ISSN 2074-9414 (Print)
ISSN 2313-1748 (Online)

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2578
https://elibrary.ru/FFBGUL

Оригинальная статья
https://fptt.ru

Получение белкового ингредиента с повышенной водоудерживающей способностью из подсолнечного шрота

И. В. Крылова[1,2,*], М. Л. Доморощенкова[1], Т. Ф. Демьяненко[1], А. В. Федоров[1,2]

[1] *ВНИИЖиров, Санкт-Петербург, Россия*

[2] *Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию: 18.06.2024
Принята после рецензирования: 05.08.2024
Принята к публикации: 01.04.2025

**И. В. Крылова: irinakrylova1987@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0132-2189*
М. Л. Доморощенкова: https://orcid.org/0000-0003-4230-8372
Т. Ф. Демьяненко: https://orcid.org/0000-0002-4220-7224
А. В. Федоров: https://orcid.org/0000-0003-0030-3848

© И. В. Крылова, М. Л. Доморощенкова, Т. Ф. Демьяненко, А. В. Федоров, 2025

Аннотация.
Подсолнечный шрот, характеризующийся ценным химическим составом, используется в основном в кормовой промышленности. Однако его применение в пищевых целях может быть более эффективным и полезным, но этому главным образом препятствует высокое содержание клетчатки. Одним из способов снижения содержания клетчатки является механическое фракционирование, применение которого также способствует повышению функционально-технологических свойств. Цель данного исследования – получить белковые продукты с повышенными функционально-технологическими свойствами из шрота подсолнечника для включения в рецептуры мучных изделий.
Объектами исследования были выбраны два образца подсолнечного шрота разных российских производителей, а также мука двух видов – пшеничная и амарантовая. Механическое фракционирование образцов проводили тремя различными методами с использованием дезинтегратора, роторно-ножевой и кулачковой мельниц. Для определения химического состава и функционально-технологических свойств образцов применяли стандартные и общепринятые методики. Готовые мучные кондитерские изделия изучали с точки зрения их органолептических характеристик. Для анализа органолептических свойств мучных изделий проводили дегустацию, в ходе которой оценивали внешний вид, вкус, аромат и текстуру по 5-ти балльной шкале.
Результаты исследования свидетельствуют о том, что количество белка в мелкой фракции подсолнечного шрота зависело от его содержания в исходном сырье. Массовая доля фракции и массовый выход сырого протеина зависели от способа измельчения шрота. Это привело к перераспределению белка и клетчатки по фракциям, отличавшимся размерами частиц. В ходе работы выявлены повышенные водо- и жироудерживающая способности полученных фракций. В образцах мучных смесей с заменой части муки на фракцию подсолнечного шрота отмечено увеличение водоудерживающей способности. Для приготовления мучных изделий была выбрана фракция подсолнечного шрота с лучшими характеристиками: повышенное содержание белка (44 %), пониженное содержание клетчатки (13 %), высокая водоудерживающая способность (455 %). Размер частиц данной фракции (менее 250 мкм) соответствовал размеру частиц пшеничной муки. У готовых мучных изделий отмечено увеличение высоты и повышенное содержание белка. Оптимальная дозировка внесения полученной фракции подсолнечного шрота в мучные изделия составила 5 % от массы мучной смеси.
Таким образом, возможно использование механического фракционирования для переработки подсолнечного шрота в белковые ингредиенты пищевого назначения, а также применения этих ингредиентов для обогащения белком мучных изделий.

Ключевые слова. Подсолнечный шрот, механическое фракционирование, сырой протеин, сырая клетчатка, водоудерживающая способность, жироудерживающая способность, мучные изделия, обогащение протеином

Для цитирования: Крылова И. В., Доморощенкова М. Л., Демьяненко Т. Ф., Федоров А. В. Получение белкового ингредиента с повышенной водоудерживающей способностью из подсолнечного шрота. Техника и технология пищевых производств. 2025. Т. 55. № 2. С. 352–363. https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2578

https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2578
https://elibrary.ru/FFBGUL

Original article
Available online at https://fptt.ru/en

Protein with High Water-Binding Capacity from Sunflower Meal

Irina V. Krylova[1,2,*], Maria L. Domoroshchenkova[1], Tatiana F. Demianenko[1], Aleksandr V. Fedorov[1,2]

[1] *VNIIZhirov, St. Petersburg, Russia*

[2] *ITMO University, St. Petersburg, Russia*

Received: 18.06.2024
Revised: 05.08.2024
Accepted: 01.04.2025

**Irina V. Krylova: irinakrylova1987@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-0132-2189*
Maria L. Domoroshchenkova: https://orcid.org/0000-0003-4230-8372
Tatiana F. Demianenko: https://orcid.org/0000-0002-4220-7224
Aleksandr V. Fedorov: https://orcid.org/0000-0003-0030-3848

© I.V. Krylova, M.L. Domoroshchenkova, T.F. Demianenko, A.V. Fedorov, 2025

Abstract.
Sunflower meal with its valuable chemical composition is a popular animal feed ingredient. However, it is also high on fiber. Mechanical fractionation can reduce the fiber content and improve the functional and technological properties of sunflower meal. This research introduces a new sunflower meal protein with improved functional and technological properties to be used in functional foods.

The study involved two samples of Russian sunflower meal and two types of flour, i.e., wheat and amaranth. The mechanical fractionation was conducted by three different methods: with a disintegrator, a rotor-knife, and a cam mill. A set of standard methods made it possible to determine the chemical, functional, and technological profiles of the samples. The sensory assessment (5-point scale) of the final confectionery products (cupcakes) included the appearance, taste, aroma, and texture.

The amount of protein in the fine fraction of the sunflower meal depended on its content in the original raw material. The mass fraction and the mass yield of crude protein depended on the grinding method. As a result, protein and fiber were distributed across fractions in different particle sizes. The fractions obtained demonstrated high water-binding and fat-retaining properties. The flour mixes with sunflower meal showed a greater water-binding capacity. The optimal fraction of sunflower meal was rich in protein (44%) but had a low fiber content (13%) and an admirable water-binding capacity (455%). The particle size of this fraction (≤ 250 μm) was the same as that of wheat flour. The finished flour products had a greater volume and increased protein content. The optimal dose for the cupcake formulation was 5% of the flour mix weight.

The method of mechanical fractionation made it possible to convert sunflower meal into protein to fortify functional flour products.

Keywords. Sunflower meal, mechanical fractionation, crude protein, crude fiber, water-binding capacity, fat-retaining capacity, flour products, fortified food

For citation: Krylova IV, Domoroshchenkova ML, Demyanenko TF, Fedorov AV. Protein with High Water-Binding Capacity from Sunflower Meal. Food Processing: Techniques and Technology. 2025;55(2):352–363. (In Russ.) https://doi.org/10.21603/2074-9414-2025-2-2578

Введение

В настоящее время востребованность в растительном белке объясняется экологическими и медицинскими причинами [1]. Выращивание сельскохозяйственных животных, птиц и аквакультур для получения продуктов животного происхождения оказывает воздействие на окружающую среду, что проявляется в загрязнении водоемов, почвы, воздуха и снижении видового разнообразия. К медицинским причинам можно отнести недостаточное потребление качественного сбалансированного белка, что отражается в рекомендациях медиков и в представлении потребителей о здоровом питании. Также существует проблема антибиотикорезистентности, возникающая при использовании антибиотиков в животноводстве. Перечисленные причины обуславливают изменения в рационе питания с частичным или полным отказом от продуктов данного типа [2, 3].

В качестве альтернативы животным белкам предлагаются растительные. Их включение в рецептуры пищевых продуктов является выгодным направлением для пищевой промышленности в рамках устойчивого

развития. Явное преимущество растительного источника белка – отсутствие холестерина. Кроме того, растительные белковые продукты, подвергшиеся мягкой обработке, отличаются высоким содержанием белка и низким – жира [3]. Поэтому в настоящее время растет интерес к получению белоксодержащих ингредиентов из растительного сырья и продуктов его переработки [1].

Источниками растительного белка являются бобовые, зерновые и масличные культуры, а также продукты их переработки, в том числе шроты. На территории Европы и России наиболее распространены подсолнечный и рапсовый шроты. Масличные семена и продукты на их основе отличаются высокой энергетической ценностью и повышенным содержанием белка и клетчатки [4]. Подсолнечник – масличная культура мирового значения, перерабатываемая в больших объемах. Технологические особенности процесса извлечения масла из семян оказывают влияние на состав получаемых белковых продуктов. При переработке прессовым методом образуется до 75 % жмыха от массы сырья, при использовании экстракции – до 60 % шрота от массы сырья [4]. Несмотря на широкое применение жмыхов и шротов в изготовлении кормов для сельскохозяйственных животных, их потенциал реализуется не в полной мере [5].

Подсолнечный шрот – побочный продукт производства подсолнечного масла методом экстракции растворителями. Он характеризуется высоким содержанием клетчатки, уровень которой зависит от степени удаления семенной оболочки. Подсолнечный шрот также является ценным источником кальция, фосфора и витаминов группы В, по содержанию которых он превосходит соевый. Подсолнечный шрот богат полиненасыщенными жирными кислотами, которые минимизируют риск развития сердечно-сосудистых и других заболеваний [3]. Фенольные соединения подсолнечника обладают высоким антиоксидантным потенциалом [6].

Подсолнечный шрот – ценное сырье с массовой долей белка до 42 %. Белок подсолнечника представлен четырьмя фракциями: глобулинами (до 40 %, преимущественно гелиантинин), альбуминами (10–30 %) и небольшим количеством глютелинов и проламинов [7]. Он обладает высокими функционально-технологическими свойствами (эмульгирующая, водо- и жироудерживающая способности) [4]. Все эти характеристики делают подсолнечный белок перспективным для пищевой отрасли. Однако, высокое содержание сырой клетчатки (до 23 %) ограничивает использование подсолнечного шрота, поскольку оно снижает его питательную ценность [5]. А высокая концентрация фенольных соединений, придающих белку темную окраску, препятствует добавлению шрота в пищевые продукты [3].

Традиционным способом получения растительных белков является экстракция разными растворителями, применение которых, преимущественно щелочных, может приводить к нарушению структуры белка и образованию соединений с нежелательными свойствами [8]. Экстракция связана не только с воздействием на белок растворителей, но и с нагреванием во время последующей сушки продукта, что влияет на пищевую ценность и функционально-технологические свойства белка. Менее распространенный способ – сухое (механическое) фракционирование растительного сырья [9], включающее его измельчение и классификацию. Это безреагентный метод разделения сухих и сыпучих продуктов различного происхождения, не требующий добавления воды и растворителей. С его помощью можно избежать не только расхода воды, но и затрат на дорогостоящий процесс сушки готового продукта, а также включения агрессивных химикатов и высоких температур. В современных условиях экологически чистые методы производства становятся все более востребованными, поэтому возможность обходиться без воды и растворителей является важным преимуществом данного метода [10]. В настоящее время сухое (механическое) фракционирование находится на стадии исследования и пока в промышленности широко не применяется.

Концентраты и изоляты растительных белков используются в продуктах питания: хлебобулочных и макаронных изделий, аналогов мясных и молочных продуктов, детского и спортивного питания [8]. Белковые компоненты в составе пищевых продуктов не только повышают их пищевую ценность, но и обеспечивают их структурно-механические и потребительские характеристики благодаря функционально-технологическим свойствам (эмульгирующие и пенообразующие свойства, водоудерживающая (ВУС) и жироудерживающая (ЖУС) способности, растворимость, вязкость и др.) [11]. Взаимодействие водных растворов и жировой составляющей с белковыми компонентами пищевых продуктов влияет на их текстуру, вкус, аромат и др. [12]. Способность белка удерживать воду влияет на структуру пищевых продуктов. ЖУС определяет вкусоароматические качества продукта [13]. ВУС и ЖУС белковых продуктов зависят от их аминокислотного состава, конформации белков, баланса гидрофобных и гидрофильных свойств и микроструктуры продукта [14]. ЖУС зависит также от количества неполярных боковых цепей белковой молекулы [13]. Сухое фракционирование обеспечивает возможность получения концентратов и белоксодержащих ингредиентов с повышенными функциональными свойствами. Белковые продукты, полученные воздушной классификацией, зачастую превосходят по своим функциональным и технологическим свойствам продукты, полученные другими методами. На примере бобов показано повышение эмульгирующих свойств белковых фракций, полученных путем пневмоклассификации. Белковые фракции также обладали повышенной водопоглощающей, пенообразующей и гелеобразующей способностями [15]. Исследователи отмечают недоста-

точное изучение влияния добавок растительного происхождения на структуру и реологические свойства хлебобулочных изделий [16].

Особенность белковых ингредиентов на основе подсолнечника – высокое содержание фенольных соединений, влияющих на переваримость белка. Некоторые из них, такие как хлорогеновая кислота, образуют соединения с белковыми молекулами, которые могут привести к повышению переваримости белка [17]. Взаимодействие фенольных соединений с крахмалом снижает его переваримость и гликемический индекс, что является преимуществом при добавлении в продукты для диабетиков [18]. Снижение биодоступности белка при образовании комплексов с фенольными соединениями более характерно для кофейной и галловой кислот, чем для хлорогеновой кислоты [19], которая преобладает в подсолнечнике.

Цель данного исследования – получить белковые продукты с повышенными функционально-технологическими свойствами из шрота подсолнечника для включения в рецептуру мучных изделий.

В процессе исследования решались следующие задачи:

– изучить влияние состава подсолнечного шрота и способа его измельчения на состав и свойства получаемых фракций;
– определить зависимость водоудерживающей способности мучных смесей от количества внесенной фракции подсолнечного шрота;
– выбрать дозировку фракции подсолнечного шрота для добавления в рецептуру мучных изделий.

Объекты и методы исследования

В качестве исследуемых объектов были выбраны два образца российского подсолнечного шрота разных производителей, а также мука двух видов – пшеничная и амарантовая (табл. 1).

Механическое фракционирование образцов шрота включало два этапа – измельчение и рассев на ситах. Измельчение проводили одним из трех способов: на электрической лабораторной мельнице ЭМ-3А до прохода через сито 2,0 мм; на кулачковой мельнице до прохода через сито 2,0 мм; на измельчителе ударно-активаторного действия (дезинтегратор).

На втором этапе проведен рассев измельченного материала при помощи лабораторных сит с размерами ячеек 0,25 и 1,00 мм. Материал помещали на верхнее сито и встряхивали круговыми движениями в течение 1 мин. В результате были выделены три фракции с размерами частиц: менее 0,25 мм; от 0,25 до 1,00 мм; от 1,00 до 2,00 мм.

Для того чтобы определить массовый выход, каждую из фракций взвешивали на лабораторных весах (погрешность 20 мг, цена деления 1 г). Массовую долю влаги определяли при помощи высушивания до постоянного веса при 105 °С (ГОСТ 10856-96). Содержание сырой клетчатки определяли методом Геннеберга-Штомана с этапом промежуточной фильтрации (ГОСТ 31675-2012), а содержание сырого протеина устанавливали методом Кьельдаля с применением анализатора KjelFlex-360 Buchi (ГОСТ 13496.4-2019).

Для определения ВУС и ЖУС навеску образца массой 1 г в центрифужной пробирке заливали 10 мл дистиллированной воды или растительного масла, мешали 1 мин со скоростью 1500 об/мин и оставляли на 30 мин, затем центрифугировали при 5000 об/мин в течение 15 мин. Массу удержанной воды или масла определяли, вычитая из массы пробирки после центрифугирования массу пробирки с сухой навеской. ВУС и ЖУС рассчитывали как отношение массы удержанной воды или масла к массе навески. Все определения выполняли в двухкратной повторности, в качестве результата брали среднее значение двух определений при расхождении между ними не более предусмотренного методикой [9].

Полученный белковый препарат (фракция подсолнечного шрота) использовали для приготовления мучных кондитерских изделий. Для замеса теста 50 г яиц взбивали с 75 г сахара. Затем, продолжая перемешивание, добавляли смесь из 110 г пшеничной муки и 5 г разрыхлителя. При выпечке изделий с фракцией подсолнечного шрота ею заменяли часть муки. После этого, продолжая перемешивать, вводили 50 г кефира (с массовой долей жира 2,5 %) и 30 г рафинированного дезодорированного подсолнечного масла. Тесто разливали по формам, получая заготовки массой 75 г. Далее их выпекали при 165 °С в течение 30 мин, затем охлаждали при 20 °С в течение 30 мин.

Таблица 1. Физико-химические показатели и функционально-технологические свойства образцов

Table 1. Physicochemical, functional, and technological profile of flours and sunflower meals

Показатели	Шрот подсолнечный (Образец 1)	Шрот подсолнечный (Образец 2)	Мука пшеничная	Мука амарантовая
Содержание сырого протеина, % абсолютно сухого вещества	39,44 ± 0,50	34,75 ± 0,50	11,50 ± 0,50	20,20 ± 0,50
Содержание сырой клетчатки, % абсолютно сухого вещества	17,12 ± 0,50	27,21 ± 0,50	2,70 ± 0,50	3,20 ± 0,50
Водоудерживающая способность, %	375 ± 5	360 ± 5	110 ± 5	230 ± 5
Жироудерживающая способность, %	87 ± 5	68 ± 5	173 ± 5	197 ± 5

Мучные изделия изучали с точки зрения их высоты и органолептических свойств. Высоту образцов измеряли линейкой с ценой деления 0,5 см. Для оценки органолептических свойств изделий провели дегустацию группой из 5 человек. В ходе дегустации оценивали внешний вид, вкус, аромат и текстуру по 5-ти балльной шкале.

Результаты и их обсуждение

Определение массовых долей фракций подсолнечного шрота. После фракционирования каждого из образцов двумя способами получено 12 фракций, внешний вид которых представлен на рисунке 1.

Для всех образцов внешний вид фракций с одинаковым размером частиц был схожим: менее 0,25 мм – однородный порошок, напоминающий муку, бурого цвета, не комкующийся; 0,25–1,00 мм – однородная крупка темно-бурого цвета, с различимыми фрагментами лузги (черно-белые вкрапления); 1,00–2,00 мм – крупные фрагменты лузги неправильной формы.

На рисунке 2 представлено распределение фракций исследуемых образцов подсолнечного шрота, полученных в результате измельчения одним из трех способов.

При фракционировании образца 1 массовые доли мелкой и средней фракций были схожи и в сумме

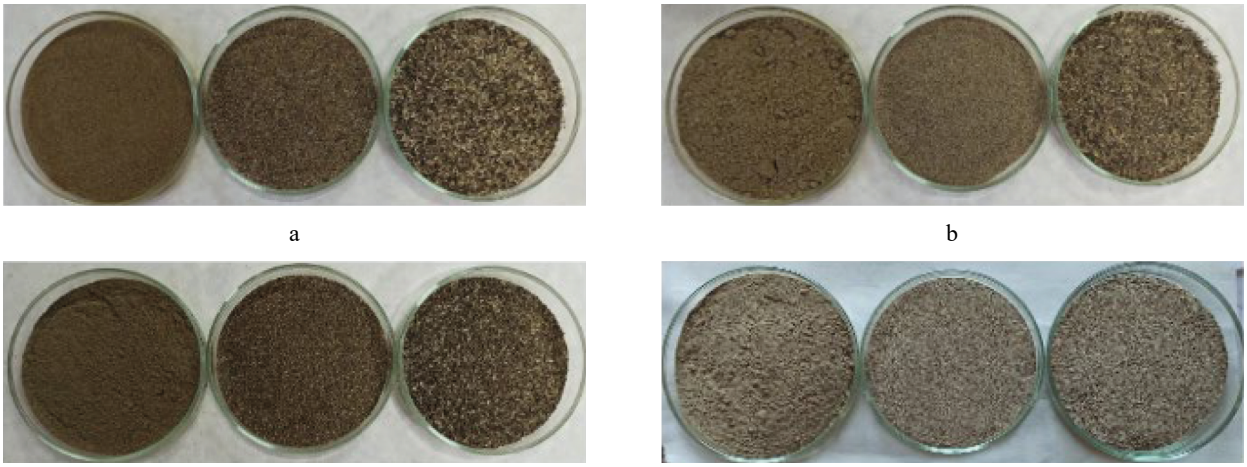

Рисунок 1. Продукты фракционирования (размер частиц слева направо: < 0,25 мм, 0,25–1,00 мм, 1,00–2,00 мм): a – образец 1, измельченный на роторно-ножевой мельнице; b – образец 1, измельченный на кулачковой мельнице; c – образец 2, измельченный на роторно-ножевой мельнице; d – образец 2, измельченный на дезинтеграторе

Figure 1. Fractionated products (particle size left to right: < 0.25 mm, 0.25–1.00 mm, 1.00–2.00 mm): a – Sample 1 (rotor-knife); b – Sample 1 (cam mill); c – Sample 2 (rotor-knife mill); d – Sample 2 (disintegrator)

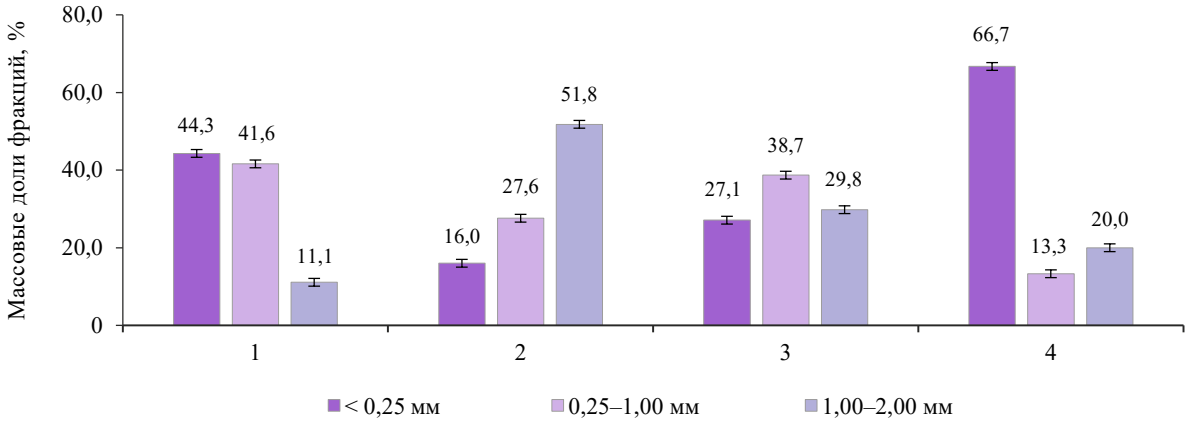

Рисунок 2. Массовые доли фракций: 1 – образец 1, измельченный на роторно-ножевой мельнице; 2 – образец 1, измельченный на кулачковой мельнице; 3 – образец 2, измельченный на роторно-ножевой мельнице; 4 – образец 2, измельченный на дезинтеграторе

Figure 2. Mass shares of fractions: 1 – Sample 1 (rotor-knife); 2 – Sample 1 (cam mill); 3 – Sample 2 (rotor-knife mill); 4 – Sample 2 (disintegrator)

составляли более 80 % конечных продуктов (рис. 2, первая группа столбцов). При этом распределение фракций образца 2 (рис. 2, третья группа столбцов) отличалось, максимальной была массовая доля средней фракции. Мелкая фракция, как правило, отличается повышенным уровнем белка, поэтому при фракционировании стремятся получить ее максимальное количество. В данном случае большее количество мелкой фракции получено из образца 1, содержавшего на 5 % больше белка, чем образец 2 (табл. 1). Таким образом, повышенное содержание белка в исходном сырье способствовало повышению массовой доли высокобелковой фракции.

В ходе исследования образец 1 был измельчен двумя разными способами. При измельчении на роторно-ножевой мельнице количество мелкой и средней фракции было на 30 % больше, чем крупной (рис. 2, первая группа столбцов). Напротив, при измельчении на кулачковой мельнице количество мелкой фракции было минимальным, а крупной – более 50 % (рис. 2, вторая группа столбцов). Таким образом, измельчение на роторно-ножевой мельнице позволило получить почти в 3 раза больше мелкой фракции, чем измельчение на кулачковой мельнице.

Влияние способа измельчения на выход фракций можно сравнить и на примере образца 2 (рис. 2, третья и четвертая группы столбцов). При измельчении на роторно-ножевой мельнице максимальной была массовая доля средней фракции, а при измельчении на дезинтеграторной установке – мелкой, количество которой в 2,5 раза больше, чем на роторно-ножевой мельнице. Следовательно, дезинтеграторная установка более эффективна для измельчения.

Количество мелкой (высокобелковой) фракции подсолнечного шрота при фракционировании зависит как от состава исходного шрота, так и от способа его измельчения. Массовая доля мелкой фракции увеличивалась при использовании сырья с высоким содержанием белка. Кроме того, измельчение одного и того же образца на дезинтеграторной установке позволяет получить больше мелкой фракции, чем на роторно-ножевой и кулачковой мельницах. Максимальный выход мелкой фракции составил 66,7 %.

Для сравнения, массовая доля мелкой фракции составляла от 14 до 27 % при воздушной классификации рисовых отрубей [1]. Эта величина зависела от схемы рассева (одна или две стадии). При воздушной классификации подсолнечного шрота с содержанием белка 34 % выход мелкой фракции составил от 28 до 88 % [20]. Эти различия обусловлены тем, что процесс воздушной классификации лучше поддается регулированию, чем рассев на ситах.

Полученные результаты можно сравнить с данными помола фасоли (45 до 300 мкм) [21] и с размерами частиц в пшеничной муке от 80 до 300 мкм [22]. Таким образом, размеры частиц подсолнечного шрота 12–110 мкм сопоставимы с размерами частиц пшеничной муки, что может обеспечить получение однородной смеси с мукой. В одном из исследований S. Lin приводит данные о влиянии размера частиц на качество мучных изделий. Качество спагетти повышалось при использовании муки помола 250 мкм и более, а качество хлеба – при не более 75 мкм [21]. M. Marchini *et al.* для приготовления хлеба предложили включить в рецептуру хлебобулочных изделий бобовую муку с размером частиц около 200 мкм [23]. N. M. Dube *et al.* определили оптимальный размер частиц муки для лапши в диапазоне от 85 до 110 мкм [24]. Следовательно, данные фракции шрота подсолнечника подходят для добавления в мучные изделия в смеси с мукой.

Характеристика фракций. Состав фракций, полученных при фракционировании двух образцов исследуемого подсолнечного шрота, измельченных одним из трех способов, показан на рисунке 3.

В образцах 1 и 2, измельченных на роторно-ножевой мельнице, несмотря на различия в их составе, максимальный уровень белка составлял 42–43 % (рис. 3, первая и третья группы столбцов). Однако, в средней и крупной фракциях он был распределен по-разному – средняя фракция образца 1 содержала почти такое же количество белка, что и мелкая.

При измельчении образца 1 двумя способами распределение белка по фракциям было схожим (рис. 3, первая и вторая группы столбцов). Максимальный уровень белка (43–44 %) наблюдался в мелкой фракции, в средней фракции он был незначительно ниже, а в крупной не превышал 30 %. Несмотря на повышение доли белка в мелкой фракции, по сравнению с исходным шротом, следует отметить, что высокий уровень белка в средней фракции означает его потери.

При измельчении образца 2 на роторно-ножевой мельнице и на дезинтеграторной установке максимальный уровень белка, полученный в мелкой фракции, отличался незначительно и составлял 42–43 % (рис. 3, третья и четвертая группы столбцов). При этом во фракциях, полученных на дезинтеграторной установке, содержание белка уменьшалось с повышением размера частиц фракции. При измельчении на роторно-ножевой мельнице уровень белка в крупной фракции оказался выше, чем в средней, что не характерно для процесса фракционирования.

Распределение клетчатки по фракциям было схожим во всех представленных вариантах фракционирования, кроме образца 2, измельченного на роторно-ножевой мельнице. В этом случае средняя фракция содержала больше клетчатки, чем крупная. Во всех остальных случаях ее количество во фракциях повышалось по мере увеличения размера частиц. Максимальный уровень клетчатки получен в крупной фракции образца 2, измельченного на дезинтеграторе (42 %). Однако более важным являлось достижение минимального уровня клетчатки в мелкой фракции, который был отмечен как в образце 1, измельченном на роторно-ножевой мельнице, так и в образце 2, измельченном на дезинте-

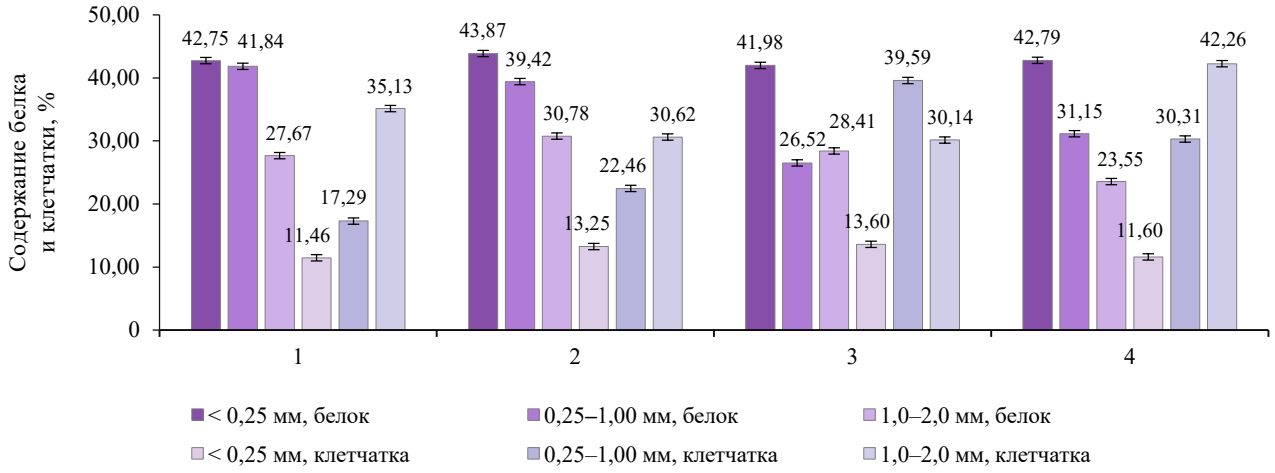

Рисунок 3. Содержание белка и клетчатки во фракциях: 1 – образец 1, измельченный на роторно-ножевой мельнице; 2 – образец 1, измельченный на кулачковой мельнице; 3 – образец 2, измельченный на роторно-ножевой мельнице; 4 – образец 2, измельченный на дезинтеграторе

Figure 3. Protein and fiber content per fraction: 1 – Sample 1 (rotor-knife); 2 – Sample 1 (cam mill); 3 – Sample 2 (rotor-knife mill); 4 – Sample 2 (disintegrator)

граторе (11–12 %). Во всех образцах содержание клетчатки в мелкой фракции не превышало 14 %.

Состав мелких фракций у всех исследованных образцов был схожим – 42–43 % белка и 11–14 % клетчатки – независимо от исходного сырья. Способ измельчения не оказал существенного влияния на распределения белка и клетчатки по фракциям, однако состав исходного сырья имел большее значение. В образце 1 с более высокой исходной долей белка произошли его значительные потери со средней фракцией, что снизило эффективность фракционирования. В образце 2 при различных способах измельчения отмечено более эффективное разделение белка и клетчатки по фракциям (белок был сосредоточен в мелкой фракции, а клетчатка в крупной).

Целью механического фракционирования является перераспределение белка и клетчатки по фракциям таким образом, чтобы белок был сконцентрирован в мелкой, а клетчатка в крупной. Примером такого процесса послужило фракционирование сои, где концентрация белка в мелкой фракции была на 5 % выше, а клетчатки на 6 % ниже, чем в исходном шроте. В мелкой фракции достигнуто снижение клетчатки на 5,7–15,6 % [25]. В исследовании воздушной классификации подсолнечного шрота содержание сырого протеина в мелкой фракции (40 %) было на 6 % выше, чем в исходном шроте [20]. Эти результаты сопоставимы с результатами настоящей работы, так как максимальное количество сырого протеина во фракциях (43,87 %) на 4,4 % превышало его содержание в исходном шроте.

Долю белка в мелкой фракции, являющейся целевым продуктом фракционирования, можно сравнить с данными других исследователей. В работе, посвященной воздушной классификации бобовых культур из сырья, – 24 % белка (горох) и 39 % белка (люпин) – были получены мелкие фракции с содержанием белка 55 и 59 % соответственно [26]. Такие значения могли быть связаны с составом сырья, а также различиями в строении семян бобовых и масличных культур.

Исследователи, изучающие фракционирование растительного сырья, чаще всего сравнивают полученные продукты по количеству белка. Однако, содержание клетчатки также важно, поскольку именно этот показатель ограничивает пищевое использование растительного сырья (в частности, подсолнечного шрота). В исследовании Q. Xing *et al.* [27] мелкие фракции, полученные при фракционировании гороха, обогащались как белком, так и клетчаткой, параллельно снижалось количество крахмала. В работе P. Silventoinen *et al.* [28] содержание клетчатки в пшеничных отрубях снижалось с 51 до 23 % (в 2,2 раза), в рисовых – с 33 до 15 % (также в 2,2 раза) в мелких фракциях. Сопоставимыми с этими результатами являются результаты фракционирования образца 1 при измельчении в роторно-ножевой мельнице.

Функционально технологические свойства фракций подсолнечного шрота. На рисунке 4 представлены результаты определения водо- и жироудерживающей способностей фракций, полученных при измельчении двух образцов шрота различными способами.

Водоудерживающая способность (ВУС) мелкой и средней фракций во всех случаях была выше, чем крупной (рис. 4). Это может быть связано с перераспределением белка и клетчатки при фракционировании. Кроме того, в большей части образцов ВУС средней фракции оказалась выше, чем мелкой. Из мелких (высокобелковых) фракций максимальная ВУС (455 %)

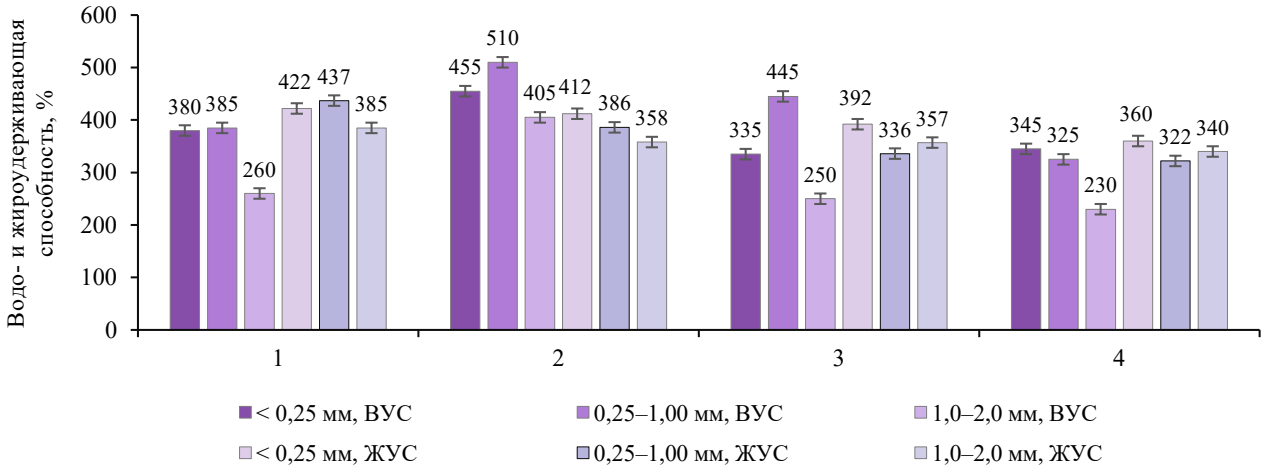

Рисунок 4. Водо- и жироудерживающая способность фракций: 1 – образец 1, измельченный на роторно-ножевой мельнице; 2 – образец 1, измельченный на кулачковой мельнице; 3 – образец 2, измельченный на роторно-ножевой мельнице; 4 – образец 2, измельченный на дезинтеграторе

Figure 4. Water-binding and fat-retaining capacities per fraction: 1 – Sample 1 (rotor-knife); 2 – Sample 1 (cam mill); 3 – Sample 2 (rotor-knife mill); 4 – Sample 2 (disintegrator)

была у образца 1, измельченного на кулачковой мельнице. У данного образца была также отмечена максимальная ВУС (510 %) в средней фракции, для которой характерно недостаточное содержание белка.

Жироудерживающая способность (ЖУС) мало отличалась по фракциям для каждого из образцов (рис. 4). При этом у большей части образцов ЖУС мелкой фракции была выше, чем у средней и крупной. Максимальное значение ЖУС наблюдалось у средней фракции образца 1, измельченного на роторно-ножевой мельнице. Максимальная ЖУС среди мелких фракций зафиксирована в этом же образце (422 %).

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что фракционирование позволяет получить белоксодержащие продукты с повышенными ВУС и ЖУС. При этом данные показатели возрастают по мере уменьшения размера частиц во фракции. Разность значений ВУС по фракциями больше, чем для ЖУС. Эта тенденция наблюдалась для образцов различного состава и способа измельчения.

В работе X. Huang *et al.* [14] при получении подсолнечного белка методом щелочной экстракции были достигнуты следующие значения: водоудерживающей (320–350 %) и жироудерживающей (380–680 %) способностей. По сравнению с настоящим исследованием, ВУС была несколько ниже, а ЖУС значительно выше. Это может быть связано с различиями в способах получения и составе подсолнечного белка, содержавшего 63–73 % сырого протеина.

ВУС белковых компонентов является более приоритетной при приготовлении мучных изделий, чем ЖУС. Именно от водоудерживающих свойств зависит сохранение структуры и показателей качества мучных и кондитерских изделий [13].

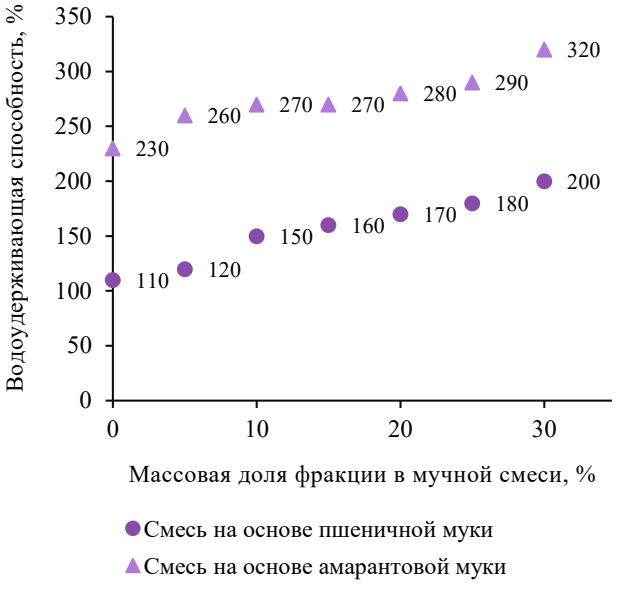

Рисунок 5. Водоудерживающая способность мучных смесей

Figure 5. Water-binding capacity per flour mix

Водоудерживающая способность мучных смесей. В качестве основного компонента первой мучной смеси была выбрана пшеничная мука высшего сорта, а основным компонентом второй была амарантовая мука, которая является безглютеновой. К каждой из мучных смесей добавляли выбранную фракцию подсолнечного шрота, заменяя ею часть муки. Фракцию вносили в количестве от 5 до 30 % с шагом 5 % и тщательно перемешивали с мукой (рис. 5).

Водоудерживающая способность смесей на основе амарантовой муки была на 110–140 % выше, чем смесей на основе пшеничной при различных массовых долях фракций подсолнечного шрота. При этом ВУС обоих образцов повышалась по мере увеличения количества фракции подсолнечного шрота. Полученные данные свидетельствуют, что замена части (до 30 %) пшеничной или амарантовой муки выбранной фракцией подсолнечного шрота повысила ВУС смесей (рис. 5).

Способность пшеничной муки удерживать воду зависит от крупности помола, содержания белка и пищевых волокон [16]. Все эти показатели изменяются при внесении новых ингредиентов, в том числе и белка подсолнечника. ВУС определяется взаимодействием воды с гидрофильными группами белков и углеводов в составе муки [29], а наличие этих групп у подсолнечного белка может отличаться. Получение белковых продуктов с повышенными функционально-технологическими свойствами является одним из преимуществ сухого фракционирования. Например, в работе P. Silventoinen *et al.* [28] были повышены растворимость протеина и гелеобразующие свойства при фракционировании рисовых отрубей с применением воздушной классификации. В исследовании M. Funke *et al.* [30] полученная белковая фракция отличалась высокой эмульгирующей способностью при воздушной классификации бобовой муки. ВУС является наиболее значимой при включении белковых ингредиентов в мучные изделия и совместно с ЖУС влияет как на технологические параметры (время образования теста), так и на органолептические качества продукта [13, 16].

Внесение фракций подсолнечного шрота в мучные изделия. В ходе дальнейшего исследования изучили влияние добавления выбранной фракции подсолнечного шрота на качество мучных изделий (на примере кексов). В рецептуре изделия часть пшеничной муки заменяли фракцией подсолнечного шрота. Такая частичная замена пшеничной муки другими видами сырья часто применяется при разработке рецептур мучных изделий. Это связано с тем, что мука нетрадиционных видов неспособна образовывать клейковину, что ограничивает ее использование для полной замены пшеничной муки [29].

В первой группе изделий фракцией заменяли 5 %, во второй – 10 %, в третьей – 15 % пшеничной муки. Кексы контрольной группы изготавливали по тому же рецепту, но без замены муки. Внешний вид полученных изделий представлен на рисунке 6.

Внешний вид изделий зависел от количества фракции. Изделия с 5 и 10 % были схожи (небольшое различие с контролем), в то время как изделия с 15 % фракции значительно отличались как от контроля, так и от других опытных образцов. Структура кексов опытных образцов характеризовалась неоднородной пористостью. Цвет мякиша был темнее, чем у контроля, особенно у изделий, содержащих 15 % фракции. На пористость кексов могли оказывать влияние как фенольные соединения, так и подсолнечный белок.

В хлебобулочных изделиях, которые изготвлены на основе пшеничной муки, глютеновая сеть придает тесту уникальные вязкоупругие свойства и способность удерживать газ, отражаясь на текстуре и определяя конечный вид продукта. На структуру глютеновой сети воздействуют все компоненты теста: белки, крахмалы, гидроколлоиды и другие ингредиенты [31]. В исследовании B. Martins *et al.* [32] изучено влияние муки из желудей, содержащей значительное количество фенольных соединений, на качество выпечки. Установлено, что добавление желудевой муки приводит к увеличению пористости изделий. Следует отметить, что включение гороха и фасоли в хлебобулочные изделия повышает упругость мякиша и продолжительность срока хранения [2]. Наличие фенольных соединений существенно влияет на качество растительных белков, например снижается усвояемость, происходит нежелательное потемнение, изменяются органолептические свойства и меняется структура белка [8, 33].

Средняя высота контрольных кексов составила 65 ± 3 мм, кексов с 5 % фракции – 71 ± 3 мм, с 10 % – 72 ± 3 мм, с 15 % – 66 ± 3 мм. Высота опытных изделий с 5 и 10 % фракции оказалась в среднем больше, чем у контроля, что можно объяснить их повышенной пористостью, которая возможно связана с различием ВУС мучных смесей. Высота изделий с 15 % фракции не превышала высоту контроля. Данный факт, наряду с темным цветом мякиша, может указывать на повышенное содержание фенольных соединений.

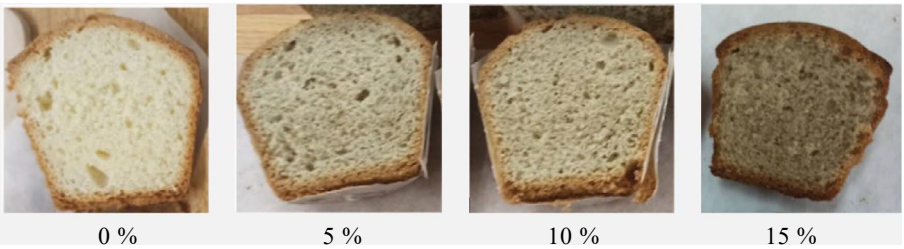

Рисунок 6. Мучные изделия с добавлением фракций подсолнечного шрота

Figure 6. Flour products with 0, 5, 10, and 15 % sunflower meal

Таблица 2. Состав тестовой заготовки (масса 75 г)

Table 2. Flour composition (75 g)

Показатели, %	Доля фракции подсолнечного шрота в рецептуре кексов, %			
	Контроль (0)	5	10	15
Белки	6,2	6,7	7,2	7,7
Жиры	10,2	10,2	10,2	10,2
Углеводы	50,2	49,4	48,6	47,8

Таблица 3. Органолептические показатели кексов ($p < 0,05$)

Table 3. Sensory profile of cupcakes ($p < 0.05$)

Показатели, балл	Доля фракции подсолнечного шрота в рецептуре кексов, %			
	Контроль (0)	5	10	15
Внешний вид	5,0 ± 0,2	4,8 ± 0,2	4,5 ± 0,2	3,5 ± 0,2
Вкус	5,0 ± 0,2	4,3 ± 0,2	4,3 ± 0,2	3,5 ± 0,2
Аромат	4,8 ± 0,2	4,3 ± 0,2	4,3 ± 0,2	4,3 ± 0,2
Текстура	4,8 ± 0,2	4,3 ± 0,2	4,5 ± 0,2	4,2 ± 0,2
Средняя оценка	4,9 ± 0,2	4,4 ± 0,2	4,4 ± 0,2	3,9 ± 0,2

Проведен расчет химического состава полученных мучных изделий. Результаты представлены в таблице 2.

Замена части муки фракцией подсолнечного шрота привела к повышению доли белка и снижению доли углеводов.

Для оценки органолептических свойств изделий проведена дегустация группой из 5 человек (табл. 3).

Результаты дегустации показали, что средняя оценка кексов с 5 и 10 % фракции была почти одинаковой, но ниже, чем у контроля. Средняя оценка кексов с 15 % фракции оказалась заметно ниже из-за показателей внешнего вида и вкуса. Снижение баллов за внешний вид изделия дегустаторы объясняли темным цветом мякиша и несимметричной формой верхушки кексов; снижение баллов за текстуру – появлением крупных пор в мякише и трещин на поверхности кексов.

Выводы

Механическое фракционирование подсолнечного шрота, при его различных составах и способах измельчения, способствовало перераспределению белка и клетчатки по фракциям таким образом, что конечные белковые продукты содержали на 4–8 % сырого протеина больше и на 6–16 % клетчатки меньше. Фракционирование позволило получить белковые продукты с повышенными функционально-технологическими свойствами, в частности для фракций с размерами частиц менее 0,25 мм (что соответствует размерам частиц муки) водо- и жироудерживающая способности составили 335–455 и 360–422 % соответственно.

Замена не более 30 % муки данной фракцией подсолнечного шрота увеличила водоудерживающую способность на 110–140 %, а содержание сырого протеина – на 7–10 % в мучных смесях на основе пшеничной или амарантовой муки. Внесение подсолнечного белка в рецептуру кексов в количестве 5 и 10 % от массы мучной смеси не привело к значительному изменению их органолептических свойств.

Таким образом, фракция подсолнечного шрота с размером частиц менее 0,25 мм, полученная после измельчения на кулачковой мельнице с исходным содержанием сырого протеина 35–40 % обладала оптимальным составом и водоудерживающей способностью для замены части муки в рецептурах мучных изделий. Основным ограничивающим фактором при использовании подсолнечного белка в выпечке оказалось его влияние на цвет изделий.

Более высокое содержание белка в исходном шроте способствовало более высокому содержанию белка в мелкой фракции. Способ измельчения оказывал большее влияние на выход мелкой фракции и массовый выход сырого протеина в мелкой фракции. Уровень сырой клетчатки и распределение высокой водоудерживающей способности по фракциям также зависели от способа измельчения. Следовательно, при использовании шротов относительно низкого качества можно получить фракции улучшенного состава, применяя подходящий метод измельчения.

Полученная фракция подсолнечного шрота обладала ценным составом (повышенное содержание белка и пониженное – клетчатки) с высокой водоудерживающей способностью и размером частиц, соответствующим размеру частиц пшеничной муки. Такое сочетание делает эту фракцию перспективным белковым ингредиентом для использования в смеси с пшеничной мукой в мучных изделиях.

Критерии авторства

И. В. Крылова – проведение исследовательского процесса и экспериментов, сбор данных, написание

и подготовка рукописи. М. Л. Доморощенкова – комментирование или пересмотр рукописи. Т. Ф. Демьяненко – отслеживание воспроизводимости результатов экспериментов. А. В. Федоров – надзор и руководство выполнением исследовательской деятельности.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ведущему инженеру Е. А. Самоделкину и коллективу ЦНИИ Конструкционных материалов «Прометей» за измельчение образца шрота на дезинтеграторе Desi-15.

Contribution

I.V. Krylova performed the research, collected the data, and drafted the manuscript. M.L. Domoroshchenkova proofread the manuscript. T.F. Demyanenko verified the experimental results. A.V. Fedorov supervised the research.

Conflict of interest

The authors declared no conflict of interest regarding the publication of this article.

Acknowledgments

The authors express their sincere gratitude to E.A. Samolyodkin, Senior Engineer of Prometey Central Research Institute of Structural Materials, and his team for grinding the meal samples on the Desi-15 disintegrator.

Список литературы / References

1. Silventoinen P, Rommi K, Holopainen-Mantila U, Poutanen K, Nordlund E. Biochemical and techno-functional properties of protein- and fibre-rich hybrid ingredients produced by dry fractionation from Rice Bran. Food Bioprocess Technol. 2019;12:1487–1499. https://doi.org/10.1007/s11947-019-02307-w

2. Вебер А. Л., Леонова С. А., Кондратьева О. В. Потребительские свойства и потенциальная востребованность продукции «dairy alternatives» из отечественных сортов гороха и фасоли. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 1. С. 108–122. [Veber AL, Leonova SA, Kondrateva OV. Consumer qualities and potential relevance of dairy alternatives from domestic beans and peas. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(1):108–122. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-1-108-122

3. Verstringe S, Vandercruyssen R, Carmans H, Rusu AV, Bruggeman G, *et al.* Alternative proteins for food and feed. In: Galanakis CM, editor. Biodiversity, functional ecosystems and sustainable food production. Cham: Springer; 2023. pp. 325–351. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07434-9_10

4. Giarola RC, Nabeshima EH, Campopiano JM, Ferrari RA, Montenegro FM, *et al.* Effect of sunflower protein meal and electrostatic complexes of sunflower meal-pectin on the cake crumb structure and color. Journal of Food Science and Technology. 2022;59:1419–1428. https://doi.org/10.1007/s13197-021-05151-z

5. Egea MB, Oliveira FJG, Bertolo MRV, Araujo JC, Gautério GV, *et al*. Bioactive phytochemicals from sunflower (*Helianthus annuus* L.) oil processing byproducts. In: Hassanien MFR, editor. Bioactive phytochemicals from vegetable oil and oilseed processing by-products. Reference series in phytochemistry. Cham: Springer; 2021. pp. 1–16. https://doi.org/10.1007/978-3-030-63961-7_4-1

6. Blicharz-Kania A, Pecyna A, Zdybel B, Andrejko D, Marczuk A. Sunflower seed cake as a source of nutrients in gluten-free bread. Scientific Reports. 2023;13:10864. https://doi.org/10.1038/s41598-023-38094-w

7. Parodi E, La Nasa J, Ribechini E, Petri A, Piccolo O. Extraction of proteins and residual oil from flax (*Linum usitatissimum*), camelina (*Camelina sativa*), and sunflower (*Helianthus annuus*) oilseed press cakes. Biomass Conversion and Biorefinery. 2023;13:1915–1926. https://doi.org/10.1007/s13399-021-01379-z

8. Колпакова В. В., Уланова Р. В., Куликов Д. С., Гулакова В. А., Семёнов Г. В. и др. Показатели качества гороховых и нутовых белковых концентратов. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 4. С. 649–664. [Kolpakova VV, Ulanova RV, Kulikov DS, Gulakova VA, Semenov GV, *et al*. Pea and chickpea protein concentrates: Quality indicators. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(4):649–664. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-4-2394

9. Zorzi CZ, Garske RP, Flôres SH, Thys RCS. Sunflower protein concentrate: A possible and beneficial ingredient for gluten-free bread. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2020;66:102539. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102539

10. Arrutia F, Binner E, Williams P, Waldron KW. Oilseeds beyond oil: Press cakes and meals supplying global protein requirements. Trends in Food Science & Technology. 2020;100:88–102. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.03.044

11. Chigwedere CM, Stone A, Konieczny D, Lindsay D, Huang S, *et al.* Examination of the functional properties, protein quality, and iron bioavailability of low-phytate pea protein ingredients. European Food Research and Technology. 2023;249:1517–1529. https://doi.org/10.1007/s00217-023-04232-x

12. Dabbour M, Jiang H, Mintah BK, Wahia H, He R. Ultrasonic-assisted protein extraction from sunflower meal: Kinetic modeling, functional, and structural traits. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2021;74:102824. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102824

13. Thirulogasundar A, Shi D, Stone AK, Xu C, Bhagwat A, *et al*. Effect of enzyme hydrolysis on the functionality, protein quality, and flavour profile of lentil and chickpea protein isolates. Journal of Food Measurement and Characterization. 2024;18:1592–1609. https://doi.org/10.1007/s11694-023-02228-5

14. Huang X, Li Y, Cui C, Sun-Waterhouse D. Structural, functional properties, and in vitro digestibility of sunflower protein concentrate as affected by extraction method: Isoelectric precipitation vs ultrafiltration. Food Chemistry. 2024;439:138090. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.138090

15. Kleekayai T, Khalesi M, Amigo-Benavent M. Cermeño Maria, Harnedy-Rothwell Pádraigín, *et al*. Enzyme-assisted extraction of plant proteins. In: Hernández-Álvarez AJ, Mondor M, Nosworthy MG, editors. Green protein processing technologies from plants. Cham: Springer; 2023. pp. 131–178. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16968-7_6

16. Маслов А. В., Мингалеева З. Ш., Ямашев Т. А., Шибаева Н. Ф. Изучение влияния комплексной растительной добавки на свойства мучных смесей и пшеничного теста. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 3. С. 511–525. [Maslov AV, Mingaleeva ZSh, Yamashev TA, Shibaeva NF. Effect of a complex plant additive on flour mixes and wheat dough. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(3):511–525. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-3-2385

17. Xu PW, Yue XJ, Yuan XF, Zhao B. Non-covalent interaction between hemp seed globulin and two hemp seed phenolic compounds: Mechanism and effects on protein structure, bioactivity, and in vitro simulated digestion. International Journal of Biological Macromolecules. 2024;255:128077. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.128077

18. Xu T, Zhong Y, Chen Q, Wu L, Ji S, *et al.* Modulating the digestibility of cassava starch by esterification with phenolic acids. Food Hydrocolloids. 2022;127:107432. https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107432

19. Günal-Köroğlu D, Lorenzo JM, Capanoglu E. Plant-based protein-phenolic interactions: Effect on different matrices and in vitro gastrointestinal digestion. Food Research International. 2023;173:113269. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113269

20. Laudadio V, Bastoni E, Introna M, Tufarelli V. Production of low-fiber sunflower (*Helianthus annuus* L.) meal by micronization and air classification processes. CyTA - Journal of Food. 2013;11(4):398–403. https://doi.org/10.1080/19476337.2013.781681

21. Lin S. Chapter Two - Dietary fiber in bakery products: Source, processing, and function. Advances in Food and Nutrition Research. 2022;99:37–100. https://doi.org/10.1016/bs.afnr.2021.12.001

22. Sivakumar C, Nadimi M, Stobbs JA, Karunakaran C, Paliwal J. A comprehensive assessment of microscopic characterization techniques to accurately determine the particle size distribution of roller-milled yellow pea flours. Powder Technology. 2024;434:119374. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2024.119374

23. Marchini M, Carini E, Cataldi N, Boukid F, Blandino M, *et al*. The use of red lentil flour in bakery products: How do particle size and substitution level affect rheological properties of wheat bread dough? LWT. 2021;136(Part 1):110299. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110299

24. Dube NM, Xu F, Zhao R. The efficacy of sorghum flour addition on dough rheological properties and bread quality: A short review. Grain & Oil Science and Technology. 2020;3(4):164–171. https://doi.org/10.1016/j.gaost.2020.08.001

25. Kuspangaliyeva B, Konakbayeva D, Tabtabaei S. Towards dry fractionation of soybean meal into protein and dietary fiber concentrates. Journal of Food Engineering. 2023;342:111358. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111358

26. Pelgrom PJM, Boom RM, Schutyser MAI. Method development to increase protein enrichment during dry fractionation of starch-rich legumes. Food and Bioprocess Technology. 2015;8:1495–1502. https://doi.org/10.1007/s11947-015-1513-0

27. Xing Q, Utami DP, Demattey MB, Kyriakopoulou K, de Wit M, *et al*. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. Innovative Food Science and Emerging Technologies. 2020;66:102480. https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480

28. Silventoinen P, Kortekangas A, Ercili-Cura D, Nordlund E. Impact of ultra-fine milling and air classification on biochemical and techno-functional characteristics of wheat and rye bran. Food Research International. 2021;139:109971. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109971

29. Рензяева Т. В., Тубольцева А. С., Рензяев А. О. Мука различных видов в технологии мучных кондитерских изделий. Техника и технология пищевых производств. 2022. Т. 52. № 2. С. 407–416. [Renzyaeva TV, Tuboltseva AS, Renzyaev AO. Various flours in pastry production technology. Food Processing: Techniques and Technology. 2022;52(2):407–416. (In Russ.)] https://doi.org/10.21603/2074-9414-2022-2-2373

30. Funke M, Loeffler M, Winkelmeyer C, Krayer M, *et al*. Emulsifying properties of lentil protein preparations obtained by dry fractionation. European Food Research and Technology. 2022;248:381–391. https://doi.org/10.1007/s00217-021-03883-y

31. Korus J, Chmielewska A, Witczak M, Ziobro R, Juszczak L. Rapeseed protein as a novel ingredient of gluten-free bread. European Food Research and Technology. 2021;247:2015–2025. https://doi.org/10.1007/s00217-021-03768-0

32. Martins RB, Garzón R, Peres JA, Barros AIRNA, Raymundo A, *et al*. Acorn flour and sourdough: An innovative combination to improve gluten free bread characteristics. European Food Research and Technology. 2022;248:1691–1702. https://doi.org/10.1007/s00217-022-03996-y

33. Genevois CE, de Escalada Pla MF. Soybean by-products and modified cassava starch for improving alveolar structure and quality characteristics of gluten-free bread. European Food Research and Technology. 2021;247:1477–1488. https://doi.org/10.1007/s00217-021-03725-x