal of Separation Purification Technology. — 2002. — № 26. — P. 101–110.
18. Кудрявцева, Т.Н. Методы доочистки водопроводной воды г. Волограда / Т.Н. Кудрявцева // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. — 2004. — №4. — С. 143–148.
19. Дорофеева, Л.И. Разделение и очистка веществ мембранными, обменными и электрохимическими методами / Л.И. Дорофеева. — Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. — 111 с.
20. Дымар, О.В. Изучение взаимосвязи скорости деминерализации кислой сыворотки от изменения напряжения процесса / О.В. Дымар, М.Р. Яковлева, А. Меркель // Пищевая промышленность: наука и технологии. — 2019. — № 3. — С. 74–79.
21. Ильина, С.И. Электромембранные процессы: учебное пособие / С.И. Ильина — М.: РХТУ им. Менделеева, 2013. — 57 с.
22. Дымар, О.В. Повышение эффективности переработки молочных ресурсов: научно-технологические аспекты / О.В. Дымар. — Минск : Колорград, 2018. — 236 с.
23. Славянский, А.А. Расчет материальных потоков сахарного производства как элемента САПР гибкой производственно-технологической системы : Учебное пособие / А.А. Славянский, С.П. Гольденберг, В.И. Тужилкин // Мос. гос. ун-т пищевых производств. — М.: Издательский комплекс МГУПП, 2004. — 112 с.

24. Методы оценки технологических качеств сахарной свеклы с использованием показателей содержания калия, натрия и α -аминного азота, определенных в свекле и продуктах ее переработки / В.Н. Кухар [и др.] // Сахар. — 2019. — № 1. — С. 18–36.
25. Чернявская, Л.И. Методы оценки качества сахарной свеклы как сырья для получения сахара / Л.И. Чернявская // Сахар. — 2006. — № 3. — С. 40–45.
26. Чернявская, Л.И. Методы оценки качества свеклы, основанные на ее лабораторной переработке / Л.И. Чернявская // Сахар. — 2006. — № 4. — С. 19–24.
27. Коррекция минерального состава полупродуктов сахарного производства с использованием электродиализа / О.К. Никулина [и др.] // Пищевая промышленность: наука и технологии. — Том 13. — № 2(48), 2020. — С. 27–35.

References

1. Bugaenko I.F. Obshchepromyshlennyye tekhnologii: Nauchnyye osnovy sakharnoy tekhnologii: Uchebnik dlya studentov vuzov [General industry technology: Scientific foundations of sugar technology: Textbook for university students]. St. Petersburg, GIORД, 2007, 512 p. (in Russian).
2. Bugaenko I.F. Osnovy sakharnogo proizvodstva [Fundamentals of sugar production]. Moscow, International Sugar Company, 2002, 357 p. (in Russian).
3. Bugaenko I.F. Printsipy effektivnogo proizvodstva sakhara [The principles of effective sugar production]. Moscow, Inmashproekt LLC, 2003, 285 p. (in Russian).
4. Lovkis Z.V. Ochistka diffuzionnogo soka pri proizvodstve sakhara [Purification of diffusion juice in sugar production]. Minsk, Belaruskaya navuka, 2013, 232 p. (in Russian).
5. Sapronov A.R. Tekhnologiya sakhara i rafinirovannogo sakhara [Technology of sugar and refined sugar] Moscow, Kolos, 1996, 367 p. (in Russian).
6. Sapronov A.R. Tekhnologiya proizvodstva sakhara [Technology of sugar production]. Moscow, Kolos, 1999, 494 p. (in Russian).
7. Gulyy I.S. Fiziko-khimicheskiye protsessy sakharnogo proizvodstva [Physico-chemical processes of sugar production]. Moscow, Agropromizdat, 1987, 264 p. (in Russian).
8. Bertuzzi S, Zurlecla N. Determinazione a: K, Na, azoto alfa-amminico in zueche-rificio, implecazioni tecnologiche [Determination of: K, Na, alpha-amino nitrogen in zueche-rificio, technological implecations]. Ind saccorif. iral., 1988, Vol. 81, no 4, pp. 135–138 (in Italian).
9. Dandar A. Beziehungen zwieschen den Verhaltnissen einiger Kationen und Anionen in der Zuckerrube und deren grundlegenden qualitativen Merkmalen [Relationships between the proportions of some cations and anions in the sugar beet and their fundamental qualitative characteristics]. C.I.T.S., 1996, pp. 931–934 (in German).
10. Povorov A.A., Davydova R.G., Fomin Yu.V. Membrannyye tekhnologii v sakharnoy promyshlennosti [Membrane technology in the sugar industry]. Sakhar = Sugar, 2003, no. 1, pp. 36–43 (in Russian).
11. Savostin, A.V., Gorodetskiy V.O. Effektivnost' antinakupinov pri vyparivanii sokov sveklosakharnogo proizvodstva [Efficiency of antiscale in the evaporation of beet sugar juices]. Sakhar = Sugar, 2014, no. 10, pp. 47–50 (in Russian).
12. Petrov S.M. Povysheniye kachestva sveklovichnogo sakhara do eksportnogo urovnya [Improving the quality of beet sugar to export level]. Sakhar = Sugar, 2017, no. 5, pp. 30–33 (in Russian).
13. Bobrovnik L.D. Rol' gidratatsii u patoki [The role of hydration in molasses]. Sakhar = Sugar, 2015, no. 6, pp. 54–58 (in Russian).
14. Filatov S.L. Ionity dlya glubokoy demineralizatsii i obestsvechivaniya sokov II saturatsii [Ionites for deep demineralization and discoloration of juice II saturation]. Sakhar = Sugar, 2011, no. 2, pp. 47–49 (in Russian).
15. Hakimzadeh V., Razavi Seyed M.A., Piroozifard K., Shahidi M. The potential of microfiltration and ultrafiltration process in purification of raw sugar beet juice. Desalination, 2006, no 200 (1-3), pp. 520–522 (in English).
16. Hinkova A., Bubnik Z., Kadlec P., Pour V., Jbtarhova H. Membrane filtration in the sugar industry. Pap. 27th Conference of the Slovak Society of Chemical Engineering, Tatranske Matliare, May 22–26, 2000 Chem. Pap., 2000, Vol. 54, no 6a, pp. 375–382 (in English).
17. Hinkova A., Bubnik Z., Kadlec P., Pridal J. Potentials of separation membranes in the sugar industry. Journal of Separation Purification Technology, 2002, no 26, pp. 101–110 (in English).
18. Kudryavtseva T.N. Metody doochistki vodoprovodnoy vody g. Volograda [Methods of post-treatment of tap water in Volgograd]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: stroitel'stvo i arkhitektura = Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: construction and architecture, 2004, no4, pp. 143–148 (in Russian).

19. Dorofeeva L.I. Razdeleniye i ochistka veshchestv membrannym, obmennym i elektrokhimicheskim metodami [*Separation and purification of substances by membrane, exchange and electrochemical methods*]. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2008, 111 p. (in Russian).
20. Dymar O.V. Yakovleva M.R., Merkel A. Izucheniye vzaimosvyazi skorosti demineralizatsii kisloy syvorotki s izmeneniyami tekhnologicheskogo napryazheniya [*The study of the relationship of the rate of demineralization of acidic serum from changes in the process voltage*]. Pischevaya promyshlennost: nauka i tekhnologii = Food industry: science and technology, 2019, pp. 74–79 (in Russian).
21. Ilyina S.I. Elektromembrannyye protsessy: uchebnoye posobiye [*Electro-membrane processes: a training manual*]. Moscow, RCTU them. Mendeleev, 2013, 57 p. (in Russian).
22. Dymar O.V. Povysheniye effektivnosti pererabotki molochnykh resursov: nauchnyye i tekhnologicheskiye aspekty [*Improving the efficiency of processing dairy resources: scientific and technological aspects*]. Minsk, Kolorgrad, 2018, 236 p. (in Russian).
23. Slavyanskiy A.A., Gol'denberg S.P., Tuzhilkin V.I. Raschet material'nykh potokov sakharnogo proizvodstva kak elementa SAPR gibkoy proizvodstvenno-tekhnologicheskoy sistemy : Uchebnoye posobiye [*Calculation of material flows of sugar production as a CAD element of a flexible production and technological system: Textbook*]. Moscow, MGUPP, 2004, 112 p. (in Russian).
24. Kuhar V.N. Metody otsenki tekhnologicheskikh kachestv sakharnoy svekly s ispol'zovaniyem pokazateley sodержaniya kaliya, natriya i a-aminnogo azota, opredelyayemykh v svekle i produktakh yeye pererabotki [*Methods for assessing the technological qualities of sugar beets using indicators of the content of potassium, sodium and a-amine nitrogen determined in beets and products of its processing*]. Sakhar = Sugar, 2019, no. 1, pp. 18–36 (in Russian).
25. Chernyavskaya L.I. Metody otsenki kachestva sakharnoy svekly kak syr'ya dlya proizvodstva sakhara [*Methods for assessing the quality of sugar beets as raw materials for sugar production*]. Sakhar = Sugar, 2006, no. 3, pp. 40–45 (in Russian).
26. Chernyavskaya L.I. Metody otsenki kachestva svekly na osnove yeye laboratornoy obrabotki [*Beet quality assessment methods based on its laboratory processing*]. Sakhar = Sugar, 2006, no. 4, pp. 19–24 (in Russian).
27. Nikulina O.K. Koloskova O.V., Yakovleva M.R., Dymar O.V. Korrektsiya mineral'nogo sostava poluproduktov sakharnogo proizvodstva s ispol'zovaniyem elektrodializa [*Correction of the mineral composition of intermediate products of sugar production using electrodialysis*]. Pischevaya promyshlennost': nauka i tekhnologii = Food industry: science and technology, Vol. 13, no 2(48), 2020, pp. 27–35 (in Russian).

Информация об авторах

Никулина Оксана Константиновна — кандидат технических наук заведующий научно-исследовательской лабораторией сахарного производства РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, 29, 220037, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sugar@belpoduct.com.

Колоскова Ольга Владимировна — кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории сахарного производства РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, 29, 220037, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sugar@belpoduct.com.

Яковлева Мария Романовна — инженер-технолог II категории научно-исследовательской лаборатории сахарного производства РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, 29, 220037, г. Минск, Республика Беларусь). E-mail: sugar@belpoduct.com.

Дымар Олег Викторович — доктор технических наук, профессор, технический директор представительства АО «МЕГА» в республике Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь. E-mail: dymarov@tut.by

Information about authors

Nikulina Oksana Konstantinovna — Ph (Engineering) researcher, Head of the research laboratory of sugar production of RUE «Scientific and Practical Centre for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus» (29, Kozlova st., 220037, Minsk, Republic of Belarus). Email: sugar@belpoduct.com.

Koloskova Olga Vladimirovna — PhD (Engineering), senior researcher of RUE «Scientific and Practical Centre for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus» (29, Kozlova st., 220037, Minsk, Republic of Belarus). Minsk, Republic of Belarus. Email: sugar@belpoduct.com.

Yakovleva Mariya Romanovna — engineer-technologist of RUE «Scientific and Practical Centre for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus» (29, Kozlova st., 220037, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sugar@belpoduct.com.

Dymar Oleg Viktorovich — Doctor of Engineering sciences, Professor, technical director of representative of MEGA a.s. (Czech Republic) in Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus. E-mail: dymarov@tut.by