



Оптимизация процесса ферментации крафтового пива посредством моделирования в системе Table Curve

© 2025. М. А. Шадрин¹, Н. В. Бураковская^{1✉}, Е. А. Молибога¹, Н. В. Щукина², М. И. Приставка¹

¹ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», г. Омск, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина», г. Омск, Российская Федерация

В рамках исследований проведен процесс оптимизации производства крафтового пива, установлены состав затора, доза внесения ферментного препарата, разработан подход к выбору оптимального соотношения технического компонента на основании полученных физико-математических показателей сусла. Оптимальные параметры анализируемого процесса производства крафтового пива определяли с использованием универсальной математической компьютерной системы Table Curve 3d.v4.0, которая строит трехфакторные математические модели, оценивает адекватность и значимость полученной модели, рассчитывает коэффициенты корреляции, детерминации модели, значение стандартной ошибки по имеющимся данным. На первом этапе обработки экспериментальных данных и разработки математических моделей выполнена проверка на достоверность различий между контрольными и опытными показателями. Определена принадлежность контрольных и опытных выборок к разным генеральным совокупностям. Достоверность различий между двумя выборками оценивали с помощью критерия Стьюдента. В качестве нулевой принималась гипотеза: различие между контрольными и опытными данными обусловлены случайностями выборки. Полученные результаты показали, что расчетное значение критерия Стьюдента в показателях больше табличного значения критерия, из чего следует, что принимается альтернативная гипотеза: различия в средних контрольных и опытных образцов значимы и не обусловлены случайными причинами, что позволяет сделать вывод – две выборки (контрольная и опытная) принадлежат двум разным генеральным совокупностям. С высоким уровнем достоверность различия объясняется внесением ферментного препарата Амилоубтилин в пивное сусло. В ходе экспериментальных исследований было установлено, что его применение позволяет повысить уровень ферментации, ускорить процесс брожения и улучшить качество пива, при этом снизить себестоимость итогового продукта. Все разработанные модели в программе Table Curve 3d.v4.0. отличались высоким уровнем адекватности, величина коэффициентов корреляции моделей составила не менее 0,99, а относительная погрешность математических моделей – не более 0,5 %.

Ключевые слова: прогнозирование, непромышленные рецептуры, композиция, пшеничное пиво

Благодарности: работа выполнена без финансового обеспечения в рамках инициативной тематики.

Авторы благодарят рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Шадрин М. А., Бураковская Н. В., Молибога Е. А., Щукина Н. В., Приставка М. И. Оптимизация процесса ферментации крафтового пива посредством моделирования в системе Table Curve. Аграрная наука Евро-Северо-Востока. 2025;26(4):827–839. DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.827-839>

Поступила: 13.06.2024

Принята к публикации: 04.08.2025

Опубликована онлайн: 29.08.2025

Optimization of craft beer fermentation process by means of Table Curve system modeling

© 2025. Maxim A. Shadrin¹, Nina V. Burakovskaya^{1✉}, Elena A. Moliboga¹, Natalya V. Shchukina², Maria I. Pristavka¹

¹Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

²Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin, Omsk, Russian Federation

Within the framework of the research the process of optimization of craft beer production was carried out, the composition of the mash, the dosage of enzyme preparation introduction were established, the approach to the selection of the optimal ratio of the technical component was developed on the basis of the obtained physical and mathematical parameters of the wort. The optimal parameters of the analyzed process of craft beer production were determined using the universal mathematical computer system Table Curve 3d.v4.0, which builds three-factor mathematical models, evaluates the adequacy and significance of the obtained model, calculates the correlation coefficients, model determination, the value of standard error on the available data. At the first stage of experimental data processing and development of mathematical models there was checked the reliability of differences between control and experimental indicators. The belonging of control and experimental samples to different general populations was determined. Reliability of differences between two samples was evaluated using Student's criterion. The following hypothesis was accepted as null hypothesis: the difference between control and experimental data is due to sampling randomness. The obtained results show that the calculated value of Student's criterion in the indicators is greater than the tabular value of the criterion, from which it follows that the

alternative hypothesis is accepted: the differences in the mean of control and experimental samples are significant and are not due to random causes, which makes it possible to conclude: the two samples (control and experimental) belong to two different general populations. The high level of reliability of the difference is explained by the introduction of the enzyme preparation Amylosubtilin into the beer wort. In the course of experimental studies it was found that the use of the enzyme preparation Amylosubtilin allows to increase the level of fermentation, accelerate the fermentation process and improve the quality of beer, while reducing the cost of the final product. All developed models were characterized by a high level of adequacy, the value of correlation coefficients of models was not less than 0.99, and the relative error of mathematical models was not more than 0.5 %, according to the results of the application of the program Table Curve 3d.v4.0.

Keywords: prediction, non-industrial formulations, composition, wheat beer

Acknowledgments: the work was done without financial support as part of an initiative topic.

The authors thank the reviewers for their contribution to the peer review of this work.

Conflict of interest: the authors stated no conflict of interest.

For citation: Shadrin M. A., Burakovskaya N. V., Moliboga E. A., Shchukina N. V., Pristavka M. I. Optimization of craft beer fermentation process by means of Table Curve system modeling. *Agrarnaya nauka Evro-Severo-Vostoka* = Agricultural Science Euro-North-East. 2025;26(4):827–839. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.30766/2072-9081.2025.26.4.827-839>

Received: 13.06.2024

Accepted for publication: 04.08.2025

Published online: 29.08.2025

Эффективным направлением совершенствования производственной деятельности пищевых предприятий является внедрение системных методов планирования и управления с использованием компьютерных технологий. В настоящее время использование цифровых систем для быстрых расчетов получило широкое распространение в различных сферах деятельности, в том числе и пищевой промышленности. Происходит цифровая трансформация бизнес-процессов, образования, науки и многого другого. Внедрение цифровых технологий в процессы производства и деятельности человека способствует их оптимизации и росту производительности. В научных исследованиях применение цифровых технологий ускоряет процесс обработки данных, совершенствует этапы построения математических моделей изучаемых процессов и явлений, что позволяет экономить время и прочие ресурсы при исследовании и анализе модели, нахождении прогнозных значений.

Планирование и управление производственными процессами является неотъемлемой частью современной пищевой промышленности [1]. Использование математических компьютерных систем позволяет быстро и точно определить оптимальные параметры анализируемого процесса производства пива и рекомендовать те параметры, которые позволяют получить наибольшую экономическую прибыль.

Выпуск алкогольной продукции имеет большое значение для экономики любой страны. Появление крафтовых пивоварен с собственными традициями вызвало новый виток развития отрасли. Пиво по-прежнему остается

самым популярным алкогольным напитком в мире [2, 3]. За последние 10 лет потребитель показал растущий интерес к ремесленному пиву [4, 5]. Крафтовое пиво не подвергается фильтрации и пастеризации, поэтому содержит в своем составе микроэлементы, витамины группы В, минеральные вещества [6, 7]. В данной работе авторами были рассмотрены вопросы, связанные с использованием ферментных препаратов (ФП), применение или варьирование различными факторами производственной цепочки, а также математическое моделирование процесса ферментации пивного суслу на основе цифровых технологий [8, 9, 10].

Цель исследования – поиск оптимальных моделей в системе Table Curve для производства крафтового пива с высоким качественным составом за счет варьирования переменных сырьевых и технически необходимых компонентов.

Научная новизна – впервые в технологии производства напитков использованы элементы цифровых технологий с учетом заданных физико-химических показателей качества крафтового пива с использованием ферментного препарата Амилосубтилин.

Материал и методы. В качестве контрольного образца исследуемого вида пива «Ароматное пшеничное» выбран следующий рецептурный состав: 70 % пшеничного солода; 30 % ячменного солода; без внесения ферментных препаратов (ФП).

Для приготовления крафтового пива использовали сырье: пшеничный и ячменный солод («Грейнрус Агро», Россия), соответствующий требованиям ГОСТ 29294-2021¹;

¹ГОСТ 29294-2021. Солод пивоваренный. Технические условия. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 26 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/76184/>

ферментный препарат Амилосубтилин (ООО «Концерн «Микробиопром», Россия); пивные дрожжи Lallemand-Voss Kveik (Lallemand, Австрия); хмель гранулированный тип 90 сортов Cascade и Citra (Beervindingem, США), соответствующий требованиям ГОСТ 32912-2014². Варьируемыми ингредиентами рецептуры являлись состав затора и доза вносимого ФП, остальные рецептурные ингредиенты – пивные дрожжи, хмель были идентичными.

Для определения основных физико-химических показателей готового продукта, а также для выявления наиболее оптимальных параметров производства использовали стандартные методы анализа. Активную кислотность определяли рН-метром с электродной системой РН 200Е (Measurement, China) с диапазоном измерений от -2 до 18 ед. рН и пределом допускаемой основной абсолютной погрешности измерения не более 0,05 ед. рН. Динамическую вязкость определяли шариковым вискозиметром автоматизированным Lovis 2000 М/МЕ (Anton Paar GmbH, Австрия). Конечную степень сбраживания находили по величине истинного содержания экстракта, после удаления спирта и диоксида углерода пикнометрическим методом на пикнометре ПЖ2-1-КШ 5/13 (ООО «Мини-МедПром», Россия). Объемную долю спирта определяли с помощью дисцилляционного выделения этилового спирта и его улавливания при кипячении в дисцилляционной установке в соответствии с ГОСТ 12787-2021³ пикнометром ПЖ2-1-КШ 5/13 (ООО «МиниМедПром», Россия). Высоту пены и пеностойкость определяли по ГОСТ 30060-22⁴, для замера использовали стакан, линейку, секундомер.

Результаты и их обсуждение. По классической технологии крафтового пива под маркой «Ароматное пшеничное» основным сырьем является композиционные вариации пшеничного и ячменного солода. В опытных образцах в качестве технически необходимых компонентов, от качества и дозы внесения которых зависит органолептическая характеристика готового продукта, экономическая эффективность и продолжительность проведения технологического процесса, используются:

- пивные дрожжи Lallemand-Voss Kveik, которые ускоряют процесс ферментации с полным

снижением концентрации сусла в процессе брожения, стабилизируют вкусо-ароматический профиль во всем температурном диапазоне, придают нейтральный аромат с легкими фруктовыми нотами;

- ФП Амилосубтилин, который показал наилучшие результаты по разжижению затора, подготовке сырья к дальнейшему осахариванию за счет содержания катализатора гидролиза различных веществ в крахмалосодержащем сырье, а также широту действия в диапазоне: +50÷+75 °С (оптимальная температура +55÷+58 °С), рН 5,0–8,0. Преимуществом данного ФП является наличие в нем альфа-амилазы – быстрое снижение вязкости растворов крахмала, т. е. подготовка сусла к действию глюкоамилазы; гидролизует внутренние альфа-1,4-гликозидные связи крахмала, приводя к быстрому снижению вязкости клейстеризованных растворов крахмала и обеспечивая подготовку сусла к действию глюкоамилазы. Конечными продуктами действия ФП являются низкомолекулярные растворимые декстрины с небольшим содержанием моно- и дисахаридов (глюкозы и мальтозы). Применение ФП позволяет: повысить эффективность использования сырья за счет более глубокого гидролиза; сократить продолжительность брожения на 10–20 часов; стабилизировать технологический процесс; увеличить выход спирта на 1–4 %; повысить качество готовой продукции и культуру производства; обеспечить безопасную эксплуатацию оборудования.

Ферменты и ФП, используемые в комплексе с основным сырьем, могут быть получены из различных источников, включая растительные, животные и микробиологические [11, 12]. Они обладают различными свойствами и активностью, которые могут влиять на качество пива [13]. Поэтому объектом исследования является определение оптимального состава комплекса «состав затора / доза ФП» [14], который будет обладать наилучшими свойствами и давать эффективный результат при производстве крафтового пива [15].

В качестве опытных образцов служили 9 образцов, имеющих в составе затор (пшеничный солод, ячменный солод) и различные дозы ФП Амилосубтилин (табл. 1).

²ГОСТ 32912-2014. Хмелепродукты. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 16 с.

URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/58320/>

³ГОСТ 12787-2021 Продукция пивоваренная. Методы определения объемной доли этилового спирта, массовой доли действительного экстракта и расчет экстрактивности начального сусла. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 27 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/76856/>

⁴ГОСТ 30060-22 Пивоваренная продукция. Методы определения органолептических показателей и объема продукции. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 5 с. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/78905/>

Таблица 1 – Варианты заторов пива «Ароматное пшеничное» /
Table 1 – Mash variants of “Aromatnoe pshenichnoe” beer

№ опыта / No. of the experiment	Состав затора (солод), % / Mash composition (malt), %		Доза ФП Амилосубтилин, мг/кг / Dose of enzyme preparation Amylosubtilin, mg/kg
	пшеничный / wheat	ячменный / barley	
Контроль / Control	70	30	0
1	60	40	0,08
2	60	40	0,12
3	60	40	0,16
4	50	50	0,08
5	50	50	0,12
6	50	50	0,16
7	40	60	0,08
8	40	60	0,12
9	40	60	0,16

В качестве измеряемых показателей выступали: содержание сухих веществ (СВ); величина динамической вязкости (ДВ); время осахаривания (Ос); конечная степень сбраживания (КСС); активная кислотность (рН).

Исследования проводили для определения качественных характеристик пива, произведенного с использованием различных составов комплекса «состав затора / доза ФП».

Приготовление пивного суслу в лабораторных условиях позволяет более детально проанализировать технологический процесс производства, контролировать качество суслу и улучшать его характеристики [16, 17, 18]. Основными этапами приготовления пивного суслу являются: выбор сырья (использование солода из зерен ячменя, которые проращиваются, сушатся и обжариваются); подготовка инструментов и оборудования; затор; измерение плотности; брожение; отделение от осадка; анализ характеристик пивного суслу. Результаты исследований представлены в таблице 2.

На следующем этапе исследований были изучены показатели в готовом пиве «Ароматное пшеничное» с разным составом затора и дозами ФП Амилосубтилин (табл. 3).

На первом этапе обработки экспериментальных данных и разработки математических моделей выполняли проверку на достоверность различий между контрольными и опытными показателями: определение принадлежности контрольных и опытных выборок к генеральным совокупностям.

Для определения достоверности отличий использовали критерий Стьюдента. Рассмотрим применение критерия для физических показателей таблицы 2, расчетное значение находим по формуле:

$$t_{\text{расч.}} = \frac{M_2 - M_1}{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}$$

где M_1 и M_2 – значения средних арифметических сравниваемых выборок; m_1 и m_2 – значения статистических ошибок средних арифметических, табличное значение определяем при числе степеней свободы, равной 16 и доверительной вероятности 0,95, $t_{\text{табл.}}(0,05; 16) = 2,12$. Результаты сравнения показателей представлены в таблице 4.

По результатам вычислений при $t_{\text{расч.}} > t_{\text{табл.}}$ получаем статистически достоверную значимость отличий данных между образцами.

С помощью критерия Стьюдента определены равны ли средние значения контрольной и экспериментальной выборок. В качестве нулевой принималась гипотеза H_0 : генеральные средние значения равны, альтернативная гипотеза H_1 : генеральные средние значения различны.

Пользуясь данными таблицы 2, для показателя «массовая доля СВ в заторе» определим числовые характеристики, необходимые для нахождения расчетного значения критерия Стьюдента:

$$\bar{X} = 16,0, \bar{Y} = 16,8, S_x^2 = 0,36, S_y^2 = 0,127.$$

Таблица 2 – Влияние дозы ФП Амиглосубтилин на показатели качества пивного сусла /
Table 2 – Effect of Amylosubtilin enzyme preparation dose on beer wort quality parameters

Показатель / Indicator	№ опыта / No. of the experiment									
	контроль / control	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Массовая доля СВ в заторе, % / Mass fraction of dry substances in the mash, %	16,0±0,2	16,5±0,2	16,7±0,2	16,9±0,2	16,8±0,2	16,9±0,2	16,0±0,2	17,0±0,2	17,1±0,2	17,3±0,2
Время Ос, мин / Saccharification time, min	60,0±0,2	59,0±0,2	58,0±0,2	56,0±0,2	58,0±0,2	56,0±0,2	54,0±0,2	57,0±0,2	54,0±0,2	52,0±0,2
ДВ, мПа*с / Dynamic viscosity, MPa*s	1,6±0,2	1,5±0,2	1,5±0,2	1,5±0,2	1,4±0,2	1,5±0,2	1,6±0,2	1,4±0,2	1,4±0,2	1,4±0,2
КСС, % / The final degree of attenuation, %	75,0±0,2	74,0±0,2	74,2±0,2	74,8±0,2	73,2±0,2	73,4±0,2	73,8±0,2	72,0±0,2	72,4±0,2	72,8±0,2
Активная кислотность, рН / Active acidity, рН	5,8±0,01	5,7±0,01	5,7±0,01	5,8±0,01	5,7±0,01	5,8±0,01	5,8±0,01	5,6±0,01	5,70±0,01	5,7±0,01

Таблица 3 – Влияние дозы ФП Амиглосубтилин на показатели качества готового пива /
Table 3 – Effect of the dose of the enzyme preparation Amylosubtilin on the quality indicators of finished beer

Показатель / Indicator	№ опыта / No. of the experiment									
	контроль / control	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Массовая доля СВ в сусле, % / Mass fraction of dry substances in wort, %	13,0±0,2	12,0±0,2	11,2±0,2	10,8±0,2	10,9±0,2	10,9±0,2	10,7±0,2	10,8±0,2	10,8±0,2	10,7±0,2
Объемная доля спирта, % / Volume fraction of alcohol, %	4,5±0,2	4,32±0,2	4,0±0,2	3,77±0,2	4,01±0,2	3,99±0,2	3,88±0,2	4,18±0,2	4,18±0,2	3,88±0,2
Высота пены, мм / Foam height, mm	40,0±0,2	39,0±0,2	38,0±0,2	38,0±0,2	38,0±0,2	39,0±0,2	37,0±0,2	35,0±0,2	39,0±0,2	40,0±0,2
Пеностойкость, мин / Foam resistance, min	3,8±0,2	3,5±0,2	3,9±0,2	3,9±0,2	3,9±0,2	3,5±0,2	4,0±0,2	4,1±0,2	3,5±0,2	3,8±0,2
Активная кислотность, рН / Active acidity, рН	4,7±0,01	4,5±0,01	4,7±0,01	4,8±0,01	4,5±0,01	4,7±0,01	4,8±0,01	4,7±0,01	4,8±0,01	4,5±0,01

Таблица 4 – Оценка достоверности различий между среднестатистическими данными в контрольных и опытных образцах / Table 4 – Assessment of reliability of differences between arithmetic mean data in control and experimental samples

Показатель / Indicator	Образцы / Samples		Критерий Стьюдента (вероятность прогноза 95 %, уровень значимости 0,05) / Student's criterion (prediction probability 95 %, significance level 0.05)	достоверность различия / reliability of difference
	контроль / control	опыт / experiment		
Затор / Beer mash				
СВ, % / Dry substances, %	16,0±0,2	16,8±0,2	2,83	Значимо / Significant
Время Ос, мин / Saccharification time, min	60,0±0,2	56,0±0,2	14,14	Значимо / Significant
Вязкость, мПа·с / Viscosity, MPa·s	1,60±0,02	1,47±0,02	4,71/0,46	Незначимо / Insignificant
КСС, % / The final degree of attenuation, %	75,0±0,2	73,4±0,2	5,66	Значимо / Significant
Активная кислотность, рН / Active acidity, pH	5,80±0,01	5,70±0,01	5,50/7,07	Значимо / Significant
Пивное сусло / Beer wort				
Массовая доля СВ, % / Mass fraction of dry substances, %	13,0±0,2	10,98±0,2	7,15	Значимо / Significant
Объемная доля спирта, % / Volume fraction of alcohol, %	4,5±0,02	4,02±0,2	16,85/2,4	Значимо / Significant
Высота пены, мм / Foam height, mm	40,0±0,2	38,11±0,2	6,68	Значимо / Significant
Пеностойкость, мин / Foam resistance, min	3,8±0,2	3,79±0,2	0,79/0,035	Незначимо / Insignificant
Активная кислотность, рН / Active acidity, pH	4,7±0,01	4,667±0,01	2,36/2,33	Значимо / Significant

Расчетное значение находили по формуле:

$$t_{\text{расч.}} = \frac{|\bar{X} - \bar{Y}|}{\sqrt{(n_x - 1)S_x^2 + (n_y - 1)S_y^2}} \sqrt{\frac{n_x n_y (n_x + n_y - 2)}{n_x + n_y}}$$

$$t_{\text{расч.}} = 3,44; \quad t_{\text{табл.}}(0,05; 16) = 2,12.$$

Поскольку $t_{\text{расч.}} > t_{\text{табл.}}$, отвергаем нулевую гипотезу, принимаем альтернативную.

В части научных исследований применяется «приближение» t-критерия:

$$t_{\text{расч.}} = \frac{|\bar{X} - \bar{Y}|}{\sqrt{n_x S_x^2 + n_y S_y^2}} \sqrt{n_x n_y}$$

В ряде источников это «приближение» называют критерием Крамера-Уэлча. Заметим, что критические значения для критерия Крамера-Уэлча зависят только от уровня значимости α и выражаются через критические значения t-критерия Стьюдента следующим образом: $t_{\text{крит}}(0,01; \infty) = 2,58$; $t_{\text{крит}}(0,1; \infty) = 1,65$; $t_{\text{крит}}(0,05; \infty) = 1,96$ (табл. 5).

Таким образом доказано, что данные контрольного образца и опытных достоверно (значимо) отличаются друг от друга практически по всем показателям, кроме пеностойкости и активной кислотности готового пива за счет введения ФП Амилосубтилина. Использование методов исследования с программой Table Curve позволит более детально определить оптимальную дозу внесения препарата, а также представить детальные рекомендации производству.

На рисунках 1–5 приведены графические иллюстрации разработанных математических моделей, на которых: Y – доза ФП Амилосубтилин, мг/кг; X – доза ячменного солода, %; Z₂ – искомый показатель.

Современный процесс производства пива осуществляется зачастую ускоренным способом, т. е. используется всего одна пауза в процессе затирания солода, именно процесс осахаривания (Ос).

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ: ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ / ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES: STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTION

Таблица 5 – Критерий Крамера-Уэлча для показателей качества пивного сусла /
Table 5 – Cramer-Welch criterion for beer wort quality indicators

Показатель / Indicator	Критерий Стьюдента (вероятность прогноза 95 %, уровень значимости 0,05) / Student's criterion (prediction probability 95 %, significance level 0.05)		
	расчетное значение $t_{расч.}$ / calculated value $t_{cal.}$	табличное значение $t_{крит.}(0,05; \infty)$ / tabular value $t_{crit.}(0,05; \infty)$	гипотеза принимаемая / hypothesis accepted
Затоп / Beer mash			
СВ, % / Dry substances, %	3,43912	1,96	Генеральные средние значения различны / The general averages are different
Время Ос, мин / Saccharification time, min	5,3505	1,96	
Вязкость, мПа·с / Viscosity, MPa·s	4,3603	1,96	
КСС, % / The final degree of attenuation, %	4,619	1,96	
Активная кислотность, рН / Active acidity, pH	2,636	1,96	
Пивное сусло / Beer wort			
Массовая доля СВ, % / Mass fraction of dry substances, %	8,4807	1,96	Генеральные средние значения различны / The general averages are different
Объемная доля спирта, % / Volume fraction of alcohol, %	8,2185	1,96	
Высота пены, мм / Foam height, mm	3,791	1,96	
Пеностойкость, мин / Foam resistance, min	0,04698	1,96	Генеральные средние значения равны / The general averages are equal
Активная кислотность, рН / Active acidity, pH	0,7707	1,96	

Данный процесс заключается в использовании гидролитических ферментов, которые содержатся в солоде и вспомогательных материалах, и доведение их до оптимальных показателей (температуры и значения рН). Эта процедура приводит к тому, что растворимые высокомолекулярные вещества разлагаются на мало-растворимые полимеры. Оптимальный температурный оптимум для данного этапа составляет 61–72 °С, при этом происходят сразу две паузы, при которых работают различные ферменты и происходит разложение крахмала, белка, β-глюкана, фосфата, липидов, полифенолов.

Аппроксимированная поверхность отклика изменения времени Ос пивного сусла приведена на рисунке 1, осуществляется на 54–56 минуте (оптимум окрашен зеленым цветом). Заметим, что при отсутствии заявленного аппроксимирующего полинома система ведет расчет по всем функциям, имеющимся в базе данных программы. Наряду с подобранной математической моделью на рисунке указаны значения: r^2 – коэффициент детерминации; $DF Adj r^2$ – уровень доверительной вероятности; $FitStdErr$

– значение стандартной ошибки; статистические оценки параметров математической модели.

Важно отметить, что любой параметр модели можно при необходимости изменить, для этого выбирается другой аппроксимирующий полином, который исследуется и анализируется.

Данная математическая модель времени Ос, мин, представлена зависимостью следующего вида:

$$Z_2 = a + b \cdot e^{-X} + c \cdot Y^{2,5},$$

где: коэффициенты модели равны: $a = 59,401$;

$$b = 2,114; c = -718,183;$$

коэффициент детерминации: $R^2 = 0,998$;

относительная погрешность модели не превышает 0,24 %.

Адекватность модели проверяли, используя критерий Фишера, $F_{расч.} = 241,9939$ найдено с помощью Table Curve, $F_{табл.}(0,05;2;6) = 5,14$ при уровне значимости 5 %, т. е. с доверительной вероятностью 95 %, число степеней свободы $k_1 = 2$, поскольку модель содержит два фактора X, Y; $k_2 = 9 - 2 - 1 = 6$. Определили, что $F_{расч.} > F_{табл.}$, можно сделать вывод о том, что полученная модель статистически значима.

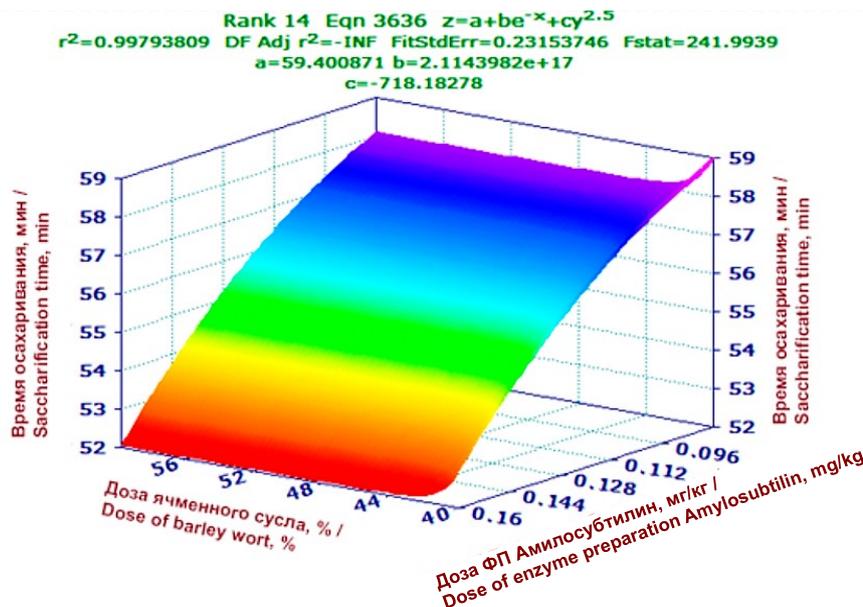


Рис. 1. Поверхность отклика изменения времени Ос /
 Fig. 1. The response surface of the saccharification time change

Поиск оптимального времени Ос достаточно важен и является основным элементом в части облегчения действия различных ФП в процессе растворения составных веществ. С помощью математического моделирования процесс Ос будет наиболее адекватным на 54–56 минуте при дозе внесения ферментного препарата в количестве 0,14 мг/кг от массы затора, композиция солода (пшеничного и ячменного) при данном результате составляет 50:50 соответственно.

Поверхность отклика изменения массовой доли СВ представлена на рисунке 2. Необходимость определения данного показателя спровоцировано тем, что количественное содержание СВ в сусле перед тем, как в него было направлено нужное количество дрожжей влияет на качество готового продукта. Микроорганизмы производят из данного сырья алкоголь и углекислый газ, являющиеся основой производства пива.

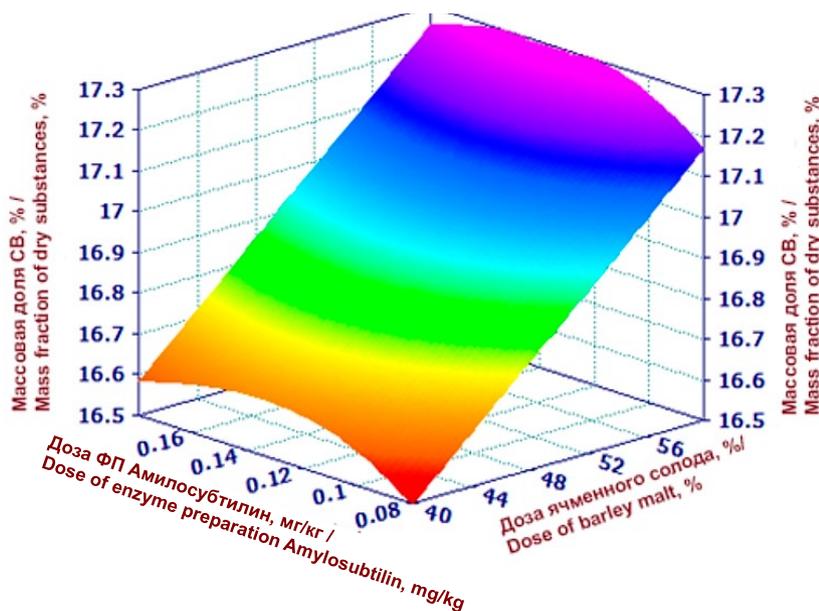


Рис. 2. Поверхность отклика изменения массовой доли СВ /
 Fig. 2. Response surface of change in dry matter mass fraction

Из данных рисунка 2 следует, что диапазон оптимума массовой доли СВ в пивном сусле изменяется от 16,7 до 17,3 % (зеленая область) при вариации дозы ячменного солода от 46 до 54 % и изменении дозы ФП Амилосубтилин от 0,08 до 0,16 мг/кг.

Представленная модель имеет высокий уровень адекватности, т. к. коэффициент корреляции практически равен единице (0,998) и относительная ошибка равна 0,1 %, следовательно, модель может с высоким уровнем достоверности использоваться при проведении операции прогнозирования.

Математическая модель описывается зависимостью вида:

$$Z_1 = a + b \cdot X + c \cdot \sqrt{Y} \cdot \ln Y,$$

коэффициент детерминации: $R^2 = 0,998$.

Аппроксимирующая функция подобрана программой автоматически с учетом введенных экспериментальных данных. Подставив статистические оценки параметров построенной модели, вычисленные с помощью Table Curve 3D, получаем уравнение

$$Z_1 = 10,363 + 0,0336 \cdot X - 6,701 \cdot \sqrt{Y} \cdot \ln Y.$$

В качестве примера прогнозирования модели рассчитаем данные, которые не попали в экспериментальное поле, а именно, содержание СВ в пивном сусле при дозе ячменного солода – $x = 45$ % и дозы ФП Амилосубтилин, равной $y = 0,12$ мг/кг. Подставляем данные x и y в разработанную модель, имеем:

$$Z_1 = a + bx + c\sqrt{y} \cdot \ln y = 10,363 + 1,512 - 6,701 \cdot \sqrt{0,12} \cdot \ln 0,12 = 16,8.$$

Полученный результат «Экстрактивность начального суслу 16,8 %» означает, что сусло на 16,8 % состоит из СВ, содержащихся в солоде. Это подтверждает тот факт, что экстрактивность начального суслу пива напрямую влияет на содержание сухих веществ в конечном продукте. Чем выше экстрактивность, тем больше растворимых веществ (сахаров, белков, минералов и других компонентов) переходит в сусло во время варки. Более высокая экстрактивность – больше растворимых веществ извлекается из солода и других ингредиентов, что ведет к более насыщенному суслу по содержанию сухих веществ. Концентрация сухих веществ – при более высокой экстрактивности итоговая концентрация сухих веществ в сусле увели-

чивается, что влияет на последующие стадии брожения и конечный вкус пива. Необходимо пояснить, что экстрактивность начального суслу можно назвать начальной плотностью, т. е. процентное содержание сухих веществ в пивном сусле до начала процесса брожения. Большая часть этих веществ – это сахара, полученные из солода. Высокая экстрактивность указывает на большое количество сахаров, что в конечном итоге приводит к более насыщенному солодовому вкусу пива.

В готовом пиве СВ преобразуются дрожжами во время затирания, т. е. первого этапа производства пива. На данном этапе производства, когда дробленый солод и зерно добавляются в чан с подогретой водой, где пророщенные зерна выдерживают до двух–трех часов. Именно в этот момент ферменты, содержащиеся в солоде, переводят некоторые его вещества (крахмал и белок) в раствор сахаров и аминокислот. При разной температуре воды происходит активизация ферментов и растворение различных веществ. Нагрев воды и солода производят постепенно, при выдерживании пауз, тем самым запуская процесс «вытягивания» различных компонентов в основной продукт. Чем выше экстрактивность начального суслу, тем ярче и полнее солодовый вкус пива (чем ниже доля СВ, тем пиво более легкое и освежающее).

На рисунке 3 представлено изменение ДВ пивного суслу, которая характеризуется измерением вязкости или вязкотекучести жидкости (жидкость: жидкая, текучая субстанция). По данному показателю можно спрогнозировать дальнейшие действия: чем выше значение параметра «вязкость», тем более тягучая (вязкая) жидкость; чем меньше вязкость, тем он более жидкий (текучий). Наибольшее значение показатель ДВ имеет для подбора оборудования с целью контроля производственного процесса. Значение оптимума для ДВ в пределах 1,46 – 1,48 мПа*с. Доза ФП наиболее адекватна при внесении 0,12 мг/кг смеси. Можно просчитать пропорции для состава затора (50:50, пшеничный и ячменный солод соответственно).

Модель изменения динамической вязкости имеет следующий вид:

$$Z_3 = a + b \cdot X^{-1} + c \cdot Y^3,$$

где: коэффициенты модели: $a = 1,691$; $b = -5,912$;
 $c = -42,015$;

коэффициент корреляции модели: $R^2 = 0,999$.

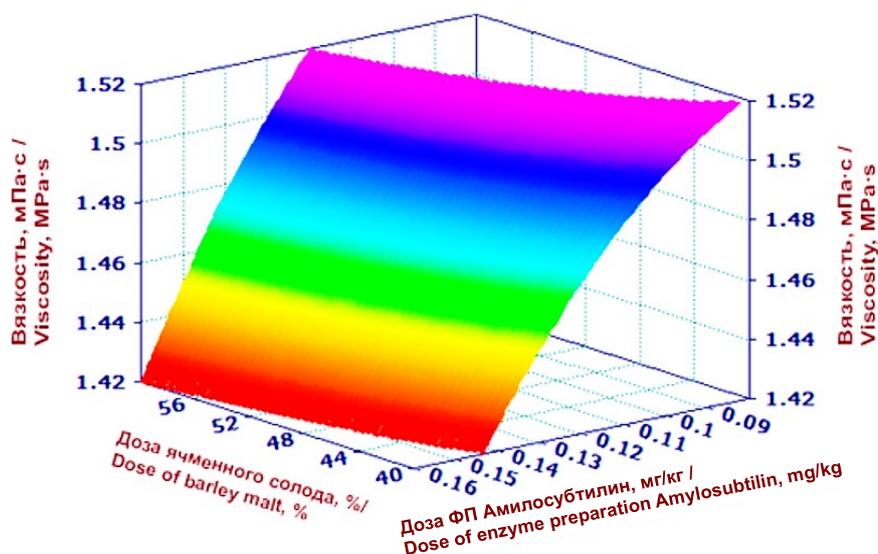


Рис. 3. Изменение ДВ пивного сула /
Fig. 3. Changes in the dynamic viscosity of beer wort

Поверхность отклика изменения КСС в пивном суле представлена на рисунке 4. Для технологической оценки углеводного состава пивного сула важным показателем

является конечная степень сбраживания. Определение этого показателя основано на сбраживании сула дрожжами с последующим нахождением количества сброженного экстракта.

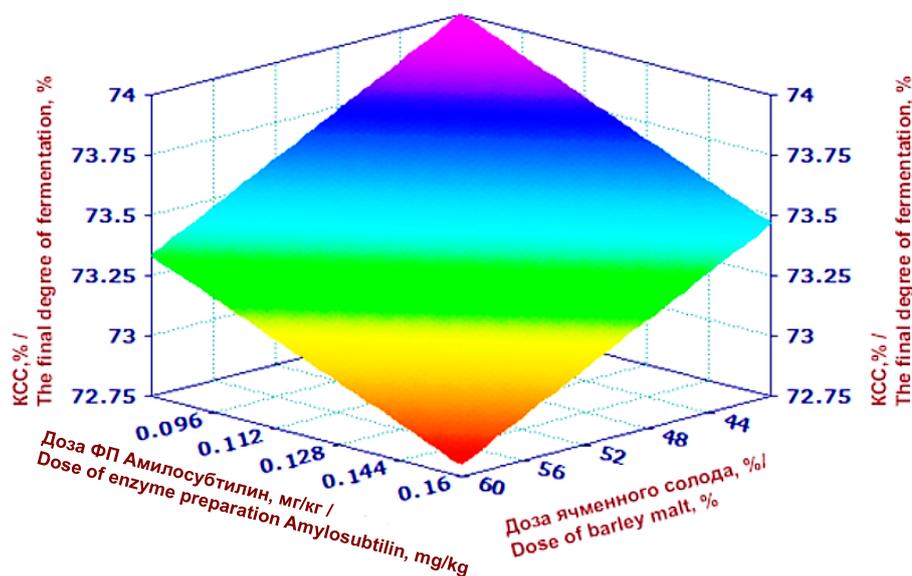


Рис. 4. Поверхность отклика изменения КСС в пивном суле /
Fig. 4. Response surface of change in the final degree of attenuation in beer wort

Математическая модель изменения КСС имеет следующий вид:

$$Z_4 = a + b \cdot X + c \cdot Y,$$

где: коэффициенты модели равны: $a = 75,867$;
 $b = -0,033$; $c = -6,667$;
коэффициент корреляции модели: $R^2 = 1$.

Математическая модель изменения КСС пивного сула представлена линейной зависимостью:

$$Z_4 = 75,867 - 0,033 \cdot X - 6,667 \cdot Y.$$

Охарактеризуем коэффициенты математической модели – при увеличении дозы

ячменного солода на 1 % КСС уменьшается на 0,033 %, при увеличении дозы ФП на 1 мг/кг, конечная степень сбраживания уменьшается на 6,667 %. По аппроксимирующей плоскости можно сделать следующие выводы: оптимальное значение КСС находится в промежутке от 73,00 до 73,25 % при дозе ячменного солода от 42,0 до 46,0 % и дозе ФП – от 0,08 до 0,11 мг/кг.

Основной процесс при производстве пива – спиртовое брожение сахаров сусла под действием ферментов дрожжей, т. е. происходит изменение химического состава сусла и превращение его в пиво. Большое значение при этом имеют первоначальный состав сусла (содержание в нем сбраживаемых сахаров, несбраживаемых углеводов, азотистых веществ, фосфатов, неорганических солей и др.) и дрожжи.

При главном брожении большая часть экстрактивных веществ превращается в продукты брожения. На основании проведенного анализа математических моделей установлено, что оптимальная КСС составляет 73,00÷73,25 % при следующих условиях проведения процесса сбраживания: доза композиционного состава затора составляет 46 % при соотношении пшеничного и ячменного солода 50:50 соответственно, доза ФП – 0,10 мг/кг.

На рисунке 5 представлено изменение активной кислотности пивного сусла, которое зависит от активности ферментов, а также выделения танинов из оболочки зерна. Изучая вопрос об активной кислотности, необходимо отметить важность именно затора.

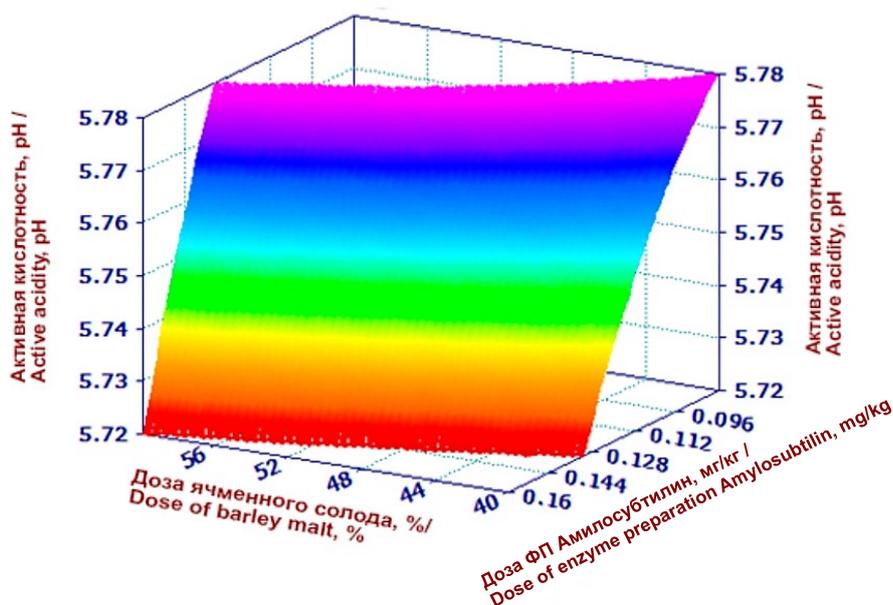


Рис. 5. Изменение активной кислотности пивного сусла /
Fig. 5. Changes in the active acidity of beer wort

Математическая модель изменения активной кислотности имеет вид:

$$Z_5 = a + b \cdot X + c \cdot Y^3,$$

где: коэффициенты модели: $a = 5,672$; $b = 0,003$;
 $c = -34,379$;

коэффициент корреляции модели: $R^2 = 0,999$;
относительная погрешность модели не превышает 0,04 %.

Согласно проведенному математическому моделированию, установили оптимум для значения pH (5,72–5,73), который находится в определенных пределах, что не противоречит основам пивоварения.

Сравнительная оценка параметров активности ферментного препарата с контрольными данными представлена в таблице 6 (контроль – показатели качества без внесения ФП, принятые за 1).

С помощью программы Table Curve 3D построены аппроксимирующие функции математических моделей ряда физико-химических показателей, определены оптимальные значения, от числовых значений которых зависит качество и органолептическая оценка готового пива.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ: ХРАНЕНИЕ И ПЕРЕРАБОТКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ / ORIGINAL SCIENTIFIC ARTICLES: STORAGE AND PROCESSING OF AGRICULTURAL PRODUCTION

Таблица 6 – Сравнительная оценка качественных показателей пива /
Table 6 – Comparative assessment of beer quality indicators

Показатель / Indicator	Опытные образцы / Experimental samples	
	контроль / control	опыт (ФП Амилосубтилин) / experiment (Enzyme preparation Amilosubtilin)
Массовая доля сухих веществ в сусле / Mass fraction of dry substances in wort	1	1,02
Объемная доля спирта / Volume fraction of alcohol	1	1,01
КСС / The final degree of attenuation	1	1,07
Высота пены / Foam height	1	1,02
Пеностойкость / Foam resistance	1	1,03
Активная кислотность / Active acidity	1	0,957

Заключение. В ходе проведения экспериментальных исследований определены физико-химические показатели: получение пивного сусла; продолжительность осахаривания; конечная степень сбраживания; массовая доля сухих веществ в заторе; объемная доля спирта; высота пены; пеностойкость. На основании полученных данных построены математические модели процесса ферментации пивного сусла с использованием ФП Амилосубтилин, которые отличались высоким уровнем адекватности, величиной коэффициентов корреляции не менее 0,99 и относительной погрешностью не более 0,5 %.

Рассмотренные математические модели позволили осуществить прогнозирование показателей процесса ферментации, не установленных экспериментальным путем, с минимальной погрешностью прогноза.

Сравнительный анализ экспериментальных данных показал, что наилучшими обладает крафтовое пиво с ФП Амилосубтилин, при применении которого массовая доля сухих веществ увеличилась в 1,02 раза (2 %), объемная доля спирта в 1,01 (1 %) и КСС в 1,07 (7 %) раза. Экспериментально было доказано, что применение ячменного солода улучшит показатели пивного

сусла: экстрактивность, продолжительность осахаривания, диастатическую силу, конечную степень сбраживания. Для оптимизации технологического процесса готового крафтового пива на этапе затирания рекомендуется добавлять ферментный препарат в оптимальной дозировке, что позволит уменьшить время осахаривания и увеличить объемную долю спирта. В целом применение выбранного ферментного препарата при производстве пива повысит эффективность производства и улучшит его качество. Данный подход позволит расширить ассортиментный ряд, снизить издержки и сократить срок выработки крафтового пива. Однако необходимо учитывать, что использование в превышающей дозировке ферментного препарата может привести к изменению вкуса и аромата пива, поэтому необходимо проводить тщательное тестирование и контроль качества в процессе производства.

В дальнейшем можно продолжить исследование в этой области, чтобы установить оптимальные дозировки ферментных препаратов для различных типов пива и разработать новые комплексы ферментных препаратов, которые могут улучшить качество пива и повысить эффективность производства.

References

1. Cabras I. Craft Beer in the EU: Exploring Different Markets and Systems Across the Continent. The Geography of Beer. N. Hoalst-Pullen, M. Patterson (eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2020. pp. 149–157. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-41654-6_12
2. Larroque M. N., Carrau F., Fariña L., Boido E., Dellacassa E., Medina K. Effect of Saccharomyces and non-Saccharomyces native yeasts on beer aroma compounds. International Journal of Food Microbiology. 2021;337:108953. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2020.108953>
3. Афанасьева О. Г., Иванов Е. А., Макушев А. Е. Анализ состояния и перспектив мировой пивоваренной промышленности и ее влияния на хмелеводческую отрасль. Аграрный вестник Урала. 2023;23(11):109–119. DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-23-11-109-119> EDN: OVKCAC
- Afanaseva O. G., Ivanov E. A., Makushev A. E. Analysis of the state and prospects of the global brewing industry and its impact on the hop industry. *Agrarnyy vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Urals. 2023;23(11):109–119. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2023-23-11-109-119>
4. Миллер Ю. Ю. Концептуальный подход к разработке ферментированных зерновых напитков. Пиво и напитки. 2023;(3):11–16. DOI: <https://doi.org/10.52653/PIN.2023.03.03.003> EDN: XDFBRT
- Miller Yu. Yu. New scientific and practical approaches to the production of fermented grain drinks. *Pivo i napitki* = Beer and beverages. 2023;(3):11–16. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52653/PIN.2023.03.03.003>
5. Medina K., Giannone N., Dellacassa E., Schinca C., Carrau F., Boido E. Commercial craft beers produced in Uruguay: Volatile profile and physicochemical composition. Food Research International. 2023;164:112349. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112349>

6. Siesto G., Pietrafesa R., Tufariello M., Gerardi C., Grieco F., Capece A. Application of microbial cross-over for the production of Italian grape ale (IGA), a fruit beer obtained by grape must addition. *Food Bioscience*. 2023;52:102487. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102487>
7. Tham A., Campton J., Cooper-McKenzie B. Tapping into flavourful journeys: a systematic review and application of craft beer tourism frameworks. *International Journal of Wine Business Research*. 2023;23:343. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJWBR-03-2023-0013>
8. Haddad F. F., Ribeiro A. P. L., Vieira K. C., Pereira R. C., Carneiro J. D. S. Specialty beers market: a comparative study of producers and consumers behavior. *British Food Journal*. 2023;125(4):1282–1299. DOI: <https://doi.org/10.1108/BFJ-10-2021-1090>
9. Bimbo F., De Meo E., Baiano A., Carlucci D. The Value of Craft Beer Styles: Evidence from the Italian Market. *Foods*. 2023;12(6):1328. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods12061328>
10. Bertuzzi T., Mulazzi A., Rastelli S., Donadini G., Rossi F., Spigno G. Targeted healthy compounds in small and large-scale brewed beers. *Food Chemistry*. 2020;310:125935. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125935>
11. Rizzon F., De Toni D., Graciola A. P., Milan G. S. Prost with craft beer! Do customer experience and price sensitivity affect product price image, perceived value and repurchase intention? *British Food Journal*. 2023;125(7):2333–2349. DOI: <https://doi.org/10.1108/BFJ-05-2022-0456>
12. Aredes R.-S., Peixoto F.-C., Sphaier L.-A., Marques F.-F. Evaluation of craft beers through the direct determination of amino acids by capillary electrophoresis and principal component analysis. *Food Chemistry*. 2021;344:128572. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.128572>
13. Baiano A. Craft beer: An overview. *Comprehensive reviews in food science and food safety*. 2021;20(2):1829–1856. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12693>
14. De Flavii R., Santarelli V., Mutarutwa D., Giuliani M., Sacchetti G. Volatiles profile of ‘Blanche’ wheat craft beer as affected by wheat origin: A chemometric study. *Food Chemistry*. 2022;385:132696. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132696>
15. Ермолаева Г. А., Ермолаев С. В. Современные технологии пива и пивных напитков на малых предприятиях. Часть I. Пиво и напитки. 2022;(1):15–21. DOI: <https://doi.org/10.52653/PIN.2022.01.01.009> EDN: ETOZZH
Ermolaeva G. A., Ermolaev S. V. Modern technologies of beer and beer drinks at small enterprises. Part I. *Pivo i napitki = Beer and beverages*. 2022;(1):15–21. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.52653/PIN.2022.01.01.009>
16. Miao Y., Gong S., Zhang Z., Xiao Y., Wang K., Zhao L., Hu Z. Physicochemical properties and antioxidant activity analysis of craft beers brewed by different litchi varieties. *Food and Fermentation Industries*. 2021;47(13):174–179. DOI: <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.026699>
17. Atallah S. S., Bazzani C., Ha K. A., Nayga R. M. Does the origin of inputs and processing matter? Evidence from consumers' valuation for craft beer. *Food Quality and Preference*. 2021;89:104146. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2020.104146>
18. Villacreces S., Blanco C. A., Caballero I. Developments and characteristics of craft beer production processes. *Food Bioscience*. 2022;45:101495. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101495>

Сведения об авторах

Шадрин Максим Александрович, кандидат техн. наук, доцент, зав. кафедрой «Биотехнология, технология общественного питания и товароведение», ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», ул. Мира, д. 11, г. Омск, Российская Федерация, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3786-4948>

✉ **Бураковская Нина Владимировна**, кандидат техн. наук, доцент кафедры «Биотехнология, технология общественного питания и товароведение», ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», ул. Мира, д. 11, г. Омск, Российская Федерация, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9419-6731>, e-mail: burakovskaya-nina@mail.ru

Молибога Елена Александровна, доктор техн. наук, профессор кафедры «Биотехнология, технология общественного питания и товароведение», ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», ул. Мира, д. 11, г. Омск, Российская Федерация, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7226-5962>

Щукина Наталья Викторовна, кандидат пед. наук, доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин, ФГБОУ ВО «Омский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина», Институтская площадь, д. 1, г. Омск, Российская Федерация, 644008, e-mail: adm@omgau.org, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3287-2017>

Приставка Мария Ивановна, аспирант, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», ул. Мира, д. 11, г. Омск, Российская Федерация, 644050, e-mail: info@omgtu.ru

Information about the authors

Maxim A. Shadrin, PhD in Engineering, associate professor, Head of the Department «Biotechnology, Catering Technology and Food Science», Omsk State Technical University, 11, Mira str., Omsk, Russian Federation, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3786-4948>

✉ **Nina V. Burakovskaya, PhD in Engineering**, associate professor, the Department «Biotechnology, Catering Technology and Food Science», Omsk State Technical University, 11, Mira str., Omsk, Russian Federation, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9419-6731>, e-mail: burakovskaya-nina@mail.ru

Elena A. Moliboga, DSc in Engineering, professor at the Department «Biotechnology, Catering Technology and Food Science», Omsk State Technical University, 11, Mira str., Omsk, Russian Federation, 644050, e-mail: info@omgtu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7226-5962>

Natalya V. Shchukina, PhD in Pedagogical Science, associate professor, the Department of Mathematics and Natural Sciences, Omsk State Agrarian University named after P. A. Stolypin, Institutskaya Square, 1, Omsk, Russian Federation, 644008, e-mail: adm@omgau.org, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3287-2017>

Maria I. Pristavka, graduate student, Omsk State Technical University, 11, Mira str., Omsk, Russian Federation, 644050, e-mail: info@omgtu.ru

✉ – Для контактов / Corresponding author