

# Способ мембранно-ферментативной очистки диффузионного сока с использованием cross flow ультрафильтрации и упрощённой дефекосатурации\*

С.Л. ФИЛАТОВ<sup>1</sup>, С.М. ПЕТРОВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф. (e-mail: petrovsm@mail.ru), Н.М. ПОДГОРНОВА<sup>2</sup>, д-р техн. наук, проф., М.С. МИХАЙЛИЧЕНКО<sup>1</sup>, В.М. ДУМЧЕНКОВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ООО «НТ-Пром»

<sup>2</sup> ФГБОУ ВО «Московский государственный университет технологий и управления имени К.Г. Разумовского» (ПКУ)

## Введение

В процессе производства сахара из свёклы происходит удаление несахаров из диффузионного сока, которое традиционно осуществляют в ходе его известково-углекислотной очистки (ИУО) с последующим отделением осадка. Однако эти операции сопряжены с высокими затратами энергии и приводят к загрязнению окружающей среды газовыми выбросами и твёрдыми отходами, которые необходимо максимально элиминировать. В качестве альтернативной технологии ИУО проводятся исследования новых методов удаления несахаров с использованием мембранной технологии (МТ) [2, 3, 6, 8–10, 12, 13, 16]. Исследования, проведённые на различных этапах сахарного производства, имеют большие перспективы снижения или устранения химического осветления и улучшения качества конечного продукта [9]. Однако такие исследования находятся ещё на начальной стадии, в то время как в других пищевых отраслях они уже достаточно распространены и имеют большие теоретические и практические разработки [4, 6, 15].

**Цель работы** – оценка существующего развития техники cross flow ультрафильтрации диффузионного сока на керамических мембранах и поиск способов повышения эффективности промышленного применения мембранных методов разделения.

В результате проведённых оценок промышленной применимости МТ [9–13] показано, что масштабное изменение существующей технологии ИУО требует больших инвестиций. В связи с этим экономически наиболее эффективно найти такие способы использования мембранных методов разделения дисперсных систем, которые могли бы изменить некоторые этапы очистки диффузионного сока или сиропа и при этом могли быть интегрированы в существующий технологический процесс производства сахара.

## Существующий уровень технических решений

Известны различные варианты технологического процесса сахарного производства, в которых микрофильтрация (МФ) и ультрафильтрация (УФ) играют важную роль в удалении коллоидных

и красящих веществ из экстрагированного сока. Белый сахар как конечный продукт должен соответствовать строгому требованию к качеству, поэтому общая тенденция заключается в том, чтобы сироп, из которого выкристаллизуется сахароза, должен иметь такой же максимально низкий уровень содержания красящих веществ, как и непосредственно вырабатываемые кристаллы. Установлено, что процесс кристаллизации сахара в сиропах из ультрафильтрованных соков протекает в 1,2 раза быстрее, чем из соков, традиционно очищенных. Повышенная скорость кристаллизации, очевидно, является следствием лучшего выделения несахаров и снижения вязкости сока в процессе УФ-обработки [10].

Переработка сахара – одно из самых энергоёмких производств в пищевой промышленности, поэтому процессы мембранного разделения, по-видимому, найдут в нём применение при повышении энергетической эффективности технологий. С другой стороны, существуют некоторые ограничения для применения процессов мембранного разделения в сахарном производстве по сравнению с другими отраслями пищевой промышленности, так как перекачиваются значительные объёмы

\* Авторы выражают благодарность сотрудникам института биохимии им. А.Н. Баха РАН за предоставленные образцы ферментных препаратов и содействие в их испытаниях при очистке диффузионного сока.

свеклосахарных растворов, обладающих высокой вязкостью и высоким осмотическим давлением [12].

В работе [13] описаны экспериментальные результаты применения мембранного разделения, например микро- и ультрафильтрация растворов из сахара-сырца как альтернатива процессу химической очистки. Образцы растворов обрабатывали в поперечном потоке микро- и ультрафильтрацией на керамических мембранах с пористостью 20 и 50 нм. При этом наблюдались изменения в содержании сахарозы, инвертного сахара и молочной кислоты, что приводило к увеличению чистоты сока от исходного значения 89 % до конечного – 91–92 %. Кроме того, пермеат может подвергаться прямой кристаллизации после сгущения с получением конечного продукта. Чистота ретентата снижалась до 87–88 %.

Также получены результаты исследований, которые показали, что сок, обработанный микро- и ультрафильтрацией, достигал такого качества, что была возможна прямая кристаллизация. Кристаллы, полученные из фильтрованного сока, впоследствии имели более высокое качество (по сравнению с необработанным соком), особенно в отношении содержания красящих и коллоидных веществ. Однако полученные результаты требуют проверки в промышленных условиях, поскольку качество и содержание примесей в соках сильно варьируется в течение производственного сезона [11].

Перекрытнопоточная микро- и ультрафильтрация на керамических мембранах в нечистых сахарных растворах изучены в работе [12], где приведены результаты экспериментов по микро- и ультрафильтрации сахарных диффузионных соков на фильтровальной установке TIA Vollene при поперечном течении через керамические мембраны MEMBRALOX. Для удаления коллоидных веществ,

крупных молекул (например, пептидов) и красящих веществ использовались мембраны с пористостью 20 нм. По сравнению с обычной фильтрацией под давлением отмечено повышение чистоты пермеата и последующее снижение содержания красящих веществ.

Обзор зарубежных литературных источников показывает, что в области переработки сахарной свёклы проводятся исследования по применению следующих видов процессов мембранного разделения (рис. 1, 2) под давлением (мембранные процессы первого поколения) [14]:

– микрофильтрация (МФ) (задерживаются частицы и раство-

рнённые макромолекулы размером более 0,1 мкм);

– ультрафильтрация (УФ) (задерживаются частицы и растворённые макромолекулы размером менее  $0,1 \times 10^{-6}$  м и более  $2 \times 10^{-9}$  м);

– нанофильтрация (НФ) (задерживаются частицы и растворённые молекулы размером менее  $2 \times 10^{-9}$  м);

– обратный осмос (ОО) (при котором трансмембранное давление приводит к селективному движению растворителя в сторону, противоположную его осмотической разнице давлений).

В настоящее время в России исследования в области мембранного разделения дисперсных систем

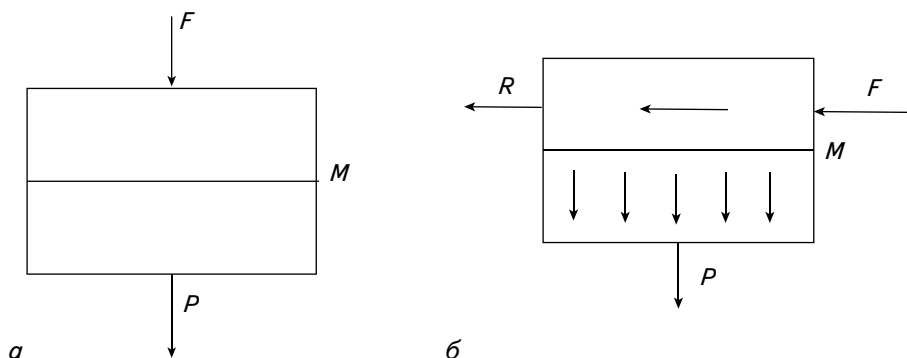


Рис. 1. Режимы течения в мембранных модулях: а) однонаправленный (тупиковый) поток (dead-end flow); б) поперечный (перпендикулярный) поток (cross flow). М – мембрана; F – сырьё; P – пермеат; R – ретентат

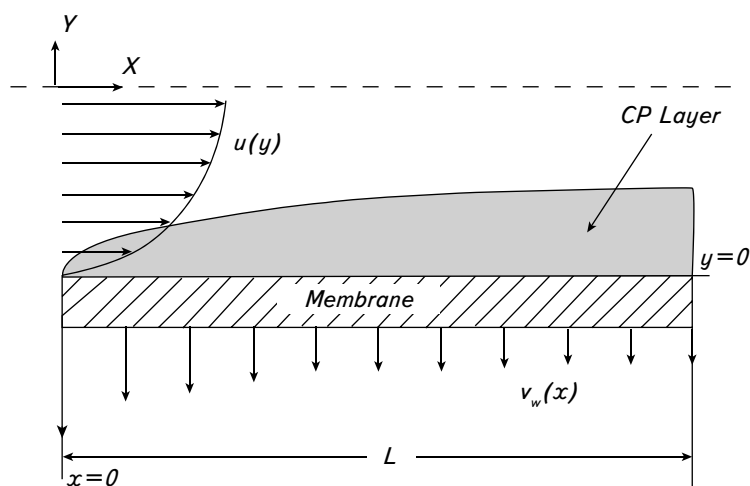


Рис. 2. Схематическое изображение поперечного (перпендикулярного) потока (cross flow) в трубчатом мембранном фильтрационном канале длиной L, изображающего стационарный концентрационно-поляризационный (CP) слой на поверхности мембраны

сахарного производства проводятся недостаточно, в то время как изыскания зарубежных учёных направлены на применение МФ и УФ для получения диффузионного сока из сахарной свёклы и его последующей известково-углекислотной очистки.

Тем не менее динамика ультрафильтрационного процесса разделения диффузионного сока сахарной свёклы изучена в работе [2]. Выявлены зависимости удельной производительности и селективности мембраны от величины рабочего давления, температуры, линейной скорости сока. Установлены оптимальные гидродинамические параметры: давление – 0,25–0,30 МПа, линейная скорость – 2–4 м/с, температура – 80–85 °С. Экспериментальный образец мембранного модуля показал производительность по фильтрату 40 л/(м<sup>2</sup>×ч). Испытания проводились на модельных и промышленных растворах на базе ОАО «Золотухинский сахарный завод». Показано, что увеличение рабочего давления до значений 0,25–0,30 МПа вызывает рост удельной производительности мембраны. Линейная скорость движения разделяемого раствора также влияет на интенсивность процессов ультрафильтрации. С увеличением скорости потока увеличивается его турбулизация, что ведёт к снижению образования нежелательного слоя отложений на поверхности мембраны. Однако, с другой стороны, увеличение скорости потока вызывает квадратичный рост потери давления в аппарате, а это приводит к снижению КПД мембранной установки.

Как следует из табл. 1, в результате применения МФ и УФ диффузионного сока в несколько ступеней удалось заметно снизить мутность и цветность очищенного сока в сравнении с ИУО. Однако чистота очищенного сока, являющаяся основным показателем эффективности проведения очистки

диффузионного сока, при применении мембранных технологий была ниже [6].

Таким образом, обзор литературных источников показывает, что для обработки диффузионного сока свеклосахарного производства в настоящее время можно использовать ультрафильтрацию и микрофильтрацию, с помощью которых возможна очистка сока. Учитывая, что между молекулярной массой сахарозы и несахаров диффузионного сока имеется значительное различие, с помощью баромембранных процессов удаётся получать водный сахарный раствор более высокой степени чистоты, что позволяет существенно упрощать технологию сахарного производства. За счёт удаления высокомолекулярных соединений, в том числе основной массы красителей, чистота диффузионного сока повышается на 2,5–3 единицы.

Установлено, что воздействие пульсаций давления и расхода в системе циркуляции разделяемого потока препятствует образованию нежелательного слоя отложений, тем самым увеличивая безрегенерационную работу мембранного аппарата, что ведёт к повышению эффективности процесса ультрафильтрации. Например, показано, что наибольший эффект очистки ультрафильтрацией диффузионного сока от высокомолекулярных

соединений и мелкодисперсных механических частиц достигается при создании в разделяемом потоке пульсаций расхода и давления резонансной частоты 67 Гц. При этом ультрафильтрация осуществляется практически с постоянной скоростью [3, 8].

Существует два общих критерия оценки эффективности мембранных технологий [5], применяемых также для всех процессов разделения: технический и экономический.

Первый критерий относится, по существу, к промышленной применимости процесса мембранного разделения и означает два основных требования: должны достигаться необходимые степени извлечения и качество (чистота) продукта.

Второй критерий, характеризующий стоимость процесса разделения, зависит от степени разработки метода разделения.

Для мембранной технологии, применительно к сахарному производству, и в частности ультрафильтрационной очистки диффузионного сока, можно отметить следующие преимущества:

- разделение может выполняться непрерывно;
- достаточно низкие энергетические затраты;
- мембранные процессы могут легко сочетаться с другими процессами разделения;

**Таблица 1.** Показатели качества очищенных соков, полученных при микрофильтрации, ультрафильтрации и путём известково-углекислотной очистки [10]

Наименование показателя	Значение показателя			
	Диффузионный сок	Сок, очищенный МФ	Сок, очищенный МФ и УФ	Сок, очищенный ИУО
Содержание сухих веществ, % масс.	19,32	18,37	15,90	22,01
Содержание сахарозы, % масс.	13,60	16,23	14,11	19,88
Чистота, %	59,42	88,74	88,28	90,33
Жёсткость, мг/л	1 017,5	807,5	750,0	803,5
Мутность, ед.	642,5	3,83	1,67	10,66
Цветность, ед.	9 834	5 559	2 138	4 209

– разделение может выполняться в мягких условиях низкого трансмембранного давления;

– возможность масштабирования процесса.

К проблемным явлениям мембранной технологии микро- и ультрафильтрации соков (рис. 3) относятся:

– концентрационная поляризация (из-за повышения концентрации у мембранной поверхности снижается её селективность и удельная производительность);

– отложение осадков на мембране (её загрязнение из-за адсорбции, образования слоя геля и забивания пор), задерживающее поток;

– в общем случае низкая селективность мембран.

Указанные недостатки технического осуществления мембранной технологии, собственно, и сдерживают её применение для очистки диффузионного сока в свеклосахарном производстве. Ультрафильтрация диффузионного сока не осуществляется в промышленных масштабах из-за нерешённых вопросов с регенерацией мембранных элементов, что приводит к снижению производительности [7, 11, 12].

**Результаты исследования**

Проведённые в лаборатории «НТ-Пром» эксперименты подтвердили данные выводы и показали, что проведение непосредственной cross flow ультрафильтрационной обработки диффузионного сока приводило в течение 20 мин к замедлению скорости фильтрования до полной его остановки и необходимости регенерации мембран обратным потоком пермеата. После 5–6 пульсационных очисток производительность мембран восстанавливалась до 50 % от первоначальной, затем требовалась химическая регенерация мембран. Это позволяет сделать вывод о недостаточной промышленной перспективности

такого метода из-за необходимости частой и сложной кислотно-щелочной промывки мембран.

По мнению авторов, дальнейшее развитие мембранной технологии очистки диффузионного сока возможно по направлению, эффективно реализуемому при ультрафильтрации фруктовых соков, предварительно ферментативно обработанных [1].

В связи с этим также изучалась возможность ультрафильтрации диффузионного сока после предварительной обработки комплексом ферментов, подобранным в институте биохимии им. А.Н. Баха РАН, при следующих условиях: температура 50–55 °С, время обработки 30–60 мин, что соответствовало необходимому времени действия ферментов. В опытах применялись трубчатые керамические мембранные элементы с порогом отсечки до 500 кДа. Эксперименты проводились при температуре 40–85 °С в условиях тангенциальной поточной (cross flow) фильтрации при скорости циркуляции ретентата, соответствующей турбулентному режиму движения в каналах мембранного элемента с образованием на цилиндрической фильтрующей поверхности проницаемого аксиально-подвижного осадка.

Ультрафильтрация диффузионного сока, не имеющего дисперсной фазы, осуществляемая после стадии ферментной обработки, происходила с постоянной скоростью 100 л/(м<sup>2</sup>×ч) в течение всего периода фильтрования при трансмембранном давлении 2 бар. Ферментная обработка диффузионного сока позволила исключить пенообразование в ретентате, сформировать реологически структурированный осадок, который не отлагается на внутренней поверхности керамической мембраны в виде гелевого слоя и не закупоривает поры мембраны, а уносится с рециркулирующим потоком ретентата при полном

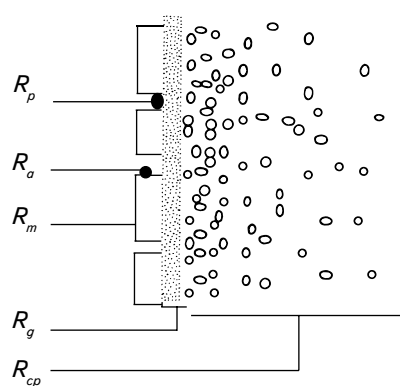


Рис. 3. Различные типы сопротивления массопереносу через мембраны: забивание пор ( $R_p$ ); адсорбция ( $R_a$ ); мембрана ( $R_m$ ); образование гелевого слоя ( $R_g$ ); концентрационная поляризация ( $R_{cp}$ ) [5]

отсутствию пенообразования. Поэтому регенерация мембраны не требовалась. Достигнутое распределение потоков при мембранно-ферментативной очистке (МФО): пермеат – 90 %, ретентат – 10 %. Для сравнения, при прямой ультрафильтрации диффузионного сока ретентат практически не рециркулировал из-за заполнения каналов вспененным диффузионным соком и необходимости частой очистки мембран обратным потоком пермеата.

Для проведения испытаний нового способа очистки были использованы диффузионный сок и известковое молоко со следующими исходными параметрами (табл. 2).

Таблица 2. Параметры исходного диффузионного сока и известкового молока

Исходный диффузионный сок	
СХ диффузионного сока, % к массе сока	13,6
СВ диффузионного сока, % к массе сока	15,9
Чистота диффузионного сока, %	85,5
рН	5,8
Известковое молоко	
Плотность молока, г/см <sup>3</sup>	1,19
Активность известкового молока, %	80

На момент отбора проб параметры работы сахарного завода представлены в табл. 3.

**Таблица 3. Показатели работы сахарного завода**

Сахаристость сахарной свёклы, % к массе сахарной свёклы	18,1
Откачка сока из диффузионного аппарата, % к массе сахарной свёклы	126
Расход извести на очистку, % СаО к массе сахарной свёклы	2,1
Потери СХ в фильтрационном осадке, % к массе осадка	0,5
СХ фильтрованного сока перед выпаркой, % к массе сока	13,6
СВ фильтрованного сока перед выпаркой, % к массе сока	14,5

Очистка диффузионного сока с использованием предлагаемого способа МФО осуществлялась в два этапа.

**I ЭТАП. Мембранно-ферментативная очистка**

Мембранно-ферментативная очистка включает в себя ферментативный гидролиз диффузионного сока, последующее его декантирование и мембранную фильтрацию декантата. Ферментативный гидролиз проходит с использованием высокоактивных ферментативных препаратов, разработанных НИИ «ФГБУН институт биохимии им. А.Н. Баха Российской академии наук». После проведения мембранно-ферментативной очистки образуются фильтрат (рис. 4) и осадок

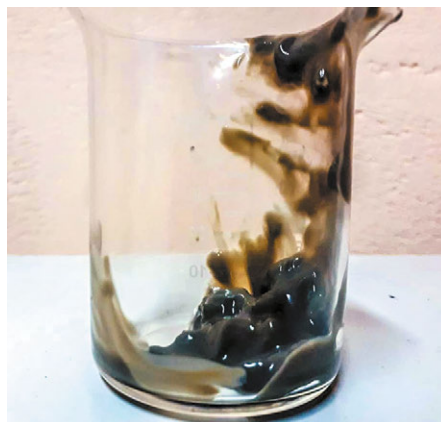


**Рис. 4. Пермеат ферментативно обработанного диффузионного сока после ультрафильтрации**

(рис. 5). Полученный фильтрат имеет параметры, приведённые в табл. 4.

**Таблица 4. Параметры пермеата после ультрафильтрации**

СВ, %	14,2
СХ, %	13,6
рН	5,7
Ч, %	95,8



**Рис. 5. Ретенат из диффузионного сока, сгущённый центрифугированием**

**II ЭТАП. Известково-углекислотная очистка**

Известково-углекислотная очистка осуществляется по упрощённой схеме и включает в себя основную горячую дефекацию, сатурацию и фильтрование. Расход СаО на основной горячей дефекации составляет 0,45 % к массе сахарной свёклы. Параметры сока после двухэтапной мембранно-ферментативной очистки

и последующей известково-углекислотной очистки приведены в табл. 5.

**Эффективность МФО**

В целях сравнения результатов мембранно-ферментативной очистки сока с традиционным способом были взяты фактические данные сахарного завода в момент отбора пробы диффузионного сока. Результаты сравнения приведены в табл. 6.



**Рис. 6. Ультрафильтрованный диффузионный сок после дефекационной очистки**

**Таблица 5. Параметры пермеата после известково-углекислотной очистки**

Расход СаО, к массе сахарной свёклы, %	0,45
СВ, %	14,1
СХ, %	13,7
рН	9,28
Ч, %	97,2

**Таблица 6. Сравнение эффективности МФО диффузионного сока с традиционной технологией**

Показатели	МФО	Традиционный способ очистки
Сахаристость сахарной свёклы, %	18,1	18,1
Расход известнякового камня на переработку свёклы, %	0,9	4,2
Эффект очистки диффузионного сока, %	77,5	39,5
Расчётные потери сахара в мелассе, %	0,69	1,85
Расчётный выход сахара	16,4	15,2
Потери сахара в дефекате, % к массе свёклы	0,01	0,04
Потери сахара в осадке декантера, % к массе свёклы	0,03	-

На основании полученных результатов предлагается осуществить полномасштабные испытания на сахарном заводе пилотной установки, реализующей инновационную технологию высокоэффективной мембранно-ферментативной очистки (МФО) диффузионного сока для получения результатов длительного периода эксплуатации и оценки экономической эффективности.

### Выводы

Несмотря на то, что традиционное производство белого сахара из сахарной свёклы хорошо отработано технологически и аппаратурно в течение многих лет, сахарная промышленность должна приспособиться к новым экологическим нормам и повысить качество сахара с оптимизацией производственных затрат с использованием новых методов, например мембранной фильтрации.

Данное решение достигнуто при комбинированном методе очистки диффузионного сока ультрафильтрацией с предварительной его ферментативной обработкой. Полученные результаты показали, что данный метод позволяет обеспечить высокое качество пермеата и, следовательно, улучшить качество сахара. Дальнейшая разработка способов очистки диффузионного сока с применением МФО нуждается в оптимизации режимов и длительном тестировании для оценки работоспособности керамических мембран и необходимого периода для их замены.

Использование нового метода МФО диффузионного сока позволяет осуществлять его ультрафильтрационную обработку с удалением ВМС в непрерывном режиме работы без падения скорости фильтрования и загрязнения трубчатых мембран, что расширяет возможность промышленной применимости данной технологии.

В результате более полного снижения содержания нес сахаров

в диффузионном соке при проведении мембранно-ферментативной обработки повышается выход сахара за счёт снижения его потерь в мелассе и уменьшения мелассообразования. При этом за счёт уменьшения выхода мелассы снижается объём уваривания утфеля III кристаллизации, что приводит к снижению мощности оборудования продуктового отделения: станции уваривания и кристаллизации охлаждением утфеля III кристаллизации и, как следствие, снижению капитальных затрат.

Применение мембранно-ферментативной очистки позволяет уменьшить потребность в извести до 0,5 % к массе свёклы. Соответственно, снижение расхода известняка и антрацита позволит уменьшить потребность в производственных мощностях известково-газовых печей. Одновременно значительно ниже нормативных величин уменьшаются выбросы в атмосферу оксида углерода и оксидов азота, что улучшает экологическую обстановку на сахарном заводе.

### Список литературы

1. *Алюханова, О.А.* Ультрафильтрационное осветление яблочного сока / О.А. Алюханова, В.Н. Воляков // Техника и оборудование для села. – 2011. – № 6 (168). – С. 17–19.
2. *Кувардина, Е.М.* Динамика ультрафильтрационного аппарата для разделения диффузионного сока сахарной свёклы : автореферат дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06 / Курск. гос. техн. ун-т. – Курск, 2003. – 16 с.
3. *Кудрявцев, В.А.* Влияние резонанса на процесс ультрафильтрации сахарных растворов / В.А. Кудрявцев, Е.М. Кувардина, В.В. Спичак, П.А. Ананьева // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2005. – № 4. – С. 43–45.
4. *Лукин, Н.Д.* Области применения, эффективность и перспективы использования баромембранных процессов в АПК / Н.Д. Лукин, В.Л. Кудряшов // Хранение и переработка сельхозсырья. – № 12. – 2017. – С. 44–52.
5. *Мулдер, М.* Введение в мембранную технологию / под ред. Ю.П. Ямпольского, В.П. Дубяги. – М. : Мир, 1999. – 513 с.

5. *Семенухин, С.О.* Анализ современных исследований и путей развития мембранных технологий в сахарной отрасли / С.О. Семенухин, В.О. Городецкий // Наука Кубани. 2018. – № 2. – С. 4–9.

6. *Семёнов, А.Г.* Развитие гелевого загрязнения мембраны при тангенциальной ультрафильтрации раствора высокомолекулярного соединения / Техника и технология пищевых производств – № 1 (20). – 2011. – С. 79–83.

7. *Яцун, С.Ф.* Моделирование процесса ультрафильтрации диффузионного сока сахарной свёклы / С.Ф. Яцун, О.Г. Локтионова, В.А. Кудрявцев, Е.М. Кувардина // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – № 2–3. – 2004. – С. 74–77.

8. *Abbara, A.A.* Utilizing of Membrane Filtration in the Sugar Industry: A Review / A.A. Abbara, K.A. Rahman, M.R. Bayoumi // The 33rd Annual Conference of the Egyptian Society of Sugar Technologists, At El-Hawamdia, Egypt, 2003. – Pp. 1–14.

9. *Hakimzadeh, V.* The potential of microfiltration and ultrafiltration process in purification of raw sugar beet juice / V. Hakimzadeh, M.A. Razavi Seyed, K. Piroozifard, M. Shahidi // Desalination, 2006, 200 (1–3). – Pp. 520–522.

10. *Hinkova, A.* Application of Cross Flow Ultrafiltration on Inorganic Membranes in Purification of Food Materials / A. Hinkova, Z. Bubnik, V. Pour, S. Henke, P. Kadlec // Czech J. Food Sci., 2005, 23: 103–110.

11. *Hinkova, A.* Membrane filtration in the sugar industry / A. Hinkova, Z. Bubnik, P. Kadlec, V. Pour, H. Štarhova // Pap. 27th Conference of the Slovak Society of Chemical Engineering, Tatranske Matliare, May 22–26, 2000. – Chem. Pap. – 2000. – 54. – № 6a. – P. 375–382.

12. *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.

13. *Koros, W.J.* Ma, Y.H. Shimidzu, T. Terminology for membranes and membrane processes (IUPAC Recommendations 1996) / W.J. Koros, Y.H. Ma, T. Shimidzu // Pure and Applied Chemistry. – № 68 (7). – Pp. 1479–1489.

14. *Mancinelli, D.* Nano- Filtration and Ultra- Filtration Ceramic Membranes for Food Processing: A Mini Review / D. Mancinelli, C. Hallé // J Membra Sci Technol. – 2015. – № 5. – Pp. 140.

15. *Zhu, Z.* Dead end Dynamic Ultrafiltration of Juice Expressed from Electroporated Sugar Beets / Z. Zhu, H. Mhemdi, L. Ding [et al.] // Food and Bioprocess Technology. – 2015. – Vol. 8. – Is. 3. – Pp. 615–622.

**Отзывы на статью****Р.С. Решетова, проф., д-р техн. наук**

**Оценка.** Несомненно, работа, направленная на повышение эффекта очистки диффузионного сока, актуальна и необходима, так как на сегодняшний момент он не превышает 40 %. Впечатляют результаты проведённых испытаний предложенного способа очистки диффузионного сока.

**Рекомендации.** Было бы хорошо определить состав оставшихся в соке несахаров после очистки. Если оставшиеся несахара не влияют на выход сахара и его качество, есть ли смысл обрабатывать сок ещё и известью, увеличивая затраты?

**В.И. Тужилкин, проф., д-р техн. наук**

**Оценка.** Можно согласиться с мнением авторов и отнести предлагаемую технологию к разряду инновационных и промышленно применимых, так как в последние 20–30 лет сахарная промышленность испытывает дефицит известняка хорошего качества, что, несомненно, сказывается на качественных показателях очищаемого диффузионного сока. По этой причине поиски эффективного реагента очистки диффузионного сока происходят все последние годы.

**Рекомендации.** Необходимо осуществить экономическое обоснование использования мембранно-ферментативной технологии очистки диффузионного сока.

**Л.И. Чернявская, проф., д-р техн. наук**

**Оценка.** Работа вызывает практический интерес для свеклосахарной промышленности.

**Рекомендации.** Целесообразно определить контаминацию диффузионного сока и динамику её изменения при предложенном низкотемпературном (50–55 °С) режиме МФО и после мембранного разделения с целью исключения инфицирования сока.

Следовало бы определить количество коллоидных веществ до разделения диффузионного сока на мембране и после неё, а также азотистых и зольных веществ в диффузионном соке и обоих продуктах (фильтрате и коллоидном осадке).

**Аннотация.** Несмотря на то, что традиционное производство белого сахара из сахарной свёклы хорошо отработано технологически и аппаратно в течение многих лет, сахарная промышленность должна приспособиться к новым экологическим нормам и повысить качество сахара с оптимизацией производственных затрат путём использования альтернативных методов, например мембранной фильтрации. Решение данной проблемы достигнуто при комбинированном способе очистки диффузионного сока cross flow ультрафильтрацией с предварительной его ферментативной обработкой. Полученные результаты показали, что предлагаемый способ позволяет обеспечить высокое качество пермеата и, следовательно, улучшить качество сахара. Использование нового способа очистки диффузионного сока позволяет осуществлять его ультрафильтрационную обработку с удалением высокомолекулярных соединений в непрерывном режиме работы без падения скорости фильтрования и загрязнения керамических трубчатых мембран, что расширяет возможность промышленной применимости данной технологии. В результате более полного снижения содержания несахаров в диффузионном соке при проведении мембранно-ферментативной обработки повышается выход сахара за счёт снижения его потерь в мелассе и уменьшения мелассообразования. Одновременно снижается расход извести до 0,5 % к массе свёклы, уменьшаются выбросы в атмосферу оксида углерода и оксидов азота, что улучшает экологическую обстановку на сахарном заводе.

**Ключевые слова:** диффузионный сок, мембранно-ферментативная очистка, cross flow ультрафильтрация, чистота сока, керамические трубчатые мембраны, скорость фильтрования.

**Summary.** Despite the fact that the traditional production of white sugar from sugar beets has been well developed technologically and instrumentally for many years, the sugar industry must adapt to new environmental standards and improve the quality of sugar while optimizing production costs by using alternative methods, such as membrane filtration. The solution to this problem was achieved by a combined method of cross flow diffusion juice purification by ultrafiltration with its preliminary enzymatic treatment. The results obtained demonstrated that the proposed method allows to ensure high quality of permeate and, consequently, improve the quality of sugar. The use of a new method for cleaning diffusion juice allows its ultrafiltration treatment with the removal of high-molecular compounds in continuous operation without a drop in the filtration rate and contamination of ceramic tubular membranes, which expands the possibility of industrial applicability of this technology. As a result of a more complete reduction in the content of non-sugars in the diffusion juice during membrane-enzymatic processing, the yield of sugar increases by reducing its losses in molasses and reducing molasses formation. At the same time, lime consumption is reduced to 0.5 % by weight of beets, and emissions of carbon monoxide and nitrogen oxides are reduced, which improves the environmental situation at the sugar factory.

**Keywords:** diffusion juice, membrane-enzymatic purification, cross flow ultrafiltration, juice purity, ceramic tubular membranes, filtration rate.