

УДК 664.1

Поступила в редакцию 22.07.2024
Received 22.07.2024**О. К. Никулина¹, М. Р. Яковлева¹, О. В. Колоскова¹, О. В. Дымар²***¹РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию», г. Минск, Республика Беларусь**²Представительство АО «МЕГА» в Республике Беларусь, г. Минск, Республика Беларусь***РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ САХАРА НА ОСНОВАНИИ
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АСПЕКТОВ ОЧИСТКИ ПОЛУПРОДУКТОВ
САХАРНОГО ПРОИЗВОДСТВА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ЭЛЕКТРОМЕМБРАННОЙ ОБРАБОТКИ**

Аннотация. В работе представлены исследования по изменению технологического качества полупродуктов сахарного производства и мелассы в результате электромембранной обработки, оценка эффективности данной обработки для разных полупродуктов сахарного производства. Предложены рациональные параметры процесса для различных полупродуктов: диффузионного сока разных степеней очистки, смеси сиропа с очищенным соком (или промежуточного сиропа), разбавленного оттока утфеля II кристаллизации и мелассы.

Ключевые слова: производство сахара, электромембранные технологии, электродиализ, эффект очистки, полупродукты сахарного производства.

O. K. Nikulina¹, M. R. Yakovleva¹, O. V. Koloskova¹, O. V. Dymar²*¹RUE “Scientific and Practical Centre for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Republic of Belarus**²Representative of MEGA a.s. in Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***DEVELOPMENT OF A SUGAR PRODUCING METHOD BASED ON
SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF PURIFYING
INTERMEDIATE PRODUCTS OF SUGAR PRODUCTION
BY USE OF ELECTROMEMBRANE PROCESSING**

Abstract. The article presents research on changes in the technological quality of intermediate products of sugar production and molasses as a result of electromembrane treatment, and an assessment of the efficiency of this treatment for various intermediate products of sugar production. Rational process parameters are proposed for various intermediate products: diffusion juice of different purification level, a mixture of syrup with purified juice (or intermediate syrup), second effluent of second massecuite and molasses.

Keywords: sugar production, electromembrane technologies, electro dialysis, purification effect, intermediate products of sugar production.

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

Эффект очистки на сегодняшний день остается главным критерием эффективности очистки диффузионного сока, от которого зависят основные технологические показатели: выход

и качество сахара, содержание сахарозы в мелассе, расход извести, стабильность работы станции фильтрации, эффекты кристаллизации в продуктовом отделении и др. Сравнением чистоты диффузионного и свекловичного соков характеризуется эффект очистки сока на диффузии. Сравнивая чистоту диффузионного сока и сока II сатурации, судят об эффективности очистки сока на дефекации и сатурации. По содержанию инвертного сахара в свекловичном (или в свекле) и диффузионном соках устанавливают, не было ли инверсии сахарозы во время процесса диффузии [8–10].

Известно, что при теоретически возможном эффекте очистки диффузионных соков, составляющем 40 %, фактически сахарными заводами достигается лишь 20–26 %, в лучшем случае 32 % (при разности между чистотой очищенного и диффузионного соков 3,0–3,5 %). При повышении чистоты очищенных диффузионных соков на 1 % содержание сахара в мелассе снижается на 0,25–0,30 % к массе свеклы [8–10].

Эффект очистки сахаросодержащих растворов зависит от качества исходного сырья, расхода известкового молока, применяемой технологической схемы. От очистки сахаросодержащих растворов зависит работа кристаллизационного отделения сахарного завода и, в конечном итоге, выход сахара и его качество. Универсального приема, позволяющего очистить сахарный раствор от всех нес сахаров, не найдено. Все методы очистки представляют собой комбинации отдельных операций: химических (нейтрализация, осаждение, коагуляция), физико-химических (адсорбция), механических (отстаивание, фильтрование, центрифугирование) и другие [1–10].

Одним из актуальных направлений является использование мембранных технологий в процессе производства сахара. Применение мембран позволяет снизить потери сахара в мелассе, увеличить выход и улучшить качественные показатели готового продукта, снизить энергозатраты на проведение процесса [1–2].

Литературные данные показывают, что при существующей технологии эффект известково-углекислотной очистки не превышает 40 %. Однако некоторые источники показывают, что теоретически возможный эффект очистки может достигать 50 % [9–10].

Исследования [11–14], проведенные научно-исследовательской лабораторией сахарного производства РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию», показали, что применение электромембранной обработки диффузионного сока различной степени очистки позволяет достичь эффекта очистки 55–69 %. Кроме того, при электромембранной обработке сиропа достигается эффект очистки 30 %, при обработке оттека утфеля II кристаллизации — 40 %, а при обработке мелассы — 30 % и более.

Целью представленного исследования являлась разработка способа получения сахара на основании научно-технологических аспектов очистки полупродуктов сахарного производства с использованием электромембранной обработки.

Материалы и методы исследований. Производственные испытания процесса электродиализа проводили на ОАО «Городейский сахарный комбинат», где установлены две электродиализные установки типа EWDU 8ЧЕД-II/250-0,8 IS.

Лабораторные измерения отобранных с производства проб проводились с помощью компьютеризированной системы комплексного лабораторного анализа и регистрации показателей сырья, промежуточных и конечного продукта сахарного производства Ecosucrolyser в соответствии с Инструкцией [15], определение мелассообразующих веществ и расчет мелассообразующего коэффициента в соответствии с [16–20].

В лабораторных условиях процесс деминерализации исследовали на электромембранной установке Р EDR-Z с использованием мембран CMH-PES катионного типа и AMH-PES — анионного.

Модельные испытания процесса электродиализа в условиях реального производства производились на пилотной мембранной установке ED(R) — Y производства MEGA a.s., Чехия, с катионно-анионным набором мембран.

Результаты исследований и их обсуждение. Так как электродиализная очистка может быть включена в классическую технологию производства сахара на разных этапах: для дополнительной очистки сока или полусиропа после III корпуса выпарной станции, а также для обработки оттеков или мелассы [21–23], проводились лабораторные, модельные и промышленные исследования применения электромембранной обработки диффузионного сока различной степени очистки, а также лабораторные и промышленные исследования по применению электромембранных процессов для очистки густых полупродуктов и мелассы (табл. 1).

Таблица 1. Изменение технологического качества полупродуктов сахарного производства и мелассы в процессе электромембранной обработки

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

Наименование показателя Сок I сатурации	Полупродукт				Меласса
	Сок I сатурации	Сок очищенный	Смесь сиропа с очищенным соком	Разбавленный оттек утфеля II кристаллизации	
Длительность обработки, минут	≤ 10	≤ 10	177	254	200
<i>Изменение после электродиализа, %</i>					
Чистота	+5,24	+4,13	+3,37	+7,95	+8,49
Мелассообразующий коэффициент	37	49	32	43	26
Эффект очистки	64,0	57,9	30,4	40,5	32,6

Из табл. 1 видно, что электромембранная обработка позволяет получить полупродукты сахарного производства высокой чистоты, снизить мелассообразующий коэффициент с достижением эффекта очистки 30,4 – 64,0 % в зависимости от обрабатываемого полупродукта.

Здесь результаты очистки с применением электродиализа отличаются для различных полупродуктов, однако длительность обработки, определяющая эффективность электромембранного процесса, также отличается.

Сравнение технологических схем (при расчетной загрузке оборудования в условиях проведения экспериментов) с обработкой сиропа и оттока показало [12-14], что, несмотря на меньшую эффективность одной обработки сиропа по сравнению с оттеком, суточная и сезонная эффективность данной схемы будет выше за счет большего количества обрабатываемых партий.

Это определяется технологическим качеством (в т.ч. химическим составом) и условиями ведения процесса каждого полупродукта.

На рис. 1-3 представлено несколько примеров описания процесса электродиализа и изменения отдельных технологических показателей при этом.

Изменение удельной электропроводимости (по которой мы считаем степень деминерализации раствора) во времени описывается экспоненциальной зависимостью (рис. 1), что означает постепенное снижение эффективности процесса при увеличении его длительности и требует поиска оптимального режима для конкретного полупродукта.

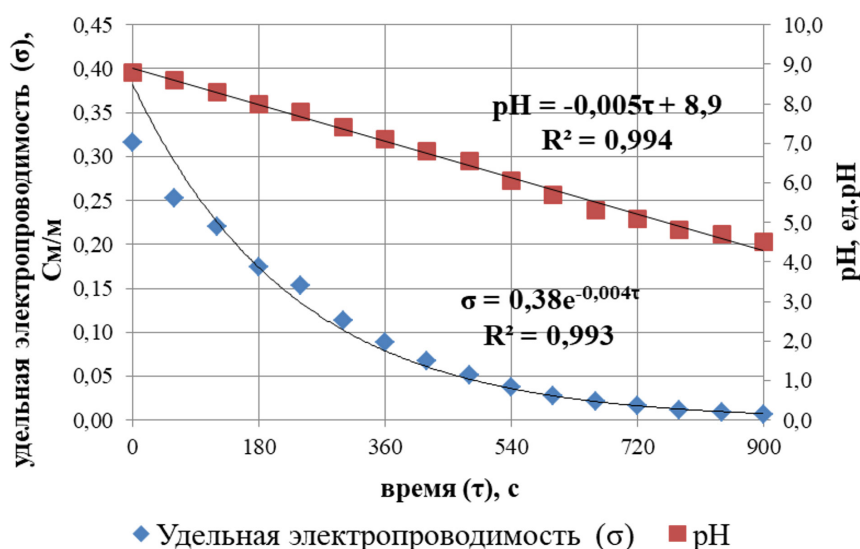


Рис. 1. Изменение удельной электропроводимости и pH в течение электромембранной обработки очищенного сока
Fig. 1. Changes in electrical conductivity and pH during electromembrane processing of purified juice

При этом рациональные параметры конкретного процесса необходимо устанавливать на основании изменения технологических параметров. Например, как видно на рис. 2 график изменения мелассообразующего коэффициента не совпадает с графиком изменения проводимости, то есть ведение процесса больше 90 минут для данного примера (обработка сиропа) нецелесообразно с точки зрения снижения сахара в мелассе, однако дальнейшая обработка позволяет провести более глубокую очистку. Для примера с оттеком II продукта (рис. 3) максимальная эффективность процесса будет достигнута только на 180 минуте.

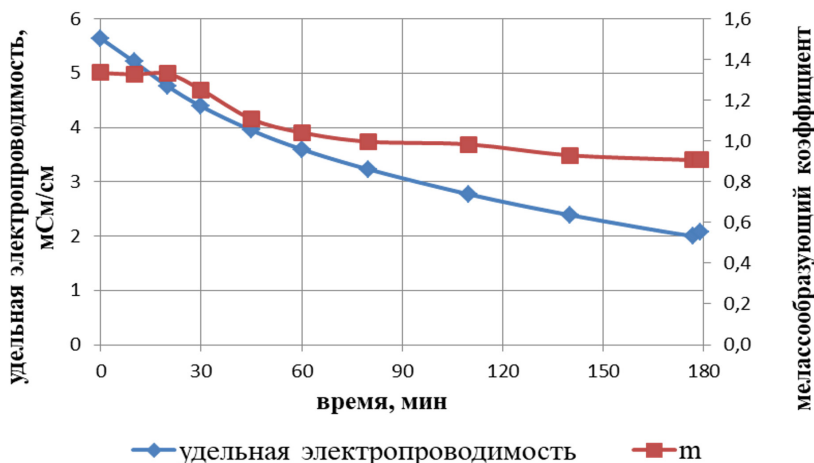


Рис. 2. Изменение коэффициента мелассообразования и удельной электропроводимости в процессе электромембранной обработки сиропа

Fig. 2. Changes in the molasses coefficient and electrical conductivity during the electromembrane treatment of syrup

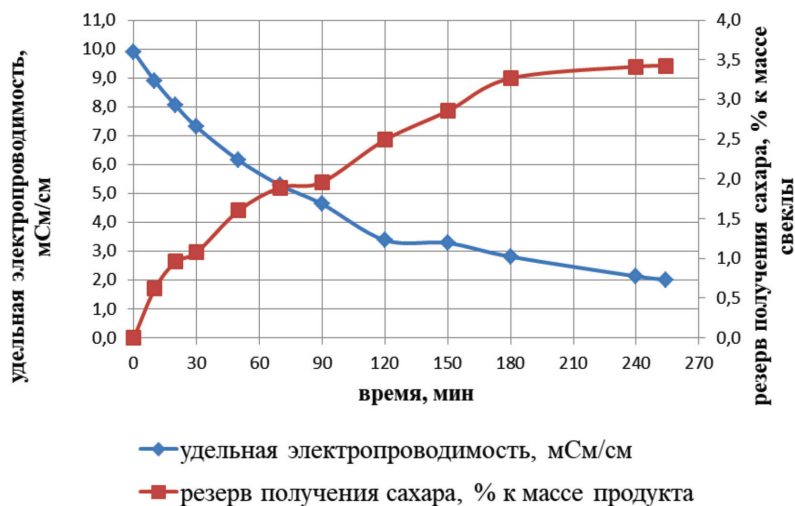


Рис. 3. Изменение удельной электропроводимости и количества дополнительно получаемого сахара в процессе электромембранной обработки оттека II продукта

Fig. 3. Changes in electrical conductivity and the amount of additionally produced sugar during the electromembrane treatment of second effluent of second masecuite

По результатам исследований установлены рациональные параметры процесса для различных полупродуктов:

- ♦ для диффузионного сока главный параметр рН не ниже 7 для очищенного сока и рН 9,0-9,5 для сока I сатурации;
- ♦ для смеси сиропа с очищенным соком или промежуточного сиропа конечной точкой процесса обработки партии должна быть электропроводимость не ниже 2,5 мСм;

- ♦ для разбавленного оттека утфеля II кристаллизации конечной точкой процесса обработки партии должна быть удельная электропроводимость не ниже 5 мСм/см;
- ♦ для обработки мелассы удельная электропроводимость в конечной точке обработки должна быть не ниже 7,0 мСм/см.

При этом полупродукты сахарного производства могут подвергаться электродиализной обработке на одном или нескольких этапах:

- ♦ диффузионный сок, очищенный или на промежуточной стадии очистки, весь или частично после обработки направляется на выпаривание для получения сиропа или на клерование желтых сахаров, или на разбавление сиропа, или на дальнейшую очистку;
- ♦ сироп после выпарной установки или на промежуточной стадии выпаривания, или разбавленный очищенным диффузионным соком/водой, весь или частично после обработки направляется на уваривание утфеля I кристаллизации или смешивается с клеровкой желтых сахаров;
- ♦ оттек утфеля II кристаллизации, с разбавлением или без, весь или частично после обработки направляется на уваривание утфеля I, II или III кристаллизации или смешивается с клеровкой желтых сахаров или сиропом с выпарной станцией;
- ♦ меласса, с разбавлением или без, вся или частично после обработки направляется на дополнительную очистку известковым молоком или на уваривание утфеля II или III кристаллизации.

Таким образом, применение электромембранных процессов при производстве сахара имеет место, варианты этого применения могут быть разнообразными и зависеть от целей предприятия: повысить чистоту продуктов, улучшить процесс варки утфелей, достать дополнительный сахар из мелассы или еще что-то, а также от производительности конкретной установки и схемы ее обвязки. Поэтому и схемы электромембранной обработки, и оптимальные ее режимы у каждого предприятия будут свои.

Кроме повышения эффективности производства сахара за счет повышения чистоты продуктов и повышения выхода сахара за счет снижения его потерь с мелассой перспективным является использование электромембранных процессов для расширения ассортимента предприятия и создания инновационной продукции, как из побочной продукции производства, так и из полупродуктов (рис. 4).

Научно-исследовательской лабораторией сахарного производства ведутся работы по изучению деминерализации свежловичной мелассы не только с целью ее обессахаривания, а также для получения при этом инновационных продуктов с бетаином, а впоследствии с возможностью выделения бетаина из деминерализованной мелассы. Также в рамках исследований будет оценена возможность изготовления на сахарном предприятии инновационных продуктов из полупродуктов с различными свойствами с добавками и без.

Инновационная продукция сахарного производства



Рис. 4. Перспективы расширения ассортимента продукции сахарных предприятий Республики Беларусь

Fig. 4. Prospects for expanding the range of products of sugar enterprises in the Republic of Belarus

Заключение. Таким образом, варианты применения электромембранных процессов при производстве сахара могут быть разнообразными и зависеть от целей предприятия: повысить чистоту продуктов, улучшить процесс варки утфелей, получить дополнительный сахар из мелассы и др. Оптимальные условия ведения процесса необходимо устанавливать для конкретного предприятия и его потребностей, но рациональными параметрами электромембранного процесса для различных полупродуктов являются:

- ♦ для диффузионного сока главный параметр рН не ниже 7 для очищенного сока и рН 9,0-9,5 для сока I сатурации;
- ♦ для смеси сиропа с очищенным соком или промежуточного сиропа конечной точкой процесса обработки партии должна быть электропроводимость не ниже 2,5 мСм;
- ♦ для разбавленного оттока утфеля II кристаллизации конечной точкой процесса обработки партии должна быть удельная электропроводимость не ниже 5 мСм/см;
- ♦ для обработки мелассы удельная электропроводимость в конечной точке обработки должна быть не ниже 7,0 мСм/см.

Кроме повышения эффективности производства сахара за счет повышения чистоты продуктов и повышения выхода сахара за счет снижения его потерь с мелассой перспективным является использование электромембранных процессов для расширения ассортимента предприятия и создания инновационной продукции, как из побочной продукции производства, так и из полупродуктов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность руководству и сотрудникам ОАО «Городейский сахарный комбинат» в лице генерального директора Соловья Г.М., главного инженера Скачко И.Н. и главного технолога Хмелинко Ю.А., а также сотрудникам цеха переработки мелассы за содействие в работе.

Исследования проводились в рамках гранта Президента Республики Беларусь в сфере науки на 2024 год.

Список использованных источников

1. *Круглик, С. В.* Об оптимизации технологии на отдельных стадиях производства сахара / С. В. Круглик // Сахар. — 2020. — №4. — С. 27-35.
2. Способ мембранно-ферментативной очистки диффузионного сока с использованием cross flow ультрафильтрации и упрощённой дефекосатурации / С. Л. Филатов, С. М. Петров, Н. М. Подгорнова [и др.] // Сахар. — 2020. — №3. — С. 9-15.
3. *Боннанфан, Ф.* Принципы очистки соков сахарной свёклы / Ф. Боннанфан // Сахар. — 2019. — №5. — С. 16-27.
4. Интенсификация известково-углекислотной очистки диффузионного сока / Ю. И. Зелепукин, В. А. Голыбин, В. А. Федорук, С. Ю. Зелепукин // Сахар. — 2016. — №1. — С. 40-43.
5. *Штангеев, В. О.* Очистка густых полупродуктов сахарного производства / В. О. Штангеев, Е. Н. Молодницкая, Л. С. Клименко // Сахар. — 2013. — №11. — С. 44-49.
6. *Рудюк, Л. С.* Ионообменные технологии в сахарной промышленности. Обессахаривание мелассы и декальцинация сока / Л. С. Рудюк, Д. Пайе, Ф. Бонненфан // Сахар. — 2018. — №4. — С. 26-27.
7. Инновационные технологии как основа устойчивого экономического развития свеклосахарного производства / С. Л. Филатов, С. М. Петров, Н. М. Подгорнова [и др.] // Сахар. — 2020. — №8. — С. 12-19.
8. *Сапронов, А. Р.* Технология сахарного производства / А.Р. Сапронов. — Москва : Колос, 1999. — 494 с.
9. *Савостин, А. В.* Эффективность очистки сахаросодержащих растворов / А.В. Савостин, А.Н. Литош // Сахар. — 2006. — №8. — С. 33-35.
10. 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 производственника).
11. Применение электродиализа для очистки диффузионного сока в сахарном производстве / О. К. Никулина [и др.] // Пищевая промышленность: наука и технологии. — 2021. — Т. 14, №3 (53). — С. 51–61.
12. Эффективные технологии производства свекловичного сахара / О.К. Никулина [и др.]. — Минск: ИВЦ Минфина, 2023. — 304 с.
13. *Никулина, О. К.* Использование электродиализа для повышения эффективности работы сахарных предприятий / О. К. Никулина // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя аграрных навук. — 2024. — Т. 62, №2. — С. 168–176. <https://doi.org/10.29235/1817-7204-2024-62-2-168-176>
14. Применение электромембранных методов обработки для очистки густых полупродуктов сахарного производства / О. К. Никулина, О. В. Дымар, О. В. Колоскова, М. Р. Яковлева // Сахар. — 2022. — №4. — С. 26-31.
15. Инструкция по химико-техническому контролю и учету сахарного производства: Утв. М-вом пищ. пром-ти СССР 27.07.81. — К.: ВНИИ сахарной промышленности, 1983. — 476 с.

16. Методы оценки технологических качеств сахарной свеклы с использованием показателей содержания калия, натрия и *a*-аминного азота, определенных в свекле и продуктах ее переработки / В.Н. Кухар [и др.] // Сахар. — 2019. — № 1. — С. 18–36.
17. Чернявская, Л. И. Методы оценки качества свеклы, основанные на ее лабораторной переработке / Л.И. Чернявская // Сахар. — 2006. — № 4. — С. 19–24.
18. Чернявская, Л. И. Методы оценки качества сахарной свеклы как сырья для получения сахара / Л.И. Чернявская // Сахар. — 2006. — № 3. — С. 40–45.
19. Bertuzzi, S. Determinazione a: K, Na, azoto alfa-amminico in zueche-rificio, implecazioni tecnologiche / S. Bertuzzi, N. Zurlecla // Ind saccorif. iral. — 1988. — Vol. 81, № 4. — P. 135–138.
20. Beziehungen zwieschen den Verhältnissen einiger Kationen und Anionen in der Zuckerrübe und deren grundlegenden qualitativen Merkmalen / A. Dandar [et al.] // C.I.T.S. — 1996. — S. 931–934.
21. 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.
22. Физико-химические процессы сахарного производства / И. С. Гулый [и др.]. — М.: Агропромиздат, 1987. — 264 с.
23. Бугаенко, И. Ф. Принципы эффективного сахарного производства / И. Ф. Бугаенко. — М.: ООО «Ин-машпроект», 2003. — 285 с.

Информация об авторах

Никулина Оксана Константиновна, кандидат технических наук, доцент, 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@belproduct.com

Яковлева Мария Романовна, магистр технических наук, младший 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@belproduct.com

Колоскова Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент, 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@belproduct.com.

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

E-mail: dymarov@tut.by

Information about authors

Nikulina Oksana Konstantinovna, PhD (Engineering), Associate Professor, Head of the Research laboratory of sugar production RUE “Scientific and Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus” (29, Kozlova str., 220037, Minsk, Republic of Belarus).

E-mail: sugar@belpoduct.com

Yakovleva Maryia Romanovna, Master of technical science, Junior Researcher RUE “Scientific and Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus” (29, Kozlova str., 220037, Minsk, Republic of Belarus).

E-mail: sugar@belpoduct.com

Koloskova Olga Viktorovna, PhD (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher RUE “Scientific and Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus” (29, Kozlova str., 220037, Minsk, Republic of Belarus).

E-mail: sugar@belpoduct.com

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

E-mail: dymarov@tut.by