

Влияние ферментативной обработки на качество технологических соков при производстве сахара из бактериально инфицированной сахарной свеклы

Беляева Любовь Ивановна

*ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр» – НИИ сахарной промышленности
Адрес: 305021, город Курск, ул. Карла Маркса, дом 706
E-mail: belyaeva_li@mail.ru*

Пружин Михаил Константинович

*ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр» – НИИ сахарной промышленности
Адрес: 305021, город Курск, ул. Карла Маркса, дом 706
E-mail: xranenie46@yandex.ru*

Остапенко Алла Владимировна

*ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр» – НИИ сахарной промышленности
Адрес: 305021, город Курск, ул. Карла Маркса, дом 706
E-mail: th@rniisp.ru*

Лабузова Валентина Николаевна

*ФГБНУ «Курский федеральный аграрный научный центр» – НИИ сахарной промышленности
Адрес: 305021, город Курск, ул. Карла Маркса, дом 706
E-mail: lvn85@mail.ru*

Объектом исследований служили корнеплоды инфицированной слизистым бактериозом сахарной свеклы, клеточный сок и полуфабрикаты свеклосахарного производства. Цель исследований заключалась в установлении закономерностей изменения качества технологических соков при введении ферментного препарата гликозидазного действия в процессе экстрагирования сахарозы из бактериально инфицированной сахарной свеклы. Теоретически обоснованы предпосылки применения гликозидазных ферментных препаратов при переработке бактериально инфицированной сахарной свеклы. На основе физического и математического моделирования процессов экстрагирования сахарозы и известково-углекислотной очистки диффузионного сока выявлены зависимости изменения технологических показателей от дозы введения гликозидазного ферментного препарата и степени инфицированности слизистым бактериозом клеточного сока сахарной свеклы. Показана роль ферментативной обработки в улучшении качества технологических соков, в том числе увеличении содержания сахарозы в очищенном соке в среднем на 2,2%, повышении эффекта очистки диффузионного сока в среднем на 3,5%, снижении мутности очищенного сока – на 20%, что может обеспечить повышение качества и выход белого сахара на 1,1%. Достигнуто требуемое состояние пищевой системы с оптимальными (максимальными) показателями величины коэффициента желательности от 0,63 до 0,99, что соответствует хорошему и очень хорошему уровню в зависимости от степени инфицированности корнеплодов. Дальнейшие исследования будут направлены на обоснование условий рационального применения ферментных препаратов гликозидазного действия в оптимальной комбинации совместно с другими технологическими вспомогательными средствами при экстрагировании сахарозы из бактериально инфицированной сахарной свеклы.

Ключевые слова: сахарная свекла, ферментный препарат, бактериальная инфицированность, слизистый бактериоз, экстрагирование сахарозы, полуфабрикат, сок

Введение

На современном этапе сахарная промышленность Российской Федерации представляет собой динамично функционирующую и экспортно-ориентированную отрасль АПК. Определенную долю вклада в повышение выхода белого свекловичного сахара вносят применяемые технологические вспомогательные средства, набор которых в технологии сахара характеризуется функциональным разнообразием и постоянным развитием. При этом обоснованность, результативность и последствия их применения в технологических процессах требуют глубокого и всестороннего изучения. С учетом развития современной биотехнологии и увеличенных объемов перерабатываемого сырья все более актуальным становится использование ферментных препаратов в технологии производства сахара, целевое применение которых предусматривает устранение негативных проявлений, связанных с переработкой бактериально инфицированной сахарной свеклы современных гибридов. Образующиеся в такой сахарной свекле высокомолекулярные полисахаридные и белковые компоненты с гликозидными и пептидными связями в процессе переработки корнеплодов не удаляются, создают помехи в работе технологической линии, приводят к снижению качества полуфабрикатов (соков, сиропа, уфелей) и, соответственно, уменьшению выхода сахара, ухудшению его потребительских свойств (увеличению мутности раствора сахара). Перспективным приемом снижения их негативного влияния может стать применение ферментных препаратов преимущественно гликозидазного действия (Сотников, Мустафин, Сотников, Рудич, 2018, с. 22; Беляева, Остапенко, Лабузова, 2019, с. 25, 26).

Литературный обзор

Применение ферментных препаратов в перерабатывающих отраслях АПК является приоритетным направлением их развития. Наиболее активно ферментные препараты применяются в производствах пищевых продуктов – мясных, молочных, соков, пива, спирта, а также кормов для животных, то есть в тех производствах, где они являются незаменимыми участниками технологических процессов (Нечаев, 2001, с. 274; Толкачева, Черенков, Корнеева, Пономарев, 2017, с. 199; Уайтхерст, ван Оорст, 2013, с. 112-113, 196-197, 229, 276, 277, 307-314).

При этом уровень развития применения ферментных препаратов в Европе значительно выше, чем в России, где некоторые отрасли только начинают их применять. Вместе с тем российский рынок ферментов по-прежнему сильно зависит от иностранных производителей. Так, в 2016 г. отечественный рынок ферментных препаратов на 95% состоял из импорта, наибольший объем приходился на датские компании Novozymes и Danisco – 37%, на втором месте Китай – 11% (Абрамова, Серба, 2019, с. 13; Толкачева, Черенков, Корнеева, Пономарев, 2017, с. 201).

В пищевой индустрии ферментные препараты используются в качестве технологических вспомогательных средств, их применение в России регламентируется Техническим регламентом Таможенного союза ТР ТС 029/2012 «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств».

В производстве сахара целевое применение ферментных препаратов, в отличие от других пищевых технологий, связано с периодически возникающими отрицательными отклонениями в качестве сахароносного сырья (сахарной свеклы, сахарного тростника), связанными с образованием полимерных соединений, относящихся к трудноудаляемым несахарам, оказываемым негативное влияние на протекание технологических процессов, выход и качество вырабатываемого белого сахара. Эффективным способом их удаления является применение ферментных препаратов с соответствующей субстратной специфичностью. Промышленное применение за рубежом получили ферментные препараты класса амилаз, используемые для разрушения полисахарида крахмала в тростниково-сахарном производстве (Eqqlestone, Montes, Monge, Guidry, 2008, p. 105), и класса декстраназ – для гидролиза декстрана, образующегося в тростниково-сахарном и свеклосахарном производствах.

Ферментные препараты класса декстраназ длительное время применяются на сахарных заводах в Германии, Великобритании, США, Австрии и других странах при переработке сахарной свеклы, пораженной слизистым бактериозом (Hein, Rosner, Emerstorfer, 2008, p. 135-143; Абрахам, Хаген, Шлюмбах, Роде, Флютер, 2017, с. 35-42; Боулер, Воунс, 2012, с. 30-34; Хайн, Резнер, Эмеррстофер, 2009, с. 4-12; Нурман, 2009, с. 20-24). Их использование в процессе экстрагирования сахарозы показало значительное улучшение процесса фильтрации сока второй сатурации,

что привело к повышению производительности, снижению содержания кальциевых солей, сокращению расхода применяемых технологических вспомогательных средств в процессах, улучшению качества сахара.

В России до 2015 г. указанный способ не применялся по ряду причин: нерегулярности инфицирования корнеплодов сахарной свеклы слизистым бактериозом, отсутствия отечественных энзимов, дороговизны зарубежных препаратов и так далее. Только в последние годы на отечественных сахарных заводах сложился ряд значимых факторов, обусловивших необходимость применения ферментных препаратов в производстве белого свекловичного сахара при переработке бактериально инфицированной сахарной свеклы (Беляева, Остапенко, Лабузова, 2019, с. 25, 26). При этом подход к созданным препаратам целевого назначения учитывал изменившийся микробный профиль бактериально инфицированных корнеплодов сахарной свеклы современных гибридов и, соответственно, изменившийся образующийся полимерный состав (кроме декстрана, в большем количестве чем обычно, проявились леван, леваноподобные и белковые вещества), а также современные тенденции развития ассортимента линейки технологических средств (разработка многофункциональных комплексных препаратов). В результате на российских сахарных заводах при переработке бактериально инфицированной сахарной свеклы используют комплексные ферментные препараты (производство ООО Предприятие «ПромАсептика», Россия): Декстрасепт 2, Дефеказа, Филтраз, представляющие собой композиции из гидролитических энзимов с гликозидазной и протеолитической активностью – декстраназы, леваназы, фитазы, протеазы, коллоидазы (производство SternEnzym, Германия) (Сотников, Wild, Moisch, Рудич, 2019, с. 38, 39; Сотников, Сотников, Wild, Moisch, 2017, с. 20, 21).

В связи с незначительным ассортиментом ферментных препаратов, предназначенных для производства сахара, степень их использования в России оценивается как недостаточная.

Теоретическое обоснование

В пищевых технологиях применяются в основном ферментные препараты класса гидролаз – эстеразы, гликозидазы, протеазы, которые осуществляют разрыв внутримолекулярных слож-

ноэфирных, гликозидных и пептидных связей с присоединением элементов воды. При этом гликозидазы стереоспецифичны, катализируют гидролиз гликозидных связей определенной пространственной конфигурации (α - или β); протеазы обладают групповой специфичностью по отношению к белкам и пептидам (Римарева, Серб, Соколова, Борщева, Игнатова, 2017, с. 63). Так, энзим декстраназа, расщепляя α -1,6 – гликозидную связь полисахарида декстрана, разрушающе действует на него. Отличительной особенностью используемых в сахарном производстве декстраназ является их высокая активность при термоустойчивости (50...70°C) и широком диапазоне pH (5,7...8,8). Леваназа – энзим, катализирующий процессы гидролиза по β -2,6 – гликозидной связи полисахаридов левана и леваноподобных веществ, что, в конечном итоге, приводит к их разрушению.

Высокая специфичность ферментов обусловлена особой формой его молекулы, которая точно соответствует форме молекулы субстрата. Технологический эффект возникает благодаря взаимодействию энзима с полисахаридным компонентом, образованию фермент-субстратного комплекса, который по завершению реакции распадается на фермент и продукты – более короткие фрагменты, затем продолжается гидролиз самих фрагментов и, в конечном итоге, до мономерных единиц разрушаемого полимера (Эгглстон, Дилкз, Блоуэрс, Уинтарс, 2017, с. 31).

Практическое применение этих ферментных препаратов при переработке бактериально инфицированной сахарной свеклы показало, что стабилизировалась работа диффузионного и сокоочистительного отделений сахарного завода; повысилась скорость фильтрования соков; сократились потери сахара и улучшилось его качество.

Однако, приведенных в научно-технической литературе сведений об использовании ферментных препаратов при переработке бактериально инфицированной свеклы современных гибридов недостаточно для рационального их использования. В имеющейся информации отсутствуют полноценные сведения о зависимости влияния ферментных препаратов от степени бактериальной инфицированности корнеплодов сахарной свеклы. Не всегда всесторонне отражено действие энзимов на состояние пищевой системы диффузионного сока, качество полуфабрикатов процессов известково-углекислотной очистки, взаимосвязи ферментных препаратов с другими используе-

мыми в процессе экстрагирования сахарозы из инфицированного сырья технологическими вспомогательными средствами.

Цель наших исследований заключалась в установлении закономерностей изменения качества технологических соков при введении ферментного препарата гликозидазного действия в процесс экстрагирования сахарозы из бактериально инфицированной сахарной свеклы.

В задачи исследований входило:

- оценка влияния ферментного препарата Декстрасепт 2 в зависимости от дозы введения и степени инфицированности слизистым бактериозом клеточного сока на изменение технологических показателей состава полуфабрикатов (диффузионного и преддефекованного соков, соков первой и второй ступени сатурации);
- установление закономерностей изменения качества полуфабрикатов (диффузионного и преддефекованного соков, соков первой и второй ступени сатурации), полученных на этапах экстрагирования сахарозы и очистки диффузионного сока из бактериально инфицированной сахарной свеклы при введении ферментного препарата Декстрасепт 2;
- формирование обобщенного критерия оптимизации влияния ферментного препарата на основе использования функции желательности.

Гипотеза проведения исследований выдвинута на основе предположения о возможности существования и установления закономерностей изменения качества технологических соков при использовании ферментного препарата гликозидазного действия с последующей оптимизацией процесса экстрагирования сахарозы из бактериально инфицированной сахарной свеклы.

Процедура исследования

Исследования проводили в 9-ти вариантном лабораторном опыте (варианты 1, 4, 7 – без введения ферментного препарата; 2, 5, 8 – с введением ферментного препарата в дозе 4 кг/1000 т сахарной свеклы; 3, 6, 9 – в дозе 8 кг/1000 т сахарной свеклы) в соответствии с положениями теории планирования эксперимента на основе ротативного плана 2-го порядка для двух факторов на трех уровнях варьирования с последующей математической обработкой по общепринятым алгоритмам корреляционно-регрессионного и дисперсионного анализа и методам проверки

статистических гипотез (Розенберг, 2008, с. 193, 194). Дисперсию воспроизводимости определяли по результатам дополнительных анализов в центре плана эксперимента. Выявленные зависимости качественных показателей полуфабрикатов от степени инфицированности сахарной свеклы и вводимых доз ферментных препаратов представляли в виде регрессионных уравнений. Преобразование натуральных значений частных откликов в безразмерную шкалу желательности или предпочтительности выполняли на основе подобранного для каждого параметра уравнения вида $y = a \cdot x + b$ с последующим вычислением обобщенного коэффициента желательности по формуле расчета средней геометрической для всех параметров (Пичкалев, 2012, с. 25-28; Юсупова, 2017, с. 74, Trautmann, Weihs, 2006, p. 208).

В качестве источника ферментных препаратов гликозидазного действия использовали фермент-антисептирующий препарат Декстрасепт 2 по ТУ 20.14.64-001-09265941-2017 «Препарат технологический вспомогательный фермент-антисептирующий «Декстрасепт» (композиции: «1», «2», «6»). Технические условия». Указанный препарат представляет собой непрозрачную жидкость от светлого до темно-коричневого цвета со специфическим запахом; содержит в своем составе энзимы гликозидазного действия декстраназу с активностью не менее 7000 ед./г, леваназу с активностью не менее 400 ед./мл.

В качестве применяемых технологических вспомогательных средств – антимикробное средство Нависан М1 по ТУ ВУ 500523189.032-2010 «Средства дезинфицирующие «Нависан», пеногаситель Лапрол ПС-1 по ТУ 2226-042-10488057-2008 «Лапрол ПС-1. Технические условия».

В исследованиях использовали корнеплоды сахарной свеклы разной степени инфицированности слизистым бактериозом, выращенные в Курской области в 2018-2019 гг. Моделирование технологических процессов изучаемого участка отражало этапы технологического потока производства свекловичного сахара и заключалось в следующих операциях: отмывании корнеплодов; получении свекловичной стружки; экстрагировании из нее сахарозы; известково-углекислотной очистки диффузионного сока, включающей преддефекацию, основную дефекацию, первую ступень сатурации, фильтрование, дефекацию перед второй ступенью сатурации, вторую ступень сатурации и фильтрование. При моделировании

процессов соблюдали оптимальный существующий технологический режим их ведения. Расход извести для проведения очистки диффузионного сока рассчитывали по массе несахаров получаемого диффузионного сока. Применение ферментного препарата осуществлялось на фоне введения пеногасителя и антимикробного средства. Дозы и точки ввода применяемых средств устанавливали согласно технологической документации по их применению.

Качественные показатели технологических соков: содержание сахарозы, солей кальция, общий эффект очистки, скорость осаждения, фильтрационный коэффициент, цветность, мутность оценивали по общепринятым в сахарном производстве методикам; оценку степени инфицированности слизистым бактериозом клеточного сока корнеплодов проводили методом микроскопирования окрашенного мазка «раздавленная капля» и выражали через количество (штук) «облачков» (слизистых включений) (Сотников, Сотников, Уайлд, Мойш, 2017, с. 18, 19).

Результаты и их обсуждение

Результаты лабораторных анализов по основным технологическим показателям, полученным при моделировании процессов экстрагирования сахарозы и известково-углекислотной очистки диффузионного сока (преддефекация, первая и вторая ступени сатурации), приведены в Таблице 1.

Из данных Таблицы 1 видно, что ранее установленное устойчивое состояние пищевой системы диффузионного сока вариантов с введением ферментного препарата гликозидазного действия Декстрасепт 2 (Беляева, Остапенко, Лабузова, Сысоева, 2019, с. 122) положительно отразилось на протекании последующих процессов известково-углекислотной очистки, проявившихся в более высоких показателях качества преддефекованного сока, соков первой и второй ступеней сатурации в сравнении с вариантами без применения ферментного препарата. Причем, наилучшие технологические показатели соков отмечены в вариантах при дозах ферментного препарата 4 кг и 8 кг/1000 т сахарной свеклы. Выявлено, что преддефекованный сок обладал наилучшей фильтрационно-седиментационной способностью: скорость осаждения преддефекационного осадка была выше, соответственно, в 4,1 и 4,5 раз. Известно, что деструкция слизевых полисахаридных соединений в процессе экстрагирования

сахарозы приводит к повышению фильтруемости сока первой ступени сатурации (Пушанко, Лагода, Шурбованный, Пушанко, Хомичак, Запольский, 2017, с. 297-300; Боулер, Воунс, 2012, с. 30). Так, фильтрационный коэффициент был ниже, соответственно, в 2,2 и 1,9 раза. В этих вариантах наблюдалось увеличение общего эффекта очистки диффузионного сока, соответственно на 3,9 и 3,1%, а содержание сахарозы очищенного сока (сока второй ступени сатурации) – в среднем на 2,2% к массе СВ; снижение мутности очищенного сока, соответственно на 27 и 15%.

Средние эффекты влияния факторов на скорость осаждения осадка (Y_1), формируемого на преддефекации, существенно снижались под влиянием степени бактериальной инфицированности (фактор В) и повышались под влиянием ферментного препарата гликозидазного действия (фактор А). Фильтрационный коэффициент (Y_2) сока первой ступени сатурации заметно возрастал под влиянием фактора В и существенно снижался под влиянием фактора А. Достоверное влияние взаимодействия изучаемых факторов по указанному показателю установлено только на средних уровнях их варьирования. Отмечается значимое снижение содержания сахарозы сока второй ступени сатурации (Y_3) и общего эффекта очистки диффузионного сока (Y_4) под влиянием степени бактериальной инфицированности; существенное положительное действие ферментного препарата гликозидазного действия на численные значения этих показателей; а также на снижение мутности очищенного сока (Y_6).

По данным регрессионного анализа, установлен характер изменения вклада изучаемых факторов и их взаимодействий в варьирование технологических показателей полуфабрикатов по результатам известково-углекислотной очистки диффузионного сока (Рисунок 1).

Рисунок 1. Доля вклада изучаемых факторов в варьирование технологических показателей полуфабрикатов по результатам известково-углекислотной очистки диффузионного сока.

Как следует из Рисунка 1, доля вклада фактора А (ферментный препарат гликозидазного действия) изменялась от 7 до 73%, а фактора В (степень инфицированности слизистым бактериозом клеточного сока) – от 8 до 87%. Заметное квадратичное влияние фактора А выявлено только для скорости осаждения осадка, полученного на преддефекации (Y_4) – 18%, и фильтрационного коэффициента сока первой ступени сатурации

Таблица 1

Эффекты действия и взаимодействия изучаемых факторов для технологических показателей преддефектованного сока, соков первой и второй ступеней сатурации

Факторы	Сочетания уровней варьирования факторов А и В и эффекты их действия и взаимодействия									Средние эффекты		НСР ₀₅
										(-1;0)	(-1;+1)	
A*)	-	4	8	-	4	8	-	4	8			
B	4	4	4	8	8	8	12	12	12			
Y ₁ (скорость осаждения, 2,4...17,6, см/мин)**)												
A	-	12,2	13,4	-	10,9	11,5	-	9,6	10,1	10,9	11,7	2,0
B	-	-	-	-0,9	-2,2	-2,8	-1,8	-4,4	-5,1	-2	-3,8	2,0
AB	-	-	-	-	-1,3	-1,9	-	-2,6	-3,3	-1,3	-1,7	1,1
Y ₂ (фильтрационный коэфф., 5,2...16,3, с/см ²)												
A	-	-6,3	-6,1	-	-4,3	-5,9	-	-3,7	-6,1	-4,8	-6,0	1,8
B	-	-	-	0,9	2,9	1,1	4,8	7,4	4,8	1,6	5,7	1,8
AB	-	-	-	-	2,0	0,2	-	2,6	0,0	1,5	0,1	1,0
Y ₃ (содержание сахарозы, 84,9...92,5, % к массе СВ)												
A	-	2,2	2,1	-	1,7	2,1	-	1,7	2,0	1,9	2,1	0,4
B	-	-	-	-1,0	-1,5	-1,0	-5,4	-5,9	-5,5	-1,2	-5,6	0,4
AB	-	-	-	-	-0,5	0,0	-	-0,5	-0,1	-0,3	0,0	0,2
Y ₄ (общий эффект очистки д. с., 23,7...29,9, %)												
A	-	3,9	4,4	-	1,6	3,1	-	1,8	2,7	2,4	3,4	1,6
B	-	-	-	-0,3	-2,6	-1,6	-1,8	-3,9	-3,5	-1,5	-3,1	1,6
AB	-	-	-	-	-2,3	-1,3	-	-2,1	-1,7	-1,5	-1,0	0,9
Y ₅ (содержание солей Са, 0,10...0,25, % к массе СВ)												
A	-	0,0	-0,1	-	0,0	0,0	-	0,0	-0,1	0,0	-0,1	0,0
B	-	-	-	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,0
AB	-	-	-	-	0,0	0,0	-	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Y ₆ (мутность, 88...171, мг/мл)												
A	-	-31	-29	-	-16	-28	-	-28	-41	-25	-33	13
B	-	-	-	20	35	21	57	60	45	25	54	13
AB	-	-	-	-	15	1	-	3	-12	6,0	-3,7	7
Y ₇ (цветность, 128...252, ед. опт. пл.)												
A	-	-34	-31	-	-17	-29	-	-17	-24	-23	-28	12
B	-	-	-	22	39	25	90	107	97	29	98	12
AB	-	-	-	-	17	2	-	17	7	11	3	7

*) А – расход ферментного препарата, кг/1000 т свеклы; В – степень бактериальной инфицированности клеточного сока, шт.;

**) Y₁ – преддефектованный сок; Y₂ – сок первой ступени сатурации; Y₃, Y₄, Y₅, Y₆, Y₇ – сок второй ступени сатурации.

(Y₅) – 5%. Заметное квадратичное влияние фактора В получено только для содержания сахарозы сока второй ступени сатурации (Y₃) – 9% и цветности (Y₇) – 5%. В целом данные Рисунка 1 иллюстрируют доминирующее отрицательное влияние степени бактериальной инфицированности корнеплодов и отражают возможность снижения такого воздействия путем применения ферментного препарата гликозидазного действия.

Далее выполнена процедура формирования множественной регрессии для оценки параметров уравнения общего вида: $Y = 0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + \dots + b_p \cdot X_p$.

Получены уравнения регрессии, количественно связывающие влияние факторов А и В лабораторного эксперимента с откликом Y (Таблица 2).

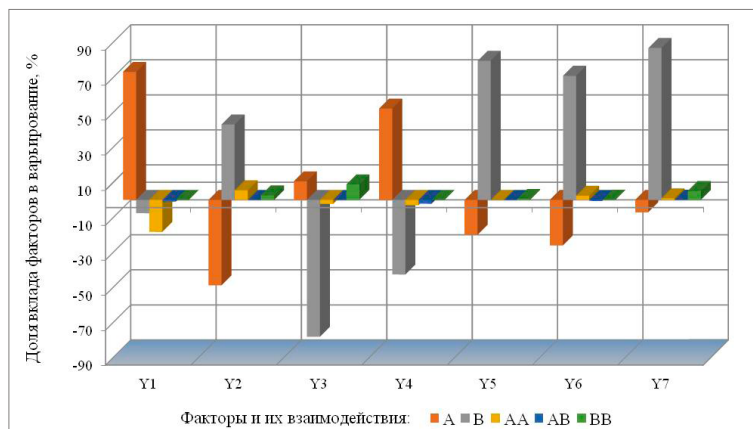


Рисунок 1. Доля вклада изучаемых факторов в варьирование технологических показателей полуфабрикатов по результатам известково-углекислотной очистки диффузионного сока.

Таблица 2

Уравнения регрессии для натуральных значений факторов, отражающие закономерности изменения показателей исследуемых продуктов по вариантам опытов

Показатель	Свободный коэффициент (0)	Коэффициенты регрессии для факторов и их взаимодействий					Уровень достоверности аппроксимации	
		A	B	AA	AB	BB	Fф	R2
Преддефектованный сок								
Y1*)	5,66	4,39750	-0,33958	-0,31583	-0,05156	0,00479	1,06	0,99
Сок первой ступени сатурации								
Y2	11,73	-1,62917	-0,49167	0,10938	x	0,07500	3,99	0,99
Сок второй ступени сатурации								
Y3	88,27	0,68750	0,93958	-0,05208	-0,00156	-0,10208	2,04	0,99
Y4	27,02	0,98750	-0,27709	-0,04375	-0,02656	x	3,99	0,98
Y5	0,111	-0,00583	0,00646	0,00010	-0,00016	0,00042	0,26	0,99
Y6	85,22	-6,91667	5,83333	0,54167	-0,18750	0,10417	3,02	0,99
Y7	173,7	-8,70834	-8,85417	0,34167	0,10938	1,29167	2,31	0,99

*) Y₁ – скорость осаждения, см/мин; Y₂ – фильтрационный коэф., с/см²; Y₃ – содержание сахарозы, % к массе СВ; Y₄ – общий эффект очистки д. с., %; Y₅ – содержание солей Ca, % к м. СВ; Y₆ – мутность, мг/мл; Y₇ – цветность, ед.опт.пл.

Приведенные в Таблице 2 регрессионные уравнения адекватно отражают влияние дозы введения гликозидазного ферментного препарата (A) и степени инфицированности слизистым бактериозом сахарной свеклы (B) на технологические показатели полуфабрикатов процессов очистки диффузионного сока. Отмеченное подтверждается соответствующими фактическими значениями критерия Фишера (F_{факт.}) и коэффициентами детерминации (R²).

Уравнения регрессии (Таблица 2) позволяют более наглядно отразить выявленные зависимости, что можно видеть на примере изменения мутности очищенного сока (Y₆) от нормы внесения гликозидазного фермента (A) и степени бактериальной инфицированности клеточного сока (B) (1):

$$Y_6 = 85,22 - 6,91667A + 5,83333B + 0,54167AA - 0,18750AB + 0,10417BB, \quad (1)$$

$$F_{\text{факт.}} = 3,02; F_{\text{табл.}} = 4,07; R^2 = 0,99$$

На основе уравнения (1) допустимо получение, дополнительно к экспериментальным, расчетных значений мутности сока второй степени сатурации (Y₆) в диапазоне дозы введения ферментного препарата от 0 до 12 кг на 1000 т свеклы и степени бактериальной инфицированности клеточного сока от 2 до 12 шт. «облачков».

Графическая визуализация зависимости мутности очищенного сока от дозы внесения ферментного препарата (A) и степени бактериальной инфицированности клеточного сока (B) представлена на Рисунке 2.

Рисунок 2. Зависимость мутности сока второй ступени сатурации (Y_6) от дозы введения гликозидного ферментного препарата (А) и степени бактериальной инфицированности клеточного сока (В).

Как показано на Рисунке 2, мутность сока второй ступени сатурации (Y_6) значительно уменьшается при увеличении дозы введения гликозидного ферментного препарата и снижении степени инфицированности клеточного сока. Это соответствует представлению о том, что мутность растворов сахара обусловлена в том числе содержащимися в сахарной свекле трудноудаляемыми ВМС с гликозидными связями (полисахаридами). Эти соединения в процессе переработки корнеплодов не удаляются, а включаются в кристаллы сахара, ухудшая его потребительские свойства – увеличивая мутность раствора сахара, которая является регламентируемым показателем при использовании сахара в качестве сырьевого ингредиента для производства кондитерских изделий, напитков (Чернявская, 2009, с. 43, 44). Вводимый ферментный препарат можно считать перспективным приемом разрушения полисахаридов.

По аналогии с отмеченным на основе уравнения регрессии (Y_4) получены, дополнительно к экспериментальным, расчетные значения общего эффекта очистки диффузионного сока в диапазоне дозы введения ферментного препарата от 0 до 12 кг на 1000 т свеклы и степени бактериальной инфицированности клеточного сока, выраженной через количество «облачков» от 2 до 12 шт., показанные на Рисунке 3.

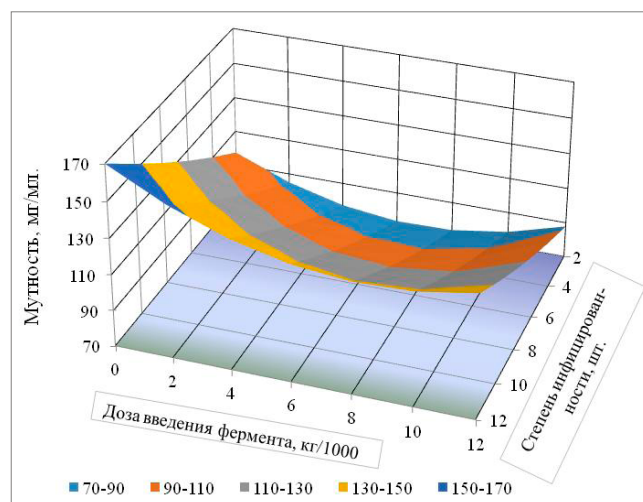


Рисунок 2. Зависимость мутности сока второй ступени сатурации (Y_6) от дозы введения гликозидного ферментного препарата (А) и степени бактериальной инфицированности клеточного сока (В).

Отраженная на Рисунке 3 поверхность свидетельствует о закономерном увеличении показателя общего эффекта очистки диффузионного сока от дозы введения ферментного препарата гликозидного действия и уменьшения степени инфицированности клеточного сока, что в целом соответствует выдвинутой исследовательской гипотезе.

Выявлено, что применение ферментного препарата Декстрасепт 2 улучшает технологические показатели полуфабрикатов, в том числе повышение эффекта очистки диффузионного сока в среднем на 3,5%, снижение мутности очищенного сока – на 20%, что способствует повышению качества и выхода белого сахара – расчетный выход сахара увеличивается на 1,1%.

Следовательно, представленные результаты свидетельствуют о наличии закономерности влияния дозы внесения гликозидного ферментного препарата и степени инфицированности клеточного сока слизистым бактериозом на технологические показатели полуфабрикатов этапов экстрагирования сахарозы и очистки диффузионного сока. Полученные регрессионные уравнения (Таблица 2) пригодны для расчета дозы введения гликозидного ферментного препарата, ориентированной на достижение заданных значений технологических показателей процессов экстрагирования сахарозы и очистки диффузионного сока.

На основе приведенных математических моделей (Таблица 2), построенных для каждого из параметров ($Y_1...Y_7$), невозможно одновременно

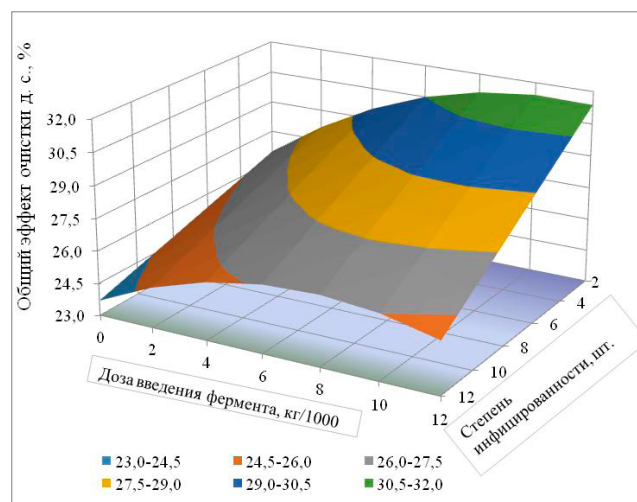


Рисунок 3. Зависимость общего эффекта очистки диффузионного сока, % (Y_4) от дозы введения ферментного препарата (А) и степени бактериальной инфицированности клеточного сока (В).

оптимизировать несколько функций. Считается установленным, что к универсальному способу можно отнести обобщенный параметр оптимизации, который строится как функция нескольких частных параметров. Одним из таких способов выступает обобщенная функция желательности Харрингтона. В основе построения этой обобщенной функции лежит идея преобразования натуральных значений частных откликов в безразмерную шкалу желательности или предпочтительности. Задача оптимизации связана с определением оптимальных условий, при которых протекает технологический процесс (Пичкалев, 2012, с. 26; Pal, Gauri, 2018, р. 79, 82). С обобщенной функцией желательности D можно производить все вычислительные операции, как с любым критерием системы, и использовать D в роли критерия оптимизации (Холоднов, Лебедева, 2018, с. 93, 94).

В результате математической обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получено уравнение регрессии, позволяющее оценить влияние исследуемых факторов A и B на эффективность введения гликозидазного фермента при разных уровнях инфицированности сахарной свеклы по обобщенному показателю параметра оптимизации ($K_{\text{жел}}$) (2).

$$K_{\text{жел.}} = 0,50 + 0,12417A + 0,01396B - 0,0076AA - 0,00172AB - 0,00448BB, \quad (2)$$

$$F_{\text{факт.}} = 2,32; F_{\text{табл.}} = 4,07; R^2 = 0,99.$$

Для оценки степени влияния входных параметров A и B на выходной обобщенный параметр в виде коэффициента желательности ($K_{\text{жел}}$) выполнена графическая интерпретация уравнения регрессии, позволяющая определить рациональные параметры использования исследуемого ферментного препарата (Рисунок 4).

По данным Рисунок 4 представляется возможность подтвердить целесообразность введения гликозидазного ферментного препарата в дозе от 4 до 8 кг на 1000 т корнеплодов сахарной свеклы при уровне бактериальной инфицированности в пределах наличия 2...8 «облачков» в клеточном соке. Данная ферментная обработка диффузионного сока позволит обеспечить требуемое состояние пищевой системы с показателями величины коэффициента желательности от 0,63 до 0,99, что соответствует хорошему и очень хорошему уровню в зависимости от инфицированности корнеплодов.

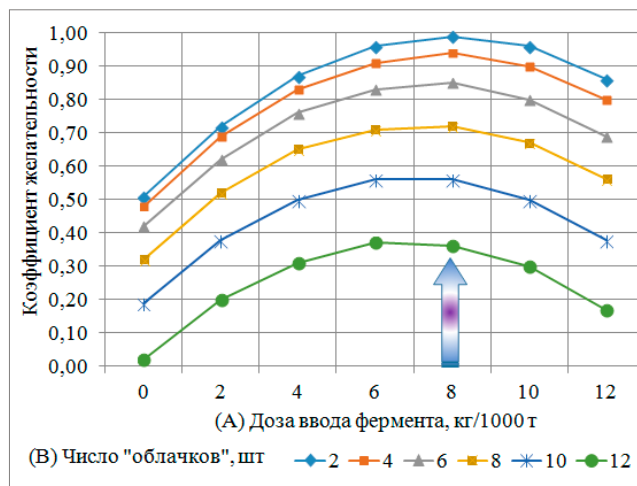


Рисунок 4. Зависимость коэффициента желательности от дозы введения гликозидазного ферментного препарата (А) и степени инфицированности слизистым бактериозом клеточного сока сахарной свеклы (В).

Выводы

Теоретически обоснованы предпосылки применения ферментных препаратов гликозидазного действия в свеклосахарном производстве при переработке бактериально инфицированной сахарной свеклы.

На основе физического и математического моделирования процессов экстрагирования сахарозы и известково-углекислотной очистки диффузионного сока выявлены зависимости изменения качества технологических соков от дозы введения фермента гликозидазного действия и степени инфицированности слизистым бактериозом клеточного сока сахарной свеклы.

Установлено, что введение ферментного препарата гликозидазного действия обеспечивает требуемое состояние пищевой системы с оптимальными (максимальными) показателями величины коэффициента желательности от 0,63 до 0,99, что соответствует хорошему и очень хорошему уровню в зависимости от степени инфицированности корнеплодов, а также улучшает технологические показатели полуфабрикатов, в том числе повышение эффекта очистки диффузионного сока в среднем на 3,5%, снижение мутности очищенного сока – на 20%, что может обеспечить повышение качества и выход белого сахара на 1,1%.

Дальнейшие исследования будут направлены на обоснование условий рационального применения ферментных препаратов гликозидазного действия в оптимальной комбинации совместно с другими технологическими вспомогательными средствами при экстрагировании сахарозы из бактериально инфицированной сахарной свеклы.

Литература

- Абрамова И.М., Серб Е.М. Биотехнологические процессы в производстве продуктов питания и кормов // Пищевая промышленность. 2019. № 4. С. 12–13.
- Абрахам К., Хаген С., Шлюмбах К., Роде А., Флютер Е. Некоторые аспекты применения декстраназы в сахарных растворах // Сахар. 2017. № 5. С. 34–42.
- Беляева Л.И., Остапенко А.В., Лабузова В.Н. Использование ферментных препаратов – актуальное направление в современной технологии сахара // Пищевая промышленность. 2019. № 4. С. 25–26.
- Беляева Л.И., Остапенко А.В., Лабузова В.Н., Сысоева Т.И. Состояние пищевой системы диффузионного сока из инфицированной слизистым бактериозом сахарной свеклы при введении ферментных препаратов гликозидазного действия // Вестник ВГУИТ. 2019. Т. 81. № 2. С. 119–124.
- Боулер Г., Воунс С. Применение декстраназы на свеклосахарных заводах Великобритании // Сахар и свекла. 2012. № 1. С. 30–34.
- Нечаев А.П. Пищевая химия. СПб.: ГИОРД, 2001. 592 с.
- Нурман Г. Опыт применения осажденного карбоната кальция в компании «Даниско Шугар» // Сахар и свекла. 2009. № 1. С. 20–24.
- Пичкалев А.В. Обобщенная функция желателности Харрингтона для сравнительного анализа технических средств // Исследования наукограда. 2012. № 1(1). С. 25–28.
- Проблемы экологического эксперимента. Планирование и анализ наблюдений / под ред. Г.С. Розенберга, Д.Б. Гелашвили, В.К. Шитикова. Тольятти: СамНЦ РАН; Кассандра, 2008. 274 с.
- Пушанко Н.Н., Лагода В.А., Шурбованный В.Н., Пушанко Н.Н., Хомичак Л.М., Запольский А.К. Теория и практика разделения суспензий в свеклосахарном производстве. Книга 1. Образование суспензий и их свойства. Киев: Изд-во Сталь, 2017. 541 с.
- Римарева Л.В., Серб Е.М., Соколова Е.Н., Борщева Ю.А., Игнатова Н.И. Ферментные препараты и биокаталитические процессы в пищевой промышленности // Вопросы питания. 2017. Т. 86. № 5. С. 63–74.
- Сотников В.А., Wild V., Moisch U., Рудич Т.В. Декстрановые, левановые и леваноподобные слизи в сахароварении // Сахар. 2019. № 4. С. 36–41.
- Сотников В.А., Мустафин Т.Р., Сотников А.В., Рудич Т.В. Обоснование применения ферментно-антисептирующих препаратов при переработке дефектной свеклы // Сахар. 2018. № 4. С. 18–24.
- Сотников В.А., Сотников А.В., Wild V., Moisch U. Сезон 2016 года: слизистый бактериоз // Сахар. 2017. № 3. С. 18–23.
- Сотников В.А., Сотников А.В., Уайлд В., Мойш У. «Бетасепт» и «Декстрасепт»: на всех фронтах борьбы с бактериальной инфекцией // Сахар. 2017. № 4. С. 16–20.
- Толкачева А.А., Черенков Д.А., Корнеева О.С., Пономарев П.Г. Ферменты промышленного назначения – обзор рынка ферментных препаратов и перспективы его развития // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 4. С. 197–203.
- Уайтхерст Р.Дж., ван Оорст М. Ферменты в пищевой промышленности. СПб.: Профессия, 2013. 408 с.
- Хайн В., Резнер Г., Эмеррстофер Ф. Меры по предотвращению производственных нарушений, вызванных декстраном // Сахар и свекла. 2009. № 1. С. 4–12.
- Холоднов В.А., Лебедева М.Ю. Использование свободного программного обеспечения для решения задач многоцелевой оптимизации в химической технологии // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2018. № 43(69). С. 91–94. DOI: <http://dx.doi.org/10.15217/issn1998984-9.2018.43.91>
- Чернявская Л.И. Контроль сахарного производства в зависимости от требований потребителей сахара: технологические аспекты // Сахар. 2009. № 7. С. 39–47.
- Эгглстон Д., Дилкз Э., Блоуэрс М., Уинтарс К. Успешное применение декстраназы на свеклоперерабатывающих заводах // Сахар. 2017. № 3. С. 30–40.
- Юсупова Г.Ф. Использование функции желателности в оценке уровня техносферной безопасности территории // Социально-экономические и технические системы: исследование, проектирование, оптимизация. 2017. № 3(76). С. 67–81.
- Eqgleston G., Montes B., Monge A., Guidry D. Optimization of α -amylase application in raw

- sugar manufacture. Part I: Characterization of commercial α -amylases // International Sugar Journal. 2008. № 1310. P. 97–104.
- Hein W., Rosner G., Emerstorfer F. Measures to prevent operational disturbances caused by dextran Dextran. Sugar Industry // Zuckerindustrie. 2008. Vol. 110. No. 1310. P. 135–143.
- 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. No. 1. P. 76–87.
- Trautmann H., Weihs C. On the distribution of the desirability index using Harrington's desirability function // Metrika. 2006. Vol. 63. No. 2. P. 207–213.

The Influence of Enzymatic Processing on a Quality of the Technological Juices in the Production of Sugar from the Bacterially Infected Sugar Beet

Lyubov I. Belyaeva

*Kursk Federal Agrarian Scientific Center" Research Institute of the Sugar Industry
70b, Karl Marks str., Kursk, 305021, Russian Federation
belyaeva_li@mail.ru*

Mikhail K. Pruzhin

*Kursk Federal Agrarian Scientific Center" Research Institute of the Sugar Industry
70b, Karl Marks str., Kursk, 305021, Russian Federation
xranenie46@yandex.ru*

Alla V. Ostapenko

*Kursk Federal Agrarian Scientific Center" Research Institute of the Sugar Industry
70b, Karl Marks str., Kursk, 305021, Russian Federation
th@rniisp.ru*

Valentina N. Labuzova

*Kursk Federal Agrarian Scientific Center" Research Institute of the Sugar Industry
70b, Karl Marks str., Kursk, 305021, Russian Federation
lvn85@mail.ru*

The object of research was sugar beet root crops that was infected with mucous bacteriosis; cell juice and sugar beet semi-finished products. The purpose of the research was to establish patterns of changing the quality of technological juices with the introduction of an enzyme preparation of glycosidase action in the process of extraction of sucrose from bacterially infected sugar beet. The prerequisites for the use of the glycosidase enzyme preparations in the processing of the bacterially infected sugar beet were theoretically justified. Based on the physical and mathematical modeling of the processes of extraction of sucrose and lime-carbon dioxide purification of diffusion juice, the dependences of the change in technological parameters on the dose of administration of the glycosidase enzyme preparation and the degree of infection of the sugar beet cell juice with mucous bacteriosis were revealed. There was shown the role of enzymatic processing in improving the quality of technological juices, including an increase in sucrose content in purified juice by an average of 2.2%, an increase in the effect of purifying diffusion juice by an average of 3.5%, a decrease in turbidity of purified juice by 20%, which can provide an increase in the quality and yield of white sugar by 1.1%. The required state of the food system with optimal (maximum) indicators of the coefficient of desirability from 0.63 to 0.99, which corresponds to a good and very good level depending on the degree of infection of root crops, has been achieved. Further research will be aimed at substantiating the conditions for the rational use of enzyme preparations of glycosidase action in the optimal combination with other technological aids in the extraction of sucrose from the bacterially infected sugar beet.

Keywords: sugar beet, enzyme preparation, bacterial infection, mucous bacteriosis, extraction of sucrose, semi-finished product, juice

References

- Abramova I.M., Serba E.M. Biotekhnologicheskie processy v proizvodstve produktov pitaniya i kormov [Biotechnological processes in the production of food and feed]. *Pishchevaya promyshlennost [Food industry]*, 2019, no. 4, pp. 12–13.
- Abraham K., Hagen P., Schlumbach K., Rode A., Flyuter E. Nekotorye aspekty primeneniya dekstranazy v saharnykh rastvorah [Some aspects

- of the use of dextranase in sugar solutions]. *Sakhar [Sugar]*, 2017, no. 5, pp. 34–42.
- Belyaeva L.I., Ostapenko A.V., Labuzova V.N. Ispolzovanie fermentnykh preparatov – aktualnoe napravlenie v sovremennoy tekhnologii sahara [The use of enzyme preparations is an actual direction in modern sugar technology]. *Pishchevaya promyshlennost [Food industry]*, 2019, no. 4, pp. 25–26.
- Belyaeva L.I., Ostapenko A.V., Labuzova V.N., Sysoeva T.I. Sostoyanie pishchevoj sistemy diffuzionnogo soka iz inficirovannoy slizistym bakteriozom saharnoy svekly pri vvedenii fermentnykh preparatov glikozidaznogo dejstviya [The state of the food system of diffusion juice from sugar beet infected with mucosal bacteriosis with the introduction of enzyme preparations of glycosidase action]. *Vestnik VGUIT [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technology]*, 2019, vol. 81, no. 2, pp. 119–124.
- Bowler G., Vones P. Primenenie dekstranazy na sveklosaharnykh zavodakh Velikobritanii [The use of dextranase in beet sugar factories in the UK]. *Sakhar i svekla [Sugar and beet]*, 2012, no. 1, pp. 30–34.
- Nechaev A.P. Pishchevaya khimiya [Food chemistry]. St. Petersburg: GIOR, 2001. 592 p.
- Nurman G. Opyt primeneniya osazhennogo karbonata kalciya v kompanii «Danisko SHugar» [Experience with the use of precipitated calcium carbonate in the company Danisko Sugar]. *Sakhar i svekla [Sugar and beet]*, 2009, no. 1, pp. 20–24.
- Pichkalev A.V. Obobshchennaya funkciya zhelatelnosti Harringtona dlya sravnitel'nogo analiza tekhnicheskikh sredstv [Generalized Harrington desirability function for a comparative analysis of technical means]. *Issledovaniya naukoigrada [Research in the Science City]*, 2012, no. 1(1), pp. 25–28.
- Pushanko N.N., Lagoda V.A., Shurbovanny V.N., Pushanko N.N., Homichak L.M., Zapolskiy A.K. Teoriya i praktika razdeleniya suspenzij v sveklosaharnom proizvodstve. Kniga 1. Obrazovanie suspenzij i ih svojstva [Theory and practice of separation of suspensions in beet sugar production. Book 1. The formation of suspensions and their properties]. Kiev: Steel Publishing House, 2017. 541 p.
- Problemy ekologicheskogo eksperimenta. Planirovanie i analiz nablyudenij [Problems of an environmental experiment. Planning and analysis of observations]. Ed. by G.P. Rosenberg, D.B. Gelashvili, V.K. Shitikova. Tolyatti: SamRC RAS; Kassandra, 2008. 274 p.
- Rimareva L.V., Serba E.M., Sokolova E.N., Boorshcheva Yu.A., Ignatova N.I. Fermentnye preparaty i biokataliticheskie processy v pishchevoj promyshlennosti [Enzyme preparations and biocatalytic processes in the food industry]. *Voprosy pitaniya [Nutrition Issues]*, 2017, vol. 86, no. 5, pp. 63–74.
- Sotnikov V.A., Wild V., Moisch U., Rudich T.V. Dekstranovye, levanovye i levanopodobnye slizi v saharovarenii [Dextran, Levan and Levan-like mucus in sugar production]. *Sakhar [Sugar]*, 2019, no. 4, pp. 36–41.
- Sotnikov V.A., Mustafin T.R., Sotnikov A.V., Rudich T.V. Obosnovanie primeneniya fermento-antiseptiruyushchih preparatov pri pererabotke defektnoy svekly [Justification for the use of enzyme-antiseptic drugs in the processing of defective beets]. *Sakhar [Sugar]*, 2018, no. 4, pp. 18–24.
- Sotnikov V.A., Sotnikov A.V., Wilde W., Moish U. «Betasept» i «Dekstrasept»: na vsekhn frontakh borby s bakterialnoy infekciey [“Betasept” and “Dextrasept”: on all fronts of the fight against bacterial infection]. *Sakhar [Sugar]*, 2017, no. 4, pp. 16–20.
- Sotnikov V.A., Sotnikov A.V., Wild V., Moisch U. Sezon 2016 goda: slizistyj bakterioz [2016 season: mucous bacteriosis]. *Sakhar [Sugar]*, 2017, no. 3, pp. 18–23.
- Tolkacheva A.A., Cherenkov D.A., Korneeva O.P., Ponomarev P.G. Fermenty promyshlennogo naznacheniya – obzor rynka fermentnykh preparatov i perspektivy ego razvitiya [Industrial enzymes – a review of the enzyme preparations market and prospects for its development]. *Vestnik VGUIT [Bulletin of the Voronezh State University of Engineering Technology]*, 2017, vol. 79, no. 4, pp. 197–203.
- Whitehurst R.J., van Oorst M. Fermenty v pishchevoj promyshlennosti [Enzymes in the food industry]. St. Petersburg: Profession, 2013. 408 p.
- Hein V., Rezner G., Emerrstofer F. Mery po predotvrashcheniyu proizvodstvennykh narushenij, vyzvannykh dekstranom [Measures to prevent industrial disturbances caused by dextran]. *Sakhar i svekla [Sugar and beet]*, 2009, no. 1, pp. 4–12.
- Kholodnov V.A., Lebedeva M.Yu. Ispolzovanie svobodnogo programmnoy obespecheniya dlya resheniya zadach mnogocelevoj optimizatsii v himicheskoy tekhnologii [The use of free software to solve the problems of multi-purpose optimization in chemical technology]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) [Bulletin of the St. Petersburg State*

- Technological Institute (Technical University)*], 2018, no. 43(69), pp. 9–94. DOI: <http://dx.doi.org/10.15217/issn1998984-9.2018.43.91>
- Chernyavskaya L.I. Kontrol saharnogo proizvodstva v zavisimosti ot trebovanij potrebitelej sahara: tekhnologicheskie aspekty [Control of sugar production depending on the requirements of sugar consumers: technological aspects]. *Sakhar [Sugar]*, 2009, no. 7, pp. 39–47.
- Eggleston D., Dilkz E., Blouers M. Winters K. Uspeshnoe primenenie dekstranazy na sveklopererabatyvayushchih zavodah [Successful use of dextranase in beet processing plants]. *Sakhar [Sugar]*, 2017, no. 3, pp. 30–40.
- Yusupova G.F. Using the desirability function in assessing the level of technosphere safety of a territory. *Socio-economic and technical systems: research, design, optimization*, 2017, no. 3(76), pp. 67–81.
- Eqgleston G., Montes B., Monge A., Guidry D. Optimization of α -amylase application in raw sugar manufacture. Part I: Characterization of commercial α -amylases. *International Sugar Journal*, 2008, no. 1310, pp. 97–104.
- Hein W., Rosner G., Emerstorfer F. Measures to prevent operational disturbances caused by dextran Dextran. *Sugar Industry / Zuckerindustrie*, 2008, vol. 110, no. 1310, pp. 135–143.
- Pal P., Gauri P.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, no. 1, pp. 76–87. DOI: <http://dx.doi.org/10.4314/ijest.v10i1.6>
- Trautmann H., Weihs C. On the distribution of the desirability index using Harrington's desirability function. *Metrika*, 2006, vol. 63, no. 2, pp. 207–213.