

Научная статья

УДК 633.854.78

DOI: 10.17586/2310-1164-2025-18-1-24-33

Ферментативная экстракция белка из продуктов переработки подсолнечника

И.В. Крылова^{1,2*}, А.В. Федоров¹¹ВНИИЖиров, Россия, Санкт-Петербург²Университет ИТМО, Россия, Санкт-Петербург

*irinakrylova1987@gmail.com

Аннотация. Определяли влияние ферментных препаратов на содержание сырого протеина в продуктах переработки подсолнечного шрота с целью повышения его уровня в продуктах ферментативного гидролиза. Объектом исследования выбрана фракция подсолнечного шрота, полученная методом механического фракционирования, содержащая 43,87% сырого протеина. Для проведения ферментативного гидролиза применяли препараты Целлолюкс, Distizyme, Viscozyme и Ultraflo. Ферментативная экстракция белка из растительного сырья основана на расщеплении клеточных стенок сырья целлюлолитическими ферментами. Известно, что преобладающими компонентами клетчатки подсолнечного шрота являются целлюлоза и гемицеллюлоза, поэтому для гидролиза выбрали ферментные препараты с целлюлазной и гемицеллюлазной активностью. Для оптимизации условий гидролиза сравнивали содержание сырого протеина при воздействии данных препаратов в дозировках 1, 2 и 4% от массы образца. Показано увеличение содержания сухих веществ и сырого протеина в продуктах гидролиза, в частности при гидролизе препаратом Целлолюкс достигнуто содержание протеина 49,86%. Последовательное повышение дозировок препаратов Distizyme, Viscozyme и Ultraflo привело к увеличению уровня протеина в продуктах гидролиза. При концентрации 4% препарата Ultraflo достигнут максимальный уровень сырого протеина, который составил 58,14%, то есть на 14% выше, чем в исходном образце. Показана возможность получения белковых продуктов на основе подсолнечного шрота методом ферментативного гидролиза. Данные белковые препараты из растительного сырья могут использоваться в пищевой промышленности, в частности для повышения содержания белка в мучных изделиях.

Ключевые слова: биотехнология; ферментативный гидролиз; сырой протеин; подсолнечный шрот; растительное сырье; целлюлазы; гемицеллюлазы; изоэлектрическая точка

Original article

Enzymatic protein extraction from sunflower processing products

Irina V. Krylova^{1,2*}, Alexandr V. Fedorov¹¹All-Russian Research Institute of Fats, St. Petersburg, Russia²ITMO University, St. Petersburg, Russia

*irinakrylova1987@gmail.com

Abstract. The effect of enzyme preparations on crude protein content in sunflower meal processing products was determined. The aim of the study was to increase the level of crude protein in the products of enzymatic hydrolysis. The objects of the study were a fraction of sunflower meal obtained by mechanical fractionation, containing 43.87% crude protein. The preparations Cellolux, Distizyme, Viscozyme, and Ultraflo were used for enzymatic hydrolysis. Enzymatic protein extraction from plant raw materials is based on the cleavage of the cell walls of the raw materials by cellulolytic enzymes. It is known that the predominant components of sunflower meal fiber are cellulose and hemicellulose. Therefore, enzyme preparations with cellulase and hemicellulase activity are selected for hydrolysis. To optimize the hydrolysis conditions, the crude protein content is compared when exposed to these preparations in dosages of 1%, 2%, and 4% by weight of the sample. An increase in the content of dry substances and crude protein in hydrolysis products was shown, in particular, a protein content of 49.86% was achieved during hydrolysis with Cellolux. A consistent increase in dosages of Distizyme, Viscozyme and Ultraflo preparations led to an increase in protein levels in hydrolysis products. At a concentration of 4% of the Ultraflo preparation, the maximum level of crude protein was reached. It was 58.14%, that is, 14% higher than in the original sample. From the data obtained, we demonstrated the possibility to obtain protein products based on sunflower meal by enzymatic hydrolysis. The results of the study can be used to obtain protein preparations from plant raw materials. These preparations can be used in the food industry, in particular to increase the protein content in flour products.

Keywords: biotechnology; enzymatic hydrolysis; crude protein; sunflower mea; vegetable raw materials; cellulases; hemicellulases; isoelectric point

Введение

Подсолнечный шрот, образующийся при переработке подсолнечника на масло, является перспективным высокобелковым сырьем, потенциал которого в настоящее время недооценен. Целесообразность использования продуктов переработки подсолнечника объясняется в первую очередь его распространенностью и доступностью. Подсолнечник – основная российская масличная культура, валовый сбор которой в последние пять лет вырос на 35%. По данным Росстата, в 2023 г. он составил свыше 17 тыс. тонн [1]. При переработке такого объема подсолнечных семян на масло образуется большое количество побочных продуктов – жмыхов и шротов. Масса шрота при производстве масла экстракционным способом составляет до 60% от массы сырья [2]. Кроме больших объемов производства важным преимуществом подсолнечного шрота является его ценный состав, питательная ценность которого определяется главным образом высоким содержанием белка, составляющим до 40% шрота [3]. Белок подсолнечника представлен четырьмя фракциями: глобулинами (40–90%, преимущественно гелиантин), альбуминами (10–30%) и небольшим количеством глутелинов и проламинов [4]. Главный запасной белок подсолнечника – 11S-глобулин – содержит большое количество глутаминовой, аспарагиновой кислоты и аргинина [5]. Продукты переработки подсолнечника могут быть источником глутамината и глутаминовой кислоты, аспарагина и аспарагиновой кислоты, а также аргинина и цистеина [2]. Количество и состав протеина в подсолнечном шроте делают его перспективным сырьем для получения белоксодержащих пищевых ингредиентов. В то же время значительная часть полученного шрота перерабатывается на корма для сельскохозяйственных животных благодаря высокому содержанию белка [2]. Однако данное высокобелковое сырье при пищевой биопереработке можно использовать более эффективно.

Переработка подсолнечного шрота в пищевой промышленности осуществляется различными способами – химическими, физическими и ферментативными. К химическим можно отнести наиболее распространенный способ получения белковых веществ из растительного сырья – экстракцию водными растворами щелочей, кислот, солей, а также органическими растворителями [5]. Все это связано с затратами на растворители, а также энергию для последующей сушки готового белкового продукта. Белок при этом подвергается воздействию реагентов и нагревания, что влияет на его питательную ценность и нативные свойства [4]. На сохранение нативных свойств направлено использование физических подходов экстракции, в которых используются сверхкритические и эвтектические растворители, микроволновое и ультразвуковое излучение [6]. К физическим способам получения белка можно отнести и различные виды фракционирования, то есть классификации предварительно измельченного материала: сырье измельчают на мельницах различной конструкции, а затем разделяют на фракции с помощью вибросит, грохотов, электростатического или трибоэлектрического воздействия. Фракционирование позволяет избежать воздействия растворителей на белок и последующей сушки [7]. Альтернативой являются ферментативные способы переработки, к которым относится биоконверсия растительного сырья целлюлолитическими, протеолитическими и другими ферментными препаратами [8], применение которых соответствует современным экологическим требованиям к промышленным технологиям.

Известны исследования применения ферментативного гидролиза в сочетании с перечисленными методами для повышения выхода белка и его модификации. Модифицировать белок и улучшить его функциональные свойства можно с помощью протеолитических ферментов, а повысить выход белка – с помощью целлюлолитических ферментов [8]. Целлюлазы расщепляют компоненты клеточной стенки растительного сырья, что увеличивает выход белковых компонентов [9]. Ферментативный гидролиз проводится в мягких условиях и способствует сохранению ценных свойств белка. Ферментативный гидролиз продуктов переработки масличных семян имеет несколько направлений: разрушение полисахаридов клеточной стенки с помощью карбогидраз; расщепление белковых молекул на пептидные фрагменты с помощью протеаз; разрушение антипитательных факторов, к которым можно отнести и фенольные соединения; наконец, различные сочетания этих процессов [6]. Для повышения эффективности ферментативного гидролиза необходимо снизить размер частиц материала, что улучшит их доступность для молекул фермента [9].

Существует целый ряд исследований, посвященных получению белка из растительного сырья. Объектом большинства из них являются соевые жмыхи и шроты как широко распространенное сырье для получения кормового и пищевого растительного белка [5]. Объектом данной работы стал подсолнечный шрот, который, несмотря на свою распространенность как сырья, недостаточно изучен с точки зрения получения белковых продуктов. Также в большинстве исследований [5, 6, 9] для получения белка используется метод щелочной экстракции. Намного менее изучено механическое фракционирование, которое чаще применяется к бобовым и зерновым [10, 11] для отделения крахмала. Лишь немногие работы [12] направлены на фракционирование подсолнечника с целью снижения уровня клетчатки. Кроме того, не было исследовано фракционирование подсолнечного шрота в сочетании с ферментативным гидролизом. Вышесказанное обусловило выбор в качестве объекта изучения продукта механического фракционирования подсолнечного шрота.

Цель данной работы – повысить содержание сырого протеина в получаемых продуктах методом ферментативного гидролиза. Для оптимизации процесса гидролиза решались задачи выбора ферментного препарата и его дозировки, а также изучения состава полученных белковых препаратов.

Материалы и методы

Материалом исследования стала белоксодержащая фракция подсолнечного шрота, в сухом веществе которой содержалось 43,87% сырого протеина и 13,25% сырой клетчатки. Для ее получения подсолнечный шрот (АО «Астон», Россия) измельчали на кулачковой мельнице и классифицировали с помощью набора лабораторных сит с ячейками 0,25 мм. Более подробно механическое фракционирование подсолнечного шрота описано в предыдущей работе авторов данного исследования [13]. Следует отметить, что в большинстве работ по фракционированию растительного сырья используется не ситовая, а воздушная классификация [10–12]. Данное отличие способа получения могло повлиять на состав и содержание клетчатки в полученной фракции.

Клетчатка представляет собой основу клеточных стенок растительного сырья, которые имеют сложный состав и включают целлюлозу, гемицеллюлозу, пектин и гликопротеиды. Применительно к задачам пищевой промышленности расщепление клеточных стенок растительного сырья необходимо при осветлении солода и для улучшения фильтрации в различных процессах. Согласно исследованиям [8], для расщепления этих компонентов наиболее целесообразно применение сложных ферментных комплексов целлюлолитического действия. Выбор ферментных препаратов определяется составом сырья, например, для осветления соков применяют пектиназы, целлюлазы и амилазы [14]. Из литературных данных [2] известно, что лузга подсолнечника содержит 40% целлюлозы, 24% гемицеллюлозы и 20% лигнина, а клетчатка шрота состоит из 23–35% целлюлозы, 13–33% гемицеллюлозы и 14–27% лигнина в зависимости от способа обработки семян. Таким образом, в подсолнечных шротах основными компонентами клетчатки являются целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин [4], поэтому в данном исследовании гидролиз белоксодержащей фракции проводили ферментными препаратами с целлюлолитической активностью (таблица 1). Выбранные препараты предназначены для расщепления клеточных стенок растительного сырья, включающего главным образом целлюлозу и гемицеллюлозу.

Таблица 1. Ферментные препараты

Table 1. Enzyme preparations

Ферментный препарат	Активность, ед/мл	Оптимальный pH	Оптимальная t , °C	Ферменты
Целлолюкс «Сиббиофарм»	2000	3,5–6,0	55–60	целлюлаза, ксиланаза, β -глюканаза
Distizyme "Novozymes"	950	4,0–6,0	55–70	пектиназа, целлюлаза, амилоглюкозидаза, α -амилаза
Viscozyme "Novozymes"	100	4,5–6,0	30–65	целлюлаза, β -глюканаза, пектиназа, ксиланаза, гемицеллюлаза
Ultraflo "Novozymes"	750	4,0–6,5	45–75	ксиланаза, β -глюканаза

Приведенные в таблице характеристики ферментных препаратов предоставлены их производителями. Исходя из этих данных, оптимальными условиями гидролиза являются значения pH 6,0–8,0 и температура 40–60°C, что подтверждается другими исследователями [8].

В данной работе гидролиз всеми ферментными препаратами проводили в одинаковых условиях. В каждом опыте навеску 5 г образца суспендировали 50 мл дистиллированной воды с температурой 55°C, которую затем поддерживали с помощью водяной бани LT300 (Loip, Россия). Значение pH суспензии довели до 4,25 – изоэлектрической точки белка подсолнечника, что соответствует его минимальной растворимости в воде. Проведение гидролиза в изоэлектрической точке способствует тому, чтобы белковые компоненты во время гидролиза концентрировались в осадке. Гидролиз вели при перемешивании 1500 об/мин в течение 30 мин мешалкой верхнеприводной RZR 2020 (Heidolph, Германия). Осадок отделяли центрифугированием при 2500 RCF в течение 15 мин (центрифуга 3-16L, Sigma, Германия). Условия проведения ферментативных реакций были подобраны экспериментально на основе предыдущих исследований [15]. Образцы, подвергавшиеся сушке, помещали в сушильный шкаф FD-53 (Binder, Германия), нагретый до температуры 50°C на 2 ч.

В полученных после гидролиза осадках и надосадочных жидкостях определяли содержание сухих веществ и сырого протеина стандартными методами. 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. Массовую долю сухих веществ определяли вычитанием массовой доли влаги из массы навески. Содержание сырого протеина определяли методом Кьельдаля (ГОСТ 13496.4-2019). Определение содержания азота проводили на дистилляторе KjelFlex K-360 (Buchi labortechnik, Швейцария). Погрешность метода составляла 0,5% согласно методике. Все измерения проводили в двукратной повторности, результаты усредняли и представляли в виде среднего значения \pm погрешность.

Результаты и обсуждение

Влияние дозировки ферментного препарата

Ферменты класса целлюлаз широко применяются в промышленности для расщепления клеточной стенки растительного сырья и повышения выхода белка [9, 16]. В данном исследовании для повышения выхода белка подсолнечника был выбран ферментный препарат Целлолюкс. Целлюлолитическая активность данного препарата способствовала расщеплению целлюлозы, составляющей до 35% клеточных стенок подсолнечного шрота [2]. Для выбора дозировки внесения данного препарата его применяли в концентрациях 0,5; 1,0 и 2,0%. Данные дозировки были выбраны, отталкиваясь от исследований [17] по ферментативному гидролизу зеленого чая аналогичным препаратом, где использовали дозировку 0,09% от массы сырья. Контрольный образец подвергали такой же обработке, но без внесения фермента. В высушенных продуктах гидролиза определяли содержание сырого протеина, по которому судили о действии фермента.

Ферментативный гидролиз увеличил содержание сырого протеина в сухом веществе осадка (таблица 2), максимальное содержание которого в продуктах гидролиза составило 49,86%, что на 6% превысило его содержание в белковой фракции подсолнечного шрота. Приведенные результаты можно сравнить с данными [18] о получении гидролизата с 35–45% сырого протеина в зависимости от предварительной обработки.

Таблица 2. Содержание сухих веществ в продуктах гидролиза

Table 2. Dry matter content in hydrolysis products

Целлолюкс, % от массы образца	Содержание сухих веществ, %	Содержание сырого протеина, с.в.
0,0	89,97 \pm 0,01	45,42 \pm 0,5
0,5	90,32 \pm 0,01	49,81 \pm 0,5
1,0	91,52 \pm 0,01	49,86 \pm 0,5
2,0	91,50 \pm 0,01	49,84 \pm 0,5

В работе [16] также применялись целлюлолитические ферменты, но объектом изучения были микроводоросли, что следует учитывать при сравнении результатов. Авторы объясняют механизм действия целлюлаз как расщепление компонентов клеточной стенки, что способствует выходу белков в раствор. В данном исследовании повышение содержания сырого протеина в продуктах гидролиза так же может быть связано со снижением содержания клетчатки после ее расщепления целлюлазами. В отличие от результатов [16], проведение гидролиза в условиях изоэлектрической точки способствовало тому, что белок был сосредоточен в осадке. Последовательное повышение концентрации ферментного препарата не вызвало роста белка в продуктах гидролиза, поэтому вместо дальнейшего увеличения его дозировки изучали влияние других ферментных препаратов с целлюлазной активностью.

Выбор ферментного препарата

Препараты Distizyme, Viscozyme и Ultraflo были выбраны для следующего эксперимента по изучению ферментативного гидролиза. Каждый фермент вносили в концентрациях 1, 2 и 4%, что можно сравнить с исследованием [19] по гидролизу зерна. В продуктах гидролиза определяли содержание сухих веществ и сырого протеина без предварительного высушивания. Ферменты из ряда карбогидраз и протеаз способствуют высвобождению и солюбилизации белка за счет гидролиза клеточных стенок и расщепления белковых молекул. Эффективность процесса зависит от таких параметров, как доза внесения фермента, значение pH, температура и продолжительность гидролиза [6].

Содержание сухих веществ (рисунок 1) снижалось при использовании ферментного препарата Distizyme с увеличением его концентрации. Схожая закономерность наблюдалась и для других препаратов, но при некоторых их дозировках содержание сухих веществ оказалось выше, чем в контроле. Для препарата Viscozyme содержание сухих веществ стало ниже контрольного (15,81%) только при дозировке 4% (15,25%). При той же концентрации препарата Ultraflo содержание сухих веществ все еще было на 3% выше контрольного, а при более низких концентрациях превышало его более, чем на 5%.

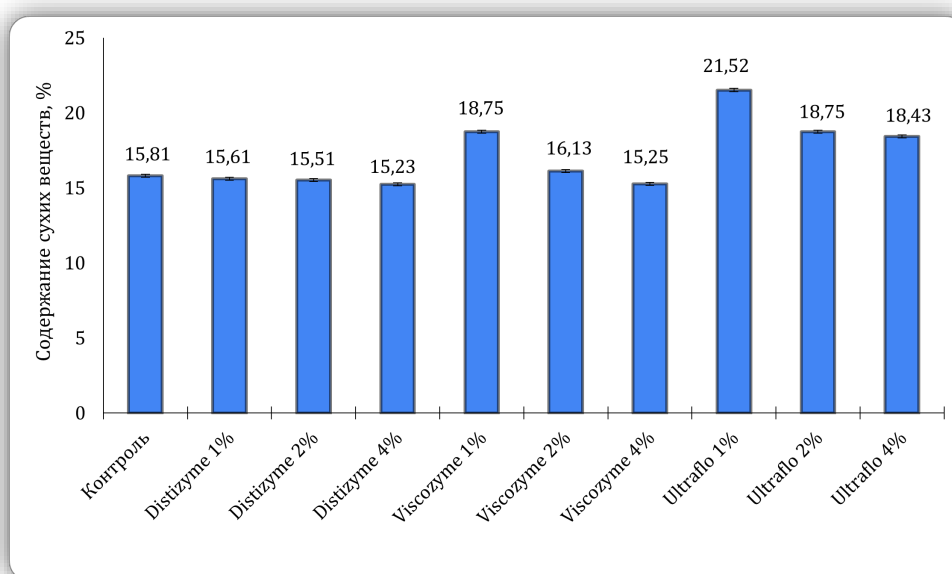


Рисунок 1 – Содержание сухих веществ при гидролизе различными ферментами
Figure 1. Dry matter content after hydrolysis by various enzymes

Концентрация ферментного препарата оказала влияние и на содержание сырого протеина в сухом веществе (рисунок 2). Во всех продуктах гидролиза уровень сырого протеина оказался выше контрольного. При этом с увеличением концентрации каждого из ферментов уровень белка возрастал. Целлюлазы широко применяются в пищевой биотехнологии, например, для повышения выхода овощных и фруктовых соков и оливкового масла. Вместе с ксиланазами и пектиназами целлюлазы входят в комплексы мацерирующих ферментов, размягчающих кожуру плодов и способствующих выходу целевого вещества в раствор [9]. Также было показано [15], что карбогидразы (целлюлазы, гемицеллюлазы, ксиланазы) за счет разрушения клеточной стенки могут повышать выход белка при его экстракции из растительного сырья.

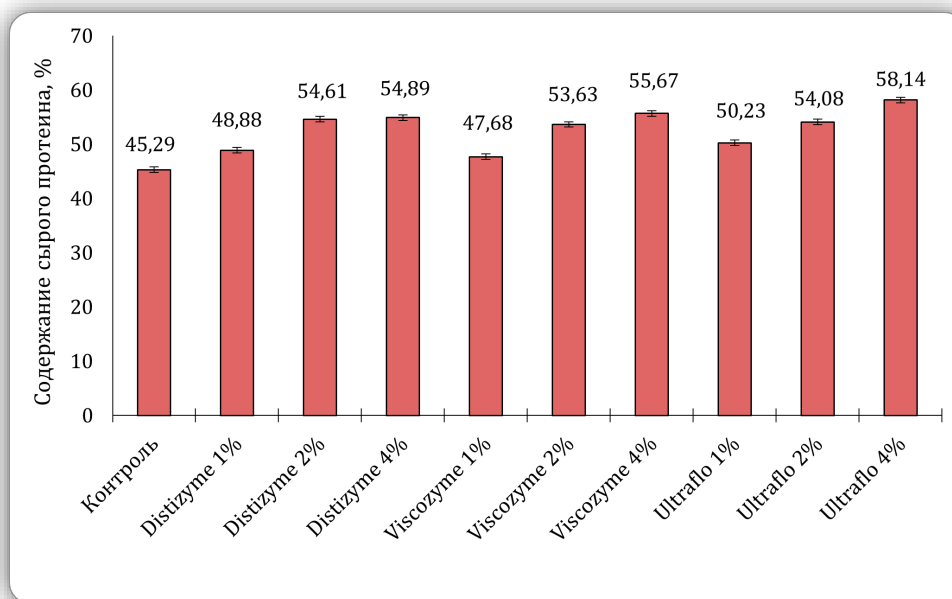


Рисунок 2 – Содержание сырого протеина при гидролизе различными ферментами
 Figure 2. Crude protein content after hydrolysis by various enzymes

Наибольшие значения содержания белка, полученные при дозировках ферментов 4%, находились в пределах от 54,89 до 58,14%. Максимальное содержание сырого протеина в сухом веществе 58,14% было получено для препарата Ultraflo при концентрации 4% (рисунок 2). С данным ферментом проводились дальнейшие исследования.

Содержание протеина в осадке и в растворе

Ферментативный гидролиз растительного сырья целлюлолитическими ферментами используется как в сочетании с другими методами экстракции, так и отдельно. Применение ферментов не только повышает выход белка, но и ускоряет процесс его получения. Сокращение времени экстракции снижает воздействие температуры и растворителей на белок и способствует сохранению его нативной структуры [8].

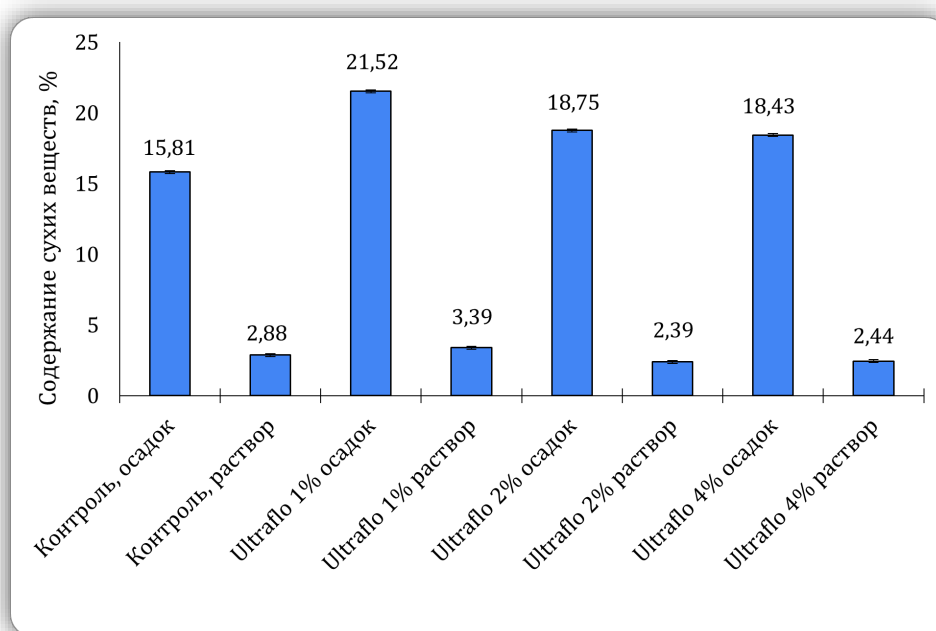


Рисунок 3 – Содержание сухих веществ при гидролизе препаратом Ultraflo
 Figure 3. Dry matter content of after hydrolysis by Ultraflo

Дополнительно изучали распределение сухих веществ в осадке и в растворе после гидролиза ферментным препаратом Ultraflo. Сухие вещества определяли в осадке без дополнительного высушивания, а также в аликвотах надосадочной жидкости после центрифугирования. Кроме того, и в надосадочной жидкости, и в осадке определяли содержание сырого протеина.

Распределение сухих веществ в растворах при различных концентрациях фермента было схожим с их распределением в осадках (рисунок 3). Во всех растворах содержание сухих веществ зафиксировано выше контрольного, но при увеличении концентрации фермента оно снижалось. Во всех осадках содержание сухих веществ превышало контрольный, но в растворе это наблюдалось лишь при концентрации фермента 1%. В остальных случаях количество сухих веществ в осадке было ниже контрольного, при этом минимальное значение составило 2,39%.

Противоположная закономерность наблюдалась в распределении сырого протеина в сухом веществе осадков и растворов (рисунок 4). В осадке содержание сырого протеина повышалось с увеличением концентрации фермента до максимального уровня в 58,14% при дозировке 4%. Напротив, во всех растворах после гидролиза уровень сырого протеина был ниже контрольного. Минимальное значение сырого протеина в сухом веществе раствора составило 15,06% и получено при дозировке фермента 2%.

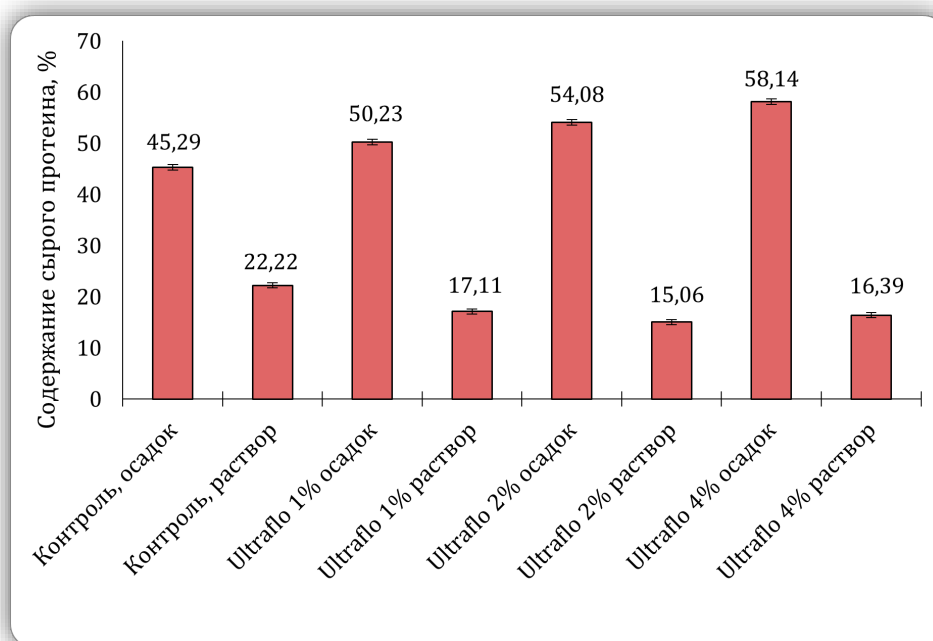


Рисунок 4 – Содержание сырого протеина при гидролизе препаратом Ultraflo
Figure 4. Crude protein content after hydrolysis by Ultraflo

Таким образом, увеличение концентрации фермента при гидролизе способствует повышению выхода белка. При этом благодаря проведению процесса при изоэлектрической точке подсолнечного белка он концентрировался в осадке. Анализ графика (рисунок 4) показывает, что потери белка из осадка в раствор снижались с повышением дозировки фермента. У большинства высших растений клеточная стенка состоит из волокон целлюлозы и прикрепленных к ним гемицеллюлоз. Эту структуру обволакивают пектины с включениями белковых молекул. Это означает, что наибольшую эффективность имеет сочетание целлюлаз, гемицеллюлаз, пектиназ и протеаз, и ферментный препарат, который можно использовать для гидролиза клеточной стенки, должен содержать смесь данных ферментов [9].

Заключение

Сравнение действия нескольких ферментных препаратов в различных дозировках показало возможность повышения содержания сырого протеина в продуктах переработки подсолнечника методом ферментативного гидролиза в изоэлектрической точке белка, а именно увеличение сырого

протеина в продуктах гидролиза на 14%, чем в исходном образце. Данный результат получен при гидролизе ферментным препаратом Ultraflo в дозировке 4% и объясняется расщеплением клетчаточных компонентов образца.

Сочетание механического фракционирования и ферментативного гидролиза позволяет избежать применения растворителей и реагентов, что не только способствует сохранению нативных свойств белка, но и повышает экологичность процесса его получения. Эти особенности выбранного метода делают его перспективным для практического применения.

Полученные белковые препараты предполагается использовать в пищевой промышленности для обогащения белком продуктов питания. В первую очередь они могут использоваться для замены части муки в традиционных и безглютеновых мучных изделиях. Включению белковых препаратов подсолнечника в мучные изделия будут посвящены дальнейшие исследования.

Литература

1. Прогноз сборов подсолнечника на 2024 год. АБ-Центр – экспертно-аналитический центр агробизнеса. 2024. URL: <https://ab-centre.ru/news/prognoz-sborov-podsolnechnika-na-2024-god?ysclid=m4788lodmt719873116> (дата обращения: 10.12.2024).
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: Hassanien R.M.F. (Ed.) *Bioactive phytochemicals from vegetable oil and oilseed processing by-products*. Reference Series in Phytochemistry. Springer, Cham. 2021, pp. 1–16. DOI: 10.1007/978-3-030-63961-7_4-1
3. Blicharz-Kania A., Pecyna A., Zdybel B., Andrejko D., Marczuk A. Sunflower seed cake as a source of nutrients in glutenfree bread. *Scientific Reports*. 2023, V. 13, article 10864. DOI: 10.1038/s41598-023-38094-w
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: 10.1007/s13399-021-01379-z
5. 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: 10.1134/S1070363212050301
6. Sun X., Abioye R., Acquah C., Udenigwe Ch. Application of ultrasound technology in plant-based proteins: Improving extraction, physicochemical, functional, and nutritional properties. In: Hernandez-Ivarez A.J., Mondor M., Nosworthy M.G. (Eds.) *Green Protein Processing Technologies from Plants*. Springer Nature. 2023, pp. 265–289. DOI: 10.1007/978-3-031-16968-7_11
7. Wockenfuss L., Lammers V., Heinz V., Sozer N., Silventoinen-Veijalainen P. Two steps of dry fractionation: Comparison and combination of air classification and electrostatic separation for protein enrichment from defatted rapeseed press cake. *Journal of Food Engineering*. 2023, V. 357, no. 8, article 111623. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2023.111623
8. Дегтярев И.А., Фоменко И.А., Мижева А.А., Серба Е.М., Машенцева Н.Г. Белковые препараты из отходов переработки рапса: обзор современного состояния и перспектив развития существующих технологий // Пищевые системы. 2023. Т. 6. № 2. С. 159–170. DOI: 10.21323/2618-9771-2023-6-2-159-170
9. Marathe S.J., Jadhav S., Bankar S.B., Singhal R.S. Enzyme-assisted extraction of bioactives. In: Puri M. (Ed.) *Food Bioactives: Extraction and biotechnology applications*. Springer. 2017, pp. 171–201. DOI: 10.1007/978-3-319-51639-4_8
10. 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: 10.1007/s11947-019-02307-w
11. Funke M., Loeffler M., Winkelmeyer C. et al. Emulsifying properties of lentil protein preparations obtained by dry fractionation. *Eur Food Res Technol.* 2022, V. 248, pp. 381–391. DOI: 10.1007/s00217-021-03883-y
12. 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: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111358
13. Крылова И.В., Федоров А.В., Доморощенкова М.Л., Демьяненко Т.Ф., Шагинова Л.О. Влияние состава подсолнечного шрота на эффективность отделения белковой части сырья от клетчатки методом механического фракционирования // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2024. № 1. С. 3–13. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-3-13
14. Pui L.P.H., Saleena L.A.K. Enzyme-aided treatment of fruit juice: A review. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023, V. 53, no. 1, pp. 38–48. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-1-2413
15. Крылова И.В., Демьяненко Т.Ф., Шагинова Л.О. Ферментативный гидролиз полисахаридов в процессах выделения подсолнечного белка // Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО: сб. тр. СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2023. Т. 2. С. 123–125.

16. 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: 10.1007/978-3-030-91206-2_4
17. Аль-Ясари А.Х., Баракова Н.В., Басковцева А.С., Алхатиб Р., Новоселов А.Г. Эффективность применения ферментных препаратов при водной экстракции фенольных веществ из листьев зеленого чая // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2024. № 1. С. 35–43. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-35-43
18. Martins P.L., Duarte L.C., Pereira H., Reis A., Carvalheiro F. Evaluation of different fractionation methods for the simultaneous protein and carbohydrate extraction from microalgae. *Biomass Conv. Bioref.* 2024, V. 15, no. 1, pp. 999–1011. DOI: 10.1007/s13399-024-05279-w
19. Ибрахим М.Н.Г., Лусина Е.И., Баракова Н.В. Эффективность применения ферментных препаратов в технологии напитков на основе голозерного овса // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2022. № 1. С. 22–28. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-1-22-28

References

1. Sunflower harvest forecast for 2024. AB-Center – expert and analytical center of agribusiness. 2024. URL: <https://ab-centre.ru/news/prognoz-sborov-podsolnechnika-na-2024-god?ysclid=m4788lodmt719873116> (Accessed 10.12.2024). (In Russian)
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: Hassanién R.M.F. (Ed.) *Bioactive phytochemicals from vegetable oil and oilseed processing by-products*. Reference Series in Phytochemistry. Springer, Cham. 2021, pp. 1–16. DOI: 10.1007/978-3-030-63961-7_4-1
3. Blicharz-Kania A., Pecyna A., Zdybel B., Andrejko D., Marczuk A. Sunflower seed cake as a source of nutrients in glutenfree bread. *Scientific Reports*. 2023, V. 13, article 10864. DOI: 10.1038/s41598-023-38094-w
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: 10.1007/s13399-021-01379-z
5. 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: 10.1134/S1070363212050301
6. Sun X., Abioye R., Acquah C., Udenigwe Ch. Application of ultrasound technology in plant-based proteins: Improving extraction, physicochemical, functional, and nutritional properties. In: Hernandez-Ivarez A.J., Mondor M., Nosworthy M.G. (Eds.) *Green Protein Processing Technologies from Plants*. Springer Nature. 2023, pp. 265–289. DOI: 10.1007/978-3-031-16968-7_11
7. Wockenfuss L., Lammers V., Heinz V., Sozer N., Silventoinen-Veijalainen P. Two steps of dry fractionation: Comparison and combination of air classification and electrostatic separation for protein enrichment from defatted rapeseed press cake. *Journal of Food Engineering*. 2023, V. 357, no. 8, article 111623. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2023.111623
8. Degtyarev I.A., Fomenko I.A., Mizheva A.A., Serba E.M., Mashentseva N.G. Protein preparations from rapeseed processing waste: a review of the current status and development prospects of existing technologies. *Food Systems*. 2023, V. 6, no. 2, pp. 159–170. DOI: 10.21323/2618-9771-2023-6-2-159-170. (In Russian)
9. Marathe S.J., Jadhav S., Bankar S.B., Singhal R.S. Enzyme-assisted extraction of bioactives. In: Puri M. (Ed.) *Food Bioactives: Extraction and biotechnology applications*. Springer. 2017, pp. 171–201. DOI: 10.1007/978-3-319-51639-4_8
10. 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: 10.1007/s11947-019-02307-w
11. Funke M., Loeffler M., Winkelmeyer C. et al. Emulsifying properties of lentil protein preparations obtained by dry fractionation. *Eur Food Res Technol.* 2022, V. 248, pp. 381–391. DOI: 10.1007/s00217-021-03883-y
12. 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: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111358
13. Krylova I.V., Fedorov A.V., Domoroshchenkova M.L., Demianenko T.F., Shaginova L.O. Influence of the composition of sunflower meal on the efficiency of separating the protein part of the raw material from fiber by mechanical fractionation. *Processes and Food Production Equipment*. 2024, no. 1, pp. 3–13. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-3-13. (In Russian)
14. Pui L.P.H., Saleena L.A.K. Enzyme-aided treatment of fruit juice: A review. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2023, V. 53, no. 1, pp. 38–48. DOI: 10.21603/2074-9414-2023-1-2413
15. Krylova I.V., Demyanenko T.F., Shaginova L.O. Enzymatic hydrolysis of polysaccharides in the processes of sunflower protein isolation. *Almanac of Scientific Works of Young Scientists of ITMO University. Collection of Works*. St. Petersburg, ITMO University Publ. 2023, V. 2, pp. 123–125. (In Russian)

16. 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: 10.1007/978-3-030-91206-2_4
17. Al-Yasari A.H., Barakova N.V., Baskovtceva A.S., Alkhateeb R., Novoselov A.G. Efficiency of enzyme preparations application in water extraction of phenolic compounds from green tea leaves. *Processes and Food Production Equipment*. 2024, no. 1, pp. 35–43. DOI: 10.17586/2310-1164-2024-17-1-35-43. (In Russian)
18. Martins P.L., Duarte L.C., Pereira H., Reis A., Carvalheiro F. Evaluation of different fractionation methods for the simultaneous protein and carbohydrate extraction from microalgae. *Biomass Conv. Bioref.* 2024, V. 15, no. 1, pp. 999–1011. DOI: 10.1007/s13399-024-05279-w
19. Ibrahim M.N.G., Lisina E.I., Barakova N.V. Influence the efficiency of enzyme preparations in the technological production of naked oat based drinks. *Processes and Food Production Equipment*. 2022, no. 1, pp. 22–28. DOI: 10.17586/2310-1164-2022-15-1-22-28. (In Russian)

Информация об авторах

Крылова Ирина Владимировна – аспирант; научный сотрудник

Александр Валентинович Федоров – д-р техн. наук, заместитель директора по научной работе

Information about the authors

Irina V. Krylova, Postgraduate Student; Researcher

Alexander V. Fedorov, D. Sc. (Eng.), Deputy Director for Research

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

Статья поступила в редакцию 13.01.2025

Одобрена после рецензирования 10.02.2025

Принята к публикации 28.02.2025

The article was submitted 13.01.2025

Approved after reviewing 10.02.2025

Accepted for publication 28.02.2025