

<https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-2-81-89>

УДК [633.854.78:577.1]:612.392.82

© 2024



Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interests

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ / ORIGINAL ARTICLE

Экстракция подсолнечного белка с применением ультразвукового излучения

**Ирина В. Крылова^{1,2*}, Александр В. Федоров^{1,2},
Мария Л. Доморощенко², Татьяна Ф. Демьяненко²,
Лилия О. Шагинова²**

¹ *Университет ИТМО; Кронверкский пр-кт, 49, литер А, г. Санкт-Петербург,
191119, Российская Федерация*

² *Всероссийский НИИ жиров; ул. Черняховского, 10Б, Санкт-Петербург,
191119, Российская Федерация*

Аннотация. Подсолнечный шрот является перспективным источником белка, который может применяться как пищевой ингредиент в рецептурах мясных, мучных и кондитерских изделий. Для выделения подсолнечного белка традиционно применяется технология щелочной экстракции, но ее эффективность может быть повышена с помощью физических методов: ультразвукового и микроволнового излучения, экстракции при повышенном давлении и других. Данная статья посвящена применению ультразвуковой обработки с целью повышения эффективности экстракции белка из обезжиренного растительного материала: из белковой фракции подсолнечного шрота и из подсолнечного шрота. Подготовку опытных проб к экстракции белка проводили с применением обработки опытных проб в ультразвуковой ванне в течение 15 минут при частоте 40 герц при температуре 24-28°C. Контрольную пробу такой предварительной обработке не подвергали. Затем из сырья выделяли белок методом щелочной экстракции с последующим изоэлектрическим осаждением. Показана возможность получения белкового продукта с более высоким содержанием сырого протеина (93,66% на сухое вещество) по сравнению с контрольным образцом. Определен массовый выход белка, составивший 64% от его содержания в сырье. Показано влияние ультразвуковой обработки на эффективность экстракции белка из сырья с различным содержанием сырого протеина. Результаты исследования показывают целесообразность применения ультразвука в получении белка подсолнечника. В частности, содержание сырого протеина в белковой пасте с помощью ультразвуковой обработки было повышено на 8,23% по сравнению с контрольной пробой. Сопоставление полученных результатов показало их соответствие с результатами других исследований. При этом существует лишь небольшое количество исследований, посвященных применению ультразвука при экстракции продуктов переработки подсолнечника.

Ключевые слова: подсолнечный белок, экстракция, ультразвук, частота, подсолнечный шрот, сырой протеин, выход белка

Для цитирования: Крылова И.В., Федоров А.В., Доморошченкова М.Л. и др. Экстракция подсолнечного белка с применением ультразвукового излучения. *Новые технологии / New technologies.* 2024; 20(2):<https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-2-81-89>

Ultrasonic treatment assisted extraction of sunflower protein

Irina V. Krylova^{1,2}, Alexandr V. Fedorov^{1,2}, Maria L. Domoroshchenkova²,
Tatiana F. Demyanenko², Liliya O. Shaginova²

¹ ITMO University; 49 Kronverksky prospect, letter A, St. Petersburg, 191119, the Russian Federation

² All-Russian Research Institute of Fats; st. 10B Chernyakhovsky St. Petersburg, 191119, the Russian Federation

Abstract Sunflower meal is a promising source of protein, which can be used as a food ingredient in the formulations of meat, flour and confectionery products. Alkaline extraction technology is traditionally used to obtain sunflower protein, but its efficiency can be increased using physical methods: ultrasound, microwave radiation, extraction at high pressure and others. This article deals with an application of the ultrasonic treatment for increase of the efficiency of protein extraction from defatted plant material: from the protein fraction of sunflower meal and from sunflower meal. The trial samples for protein extraction were prepared by the preliminary treatment of the samples in the ultrasonic bath for 15 minutes at a frequency of 40 hertz at temperature 24-28°C. The control sample was not subjected to such pretreatment. Then protein was isolated from the raw material by alkaline extraction followed by isoelectric precipitation. The possibility of the protein preparation isolation with a higher crude protein content (93,66% m.f.b) compared to the control sample has been shown. The mass yield of protein was 64% of its content in the raw material. The influence of ultrasonic treatment on the efficiency of protein extraction from raw material with different crude protein content is demonstrated. The results of the study show the feasibility of usage of ultrasound treatment in isolation of sunflower protein. In particular, the crude protein content in the trial protein sample after ultrasonic treatment was increased by 8,23% compared to the control sample. The obtained results demonstrated their consistency when compared to the results of other studies. However, there are only a limited number of studies on the use of ultrasound in the extraction of sunflower derived products.

A comparison of the results obtained showed their consistency with the results of other studies. However, there are only a small number of studies on the use of ultrasound in the extraction of sunflower processing products.

Keywords: sunflower protein, extraction, ultrasound, frequency, sunflower meal, crude protein, protein yield

For citation: Krylova I.V., Fedorov A.V., Domoroshchenkova M.L. et al. Extraction of sunflower protein using ultrasonic radiation. *Novye tehnologii / New technologies.* 2024; 20(2):<https://doi.org/10.47370/2072-0920-2024-20-2-81-89>

Введение. Подсолнечный белок, полученный из жмыхов и шротов, может применяться в пищевой промышленности для включения в рецептуры пищевых продуктов. Для обогащения растительным белком он может быть добавлен в мучные, кондитерские и мясные изделия. Наиболее удобными формами подсолнечного белка для включения в пищевые продукты являются изоляты и концентраты. Технология получения белкового изолята подсолнечника основана на экстракции белка щелочными растворами с последующим осаждением и центрифугированием. Получаемый изолят характеризуется низким содержанием клетчатки и более высоким содержанием некоторых аминокислот (лизин, метионин, треонин) [1].

Щелочная экстракция белков основана на изменении их растворимости при различных значениях рН. Белки наиболее растворимы при щелочных условиях, так как заряженные и полярные группы взаимодействуют с молекулами растворителя – воды. На растворимость влияют также взаимодействия белков друг с другом и с растворителем, строение белка – гидрофильно-гидрофобный баланс поверхности белковой молекулы. Температура процесса щелочной экстракции должна быть достаточно низкой, чтобы не вызывать денатурацию белка и сохранить его структуру наиболее близкой к нативной. В некоторых случаях процесс ведут при повышенной температуре, чтобы вызвать частичную или полную денатурацию и повлиять таким образом на функциональные характеристики белка (например, способность к гелеобразованию). Другими параметрами процесса щелочной экстракции являются скорость перемешивания (зависящая от используемого оборудования), продолжительность процесса (от одного часа до суток) и соотношение массы сырья к объему растворителя (от 1:4 до 1:15) [2, 3].

Помимо щелочной экстракции существуют инновационные технологии извлечения растительных белков. К ним относятся:

экстракция сверхкритическими растворителями, экстракция с применением ферментов, применение ультразвука, микроволновая экстракция, электростатическая сепарация и другие физические методы [4, 5]. Применение данных методов направлено на более полное сохранение нативной структуры и функционально-технологических свойств белка, сокращение времени процесса и количества растворителя [3, 6]. Эти методы могут также применяться в сочетании со щелочной экстракцией.

Экстракция с применением ультразвука – способ интенсификации массопереноса, позволяющий более эффективно использовать сырье. Для обработки пищевого сырья чаще всего используются ультразвуковые волны с частотой от 20 до 100 кГц [7, 8]. Экстракция с применением ультразвука сочетает в себе термический, механический и кавитационный эффект. Эти воздействия разрушают клеточные стенки растительного сырья, способствуют проникновению растворителя внутрь клетки и влияют на внутреннюю структуру клетки. При этом содержимое клетки, включая целевой продукт, переходят в раствор, что повышает выход процесса экстракции [9, 10]. В исследованиях по экстракции с применением ультразвука были изучены такие виды сырья, как миндаль, перилла, рапс, арахис, соя, подсолнечник, рис, горох и другие [4]. В большинстве исследований выход белка был повышен по сравнению с выходом при экстракции традиционными методами, одновременно повысились растворимость и функциональные свойства белков [11, 12].

На эффективность экстракции с применением ультразвука влияет ряд параметров: интенсивность и продолжительность воздействия ультразвука, температура, давление, рН раствора, соотношение твердого материала к растворителю, размер и форма реактора [13]. Высокоинтенсивное ультразвуковое воздействие применяется для повышения функционально-технологических свойств пищевых ингредиентов различного состава [14, 15, 16].

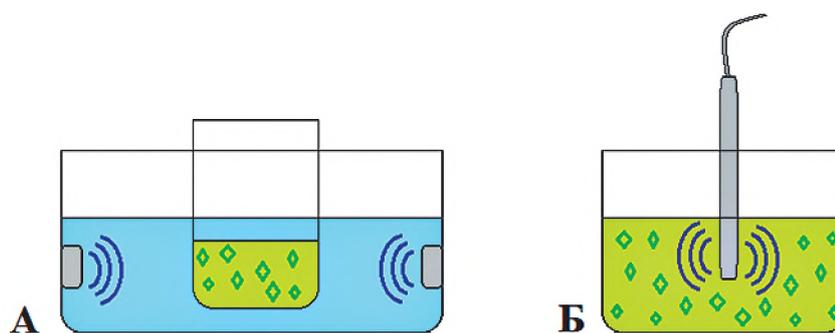


Рис. 1. Разновидности ультразвуковых установок

Fig. 1. Types of ultrasonic installations

Ультразвуковая установка может представлять собой ультразвуковую ванну (рис. 1 А) или сонотрод (рис. 1 Б). В первом случае исследуемый раствор помещают в емкость, которую ставят в резервуар ультразвуковой ванны, заполненной рабочей жидкостью, с излучателями по сторонам. Во втором случае ультразвуковой излучатель (сонотрод) погружают непосредственно в исследуемый раствор. Ультразвуковая ванна обеспечивает более равномерное распространение ультразвука по всему объему раствора и во всех направлениях [17, 18, 19].

Целью данного исследования было определение влияния предварительной ультразвуковой обработки на эффективность экстракции растительного сырья. Для этого решались следующие задачи: сравнение экстракции сырья, обработанного и необработанного ультразвуком; изучение влияния ультразвука на сырье различного состава; определение массового выхода сырого протеина при ультразвуковой экстракции. В качестве исследуемого объекта был выбран подсолнечный шрот и продукты его переработки.

Материалы и методы. В качестве объектов исследования были выбраны подсолнечный шрот и продукт его переработки – белковая фракция. Белковая фракция (Образец 1) была получена путем механического измельчения шрота на электрической мельнице ЭМ-3А (ТУ

46-22-26-84) и просеивания сквозь сито с размером ячеек 0,25 мм. Такая обработка шрота приводит к повышению уровня белка и снижению уровня клетчатки. В данном случае белковая фракция содержала 41,08% сырого протеина на а.с.в., 22,67% сырой клетчатки на а.с.в. и 8,28% влаги.

Подсолнечный шрот (Образец 2) российского производства (ГОСТ 11246-96) содержал 34,75% сырого протеина на а.с.в., 27,21% сырой клетчатки на а.с.в., 1,81% жира на а.с.в. и 9,59% влаги.

Для проведения ультразвуковой обработки использовали ванну ультразвуковую Stegler 3DT емкостью 3 л, с мощностью ультразвука 120 Вт и частотой 40 кГц. Ультразвуковую обработку образца проводили в течение 15 минут при температуре 24–28°C (повышение температуры происходит в процессе воздействия ультразвука).

Выделение белка проводили методом щелочной экстракции 0,1% водным раствором гидроксида натрия при соотношении материала к раствору 1:10 и температуре 55°C в течение 30 минут. После проведения экстракции отделяли центрифугированием нерастворимый осадок. Из жидкости осаждали белок в изоэлектрической точке 10% водным раствором соляной кислоты. После центрифугирования получали влажный осадок, представлявший собой белковую пасту.

В полученной белковой пасте определяли содержание сухих веществ методом

высушивания до постоянного веса при 105°C. Содержание сырого протеина в белковой пасте определяли методом Кьельдаля с применением анализатора азота KjelFlex K-360. Все измерения влаги и сырого протеина выполняли в двух повторностях, вычисляя значение как среднее двух измерений.

Результаты и обсуждение. В исследовании [20], посвященном экстракции подсолнечного белка, проводили его предварительную обработку ультразвуковым излучением. В качестве сырья также брали подсолнечный шрот с размером частиц 0,25 мм с содержанием белка около 30%. По результатам исследования, при облучении ультразвуком в течение 15 мин,

количество белка в растворе выходит на плато и при увеличении времени остается на том же уровне. Исходя из этого, время обработки ультразвуковым излучением в данном исследовании было выбрано равным 15 минутам. Частота ультразвука составляла 20 и 28 кГц, при этом с повышением частоты повышался выход белка. В данном исследовании было использовано оборудование с частотой ультразвука 40 кГц. Следует учесть, что использованное оборудование представляло собой соноотрод – излучатель ультразвука, который погружают в раствор, а в данном исследовании была использована ультразвуковая ванна. Схема проведенных экспериментов представлена на рисунке 2.



Рис. 2. Схема экспериментов

Fig. 2. Scheme of experiments

В качестве контрольного измерения (Опыт 1) была проведена экстракция Образца 1 (41,08% сырого протеина на а.с.в.) без ультразвуковой обработки. Первые 15 минут после добавления щелочного раствора навеску образца массой 15 г выдерживали при комнатной температуре при перемешивании. Затем проводили щелочную экстракцию 0,1% раствором гидроксида натрия, при перемешивании на водяной бане с температурой 55°C. Осадок, оставшийся после экстракции, от-

деляли центрифугированием в течение 15 минут при 3000 об/мин. Осаждение белка из надосадочной жидкости проводили 10% раствором соляной кислоты в изоэлектрической точке. После центрифугирования при тех же условиях получали в качестве осадка белковую пасту. Содержание сырого протеина на абсолютно сухое вещество в полученной белковой пасте составило 85,43%.

Для изучения ультразвукового воздействия на состав белковых продуктов

(Опыт 2) была проведена экстракция образца 1 (41,08% сырого протеина на а.с.в.) с предварительной обработкой ультразвуком. Обработку проводили в ультразвуковой ванне с частотой 40 кГц в течение 15 мин, при перемешивании, при температуре рабочей жидкости 28°C.

Затем проводили щелочную экстракцию и осаждение белка при тех же условиях, что и в контрольном измерении. Содержание сырого протеина на абсолютно сухое вещество в полученной белковой пасте составило 93,66%, то есть на 8,23% больше, чем в контрольном измерении.



Рис. 3. Обработка образцов в ультразвуковой ванне

Fig. 3. Treatment of samples in an ultrasonic bath

Чтобы изучить влияние состава сырья на состав белковых продуктов (Опыт 3), была проведена экстракция Образца 2 (34,75% сырого протеина на а.с.в.) с предварительной обработкой ультразвуком. Обработку образца ультразвуком проводили при тех же условиях, что и для Образца 1. Затем проводили щелочную экстракцию и осаждение белка при тех же условиях, что и в контрольном изме-

рении. Содержание сырого протеина на абсолютно сухое вещество в полученной белковой пасте составило 85,13%. Это значение незначительно отличается от полученного в контрольном измерении, несмотря на то, что содержание белка в сырье в данном случае было на 6,33% ниже. Состав белковых продуктов, полученных во всех трех опытах, представлен в таблице 1.

Таблица 1

Состав белковых продуктов

Table 1

Composition of protein products

Состав продукта	Опыт 1	Опыт 2	Опыт 3
Влага, %	80,78 ± 0,01	78,85 ± 0,01	84,22 ± 0,01
Сырой протеин, %	16,42 ± 0,5	19,81 ± 0,5	13,43 ± 0,5
Сырой протеин, % а.с.в.	85,43 ± 0,5	93,66 ± 0,5	85,13 ± 0,5

В Опыте 3 дополнительно был определен массовый выход белка. Масса навески составляла 38 г, количество белка на исходное вещество 31,53%. Таким образом, навеска содержала 12 г белка. Белковая паста с содержанием сырого протеина 13,43% и массой 57 г содержала 7,7 г белка. Массовый выход белка в данном опыте составил $(7,7 \cdot 100) / 12 = 64\%$.

Полученные результаты можно сравнить с предыдущими исследованиями. Например, при щелочной экстракции бобов вигны с применением ультразвука [21] был получен продукт с содержанием сырого протеина 77,3% (после высушивания). В качестве сырья была взята обезжиренная мука из бобов вигны с содержанием белка 26,4%, продолжительность воздействия ультразвука составляла 20 минут. Для получения белка из семян конопли [22] проводили ферментативный гидролиз, после чего применяли ультразвук с частотой 20 кГц в течение 8 минут. При этом содержание белка в полученных продуктах составляло от 92,4% до 94,3%. При экстракции семян акебии [15], содержащих 20,84% протеина и обработанных в ультразвуковой ванне в течение 60 минут, был получен белковый продукт с содержанием протеина 54,17%. Приведенные значения сравнимы с результатом (93,66%), полученным в данном исследовании. Разброс значений можно объяснить различиями в составе сырья, а также условиях ультразвуковой обработки.

При ультразвуковой экстракции бобов вигны [11] был достигнут выход белка 26,72% после 210 минут экстракции. Однако в другом исследовании экстракции бобов вигны [21] применение ультразвука повысило выход белка с 32% (контроль)

до 59%. Использование ультразвукового излучения при получении белка конопли [22]: выход белка составлял от 35,1% до 49,7% в зависимости от условий экстракции. При ультразвуковой экстракции семян акебии (в ультразвуковой ванне в течение 60 минут) [15] выход белка составил 20,84%. Воздействие ультразвука на семена кунжута [7]: был достигнут выход белка 59,8%. Таким образом, выход белка при ультразвуковой экстракции составлял, в зависимости от сырья и от параметров процесса, от 20,84% до 59,8%. Полученный в данном исследовании выход в 64% также соответствует этим значениям.

Выводы. В данном исследовании было изучено воздействие ультразвука на растительное сырье при извлечении белка. Было показано повышение содержания сырого протеина в полученных продуктах. После ультразвуковой обработки исследуемых образцов содержание сырого протеина в полученной белковой пасте было на 8,23% выше, чем в контроле. Достигнутый при этом уровень сырого протеина в продукте (93,66% на сухое вещество) соответствует результатам аналогичных исследований ультразвуковой экстракции. Кроме того, при ультразвуковой обработке сырья с меньшим (на 6,33%) содержанием белка был получен белковый продукт с таким же уровнем сырого протеина, как из высокобелкового сырья. Выход белка после обработки ультразвуком составил 64%, что превышает результаты, полученные в некоторых аналогичных исследованиях. Таким образом, обработка растительного сырья (в частности подсолнечного шрота) ультразвуком способствует повышению эффективности экстракции белка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES:

1. Stepycheva N.V., Makarov S.V., Kucherenko P.N. Secondary material resources of oil-producing plants. Russ J Gen Chem. 2021; 82: 969-976.
2. Li J., Wang W., Xu W. et al. Evaluation of multiscale mechanisms of ultrasound-assisted extraction from porous plant materials: Experiment and modeling on this intensified process. Food Research International. 2024; 182: Article 114034.

3. Kleekayai T., Khalesi M., Amigo-Benavent M. et al. Enzyme-Assisted Extraction of Plant Proteins. In: Hernández-Álvarez A.J., Mondor M., Nosworthy M.G. Green Protein Processing Technologies from Plants. Springer, Cham; 2023.
4. Jahan K., Ashfaq A., Younis K. et al. A review of the effects of ultrasound-assisted extraction factors on plant protein yield and functional properties. Food Measure. 2022; 16: 2875-2883.
5. Navaf M., Sunooj K.V., Aaliya B. et al. Contemporary insights into the extraction, functional properties, and therapeutic applications of plant proteins. Journal of Agriculture and Food Research. 2023; 14: Article 100861.
6. Sorita G.D., Leimann F.V., Ferreira S.R.S. Phenolic Fraction from Peanut (*Arachis hypogaea* L.) By-product: Innovative Extraction Techniques and New Encapsulation Trends for Its Valorization. Food Bioprocess Technol. 2023; 16: 726-748.
7. Shen L., Pang S., Zhong M. et al. A comprehensive review of ultrasonic assisted extraction (UAE) for bioactive components: Principles, advantages, equipment, and combined technologies. Ultrasonics Sonochemistry. 2023; 101: Article 106646.
8. Kamal H., Ali A., Manickam S. et al. Impact of cavitation on the structure and functional quality of extracted protein from food sources – An overview. Food Chemistry. 2023; 407: Article 135071.
9. Hadidi M., Aghababaei F., McClements D.J. Enhanced alkaline extraction techniques for isolating and modifying plant-based proteins. Food Hydrocolloids. 2023; 145: Article 109132.
10. Friolli M.P.S., Silva E.K., Napoli D.C.S. et al. High-intensity ultrasound-based process strategies for obtaining edible sunflower (*Helianthus annuus* L.) flour with low-phenolic and high-protein content. Ultrasonics Sonochemistry. 2023; 97: Article 106449.
11. Yang C., Liu W., Zhu X. et al. Ultrasound-assisted enzymatic digestion for efficient extraction of proteins from quinoa. LWT. 2024; 194: Article 115784.
12. Liu X., Wang M., Xue F. et al. Application of ultrasound treatment to improve the technofunctional properties of hemp protein isolate. Future Foods. 2022; 6: Article 100176.
13. Grossmann L., McClements D. J. Current insights into protein solubility: A review of its importance for alternative proteins. Food Hydrocolloids. 2023; 137: Article 108416.
14. Islam Z., Mir N. A., Gani A. Effect of controlled enzymatic treatment on the physicochemical, structural and functional properties of high-intensity ultrasound treated album (*Chenopodium album*) protein. Food Hydrocolloids. 2023; 144: Article 108940.
15. Jiang Y., Zhou X., Zheng Y. et al. Impact of ultrasonication/shear emulsifying/microwave-assisted enzymatic extraction on rheological, structural, and functional properties of *Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz. seed protein isolates. Food Hydrocolloids. 2021; 112: Article 106355.
16. Das R.S., Tiwari B.K., Chemat F. et al. Impact of ultrasound processing on alternative protein systems: Protein extraction, nutritional effects and associated challenges. Ultrasonics Sonochemistry. 2022; 91: Article 106234.
17. Kumar M., Tomar M., Potkule J. et al. Advances in the plant protein extraction: Mechanism and recommendations. Food Hydrocolloids. 2021; 115: 106595.
18. Khadhraoui B., Ummat V., Tiwari B.K. et al. Review of ultrasound combinations with hybrid and innovative techniques for extraction and processing of food and natural products. Ultrasonics Sonochemistry. 2021; 76: Article 105625.
19. Ampofo J., Ngadi M. Ultrasound-assisted processing: Science, technology and challenges for the plant-based protein industry. Ultrasonics Sonochemistry. 2022; 84: Article 105955.
20. Dabbour M., Jiang H., Mintah B.K. et al. Ultrasonic-assisted protein extraction from sunflower meal: Kinetic modeling, functional, and structural traits. Innovative Food Science & Emerging Technologies. 2021; 74: Article 102824.

21. Loushigam G., Shanmugam A. Modifications to functional and biological properties of proteins of cowpea pulse crop by ultrasound-assisted extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2023; 97: Article 106448.

22. Karabulut G., Kapoor R., Feng H. Biotransformation approaches using solid-state fermentation and germination with high-intensity ultrasound to produce added-value hemp protein nanoaggregates. *Food Bioscience*. 2023; 56: Article 103400.

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Владимировна Крылова, аспирант, научный сотрудник, Университет ИТМО, НИИ жиров
irinakrylova1987@gmail.com

Irina V. Krylova, Post graduate student, Researcher, ITMO University, Research Institute of Fats
irinakrylova1987@gmail.com

Александр Валентинович Федоров, доктор технических наук, доцент факультета биотехнологий, Университет ИТМО, Всероссийский НИИ жиров
alval58@yandex.ru

Alexander V. Fedorov, Dr Sci. (Engineering), Associate Professor, the Faculty of Biotechnology, ITMO University, All-Russian Research Institute of Fats
alval58@yandex.ru

Мария Львовна Доморощенкова, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, доцент, заведующий отделом производства пищевых растительных белков и биотехнологии, Всероссийский НИИ жиров
mdomor@mail.ru

Maria L. Domoroshchenkova, PhD (Engineering), Leading Researcher, Associate Professor, Head of the Department of Production of Food Vegetable Proteins and Biotechnology, All-Russian Research Institute of Fats
mdomor@mail.ru

Татьяна Федоровна Демьяненко, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Всероссийский НИИ жиров
tandem.50@list.ru

Tatyana F. Demyanenko, PhD (Engineering), Senior Researcher, All-Russian Research Institute of Fats
tandem.50@list.ru

Лилия Олеговна Шагинова, младший научный сотрудник, Всероссийский НИИ жиров
pumarj@mail.ru

Liliya O. Shaginova, Junior researcher, All-Russian Research Institute of Fats
pumarj@mail.ru

Заявленный вклад соавторов

Все авторы настоящего исследования принимали непосредственное участие в планировании, выполнении и анализе данного исследования. Все авторы настоящей статьи ознакомились и одобрили представленный окончательный вариант.

Claimed contribution of co-authors

All authors of the research were directly involved in the design, execution, and analysis of the research. All authors of this article have read and approved the final version submitted.

Поступила в редакцию 19.03.2024; поступила после рецензирования 22.04.2024; принята к публикации 23.04.2024
Received 19.03.2024; Revised 22.04.2024; Accepted 23.04.2024