

Применение электромембранных методов обработки для очистки густых полупродуктов сахарного производства

О.К. НИКУЛИНА, канд. техн. наук, зав. научно-исследовательской лабораторией сахарного производства*
(e-mail: sugar@belproduct.com)

О.В. ДЫМАР, инженер, д-р техн. наук, проф., техн. директор представительства АО «МЕГА» в Республике Беларусь
(e-mail: dymarov@tut.by)

О.В. КОЛОСКОВА, канд. техн. наук, ст. научн. сотрудник научно-исследовательской лаборатории сахарного производства*
(e-mail: sugar@belproduct.com)

М.Р. ЯКОВЛЕВА, магистр техн. наук, инженер-технолог II категории научно-исследовательской лаборатории сахарного производства* (e-mail: sugar@belproduct.com)

*РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию»

Введение

Научно-исследовательская лаборатория сахарного производства РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» с 2019 г. в рамках Отраслевой научно-технической программы «Пищевые технологии» занимается усовершенствованием технологии получения белого сахара при помощи электромембранных технологий (электродиализа) [4].

Научная новизна работы заключается в установлении закономерностей протекания процессов деминерализации полупродуктов сахарного производства с применением электродиализа, определении пределов изменений физико-химических показателей и компонентного состава продуктов сахарного производства при использовании электродиализа для снижения минерализации. Предполагается, что практическое применение полученных результатов позволит повысить качество продуктов сахарного производства, снизить технологические потери сахара, уменьшить потребление вспомогательных материалов и энергоресурсов.

При выполнении научно-исследовательской работы нами проанализированы возможные направ-

ления применения электромембранных технологий при производстве сахара из сахарной свёклы, установлены фактические пределы удаления анионов и катионов из полупродуктов сахарного производства. Проведены лабораторные, модельные и промышленные испытания процессов деминерализации продуктов сахарного производства с помощью электродиализа. Произведён расчёт материальных потоков сахарного производства с учётом полученных данных [3]. При испытаниях использовались полупродукты сахарного производства, полученные в процессе переработки сахарной свёклы на предприятии ОАО «Городейский сахарный комбинат».

В итоге проведённой работы рассчитана эффективность проведения деминерализации по разным технологическим схемам (на продуктах: сироп с очищенным соком, сок I сатурации, очищенный сок, отгёк utfеля II кристаллизации); определены полупродукты, электромембранная обработка которых наиболее целесообразна в существующих для ОАО «Городейский сахарный комбинат» условиях; установлены оптимальные параметры режима ведения процесса деминерализации для каждого полупродукта.

По результатам лабораторных и полупромышленных исследований разработана усовершенствованная технология очистки диффузионного сока с применением электромембранной обработки сока I сатурации [2]. Установлено снижение мелассообразующего коэффициента при использовании электромембранной обработки сока на 24,2–30,8 %, при этом активная кислотность обрабатываемого продукта находилась в диапазоне pH 9,0–9,5. Обработка позволяет снизить содержание сахара в мелассе на 1,22–1,38 % к массе свёклы, тем самым повышая выход сахара с 14,3 до 15,5–15,7 % к массе свёклы.

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 [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.

В связи с этим были исследованы химический состав и его изменение в результате электромем-

бранной обработки густых полу-продуктов. Наибольший интерес для обработки представляют такие полупродукты, как сироп после определённой ступени выпарной установки и отток утфеля II ступени кристаллизации. Причём обработка оттока предположительно является более эффективной из-за большого количества золы, что обуславливает большие проводимости обрабатываемых продуктов и, соответственно, большие рабочие электрические токи процесса.

Производственные испытания процесса деминерализации густых сахарных полупродуктов

Для получения данных о фактических пределах изменения содержания катионов и описания течения процесса в промышленных условиях были проведены производственные испытания процесса электродиализа на предприятии ОАО «Городейский сахарный комбинат», где установлены две электродиализные установки типа EWDU 8×ED-II/250-0,8 1S.

Испытания проводились на смеси сиропа и очищенного сока (табл. 1) и разбавленном до 40 % сухих веществ первом оттоке утфеля II кристаллизации (табл. 2). В процессе электродиализа измеряли удельную электропроводимость продуктов, исследовали изменение физико-химического состава (чистоты, содержания кондуктометрической золы, солей кальция, щелочных металлов). Расчёт мелассообразующих коэффициентов и ожидаемых производствен-

Таблица 1. Результаты производственных испытаний процесса электродиализа смеси сиропа с очищенным соком и расчётные показатели

Время, мин.	Электропроводимость, мСм/см	Зола кондуктометрическая, % к массе продукта	СаО, % к массе продукта	Чистота, %	Мелассообразующий коэффициент (m)	Сахар в мелассе, % к массе свёклы	Резерв сахара, % к массе продукта
0	5,64	0,98	0,055	87,83	1,34	2,84	0,0
10	5,21	0,86	0,049	88,41	1,33	2,67	0,2
20	4,76	0,79	0,046	88,65	1,33	2,62	0,2
30	4,39	0,72	0,040	88,78	1,25	2,43	0,4
45	3,95	0,66	0,039	88,98	1,11	2,11	0,8
60	3,60	0,62	0,036	88,91	1,04	2,00	0,9
80	3,23	0,55	0,034	89,56	1,00	1,79	1,1
110	2,77	0,46	0,028	90,35	0,98	1,62	1,3
140	2,39	0,38	0,025	90,58	0,93	1,49	1,4
177	2,00	0,32	0,019	91,20	0,91	1,35	1,6

Таблица 2. Результаты производственных испытаний процесса электродиализа оттока утфеля II кристаллизации и расчётные показатели

Время, мин.	Электропроводимость, мСм/см	Зола кондуктометрическая, % к массе продукта	СаО, % к массе продукта	Чистота, %	Мелассообразующий коэффициент (m)	Сахар в мелассе, % к массе свёклы	Резерв сахара, % к массе продукта
0	9,89	1,71	0,110	76,95	1,28	6,16	0,0
10	8,89	1,45	0,102	78,18	1,32	5,94	0,6
20	8,04	1,19	0,088	78,89	1,25	5,40	1,0
30	7,30	1,15	0,082	79,13	1,23	5,22	1,1
50	6,15	1,00	0,076	80,24	1,13	4,48	1,6
70	5,28	0,88	0,069	80,88	1,08	4,12	1,9
90	4,63	0,78	0,062	81,00	1,03	3,87	2,0
120	3,38	0,65	0,054	82,21	0,96	3,34	2,5
150	3,28	0,54	0,045	83,04	0,89	2,93	2,9
180	2,81	0,44	0,039	84,00	0,83	2,54	3,3
240	2,13	0,33	0,022	84,35	0,74	2,21	3,4
254	2,01	0,30	0,019	84,37	0,73	2,17	3,4

ных показателей осуществляли по уравнениям классического метода П.М. Силина [1].

Обработка сиропа в смеси с очищенным соком (см. табл. 1) при заданных условиях позволяет дополнительно получить 1,4–1,6 % сахара к массе обрабатываемого продукта. Объём партии на обработку для одной установки составляет 7 м³. Следовательно, электро-мембранная обработка одной партии смеси сиропа с очищенным соком позволяет дополнительно получить 114 кг сахара.

Обработка разбавленного оттока II кристаллизации (см. табл. 2) при заданных условиях позволяет дополнительно получить 3,6 % сахара к массе обрабатываемого продукта. При объёме партии на обработку 7 м³ это составит 287 кг сахара. Но процесс протекает достаточно длительно.

Эффективность работы установки зависит от числа проведённых обработок полупродукта за сутки, а значит, от продолжительности обработки. Изменение показателей удельной электропроводимости и мелассообразующего коэффициента в процессе обработки смеси сиропа и очищенного сока представлено на рис. 1, разбавленного оттока утфеля II кристаллизации – на рис. 2.

Полученные в ходе исследования данные (см. рис. 1) позволяют сделать вывод об отсутствии технологической необходимости проводить обработку до полной деминерализации раствора, так как скорость изменения коэффициента мелассообразования замедляется по ходу процесса деминерализации, что делает обязательным поиск рациональной степени деминерализации, обеспечивающей максимальное удаление мелассообразователей за производственный цикл (например, сутки).

Установлено заметное снижение скорости изменения электропро-

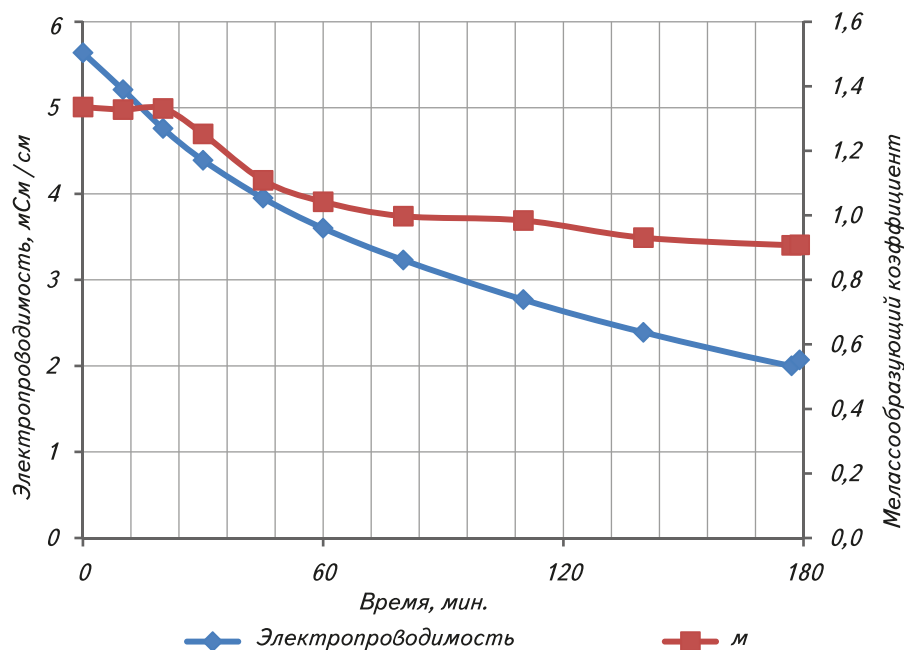


Рис. 1. Изменение показателей удельной электропроводимости и мелассообразующего коэффициента в процессе обработки смеси сиропа и очищенного сока

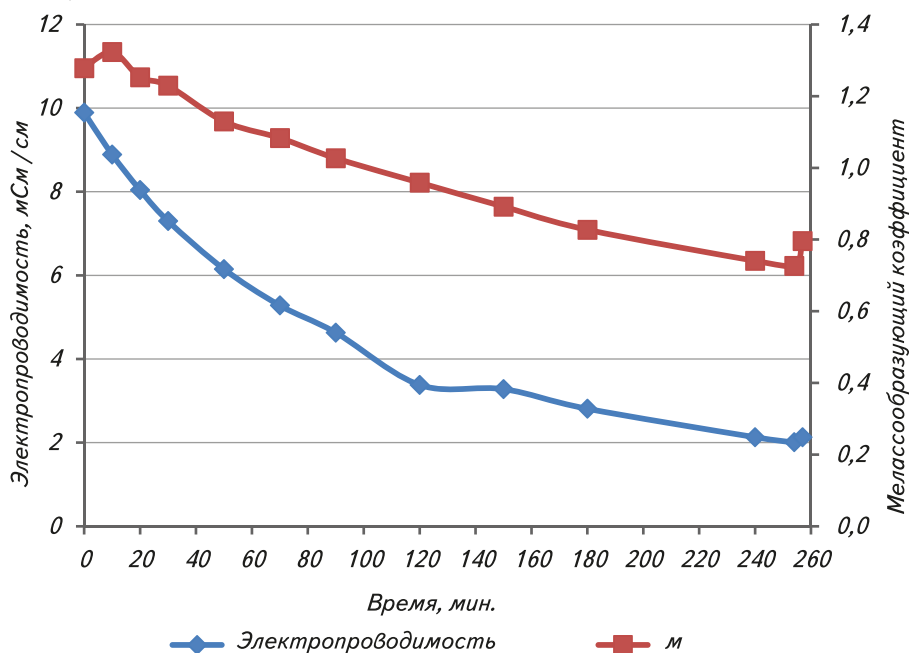


Рис. 2. Изменение показателей удельной электропроводимости и мелассообразующего коэффициента в процессе обработки разбавленного оттока утфеля II кристаллизации

водимости после 120-й минуты работы (см. рис. 2), следовательно, обессоливание раствора замедляется. Можно предположить, что эффективнее провести две обработки за данный промежуток

времени, чем одну, но с большей деминерализацией.

Изменение резерва получения сахара и удельной электропроводимости в течение электро-мембранной обработки смеси сиропа

с очищенным соком представлено на рис. 3, разбавленного оттока II кристаллизации – на рис. 4. Резерв получения сахара к концу процесса прирастает менее активно, поэтому длительность операции целесообразно регулировать исходя из экономических соображений, корректируя производительность установки по удаляемым мелассообразователям с учётом времени на переключение и санитарную обработку. По данным графикам можно рассчитать конечную удельную электропроводимость, удовлетворяющую конкретной поставленной цели: получить больше сахара или сократить длительность процесса.

Установлено, что электромембранная обработка разбавленного оттока II кристаллизации протекает достаточно длительно: при производственных испытаниях длительность процесса деминерализации составила 254 минуты (см. табл. 2). На основании полученных данных можно предположить, что эффективнее провести несколько обработок за данный промежуток времени, чем обеспечить полную деминерализацию раствора.

Экспериментально установлено, что после 180 минут обработки резерв получения сахара практически не увеличивается (см. рис. 4), следовательно, дальнейшая обработка раствора нецелесообразна. Значение конечной удельной электропроводимости при этом находится в точке $3 \pm 0,2$ мСм/см. Однако резерв получения сахара уже через 90 минут электромембранной обработки сахарного раствора достигает 2 % к массе продукта, что делает обработку технологически эффективной уже при её завершении в точке $5 \pm 0,2$ мСм/см. В этом случае длительность процесса сокращается втрое, а количество дополнительно получаемого сахара составляет 160 кг.

Из указанного следует, что время одной полной обработ-

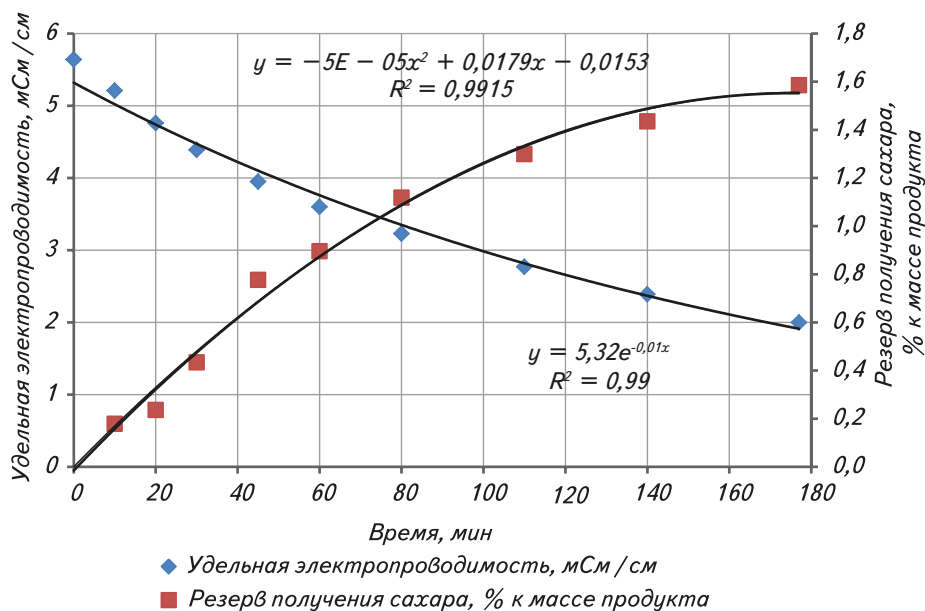


Рис. 3. Изменение резерва получения сахара и удельной электропроводимости в течение электромембранной обработки смеси сиропа с очищенным соком

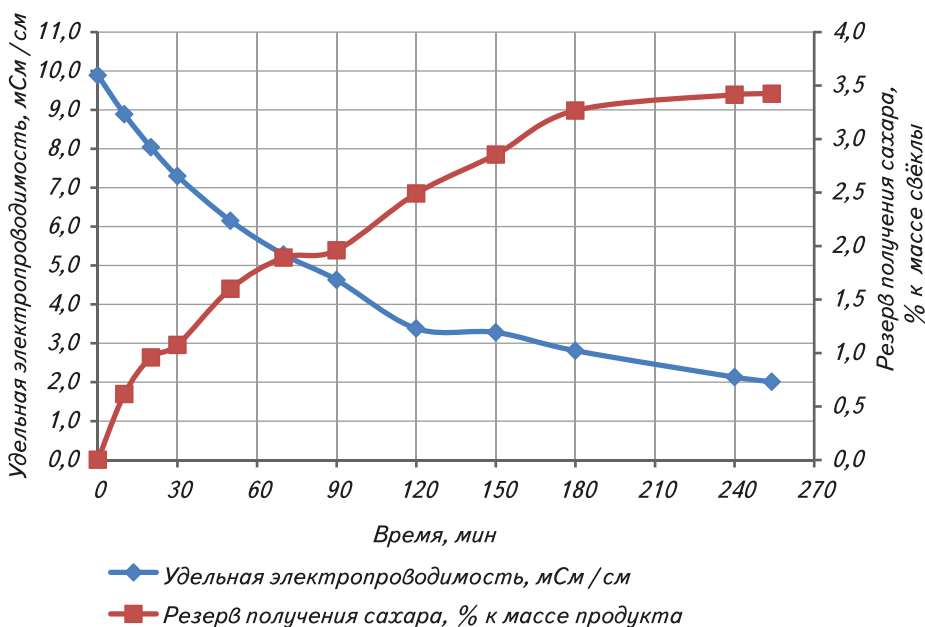


Рис. 4. Изменение резерва получения сахара и удельной электропроводимости в течение электромембранной обработки разбавленного оттока II кристаллизации

ки оттока до 2 мСм/см соответствует времени трёх обработок до $5 \pm 0,2$ мСм/см. Таким образом, вместо 287 кг сахара можно дополнительно получить 480 кг, т. е. в 1,7 раз больше. Однако оценочный расчёт приведён без учёта затрат времени на подготовительные операции.

Оценка эффективности применения электромембранной обработки густых полупродуктов на предприятии ОАО «Городейский сахарный комбинат»

В сезон переработки сахарной свёклы урожая 2020 г. электродиализное оборудование ОАО «Городейский сахарный комбинат»

эксплуатировалось в режиме обработки разбавленного очищенным соком сиропа до $2 \pm 0,2$ мСм/см.

В начале производственного сезона процесс деминерализации вели до конечной удельной электропроводимости обрабатываемых продуктов 2,0 мСм/см. К концу сезона длительность процесса до заданной конечной точки увеличилась до 297 минут, что было вызвано ухудшением качества исходного сырья, а именно повышением зольности. В начале сезона средняя удельная электропроводимость исходного сырья составляла 3,89 мСм/см, однако, постепенно изменяясь, к концу сезона средний показатель составил 5,84 мСм/см. В ходе производственных испытаний изменили конечную точку обработки партии с 2,0 до 2,5 мСм/см, что позволило сократить длительность процесса, при этом уменьшение резерва получения сахара составило около 0,2 % к массе свёклы (см. рис. 3).

Завершение процесса деминерализации смеси сиропа с очищенным соком при удельной электропроводимости 2,5 мСм/см в конце производственного сезона позволило снизить максимальную дли-

тельность процесса деминерализации на 35 %.

В сезон переработки сахарной свёклы урожая 2021 г. электродиализное оборудование ОАО «Городейский сахарный комбинат» эксплуатировалось в режиме обработки разбавленного оттока II кристаллизации до $7 \pm 0,2$ мСм/см.

Для получения данных о фактических пределах изменения содержания катионов и расчёта резерва сахара в ОАО «Городейский сахарный комбинат» с производства отбирались и исследовались пробы оттока в разных точках процесса электродиализа, а также были проведены производственные испытания при ведении деминерализации оттока утфеля II кристаллизации до 5 мСм/см (рекомендуемое значение) (табл. 3). Как следует из таблицы, при использовании электродиализа для деминерализации оттока утфеля II кристаллизации соли кальция снижаются на 17,5–62,5 %, мелассообразующий коэффициент — на 10,2–40,5 %, содержание золы — на 37,3–67,1 %, а резерв сахара составляет 1,6–5,5 % к массе обрабатываемого продукта, или 128–439 кг с партии оттока. При ведении процесса

до 9 мСм/см наблюдается низкая степень очистки полупродукта. Наиболее эффективным с технологической точки зрения является ведение процесса до 5 мСм/см: на 13 % удаляется больше несахаров, на 20 % — больше золы, на 29 % — солей кальция по сравнению с обработкой до 7 мСм/см. При этом мелассообразующий коэффициент снижается дополнительно на 7 %, а резерв сахара повышается на 24 %, однако длительность процесса увеличивается вдвое, что в итоге ухудшает экономические показатели работы установки в рамках производственного цикла. Поэтому подбор конечной точки обработки оттока утфеля II кристаллизации необходимо регулировать в зависимости от длительности процесса, которая зависит в основном от физического износа ионообменных мембран.

Сравнение показателей эффективности работы электродиализной установки, эксплуатируемой на предприятии ОАО «Городейский сахарный комбинат», по схемам работы с оттоком утфеля II кристаллизации и разбавленным очищенным соком сиропом приведено в табл. 4.

Таблица 3. Результаты производственных испытаний процесса электродиализа оттока утфеля II кристаллизации и расчётные показатели

Номер опыта	Время, мин.	Удельная электропроводимость, мСм/см	Зола кондуктометрическая, % к массе продукта	СаО, % к массе продукта	Чистота, %	Мелассообразующий коэффициент (m)	Резерв сахара, % к массе продукта
Опыт 1	0	13,1	3,35	0,063	74,09	1,08	0,0
	216	9,1	2,10	0,052	77,46	0,97	1,6
Изменение показателя		4,0	1,25	0,011	+3,36	0,11	1,6
Опыт 2	0	13,4	2,58	0,095	74,32	1,00	0,0
	311	7,0	0,85	0,045	78,19	0,81	2,0
Изменение показателя		6,4	1,73	0,050	+3,87	0,18	2,0
Опыт 3	0	14,0	2,75	0,070	74,37	1,45	0,0
	425	7,0	0,97	0,027	78,77	1,12	3,4
Изменение показателя		7,0	1,78	0,043	+4,40	0,34	3,4
Опыт 4	0	13,2	4,34	0,048	71,73	1,48	0,0
	1000	5,0	1,50	0,018	78,19	0,93	5,5
Изменение показателя		8,2	2,84	0,030	+6,46	0,55	5,5

Таблица 4. Сравнение технологических схем электромембранной обработки

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

Заключение

Таким образом, при существующих на предприятии ОАО «Городейский сахарный комбинат» мощностях электромембранного оборудования наиболее целесообразно с технологической точки зрения и наиболее выгодно экономически использовать схему с обработкой разбавленного очищенного соком сиропа. Данная схема позволяет разгрузить продуктовое отделение завода, повысить выход сахара за счёт снижения его потерь с мелассой на 0,035 % к массе свёклы, снизить количество мелассы на 0,083 % к массе свёклы.

Менее успешная реализация усовершенствованной технологии на оттоке утфеля II кристаллизации с целью увеличения его чистоты и возвращения в технологический поток определяется не только высокой длительностью процесса и меньшим экономическим эффектом, но и рециркуляцией сахара и несахаров в производстве. При этом возможным вариантом применения данной схемы можно рассмотреть дальнейший вывод дилуата из производства в качестве высокопитательной добавки в корм, в том числе с повышенным содержанием бетаина.

Схемы с электромембранной обработкой очищенного диффузионного сока являются весьма перспективными и экономически целесообразными, но требуют для реализации частичной или полной модернизации сокоочистительного отделения предприятия ОАО «Городейский сахарный комбинат» и обработки всего объёма сока.

Кроме дальнейшей оптимизации процесса электродиализа и повышения эффективности производства сахара за счёт повышения чистоты продуктов и сни-

жения потерь с мелассой перспективным является использование электродиализной установки для расширения ассортимента предприятия и создания инновационной продукции.

Список литературы

1. Методы оценки технологических качеств сахарной свёклы с использованием показателей содержания калия, натрия и α -аминного азота, определённых в свёкле и продуктах её переработки / В.Н. Кухар, А.П. Чернявский, Л.И. Чернявская, Ю.А. Моканюк // Сахар. — 2019. — № 1. — С. 18–36.
2. Никулина, О.К. Очистка диффузионного сока с применением электродиализа / О.К. Никулина, О.В. Дымар // Сахар. — 2021. — № 3. — С. 32–36.
3. Применение электродиализа для очистки диффузионного сока в сахарном производстве / О.К. Никулина, О.В. Колоскова, М.Р. Яковлева, О.В. Дымар // Пищевая промышленность: наука и технологии. — 2021. — Т. 14. — № 3(53). — С. 51–61.
4. Усовершенствовать технологию получения белого сахара с использованием электродиализа для деминерализации полупродуктов сахарного производства : отчёт о НИОТР (заключ.) / Науч.-практ. центр Нац. акад. наук Беларуси по продовольствию; рук. О.К. Никулина. — Минск, 2021. — 254 с. — № ГР 20193042.
5. Физико-химические процессы сахарного производства / И.С. Гулый, В.М. Лысанский, Л.П. Рева [и др.]. — М. : Агропромиздат, 1987. — 264 с.

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос о возможности применения электромембранных процессов для очистки густых полупродуктов свеклосахарного производства. Представлены данные производственных испытаний процесса деминерализации густых сахарных полупродуктов при помощи электродиализа. Приведены оценка эффективности применения электромембранной обработки густых полупродуктов и сравнение схем работы с оттоком утфеля II кристаллизации и смеси сиропа с очищенным соком для электродиализной установки, эксплуатируемой на предприятии ОАО «Городейский сахарный комбинат».

Ключевые слова: электродиализ, электромембранные технологии, отток утфеля II кристаллизации, сироп, меласообразующий коэффициент.

Summary. The question of the application of electromembrane processes for the purification of thick semi-products of sugar beet production is discussed in the article. The data of production testing of the processes of demineralization of thick semi-products by means of electrodialysis are given. An assessment of the effectiveness of the using of electromembrane treatment of thick semi-products and a comparison of working schemes with an effluent of massecuite II crystallization and mixture of purified juice and syrup on the electrodialysis equipment installed at JSC «Gorodeya Sugar Factory» are presented.

Keywords: electrodialysis, electromembrane technologies, an effluent of massecuite II crystallization, syrup, molasses forming coefficient.