ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-458-469
УДК 664.1.03:577.15

Оригинальная статья
http://fptt.ru

Улучшение технологических индикаторов полуфабрикатов производства сахара из бактериально инфицированной сахарной свеклы

Л. И. Беляева*, М. К. Пружин, А. В. Остапенко, В. Н. Гурова

Курский федеральный аграрный научный центр, Курск, Россия

Поступила в редакцию: 31.03.2021
Принята после рецензирования: 01.05.2021
Принята в печать: 15.07.2021

**e-mail: belyaeva_li@mail.ru*
© Л. И. Беляева, М. К. Пружин, А. В. Остапенко, В. Н. Гурова, 2021

Аннотация.
Введение. Технологические вспомогательные средства играют особую роль в технологии сахара, но результативность их комплексного применения требует всестороннего и глубокого изучения. Цель исследования – установление закономерностей изменения технологических индикаторов полуфабрикатов, полученных из бактериально инфицированной сахарной свеклы при совместном применении ферментного препарата, антимикробного средства и пеногасителя.
Объекты и методы исследования. Полуфабрикаты сока (диффузионный, преддефекованный, первой и второй сатурации) и сиропа, качество которых определяли по общепринятым методикам. Лабораторный опыт проводили на основе D-оптимального плана Бокса-Бенкена 2-го порядка для трех факторов на трех уровнях варьирования.
Результаты и их обсуждение. Выявлена положительная динамика улучшения технологических индикаторов (содержание сахарозы, скорость осаждения, мутность, цветность, общий эффект очистки) полуфабрикатов известково-углекислотной очистки и сгущения очищенного сока при совместном применении ферментного препарата Декстрасепт 2, антимикробного средства Бетасепт и пеногасителя Волтес ФСС 93 в процессе экстрагирования сахарозы из сахарной свеклы второй степени инфицирования слизистым бактериозом. Увеличение сахарозы в полуфабрикатах на уровне 1,1 % к массе сухих веществ подтверждено высоким эффектом очистки диффузионного сока (на 2,2 абс. %). Величины мутности очищенного сока и сиропа ниже пороговых значений, обусловленные возрастанием скорости осаждения преддефекованного сока и сока первой сатурации в 4,1 и 3,2 раза соответственно за счет эффективного удаления высокомолекулярных соединений. Доля вклада ферментного препарата варьировала от 40 до 71 %, антимикробного средства – от 19 до 49 %, пеногасителя – от 1,6 до 6,5 %. Значения многокритериального параметра оптимизации соответствовали уровням технологических индикаторов «очень хорошо» и «хорошо». Совместное введение (на 1000 т свеклы) Декстрасепт 2 6–8 кг, Бетасепт 1,5–2,0 кг и Волтес ФСС 93 15–20 кг в процессе экстрагирования сахарозы обеспечивает благоприятные условия протекания технологических процессов, способствующие повышению качества и выхода белого сахара на 0,25 %.
Выводы. Выявленные регрессионные зависимости могут быть рекомендованы для прогнозирования основных технологических индикаторов полуфабрикатов. Они позволяют определять результативность совокупного введения ферментного препарата, антимикробного средства и пеногасителя в производстве сахара. Дальнейшие исследования будут направлены на выявление закономерностей многофакторного взаимодействия указанных препаратов с точками их ввода и уровнем бактериального инфицирования сахарной свеклы.

Ключевые слова. Сахар, сахарная свекла, микроорганизмы, ферментный препарат, сок, сироп, мутность, цветность, регрессия

Для цитирования: Улучшение технологических индикаторов полуфабрикатов производства сахара из бактериально инфицированной сахарной свеклы / Л. И. Беляева [и др.] // Техника и технология пищевых производств. 2021. Т. 51. № 3. С. 458–469. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-458-469.

Original article
Available online at http://fptt.ru/eng

Improvement of Technological Indicators of Semi-Finished Products of Sugar Production from Bacterially Infected Sugar Beet

Lubov I. Belyaeva*, Michail K. Pruzhin, Alla V. Ostapenko, Valentina N. Gurova

Federal Agricultural Kursk Research Center, Kursk, Russia

Received: March 31, 2021

Accepted in revised form: May 01, 2021
Accepted for publication: July 15, 2021

**e-mail: belyaeva_li@mail.ru*
© L.I. Belyaeva, M.K. Pruzhin, A.V. Ostapenko, V.N. Gurova, 2021

Abstract.
Introduction. Technological aids play a special role in sugar production technology, but their complex effectiveness requires a comprehensive and in-depth study. The research objective was to establish the patterns of change in the technological indicators of semi-finished products obtained from bacterially infected sugar beets with the combined use of an enzyme preparation, antimicrobial agent, and defoamer.
Study objects and methods. The study involved such semi-finished products as juice (diffusion, pre-defecated, first and second saturation) and syrup, the quality of which was determined according to standard methods. The laboratory experiment was carried out on the basis of the second-order D-optimal Box-Behnken plan for three factors at three levels.
Results and discussion. The research revealed positive dynamics of the following technological indicators: sucrose content, deposition rate, turbidity, chromaticity, and general purification effect. The sugar beet had the second degree of infection with mucous bacteriosis. Purified juice underwent lime-carbon dioxide purification and thickening under the combination of enzyme preparation Dextrasept 2, antimicrobial agent Betasept, and antifoam agent Voltes FSS 93. The greatest increase in sucrose at the level of 1.1% by DM weight was confirmed by a higher overall effect of purification of diffusion juice (2.2 %). The values of turbidity of the purified juice and syrup were below the threshold values. The low values resulted from the increase in the sedimentation rate of the pre-defective juice and the juice of the first saturation by an average of 4.1 and 3.2 times, respectively, due to the effective removal of high molecular weight compounds. The share of the enzyme preparation was 40–71%, antimicrobial agent – 19–49%, defoamer – 1.6–6.5%. The values of the multicriteria optimization parameter corresponded with technological indicators. The optimal combination (per 1000 tons of beets) included 6–8 kg of Dextrasept 2, 1.5–2.0 kg of Betasept, and 15–20 kg of Voltes FSS 93. As a result, the yield of white sugar increased by 0.25%.
Conclusion. The regression dependencies can be recommended for predicting the main technological indicators of semi-finished products. The resulting data makes it possible to determine the effectiveness of the combined use of an enzyme preparation, antimicrobial agent, and defoamer in sugar production. Further research will identify the patterns of multifactorial interaction of these preparations.

Keywords. Sugar, sugar beet, microorganisms, enzyme preparation, juice, syrup, turbidity, color, regression

For citation: Belyaeva LI, Pruzhin MK, Ostapenko AV, Gurova VN. Improvement of Technological Indicators of Semi-Finished Products of Sugar Production from Bacterially Infected Sugar Beet. Food Processing: Techniques and Technology. 2021;51(3):458–469. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-3-458-469.

Введение

Современные мировые тенденции развития пищевых технологий основаны на использовании научных подходов, обеспечивающих высокое качество продуктов питания при снижении материало- и энергозатрат. В повышении конкурентоспособности российской пищевой продукции особую роль играют пищевые ингредиенты – пищевые добавки и технологические вспомогательные средства (технологические добавки). Их набор выражен функциональным многообразием, постоянным совершенствованием и импортозависимостью [1, 2].

В пищевой индустрии производство белого свекловичного сахара возможно при использовании технологических вспомогательных средств. Применение широкого функционального спектра средств (антимикробные, пеногасители, ферментные препараты, антинакипины, флокулянты, коагулянты, деколоранты, сорбенты, затравочные материалы и др.) обусловлено как сложностью, множественностью и ресурсоемкостью процессов, так и разным технологическим качеством перерабатываемой сахарной свеклы, в том числе микробиологически зараженной. В последние годы в объеме перерабатываемых высокопродуктивных гибридов сахарной свеклы отмечено увеличение доли бактериально инфицированных корнеплодов [3]. Наличие в технологической линии на начальных процессах благоприятных условий для выживания и развития микроорганизмов (невысокая температура, влага, воздух, легкая доступность к питательным веществам) становится причиной появления их устойчивых форм к различного рода угнетающим факторам. Толерантность и резистентность многих видов бактерий обусловлена их способностью к существованию в состоянии биологических пленок [4, 5]. Наиболее характерные биопленкообразователи для производства сахара представлены слизеобразующими бактериями *Leuconostoc mesenteroides*. Они продуцируют из целевого компонента сахарозы внеклеточный полисахарид декстран, служащий

основной структурной единицей экзополимерного матрикса биопленки.

Слизеобразующие бактерии отнесены к проблемным как с позиций технологии сахара, так и его использования в качестве сырьевого ингредиента для производства других пищевых продуктов. Развитие и перемещение слизеобразующей микрофлоры в пищевых системах процессов сахарного производства приводит к накоплению в полуфабрикатах нежелательных веществ: высокомолекулярных соединений декстрана и левана, органических кислот, газов. Эти вещества тормозят протекание технологических процессов, снижают качество получаемых полуфабрикатов и потребительские свойства вырабатываемого белого сахара, увеличивая цветность и мутность растворов сахара, ухудшая его кристаллоструктуру, снижая микробиологическую чистоту [6–8]. В результате снижены необходимые функционально-технологические свойства сахара как сырьевого ингредиента. Это создает проблемы в пищевых технологиях (возникает пенообразование, ослизнение, повышение вязкости) и приводит к ухудшению потребительских свойств вырабатываемых продуктов питания: помутнению, образованию хлопьевидного осадка в безалкогольных и алкогольных напитках; непрозрачности желейных и карамельных кондитерских изделий и др. [9, 10]. Поэтому поиск возможностей повышения качества белого сахара из инфицированной сахарной свеклы актуален с производственной точки зрения.

В научно-технической литературе недостаточно представлена информация по комплексному применению в производстве сахара технологических вспомогательных средств различной функциональной направленности. Начальный процесс экстрагирования сахарозы насыщен используемыми средствами. От его эффективного протекания зависит качество полуфабрикатов последующих процессов: от известково-углекислотной очистки диффузионного сока до получения белого сахара. При переработке инфицированной слизистым бактериозом сахарной свеклы обязательно применение антимикробного средства (для уничтожения и подавления развития микроорганизмов), пеногасителя (для снижения и устранения пенообразования), ферментного препарата гликозидазного действия (для гидролиза полисахаридов декстрана и левана). Изучению вопросов автономного применения конкретных препаратов этих средств (режимов и точек ввода, оптимальных доз и др.) посвящено большое количество публикаций отечественных и зарубежных ученых [11, 12]. Однако вопросу взаимодействия между ними не уделено достаточного внимания. В сфере применения пищевых ингредиентов к фокусу исследований отнесены взаимодействия между различными пищевыми добавками для повышения пищевой ценности и качества вырабатываемых продуктов питания [13].

В связи с этим цель исследования заключалась в установлении закономерностей изменения технологических индикаторов полуфабрикатов технологического потока, полученных при совместном применении ферментного препарата, антимикробного средства и пеногасителя в заданном диапазоне доз в процессе экстрагирования сахарозы из бактериально инфицированной сахарной свеклы.

Объекты и методы исследования

Исследования проводили в лаборатории технологий сахара НИИ сахарной промышленности ФГБНУ «Курский ФАНЦ». Объектами исследования стали полуфабрикаты сока (диффузионный, преддефекованный, первой и второй ступеней сатурации) и сиропа, полученные из корнеплодов сахарной свеклы второй степени инфицирования слизистым бактериозом, предназначенные для переработки на сахарных заводах Центрально-Черноземного региона в производственный сезон 2019–2020 гг.

В качестве технологических вспомогательных средств использовали антимикробное средство Бетасепт по ТУ 2381-001-92287788-2014; пеногаситель Волтес ФСС 93 по ТУ 2226-100-34686523-09; ферменто-антисептирующий препарат Декстрасепт 2 по ТУ 20.14.64-001-09265941-2017, содержащий декстраназу с активностью не менее 7000 ед./г и леваназу с активностью не менее 400 ед./мл.

Исследования проводили на основе методов физического и математического моделирования последовательных технологических процессов производства белого сахара: получение свекловичной стружки, экстрагирование сахарозы, известково-углекислотная очистка диффузионного сока, сгущение очищенного сока. Экстрагирование сахарозы из свекловичной стружки осуществляли при температуре 68–70 °С подогретой до 80 °С и подкисленной серной кислотой до pH 5,5–5,8 водопроводной водой в соотношении стружка:вода 1:1. Дозы и точки ввода применяемых вышеуказанных средств устанавливали согласно технологической документации по их применению.

Известково-углекислотную очистку диффузионного сока проводили путем многократной последовательной обработки известковым молоком $Ca(OH)_2$ плотностью 1,18–1,19 г/см^3 и углекислым газом CO_2 с удалением осадка несахаров. Соблюдали существующий технологический режим (температуру, щелочность, продолжительность) и алгоритм ведения процессов: предварительная дефекация, основная дефекация, первая ступень сатурации, фильтрование, дефекация, вторая ступень сатурации, фильтрование. Полученный очищенный сок сгущали выпариванием до содержания сухих веществ (СВ) 68–72 %.

Таблица 1. Сокращенная факториальная схема реализации лабораторного опыта

Table 1. Short factorial scheme of the experiment

Вариант опыта			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Факторы	Кодированные значения	A	+	+	−	−	+	+	−	−	0	0	0	0	0
		B	+	−	+	−	0	0	0	0	+	+	−	−	0
		C	0	0	0	0	+	−	+	−	+	−	+	−	0
	Натуральные значения, кг/1000 т сахарной свеклы	Ферментный препарат (A)	8	8	4	4	8	8	4	4	6	6	6	6	6
		Антимикробное средство (B)	2,0	1,0	2,0	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5	2,0	2,0	1,0	1,0	1,5
		Пеногаситель (C)	15	15	15	15	20	10	20	10	20	10	20	10	15

В качестве технологических индикаторов полуфабрикатов рассматривали информативные показатели качества, которые определяли по общепринятым в сахарном производстве методикам. Содержание сахарозы измеряли на поляриметре Saccharomat NIR W2, содержание сухих веществ – на рефрактометре DUR-SW, цветность – на фотометре Coloromat 100. Степень инфицирования слизистым бактериозом определяли методом микроскопирования окрашенного мазка «раздавленная капля» с использованием микроскопа Levenhuk D740T [12]. Скорость осаждения устанавливали по изменению высоты слоя осадка в течение первых 5 мин, выражая в см/мин. Мутность определяли комплексометрическим методом по разности содержания солей кальция – общего и растворимых [14].

Экспериментальная часть работы выполнена с использованием матрицы 13-вариантного лабораторного опыта на основе D-оптимального плана Бокса-Бенкена 2-го порядка для трех факторов на трех уровнях их варьирования (табл. 1).

Для оценки дисперсии воспроизводимости осуществлено дополнительное 5-кратное дублирование одного варианта на нулевых уровнях варьирования изучаемых факторов. Выявление закономерностей совокупного влияния ферментного препарата, антимикробного средства и пеногасителя на качество протекания изучаемых процессов выполняли с использованием практических положений теории планирования эксперимента на основе алгоритмов регрессионного анализа и методов проверки статистических гипотез.

Выявленные зависимости технологических индикаторов полуфабрикатов от вводимых доз ферментного препарата, антимикробного средства и пеногасителя представляли в виде регрессионных уравнений для кодированных и натуральных значений факторов. Статистическую значимость коэффициентов регрессии определяли с помощью t-критерия Стьюдента путем сравнения их численных значений с доверительным интервалом на уровне $\alpha = 0{,}05$. В качестве дополнительной характеристики адекватности уравнений регрессии использовали коэффициент детерминации (R^2). Его значение, близкое к 1,0, считали индикатором степени соответствия модели экспериментальным данным.

Статистическую значимость с уровнем $\alpha = 0{,}05$ эффектов действия и взаимодействия изучаемых факторов определяли по результатам параметрического дисперсионного анализа (модель первого типа) на основе показателя наименьшей существенной разности ($НСР_{05}$).

Натуральные значения каждого технологического индикатора по вариантам опыта переводили в безразмерную шкалу желательности на основе математической аппроксимации [15]. Обобщенный коэффициент желательности получен в соответствии с формулой средней геометрической с учетом всех оцениваемых индикаторов по каждому варианту опыта [16, 17].

Результаты и их обсуждение

Ранее проведенными нами исследованиями было установлено улучшение технологических индикаторов диффузионного сока, полученного из сахарной свеклы второй степени инфицирования слизистым бактериозом при совместном применении в процессе экстрагирования сахарозы ферментного препарата гликозидазного действия Декстрасепт 2, антимикробного средства Бетасепт и пеногасителя Волтес ФСС 93 с максимальными и средними дозами. Наилучшие результаты получены при следующих оптимальных дозах препаратов (на 1000 т свеклы): Декстрасепт 2 – 6–8 кг, Бетасепт – 1,5–2,0 кг и Волтес ФСС 93 – 15–20 кг [18]. Принципами разработки сложных технологических систем производства продуктов питания из растительного сырья предусмотрен системный учет влияющих факторов на большинство качественных показателей процессов технологического потока [19]. Данное исследование было направлено на выявление эффективности действия изучаемых факторов на последующих процессах известково-углекислотной очистки и сгущения очищенного сока, что обеспечит высокий уровень согласованности технологических рекомендаций.

По результатам факториального опыта выявлено и показано на рисунках 1–3 преимущественное

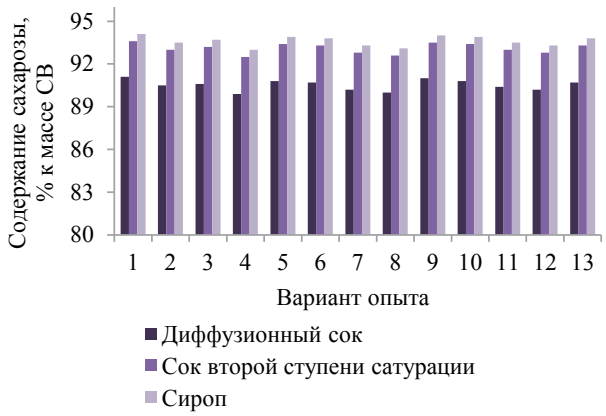


Рисунок 1. Влияние совместного применения ферментного препарата, антимикробного средства и пеногасителя на содержание сахарозы в диффузионном соке, соке второй ступени сатурации и сиропе по вариантам опыта

Figure 1. Effect of the combined use of an enzyme preparation, antimicrobial agent, and defoamer on the sucrose content in diffusion juice, second saturation juice, and syrup

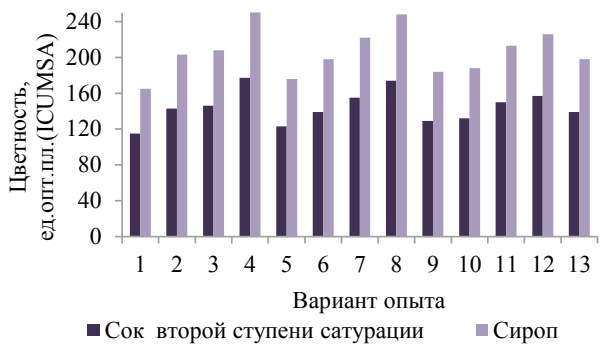


Рисунок 2. Влияние совместного применения ферментного препарата, антимикробного средства и пеногасителя на цветность сока второй ступени сатурации и сиропа по вариантам опыта

Figure 2. Effect of the combined use of an enzyme preparation, antimicrobial agent, and defoamer on the color of the second saturation juice and syrup

положительное совокупное влияние ферментного препарата Декстрасепт 2, антимикробного средства Бетасепт и пеногасителя Волтес ФСС 93 с максимальными и средними дозами (варианты № 1, 5, 6, 9, 10, 13) на изменение технологических индикаторов сока первой и второй ступеней сатурации, а также сиропа в сравнении с вариантом применения указанных препаратов с минимальными дозами (вариант № 4).

По данным рисунка 1 отмечено стабильное увеличение содержания сахарозы в исходном диффузионном соке, соке второй ступени сатурации (очищенном соке) и сиропе из-за возрастания доз введения изучаемых препаратов. В вариантах № 1, 5 и 9 увеличение было наибольшим – на 1,1 % к массе СВ в сравнении с вариантом № 4. Это обусловлено эффективным удалением несахаристых соединений в процессах экстрагирования сахарозы и известково-углекислотной очистки, что подтверждено повышением общего эффекта очистки диффузионного сока на 2,2 абс. % по этим вариантам. При прочих равных условиях протекания последующего процесса кристаллизации сахарозы совместное введение технологических вспомогательных средств способствовало повышению расчетного выхода сахара на 0,25 %.

Закономерное снижение цветности очищенного сока достигнуто в вариантах № 1, 5 и 9, по сравнению с вариантом № 4, на 35, 31 и 27 % соответственно. Уровень нарастания цветности сиропа по этим вариантам был ниже на 31 % (рис. 2).

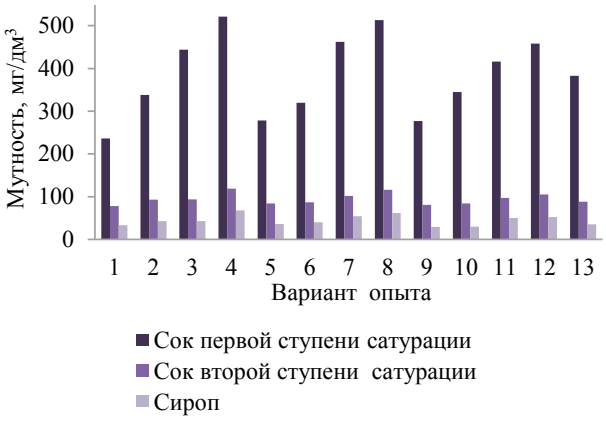


Рисунок 3. Влияние совместного применения ферментного препарата, антимикробного средства и пеногасителя на изменение мутности соков первой и второй ступеней сатурации и сиропа по вариантам опыта

Figure 3. Effect of the combined use of an enzyme preparation, antimicrobial agent, and defoamer on the turbidity of the first and second saturation juices and syrup

По указанным вариантам опыта отмечена положительная динамика изменения мутности соков первой и второй ступеней сатурации и сиропа (рис. 3). Соблюдение значений мутности полуфабрикатов по технологическому потоку в пределах 200–500 мг/дм^3 для сока первой ступени сатурации, 70–100 мг/дм^3 для сока второй ступени сатурации, 25–30 мг/дм^3 для сиропа позволяет достичь величины мутности вырабатываемого белого сахара на уровне (менее

2 мг/кг), характерном для сахара высокого качества [20]. В варианте № 4 мутность соков первой и второй ступеней сатурации и сиропа превышала приведенные пороговые значения. В вариантах № 1, 5, 9 снижение мутности в полуфабрикатах было наибольшим и составило: для сока первой ступени сатурации и сиропа – 49 %, для сока второй ступени сатурации – 32 %. Это свидетельствовало об эффективном удалении высокомолекулярных соединений в процессах экстрагирования и очистки при оптимальных дозах совместного введения ферментного препарата гликозидазного действия, антимикробного средства и пеногасителя. Отмеченное подтверждено высокой седиментационной способностью преддефекованного сока и сока первой ступени сатурации в указанных вариантах:

Таблица 2. Эффекты действия и взаимодействия изучаемых факторов для технологических индикаторов полуфабрикатов по результатам известково-углекислотной очистки диффузионного сока и сгущения очищенного сока

Table 2. Effects and interaction of the factors on the technological indicators of semi-finished products according to the results of lime-carbon dioxide purification of diffusion juice and thickening of purified juice

Полуфабрикат	Технологический индикатор*	Уровень варьирования (0, +)	Средние эффекты действия и взаимодействия факторов					
			A	B	AB	C	AC	BC
Преддефекованный сок	Y_1	0	1,19	0,84	–0,28	0,69	–0,07	0,08
		+	1,90	1,00	–0,55	0,30	–0,15	0,15
		$НСР_{05}$	0,13	0,13	0,08	0,13	0,08	0,08
Сок первой ступени сатурации	Y_2	0	1,35	1,10	–0,25	0,80	–0,10	0,05
		+	2,00	1,30	–0,50	0,40	–0,20	0,10
		$НСР_{05}$	0,09	0,09	0,05	0,09	0,05	0,05
	Y_3	0	–106,3	–45,3	–6,33	–25,22	2,33	–6,67
		+	–191,8	–107,8	–12,44	–50,89	4,89	–12,11
		$НСР_{05}$	11,73	11,73	6,77	11,73	6,77	6,77
Сок второй ступени сатурации	Y_4	0	0,46	0,34	–0,03	0,19	–0,03	–0,02
		+	0,53	0,58	–0,07	0,17	0,00	0,00
		$НСР_{05}$	0,09	0,09	0,05	0,09	0,05	0,05
	Y_5	0	–17,78	–10,78	2,22	–5,67	2,89	0,89
		+	–22,22	–19,22	4,78	–6,67	5,78	2,78
		$НСР_{05}$	2,46	2,46	1,42	2,46	1,42	1,42
	Y_6	0	–22,78	–13,33	0,56	–8,22	0,89	1,00
		+	–33,33	–26,44	1,67	–11,22	1,67	1,89
		$НСР_{05}$	1,71	1,71	0,99	1,71	0,99	0,99
	Y_7	0	1,39	1,17	0,18	0,11	–0,05	–0,28
		+	1,33	1,25	0,35	0,17	–0,10	–0,55
		$НСР_{05}$	0,49	0,49	0,28	0,49	0,28	0,28
Сироп	Y_8	0	0,46	0,32	–0,04	0,17	0,02	–0,01
		+	0,54	0,58	–0,06	0,17	0,01	0,01
		$НСР_{05}$	0,09	0,09	0,05	0,09	0,05	0,05
	Y_9	0	–19,11	–11,76	3,76	–5,11	1,06	0,24
		+	–18,73	–19,52	7,50	–3,73	2,03	0,51
		$НСР_{05}$	0,45	0,45	0,26	0,45	0,26	0,26
	Y_{10}	0	–32,67	–19,56	2,00	–12,11	1,00	2,44
		+	–47,67	–37,78	4,00	–16,22	2,00	4,56
		$НСР_{05}$	4,17	4,17	2,41	4,17	2,41	2,41

* Y_1 – скорость осаждения, см/мин (преддефекованный сок); Y_2 – скорость осаждения, см/мин; Y_3 – мутность, мг/дм^3 (сок первой ступени сатурации); Y_4 – сахароза, % к массе СВ; Y_5 – мутность, мг/дм^3; Y_6 – цветность, ед. опт. пл. (ед. ICUMSA); Y_7 – общий эффект очистки, % (сок второй ступени сатурации); Y_8 – сахароза, % к массе СВ; Y_9 – мутность, мг/дм^3; Y_{10} – цветность, ед. опт. пл. (ед. ICUMSA) (сироп).

* Y_1 – sedimentation rate, cm/min (pre-flawed juice); Y_2 – deposition rate, cm/min; Y_3 – turbidity, mg/dm^3 (first saturation juice); Y_4 – sucrose, % by DM weight; Y_5 – turbidity, mg/dm^3; Y_6 – chromaticity, units of optical density (ICUMSA); Y_7 – general purification effect, % (second saturation juice); Y_8 – sucrose, % by DM weight; Y_9 – turbidity, mg/dm^3; Y_{10} – chromaticity, units of optical density (ICUMSA) (syrup).

Таблица 3. Уравнения регрессии для кодированных значений факторов, отражающие закономерности изменения технологических индикаторов исследуемых полуфабрикатов

Table 3. Regression equations for coded values of factors, reflecting the patterns of change in technological indicators of the semi-finished products

Технологический индикатор*	Коэффициенты регрессии для факторов и их взаимодействий									Показатели адекватности уравнения			
	0	A	B	C	AA	AB	BB	BC	CC	$F_{факт.}$	F_{05}	R	R^2
Y_1	2,64	0,950	0,500	0,150	–	–0,275	–	–	–0,365	0,55	2,92	0,972	0,95
Y_2	3,36	1,000	0,650	0,200	–	–0,250	–	–	–0,360	1,85	2,92	0,964	0,95
Y_3	383,92	–96,00	–53,88	–25,38	–	–	–	–	–	1,67	2,80	0,991	0,98
Y_4	93,20	0,275	0,300	0,075	–0,150	–	–	–	–	0,52	2,85	0,983	0,97
Y_5	91,00	–11,13	–9,625	–3,500	5,625	–	–	–	–	1,06	2,85	0,979	0,96
Y_6	141,40	–16,50	–13,13	–5,625	5,100	–	–	–	–	1,93	2,85	0,984	0,97
Y_7	29,97	0,663	0,625	0,088	–0,714	–	–0,539	–0,275	–	1,31	3,00	0,962	0,93
Y_8	93,70	0,275	0,300	0,075	–0,150	–	–	–	–	0,43	2,85	0,983	0,97
Y_9	39,20	–9,375	–9,750	–1,875	8,170	3,750	–	–	–	0,96	2,92	0,986	0,97
Y_{10}	201,80	–23,750	–18,875	–8,125	7,450	–	–	–	–	0,45	2,85	0,985	0,97

* Y_1 – скорость осаждения, см/мин (преддефекованный сок); Y_2 – скорость осаждения, см/мин; Y_3 – мутность, мг/дм^3 (сок первой ступени сатурации); Y_4 – сахароза, % к массе СВ; Y_5 – мутность, мг/дм^3; Y_6 – цветность, ед. опт. пл. (ед. ICUMSA); Y_7 – общий эффект очистки, % (сок второй ступени сатурации); Y_8 – сахароза, % к массе СВ; Y_9 – мутность, мг/дм^3; Y_{10} – цветность, ед. опт. пл. (ед. ICUMSA) (сироп).

* Y_1 – sedimentation rate, cm/min (pre-flawed juice); Y_2 – deposition rate, cm/min; Y_3 – turbidity, mg/dm^3 (first saturation juice); Y_4 – sucrose, % by DM weight; Y_5 – turbidity, mg/dm^3; Y_6 – chromaticity, units of optical density (ICUMSA); Y_7 – general purification effect, % (second saturation juice); Y_8 – sucrose, % by DM weight; Y_9 – turbidity, mg/dm^3; Y_{10} – chromaticity, units of optical density (ICUMSA) (syrup).

скорость осаждения осадка была выше в 4,1 и 3,2 раза соответственно.

Результаты обработки экспериментальных данных по технологическим индикаторам полуфабрикатов, полученные при моделировании процессов экстрагирования сахарозы, известково-углекислотной очистки диффузионного сока и сгущения очищенного сока, приведены в таблице 2.

Показано положительное влияние ферментного препарата Декстрасепт 2, антимикробного средства Бетасепт и пеногасителя Волтес ФСС 93 на протекание процессов известково-углекислотной очистки и сгущения очищенного сока. Положительное влияние проявляется в высоких значениях технологических индикаторов преддефекованного сока, соков первой и второй ступеней сатурации, а также сиропа в сравнении с вариантами применения указанных препаратов в минимальных дозах. Главные эффекты факторов А, В и С были статистически значимыми, но существенные взаимодействия факторов АВ, АС и ВС проявили себя в меньшей степени и только для отдельных технологических индикаторов.

Наличие или отсутствие закономерного проявления влияния изучаемых факторов можно отразить результатами регрессионного анализа. С этой целью были получены полиномиальные зависимости, количественно связывающие влияние ферментного препарата (А), антимикробного средства (В) и пеногасителя (С) на состояние технологических индикаторов (отклики Y_1–Y_{10}) с учетом только значимых коэффициентов регрессии (табл. 3).

Из таблицы 3 видно, что приведенные регрессионные уравнения адекватно отражали влияние ферментного препарата Декстрасепт 2 (А), антимикробного средства Бетасепт (В) и пеногасителя Волтес ФСС 93 (С) на технологические индикаторы полуфабрикатов процессов известково-углекислотной очистки диффузионного сока и сгущения очищенного сока. Отмеченное подтверждено соответствующими фактическими значениями критерия Фишера ($F_{факт.}$) и коэффициентами детерминации (R^2). Например, уравнение регрессии для расчета зависимости мутности очищенного сока (Y_5) от кодированных значений переменных А, В и С можно представить в следующем виде (1):

$$Y_5 = 91{,}00 - 11{,}13A - 9{,}625B - 3{,}50C + 5{,}625AA \quad (1)$$

$$F_{факт.} = 1{,}06;\ F_{05} = 2{,}85;\ R = 0{,}979;\ R^2 = 0{,}96$$

По данным регрессионного анализа выявлены особенности изменения вклада изучаемых факторов и их взаимодействий в варьирование технологических индикаторов полуфабрикатов по результатам известково-углекислотной очистки диффузионного сока и сгущения очищенного сока (рис. 4).

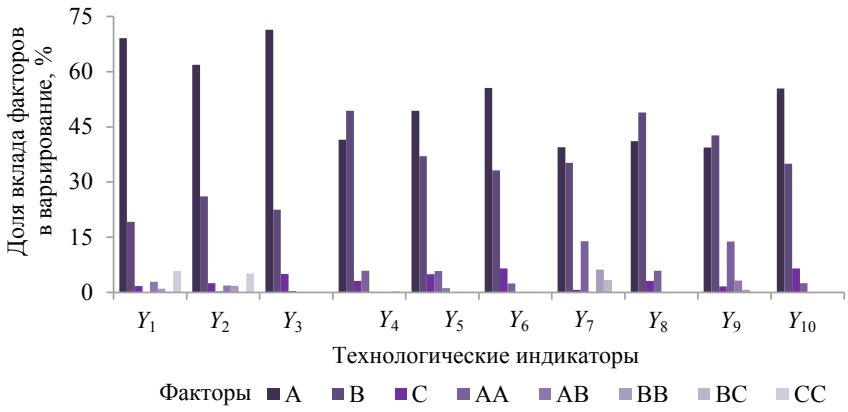


Рисунок 4. Доля вклада изучаемых факторов в варьирование технологических индикаторов полуфабрикатов по результатам известково-углекислотной очистки диффузионного сока и сгущения очищенного сока

Figure 4. Share of the factors in the variation of technological indicators of semi-finished products based on the results of the lime-carbon dioxide purification of diffusion juice and thickening of purified juice

Как следует из данных рисунка 4, доля вклада в варьирование выходных показателей фактора А составила 40–71 %, фактора В – 19–49 %, а фактора С –1,6–6,5 %.

Заметное квадратичное влияние фактора А выявлено только для Y_5, Y_6, Y_7, Y_9 и Y_{10}, а фактора В – только для Y_7 (общий эффект очистки диффузионного сока, %). Данные рисунка 4 иллюстрируют доминирующее влияние главных эффектов ферментного препарата и антимикробного средства на основные технологические индикаторы исследуемых полуфабрикатов по вариантам опыта.

Совокупное влияние ферментного препарата Декстрасепт 2, антимикробного средства Бетасепт и пеногасителя Волтес ФСС 93, совместно введенных в процесс экстрагирования сахарозы из бактериально инфицированной сахарной свеклы, на содержание сахарозы, цветность и мутность соков первой и второй ступеней сатурации и сиропа по вариантам опыта (рис. 1–3) соответствовало выдвинутой гипотезе исследования.

Статистически значимая роль главных эффектов факторов А, В и С для представленных в таблице 2 технологических индикаторов была обусловлена совокупным ингибирующим действием триады препаратов в оптимальных дозах на бактериальную инфицированность диффузионного сока в процессе экстрагирования сахарозы за счет результативного выполнения своих функциональных задач. В последствии это оказало положительное действие на протекание процессов очистки и сгущения сока.

Приведенные в таблице 3 уравнения регрессии для кодированных значений факторов, адекватно отражающие закономерности изменения показателей исследуемых полуфабрикатов, могут найти применение в прогнозных расчетах технологических индикаторов, ограниченных пределами численных значений изученных уровней варьирования. При необходимости можно выполнить прогнозные расчеты за пределами области факторного пространства, заданной матрицей плана опыта. Для этого необходимо перейти к натуральным значениям изучаемых факторов и получить соответствующее уравнение регрессии, которое на примере технологического индикатора мутности очищенного сока (Y_5) имело вид:

$$Y_5 = 214{,}37 - 22{,}44A - 19{,}25B - 0{,}70C + 1{,}41AA \quad (2)$$

На основе данного уравнения получены дополнительно к экспериментальным расчетные значения мутности очищенного сока (Y_5) в

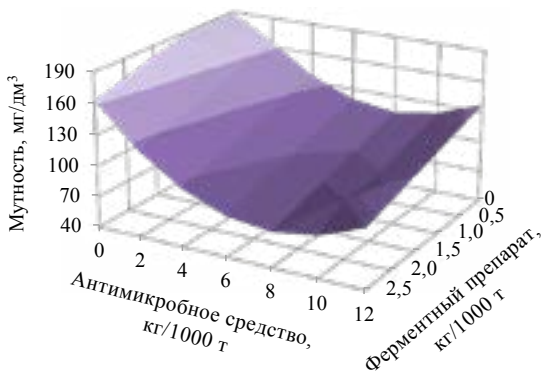
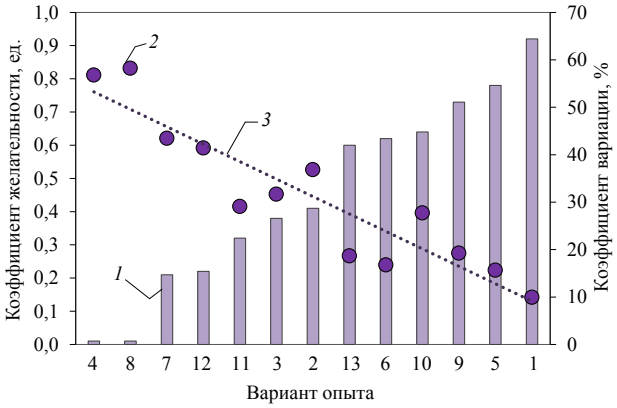


Рисунок 5. Зависимость мутности очищенного сока (Y_5) от доз внесения ферментного препарата (А) и антимикробного средства (В)

Figure 5. Effect of the amount of enzyme preparation (A) and antimicrobial agent (B) on the turbidity of the purified juice (Y_5)



1 − обобщенный коэффициент желательности, ед.;
2 − коэффициент вариации частных коэффициентов желательности, %;
3 − линия тренда для коэффициента вариации

Рисунок 6. Оценка уровня изменчивости состояния технологических индикаторов на основе коэффициента вариации частных коэффициентов желательности

Figure 6. Variability of technological indicators based on the variation coefficient of partial desirability coefficients

диапазоне доз ферментного препарата от 0 до 12 кг, антимикробного средства от 0 до 2,5 кг на фоне введения пеногасителя в дозе 15 кг/1000 т свеклы при второй степени инфицирования слизистым бактериозом корнеплодов (рис. 5).

Данные рисунка 5 отражают особенности изменения мутности очищенного сока, характерные для каждого сочетания доз ферментного препарата Декстрасепт 2 и антимикробного средства Бетасепт на постоянном уровне внесения пеногасителя Волтес ФСС 93.

На основе приведенных в таблице 3 регрессионных зависимостей по каждому из технологических индикаторов (Y_1–Y_{10}) невозможно получить консолидированную оценку влияния изучаемых факторов. Установлено, что универсальным способом получения такой оценки может быть обобщенный параметр оптимизации, который представляет собой функцию нескольких частных параметров. Одним из таких способов выступает обобщенная функция желательности Харрингтона (D). С ней производят все вычислительные операции, как с любым критерием системы, и используют этот показатель в роли критерия оптимизации [15−17].

В результате математической обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получено уравнение регрессии (3). Оно позволяет оценить влияние исследуемых факторов A, B и C на эффективность введения ферментного препарата, антимикробного средства и пеногасителя при помощи обобщенного показателя многокритериального параметра оптимизации (D):

$$D = 0{,}57 + 0{,}21A + 0{,}22B + 0{,}07C - 0{,}08AA + 0{,}06AB - 0{,}08CC \quad (3)$$

$$F_{факт.} = 1{,}12;\ F_{табл.} = 3{,}49;\ R^2 = 1{,}00$$

Результаты исследований свидетельствуют о дополнительной возможности использования частных коэффициентов желательности для характеристики уровня изменчивости состояния технологических индикаторов при установлении оптимальной дозы введения ферментного препарата Декстрасепт 2, антимикробного средства Бетасепт и пеногасителя Волтес ФСС 93 в процессе переработки бактериально инфицированной сахарной свеклы (рис. 6).

Критерии оценки были приняты на шкале желательности в пределах: «очень хорошо» – 1,00–0,80, «хорошо» – 0,80–0,63, «удовлетворительно» – 0,63–0,37, «плохо» – 0,37–0,20, «очень плохо» – 0,2–0,00. Из данных рисунка 6 следует, что только в вариантах № 1, 5 и 9 обобщенная функция желательности при одностороннем ограничении соответствует уровням технологических индикаторов «очень хорошо» и «хорошо». Это свидетельствует о целесообразности введения соответствующих им количеств исследуемых средств: ферментного препарата – 6–8 кг/1000 т свеклы, антимикробного средства – 1,5–2,0 кг/1000 т свеклы и пеногасителя – 15–20 кг/1000 т свеклы, обеспечивающих оптимальные условия протекания технологических процессов при переработке сахарной свеклы второй степени инфицирования слизистым бактериозом.

Выводы

Выявлена положительная динамика улучшения технологических индикаторов полуфабрикатов известково-углекислотной очистки и сгущения очищенного сока при совместном применении в процессе экстрагирования сахарозы из сахарной свеклы второй степени инфицирования слизистым бактериозом ферментного препарата Декстрасепт 2, антимикробного средства Бетасепт и пеногасителя Волтес ФСС 93 с максимальными и средними дозами в сравнении с минимальными дозами. Наибольшее увеличение сахарозы в полуфабрикатах (на 1,1 % к массе СВ) подтверждено высоким общим эффектом очистки диффузионного сока (на 2,2 абс. %) за счет эффективного удаления несахаристых соединений. Достигнуто снижение цветности на 27–35 %. Мутность полуфабрикатов была ниже пороговых значений. Это подтверждено возрастанием скорости осаждения преддефекованного сока и сока первой ступени сатурации в 4,1 и 3,2 раза соответственно.

Закономерности изменения технологических индикаторов аппроксимированы приведенными регрессионными уравнениями, адекватно отражающими совокупное влияние гликозидазного ферментного препарата, антимикробного средства и пеногасителя. Это подтверждено соответствующими

фактическими значениями критерия Фишера и коэффициентами детерминации. Доля вклада ферментного препарата варьировала от 40 до 71 %, антимикробного средства – от 19 до 49 %, а пеногасителя – от 1,6 до 6,5 %.

Установленные по экспериментальным данным регрессионные зависимости, позволяющие оценивать результативность введения фермента, антимикробного средства и пеногасителя, пригодны для прогнозных расчетов как состояния отдельных технологических индикаторов, так и обобщенного показателя многокритериального параметра оптимизации. Выявлены значения этого параметра, соответствующие уровням технологических индикаторов «очень хорошо» и «хорошо». На этой основе предложено совместное введение технологических вспомогательных средств в процессе экстрагирования сахарозы при переработке сахарной свеклы второй степени инфицирования слизистым бактериозом в следующих оптимальных дозах (на 1000 т свеклы): Декстрасепт 2 – 6–8 кг, Бетасепт – 1,5–2,0 кг и Волтес ФСС 93 – 15–20 кг, обеспечивающих благоприятные условия протекания технологических процессов, способствующие повышению качества и выхода белого сахара на 0,25 %.

Критерии авторства

Авторы в равной степени участвовали в подготовке и написании статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution

All the authors contributed equally to the study and bear equal responsibility for information published in this article.

Conflict of interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Список литературы

1. Technological additives as an element of dry milk properties directed formation / A. G. Galstyan [et al.] // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. 2019. Vol. 4. № 436. P. 95–102. https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.102.

2. Старовойтова К. В., Терещук Л. В. Перспективы отечественного производства микроингредиентов // Техника и технология пищевых производств. 2016. Т. 41. № 2. С. 77–83.

3. Robles-Gancedo S., López-Díaz T. M., Otero A. Identification of main bacteria and fungi found during beet sugar extraction in Spanish factories // International Sugar Journal. 2014. Vol. 116. № 1386.

4. Образование биологических пленок микроорганизмов на пищевых производствах / А. В. Тутельян [и др.] // Вопросы питания. 2019. Т. 88. № 3. С. 32–43. https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10027.

5. Методы борьбы с биологическими пленками на пищевых производствах / А. В. Тутельян [и др.] // Молочная промышленность. 2020. № 11. С. 48–53.

6. Effect of dextran and enzymatically decomposed dextran on the sucrose crystal shape / K. Abraham [et al.] // Zuckerindustrie. 2019. Vol. 144. № 10. P. 588–595. https://doi.org/10.36961/si23679.

7. Сапронова Л. А. Способы повышения качества кристаллического сахара // Хранение и переработка сельхозсырья. 2017. № 5. С. 9–14.

8. Borji A., Borji F.-E., Jourani A. Sugar industry: Effect of dextran concentrations on the sucrose crystallization in aqueous solutions // Journal of Engineering. 2019. Vol. 2019. https://doi.org/10.1155/2019/7987369.

9. Functionality of sugars in foods and health / R. A. Clemens [et al.] // Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2016. Vol. 15. № 3. P. 433–470. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12194.

10. The influence of different amounts of dextran and starch in crystallized sugar in the formation of floc in acidic carbonated solutions and alcoholic solutions / L. R. Lemos [et al.] // Sugar Tech. 2013. Vol. 15. № 1. P. 65–70. https://doi.org/10.1007/s12355-012-0188-3.

11. Development of a theoretical-experimental method for the optimum selection and dosage of antifoams in the sugar industry / M. T. Garcia Cubero [et al.] // Zuckerindustrie. 2000. Vol. 125. № 7. P. 524–530.

12. «Бетасепт» и «Декстрасепт»: на всех фронтах борьбы с бактериальной инфекцией / В. А. Сотников [и др.] // Сахар. 2017. № 4. С. 16–20.

13. Заворохина Н. В., Чугунова О. В., Минниханова Е. Ю. Исследование синергизма тройных смесей подсластителей, применяемых для низкокалорийных сладких блюд // Пищевая промышленность. 2019. № 9. С. 66–69. https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10134.

14. Содержание зольных элементов в белом сахаре, методы их контроля и снижения / Л. И. Чернявская [и др.] // Сахар. 2017. № 11. С. 40–47.

15. Любушин Н. П., Брикач Г. Е. Использование обобщенной функции желательности Харрингтона в многопараметрических экономических задачах // Экономический анализ: теория и практика. 2014. Т. 370. № 18. С. 2–10.

16. Pal S., Gauri S. K. A desirability functions-based approach for simultaneous optimization of quantitative and ordinal response variables in industrial processes // International Journal of Engineering, Science and Technology. 2018. Vol. 10. № 1. P. 76–87. https://doi.org/10.4314/ijest.v10i1.6.

17. Холоднов В. А., Лебедева М. Ю. Использование свободного программного обеспечения для решения задач многоцелевой оптимизации в химической технологии // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического университета (технического университета). 2018. Т. 69. № 43. С. 91–94. https://doi.org/10.15217/issn1998984-9.2018.43.91.

18. Технологические приемы ингибирования бактериальной инфицированности процесса экстрагирования сахарозы при производстве сахара / Л. И. Беляева [и др.] // Достижения науки и техники АПК. 2021. Т. 35. № 2. С. 66–72. https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10211.

19. Панфилов В. А. Синергетический подход к созданию технологий АПК будущего // Техника и технология пищевых производств. 2020. Т. 50. № 4. С. 642–649. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-642-649.

20. Чернявская Л. И. Как добиться качества сахара экспортного потенциала? Тезисы доклада на IV технологическом семинаре производителей сахара «Клуб технологов 2017» // Сахар. 2017. № 6. С. 22–27.

References

1. Galstyan AG, Turovskaya SN, Ryabova AE, Illarionova EE, Semipyatniy VK, Radaeva IA, et al. Technological additives as an element of dry milk properties directed formation. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences. 2019;4(436):95–102. https://doi.org/10.32014/2019.2518-170X.102.

2. Starovoytova KV, Terechuk LV. Prospects of domestic micro-ingredients production. Food Processing: Techniques and Technology. 2016;41(2):77–83. (In Russ.).

3. Robles-Gancedo S, López-Díaz TM, Otero A. Identification of main bacteria and fungi found during beet sugar extraction in Spanish factories. International Sugar Journal. 2014;116(1386).

4. Tutelyan AV, Yushina YuK, Sokolova OV, Bataeva DS, Fesyun AD, Datiy AV. Formation of biological films by microororganisms in food productions. Problems of Nutrition. 2019;88(3):32–43. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/0042-8833-2019-10027.

5. Tutelyan AV, Romanova YuM, Manevich BV, Yushina YuK, Fedorova LS, Sinitsyna OA, et al. Biofilm control methods in food production. Dairy Industry. 2020;(11):48–53. (In Russ.).

6. Abraham K, Brykczynski H, Rudolph-Floter ESJ, Schlumbach K, Schafer A, Floter E. Effect of dextran and enzymatically decomposed dextran on the sucrose crystal shape. Zuckerindustrie. 2019;144(10):588–595. https://doi.org/10.36961/si23679.

7. Sapronova LA. Methods for improving the quality of crystalline sugar. Storage and Processing of Farm Products. 2017;(5):9–14. (In Russ.).

8. Borji A, Borji F-E, Jourani A. Sugar industry: Effect of dextran concentrations on the sucrose crystallization in aqueous solutions. Journal of Engineering. 2019;2019. https://doi.org/10.1155/2019/7987369.

9. Clemens RA, Jones JM, Kern M, Lee S-Y, Mayhew EJ, Slavin JL, et al. Functionality of sugars in foods and health. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety. 2016;15(3):433–470. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12194.

10. Lemos LR, Nogueira A, Wosiacki G, Lacerda LG, Demiate IM. The influence of different amounts of dextran and starch in crystallized sugar in the formation of floc in acidic carbonated solutions and alcoholic solutions. Sugar Tech. 2013;15(1):65–70. https://doi.org/10.1007/s12355-012-0188-3.

11. Garcia Cubero MT, Gonzalez Benito G, Olmedo Fernandez F, Hiero Blanco JF. Development of a theoretical-experimental method for the optimum selection and dosage of antifoams in the sugar industry. Zuckerindustrie. 2000;125(7):524–530.

12. Sotnikov VA, Sotnikov AV, Uayld V, Moysh U. “Betasept” i “Dekstrasept”: na vsekh frontakh bor′by s bakterial′noy infektsiey [Betasept and Dextrasept: fighting bacterial infection]. Sahar. 2017;(4):16–20. (In Russ.).

13. Zavorokhina NV, Chugunova OV, Minnikhanova EYu. Investigation of synergism of ternary mixtures of sweeteners used to a low calorie sweet dishes. Food Industry. 2019;(9):66–69. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10134.

14. Chernyavskaya LI, Mokanyuk YuA, Kukhar VN, Chernyavskiy AP. Soderzhanie zol′nykh ehlementov v belom sakhare, metody ikh kontrolya i snizheniya [The content of ash elements in white sugar: control and reduction methods]. Sahar. 2017;(11):40–47. (In Russ.).

15. Liubushin NP, Brikach GE. Harrington’s desirability generalized function in multiple parameter economic tasks. Economic Analysis: Theory and Practice. 2014;370(18):2–10. (In Russ.).

16. Pal S, Gauri SK. A desirability functions-based approach for simultaneous optimization of quantitative and ordinal response variables in industrial processes. International Journal of Engineering, Science and Technology. 2018;10(1):76–87. https://doi.org/10.4314/ijest.v10i1.6.

17. Kholodnov VA, Lebedeva MYu. The use of free software for solving problems of multi-objective optimization in chemical engineering. Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University). 2018;69(43):91–94. (In Russ.). https://doi.org/10.15217/issn1998984-9.2018.43.91.

18. Belyaeva LI, Pruzhin MK, Ostapenko AV, Gurova VN, Sysoeva TI. Technological methods for inhibiting bacterial infection of the process of extracting sucrose in the sugar production. Achievements of Science and Technology in Agro-Industrial Complex. 2021;35(2):66–72. (In Russ.). https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10211.

19. Panfilov VA. Synergetic approach to agro-industrial technologies of the future. Food Processing: Techniques and Technology. 2020;50(4):642–649. (In Russ.). https://doi.org/10.21603/2074-9414-2020-4-642-649.

20. Chernyavskaya LI. Kak dobit′sya kachestva sakhara ehksportnogo potentsiala? Tezisy doklada na IV tekhnologicheskom seminare proizvoditeley sakhara “Klub tekhnologov 2017” [How to achieve sugar quality export potential? Proceedings of the IV technological seminar of sugar producers “Club of Technologists 2017”]. Sahar. 2017;(6):22–27. (In Russ.).