

ISSN 1817-7204 (Print)
ISSN 1817-7239 (Online)

ПЕРАПРАЦОЎКА І ЗАХАВАННЕ СЕЛЬСКАГА СПАДАРЧАЙ ПРАДУКЦЫІ **PROCESSING AND STORAGE OF AGRICULTURAL PRODUCTS**

УДК 664.12.087.97
<https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-168-176>

Поступила в редакцию 19.02.2024
Received 19.02.2024

О. К. Никулина

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию,
Минск, Республика Беларусь*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИАЛИЗА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ САХАРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Аннотация. Показана эффективность применения электромембранной обработки полупродуктов сахарного производства с целью увеличения выхода сахара за счет снижения его потерь в мелассе. На основании анализа изменения исследуемых показателей полупродуктов сахарного производства в процессе электродиализа получены научные данные о влиянии электромембранной обработки на химический состав и технологическое качество очищаемых полупродуктов сахарного производства, снижение содержания солей кальция в них. Целью исследований является создание высокоэффективного способа производства белого сахара, позволяющего повысить выход сахара из сырья и снизить количество вспомогательных веществ за счет использования электродиализа, с последующей его практической реализацией на предприятиях отрасли. В производственных условиях было установлено, что электромембранная обработка одной партии (7 т) очищенного сока позволяет дополнительно получить до 35 кг сахара, партии сиропа – до 130 кг, а оттока утфеля II кристаллизации – до 255 кг. Электромембранная обработка мелассы позволяет: снизить в ней массовую долю солей кальция к сухим веществам на 39 % к их начальному содержанию; повысить чистоту мелассы на 8,5 %; снизить мелассообразующий коэффициент на 21 % за счет снижения содержания калия и натрия. При этом расчетное количество дополнительно полученного из нее сахара составит 5,1 % к массе, или 392,7 кг сахара с одной партии обрабатываемой мелассы. Исследования позволяют разработать научно-технологические аспекты очистки полупродуктов сахарного производства с использованием электромембранной обработки.

Ключевые слова: полупродукты сахарного производства, меласса, очистка диффузионного сока, электромембранная обработка, электродиализ, мелассообразующие вещества

Для цитирования: Никулина, О. К. Использование электродиализа для повышения эффективности работы сахарных предприятий / О. К. Никулина // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2024. – Т. 62, № 2. – С. 168–176. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-168-176>

Oksana K. Nikulina

Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Foodstuff, Minsk, Republic of Belarus

USING ELECTRODIALYSIS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF SUGAR ENTERPRISES

Abstract. The paper shows the efficiency of electromembrane treatment of semi-products of sugar production in order to increase the yield of sugar by reducing its losses in molasses. Based on the analysis of changes in the studied parameters of semi-products of sugar production during the electro dialysis process, scientific data were obtained on the effect of electromembrane treatment on the chemical composition and technological quality of purified semi-products of sugar production, as well as on decrease in calcium salts content in them. The purpose of the research is to create a highly efficient method for production of white sugar, allowing to increase the yield of sugar from raw materials and reduce the amount of excipients by means of electro dialysis with its subsequent practical implementation at industry enterprises. Under production conditions, it was found that electromembrane treatment of one batch (7 t) of purified juice allows to additionally obtain up to 35 kg of sugar, a batch of syrup – up to 130 kg, and soft sugar effluent of II crystallization – up to 255 kg. Electromembrane treatment of molasses makes it possible to: reduce the mass fraction of calcium salts to dry matters by 39 % of their initial content; increase

molasses purity by 8.5 %; reduce the molasses-forming coefficient by 21 % by reducing the content of potassium and sodium. In this case, the estimated amount of additional sugar obtained from it will make 5.1 % by weight or 392.7 kg of sugar from one batch of processed molasses. The research will allow to develop scientific and technological aspects of purification of semi-products of sugar production using electromembrane treatment.

For citation: Nikulina O. K. Using electrodialysis to increase the efficiency of sugar enterprises. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya agrarnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Agrarian series*, 2024, vol. 62, no. 2, pp. 168–176 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-168-176>

Введение. Повышение эффективности работы сахарных предприятий Республики Беларусь является приоритетным направлением социально-экономической политики государства. В рамках заданий Отраслевой научно-технической программы «Пищевые технологии» научно-исследовательской лабораторией сахарного производства РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по продовольствию» проводятся научные исследования, направленные на поиск способов обработки полупродуктов сахарного производства с помощью электродиализа и изучение результатов данной обработки, а также применение данных способов для повышения эффективности производства сахара и увеличения выхода готовой продукции.

В сахарном производстве каждый продукт по химическому составу представляет собой очень сложную систему, количественное соотношение компонентов которой меняется в широких пределах из-за целого ряда факторов. При этом все эти составляющие в разной степени препятствуют получению кристаллической сахарозы и увеличивают потери ее с мелассой. Одной из важнейших задач технологии сахарного производства является максимальное удаление балластных компонентов из сахарных растворов. Для этого требуется проведение физико-химических процессов с использованием наиболее эффективных технологических приемов и средств [1–10].

Часто возникающей и труднорешаемой проблемой в сахарном производстве является высокое содержание солей кальция в полупродуктах, что ухудшает качество готовой продукции и отрицательным образом сказывается на работе теплообменной аппаратуры. Схема очистки диффузионного сока должна обеспечивать максимально возможное осаждение анионов кислот, образующих с ионами Ca^{2+} труднорастворимые соли. Если их не удалять в процессе очистки, неизбежно снижается производительность теплообменной аппаратуры [1–5, 9, 11–13].

Однако основной проблемой является наличие в сырье и затем в полупродуктах значительного количества щелочных металлов калия и натрия: будучи сильными мелассообразователями, они способствуют увеличению содержания сахара в мелассе, накапливаясь ней, и, следовательно, снижению выхода готовой продукции [4, 14–16]. В связи с этим возникла необходимость поиска новых способов ведения процессов в сахарной промышленности [7, 9, 13, 17].

Основным методом очистки диффузионного сока в настоящее время является метод очистки при помощи извести и углекислоты, которому более 150 лет, и возможности его совершенствования практически исчерпаны [1–5]. Применение в сахарной отрасли новых технологий (в частности, электродиализа) для удаления из полупродуктов сахарного производства и мелассы щелочных металлов и органических кислот с целью повышения выхода сахара является одним из наиболее перспективных способов повышения эффективности сахарного производства¹ [18].

Электродиализная очистка может быть включена в классическую технологию производства сахара на следующих этапах: для дополнительной очистки сока II сатурации, полусиропа после III корпуса выпарной станции; для обработки клеровки I оттека утфеля I кристаллизации и даже клеровки мелассы. С технологической точки зрения целесообразнее удалять несахара в начале технологического процесса, т. е. проводить электродиализную очистку сока после его предварительной очистки, что интенсифицирует работу выпарной установки и продуктового отделения сахарного завода [5]. Однако с электротехнической позиции электродиализом предпочтительнее очищать растворы с высоким содержанием золы и сухих веществ. Это позволяет вести процесс с большей экономией водо- и энергоресурсов.

¹ Усовершенствовать технологию получения белого сахара с использованием электродиализа для деминерализации полупродуктов сахарного производства: отчет о НИОТР (заключ.) / Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по продовольствию; рук. О. К. Никулина. Минск, 2021. 254 с. № ГР 20193042.

Электродиализ является процессом переноса ионов через полупроницаемые (ионселективные) мембраны под действием электрического поля, который может проходить по градиенту концентрации и против него. Главным преимуществом такого метода деминерализации растворов является то, что он происходит без применения химических реагентов. Это позволяет снизить затраты на их приобретение и последующую очистку продукта от их остатков. Эффективность переноса может изменяться подбором соответствующей силы тока и времени обработки [19, 20].

Процесс электродиализа представляет собой движение катионов к катоду, а анионов к аноду под действием постоянного электрического тока в растворе. 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 сахара, являясь электронейтральным веществом, остается в растворе, из которого происходит удаление солей и за счет этого достигается его очистка [2, 21].

Электродиализ позволяет получить полупродукты сахарного производства высокого качества путем регулирования минерального состава и кислотности до требуемых значений за счет удаления ионогенных соединений. Указанный процесс не только обеспечивает корректировку физико-химических показателей, но и значительно улучшает технологические характеристики, что облегчает дальнейшие операции очистки, вакуумного сгущения, кристаллизации и сушки [22].

Цель исследований – создание высокоэффективного способа производства белого сахара, позволяющего повысить выход сахара из сырья и снизить количество вспомогательных веществ за счет использования электродиализа с последующей его практической реализацией на предприятиях отрасли.

При этом *основной задачей* применения электромембранной обработки полупродуктов сахарного производства является достижение высокой степени их очистки, характеризующейся минимальным содержанием солей кальция и мелассообразующих элементов (катионов щелочных металлов).

Материалы и методы исследований. При выполнении работы использовались современные методы постановки эксперимента, теоретический анализ, аналитические и физико-химические исследования полупродуктов сахарного производства и мелассы.



Рис. 1. Пилотная электродиализная установка ED(R)-Y

Fig. 1. Pilot electrodialysis unit ED(R)-Y

Исследования влияния электромембранной обработки на химический состав сока I сатурации и очищенного диффузионного сока проводились при модельных производственных испытаниях в ОАО «Городейский сахарный комбинат» с использованием пилотной мембранной установки ED(R)-Y производства MEGA a.s., Чехия, с катионно-анионным набором мембран (рис. 1).

Исследования влияния электромембранной обработки на химический состав очищенного диффузионного сока, смеси сиропа с очищенным соком, разбавленного оттока утфеля II кристаллизации и мелассы проводились в производственных условиях Городейского сахарного комбината, на котором размещены две электродиализные установки типа EWDU 8×ED-II/250-0,8 1S.

В процессе электродиализа измеряли удельную электропроводимость полупродуктов, исследовали изменение физико-химических показателей (чистоты, содержания солей кальция, щелочных металлов).

Результаты исследований и их обсуждение. Для исследования минерального комплекса в процессе переработки сахарной свеклы на сахар были отобраны

полупродукты и меласса, в которых определяли содержание калия, натрия, кальция к массе общей золы (табл. 1).

Таблица 1. Массовая доля катионов в полупродуктах сахарного производства и мелассе, % к массе золы

Table 1. Mass fraction of cations in semi-products of sugar production and molasses, % by weight of ash

Полупродукт сахарного производства	Калий	Натрий	Кальций
Сок I сатурации	24,5	1,0	13,0
Очищенный сок	33,0	4,7	1,7
Оттек утфеля II кристаллизации	34,7	5,3	2,0
Меласса	32,5	4,6	1,7

Видно, что калий составляет 24,5–34,7 % золы полупродуктов, содержание натрия мало, но оба катиона в процессе производства сахара накапливаются в межкристалльных оттеках и мелассе. Они являются наиболее сильными мелассообразователями. Считается [1], что 1 часть катионов калия и натрия удерживает в мелассе 5 частей сахарозы.

Катионы кальция составляют значительную часть золы в соке I сатурации за счет добавления извести на очистку сока, они в большей мере удаляются в процессе сокоочистки до получения очищенного сока, однако оставшееся их количество влияет на работу теплообменной аппаратуры за счет образования малорастворимых солей с органическими кислотами.

С целью снижения отрицательного влияния минерального состава полупродуктов сахарного производства на технологический процесс применяли для их обработки электродиализ, позволяющий очищать сахарные растворы от электролитов.

При очистке полупродуктов сахарного производства и мелассы с помощью электродиализа удалось достичь результатов, представленных в табл. 2.

Таблица 2. Изменение химического состава и технологического качества полупродуктов сахарного производства и мелассы в процессе электромембранной обработки

Table 2. Changes in the chemical composition and technological quality of semi-products of sugar production and molasses during electromembrane treatment

Наименование показателя	Полупродукт				Меласса
	Сок I сатурации	Сок очищенный	Смесь сиропа с очищенным соком	Разбавленный оттек утфеля II кристаллизации	
<i>Изменение после электродиализа, %</i>					
Чистота	+5,24	+4,13	+3,37	+7,95	+8,49
<i>Удаление электродиализом, % к исходному количеству</i>					
Соли кальция	93,5	76,5	65,5	82,7	38,6
Калий	95,0	98,5	69,0	85,3	63,2
Натрий	50,0	90,3	58,8	72,9	33,3

Таким образом, в производственных условиях установлено, что электромембранная обработка позволяет получить полупродукты сахарного производства высокой чистоты с низким содержанием солей кальция и мелассообразующих элементов, что, в свою очередь, способствует увеличению выхода кристаллического сахара и снижению расхода вспомогательных материалов на его производство.

Электродиализной обработке (при температуре не ниже 25 °С и содержании сухих веществ раствора не менее 25 % для густых полупродуктов) подвергаются полупродукты сахарного производства на одном или нескольких этапах:

диффузионный сок, очищенный или на промежуточной стадии очистки, весь или частично – до рН не ниже 7,0. Обработанный сок затем направляется на выпаривание для получения сиропа или на клерование желтых сахаров, или на разбавление сиропа, или на дальнейшую очистку;

сироп после выпарной установки или на промежуточной стадии выпаривания, или разбавленный очищенным диффузионным соком/водой, весь или частично – до удельной электропроводимости 2,5–3,5 мСм/см. Обработанный сироп затем направляется на уваривание утфеля I кристаллизации или смешивается с клеровкой желтых сахаров;

оттек утфеля II кристаллизации, с разбавлением или без, весь или частично – до удельной электропроводимости 5,0–7,0 мСм/см. Обработанный оттек затем направляется на уваривание утфеля I, II или III кристаллизации или смешивается с клеровкой желтых сахаров или сиропом с выпарной станции;

меласса, с разбавлением или без, вся или частично – до удельной электропроводимости 7,0–11,0 мСм/см. Обработанная меласса затем направляется на дополнительную очистку известковым молоком или на уваривание утфеля II или III кристаллизации.

Модельные производственные испытания¹ [18] показали, что применение электродиализа на соке I сатурации и на очищенном соке дает одинаковый расчетный эффект снижения содержания сахара в мелассе и повышения выхода сахара за счет этого. Сравнительная оценка показателей переработки по результатам расчета материальных потоков в разрезе технологических схем приведена в табл. 3.

Таблица 3. Сравнительная оценка технологических схем переработки свеклы

Table 3. Comparative evaluation of technological schemes of beet processing

Технологическая схема	Выход сахара, % к массе свеклы	Содержание сахара в мелассе, % к массе свеклы	Выход условной мелассы, % к массе свеклы
Традиционная схема	14,57	1,37	3,3
Схема с применением электродиализа сока I сатурации	15,62	0,32	1,0
Схема с применением электродиализа очищенного сока	15,63	0,31	1,1

Однако схема с применением электродиализа сока I сатурации является более предпочтительной, так как дополнительно позволяет исключить некоторые технологические операции, что, в свою очередь, способствует снижению расхода извести на очистку.

Способ очистки диффузионного сока с применением электродиализа на соке I сатурации запатентован в Республике Беларусь².

Предложенный способ является новым, поскольку электродиализная очистка осуществляется после стадии получения фильтрованного сока I сатурации, на какую-либо обработку которого не направлены известные уровни техники, так как он имеет более сложный химический состав, чем у других полупродуктов. Это позволяет исключить ранее неотъемлемые стадии технологического процесса.

На рис. 2 представлены процессовые схемы традиционной очистки диффузионного сока в сахарном производстве и с применением электромембранной обработки сока I сатурации.

Провести электромембранную обработку сока I сатурации в условиях производства не удалось по техническим причинам, поэтому при промышленных испытаниях осуществляли обработку электродиализом очищенного сока.

В производственных условиях было установлено, что электромембранная обработка одной партии (7 м³) очищенного сока позволяет дополнительно получить до 35 кг сахара. При этом расчетное количество дополнительно полученного сахара за 90 сут при работе двух электродиализных установок типа EWDU 8×ED-II/250-0,8 1S на предприятии составило более 245 т. При обработке всего объема сока на предприятии с суточной производительностью 9,5 тыс. т сахарной свеклы может быть дополнительно получено 3816 т сахара.

¹ Усовершенствовать технологию получения белого сахара с использованием электродиализа для деминерализации полупродуктов сахарного производства: отчет о НИОТР (закл.)

² Способ очистки диффузионного сока: пат. ВУ 23796 / О. К. Никулина, О. В. Дымар, О. В. Колоскова, М. Р. Яковлева. Оpubл. 30.08.2022.

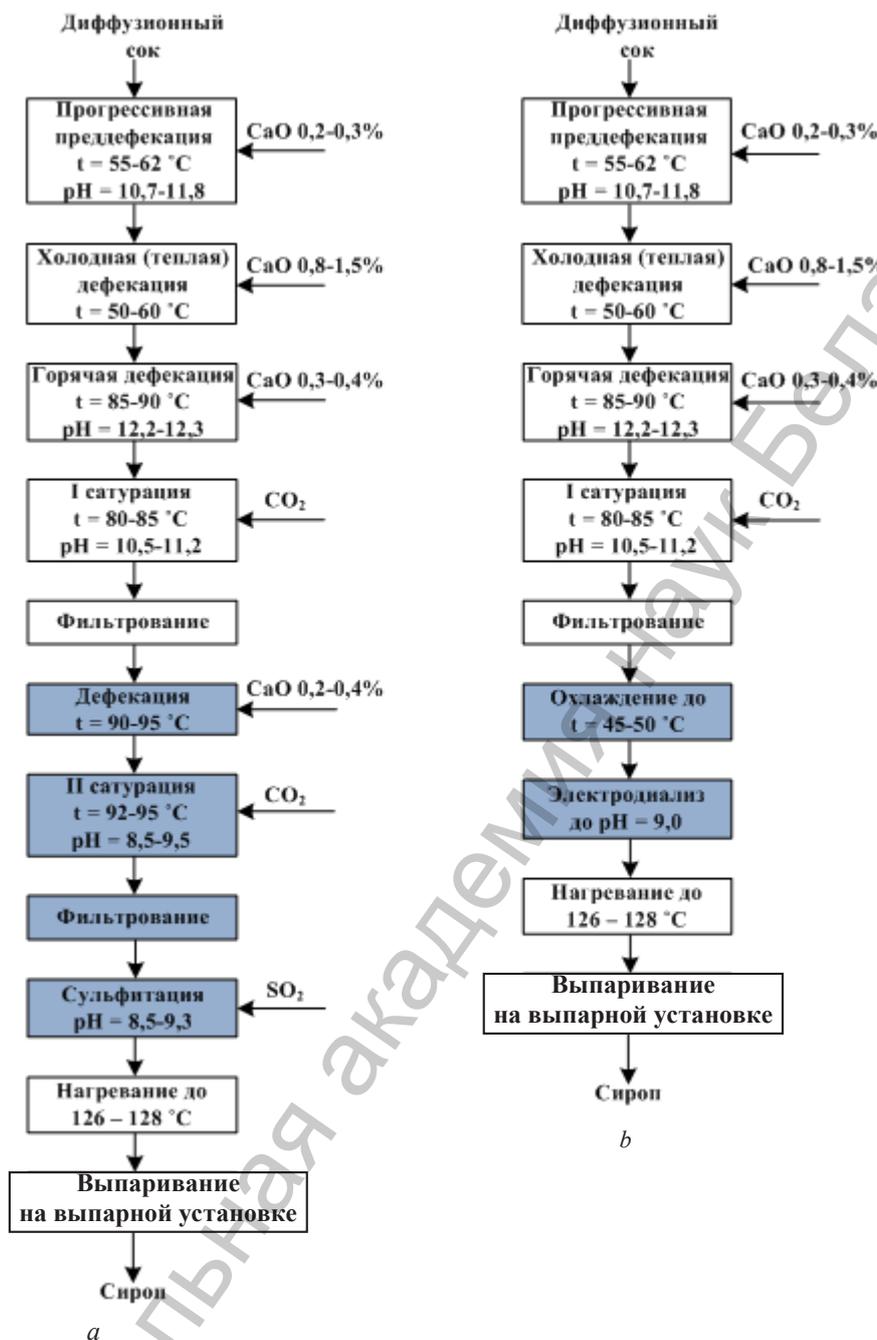


Рис. 2. Процессовые схемы очистки диффузионного сока: *a* – традиционная технология; *b* – разработанная технология

Fig. 2. Process schemes for diffusion juice purification: *a* – traditional technology; *b* – proposed technology

Схемы с электромембранной обработкой очищенного диффузионного сока являются экономически целесообразными и весьма перспективными для использования, однако для их внедрения необходима частичная или полная модернизация сокоочистительного отделения и обработка всего объема сока, что предполагает дооснащение предприятия электромембранным оборудованием.

Так как с электротехнической позиции электродиализом предпочтительнее очищать растворы с высоким содержанием золы и сухих веществ, проводились исследования изменения химического состава в результате электромембранной обработки густых полупродуктов. С технологической точки зрения наибольший интерес для обработки представляют такие густые полупро-

дукты, как сироп разбавленный или с промежуточной стадии выпарки и оттек утфеля II ступени кристаллизации.

Сравнение показателей эффективности работы электродиализной установки по схемам работы с оттеком утфеля II кристаллизации и с разбавленным очищенным соком сиропом приведено в табл. 4.

Таблица 4. Сравнение технологических схем электромембранной обработки при расчетной нагрузке оборудования

Table 4. Comparison of technological schemes for electromembrane treatment at calculated equipment load

Наименование показателя	Схема с обработкой сиропа	Схема с обработкой оттека
Средняя длительность электромембранной обработки, мин	67,5	260,0
Среднее количество обработок в сут	26	9
Масса партии, т	8,120	7,980
Дополнительный сахар		
с одной обработки, т	0,130	0,255
в сут, т	3,38	2,30
за 90 сут, т	304,2	206,6
% к массе свеклы	0,035	0,024
Снижение количества несахаров		
с одной обработки, т	0,114	0,231
в сут, т	2,96	2,08
за 90 сут, т	266,8	187,2
Снижение количества мелассы		
с одной обработки, т	0,305	0,608
в сут, т	7,93	5,48
за 90 сут, т	713,8	493,2
% к массе свеклы	0,083	0,057

Видно, что при небольших мощностях электромембранного оборудования на сахарном предприятии наиболее целесообразно с технологической точки зрения и наиболее выгодно экономически использовать схему с обработкой разбавленного очищенным соком сиропа. Данная схема позволяет разгрузить продуктовое отделение завода, повысить выход сахара за счет снижения его потерь с мелассой на 0,035 % к массе свеклы, снизить количество мелассы на 0,083 % к массе свеклы.

Менее успешная реализация усовершенствованной технологии на оттеке утфеля II кристаллизации с целью увеличения его чистоты и возвращения в технологический поток определяется не только более высокой длительностью процесса и меньшим эффектом снижения потерь сахара, но и возвращением сахара обратно в технологический цикл вместе с несахарами вместо получения в качестве готовой продукции.

Еще одним перспективным для электромембранной обработки густым продуктом является меласса – побочный продукт сахарного производства, в котором из-за присутствия мелассообразующих компонентов удерживается около 15 % сахара, вводимого в производство с сырьем. Выделение сахара из мелассы имеющимися в распоряжении технолога методами на сахарном заводе технологически сложно и экономически нецелесообразно. Удаление же мелассообразующих веществ может способствовать высвобождению сахарозы и разработке способа ее получения из мелассы.

При проведении производственных испытаний установлено, что электромембранная обработка мелассы позволяет: снизить в ней массовую долю солей кальция к сухим веществам на 39 % к их начальному содержанию; повысить чистоту мелассы на 8,5 %; снизить мелассообразующий коэффициент на 21 % за счет снижения содержания калия и натрия. При этом расчетное количество дополнительно полученного из нее сахара составит 5,1 % к массе, или 392,7 кг сахара с одной партии обрабатываемой мелассы.

Таким образом, в производственных условиях ОАО «Городейский сахарный комбинат» показана эффективность применения электромембранной обработки полупродуктов сахарного производства с целью увеличения выхода сахара за счет снижения его потерь в мелассе.

Заклучение. На основании анализа изменения исследуемых показателей полупродуктов сахарного производства в процессе электродиализа получены научные данные о влиянии электро-мембранной обработки на химический состав и технологическое качество очищаемых полу-продуктов сахарного производства и мелассы, снижение содержания солей кальция в них. Показана эффективность применения электро-мембранной обработки полупродуктов сахарного произ-водства с целью увеличения выхода сахара за счет уменьшения его потерь в мелассе.

Дальнейшие исследования позволят разработать научно-технологические аспекты очистки полупродуктов сахарного производства с использованием электро-мембранной обработки.

Благодарности. Исследования проводились в рам-ках гранта Президента Республики Беларусь в сфере нау-ки на 2024 год.

Acknowledgments. The research was carried out within the framework of a grant from the President of the Republic of Belarus in the field of science for 2024.

Список использованных источников

1. Бугаенко, И. Ф. Общая технология отрасли. Научные основы технологии сахара / И. Ф. Бугаенко, В. И. Тужил-кин. – СПб.: ГИОРД, 2007. – Ч. 1. – 508 с.
2. Бугаенко, И. Ф. Принципы эффективного сахарного производства / И. Ф. Бугаенко. – М.: Междунар. сахар. компания, Инмашпроект, 2003. – 285 с.
3. Эффективные технологии производства свекловичного сахара / О. К. Никулина [и др.]. – Минск: ИВЦ Мин-фина, 2023. – 302 с.
4. Сапронов, А. Р. Технология сахарного производства / А. Р. Сапронов. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Колос, 1999. – 495 с.
5. Физико-химические процессы сахарного производства / И. С. Гульй [и др.]. – М.: Агропромиздат, 1987. – 264 с.
6. Круглик, С. В. Об оптимизации технологии на отдельных стадиях производства сахара / С. В. Круглик // Сахар. – 2020. – № 4. – С. 27–35. <https://doi.org/10.24411/2413-5518-2020-10403>
7. Способ мембранно-ферментативной очистки диффузионного сока с использованием cross flow ультрафиль-трации и упрощённой дефексатурации / С. Л. Филатов [и др.] // Сахар. – 2020. – № 3. – С. 9–15. <http://doi.org/10.24411/2413-5518-2020-10307>
8. Боннанфан, Ф. Принципы очистки соков сахарной свёклы / Ф. Боннанфан // Сахар. – 2019. – № 5. – С. 16–27.
9. Интенсификация известково-углекислотной очистки диффузионного сока / Ю. И. Зелепукин [и др.] // Сахар. – 2016. – № 1. – С. 40–43.
10. Штангеев, В. О. Очистка густых полупродуктов сахарного производства / В. О. Штангеев, Е. Н. Молодницкая, Л. С. Клименко // Сахар. – 2013. – № 11. – С. 44–49.
11. Савостин, А. В. Эффективность антинакипинов при выпаривании соков свеклосахарного производства / А. В. Савостин, В. О. Городецкий // Сахар. – 2014. – № 10. – С. 47–50.
12. Петров, С. М. О возможности удаления солей кальция из сиропов, полученных с использованием антинаки-пинов / С. М. Петров, С. Л. Филатов, В. М. Думченков // Сахар. – 2018. – № 2. – С. 30–33.
13. Рудюк, Л. С. Ионнообменные технологии в сахарной промышленности. Обессахаривание мелассы и декальци-нация сока / Л. С. Рудюк, Д. Пайе, Ф. Бонненфан // Сахар. – 2018. – № 4. – С. 26–27.
14. Bertuzzi, S. Determinazione a, K, Na, azoto alfa-amminico in zuecherificio, implecazioni tecnologiche / S. Bertuzzi, M. Zavarella // L'Ind. Sacc. Ital. – 1988. – Vol. 81, № 4. – P. 135–138.
15. Beziehungen zwischen den Verhältnissen einiger Kationen und Anionen in der Zuckerrube und deren grundlegenden qualitativen Merkmalen / A. Dandar [et al.] // Processing expert systems, technological value of sugar beet, progress in sugar technology: proc. of the 20th Gen. Assembly of CITS, Munich, Germany, 26–30 June 1995 / Commiss. Intern. Techn. de Sucrierie. – Berlin, 1996. – S. 116–122.
16. Бобровник, Л. Д. Роль гидратации в мелассообразовании / Л. Д. Бобровник // Сахар. – 2015. – № 6. – С. 54–58.
17. Инновационные технологии как основа устойчивого экономического развития свеклосахарного производ-ства / С. Л. Филатов [и др.] // Сахар. – 2020. – № 8. – С. 12–19. <https://doi.org/10.24411/2413-5518-2020-10802>
18. Применение электродиализа для очистки диффузионного сока в сахарном производстве / О. К. Никулина [и др.] // Пищевая пром-сть: наука и технологии. – 2021. – Т. 14, № 3 (53). – С. 51–61. [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2021-14-3\(53\)-51-61](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2021-14-3(53)-51-61)
19. Дымар, О. В. Изучение взаимосвязи скорости деминерализации кислой сыворотки от изменения напряжения процесса / О. В. Дымар, М. Р. Яковлева, А. Меркель // Пищевая пром-сть: наука и технологии. – 2019. – Т. 12, № 1 (43). – С. 74–79.
20. Ильина, С. И. Электро-мембранные процессы / С. И. Ильина. – М.: РХТУ, 2013. – 57 с.
21. Дорофеева, Л. И. Разделение и очистка веществ мембранными, обменными и электрохимическими методами / Л. И. Дорофеева. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2008. – 111 с.
22. Дымар, О. В. Повышение эффективности переработки молочных ресурсов: научно-технологические аспекты / О. В. Дымар. – Минск: Колорград, 2018. – 236 с.

References

1. Bugaenko I. F. *General technology of the industry. Scientific bases of sugar technology. Part 1*. St. Petersburg, GIORD Publ., 2007. 508 p. (in Russian).
2. Bugaenko I. F. *Principles of efficient sugar production*. Moscow, International Sugar Company, Inmashproekt Publ., 2003. 285 p. (in Russian).
3. Nikulina O. K., Koloskova O. V., Yakovleva M. R., Mel'nichek S. V., Dymar O. V. *Efficient technologies for beet sugar production*. Minsk, IVTs Minfina Publ., 2023. 302 p. (in Russian).
4. Sapronov A. R. *Technology of sugar production*. 2nd ed. Moscow, Kolos Publ., 1999. 495 p. (in Russian).
5. Gulyi I. S., Lysyanskii V. M., Reva L. P., Fedotkin I. M., Tobilevich N. Yu., Bobrovnik L. D. [et al.]. *Physico-chemical processes of sugar production*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 264 p. (in Russian).
6. Kruglik S. V. On the optimization of technology at the certain stages of sugar production. *Sakhar* [Sugar], 2020, no. 4, pp. 27–35 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2413-5518-2020-10403>
7. Filatov S. L., Petrov S. M., Podgornova N. M., Mikhailichenko M. S., Dumchenkov V. M. Method of membrane-enzymatic purification of diffusion juice with the use of cross flow ultrafiltration and simplified liming carbonation. *Sakhar* [Sugar], 2020, no. 3, pp. 9–15 (in Russian). <http://doi.org/10.24411/2413-5518-2020-10307>
8. Bonnenfant F. Principles of sugar beet juices filtration. *Sakhar* [Sugar], 2019, no. 5, pp. 16–27 (in Russian).
9. Zelepukin Y. I., Golybin V. A., Fedoruk V. A., Zelepukin S. Yu. Intensification of calcareous and carbon-dioxide purification of diffusion juice. *Sakhar* [Sugar], 2016, no. 1, pp. 40–43 (in Russian).
10. Shtangeev V. O., Molodnitskaya E. N., Klimenko L. S. Purification of dense intermediate products used in sugar production. *Sakhar* [Sugar], 2013, no. 11, pp. 44–49 (in Russian).
11. Savostin A.V., Gorodetsky V. O. Efficiency antiscale by evaporation juice sugar industry. *Sakhar* [Sugar], 2014, no. 10, pp. 47–50 (in Russian).
12. Petrov S. M., Filatov S. L., Dumchenkov V. M. On the possibility of removing salts of calcium using syrups containing antiscales. *Sakhar* [Sugar], 2018, no. 2, pp. 30–33 (in Russian).
13. Rudiuk L. S., Paillat D., Bonnenfant P. Ion-exchange technologies in sugar industry. Molasses desugarization and juice decalcifying. *Sakhar* [Sugar], 2018, no. 4, pp. 26–27 (in Russian).
14. Bertuzzi S., Zurlecla N. *Determinazione a: K, Na, azoto alfa-amminico in zuecherificio, implecazioni tecnologiche* [Determination of: K, Na, alpha-amino nitrogen in the sugar factory, technological implementations]. *L'Industria Saccarifera Italiana* [Italian Sugar Industry], 1988, vol. 81, no. 4, pp. 135–138 (in Italian).
15. Dandar A., Bajci P., Matula S., Sopkovic M. *Beziehungen zwischen den Verhältnissen einiger Kationen und Anionen in der Zuckerrube und deren grundlegenden qualitativen Merkmalen* [Relationship between the contents of some cations and anions in sugarbeet and its fundamental quality indices]. *Processing expert systems, technological value of sugar beet, progress in sugar technology: proceedings of the 20th General Assembly of CITS, Munich, Germany, 26–30 June 1995*. Berlin, 1996, pp. 116–122 (in German).
16. Bobrovnik L. D. Role of hydration in the formation of molasses. *Sakhar* [Sugar], 2015, no. 6, pp. 54–58 (in Russian).
17. Filatov S. L., Petrov S. M., Podgornova N. M., Mikhailichenko M. C., Dumchenkov V. M. Innovative technologies as a basis for sustainable economic development of beet production. *Sakhar* [Sugar], 2020, no. 8, pp. 12–19 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2413-5518-2020-10802>
18. Nikulina O. K., Koloskova O. V., Yakovleva M. R., Dymar O. V. Application of electrodialysis for purification of diffusion juice in sugar production. *Pishcheyaya promyshlennost': nauka i tekhnologii = Food Industry: Science and Technology*, 2020, vol. 14, no. 3 (53), pp. 51–61 (in Russian). [https://doi.org/10.47612/2073-4794-2021-14-3\(53\)-51-61](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2021-14-3(53)-51-61)
19. Dymar O. V., Yakovleva M. R., Merkel A. Studying of interrelation of the rate of demineralization of acid milk serum from changes in the voltage of the process. *Pishcheyaya promyshlennost': nauka i tekhnologii = Food Industry: Science and Technology*, 2019, vol. 12, no. 1 (43), pp. 74–79 (in Russian).
20. Il'ina S. I. *Electro-membrane processes*. Moscow, Russian University of Chemical Technology, 2013. 57 p. (in Russian).
21. Dorofeeva L. I. *Separation and purification of substances by membrane, exchange and electrochemical methods*. Tomsk, Publishing House of Tomsk Polytechnic University, 2008. 111 p. (in Russian).
22. Dymar O. V. *Improving the efficiency of processing dairy resources: scientific and technological aspects*. Minsk, Kolorgrad Publ., 2018. 236 p. (in Russian).

Информация об авторе

Никulina Оксана Константиновна – кандидат технических наук, доцент, заведующий научно-исследовательской лабораторией сахарного производства, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию (ул. Козлова, 29, 220037, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sugar@belproduct.com

Information about author

Oksana K. Nikulina – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Research Laboratory of Sugar Production, Scientific and Practical Centre of the National Academy of Sciences of Belarus for Foodstuff (29, Kozlov Str., 220037, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sugar@belproduct.com