

УДК 664.1.039

[https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-3\(57\)-69-78](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-3(57)-69-78)

Поступила в редакцию 11.08.2022

Received 11.08.2022

**О. К. Никулина<sup>1</sup>, О. В. Колоскова<sup>1</sup>, М. Р. Яковлева<sup>1</sup>, О. В. Дымар<sup>2</sup>**<sup>1</sup> РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию», г. Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup> Представительство АО «МЕГА» в Республике Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь

## **ПОВЫШЕНИЕ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ ДИФфуЗИОННОГО СОКА МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ДЕМИНЕРАЛИЗАЦИИ**

**Аннотация.** Важным этапом в оптимизации свеклосахарного производства является совершенствование технологии очистки диффузионного сока. Для повышения эффективности технологии очистки диффузионного сока необходимо интенсифицировать отдельные ее стадии в классической схеме с достижением максимально возможных локальных и общего эффекта очистки. Наиболее перспективным и малоисследованным методом обработки продуктов переработки сахарной свеклы с целью регулирования их минерального состава и снижения отрицательного влияния золы на технологический процесс получения сахара является электродиализ, позволяющий очищать сахарные растворы от электролитов.

Целью данной работы было изучение минерального и органического состава полупродуктов сахарного производства и исследование его изменения в процессе электромембранной обработки. 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 на ОАО «Городейский сахарный комбинат». Испытания проводились при установленном режиме получения сахара на пилотной мембранной установке с катионно-анионным набором мембран на диффузионных соках, соках I сатурации и сульфитированных соках.

Установлено, что в процессе электродиализа из полупродуктов сахарного производства катионы калия удаляются на 94,4–98,5 %. Из сока I сатурации катионы кальция удаляются на 93,6 %, из сульфитированного сока — на 66,7 %. При этом повышается чистота сульфитированного сока на 4,1 %, сока I сатурации — на 5,2 %, происходит снижение солей кальция и *α*-аминного азота в соке I сатурации на 93,5 и 95,8 % соответственно, в сульфитированном соке — на 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.

**Ключевые слова:** очистка диффузионного сока, электромембранная обработка, электродиализ, минеральный состав, органические кислоты

**О. К. Nikulina<sup>1</sup>, O. V. Koloskova<sup>1</sup>, M. R. Yakovleva<sup>1</sup>, O. V. Dymar<sup>2</sup>**<sup>1</sup> RUE “Scientific and Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Republic of Belarus<sup>2</sup> Representative of MEGA a.s. in Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

## **INCREASING THE DIFFUSION JUICE PURIFICATION DEGREE BY THE ELECTROCHEMICAL DEMINERALIZATION PROCESS**

**Abstract.** The improvement of the diffusion juice purification technology is an important stage of the optimization of sugar beet production. To increase the efficiency of the technology of diffusion juice purification, it is necessary to intensify separate stages of purification of diffusion juice in the classical scheme with the achievement of the maximum possible local and the general effects of purification. The most perspective and insufficiently explored method of sugar beet by-products treatment is electrodiolysis, which makes it possible to purify sugar solutions from electrolytes.

Electrodialysis allows to regulate mineral composition of sugar beet by-products and reduce the negative effect of ash content on the technological process of sugar production.

The purpose of this study was to investigate the mineral and organic composition of intermediate products of sugar production and study its changes in the process of electromembrane treatment. Model tests of the electrodialysis process were carried out in industrial conditions at JSC “Gorodeya Sugar Refinery” to obtain data on the actual range of changes in the cations and anions content in the intermediate products of sugar production and its technological quality. The tests were carried out on a pilot membrane plant with a cationic-anionic set of membranes in a steady state mode. The demineralization process was explored on diffusion juices, juices of I saturation and sulphitated juices.

It has been established that in the process of electrodialysis potassium cations are removed from sugar beet by-products by 94.4–98.5%. Calcium cations are removed from the juice of I saturation by 93.6%, from sulphitated juice — by 66.7%. At the same time, the purity of sulphitated juice increases by 4.1%, juice of the first saturation — by 5.2%, there is a decrease in calcium salts and  $\alpha$ -amine nitrogen in the juice of the first saturation — by 93.5 and 95.8%, respectively, in sulphitated juice — by 76.5 and 43.8%. In diffusion juice, the decrease in the content of  $\alpha$ -amine nitrogen is only 11.9%, there is no decrease in calcium salts, a decrease in the total amount of non-sugars is 29.3%, which gives reason to consider its processing ineffective compared to other intermediates.

**Key words:** purification of diffusion juice, electromembrane treatment, electrodialysis, mineral composition, organic acids

**Введение.** Важным фактором в оптимизации свеклосахарного производства является совершенствование технологии очистки диффузионного сока. Для повышения ее эффективности сделаны попытки интенсифицировать отдельные стадии технологического процесса в классической схеме [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Совершенствование локальных операций обеспечивает получение максимального интегрального эффекта очистки диффузионного сока [1]. Вместе с тем, разработка новых решений в данном направлении продолжается [7, 8, 9, 10, 11], но окончательного решения до сих пор нет, что делает научный поиск в данном направлении по-прежнему актуальным.

Исследования качества сахарной свеклы, выращенной в условиях Республики Беларусь, показали, что отечественное сырье характеризуется высоким содержанием золы в диапазоне 0,60–0,76 % к массе свеклы, а по некоторым зонам свеклосеяния уровень содержания золы доходит до 0,89 % к массе свеклы, что предполагает получение диффузионного сока низкого качества, даже при высоких показателях сахаристости свеклы и чистоты свекловичного сока. При этом содержание калия находится в диапазоне 5,13–8,20 ммоль на 100 г свеклы (среднее 6,67 ммоль на 100 г свеклы), содержание натрия — 0,36–1,20 ммоль на 100 г свеклы (среднее 0,78 ммоль на 100 г свеклы). Это обеспечивает соотношение калия к натрию 9 : 1, при оптимальном для переработки соотношении 5 : 1 [12]. Зола составляет 25–27 % несахаров (НСХ) диффузионного сока и существенно влияет на его качество, поэтому поиск технологических приемов, позволяющих уменьшить количество золы в технологическом процессе производства сахара из сахарной свеклы, имеет важное значение.

Наиболее перспективным и малоисследованным методом обработки продуктов переработки сахарной свеклы с целью регулирования их минерального состава и снижения отрицательного влияния золы на технологический процесс получения сахара является электрохимический ионообменный процесс — электродиализ, позволяющий очищать сахарные растворы от электролитов.

**Целью данной работы** являлось изучение минерального и органического состава полупродуктов сахарного производства и исследование его изменения в процессе электромембранной обработки.

**Материалы и методы исследований.** Пробы полупродуктов сахарного производства отбирались на ОАО «Городейский сахарный комбинат» в процессе переработки сахарной свеклы урожая 2019 года для изучения химического состава. Исследования по содержанию общей золы, калия, натрия, кальция, магния, органических кислот были проведены Республиканским контрольно-испытательным комплексом по качеству и безопасности продуктов питания, исследования содержания редуцирующих веществ, азотистых соединений и показателей технологического качества полупродуктов были проведены научно-исследовательской лабораторией сахарного производства.

Модельные испытания процесса деминерализации производились на пилотной мембранной установке ED(R) — Y производства MEGA a.s., Чехия с катионно-анионным набором мембран [13].

**Результаты исследований и их обсуждение.** Средние показатели содержания золы в полупродуктах сахарного производства представлены в табл. 1 [12].

**Таблица 1. Содержание золы в полупродуктах сахарного производства**  
**Table 1. Ash content in semi-products of sugar production**

	содержание в полупродукте, % к массе полупродукта			содержание золы на 100 НСХ, %	содержание золы на 100 СВ, %
	СВ	золы	НСХ		
Диффузионный сок	17,84	0,4	1,69	23,7	2,2
Сок I сатурации	17,21	0,4	1,41	28,4	2,3
Сульфитированный сок	17,33	0,3	1,25	24,0	1,7
Оттек утфеля I кристаллизации	81,00	3,7	12,18	30,4	4,6
Оттек утфеля II кристаллизации	84,81	5,8	18,64	31,1	6,8
Меласса	84,21	7,7	27,75	27,7	9,1

Результаты исследований свидетельствуют о том, что зола из диффузионного сока мало удаляется в процессе его очистки, но увеличивается к концу процесса за счет вносимых в сок вспомогательных средств [12]. Средние показатели процентного содержания калия, натрия, кальция и магния в золе исследуемых полупродуктов приведены в табл. 2 [12].

**Таблица 2. Массовая доля катионов в сырье и полупродуктах сахарного производства**  
**(% к массе золы)**

**Table 2. Mass fraction of cations in raw materials and intermediate products of sugar production (% by weight of ash)**

Полупродукт сахарного производства	калий, %	натрий, %	кальций, %	магний, %
Сахарная свекла	30,7	1,8	-	-
Диффузионный сок	27,8	1,0	1,5	3,5
Сок I сатурации	24,5	1,0	13,0	0,0
Сульфитированный сок	33,0	4,7	1,7	0,0
Оттек утфеля I кристаллизации	33,7	5,4	1,7	0,1
Оттек утфеля II кристаллизации	34,7	5,3	2,0	0,1
Меласса	32,5	4,6	1,7	0,1

Минеральные вещества сахарной свеклы в большей степени представлены калием, который составляет 24,5 — 34,7 % золы 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 % [12]. Ионы калия и натрия являются наиболее сильными мелассообразователями и способствуют увеличению содержания сахара в мелассе и ее выхода [14].

Катионы кальция составляют 1,5 % от золы 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.

Катионы магния обнаруживаются в значительном количестве в диффузионном соке. Далее по процессу катионы магния не обнаружены или их количество незначительно.

Результаты исследований (табл. 3) показывают, что шавелевая и яблочная кислоты не удаляются при очистке и накапливаются в полупродуктах к концу производства. Молочная и уксусная кислоты в процессе очистки сока удаляются в значительной мере, но снова образуются в процессе производства и накапливаются в мелассе. Состав органических веществ меняется в процессе производства и их содержание в полупродуктах увеличивается к его концу. Лимонная кислота в отобранных продуктах не обнаружена. Редуцирующие вещества в значительной мере удаляются на стадии очистки диффузионного сока, но образуются в большом количестве в конечных полупродуктах.

**Таблица 3. Массовая доля органических веществ в полупродуктах сахарного производства (% к массе продукта)**

**Table 3. Mass fraction of organic substances in intermediate products of sugar production (% by weight of the product)**

Полупродукт сахарного производства	щавелевая кислота, %	яблочная кислота, %	молочная кислота, %	уксусная кислота, %	лимонная кислота, %	редуцирующие вещества, %	белки, %	нитраты, %
Диффузионный сок	0,148	0,012	0,580	0,128	0	0,105	0,75	0,003
Сок I сатурации	0,196	0,037	0,168	0,011	0	0,009	0,38	0,090
Сульфитированный сок	0,159	0,035	0,278	0,016	0	0,020	0,54	0,028
Оттек утфеля I кристаллизации	0,948	0,272	2,062	0,258	0	0,497	6,25	0,442
Оттек утфеля II кристаллизации	0,952	0,492	2,238	0,297	0	0,512	8,88	0,564
Меласса	0,648	0,390	2,160	0,608	0	0,876	11,13	0,769

Так как с технологической точки зрения целесообразнее удалять несахара в начале технологической схемы производства сахара, т.е. проводить электродиализную очистку сока, что интенсифицирует работу выпарной установки и продуктового отделения сахарного завода, для обработки использовали диффузионный сок различной степени очистки по стадиям классического технологического процесса.

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 установленном режиме получения сахара на пилотной мембранной установке с катионно-анионным набором мембран на диффузионных соках, соках I сатурации и сульфитированных соках.

**Таблица 4. Изменение минерального состава полупродуктов сахарного производства в процессе электродиализа (% к массе продукта)**

**Table 4. Change in the mineral composition of intermediate products of sugar production in the process of electro dialysis (% by weight of the product)**

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

Анализ данных (табл. 4) показывает, что определяемая методом сжигания общая зола в процессе электродиализа из полупродуктов сахарного производства удаляется полностью.

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 золы. Поэтому при небольшом количестве катионов в исходном полупродукте изменение их содержания в процессе электродиализа не столь значительно, в связи со значениями близкими к пределу удаления.

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. Катионы кальция не удаляются из диффузионного сока. Из сока I сатурации катионы кальция удаляются на 93,6 %. Из сульфитированного сока катионы кальция удаляются до предела удаления, следовательно эффект декальцинации сульфитированного сока при использовании электродиализа составляет 66,7 % [13].

**Таблица 5. Изменение органического состава полупродуктов сахарного производства в процессе электродиализа (% к массе продукта)**  
**Table 5. Changes of the organic composition of intermediate products of sugar production in the process of electro dialysis (% by weight of the product)**

Полупродукт сахарного производства	щавелевая кислота, %	яблочная кислота, %	молочная кислота, %	уксусная кислота, %	редуцирующие вещества, %	белки, %	нитраты, %
Диффузионный сок							
Сок	0,174	0,019	0,570	0,139	0,105	0,75	0,031
Дилуат	0,015	0,000	0,119	0,034	0,084	0,47	0,006
Δ	0,159	0,019	0,451	0,105	0,021	0,28	0,025
Сок I сатурации							
Сок	0,197	0,038	0,163	0,012	0,004	0,44	0,091
Дилуат	0,002	0,017	0,032	0,004	0,005	0,25	0,001
Δ	0,196	0,021	0,131	0,008	+0,001	0,19	0,090
Сульфитированный сок							
Сок	0,160	0,038	0,298	0,015	0,014	0,54	0,028
Дилуат	0,002	0,021	0,063	0,005	0,016	0,41	0,001
Δ	0,159	0,017	0,236	0,010	+0,002	0,13	0,027
Удаление органических веществ в процессе электродиализа, % к исходному количеству							
Диффузионный сок	91,4	100,0	79,1	75,5	20,0	37,3	80,6
Сок I сатурации	99,2	56,0	80,6	66,7	+25,0	43,2	98,9
Сульфитированный сок	99,1	44,0	79,0	66,7	+14,3	24,1	96,4

Результаты исследования изменения органического состава диффузионного, сульфитированного соков и сока I сатурации в процессе электромембранной обработки (в табл. 5) показывают, что в процессе электродиализа из полупродуктов сахарного производства на 91 — 99 % удаляется щавелевая кислота, на 44 — 100 % яблочная, на 67 — 76 % уксусная и на 79 — 81 % молочная кислоты. Белки удаляются на 24 — 43 %, нитраты на 81 — 99 %. Редуцирующие вещества в процессе обработки соков снижаются на 20 % в диффузионном соке, увеличиваются на 14 % в сульфитированном и 25 % в соке I сатурации.

Изменение содержания редуцирующих веществ в процессе электромембранной обработки полупродуктов сахарного производства требует более глубоко изучения.

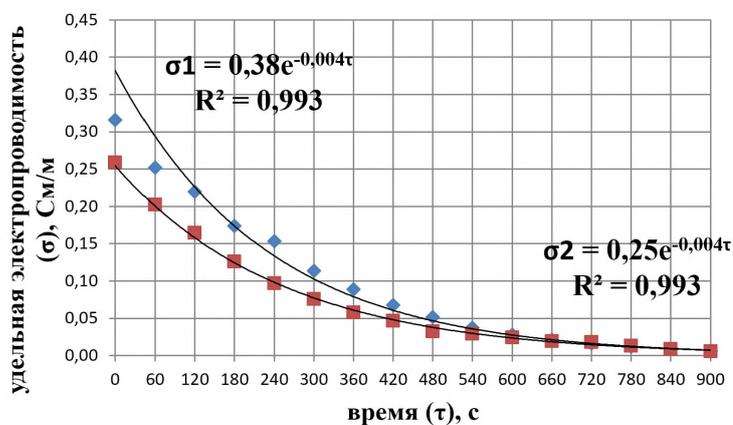
Из табл. 6 следует, что чистота всех соков в результате деминерализации значительно повышается. Снижение содержания сухих веществ происходит в основном за счет снижения количества несхаров, потери же сахарозы в процессе незначительны и наблюдаются при работе с сульфитированным соком. Также наблюдается 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 несхаров — 29,3 %, что дает основание считать его обработку малоэффективной по сравнению с другими полупродуктами [15].

**Таблица 6. Изменение технологических показателей полупродуктов сахарного производства**  
**Table 6. Changes of technological indicators of semi-products of sugar production**

Полупродукт сахарного производства	СВ, %	СХ, %	Ч, %	рН	НСХ, %	соли кальция, %	α-аминовый 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

При проведении модельных испытаний в процессе электродиализа измеряли удельную электропроводимость полупродуктов. Изменение величины удельной электропроводимости отражает степень деминерализации раствора в контрольной точке и является основным параметром для регулирования данного процесса.

Процесс описан графиками, представленными на рис. 1.



- ◆ Удельная электропроводимость сульфитированного сока (σ1)
- Удельная электропроводимость сока I сатурации (σ2)

Рис. 1. Процесс деминерализации  
 Fig. 1. Demineralization process

Очевидно (рис. 1), что скорость деминерализации к окончанию процесса замедляется. Так как длительность процесса деминерализации зависит не только от химического состава начального полупродукта, но и от потока полупродукта, продолжительности работы установки, качества санитарной обработки мембран, срока их эксплуатации и др., время протекания процесса деминерализации может варьироваться в больших пределах. Сокращение длительности процессов в производстве всегда является более предпочтительным по энергозатратам, поэтому для установления необходимости осуществления электромембранной обработки сока до его полной деминерализации проводилась оценка степени деминерализации соков по ходу процесса.

Экспериментальные данные позволяют рассчитать уравнения регрессии, описывающие деминерализацию сока I сатурации экспоненциальной зависимостью вида (1) и деминерализацию сульфитированного сока уравнением аналогичного вида (2):

$$\sigma = 0,25e^{-0,004\tau}, \quad (1)$$

$$\sigma = 0,38e^{-0,004\tau}, \quad (2)$$

где  $\sigma$  — удельная электропроводимость, См/м;  $\tau$  — время, с.

Используя уравнения, находили значения удельной электропроводимости соответствующие 360 секундам. Химический состав и технологическое качество дилуата определяли при удельной электропроводимости 0,06 См/м для сатурационного сока и 0,09 См/м для сульфитированного (1 этап) и при завершении процесса (2 этап).

Промежуточные показатели, оценка степени деминерализации и ее влияния на технологическое качество сока I сатурации и сульфитированного сока приведены в таблицах 7 — 9.

**Таблица 7. Изменение минерального состава сока I сатурации и сульфитированного сока в процессе электродиализа (% к массе продукта)**

**Table 7. Changes of the mineral composition of juice of I saturation and sulphitated juice during electrodiagnosis (% by weight of the product)**

Полупродукт сахарного производства	Зола, %	Калий, %	Натрий, %	Кальций, %
Сок I сатурации				
Сок	0,3	0,091	0,003	0,038
Дилуат (1 этап)	0,1	0,016	0,003	0,014
Δ	0,2	0,075	0	0,024
Дилуат (2 этап)	0,0	0,005	0,002	0,005
Δ	0,3	0,086	0,001	0,033
Сульфитированный сок				
Сок	0,3	0,097	0,011	0,005
Дилуат (1 этап)	0,0	0,009	0,004	0,002
Δ	0,3	0,088	0,007	0,003
Дилуат (2 этап)	0,0	0,002	0,002	0,001
Δ	0,3	0,095	0,009	0,004
Изменение показателей в процессе электродиализа, % к исходному качеству				
Сок I сатурации: 1 этап	66,7	82,4	0	63,2
2 этап	100,0	94,5	33,3	86,8
Сульфитированный сок: 1 этап	100,0	90,7	63,6	40,0
2 этап	100,0	97,9	81,8	80,0

Полученные данные (табл. 7) свидетельствуют о том, что переход катионов на первом и втором этапах деминерализации осуществляется по-разному. Катионы калия уже на первом этапе удаляются из сока I сатурации на 82,4 % и из сульфитированного сока на 90,7 %. Из сока I сатурации катионы кальция и общая зола удаляются на 63,2 и 66,7 % соответственно. Содержание катионов натрия в соке I сатурации незначительно, поэтому степень их удаления низкая — 33,3 %.

Общая зола, определенная методом сжигания, удаляется из сульфитированного сока полностью уже на первом этапе, катионы кальция на первом этапе удаляются на 40,0 %, натрия — на 63,6 %. Содержание катионов кальция в соке низкое, поэтому степень их удаления достигает 80 % к концу процесса.

Данные из табл. 8 свидетельствуют об удалении шавелевой кислоты из соков на 94,2 — 96,8 % и полном удалении уксусной кислоты уже на первом этапе процесса деминерализации. Из сока I сатурации молочная кислота удаляется на 67,8 % на первом этапе при общем ее удалении на 87,9 %. Яблочная кислота и белки удаляются из сока I сатурации на 48,4 и 43,2 % соответственно, из них за первый этап на 35,5 и 29,5 %. Редуцирующие вещества из сока I сатурации удаляются на 38,5 % на первом этапе процесса деминерализации, но в конце второго этапа деминерализации содержание редуцирующих веществ в соке увеличивается. Это может свидетельствовать о разложении органических соединений при использовании электродиализа.

**Таблица 8. Изменение органического состава сока I сатурации и сульфитированного сока в процессе электродиализа (% к массе продукта)**  
**Table 8. Changes of the organic composition of the juice of I saturation and sulphitated juice in the process of electrodiagnosis (% by weight of the product)**

Полупродукт сахарного производства	Щавелевая кислота, %	Яблочная кислота, %	Молочная кислота, %	Уксусная кислота, %	Редуцирующие вещества, %	Белки, %
Сок I сатурации						
Сок	0,171	0,031	0,174	0,007	0,013	0,44
Дилуат (1 этап)	0,010	0,020	0,056	0,000	0,008	0,31
Δ	0,161	0,011	0,118	0,007	0,005	0,13
Дилуат (2 этап)	0,003	0,016	0,021	0,000	0,016	0,25
Δ	0,168	0,015	0,153	0,007	+0,003	0,19
Сульфитированный сок						
Сок	0,156	0,031	0,237	0,018	0,032	0,44
Дилуат (1 этап)	0,005	0,030	0,039	0,000	0,015	0,31
Δ	0,151	0,001	0,198	0,018	0,017	0,13
Дилуат (2 этап)	0,003	0,027	0,015	0,000	0,031	0,25
Δ	0,153	0,004	0,222	0,018	0,001	0,19
Изменение показателей в процессе электродиализа, % к исходному качеству						
Сок I сатурации: 1 этап	94,2	35,5	67,8	100,0	38,5	29,5
2 этап	98,2	48,4	87,9	100,0	+23,1	43,2
Сульфитированный сок: 1 этап	96,8	3,2	83,5	100,0	53,1	29,5
2 этап	98,1	12,9	93,7	100,0	3,1	43,2

Из сульфитированного сока молочная кислота удаляется на 83,5 % на первом этапе при общем ее удалении на 93,7 %. Яблочная кислота и белки удаляются из сока на 12,9 и 43,2 % соответственно, из них за первый этап на 3,2 и 29,5 %. Редуцирующие вещества из сульфитированного сока удаляются на 53,1 % на первом этапе процесса деминерализации, но в конце второго этапа деминерализации содержание редуцирующих веществ в соке увеличивается и эффект удаления составляет всего 3,1 %.

Данные экспериментов (табл. 9) свидетельствуют, что в процессе электромембранной обработки сока I сатурации происходит снижение содержания сухих веществ в основном за счет удаления из сока сахара на 65,4 % и вследствие этого повышение чистоты сока на 4,8 %, потери сахарозы составляют 0,24 % к массе сока. При этом большая часть сахара удаляется на первом этапе процесса деминерализации, что влечет за собой более значимое повышение чистоты сока.

Степень изменения технологического показателя соли кальция, определяемого титриметрическим методом, практически соответствует степени удаления катионов кальция, определенных методом пламенной фотометрии. Из этого следует, что упрощенный метод титриметрического определения солей кальция является подходящим для контроля и оценки перехода катионов кальция в процессе деминерализации.

В процессе электромембранной обработки сульфитированного сока происходит снижение содержания сухих веществ на 56,8 % и вследствие этого повышение чистоты сока на 4,0 %, потери сахарозы составляют 0,62 % к массе сока. При этом большая часть сахара удаляется на первом этапе процесса деминерализации, что влечет за собой более значимое повышение чистоты сока. Степень изменения технологического показателя соли кальция, определяемого титриметрическим методом, составила 55,6 % на первом и 66,7 % на втором этапе деминерализации.

Дальнейшие исследования процесса электромембранной обработки полупродуктов сахарного производства позволят установить оптимальные точки применения электродиализа и предложить экономически эффективные режимы обработки.

**Заключение.** Установлено, что в процессе электродиализа из полупродуктов сахарного производства катионы калия удаляются на 94,4–98,5 %. Из сока I сатурации катионы кальция удаляются на 93,6 %, декальцинация сульфитированного сока при использовании электродиализа составляет 66,7 %. При этом повышается чистота сульфитированного сока на

4,1 % и сока I сатурации на 5,2 %, происходит снижение солей кальция и  $\alpha$ -аминного азота в соке I сатурации на 93,5 и 95,8 % соответственно и в меньшей степени в сульфитированном соке — на 76,5 и 43,8 %. В диффузионном соке снижение содержания  $\alpha$ -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.

**Таблица 9. Изменение технологического качества сока I сатурации и сульфитированного сока в процессе электродиализа**

**Table 9. Change of the technological quality of I saturation and sulphitated juice in the process of electrodiagnosis**

Полупродукт сахарного производства	СВ, %	СХ, %	Ч, %	рН	НСХ, %	Соли кальция, %
Сок I сатурации						
Сок	16,96	15,66	92,33	10,9	1,30	0,073
Дилуат (1 этап)	16,08	15,47	96,21	10,1	0,61	0,026
$\Delta$	0,88	0,19	+3,9	0,8	0,69	0,047
Дилуат (2 этап)	15,87	15,42	97,15	9,3	0,45	0,009
$\Delta$	1,09	0,24	+4,8	1,6	0,85	0,064
Сульфитированный сок						
Сок	17,61	16,29	92,50	9,0	1,32	0,009
Дилуат (1 этап)	16,80	16,14	96,10	6,7	0,66	0,004
$\Delta$	0,81	0,15	+3,6	2,3	0,66	0,005
Дилуат (2 этап)	16,24	15,67	96,49	4,8	0,57	0,003
$\Delta$	1,37	0,62	+3,99	4,2	0,75	0,006
Изменение показателей в процессе электродиализа, % к исходному качеству						
Сок I сатурации: 1 этап					53,1	64,4
2 этап					65,4	87,7
Сульфитированный сок: 1 этап					50,0	55,6
2 этап					56,8	66,7

С целью сокращения длительности и повышения экономической эффективности процесса электромембранной обработки установлено, что в производственных условиях целесообразно ориентироваться на предельно технически достижимую степень деминерализации. Так как большая часть несахаров удаляется из полупродуктов на первом этапе обработки, существует рациональная степень деминерализации, обеспечивающая при сохранении приемлемого качества обработки высокую скорость процесса удаления примесей.

#### Список использованных источников

1. 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).
2. Рева, Л. П. Совершенствование современной типовой технологической схемы очистки диффузионного сока / Л. П. Рева, В. Ю. Вислобоков // Сахар. — 2013. — №4. — С. 54–61.
3. Решетова, Р. С. Виды возвратов на предварительную дефекацию, их влияние на формирование осадка несахаров и эффективность очистки диффузионного сока / Р. С. Решетова, О. Ю. Бганцева, М. А. Гаманченко // Сахар. — 2020. — №9. — С. 18–23.
4. Круглик, С. В. Об оптимизации технологии на отдельных стадиях производства сахара / С. В. Круглик // Сахар. — 2020. — №4. — С. 27–35.
5. Совершенствование способа известково-углекислотной очистки диффузионного сока свеклосахарного производства / В.О. Городецкий [и др.] // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. — 2017. — №5-6 (359-360). — С. 67–70.
6. Савостин, А. В. Совершенствование очистки диффузионных соков на основе свойств дисперсных систем / А. В. Савостин, И.М. Кузьмин // Сахар. — 2011. — №3. — С. 52–54.
7. The potential of microfiltration and ultrafiltration process in purification of raw sugar beet juice / V. Hakimzadeh [and etc.] // Desalination. — 2006. — №200 (1-3). — P. 520–522.

8. *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.
9. Инновационные технологии как основа устойчивого экономического развития свекло-сахарного производства / С. Л. Филатов [и др.] // *Сахар*. — 2020. — №8. — С. 12–19.
10. Способ мембранно-ферментативной очистки диффузионного сока с использованием cross flow ультрафильтрации и упрощенной дефекосатурации / С. Л. Филатов [и др.] // *Сахар*. — 2020. — №3. — С. 9–15.
11. Иониты для глубокой деминерализации и обесцвечивания сока II сатурации / С. Л. Филатов [и др.] // *Сахар*. — 2011. — №2. — С. 47–49.
12. 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.
13. Применение электродиализа для очистки диффузионного сока в сахарном производстве / О.К. Никулина [и др.] // *Пищевая промышленность: наука и технологии*. — 2021. — Том 14, №3(53). — С. 51–61.
14. Содержание сахара в мелассе. Оптимизация режима кристаллизации сахарозы на последнем продукте / Ловкис З.В. [и др.]; под общ. ред. З.В. Ловкиса. — Минск: Беларуская навука, 2014. — 97 с. (Настольная книга производителя).
15. *Никулина, О.К.* Инновационные решения для совершенствования технологии сахарного производства / О.К. Никулина, О.В. Дымар // *Проблемы и перспективы научно-инновационного обеспечения агропромышленного комплекса регионов: сборник докладов Международной научно-практической конференции (Курск, 28–30 июня 2021 г.). ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр»*. — Курск, 2021. — С 110–113.

#### 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](mailto: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](mailto:sugar@belpoduct.com)

*Яковлева Мария Романовна* — магистр технических наук, 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](mailto:sugar@belpoduct.com)

*Дымар Олег Викторович* — доктор технических наук, профессор, технический директор представительства АО «МЕГА» в республике Беларусь (ул. Мележа, д. 5/2, пом. 1201, 220113, г. Минск, Республика Беларусь).

E-mail: [dymarov@tut.by](mailto:dymarov@tut.by)

#### Information about authors

*Nikulina Oksana Konstantinovna* — PhD (Engineering), 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](mailto: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](mailto:sugar@belpoduct.com)

*Yakovleva Mariya Romanovna* — Master of technical science, Process engineer 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](mailto:sugar@belpoduct.com)

*Dymar Oleg Viktorovich* — Doctor of technical sciences, Professor, Technical director of representative office of MEGA a.s. in the Republic of Belarus (Melezha str., 5/2, room 1201, 220113, Minsk, Republic of Belarus).

E-mail: [dymarov@tut.by](mailto:dymarov@tut.by)