



Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК 664.769

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.020



ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КУКУРУЗНО-МОРКОВНЫХ ЭКСТРУДАТОВ

Алена Николаевна Гуляева¹, Марианна Сергеевна Воронина²

^{1,2} ФГБОУ ВО Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

¹ nikol163@bk.ru

² marianna419@rambler.ru

Аннотация. Кукурузную муку и смесь морковных выжимок экструдировали для исследования влияния процесса экструзии на общее содержание фенольных соединений (ОСФ), антиоксидантную активность (АА) и некоторые отдельные функционально-технологические свойства экструдатов. Исследования проводились для трех уровней содержания морковной муки (10 %, 20 %, 30 %), влажности сырья (15 %, 20 %, 25 %), температуры экструзии 120 °С и скорости шнека (100, 150, 200 об/мин) в качестве параметров экструзии. Более высокое содержание муки и влажность сырья благоприятствовали выделению из сырья общего содержания фенольных соединений с высокой антиоксидантной активностью. На индекс водопоглощения влияли высокая влажность сырья и низкая скорость шнека, индекс водорастворимости увеличивался при более высоком процентном содержании морковной муки и температуре экструзии, при низкой влажности сырья и скорости шнека. Оптимальные условия: 30 % содержание морковной муки, 25 % влажность сырья и 100 об/мин скорость шнека, общее содержание фенольных соединений и антиоксидантная активность экструдированных продуктов составляли 175 мг галловой кислоты/100 г СВ и 326,8 мг/мл ЕС50/100 г СВ соответственно, тогда как в контрольных экструдатах эти количества составляли 132,1 мг галловой кислоты/100 г СВ и 305,5 мг/мл ЕС50/100 г СВ соответственно.

Ключевые слова: экструзия, морковь, кукурузная крупа, экструдат, свойства, водорастворимость, водопоглощение.

Благодарности: автор выражает признательность коллегам за помощь, благодарность за финансовую поддержку исследования.

Для цитирования: Гуляева А. Н., Воронина М. С. Эмпирическое исследование функционально-технологических свойств кукурузно-морковных экструдатов // Ползуновский вестник. 2025. № 3, С. 124–128. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.020. EDN: <https://elibrary.ru/EZNLLZ>.

Original article

EMPIRICAL STUDY OF FUNCTIONAL AND TECHNOLOGICAL PROPERTIES OF CORN-CARROT EXTRUDATES

Alena Nikolaevna Gulyaeva¹, Marianna Sergeevna Voronina²

¹ FSBEI HE Samara State Technical University, Samara, Russia

¹ nikol163@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3299-1470>

² marianna419@rambler.ru

Abstract. Corn flour and carrot pomace mixture were extruded to study the effect of the extrusion process on the total phenolic content (TPC), antioxidant activity (AA) and some individual functional and technological properties of the extrudates. The studies were conducted for three levels of carrot flour content (10 %, 20 %, 30 %), raw material moisture (15 %, 20 %, 25 %), extrusion temperature of 120 °C and screw speed (100, 150, 200 rpm) as extrusion parameters. Higher flour content and raw material moisture favored the release of total phenolic content with high antioxidant activity from the raw material. The water absorption index was affected by high raw material moisture and low screw speed, the water solubility index increased at higher percentage of carrot flour and extrusion temperature, at low raw material moisture and screw speed. Under optimal conditions: 30 % carrot flour content, 25 % raw material moisture and 100 rpm screw speed, the total phenolic content and antioxidant activity of the extruded products were 175 mg gallic acid/100 g DM and 326,8 mg/ml EC50/100 g DM, respectively, while in the control extrudates these amounts were 132,1 mg gallic acid/100 g DM and 305,5 mg/ml EC50/100 g DM, respectively.

Keywords: extrusion, carrot, corn grits, extrudate, properties, water solubility, water absorption.

Acknowledgements: the author expresses gratitude to his / her colleagues for their help, thanks for the financial support of the research.

For citation: Gulyaeva, A.N. & Voronina, M.S. (2025). Empirical study of functional and technological properties of corn-carrot extrudates. Polzunovskiy vestnik, (3), 124-128. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.03.020. EDN: <https://elibrary.ru/EZNLLZ>.

© Гуляева А. Н., Воронина М. С., 2025

ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КУКУРУЗНО-МОРКОВНЫХ ЭКСТРУДАТОВ

ВВЕДЕНИЕ

Процесс экструзии является важной технологической обработкой зерновых продуктов, таких как снеки и сухие завтраки, с изменением текстуры. Экструзия – это непрерывный процесс, состоящий из смешивания, резки, нагрева, варки и формования исходного материала. Экструзионная варка – привлекательный процесс в пищевой промышленности, т.к. он универсален, высокопроизводителен, качественен, низкий по стоимости, энергоэффективен, возможно спроектировать изделия заданной формы [1].

Экструзионная варка вызывает изменение физико-химических и функциональных свойств, которые также зависят от сырья и переменных показателей процесса экструзии, таких как влажность сырья, скорость и конфигурация шнека, геометрия матрицы, температура и время [2].

Целью исследования было изучить влияние включения морковной муки и переменных показателей процесса экструзии (влажность сырья и скорость шнека) на антиоксидантные свойства (общее содержание фенольных соединений, антиоксидантную активность) и функциональные свойства (показатель водопоглощения, показатель водорастворимости) экструдированных продуктов.

МЕТОДЫ

Объектами исследования выступают кукурузная крупа и морковная мука. Химический состав всех ингредиентов приведен в таблице 1.

Смеси были составлены из кукурузной крупы и морковной муки в соотношениях 90:10, 80:20 и 70:30 соответственно.

Эксперименты по экструзии проводили на одношнековом экструдере. Экструдер имел диаметр

шнека 19 мм с соотношением длины к диаметру 30:1, номинальной степенью сжатия 3:1 и отверстием матрицы 3 мм. Температуру зоны подачи поддерживали постоянной на уровне 50 °C на протяжении всех экспериментов. Параметрами экструзии, включающими независимые переменные, скорость шнека (100, 150 и 200 об/мин) и влажность сырья 10, 15 и 25 %.

Экстракцию образца для определения общего содержания фенольных соединений и антиоксидантной активности: 1 г образца смешивали с 10 мл этилового спирта ректификованного с дистиллированной водой (1:1), встряхивали на низкой скорости в течение 1 ч и затем центрифугировали при 3000 об/мин в течение 20 мин. Супернатант декантировали и остаток повторно экстрагировали. Два супернатанта объединяли и хранили при 20 °C для анализа общего содержания фенольных соединений и антиоксидантной активности [3].

Общее содержание фенольных соединений (ОСФ) образца определяли методом Фолина-Чокальтеу с некоторыми модификациями. К 50 мкл экстракта образца добавляли 3,5 мл дистиллированной воды и 150 мкл реагента Фолина-Чокальтеу. Раствор перемешивали и выдерживали в течение 30 мин при 37 °C. После этого измеряли поглощение раствора при 760 нм против холостого образца. Контрольный раствор содержал все компоненты, присутствовавшие в образце, за исключением экстракта. Галловую кислоту использовали в качестве положительного контроля (стандарта), и для стандарта строили зависимость между поглощением и концентрацией окрашенных соединений. Эту стандартную кривую использовали для расчета концентрации образца, а данные выражали в мг эквивалента галловой кислоты (галловой кислоты)/100 г сухого веса (СВ). Этот анализ проводили в трех повторностях [3].

Таблица 1 – Химический состав сырья перед процессом экструзии [2]

Table 1 – Chemical composition of raw materials before the extrusion process [2]

Компонент, г/100 г	Кукурузная крупа	Морковная мука
Содержание влаги	10,3±0,23	12,1±0,21
Минеральные вещества	0,93±0,06	0,9±0,03
Жиры	1,20±0,09	0,1±0,07
Белки	6,18±0,77	1,5±0,05
Крахмал	84,7±2,46	0,6±0,01
Общее количество пищевых волокон	2,57±0,01	3,8±0,04
- растворимые	0,91±0,01	0,8±0,04
- нерастворимые	1,66±0,01	3,0±0,04

Таблица 2 – Определение эффектов и оптимальных уровней экспериментальных параметров по методу Бокса-Бенкена

Table 2 – Determination of effects and optimal levels of experimental parameters using the Box-Behnken method

Уровень	Содержание морковных выжимок	Влажность сырья	Скорость шнека	Уровень	Содержание морковных выжимок	Влажность сырья	Скорость шнека
1	-1	-1	0	12	0	0	+1
2	+1	0	-1	13	0	0	0
3	+1	0	0	14	0	+1	+1
4	0	+1	-1	15	0	-1	0
5	-1	0	-1	16	+1	0	+1
6	0	0	-1	17	-1	+1	0
7	+1	0	0	18	0	-1	-1
8	-1	0	+1	19	+1	+1	0
9	-1	0	0	20	0	+1	0
10	-1	0	0	21	+1	-1	0
11	0	+1	0	22	0	-1	+1
Переменные				Уровни			
				-1	0	+1	
Содержание морковной муки, %				10	20	30	
Влажность сырья, %				10	15	25	
Скорость шнека, об/мин				100	150	200	

Таблица 3 – Оцененные оптимальные условия, прогнозные и экспериментальные значения реакций процесса экструзии
 Table 3 – Estimated optimal conditions, predicted and experimental values of reactions of the extrusion process

Образцы	Оптимальные условия				Антиоксидантные свойства				Функциональные свойства			
	Содержание выжимок, %	Влажность, %	Температура, °C	Скорость шнека, об/мин	Общее содержание фенольных соединений, мг ГК/100 г СВ		Антиоксидантная активность, мг/мл E_{c50} /100 г СВ		Индекс водопоглощения, г/г СВ		Индекс водорастворимости, г/100 г СВ	
					теор	факт	теор	факт	теор	факт	теор	факт
Экструдат	30	29	75	100	131,4	175	327,4	326,8	2,48	2,50	21,6	21,1
Контрольный образец						132,1		305,5		6,18		15,4
Смесь						171,6		381,8		-		-

Антиоксидантная активность

Анализ DPPH представляет собой активность по улавливанию свободных радикалов. Раствор 2,2-дифенил-1-пикрилгидразила (ДФПГ) готовили добавлением 7,9 мг ДФПГ в 200 мл этилового спирта ректификованного. 125 мкл экстракта смешивали с 2 мл этанола и к 0,5 мл этого раствора добавляли 3 мл DPPH. Раствор перемешивали и выдерживали в течение 30 мин. После этого измеряли поглощение раствора и контроля (DPPH) при 517 нм относительно холостого раствора (этанола). Результаты выражали в мг/мл E_{c50} /100 г СВ. Образцы анализировали в трех повторностях [3].

Содержание влаги

Содержание влаги в образцах определяли стандартными методами в сушильном шкафу. Первоначально 5 г образца в трех экземплярах сушили с горячим воздухом при температуре 130–133 °C в течение 2 часов. После высушивания высушенный образец еще раз взвешивали. Следующая формула используется для расчета содержания влаги (W).

$$W(\%wb) = \frac{W_i - W_f}{W_i} \times 100,$$

где W_i – начальный вес образца (5 г),

W_f – масса образца после высушивания, г.

Индекс водопоглощения (ИВП) и индекс водорастворимости (ИВР)

Для определения ИВП и ИВР экструдатов применяли следующую методику. Измельченные экструдаты (2,5 г) суспендировали в дистиллированной воде (30 мл) в центрифужной пробирке емкостью 60 мл. Суспензию периодически перемешивали и центрифугировали при 3000^{-1} в течение 10 мин. Надосадочную жидкость декантировали в алюминиевую чашку и сушили при 135 °C в течение 2 часов. Измеряли массу геля, оставшегося в центрифужной пробирке. ИВП и ИВР были рассчитаны по:

$$ИВП = \frac{W_g}{W_{ds}} \times 100,$$

где ИВП – показатель водопоглощения,

W_g – масса геля (г),

W_{ds} – масса сухого образца (г).

$$ИВР = \frac{W_{ss}}{W_{ds}} \times 100,$$

где ИВР – показатель растворимости в воде (%),

W_{ss} – масса сухих твердых веществ надосадочной жидкости (г),

W_{ds} – масса сухого образца (г) [4].

Определение оптимальных условий экструзии

В экспериментах по экструзии применяли способ Бокса-Бенкена для определения эффектов и оптимальных уровней экспериментальных параметров. Эффекты изучались на трех экспериментальных уровнях –1, 0 и +1. Всего потребовалось 20 экспериментов, как описано в таблице 2.

Экспериментальные данные были проанализированы с помощью метода регрессии поверхности отклика, а параметры, полученные в результате анализа методологии поверхности отклика (МПО), были подставлены в следующее уравнение полиномиальной модели второго порядка.

$$Y_i = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i X_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^k \beta_{ij} X_i X_j,$$

где Y_i – прогнозируемый ответ;

β_0 – коэффициент перехвата;

β_i , β_{ii} и β_{ij} – коэффициенты линейных, квадратичных членов и членов взаимодействия;

X_i и X_j – переменные;

k – количество независимых параметров ($k = 3$).

Статистический анализ

Для оценки экспериментальных данных использовали множественный регрессионный анализ и дисперсионный анализ (МРАДА). Моделирование началось с квадратичной модели, включающей линейные, квадратичные условия взаимодействия. Значимые члены модели для каждого ответа были найдены с помощью МРАДА. Адекватность и качество моделей проверялись путем оценки несоответствия (ОН), коэффициента детерминации R^2 и значения p , полученного из МРАДА. Методология желаемых функций Дерринджера была использована для создания оптимальных условий для переменных процесса экструзии по всем свойствам экструдированных продуктов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методика поверхности отклика была использована для анализа влияния параметров экструзии на антиоксидантные и функциональные свойства экструдированных продуктов.

Коэффициенты регрессии математических моделей описывают все экспериментальные реакции в зависимости от соотношения морковных выжимок (X_1), влажности сырья (X_2) и скорости шнека (X_3) для процесса экструзии.

Линейные и квадратичные члены содержания морковных выжимок и скорости вращения шнека экструзии значимо ($p < 0,05$) и влияют на общее содер-

ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КУКУРУЗНО-МОРКОВНЫХ ЭКСТРУДАТОВ

жание фенольных соединений и антиоксидантную активность. Определенные значения общего содержания фенольных соединений и антиоксидантной активности находились в пределах 66,3–177,5 мг галловой кислоты/100 г сухой массы и 124,2–336,8 мг/мл Ес50/100 г СВ соответственно.

На рисунке 1 представлены графики поверхности отклика, отражающие влияние содержания морковных выжимок, влажности сырья и скорости вращения шнека на общее содержание фенольных соединений в экструдатах. Графики для антиоксидантной активности не приведены, поскольку её изменения коррелировали с динамикой общего содержания фенольных соединений. Тенденция, наблюдаемая для общего содержания фенольных соединений при одновременном изменении содержания морковных выжимок и скорости вращения экструдера, показана на рисунке 1. Общее содержание фенольных соединений экструдатов увеличивалась на 62 % при повышении скорости вращения от 80 до 100 об/мин независимо от уровня содержания морковных выжимок.

Что касается влияния влажности сырья и скорости вращения шнека на общее содержание фенольных соединений, предполагается, что увеличение влажности сырья с 10 до 25 % вызывает значительное ($p < 0,05$) увеличение общего содержания фенольных соединений на 20 %.

Из МРАДА видно, что на ИВП значительно ($p < 0,05$) влияли линейные члены влажность сырья, скорость шнека и влажность сырья. Функциональные свойства экструдатов ИВП, ИВР наблюдались в диапазоне 2,05–4,76 г/г сухой массы и 9,28–22,8 г/100 г сухой массы соответственно.

Водопоглощение обычно связывают с дисперсией крахмала в избытке воды, и дисперсия увеличивается в зависимости от степени повреждения крахмала из-за желатинизации и фрагментации, вызванной экструзией, то есть уменьшения молекулярной массы молекул амилозы и амилопектина.

Результаты, касающиеся влияния скорости шнека на ИВП, показали, что по мере увеличения скорости шнека от 100 до 200 об/мин ИВП увеличивался на 33 %.

Что касается влияния содержания морковных выжимок и скорости шнека на ИВР, было замечено: при увеличении содержания морковных выжимок с 10 % до 30 % ИВР экструдатов увеличивался на 28 % при низкой скорости вращения шнека (100 об/мин). Более высокий показатель ИВР при более высоком содержании морковных выжимок можно объяснить присутствием низкомолекулярных соединений, т.е. присутствие растворимой клетчатки в выжимках вызывает увеличение ИВР в экструдатах.

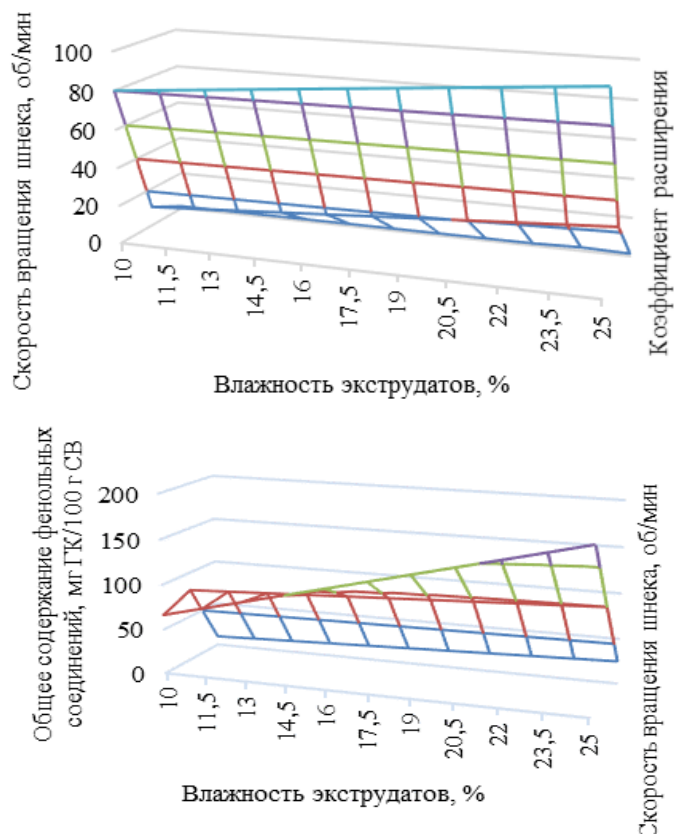


Рисунок 1 – Графики поверхности отклика общего содержания фенольных соединений (ОСФ), коэффициента расширения (КР), зависящие от влажности экструдатов (W) и скорости вращения шнека экструдера (ω) при соответствующем нулевом кодированном уровне двух других переменных

Figure 1 – Response surface plots of total phenol content (TPC), coefficient of expansion (CE) as a function of extrudate moisture content (W) and extruder screw speed (ω) at the corresponding zero coded level of the other two variables

ОБСУЖДЕНИЕ

Оптимальные условия процесса были исследованы для переменных процесса экструзии путем максимизации общего содержания фенольных соединений, антиоксидантной активности, ИВР и минимизации ИВП. В таблице 3 указаны оптимизированные условия процесса экструзии, а также прогнозируемые и экспериментальные переменные отклика. Прогнозируемые результаты хорошо согласуются с экспериментальными результатами.

Экструдированные продукты при оптимальных условиях экструзии без введения морковных выжимок называются контрольными экструдатами. Из таблицы 3 видно, что общее содержание фенольных соединений и антиоксидантная активность экструдатов, полученных с использованием выжимок, называемых экструдатами, показали на 12 % и 7 % больше общего содержания фенольных соединений и антиоксидантной активности соответственно по сравнению с контрольными экструдатами.

ИВП является функцией внутренних пустот в образце и толщины клеточных стенок пустот. Добавление выжимок моркови изменило структуру пустот в смеси и, таким образом, могло повлиять на ИВП конечных экструдатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экструдированные продукты, полученные путем экструзии кукурузной муки с добавлением морковных выжимок, продемонстрировали более высокие показатели общего содержания фенольных соединений и антиоксидантной активности. Основное влияние на общее содержание фенольных соединений и антиоксидантную активность экструдатов оказывали концентрация морковных выжимок и температура экструзии.

Как очевидно, содержание морковных выжимок оказало положительное влияние, тогда как температура оказала отрицательное влияние на общее содержание фенольных соединений и антиоксидантную активность экструдатов. Более низкие влажность сырья, температура экструзии и скорость шнека благоприятствовали низкому ИВП, тогда как ИВР становился больше с увеличением содержания морковных выжимок, температуры экструзии и уменьшением влажности сырья, скорости шнека. Благодаря улучшенным антиоксидантным свойствам включение морковных выжимок во время экструзии может представлять интерес для разработки различных обогащенных продуктов питания в будущем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mohammed S.A., Raouf A. Extrusion for the Production of Functional Foods and Ingredients / Innovative Food Processing Technologies. (2021). 22–35. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.23041-2>.
2. Chiara R. Extrusion-cooking affects oat bran physicochemical and nutrition-related properties and increases its β -glucan extractability / Chiara R., Eline V.W., Muriel H.,

Yamina D.B., Hélène C., Roberto K., Lisa M.L., Christophe M.C. // Journal of Cereal Science. (2021). <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103360>.

3. Гуляева А.Н., Воронина М.С. (2020). Разработка методологии повышения пищевой ценности полуфабрикатов для мучных кондитерских изделий. Инновации и продовольственная безопасность. № 3. 7–13. <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2020-29-3-7-13>.

4. Остриков А.Н. [и др.]. Экструзия в пищевой технологии / А.Н. Остриков, О.В. Абрамов, А.С. Рудометкин. СПб.: ГИОРД, 2004. 288 с.

5. Афанасьев В.А., Фролова Л.Н., Сизиков К.А., Остриков А.Н., Зобова С.Н. Математическая модель процесса экструзии зерновых культур при неизотермическом течении их расплава до температуры начала реакции Майяра // Вестник ВГИТ. 2021. Т. 83. № 1. С. 23–29. Doi: 10.20914/2310-1202-2021-1-23-29.

Информация об авторах

А. Н. Гуляева – аспирант, старший преподаватель Высшей биотехнологической школы, Самарский государственный технический университет.

М. С. Воронина – к.т.н., доцент, доцент Высшей биотехнологической школы, Самарский государственный технический университет.

REFERENCES

1. Mohammed, S.A., Raouf, A. (2021). Extrusion for the Production of Functional Foods and Ingredients. Innovative Food Processing Technologies 22–35. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.23041-2>.
2. Chiara, R., Eline, V.W., Muriel, H., Yamina, D.B., Hélène, C., Roberto, K., Lisa, M.L. (2021). Extrusion-cooking affects oat bran physicochemical and nutrition-related properties and increases its β -glucan extractability / Christophe, M.C. Journal of Cereal Science <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2021.103360>.
3. Gulyaeva, A.N., Voronina, M.S. (2020). Development of a methodology for increasing the nutritional value of semi-finished products for flour confectionery. Innovations and Food Security. No. 3. 7–13. <https://doi.org/10.31677/2311-0651-2020-29-3-7-13>. (In Russ.).
4. Ostrikov, A.N., Abramov, O.V., Rudometkin, A.S. (2004). Extrusion in food technology. SPb.: GIORД, 2004. 288 p. (In Russ.).
5. Afanasyev, V.A., Frolova, L.N., Sizikov, K.A., Ostrikov, A.N., Zobova, S.N. (2021). Grain crops extrusion process mathematical model at a non-isothermal flow of their melt up to the temperature of the Maillard reaction start // Vestnik VGUIT. 2021. Vol. 83. No. 1. Pp. 23–29. Doi: 10.20914/2310-1202-2021-1- 23-29. (In Russ.).

Information about the authors

A.N. Gulyaeva - postgraduate student, senior lecturer of the Higher School of Biotechnology, Samara State Technical University.

M.S. Voronina - PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Higher School of Biotechnology, Samara State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 22 октября 2024; одобрена после рецензирования 24 июня 2025; принята к публикации 10 июля 2025.

The article was received by the editorial board on 22 Oct 2024; approved after editing on 24 June 2025; accepted for publication on 10 July 2025.