

# Применение комбинации баро- и электромембранных методов обработки для очистки диффузионного сока<sup>S</sup>

**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

Одной из проблем при производстве сахара является накипеобразование на поверхности нагрева выпарных аппаратов. Оно приводит к снижению производительности выпарного оборудования, увеличению расхода топлива и продолжительности уваривания utfелей, повышению неучтённых потерь сахарозы от термического разложения и цветности продуктов, ухудшению качества готового продукта [9]. 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]. Наличие значительного количества имеющих высокий мелассообразующий коэффициент щелочных металлов К и Na повышает содержание сахара в мелассе и, следовательно, снижает выход целевого продукта.

Применение флокулянтов и ингибиторов накипеобразования на стадии очистки соков отрицательно влияет на фильтрование

сиропов и ухудшает показатели качества сахара. Альтернативой является декальцинация (умягчение) сока II сатурации, которая решает сразу две задачи: предотвращает накипеобразование при выпаривании и снижает мутность белого сахара. Одним из способов декальцинации сока является применение ионного обмена по схеме NRS-процесса. Он основан на обмене ионов кальция и магния на ионы натрия с использованием ионообменных смол в натриевой форме [7]. Но это приводит к увеличению количества мелассы. Помимо того, несмотря на высокие технологические показатели данной обработки, метод полной деминерализации сока далеко не всегда экономически выгоден в силу высокой стоимости ионитов, большого расхода регенерирующих растворов, сбросов в окружающую среду агрессивных растворов и др.

Исходя из вышесказанного, применение безреагентного способа деионизации — электродиализа — позволит увеличить экономическую эффективность за счёт ограниченного использования химических реагентов, повышения

выхода готового продукта и увеличения относительного содержания бетаина в мелассе.

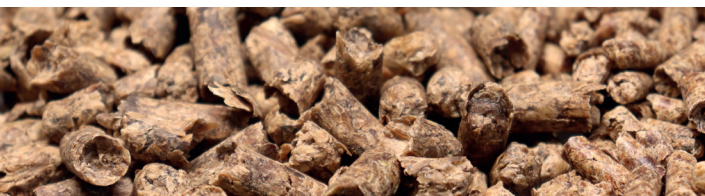
## Оценка перспектив применения электроионообменных технологий в производстве сахара

Электродиализная очистка может быть включена в классическую технологию производства сахара на следующих этапах производства: для дополнительной очистки сока II сатурации, полусиропа после III корпуса выпарной станции; для обработки клеровки I оттока utfеля I кристаллизации и даже клеровки мелассы. С технологической точки зрения целесообразнее удалять несакхара в начале технологического процесса, т. е. проводить электродиализную очистку сока после его предварительной очистки, что интенсифицирует работу выпарной установки и продуктового отделения сахарного завода.

Примерно с середины 80-х гг. прошлого века широкое распространение получили ионообменные технологии. Их используют в самых разнообразных целях:

— с помощью ионитов удаляют соли кальция из соков перед их

<sup>S</sup> Выбор спонсора научных публикаций осуществляется по усмотрению редакции, любая взаимосвязь между видами деятельности спонсора и результатами научной работы исключается



выпариванием для предотвращения накипеобразования;

- осуществляют очистку от ионогенных несахаров, подвергая деионизации соки и концентрированные растворы;

- снижают содержание сахара в мелассе путём замены щелочных катионов на катионы магния и кальция в концентрированных растворах;

- удаляют красящие вещества из соков или сиропов;

- дополнительно извлекают сахар из мелассы с помощью её деионизации или хроматографического разделения [8].

Комбинированные схемы, сочетающие известково-углекислотную очистку сока с дальнейшей его обработкой ионообменными смолами, позволяют значительно увеличить эффект очистки сока, но имеют определённые недостатки:

- высокий расход реагентов;

- необходимость частых регенераций ионитов, после которых образуется большое количество агрессивных сточных вод [8].

Существуют также способы очистки диффузионного сока с использованием ионообменных процессов совместно с мембранными (см. Патент РФ № 2016637 С1, 30.07.1994; Патент РФ № 2260056 С2, 15.08.2000; Патент РФ № 2114177 С1, 27.06.1998). К недостаткам указанных способов следует отнести сложный этап предварительной подготовки сока и сиропа, внесение химических соединений (кислоты или соли поливалентных металлов) для осаждения белков и коллоидов, недостаточную чистоту сока после отделения осадка белков и коллоидов фильтрованием или центрифугированием, а также необходимость утилизации концентрата после ультрафильтрации, стоков после ионообмена и фильтрации с сорбентом.

Электродиализная очистка диффузионного сока с помощью

ионообменных мембран является более экологичным способом решения задачи, позволяющим увеличить выход сахара путём дополнительной его очистки. При этом используется доступный вид энергии – электрическая, не образуется очень большое количество сточных вод с реагентами, необходимыми для восстановления ионообменной ёмкости колонн.

Процесс электродиализа основан на селективном прохождении ионов через мембраны в электрическом поле. На пути движения ионов устанавливаются ионообменные мембраны: катионная и анионная, пропускающие только один вид ионов, а сахароза, являясь электронейтральным веществом, остаётся в растворе. Так происходит удаление солей из обрабатываемого раствора и за счёт этого – его очистка. Диффузионный сок сахарного производства, очищенный традиционным известково-углекислотным способом, содержит несахара, являющиеся в большинстве своём электролитами, способными мигрировать в электрическом поле. К тому же применение электродиализа в технологии сахарного производства способствует созданию малоотходной технологии [2].

#### **Способ концентрирования диффузионного сока**

Так как для электромембранной обработки эффективнее применять продукты с более высокой концентрацией сухих веществ (30–50 % СВ), а очищенный диффузионный сок содержит их менее 20 %, целесообразно его предварительно концентрировать. Развитие баромембранных технологий позволяет использовать для этого обратный осмос.

Нами проведён эксперимент с целью определения возможности и предварительной оценки пределов применимости обратного ос-

моса для концентрирования диффузионного сока свеклосахарного производства после его очистки.

Для исследований использовали мембрану RO 3838/30 FF DOW со следующими характеристиками: площадь мембраны – 7,5 м<sup>2</sup>, предельное рабочее давление на мембрану – 5,5 МПа, допустимая температура работы 50 °С.

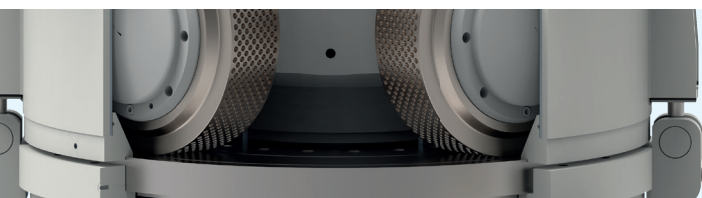
Характеристики использованного для концентрирования очищенного диффузионного сока: содержание сухих веществ – 17,0 %, удельная электропроводимость – 4,45 мСм/см, рН – 8,95, температура – 45–47 °С. Рабочий поток сока над мембраной составлял 5,9 м<sup>3</sup>/ч.

Для установления предельных концентраций сухих веществ сока при давлении фильтрования, создаваемом в условиях проведения эксперимента, сок разбавляли водой, фиксировали предельное давление фильтрования для каждой концентрации и время фильтрования (табл. 1, рис. 1). По полученным результатам методом экстраполяции были рассчитаны пределы концентрирования очищенного диффузионного сока в зависимости от используемого давления, а также проведена оценка количества пермеата (табл. 2).

По результатам эксперимента можно сделать следующие выводы:

- концентрирование очищенного диффузионного сока сахарного производства при помощи обратного осмоса возможно при давлениях существенно более высоких, чем стандартно применяемые в молочной промышленности;

- в качестве опытного образца целесообразно использовать осмотическую систему для опреснения морской воды с давлениями до 12,0 МПа. Мембраны рационально подбирать с наибольшей доступной рабочей температурой, так как температура диффузион-



**Таблица 1.** Производительность мембраны в зависимости от содержания сухих веществ и соответствующего им предельного давления концентрирования

Давление, МПа	Сухие вещества, %	Предельное давление, МПа	Объём пермеата, л	Время, с	Производительность мембраны, л/ч×м <sup>2</sup>	Дельта давлений, МПа
1,60	13,35	1,60	0,5	124,0	1,94	0,00
2,00	13,35	1,60	0,5	34,5	6,96	0,40
2,00	14,90	1,82	0,5	55,0	4,36	0,18
2,00	16,20	2,00	0,5	119,0	2,02	0,00
1,40	12,00	1,40	0,5	132,0	1,82	0,00

ного сока на различных этапах очистки может превышать 90 °С.

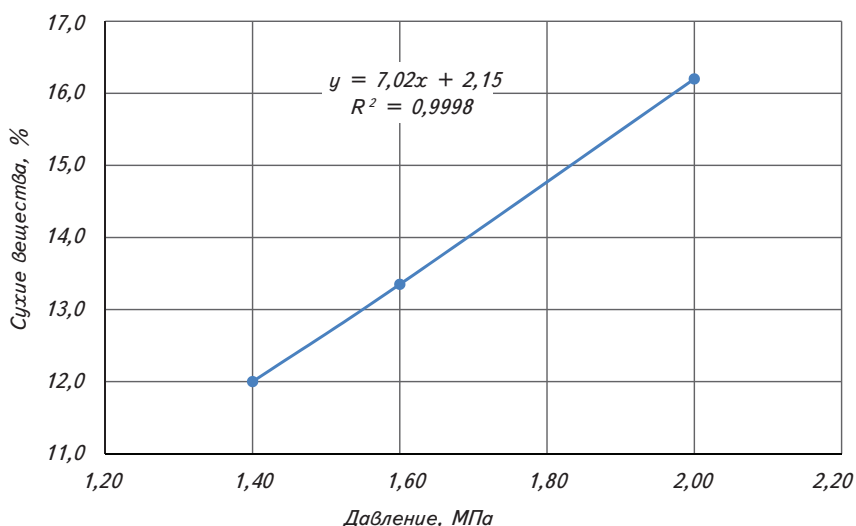
Основным параметром, определяющим производительность РО-мембраны, является превышение рабочего давления в контуре над предельным давлением — осмотическим давлением обрабатываемого продукта при данной концентрации.

#### Способ очистки диффузионного сока

Нами были проведены лабораторные исследования, а также модельные и производственные испытания по применению электродиализа для очистки полупродуктов сахарного производства

в рамках ОНТП «Пищевые технологии» на базе ОАО «Городейский сахарный комбинат», где с 2019 г. в промышленном режиме эксплуатируется электродиализное оборудование компании MEGA a.s.

Было установлено [5, 6], что из полупродуктов сахарного производства катионы калия удаляются на 94,4–98,5 %. Из сока I сатурации катионы кальция удаляются на 93,6 %, что сравнимо с эффектом от проведения II сатурации. Содержание катионов кальция в очищенном соке при использовании электродиализа снижается на 66,7 %. В процессе электродиализа повышается чистота очищенного сока на 4,1 процентных пункта


**Рис. 1.** Экспериментальная зависимость предела концентрирования от давления обратного осмоса

**Таблица 2.** Экстраполяция предела концентрирования и оценка количества пермеата

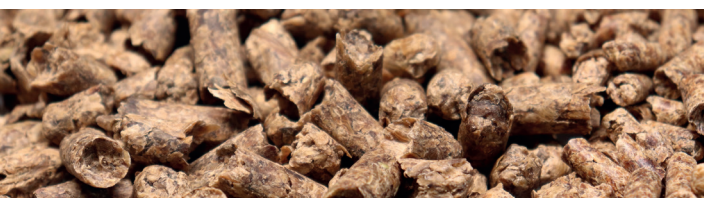
Давление, МПа	Сухие вещества сока, %	Масса сока/концентрата, кг	Масса пермеата, кг
2,10	16,9	1000	—
2,20	17,6	966,5	33,5
2,30	18,3	929,4	70,6
2,40	19,0	895,1	104,9
2,50	19,7	863,2	136,8
3,00	23,2	732,6	267,4
3,50	26,7	636,4	363,6
4,00	30,2	562,5	437,5
4,50	33,7	504,0	496,0
5,00	37,2	456,5	543,5
5,50	40,7	417,2	582,8
6,00	44,3	384,1	615,9
6,50	47,8	355,9	644,1
7,00	51,3	331,5	668,5
7,50	54,8	310,3	689,7
8,00	58,3	291,6	708,4
10,00	72,3	235,0	765,0
12,00	86,4	196,8	803,2

\* зелёный — технически достижимо для стандартных установок обратного осмоса молочной промышленности;

\*\* жёлтый — технически достижимо для данного типа мембран;

\*\*\* красный и до 12,0 МПа — является рабочим для систем опреснения морской воды.

и сока I сатурации — на 5,2 процентных пункта, происходит снижение содержания солей кальция и α-аминного азота в соке I сатурации на 93,5 и 95,8 % соответственно и в меньшей степени в очищенном соке — на 76,5 и 43,8 %. Произведённые расчёты прогнозных показателей и расчёт материальных потоков сахарного производства подтвердили, что схема с применением электродиализа сока I сатурации позволяет снизить расход извести и сатурационного газа по



сравнению с традиционной схемой очистки диффузионного сока.

Рациональным технологическим критерием завершения процесса электромембранной обработки сока I сатурации может являться уровень pH не ниже 9,0 [3]. При этом можно достичь: снижения зольности сока на 95 % и повышения его чистоты до 96 %; минимума солей кальция и удаления из сока мелассообразующих минералов (калия и натрия); снижения цветности сока на 19,3–28,4 % и его мутности на 34,8 %. Кроме того, можно исключить из схемы очистки диффузионного сока II сатурацию, дополнительную дефекацию и сульфитацию, снизив при этом выход условной мелассы на 2,7–3,1 % к массе свёклы и содержание сахара в ней на 1,2–1,4 % к массе свёклы.

На основании полученных данных был разработан способ очистки диффузионного сока [4], который осуществляется следующим образом. Диффузионный сок подвергается прогрессивной предварительной дефекации в многосекционном преддефекаторе. Основную дефекацию проводят сразу после преддефекации без промежуточного фильтрования в две ступени. Продолжительность тёплой дефекации 20 мин, горячей – 10 мин. Дефекованный сок, содержащий гидроксид кальция в растворе и осадке и коагулят, направляют на первую сатурацию, где его обрабатывают сатурационным газом. В результате реакции гидроксида кальция с диоксидом углерода образуются кристаллы  $\text{CaCO}_3$ , которые выпадают в осадок. Затем сок фильтруется, через охладитель-рекуператор охлаждается до 40–45 °С и направляется на электродиализную обработку. Электродиализную очистку проводят до pH сока 9,0–9,5.

После электродиализной очистки сок либо сушат до 60–75 %

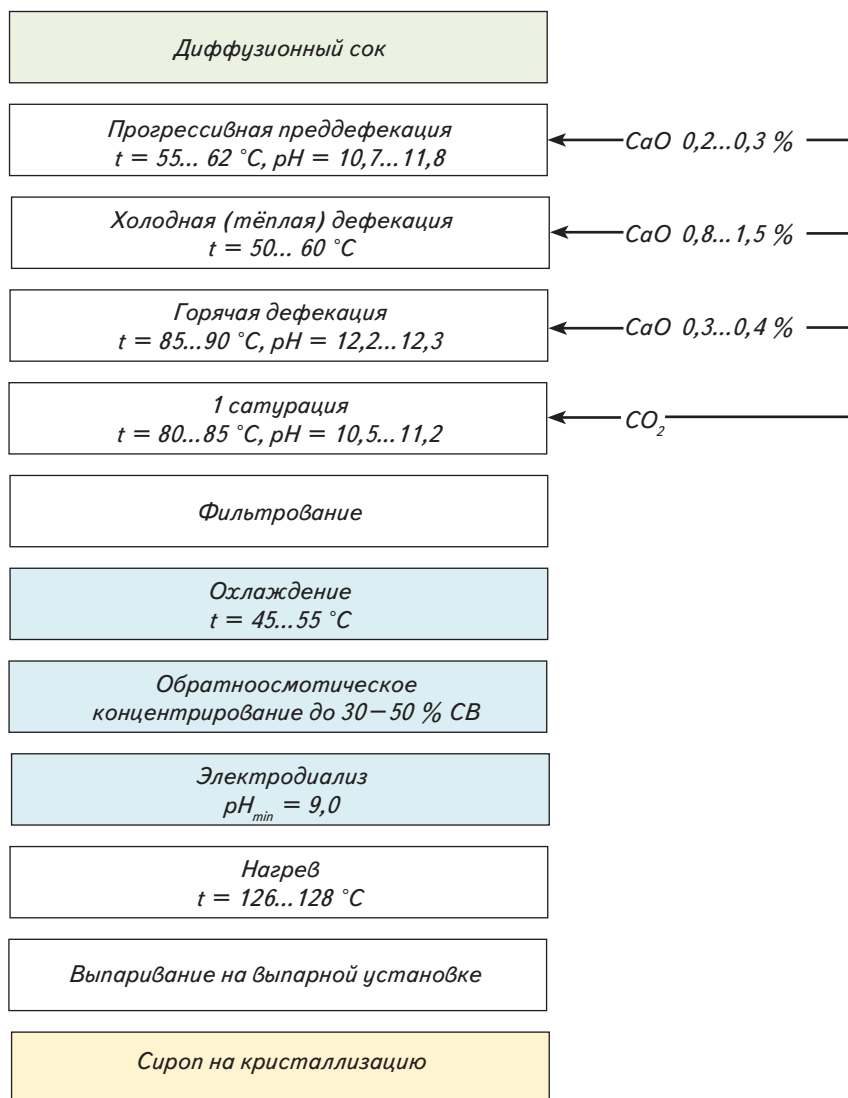


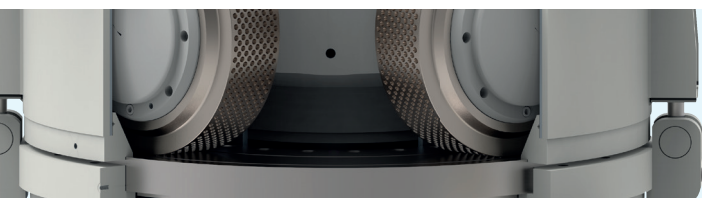
Рис. 2. Технологическая схема очистки диффузионного сока

сухих веществ и направляют на стадию уваривания утфеля I кристаллизации, либо вводят на стадию приготовления клеровки сахаров II и III кристаллизации.

Проведение сокоочистки по предложенной технологической схеме позволяет увеличить выход сахара на 1,05 % к массе свёклы, снизить цветность сока на 19,3–

Таблица 3. Показатели диффузионного сока после очистки

Показатель очищенного сока	Значение показателя	
	Традиционный способ	Предложенный способ
Чистота, %	92,53	96,83
НСХ, % к массе сока	1,30	0,52
Соли кальция, % к массе сока	0,065	0,005
Калий, % к массе сока	0,100	0,005
Натрий, % к массе сока	0,016	0,002



28,4 % и снизить расход известнякового камня на очистку сока на 0,7 % к массе свёклы [4, 5].

#### Заключение

Установлена практическая возможность применения обратного осмоса для концентрирования диффузионного сока перед его электромембранной деминерализацией. Теоретически показана возможность осуществлять концентрирование сока до 60 % сухих веществ и выше.

Обосновано, что при применении электродиализа можно исключить из схемы очистки диффузионного сока II сатурацию, дополнительную дефекацию и сульфитацию, при этом повысить чистоту сока перед выпариванием более чем на 4 единицы с 92,5 до 96,8 % за счёт удаления мелассообразующих элементов, что позволяет увеличить выход сахара на 1,05 % к массе свёклы (табл. 3).

Предлагаемая технологическая схема очистки диффузионного сока представлена на рис. 2.

Использование новой схемы очистки диффузионного сока позволяет достичь эффекта декальцинации, снизить содержание мелассообразователей, разгрузить выпарную установку. Комбинация процессов из обратноосмотического концентрирования и электромембранной обработки может применяться как на промежуточной, так и на завершающей стадии очистки диффузионного сока по классической технологии.

#### Список литературы

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. Бугаен-

ко. – М.: Международная сахарная компания, 2002. – 357 с.

3. Коррекция минерального состава полупродуктов сахарного производства с использованием электродиализа / О.К. Никулина, М.Р. Яковлева, О.В. Колоскова, О.В. Дымар // Пищевая промышленность: наука и технологии. – 2020. – Т. 13. – № 2 (48). – С. 27–35.

4. Никулина, О.К. Технология получения сахара с использованием биологически активных препаратов при хранении свёклы и электромембранной очистки сока: специальность 05.18.05 «Технология сахара и сахаристых продуктов, чая, табака и субтропических культур»: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Оксана Константиновна Никулина; РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию». – Минск, 2021. – 22 с.

5. Никулина, О.К. Очистка диффузионного сока с применением

электродиализа / О.К. Никулина, О.В. Дымар // Сахар. – 2021. – № 3. – С. 32–36.

6. 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.

7. Повышение качества свекловичного сахара до экспортного уровня / С.М. Петров, Н.М. Подгорнова, В.И. Тужилкин, С.Л. Филатов // Сахар. – 2017. – № 5. – С. 30–33.

8. Поворов, А.А. Мембранная технология в сахарной промышленности / А.А. Поворов, Р.Г. Давыдова, Ю.В. Фомин // Сахар. – 2003. – № 1. – С. 36–43.

9. Савостин, А.В. Эффективность антинакипинов при выпаривании соков свеклосахарного производства / А.В. Савостин, В.О. Городецкий // Сахар. – 2014. – № 10. – С. 47–50.

**Аннотация.** В статье рассмотрен вопрос возможности комбинирования электромембранных и баромембранных процессов для очистки диффузионного сока свеклосахарного производства. Приведены данные эксперимента по оценке пределов применимости обратного осмоса для концентрирования очищенного диффузионного сока свеклосахарного производства. Представлены результаты научно-производственных испытаний, подтверждающие эффективность применения электродиализа для очистки диффузионного сока различной степени очистки. Предложена технологическая схема очистки диффузионного сока, включающая комбинацию процессов обратноосмотического концентрирования и электромембранной обработки, которая позволяет достичь эффекта декальцинации, снизить содержание мелассообразователей, разгрузить выпарную установку.

**Ключевые слова:** очистка диффузионного сока, электродиализ, обратный осмос, электромембранные технологии, баромембранные технологии.

**Summary.** The possibility of combining electromembrane and baromembrane processes for the purification of diffusion juice of sugar beet production is discussing in article.

The experimental data concerning the evaluation of the limits of applicability of reverse osmosis for the concentration of purified diffusion juice of sugar beet production are presented. The data of scientific and production experiments confirming the effectiveness of the use of electrodiolysis for the purification of diffusion juice of various degrees of purification are presented. A technological scheme for the purification of diffusion juice is proposed. It includes a combination of processes from reverse osmotic concentration and electromembrane treatment and allows to achieve the effect of decalcification, to reduce the content of molasses forming agents and to reduce the load on the evaporation plant.

**Keywords:** diffusion juice purification, electrodiolysis, reverse osmosis, electromembrane technologies, baromembrane technologies.

