



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 663 : 636.087.24 : 519.86
doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.018



РАЗРАБОТКА МУЛЬТИЭНЗИМНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ГИДРОЛИЗА ПИВНОЙ ДРОБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Виктория Петровна Вистовская ¹, Елена Петровна Каменская ²,
Денис Сергеевич Кожемякин ³, Елена Сергеевна Дикалова ⁴

^{1, 2, 3, 4} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ ypvist@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0606-4599>

² ekam2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3760-6914>

³ denkzm1998@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4051-569X>

⁴ des_1983@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5722-7423>

Аннотация. Исследование посвящено составлению мультиэнзимной композиции для гидролиза пивной дробины с применением методов математического моделирования. Объектом исследования являлась пивная дробина, полученная при производстве светлого пива по классической технологии. Для ферментализации использовались комплексные ферментные препараты производства ООО ПО «Сиббиофарм» (г. Бердск), обладающие целлюлолитическим, ксиланазным, β -глюканазным и протеолитическим действиями: «Целлолюкс А», «Целлолюкс БГК», «Протосубтилин». В эксперименте пивная дробина смешивалась с водой температурой 51 ± 2 °С в соотношении 1:5. Полученная суспензия после внесения ферментных препаратов термостатировалась при температуре 50 °С при периодическом перемешивании в течение шести часов. Каждый час отбирались пробы, которые подвергались центрифугированию, надосадочная жидкость использовалась для определения содержания редуцирующих сахаров и аминного азота. В результате установлены дозировки внесения ферментных препаратов, значения которых использовались при планировании и постановке полного факторного эксперимента ПФЭ ²⁴ со следующими факторами: продолжительность гидролиза и дозировка каждого из трех ферментных препаратов. На основании результатов серии экспериментов получены два уравнения регрессии, описывающие процессы накопления редуцирующих сахаров и аминного азота при совместном действии выбранных факторов. Полученные математические модели соответствовали требованиям адекватности по критерию Фишера, а также были апробированы в условиях эксперимента, установленные значения находились в пределах стандартных отклонений. В результате анализа полученных зависимостей определены соотношения факторов, обеспечивающих оптимальное совместное накопление редуцирующих сахаров и аминного азота.

Ключевые слова: пивная дробина, ферментные препараты, редуцирующие сахара, аминный азот, математическое моделирование, вторичные сырьевые ресурсы, пиво, биоконверсия, ферментативный гидролиз.

Для цитирования: Разработка мультиэнзимной композиции для гидролиза пивной дробины с использованием методов математического моделирования / В. П. Вистовская [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 3. С. 134–141. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.018. EDN: <https://elibrary.ru/KSGYGV>.

DEVELOPMENT OF A MULTIENTZYMATIC COMPOSITION FOR BREWER'S SPENT GRAIN HYDROLYSIS THROUGH USE OF MATHEMATICAL MODELING METHODS

Victoria P. Vistovskaya ¹, Elena P. Kamenskaya ²,
Denis S. Kozhemyakin ³, Elena S. Dikalova ⁴

^{1, 2, 3, 4} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ vpvist@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0000-0606-4599>

² ekam2007@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3760-6914>

³ denkzm1998@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4051-569X>

⁴ des_1983@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5722-7423>

Abstract. *The study was focused on preparing a multienzymatic composition for brewer's spent grain hydrolysis through the use of mathematical modeling methods. The object of the study was spent grain obtained through traditional brewery. Complex cellulolytic, xylanasic, β -glucanasic and proteolytic enzyme preparations produced by Production Association Sibbiopharm Ltd. (city of Berdsk) were used for enzymolysis: Cellolux-A, Cellolux BGK, Protosubtilin. In the experiment, spent grain was mixed with water at the temperature of 51 ± 2 °C at a 1:5 ratio. Upon introducing the enzyme preparations, the resulting suspension was maintained at the temperature of 50 °C with intermittent mixing in the course of six hours. Samples, which were collected hourly, underwent centrifugation and the supernatant fluid was used to determine the concentration of reducing sugars and amino nitrogen. As a result, the dosages of enzyme preparation introduction have been determined, the values of which were used to design and conduct a full factorial experiment FFE 2⁴ with the following factors: the duration of hydrolysis and the dosage of each of the three enzyme preparations. On the basis of the results of a series of experiments, two regression equations which described the processes of reducing sugars and amino nitrogen accumulation, with both factors in co-operation, were deduced. The resulting mathematical models were shown to be adequate by passing the F-test and were tested experimentally, with the values determined not exceeding the observational error. As a result of analyzing the deduced correspondences, the factor ratios which achieve the most efficient co-accumulation of reducing sugars and amino nitrogen were specified.*

Keywords: *brewer's grains, enzyme preparations, reducing sugars, amine nitrogen, mathematical modeling, secondary raw materials, beer, bioconversion, enzymatic hydrolysis.*

For citation: Vistovskaya, V.P., Kamenskaya, E.P., Kozhemyakin, D.S. & Dikalova, E.S. (2023). Development of a multienzymatic composition for brewer's spent grain hydrolysis through the use of mathematical modeling methods. *Polzunovskiy vestnik*, (3), 134-141. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.03.018. <https://elibrary.ru/KSGYGV>.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема рационального использования всех видов материальных и топливно-энергетических ресурсов рассматривается как одна из основных в повышении эффективности общественного производства. Актуальная задача состоит в том, чтобы вовлечь в сферу производства не только сельскохозяйственное сырье, перерабатываемое на предприятиях, но и вторичные сырьевые ресурсы (ВСР), так называемые «отходы», являющиеся ценным сырьем для создания продукции пищевого, технического и кормового назначения. Кроме того, их умелое и бережное использование позволяет создать дополнительные источники сырья и топлива, сократить площади под посевы технических культур, устранить угрозу

загрязнения окружающей среды, а также организовать энергосберегающие малоотходные и безотходные производства.

В последние годы в России вновь возобновился интерес к научно-исследовательским работам, позволяющим повысить эффективность использования вторичных сырьевых ресурсов и обосновать целесообразность малоотходных технологий производства пищевых продуктов. К так называемым технологиям «нового поколения» следует отнести биотехнологические способы утилизации отходов. Продукты, получаемые биотехнологическими способами, выгодно отличаются от традиционных химических тем, что сырьем для их получения служат возобновляемые материалы животного и растительного происхождения, а также отходы различных производств.

Для пивоваренной отрасли одной из ведущих отраслей в пищевой промышленности как России, так и других стран, вопросы разработки малоотходной и безотходной технологии имеют первостепенное значение, поскольку в производстве пива степень использования сырья для получения готового продукта составляет примерно 75 %, остальные 25 % – вторичные сырьевые ресурсы. К ВСР пивоваренного производства относятся пивная дробина, зерновой сплав, остаточные пивные дрожжи, белковый отстой, хмелевая дробина и др. Среди данных ВСР наибольший удельный вес (82–87 %) занимает пивная (солодовая) дробина, которая является ценным зерновым сырьем с точки зрения ее дальнейшей переработки для различных нужд. Пивная дробина не токсична и состоит из дробленых зернопродуктов и солода, оставшихся после фильтрования затора, она составляет основную долю твердых отходов пивоваренных заводов, только в России за год на предприятиях отрасли её вырабатывается более 15 миллионов тонн. Существуют различные способы утилизации дробины, но к основным относят только вывозы на полигоны или отвалы и использование в качестве корма для сельскохозяйственных животных и птицы. Широкое использование свежей пивной дробины ограничено её низким сроком хранения (как правило, не более 2–3 суток), сложностью транспортировки и необходимостью применения больших объемов для удовлетворения потребностей организма животных. Нарушение условий утилизации пивной дробины приводит к скоплению и загниванию на свалках огромного её количества, выделяющей в атмосферу ядовитые продукты гидролиза и гниения, значительно нарушающие экологию [1–4].

Особенностью химического состава нативной дробины является преобладание клеточных стенок зерна (в среднем 80 %), состоящих из высокомолекулярных полисахаридов: целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы типа ксиланов, арабанов, арабиноксиланов, связанных с целлюлозой и белками. Кроме того, в составе дробины присутствуют азотистые вещества, представленные белками и аминокислотами (12–15 %); остатки нерастворенного крахмала; свободные и связанные фенольные соединения различной молекулярной массы; липиды, жирнокислотный состав которых биологически высокоэффективен и др. При этом к недостаткам химического состава дробины следует отнести незначительное содержание витаминов и незаменимых аминокислот в составе белков, а высокое содержание клетчатки не позволяет превышать её количество более 1/3 кормового рациона животных [5, 6].

На сегодняшний день существующие способы утилизации пивной дробины требуют дальнейшего изучения и совершенствования, особенно актуальными являются вопросы её переработки с целью предотвращения загрязнения окружающей среды, обеспечения кормовой базы сельскохозяйственного комплекса, а также поиска дополнительных источников белка в виде новых кормовых добавок. Для повышения биологической ценности и усвояемости солодовой дробины, а также эффективности получения биологически активных кормовых добавок на её основе необходимо не только совершенствование способов биоконверсии основных компонентов сырья, но и биосинтетической активности культивируемых на продуктах гидролиза штаммов микроорганизмов [7, 8].

Важным направлением биоконверсии пивной дробины является разработка технологии белково-углеводных кормовых добавок, полученных с использованием перспективных штаммов микроорганизмов – активных продуцентов белка при культивировании на ферментализатах пивной дробины. Поскольку для интенсивного накопления микробного белка при микробиологическом синтезе штаммы в качестве основного источника энергии и углерода используют, в основном, моно- и дисахариды, следовательно, для повышения эффективности биоконверсии пивной дробины в белково-углеводные кормовые добавки необходим поиск как новых отдельных ферментных препаратов (ФП), так и составление мультиэнзимных композиций (МЭК), которые обеспечивают максимальную биодegradацию основных компонентов дробины.

При разработке мультиэнзимных композиций для достоверного описания процесса ферментализации и сокращения количества опытов целесообразно использовать математические методы планирования экспериментов.

Цель настоящего исследования – составление целевой мультиэнзимной композиции для гидролиза пивной дробины на основе математических методов планирования эксперимента.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлась сырая пивная дробина, полученная при производстве светлого пива на АО «Форштадтская пивоварня», г. Барнаул.

Дробину расфасовывали в полиэтиленовые пакеты и хранили при температуре минус 12 °С в морозильной камере «Бирюса». На серию экспериментов использовалась одна партия пивной дробины с влажностью 80±1 %.

При проведении исследований использо-

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИЭНЗИМНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ГИДРОЛИЗА ПИВНОЙ ДРОБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

вали гидромодуль 1:5, т.е. к 100 г пивной дробины добавляли воду температурой 51 ± 2 °С, доводя объем полученной суспензии до 500 мл. Полученную суспензию после внесения ферментных препаратов помещали в термостат при температуре 50 °С. Через определенные промежутки времени в течение шести часов ферментализации и во время отбора проб суспензию перемешивали. Отобранную пробу центрифугировали 5 мин при 10000 об/мин. После центрифугирования надосадочную жидкость (supernatant) фильтровали через складчатый фильтр и в дальнейшем использовали для определения редуцирующих сахаров и аминного азота.

Для выполнения поставленной цели исследования применялись следующие физико-химические методы анализа:

- определение содержания аминного азота йодометрическим титрованием [9];
- определение редуцирующих сахаров (РС) методом Бертрана [10];
- определение массовой доли сухих веществ и влаги методом двухступенчатого высушивания [11];

Таблица 1 – Основная характеристика ферментных препаратов

Table 1 – The main characteristics of enzyme preparations

Наименование препаратов	Ферменты	Активность основного фермента	Продуцент	Параметры	Оптимальные условия действия
ЦеллоЛюкс-А	Целлюлаза, ксиланаза, β-глюканаза, глюкоамилаза	Целлюлолитическая активность – 2000 ± 200 ед/г	<i>Trichoderma viride</i>	Температура, °С	45–60
				рН, ед	3,5–6,0
ЦеллоЛюкс-БГК	Ксиланаза, β-глюканаза,	Ксиланазная активность - (КсА), не менее 6000 ед/мл; β-глюканазная активность (β-ГлА), не менее 2000 ед/мл	<i>Trichoderma reesei</i>	Температура, °С	45–60
				рН, ед	3,5–6,0
Протосубтилин ГЗх	Нейтральные и щелочные протеиназы, α-амилаза, β-глюканаза, ксиланаза, целлюлаза	Протеолитическая активность – 70 ± 7 ед/г	<i>Bacillus subtilis</i>	Температура, °С	45–55
				рН, ед	6,0–7,0

Используемые ФП обладали целлюлолитическим, ксиланазным, β-глюканазным и протеолитическим действиями.

Математическую модель исследуемого процесса ферментации, учитывающую влияние нескольких факторов, получали на основе полного факторного эксперимента ПФЭ 2⁴.

Для полного описания процесса ферментативного гидролиза и его оптимизации были выбраны следующие критерии: накопление редуцирующих веществ – Y_1 ; накопление аминного азота – Y_2 .

В работе использовали следующие факторы: продолжительность процесса – X_1 , дозировка препарата «Целлолюкс А» – X_2 , дозировка препарата «Протосубтилин» – X_3 , дозировка препарата «Целлолюкс БГК» – X_4 [12, 13].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для проведения ферментативного гидролиза пивной дробины использовали отечественные ферментные препараты производства ООО ПО «Сиббиофарм», г. Бердск: ЦеллоЛюкс-БГК, ЦеллоЛюкс-А, Протосубтилин ГЗх.

Характеристика ФП представлена в таблице 1 [14].

По предварительным экспериментальным данным были определены уровни и интервалы варьирования факторов, приведенные в таблице 2.

Таблица 2 – Факторы и интервалы их варьирования

Table 2 – Factors and their variation intervals

Фактор	Обозначение	Нижний уровень	Верхний уровень	Основной уровень	Интервал варьирования
Продолжительность ферментализации	X_1	4	6	5	1
«Целлолюкс А»	X_2	0,5	2	1,25	0,75
«Протосубтилин»	X_3	0,5	1	0,75	0,25
«Целлолюкс БГК»	X_4	0,2	0,4	0,3	0,1

При постановке четырехфакторного эксперимента были определены следующие сочетания факторов первого, второго и третьего порядков:

$$C_4^2 = \frac{4!}{2!2!} = 6;$$

$$C_4^3 = \frac{4!}{3!1!} = 4;$$

$$C_4^4 = \frac{4!}{4!0!} = 1.$$

Общее количество взаимодействий в ПФЭ 2^4 составило 11. На основании этого

Таблица 3 – Расчетные данные проверки дисперсии параллельных опытов и воспроизводимости экспериментов

Table 3 – Calculated data for verification of the variance of parallel experiments and reproducibility of experiments

№	Редуцирующие сахара					Аминный азот					G_T
	\bar{y}	S_i^2	G	$S^2_{(y)}$	$S(y)$	\bar{y}	S_i^2	G	$S^2_{(y)}$	$S(y)$	
1	2,03	0,005	0,3977	0,058	0,24	20,3	24,5	0,4464	3,43	1,85	0,4517
2	2,09	0,029				23,1	0,98				
3	2,065	0,001				9,8	0,01				
4	2,47	0,370				28,0	0,01				
5	1,95	0,005				18,2	0,01				
6	2,32	0,174				22,4	3,92				
7	2,76	0,045				19,6	15,68				
8	2,62	0,001				18,9	0,98				
9	2,05	0,001				8,4	0,01				
10	2,34	0,001				25,2	0,01				
11	2,09	0,135				20,3	0,98				
12	2,34	0,080				21,7	0,98				
13	2,43	0,003				30,1	0,98				
14	2,31	0,031				27,3	0,98				
15	2,43	0,001				10,5	0,98				
16	1,62	0,055				19,6	3,92				

Данные таблицы 3 позволили сделать заключение об однородности дисперсии параллельных опытов, определяющих накопление редуцирующих сахаров и аминного азота, так как их расчетные значения критерия Кохрена оказались меньше табличного.

Полученные стандартные отклонения $S(y)$ (таблица 3) использовались при сравнении спрогнозированных результатов с экспериментальными.

При определении коэффициентов регрессии b_u и их значимость при помощи критерия Стьюдента (t_T), было установлено, что для эксперимента по накоплению редуцирующих сахаров значимыми оказались коэффициенты b_0, b_{13}, b_{24} и b_{123} , а для аминного азота – $b_0, b_1, b_2, b_{13}, b_{23}, b_{24}, b_{34}, b_{124}, b_{234}$ и b_{1234} . Данные коэффициенты включали в итоговое уравнение регрессии.

Уравнение, описывающее процесс накопления РС, имеет следующий вид:

$$Y_1 = 2,24 - 0,11X_1X_3 - 0,14X_2X_4 - 0,09X_1X_2X_3.$$

Уравнение, которое описывает процесс

была построена матрица планирования с учетом взаимодействий факторов.

На следующем этапе была определена дисперсия для каждого параллельного опыта S^2_i , значение критерия Кохрена G (отношение дисперсии с наибольшим значением к сумме всех дисперсий), дисперсия воспроизводимости $S^2_{(y)}$ и стандартная ошибка $S(y)$. Для проверки дисперсии на однородность, полученные значения G сравнивали с табличным значением критерия Кохрена G_T . Все вышеперечисленные значения для редуцирующих сахаров и аминного азота представлены в таблице 2.

накопления аминного азота, представлено в следующем виде:

$$Y_2 = 20,21 + 3,06X_1 - 1,66X_2 - 1,84X_1X_3 - 2,01X_2X_3 - 0,7X_2X_4 + 0,88X_3X_4 - 0,88X_1X_2X_4 - 2,45X_2X_3X_4 + 2,98X_1X_2X_3X_4.$$

Математические модели соответствовали требованиям адекватности по критерию Фишера. Расчетные данные критерия для редуцирующих сахаров и аминного азота составили 1,52 (< 2,42 табличные данные) и 1,42 (< 2,74 табличные данные).

Для получения наиболее достоверных результатов было осуществлено кодирование факторов. Уравнение, описывающее процесс накопления РС в кодированных переменных, имеет следующий вид:

$$Y_1 = 2,14 - 0,12X_1 - 1,24X_2 - 0,81X_3 + 2,34X_4 + 0,36X_1X_2 + 0,16X_1X_3 + 2,4X_2X_3 - 1,86X_2X_4 - 0,48X_1X_2X_3.$$

Уравнение, которое описывает процесс накопления аминного азота, представлено в следующем виде:

$$Y_2 = 257,24 - 40,62X_1 - 216,63X_2 - 308,03X_3$$

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИЭНЗИМНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ГИДРОЛИЗА ПИВНОЙ ДРОБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

$$- 957,43X_4 + 39,18X_1X_2 + 52,36X_1X_3 + 164X_1X_4 + 266,21X_2X_3 + 741,48X_2X_4 + 1194,18X_3X_4 - 47,56X_1X_2X_3 - 130,61X_1X_2X_4 - 199,07X_1X_3X_4 - 923,02X_2X_3X_4 + 158,54X_1X_2X_3X_4.$$

Для визуализации характеристики процесса накопления РС и аминного азота были построены поверхности отклика, при этом некоторые факторы имели фиксированные значения.

Для первого уравнения изменяемыми факторами были приняты дозировка препарата «Целлолюкс А» (X_2) и «Протосубтилин» (X_3), так

как их взаимодействие в модели имеет наибольший коэффициент (2,4). Продолжительность процесса (X_1) зафиксирована на уровне 6 часов, так как при данном значении были достигнуты наилучшие результаты, а дозировка препарата «Целлолюкс БГК» в дозировке 0,2 г/кг также фиксирована, поскольку ее внесение не оказало значительного влияния на содержание РС. Поверхность отклика, отражающая зависимость показателя РС от дозировок препаратов «Целлолюкс А» и «Протосубтилин», представлена на рисунке 1.

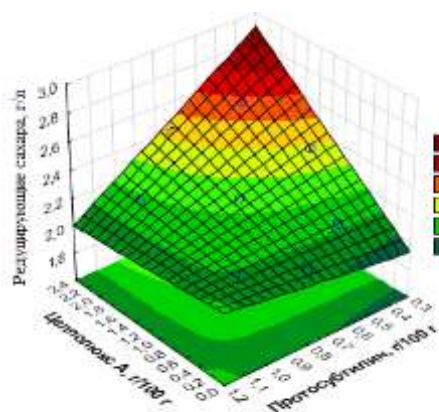


Рисунок 1 – Поверхность отклика накопления редуцирующих сахаров

Figure 1 – Response surface accumulation of reducing substances

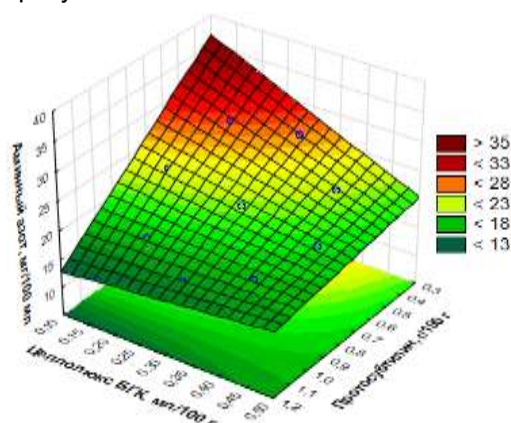


Рисунок 2 – Поверхность отклика накопления аминного азота

Figure 2 – Response surface amino nitrogen accumulation

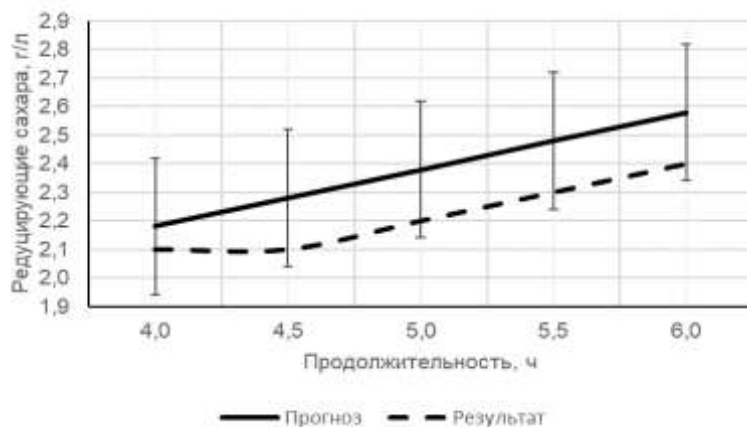


Рисунок 3 – Сравнительный анализ накопления редуцирующих сахаров
Figure 3 – Comparative analysis of the accumulation of reducing sugars

Согласно данным, представленным на рисунке 1, можно утверждать, что содержание РС растет с увеличением дозировки ФП «Целлолюкс А» и уменьшением дозировки препарата «Протосубтилин».

Во втором уравнении наибольший эффект имело взаимодействие факторов X_3 и X_4 (коэффициент 1194,18), факторы X_1 и X_2 были

фиксированными. Поверхность отклика, отображающая зависимость накопления аминного азота от дозировок препаратов «Протосубтилин» и «Целлолюкс БГК», представлена на рисунке 2.

Проанализировав данные рисунка 2, можно сделать заключение, что с уменьшением дозировок обоих ФП содержание аминного азота возрастает.

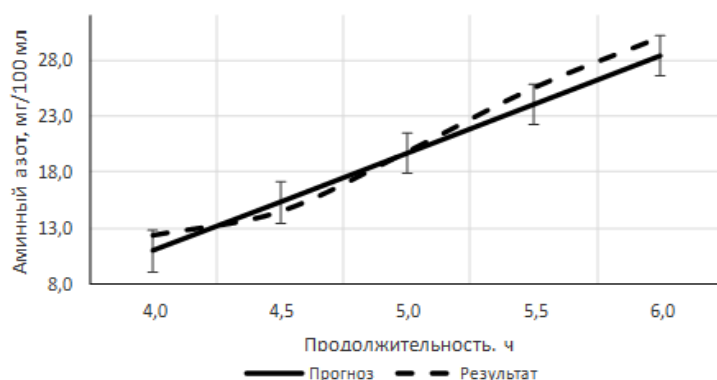


Рисунок 4 – Сравнительный анализ накопления аминного азота

Figure 4 – Comparative analysis of the accumulation of amine nitrogen

Для подтверждения правильности построения математической модели накопления редуцирующих веществ и аминного азота была проведена экспериментальная апробация разработанной мультиэнзимной композиции. Полученные значения сравнивали с теоретически рассчитанными данными. Сравнение показателей для редуцирующих сахаров и аминного азота представлены на рисунках 3 и 4 соответственно.

Согласно данным, представленным на рисунках 3 и 4, содержание редуцирующих сахаров было несколько ниже спрогнозированного (2,4 г/л), а аминного азота – несколько выше (30,0 мг/100 мл). Однако все значения находились в пределах стандартных отклонений (0,24 – для редуцирующих сахаров и 1,85 – для аминного азота). Из этого следует, что математические модели были построены верно.

ВЫВОДЫ

После изучения зависимостей были определены соотношения факторов, которые обеспечивают максимальное совместное накопление редуцирующих сахаров и аминного азота. Продолжительность гидролиза (X_1) – 6 ч, дозировка препарата «Целлолюкс А» (X_2) – 2 г на 100 г пивной дробины с влажностью 80 %, (гидромодуль 1:5), «Протосубтилин» (X_3) – 0,5 г/100 г, «Целлолюкс БГК (X_4) – 0,2 мл/100 г. При таком соотношении факторов прогнозируемое значение аминного азота и редуцирующих сахаров составляло 2,58 г/л и 28,44 мг/100 мл соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров С.М., Филатов С.Л., Пивнова Е.П., Шибанов В.М. К вопросу о способах утилизации пивной дробины // Пиво и напитки. 2014. № 6. С. 32–37.

2. Орлов А.И., Резниченко И.Ю. Применение отходов пивоварения в ресурсосберегающих технологиях // Ползуновский вестник. 2021. № 2. С. 146–152.

3. Lynch K.M., Steffen E.J., Arendt E.K. Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. *Journal of the Institute of Brewing*. 2016; 122(4):553–568.

4. ГОСТР 53358-2009 – Продукты пивоварения. Термины и определения. Технические условия. Москва, 2011. 19 с.

5. Рахматджонов Ш.М., Каменская Е.П. Оптимизация условий ферментативного гидролиза пивной дробины // Материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, посвященной 90-летию юбилею академика Саковича Г.В. Бийск. 2021. С. 347–350.

6. Composition and nutrient value proposition of brewers spent grain / S. Ikram, L. Huang, H. Zhang [et al.] // *Journal of Food Science*. 2017. Vol. 82. № 10. P. 2232–2242.

7. Плиева З.А. Биоконверсия пивной дробины с использованием разных видов дрожжей: автореф. дисс. ... канд. биол.наук: 03.02.14: Автореферат дисс. ... к.б.н. Владикавказ, 2015. 26 с.

8. Кобелев К.В., Гернет М.В., Грибкова И.Н. Разработка инновационного способа получения биологически активных соединений пивной дробины // *Техника и технология пищевых производств*. 2021. Т. 51, № 1. С. 113–124.

9. Ермолаева Г.А. Справочник работника лаборатории пивоваренного предприятия. СПб. : Профессия, 2004. 536 с.

10. ГОСТ 26176-19 Корма, комбикорма. Методы определения растворимых и легкогидролизуемых углеводов. М. : Стандартинформ, 2019. 12 с.

11. ГОСТ 31640-2012 Корма. Методы определения содержания сухого вещества. М. : Стандартинформ, 2012. 8 с.

12. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования эксперимента. М. : ДеЛи принт, 2005. 296 с.

13. Звонарев С.В. Основы математического моделирования : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. 112 с.

14. Официальный сайт ООО ПО «Сиббиофарм» [Электронный ресурс] URL:

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИЭНЗИМНОЙ КОМПОЗИЦИИ ДЛЯ ГИДРОЛИЗА ПИВНОЙ ДРОБИНЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

<https://www.sibbio.ru/> (дата обращения 25.07.2023).

Информация об авторах

В. П. Вистовская – кандидат технических наук, доцент кафедры технологии бро- дильных производств и виноделия.

Е. П. Каменская – кандидат биологиче- ских наук, доцент кафедры технологии бро- дильных производств и виноделия.

Д. С. Кожемякин – магистрант кафедры технологии бро- дильных производств и вино- делия.

Е. С. Дикалова – старший преподава- тель кафедры технологии бро- дильных про- изводств и виноделия.

REFERENCES

1. Petrov, S.M., Filatov, S.L., Pivnova, E.P. & Shi- banov, V.M. (2014). To the question of the methods of disposal of beer grains *Beer and drinks*. (6). 32-37 (in Russ.).
2. Orlov, A.I. & Reznichenko, I.Yu. (2021). Appli- cation of brewing waste in resource-saving technolo- gies. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 146-152. (in Russ.). DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2021.02.020.
3. Lynch, K.M., Steffen, E.J. & Arendt, E.K. (2016). Brewers' spent grain: a review with an empha- sis on food and health. *Journal of the Institute of Brew- ing*, (122(4)), 553–568. (in the UK).DOI:10.1002 / jib.363.
4. Brewing products. Terms and Definitions. Technical conditions. (2011). HOST R 53358-2009. Moscow : Standards Publishing House. (in Russ.).
5. Rakhmatjonov, Sh.M. & Kamenskaya, E.P. Optimization of the conditions for the enzymatic hydroly- sis of brewer's grains *Proceedings of the XIV All-Rus- sian scientific and practical conference of students, graduate students and young scientists with interna- tional participation, dedicated to the 90th anniversary of Academician Sakovich G.V.* A.N. Blaznov, V.V. Bu- daeva, I.N. Pavlov (Ed.). Barnaul : ASTU.). (in Russ.).
6. Ikram, Sana & Huang, Lian, Yan & Zhang, Hui- juan & Wang, Jing & Yin, Meng. (2017). Composition and Nutrient Value Proposition of Brewers Spent Grain: Composition and preservation of BSG... *Journal of Food Science*. (82). (10). 2232-2242. (in USA)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 28.03.2023; одобрена после рецензирования 13.08.2023; принята к публикации 11.09.2023.

The article was received by the editorial board on 28 Mar 2023; approved after editing on 13 Aug 2023; accepted for publication on 11 Sep 2023.

DOI:10.1111/1750-3841.13794.

7. Plieva, Z.A. (2015). Bioconversion of brewer's grains using different types of yeast. Extended abstract of candidate's thesis. Vladikavkaz. (in Russ.).

8. Kobelev, K.V., Gernet, M.V. & Gribkova, I.N. (2021). Development of an innovative method for ob- taining biologically active compounds of beer pellets. *Technique and technology of food production*. (V. 51), (1). 113-124. (in Russ.). doi: 10.21603/2074-9414-2021-1-113-124.

9. Ermolaeva, G.A. (2004). Handbook of a labora- tory worker of a brewery. St. Petersburg : Profession. (in Russ.).

10. Feed, compound feed. Methods for the deter- mination of soluble and easily hydrolyzed carbohy- drates. (2019). HOST 26176-19. Moscow : Standards Publishing House. (in Russ.).

11. Feed. Methods for determining the content of dry matter. (2012). HOST 31640-2012. Moscow: Standards Publishing House. (in Russ.).

12. Grachev, Yu.P. & Plaksin, Yu.M. (2005). Mathematical methods of experiment planning. Mos- cow: DeLiprint. (in Russ.).

13. Zvonarev, S.V. (2019). Fundamentals of mathematical modeling: a tutorial. Yekaterinburg : Pub- lishing Institutional repository of Federal State Autono- mous Educational Institution of Higher Professional Ed- ucation Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin. (in Russ.).

14. *Sait the company «Sibbiopharm»* Retrieved from <https://www.sibbio.ru.> (in Russ.).

Information about the authors

V.P. Vistovskaya - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Fermentation and Winemaking.

E.P. Kamenskaya - Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Technology of Fermentation and Winemaking.

D.S. Kozhemyakin - Master's Degree Stu- dent of the Department of Technology of Fermen- tation and Winemaking.

E.S. Dikalova - Senior Lecturer of the De- partment of Technology of Fermentation and Winemaking.