

Научная статья

УДК 633.854.78

DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-3-13

Влияние состава подсолнечного шрота на эффективность отделения белковой части сырья от клетчатки методом механического фракционирования

И.В. Крылова^{1,2*}, А.В. Федоров^{1,2}, М.Л. Доморошченкова¹, Т.Ф. Демьяненко¹, Л.О. Шагинова¹¹Всероссийский научно-исследовательский институт жиров, Россия, Санкт-Петербург²Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург

*irinakrylova1987@gmail.com

Аннотация. Изучали влияние состава подсолнечного шрота на эффективность механического фракционирования. Объектами исследования выбраны два образца подсолнечного шрота российского производства различных производителей с разным содержанием сырого протеина. Механическое фракционирование включало в себя стадии измельчения сырья и его отсева с помощью набора сит. Его эффективность определялась массовым выходом фракций и содержанием сырого протеина во фракциях, а также отношением содержания сырого протеина к содержанию сырой клетчатки. Для каждого из образцов определяли массовый выход и физико-химический состав полученных фракций. Показателями состава фракций выбраны содержание сырого протеина и сырой клетчатки. Несмотря на различное содержание сырого протеина в образцах (35 и 39%), его значение в высокобелковой фракции обоих отсевов было схожим и составило 42 и 43% соответственно. Содержание клетчатки в высокобелковых фракциях двух отсевов также отличалось незначительно и составило 14% при отсеве первого образца и 12% при отсеве второго. Обнаружено заметное различие массовых выходов фракций в двух отсевах. Выход высокобелковой фракции при отсеве первого образца (71%) значительно превышал этот показатель при отсеве второго образца (27%). Показано, что механическое фракционирование первого образца более эффективно благодаря большему выходу высокобелковой фракции.

Ключевые слова: биотехнология; пищевая химия; растительное сырье; механическое фракционирование; белковые продукты, подсолнечный шрот

Original article

Influence of the composition of sunflower meal on the efficiency of separating the protein part of the raw material from fiber by mechanical fractionation

Irina V. Krylova^{1,2*}, Alexander V. Fedorov^{1,2}, Maria L. Domoroshchenkova¹, Tatiana F. Demianenko¹, Liliia O. Shagina¹¹All-Russian Research Institute of Fats, Russia, St. Petersburg²ITMO University, Russia, St. Petersburg

*irinakrylova1987@gmail.com

Abstract. The purpose of this article is to study the effectiveness of mechanical fractionation of sunflower meal. The objects of the study were two samples of sunflower meal of Russian production, by various manufacturers, and with different content of raw protein. Mechanical fractionation included the stages of grinding raw materials and its sifting using a set of sieves. The effectiveness of mechanical fractionation is determined by the mass yields of the fractions and the content of raw protein in the fractions as well as the ratio of the content of raw protein to the content of raw fiber. Based on this definition of effectiveness, the mass yields and the physicochemical composition of the obtained fractions were determined for each of the samples. The quality parameters of the fractions were selected by the content of raw protein and the content of raw fiber. Despite the different content of raw protein in the raw materials (35% in the first sample and 39% in the second sample), the content of raw protein in the high-protein fraction of both samples was similar and amounted to 42% and 43%, respectively. The fiber content in high-protein fractions of the two samples also differed slightly and amounted to 14% in the first sample and 12% in the second sample. At the same time, a noticeable difference in the mass yields of the fractions in two samples was discovered. The output of the high-protein fraction in the first sample (71%) significantly exceeded the output of the high-protein fraction in the second sample (27%). Thus, mechanical fractionation of the first sample was more effective due to the greater yield of the high-protein fraction.

Keywords: biotechnology; food chemistry; plant raw materials; mechanical fractionation; protein products; sunflower meal

Введение

Подсолнечник – масличная культура, выращиваемая во всем мире, наряду с соей и рапсом. В России она является основной по объемам производства в сельском хозяйстве. При переработке подсолнечника на масло образуются твердые отходы – жмыхи и шроты. Жмыхи, получаемые при извлечении масла прессовым способом, составляют до 75% от массы сырья; шроты, получаемые при извлечении масла экстракционным способом, составляют до 60% от массы сырья [1, 2]. Жмыхи и шроты используются преимущественно в кормовых целях, но в последние годы во многих странах Европы разрабатываются технологии их переработки в пищевые ингредиенты. Использование масличных шротов как сырья определяется их широкой доступностью и низкой стоимостью, а также ценным составом. Как и исходные масличные семена, масличные шроты отличаются высокой энергетической ценностью, а также высоким содержанием сырого протеина и сырой клетчатки. Шрот подсолнечника содержит до 43% сырого протеина и до 23% сырой клетчатки. Также в нем присутствуют полиненасыщенные жирные кислоты, витамин Е, витамины группы В, микроэлементы. Фенольные соединения подсолнечного шрота обладают антиоксидантной активностью [3, 4].

Перспективность подсолнечного шрота как источника пищевого белка определяется не только его экономической доступностью, но и составом белкового комплекса. Содержание сырого протеина в шроте подсолнечника составляет 40–50% на сухое вещество, при этом белок подсолнечника обладает хорошими функционально-технологическими свойствами. В частности, это высокая эмульгирующая, водоудерживающая и жирудерживающая способность. Белок подсолнечника представлен четырьмя фракциями: глобулинами (40–90% белка), альбуминами (10–30% белка) и небольшим количеством глютенинов и проламинов [2]. Благодаря низкому содержанию проламинов белок подсолнечника может включаться в продукты, предназначенные для потребителей с целиакией. Таким образом, основными типами запасных белков семян подсолнечника являются 2S альбумины и 11S глобулины в соотношении 2:1 [3, 4]. Обе эти белковые фракции способны коагулировать при нагревании, поэтому в процессе переработки семян на масло может происходить их частичная денатурация. Глобулин подсолнечника (гелиантин) имеет коэффициент седиментации в интервале 7–12S. Такие аминокислоты, как лизин и валин находятся преимущественно в этой фракции. Гидролиз глобулинов позволяет получать биологически активные пептиды. Семена подсолнечника содержат большие количества глутамина и глутаминовой кислоты, аспарагина и аспарагиновой кислоты, аргинина и цистеина. Подсолнечный шрот в сравнении с соевым отличается повышенным количеством серосодержащих аминокислот, особенно метионина, но низким уровнем лизина [5, 6].

Подсолнечный белок вызывает интерес как перспективный ингредиент пищевых продуктов. В форме изолятов и концентратов он может применяться для обогащения белком мучных изделий, например в смеси с пшеничной мукой [1, 6]. Такие ингредиенты наиболее востребованы при производстве безглютеновых изделий, так как их состав является менее полноценным в сравнении с традиционным. Безглютеновые изделия часто отличаются низким содержанием минеральных веществ, витаминов, пищевых волокон и особенно белка [1]. Упоминая о недостаточном содержании пищевых волокон следует пояснить, что их количество и состав должны полностью соответствовать физиологическим потребностям организма человека, поэтому следует избегать привнесения избытка неперевариваемых пищевых волокон, в связи с чем и ставится задача снижения клетчатки в подсолнечном белковом ингредиенте. Таким образом, для использования продуктов переработки подсолнечника в мучных изделиях необходимо снижать уровень клетчатки и повышать уровень белка. Это позволит обогащать продукты подсолнечным белком, внося его в относительно небольших количествах. Отдельное направление использования растительного, в том числе подсолнечного, белка – заменители яиц в выпечке, предназначенной для потребителей с аллергией на яичный белок [6].

Наиболее распространенный процесс получения растительных белков в виде концентратов и изолятов – щелочная экстракция с последующим изоэлектрическим осаждением, для которой используют предварительно обезжиренное и измельченное сырье. Преимуществами этой технологии являются масштабируемость процесса, высокий выход белка, получение продуктов с большой концентрацией белка (изоляты, концентраты). Этот способ основан на изменении растворимости белков при изменении значений pH. В щелочных условиях трансформируется пространственная

структура белковой молекулы и происходит электростатическое взаимодействие белка с молекулами воды, что приводит к повышению его растворимости. При этом нарушается третичная структура белка, что может отразиться на его свойствах. Повышение растворимости большинства растительных белков происходит при значениях рН от 8 до 11. Более высокие его значения не рекомендуются в связи с образованием токсичных соединений (лизиноаланин) [5]. Из-за сложного состава растительного сырья одновременно с белками могут экстрагироваться и другие вещества, например простые углеводы. Массовое отношение материала к растворителю составляет от 1:5 до 1:20, температура экстракции – от 50 до 60°C. Более высокая температура увеличивает выход белка, но приводит к его денатурации и снижению функциональных свойств. После экстракции проводят центрифугирование, позволяющее удалить нерастворимый осадок и отделить белоксодержащую суспензию. Следующей стадией является осаждение белка при рН, соответствующем его изоэлектрической точке, путем добавления растворов кислот. Значение изоэлектрической точки зависит от типа белка и для большинства растительных белков находится около рН 4,5. Осажденный белок отделяют центрифугированием и ресуспенсируют в воде при нейтральном значении рН. После высушивания полученной суспензии получают белковый концентрат или изолят. Из описания процесса щелочной экстракции очевидны возникающие проблемы: возможность частичной денатурации белка из-за воздействия щелочных растворов и нагревания, риск образования токсичных соединений, соэкстрагирование посторонних веществ. Кроме того, щелочная экстракция не является экономичным процессом в связи с использованием большого количества растворителя и необходимости последующей сушки белковой суспензии [7, 8].

Альтернативным способом получения белоксодержащих продуктов из подсолнечника является сухое, или механическое, фракционирование. Этот метод применяется к растительному сырью различного состава: бобовых, зерновых, отрубей и шротов масличных культур. Процесс включает две технологические операции: измельчение материала и его классификацию. Для измельчения сырья используют мельницы различных конструкций: молотковые, пальцевые, валковые и жерновые. По способу воздействия на измельчаемый материал различают мельницы ударного, истирающего, размалывающего, раздавливающего, раскалывающего действия [5, 7]. При измельчении получают смесь частиц с различным содержанием белка, которые затем разделяют, например с помощью метода воздушной классификации. При этом небелковые компоненты отделяются от белоксодержащей фракции. Для классификации измельченного сырья чаще всего используют центробежные воздушные классификаторы [9], а также рассев на ситах и электросепарацию [10]. Подбирая параметры процесса классификации, который проводят в одну или в две стадии, получают белковые продукты различного состава. По схеме одностадийного фракционирования материал измельчают, а затем проводят воздушную классификацию. По двухстадийной схеме после воздушной классификации крупную фракцию измельчают и классифицируют повторно, что приводит к более эффективному отделению белка. Сухое фракционирование позволяет получать концентраты и белоксодержащие ингредиенты с повышенными функциональными свойствами, так как воздействие растворителей и высоких температур исключено из процесса. Кроме того, сухие методы получения белков требуют меньших затрат энергии, поскольку не предполагают использования воды и последующей сушки готового продукта [11, 12].

Эффективность сухого фракционирования определяется отношением количества белка, перешедшего в мелкую фракцию, к количеству белка в исходном сырье, и находится в обратной зависимости от твердости семян, содержания сырого протеина, клетчатки, жира, влажности материала и степени его измельчения. *Твердость* исходного материала влияет на содержание сырого протеина в мелкой фракции. Высокая твердость семян приводит к высокой степени адгезии между их белковой и небелковой частью. Кроме того, твердость семян зависит от состава и количества нерастворимых волокон (клетчатки). При фракционировании бобов наиболее полное отделение белка выявлено для твердых семян, а при фракционировании пшеницы – для мягких семян [5]. В работе [7] показано, что уровень сырого *протеина* мало влияет на эффективность фракционирования, а в исследовании [9] выявлена положительная корреляция между содержанием сырого протеина в горохе и его количеством в мелкой фракции. Содержание сырой *клетчатки* неоднозначно влияет на эффективность фракционирования, так как зависит от состава клеточной стенки (количество нейтрально-детергентной

клетчатки) и ее толщины. Количество клетчатки в конечном продукте зависит также от содержания лузги семян в растительном сырье. Содержание сырого *жира* в исходном материале – еще один значимый фактор, высокий уровень которого (5% и более) вызывает слипание частиц, затрудняющее их измельчение и фракционирование. Другой важный параметр – *влажность*, при низком значении позволяет избежать слипания частиц, в связи с чем при подготовке к фракционированию сырье иногда подвергают предварительной сушке [10]. Оптимальную степень *измельчения* выбирают в зависимости от вида и состава сырья. Для нескольких изученных видов сырья было показано преобладание белка в мелкой фракции. С уменьшением размера частиц содержание в них белка повышалось, но это происходило за счет снижения выхода мелкой фракции. Слишком тонкое измельчение сырья приводит к слипанию частиц под действием сил Ван-дер-Ваальса. Происходящая при этом агломерация частиц сырья снижает эффективность процесса сухого фракционирования, приводя к низкому качеству продукта и его незначительному выходу [11]. Наконец, существует возможность повышения эффективности фракционирования путем изменения *технологической* схемы процесса – двухстадийное фракционирование приводит к более эффективному отделению белка [12].

Таким образом, анализ научных источников показывает неоднозначность данных зависимости эффективности фракционирования от состава исходного материала, и этот вопрос требует дальнейшего изучения. Кроме того, большинство исследований посвящено переработке подсолнечного жмыха, в то время как в России основным побочным продуктом производства подсолнечного масла является шрот, получаемый в больших объемах. Помимо этого, в работах по фракционированию продуктов переработки подсолнечника практически не затронут вопрос вариативности качества исходных семян, из-за чего состав шрота может значительно отличаться. В этой связи был поставлен вопрос о возможности получения продукта стабильного состава при колебаниях в структуре исходного сырья.

Цель данного исследования – отделение белковой составляющей подсолнечного шрота (являющейся целевым продуктом) различного состава от клетчатки методом механического фракционирования. Для этого решались следующие задачи: изучение массовых долей фракций, полученных при фракционировании образцов различного состава; изучение физико-химического состава полученных фракций; выявление взаимосвязи между составом исходного сырья и эффективностью фракционирования.

Объекты и методы исследования

В качестве исходного сырья были выбраны два образца подсолнечного шрота российского производства различных производителей. Происхождение и состав образцов представлены в таблице 1.

Таблица 1. Происхождение и состав изученных образцов

Table 1. Origin and composition of the samples under investigation

Показатели	Образец 1	Образец 2
производитель	АО «Астон», Россия	ООО «Бунге», Россия
массовая доля влаги, %	9,91 ± 0,01	9,59 ± 0,01
содержание жира, % а.с.в.*	1,89 ± 0,01	1,81 ± 0,01
содержание протеина, % а.с.в.	39,44 ± 0,50	34,75 ± 0,50
содержание клетчатки, % а.с.в.	17,12 ± 0,50	27,21 ± 0,50
остаточное количество растворителя, %*	0,02	0,02
посторонние примеси*	отсутствуют	отсутствуют
металлические примеси*	отсутствуют	отсутствуют

*использованы данные производителя продукции

Образцы отличались главным образом по двум показателям, влияющим на эффективность фракционирования: содержанию сырого протеина и сырой клетчатки. Такие параметры, как содержание жира и массовая доля влаги близки у обоих образцов и не оказывали значительного воздействия на процесс. Образец 1 содержал сырого протеина на 4,69% и сырой клетчатки на 10,09% меньше, чем Образец 2.

В качестве первой стадии процесса механического фракционирования оба исследуемых образца измельчали на роторно-ножевом измельчителе – мельница электрическая лабораторная ЭМ-3А (СССР; мощность 220В, частота 50 Гц, ТУ 46-22-26-84). Материал помещали в размольную камеру мельницы порциями весом около 50 г и измельчали в течение 30 с до равномерного помола всего материала, затем пропускали через сито с ячейками 2,0 мм, что определяет максимальный размер частиц.

На втором этапе механического фракционирования проводили рассев измельченного материала. Для этого использовали лабораторные сита (ГОСТ Р 51568-99) с размерами ячеек 0,25 и 1,00 мм. Размеры ячеек выбирали исходя из предыдущих исследований фракционирования подсолнечного шрота. Сита устанавливали на поддон, каждую порцию материала весом около 100 г помещали на верхнее сито, накрывали крышкой и встряхивали круговыми движениями в течение минуты. Три фракции подсолнечного шрота собирали из поддона (размер частиц менее 0,25 мм), с нижнего (размер частиц 0,25–1,00 мм) и верхнего сита (размер частиц 1,00–2,00 мм). Для определения массового выхода каждую из фракций взвешивали на лабораторных весах ВЛКТ-500 (погрешность 20 мг, цена деления 1 г).

Массовую долю влаги определяли методом высушивания до постоянного веса (ГОСТ 10856-96). Высушивание проводили в бюксах в сушильном шкафу при температуре 105°C. Погрешность метода составляла 0,01% согласно методике. Содержание сырого протеина определяли методом Кьельдаля (ГОСТ 13496.4-2019). Определение содержания азота проводили на дистилляторе Buchi KjellFlex K-360. Погрешность метода составляла 0,5% согласно методике. Содержание сырой клетчатки определяли методом Генненберга–Штомана (ГОСТ 31675-2012). Для определения клетчатки использовали водоструйный насос и колбу Бюхнера. Погрешность метода составляла 0,5% согласно методике. Все измерения выполняли в двух повторностях, в качестве конечного результата рассчитывали среднее значение двух определений, с учетом погрешности метода.

Результаты и их обсуждение

1. Изучение полученных фракций и их массовых долей

После проведения фракционирования получены фракции с размерами частиц менее 0,25 мм; от 0,25 до 1,00 мм; от 1,00 до 2,00 мм. Фракции, полученные при севе Образцов 1 и 2, показаны на рисунках 1 и 2 соответственно.



Рисунок 1. Фракции, полученные при севе Образца 1.

Размеры частиц во фракциях, слева направо: менее 0,25 мм; 0,25–1,00 мм; 1,00–2,00 мм

Figure 1. Fractions obtained from sieving Sample 1.

Particle sizes in fractions, from left to right: less than 0.25 mm; 0.25–1.00 mm; 1.00–2.00 mm

Фракция Образца 1 с размером частиц менее 0,25 мм представляла собой однородный порошок бурого цвета, напоминающий муку, не комкующийся. Фракция с размером частиц 0,25–1,00 мм представляла собой однородную крупку темно-бурого цвета с различимыми фрагментами лузги (черно-белые вкрапления). Фракция с размерами частиц 1,00–2,00 мм представляла собой крупные фрагменты лузги неправильной формы.

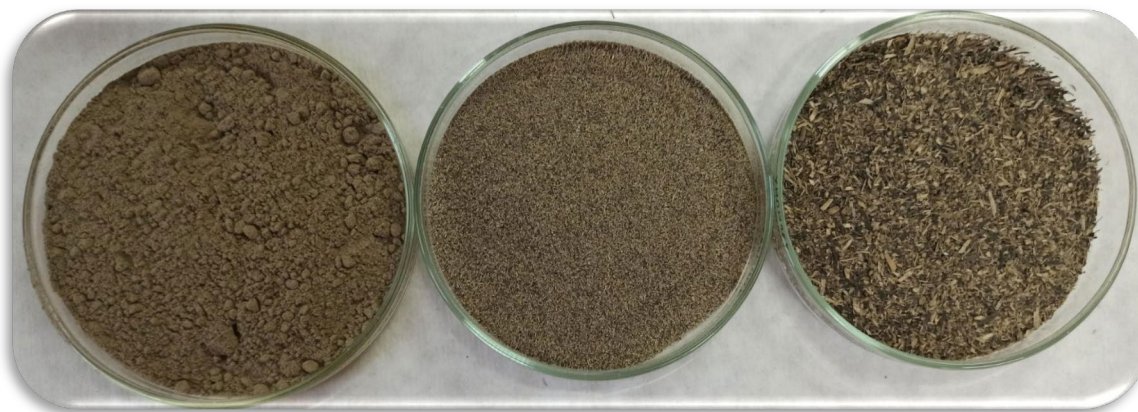


Рисунок 2. Фракции, полученные при рассеве Образца 2.

Размеры частиц во фракциях, слева направо: менее 0,25 мм; 0,25–1,00 мм; 1,00–2,00 мм

Figure 2. Fractions obtained during sieving of Sample 2.

Particle sizes in fractions, from left to right: less than 0.25 mm; 0.25–1.00 mm; 1.00–2.00 mm

Фракция Образца 2 с размером частиц менее 0,25 мм представляла собой однородный порошок бежевого цвета, напоминающий муку, комкующийся (слипание частиц). Фракция с размером частиц 0,25–1,00 мм представляла собой однородную крупку темно-бурого цвета без явно различимых фрагментов лузги. Фракция с размерами частиц 1,00–2,00 мм представляла собой крупные фрагменты лузги неправильной формы.

Таким образом крупные фракции, полученные при рассеве обоих образцов, были внешне похожи. Средние фракции разных сесевов различались: полученная из Образца 1 средняя фракция содержала заметно больше частиц лузги, а полученная из Образца 2 была более однородной. Мелкие фракции обоих сесевов были одинаково однородными, но различались по цвету: в первом сесеве мелкая фракция была более темной. Кроме того, во втором сесеве частицы мелкой фракции образовывали комки, а в первом такого не наблюдалось.

Массовые доли полученных фракций приведены в таблице 2. Потери при фракционировании возникали преимущественно на стадии сесева и не превышали 5% массы обоих образцов.

Таблица 2. Массовые выходы фракций

Table 2. Mass yields of fractions

Размер частиц, мм	Массовая доля, %	
	Образец 1	Образец 2
менее 0,25 мм	71,3 ± 0,1	27,1 ± 0,1
от 0,25 до 1,00 мм	17,5 ± 0,1	38,7 ± 0,1
от 1,00 до 2,00 мм	8,8 ± 0,1	29,8 ± 0,1
потери	2,4 ± 0,1	4,4 ± 0,1
всего	100,0 ± 0,1	100,0 ± 0,1

Из приведенных данных видно, что распределение измельченного материала по фракциям значительно отличалось для исследуемых образцов. При фракционировании растительного сырья, как правило, фракция с наименьшим размером частиц содержит больше всего белка и является целевым продуктом, а во фракции с наибольшим размером частиц сконцентрированы небелковые компоненты шрота (преимущественно клетчатка), поэтому высокий выход мелкой фракции обычно соответствует высокой эффективности процесса.

В данном случае при фракционировании Образца 1 массовая доля мелкой фракции была наибольшей и превышала суммарную долю двух других фракций, а массовая доля крупной фракции была наименьшей. Для Образца 2 массовые доли всех фракций были очень близки, а массовая доля мелкой фракции была меньше, чем остальных. Если для Образца 1 более 70% массы составляла мелкая фракция, то для Образца 2 около 70% массы составляли две крупные фракции.

В статьях авторов [7–9] изучено преимущественно фракционирование с применением воздушной классификации, где выходы фракций задаются путем выбора параметров процесса. В случае использования отсева на ситах (в промышленном масштабе это могут быть вибросита) соотношение массовых долей фракций мало поддается регулировке.

На массовые выходы фракций влияют обе стадии процесса фракционирования: измельчение и сев. Стадия измельчения определяет распределение частиц по размеру, а следовательно, количество мелкой фракции [5, 7, 9]. При одинаковом способе помола разных образцов степень измельчения зависит от их механических свойств (твердости материала). На стадии отсева разделение частиц на фракции зависит не только от их размера, так как мелкие частицы могут агломерировать (слипаться) из-за электростатических взаимодействий. Кроме того, при повышенной влажности или жирности материала слипание частиц может происходить как при измельчении, так и при отсеве [10–12]. Однако в данном случае массовая доля влаги и содержание жира в образцах были примерно одинаковы, а значит не могли вызвать существенных различий в процессе фракционирования.

2. Изучение физико-химического состава полученных фракций

Для всех полученных фракций определяли содержание сырого протеина и сырой клетчатки в абсолютно сухом веществе. Содержание сырого протеина и сырой клетчатки во фракциях в сравнении с содержанием в исходных образцах приведено в таблице 3.

Таблица 3. Содержание протеина и клетчатки во фракциях

Table 3. Protein and fiber content in fractions

Размер частиц, мм	Содержание сырого протеина, % на а.с.в.		Содержание сырой клетчатки, % на а.с.в.	
	Образец 1	Образец 2	Образец 1	Образец 2
менее 0,25 мм	41,98 ± 0,5	42,75 ± 0,5	13,60 ± 0,5	11,46 ± 0,5
от 0,25 до 1,00 мм	26,52 ± 0,5	41,84 ± 0,5	39,59 ± 0,5	17,29 ± 0,5
от 1,00 до 2,00 мм	28,41 ± 0,5	27,67 ± 0,5	30,14 ± 0,5	35,13 ± 0,5
исходный шрот	39,44 ± 0,5	34,75 ± 0,5	17,12 ± 0,5	27,21 ± 0,5

Из приведенных данных видно различие между отсевами двух образцов. При фракционировании Образца 1 наибольшее содержание протеина получено в мелкой фракции. Это соответствует данным других исследователей [5, 9, 10] о концентрации белковых компонентов сырья в мелкой фракции. Однако количество протеина в мелкой фракции лишь немногим выше (на 2,54%), чем в исходном шроте. В двух других фракциях содержание протеина значительно ниже (в 1,5–1,6 раза), чем в мелкой фракции, что говорит о перераспределении белковых компонентов сырья и их концентрировании в мелкой фракции.

При фракционировании Образца 2 протеин распределился по фракциям по-другому: в мелкой фракции его содержание так же было максимальным (на 8% выше, чем в исходном шроте); в средней – наличие протеина мало отличалось от мелкой (на 0,91%); в крупной фракции содержание протеина заметно отличалось (в 1,5 раза ниже, чем в мелкой).

Содержание протеина в мелкой фракции, являющейся целевым продуктом фракционирования, можно сравнить с данными других исследователей. В воздушной классификации бобовых [11] из сырья, содержавшего 24% протеина (горох) и 39% протеина (люпин), были получены мелкие фракции со значениями протеина 55 и 59% соответственно. Такие показатели могут быть связаны с составом сырья, а также различиями в строении семян бобовых и масличных. В другом исследовании [13] при воздушной классификации подсолнечного шрота с содержанием протеина 34% получена мелкая фракция с 40% протеина (на 6% выше). Эти значения близки к параметрам, полученным в ходе экспериментов для Образца 2. При этом необходимо учитывать, что процесс фракционирования в работе [13] отличался по технологии.

Анализируя данные таблицы 3, видны различия в распределении клетчатки по фракциям для разных образцов. Среди фракций Образца 1 наибольшее содержание клетчатки выявлено в средней

фракции, а в крупной ее было на 9,45% меньше. Эти значения отличаются от ожидаемых, так как процесс фракционирования предполагает концентрирование клетчатки в крупной фракции. В мелкой фракции содержание клетчатки минимально, что согласуется с ожидаемыми результатами. Максимальное количество клетчатки во фракциях в 2,3 раза выше, чем в исходном шроте.

Во фракциях Образца 2 распределение клетчатки оказалось близким к ожидаемому: минимально в мелкой фракции и возрастало в средней и крупной фракциях. При этом уровень клетчатки в мелкой и средней фракциях был меньше, чем в исходном шроте, а в крупной фракции лишь в 1,3 раза больше.

Для получения целевого продукта требуемого качества содержание клетчатки в мелкой фракции должно быть минимальным. В данном эксперименте это условие выполняется для обоих образцов, но уровень клетчатки в них отличался изначально, поэтому в мелкой фракции Образца 1 клетчатки только в 1,3 раза меньше, чем в исходном шроте, а в мелкой фракции Образца 2 – в 2,4 раза.

Исследователи, изучающие фракционирование растительного сырья, чаще всего сравнивают полученные продукты по содержанию протеина. Но уровень клетчатки не менее важен, так как именно этот показатель ограничивает пищевое применение растительного сырья, в частности, подсолнечного шрота. В исследовании [14] мелкие фракции, полученные при фракционировании гороха, были обогащены как белком, так и клетчаткой, при снижении количества крахмала. В работе [15] содержание клетчатки в пшеничных отрубях было понижено с 51 до 23% (в 2,2 раза), в рисовых отрубях с 33 до 15% (также в 2,2 раза) в мелких фракциях. С этими результатами сравнимы результаты фракционирования Образца 2.

3. Расчет эффективности фракционирования

В обзоре [16], а также в публикациях [12, 13] эффективность сухого фракционирования рассчитана как отношение содержания сырого протеина в целевой фракции к его содержанию в исходном сырье. В статье [14] была дополнительно вычислена степень обогащения целевой фракции белком, которая рассчитывалась как отношение разности содержания сырого протеина в целевой фракции и в сырье к его содержанию в сырье. В исследовании [17] по фракционированию сои рассчитывали отдельно выход сырого протеина и сырой клетчатки. Для этого содержание сырого протеина (или сырой клетчатки) в каждой фракции относили к тому же показателю исходного сырья. Кроме того, авторы [15] вычислили на сколько понизилось содержание клетчатки после фракционирования. Также следует учитывать отношение содержания сырого протеина к содержанию сырой клетчатки в полученных продуктах, так как уровень клетчатки является ограничивающим фактором при использовании подсолнечного шрота.

Таким образом сформулированы показатели эффективности механического фракционирования: выход сырого протеина/клетчатки рассчитан как отношение массы сырого протеина/клетчатки в каждой

фракции к ее массе в исходном сырье $M_{\phi} = \frac{M_{\phi} \cdot 100}{M_{и}}$. Полученные значения представлены на рисунке 3.

Выход сырого протеина для изученных образцов значительно отличается. Свыше 77% сырого протеина, содержавшегося в Образце 1, после фракционирования было сосредоточено в мелкой (целевой) фракции. Суммарное количество сырого протеина в средней и крупной фракциях составило менее 21%. Таким образом, значительная часть белка из исходного сырья перешла в целевую фракцию. В результате фракционирования Образца 2 распределение сырого протеина по фракциям выглядело иначе: выход сырого протеина в средней фракции, не являющейся целевой, был максимальным и на 14% превышал выход протеина в мелкой фракции; выход протеина в крупной фракции так же был достаточно высоким. Это означает, что произошли значительные потери белка в среднюю и крупную фракции.

Выход сырой клетчатки по фракциям отличался для двух образцов. В Образце 1 клетчатка, как и белок, была сосредоточена в мелкой фракции, что означает неполное разделение белка и клетчатки по фракциям, и связано с высокой массовой долей самой фракции. Выход клетчатки в крупной фракции был минимальным, что объясняется низкой массовой долей самой фракции, но также не способствует отделению клетчатки. Во фракциях Образца 2 клетчатка распределялась наиболее ожидаемым образом, ее выход увеличивался с размером частиц фракции. Однако с крупной фракцией было отделено только 40% сырой клетчатки.

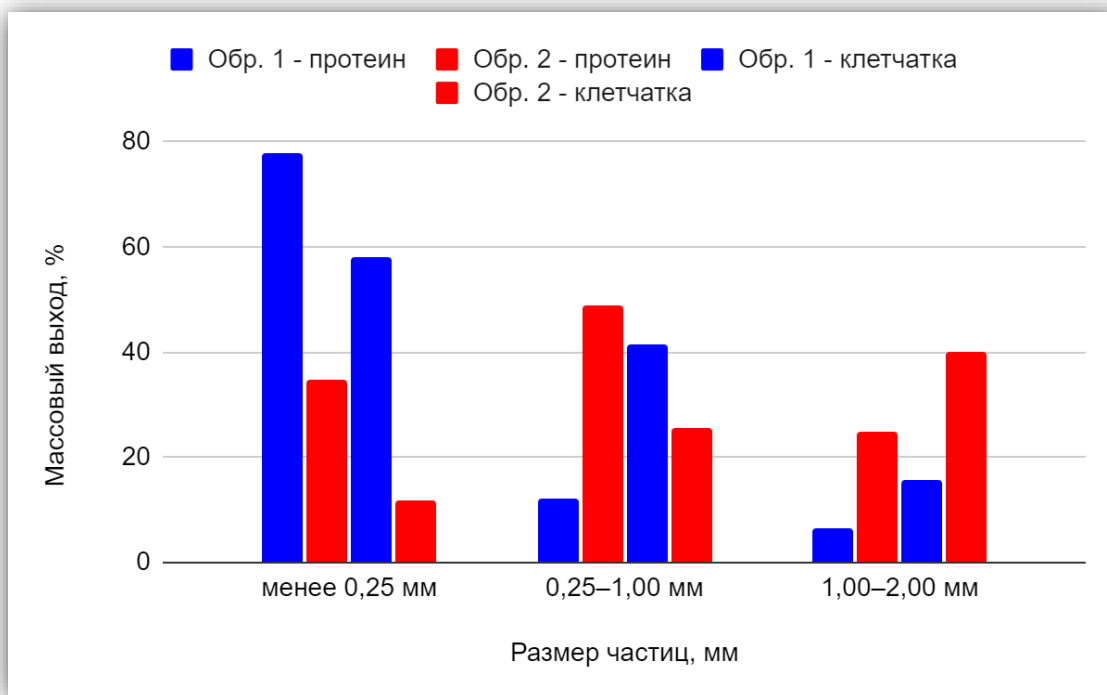


Рисунок 3. Массовые выходы белка и клетчатки во фракциях
 Figure 3. Mass yields of protein and fiber in fractions

Степень обогащения целевой фракции протеином рассчитана как отношение содержания сырого протеина в целевой фракции к его содержанию в сырье $O_{\phi} = \frac{W_{\phi} \cdot 100}{M_{и}}$. Отношение содержания сырого протеина к содержанию сырой клетчатки рассчитывали для каждой фракции. Полученные значения приведены в таблице 4.

Таблица 4. Содержание белка и клетчатки во фракциях
 Table 4. Content of protein and fiber in fractions

Размер частиц, мм	Отношение содержания протеина к содержанию клетчатки	
	Образец 1	Образец 2
менее 0,25 мм	3,09	3,73
0,25–1,00 мм	0,67	2,42
1,00–2,00 мм	0,94	0,79

Отношение содержания сырого протеина к содержанию сырой клетчатки так же показывает эффективность фракционирования, так как целью этого процесса является разделение белка и клетчатки по фракциям. Этот показатель у мелкой фракции Образца 2 выше, чем Образца 1 из-за разного уровня клетчатки при схожем уровне белка. При этом для исходных шротов отношение содержания протеина к содержанию клетчатки было выше для Образца 1 (2,30), чем для Образца 2 (1,28). Отношение уровня белка к уровню клетчатки так же достаточно высокое в средней фракции Образца 2, что может означать потери белка с данной фракцией.

Степень обогащения целевой фракции сырым протеином для Образца 1 составила 106,44%, для Образца 2 – 123,02%. При этом содержание сырого протеина в исходном шроте для Образца 1 было выше (39,44%), чем для Образца 2 (34,75%). Таким образом, для шрота с изначально более низким белком его содержание повысилось в большей степени, чем для шрота с более высоким белком. В связи с этим для двух изученных шротов не выявлено прямого влияния содержания сырого протеина в сырье на его содержание в целевой фракции.

Заключение

В результате фракционирования каждого из шротов получены фракции, схожие по внешнему виду: мелкая фракция представляла собой однородный порошок, средняя была менее однородной, а крупная содержала в основном фрагменты лузги семян. Выявлено различие между образцами в массовых долях фракций: в Образце 1 мелкая (целевая) фракция составляла более 70%, а в Образце 2 менее 30%. Таким образом, несмотря на общую закономерность распределения частиц по фракциям, количественные различия были значительны.

При фракционировании достигнуто такое распределение белка и клетчатки, при котором белок был сосредоточен преимущественно в мелкой фракции каждого отсева, а клетчатка в крупной. При этом содержание протеина в мелкой фракции было в 1,6 раза больше, чем в крупной. Максимальное значение сырого протеина, достигнутое в мелкой фракции, было меньше ожидаемого и составило 8% (что согласуется с литературными данными для подсолнечных шротов). Максимальное содержание протеина в мелких фракциях двух образцов отличалось незначительно, несмотря на различия их исходного состава. Наличие клетчатки во фракциях возрастало с увеличением размера частиц, кроме средней фракции Образца 1. При этом для мелкой фракции удалось добиться снижения клетчатки в 2,4 раза в сравнении с исходным шротом, что повышает ценность данной фракции для дальнейшего использования. Содержание клетчатки в мелких фракциях двух образцов разного состава отличалось незначительно.

Максимальный выход сырого протеина был достигнут в мелкой фракции Образца 1 и составил свыше 77%, что соответствует значительной части белка. Для Образца 2 выход протеина в мелкой фракции был значительно ниже (35%). Суммарный выход клетчатки для средней и крупной фракций в обоих образцах составил 55–65%, что соответствует отделению клетчатки с крупными фракциями. В мелкой фракции Образца 2 содержалось в 3,7 раза больше протеина, чем клетчатки (в исходном шроте – в 1,3 раза больше). Максимальная степень обогащения сырым протеином достигнута в мелкой фракции Образца 2 и составила 123% по сравнению с исходным шротом.

Таким образом, фракционирование изученных образцов привело к перераспределению протеина и клетчатки таким образом, что протеин был сосредоточен в мелких фракциях, а клетчатка в крупных. Мелкие фракции двух образцов содержали максимальное количество сырого протеина (42–43%) и минимальное количество сырой клетчатки (12–14%), и эти значения у обоих отсевов схожие, несмотря на различия в составе исходного сырья. Для образца с более высоким содержанием сырого протеина достигнут больший его выход в мелкой (целевой) фракции, а отношение содержания протеина к содержанию клетчатки было выше, как и степень обогащения целевой фракции белком. Это означает, что отличия в составе исходного сырья не оказали влияния на максимальное содержание сырого протеина во фракциях, но значительно повлияли не его массовый выход. Полученные продукты переработки подсолнечного шрота могут быть использованы в пищевой промышленности, в частности для обогащения белком мучных и хлебобулочных изделий. Это возможно благодаря достаточно высокому выходу этих продуктов при переработке подсолнечного шрота, снижению уровня клетчатки и повышению уровня протеина. Наиболее перспективны данные продукты для включения в состав безглютеновых изделий, которые часто отличаются низким уровнем белка.

Литература/References

1. 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, V. 13, article 10864. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-38094-w>
2. Egea M.B., de Oliveira Filho J.G., Bertolo M.R.V., de Araújo J.C., Gautério G.V., Lemes A.C. Bioactive phytochemicals from sunflower (*Helianthus annuus* L.) oil processing byproducts. In: Ramadan Hassanien M.F. (eds) *Bioactive phytochemicals from vegetable oil and oilseed processing by-products. Reference Series in Phytochemistry*. Springer, Cham. 2021, pp. 1–16. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-63961-7_4-1
3. Verstringe S., Vandercruyssen R., Carmans H., Rusu A.V., Bruggeman G., Trif M. Alternative proteins for food and feed. In: Galanakis C.M. (eds) *Biodiversity, Functional Ecosystems and Sustainable Food Production*. Springer, Cham. 2023, pp. 325–351. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-07434-9_10
4. Parodi E., La Nasa J., Ribechini E. et al. Extraction of proteins and residual oil from flax (*Linum usitatissimum*), camelina (*Camelina sativa*), and sunflower (*Helianthus annuus*) oilseed press cakes. *Biomass Conv. Bioref.* 2023, V. 13, pp. 1915–1926. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01379-z>

5. Kleekayai T., Khalesi M., Amigo-Benavent M., Cermeño M., Harnedy-Rothwell P., FitzGerald R.J. Enzyme-assisted extraction of plant proteins. In: Hernández-Álvarez A.J., Mondor M., Nosworthy M.G. (eds) *Green Protein Processing Technologies from Plants*. Springer, Cham. 2023, pp. 131–178. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16968-7_6
6. Giarola R.C., Nabeshima E.H., Michelazzo C., et al. Effect of sunflower protein meal and electrostatic complexes of sunflower meal-pectin on the cake crumb structure and color. *J Food Sci Technol*. 2023, V. 59, pp. 1419–1428. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13197-021-05151-z>
7. Murtaza M.A., Ameer K. Food processing industrial byproducts as raw material for the production of plant protein foods. In: Manickavasagan A., Lim L.T., Ali A. (eds) *Plant Protein Foods*. Springer, Cham. 2022, pp. 109–129. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91206-2_4
8. Stepycheva N.V., Makarov S.V., Kucherenko P.N. Secondary material resources of oil-producing plants. *Russ J Gen Chem*. 2012, V. 82, pp. 969–976. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1070363212050301>
9. Funke M., Loeffler M., Winkelmeier C. et al. Emulsifying properties of lentil protein preparations obtained by dry fractionation. *Eur Food Res Technol*. 2022, V. 248, pp. 381–391. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-021-03883-y>
10. Pelgrom P.J.M., Schutyser M.A.I., Boom R.M. Thermomechanical morphology of peas and its relation to fracture behaviour. *Food Bioprocess Technol*. 2013, V. 6, pp. 3317–3325. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-012-1031-2>
11. Pelgrom P.J.M., Boom R.M., Schutyser M.A.I. Method development to increase protein enrichment during dry fractionation of starch-rich legumes. *Food Bioprocess Technol*. 2015, V. 8, pp. 1495–1502. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-015-1513-0>
12. Silventoinen P., Rommi K., Holopainen-Mantila U. et al. Biochemical and techno-functional properties of protein- and fibre-rich hybrid ingredients produced by dry fractionation from rice bran. *Food Bioprocess Technol*. 2019, V. 12, pp. 1487–1499. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11947-019-02307-w>
13. 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, V. 11, Is. 4, pp. 398–403, DOI: 10.1080/19476337.2013.781681
14. Xing Q., Utami D.P., Dematthey M.B., Kyriakopoulou K., de Wit M., Boom R.M., Schutyser M.A.I. A two-step air classification and electrostatic separation process for protein enrichment of starch-containing legumes. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2020, V. 66, article 102480. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2020.102480>
15. 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, V. 139, article 109971. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109971>
16. Tabtabaei S., Kuspangaliyeva B., Legge R.L., Rajabzadeh A.R. Air classification of plant proteins. In: Hernández-Álvarez A.J., Mondor M., Nosworthy M.G. (eds) *Green Protein Processing Technologies from Plants*. Springer, Cham. 2023, pp. 31–59. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16968-7_2
17. Kuspangaliyeva B., Konakbayeva D., Tabtabaei S. Towards dry fractionation of soybean meal into protein and dietary fiber concentrates. *Journal of Food Engineering*. 2023, V. 342, article 111358. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2022.111358>

Информация об авторах

Ирина Владимировна Крылова – аспирант, научный сотрудник
Александр Валентинович Федоров – д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе
Мария Львовна Доморошенко – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник
Татьяна Федоровна Демьяненко – канд. техн. наук, старший научный сотрудник
Анистратова Оксана Вячеславовна – доцент кафедры технологии продуктов питания
Лилия Олеговна Шагинова – младший научный сотрудник

Information about the authors

Irina V. Krylova, Postgraduate Student, Researcher
Alexander V. Fedorov, D. Sc. (Eng.), Deputy Director for Research
Maria L. Domoroshchenkova, Ph.D. (Eng.), Principal Researcher
Tatiana F. Demianenko, Ph.D. (Eng.), Senior Researcher
Liliia O. Shaginova, Junior Researcher

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

Статья поступила в редакцию 31.10.2023
Одобрена после рецензирования 07.02.2024
Принята к публикации 22.02.2024

The article was submitted 31.10.2023
Approved after reviewing 07.02.2024
Accepted for publication 22.02.2024