

<https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2636>
<https://elibrary.ru/WONCBU>

Оригинальная статья
<https://fptt.ru>

Изоляты белка из обезжиренной гороховой муки: получение и оценка качества



А. Ю. Глухарев^{1,*}, Ю. А. Кучина¹, С. Р. Деркач¹,
А. С. Князева², Д. А. Утьянов²

¹ Мурманский арктический университет , Мурманск, Россия

² Федеральный научный центр пищевых систем им. В. М. Горбатова РАН , Москва, Россия

Поступила в редакцию: 15.10.2025

Принята после рецензирования: 25.11.2025

Принята к публикации: 10.03.2026

*e-mail: glukharevayu@yandex.ru

© А. Ю. Глухарев, Ю. А. Кучина, С. Р. Деркач,

А. С. Князева, Д. А. Утьянов, 2026



Аннотация.

Совершенствование технологии производства белкового изолята из гороха вызывает большой интерес у исследователей и производителей пищевой продукции. Отсутствие стадии обезжиривания сырья в производстве изолята горохового белка приводит к снижению качества продукта, а также более низкому содержанию белка (80–85 %) по сравнению с животными или растительными аналогами (≥ 90 %). Таким образом, вопрос повышения эффективности использования сырья в технологии извлечения белка из гороха является особо актуальным. Цель исследования – изучить возможность использования стадии обезжиривания сырья в технологии получения изолята горохового белка и выбрать наиболее эффективный растворитель на основе оценки влияния данной операции на качество получаемого высокобелкового продукта.

Образцы белкового изолята из гороховой муки получали методом щелочной экстракции с изoeлектрическим осаждением. Для обезжиривания гороховой муки использовали н-гексан, ацетон и этанол. Химический состав, белизну, растворимость, аминокислотный состав и ИК-спектры белков исследуемых образцов изучали с помощью стандартных физико-химических методов анализа.

Установлено влияние используемого растворителя на стадии обезжиривания сырья на свойства образцов гороховой муки и белкового изолята. Удаление жира позволило увеличить белизну гороховой муки и улучшить цвет готового продукта. Содержание белка в образцах белкового изолята из обезжиренной гороховой муки составило 84,7 % – при использовании н-гексана, 88,0 % – ацетона, 89,6 % – этанола. Аминокислотный анализ показал высокое содержание незаменимых аминокислот. Изучена растворимость белка в воде. Исследование ИК-спектров не выявило изменения структуры белков. Комплексный показатель качества обезжиривания позволил определить, что наиболее подходящим растворителем является ацетон, который способствует получению продукта с улучшенными характеристиками и высоким выходом белка.

Экспериментально доказана принципиальная возможность повышения содержания белка в белковом изоляте и улучшения цвета продукта за счет экстракции жира из гороховой муки. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения технологии белкового изолята из гороха, а также других белковых продуктов из сырья животного или растительного происхождения.

Ключевые слова. Растительное сырье, горох, гороховая мука, белковый продукт, изолят белка, обезжиривание, совершенствование технологии, аминокислотный состав, качество продукта

Для цитирования: Глухарев А. Ю., Кучина Ю. А., Деркач С. Р., Князева А. С., Утьянов Д. А. Изоляты белка из обезжиренной гороховой муки: получение и оценка качества. Техника и технология пищевых производств. 2026. Т. 56. № 2. С. 277–295. <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2636>

Protein Isolates from Defatted Pea Flour: Production and Quality Assessment



Andrei Yu. Glukharev^{1,*}, Yuliya A. Kuchina¹,
Svetlana R. Derkach¹, Alexandra S. Knyazeva²,
Dmitry A. Utyanov²

¹ Murmansk Arctic University^{ROR}, Murmansk, Russia

² V. M. Gorbatov Federal Research Center for Food Systems of RAS^{ROR}, Moscow, Russia

Received: 15.10.2025

Revised: 25.11.2025

Accepted: 10.03.2026

*e-mail: glukharevayu@yandex.ru

© A. Yu. Glukharev, Yu. A. Kuchina, S. R. Derkach, A. S. Knyazeva,
D. A. Utyanov, 2026



Abstract.

Advances in pea protein isolate technology are driving interest across research and industrial food sectors. Without defatting stage, pea protein isolate tends to demonstrate lower quality and protein content (80–85%), compared to animal or vegetable analogues (≥ 90%). This article introduces an improved pea protein isolate technology with increased protein mass fraction.

Protein isolate samples were obtained from pea flour by alkaline extraction with isoelectric deposition. N-hexane, acetone, and ethanol served as defatters. The chemical composition, whiteness, solubility, amino acid composition, and IR spectra of proteins were studied using standard physicochemical methods.

The solvent used at the defatting stage proved to affect the properties of protein isolate and protein flour. The defatted flour was whiter, and the color of the finished product was better. The protein content in the defatted protein isolate was 84.7% when using n-hexane, 88.0% for acetone, and 89.6% for ethanol. The protein was rich in essential amino acids; the water solubility improved. The IR spectra revealed no structural changes. Acetone proved to be the most suitable solvent, yielding a protein-rich product with improved characteristics.

Defatting significantly increased protein yield and improved the color profile of protein isolate. These insights are applicable for optimizing the processing of both plant and animal-derived proteins.

Keywords. Vegetable raw material, peas, pea flour, protein product, protein isolate, defatting, technology improvement, amino acid composition, product quality

For citation: Glukharev AY, Kuchina YuA, Derkach SR, Knyazeva AS, Utyanov DA. Protein Isolates from Defatted Pea Flour: Production and Quality Assessment. 2026;56(2):277–295. (In Russ.) <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2026-2-2636>

Введение

Современные тенденции в области производства продуктов питания направлены на глубокую переработку сырья с целью максимального извлечения из него ценных пищевых и биологически активных веществ – получения продуктов с высокой добавленной стоимостью, в т. ч. белков [1, 2]. Белки – основные вещества, необходимые для поддержания здоровья и оптимальной работоспособности. Они выполняют важную роль в питании и участвуют в широком спектре метаболических процессов [3]. Удовлетворение физиологической потребности в белке является ключевым фактором в обеспечении полноценного питания человека [4, 5].

Согласно прогнозам, к 2050 г. численность населения мира достигнет 9,8 млрд человек, а спрос на безопасные и питательные продукты питания возрастет на 70 %. В связи с этим в настоящее время все больше

научных исследований посвящено поиску и изучению альтернативных и устойчивых источников пищевого белка [6]. Оценка перспектив использования таких источников способствует снижению негативного воздействия мирового производства мяса на окружающую среду [7–9]. Среди альтернативных источников особое место занимают продукты на растительной основе. Растительное сырье обладает особыми преимуществами для получения белка: оно значительно дешевле животного, более доступно и требует меньших затрат для производства, хранения и транспортировки [10–12].

За последние несколько лет рынок растительных продуктов стремительно растет, и, согласно прогнозам, к 2030 г. его мировой объем достигнет 161 млрд долларов¹ [12]. Возросший интерес к растительным продуктам

¹ Plant-based food market value worldwide 2030. Statista. 2024. URL: <https://www.statista.com/statistics/1280394/global-plant-based-food-market-value> (дата обращения: 09.09.2025).

богатым белком обусловлен общемировым трендом, направленным на смещение диетических привычек в сторону растительного рациона в связи с этическим выбором (веганство, вегетарианство и флекситарианство) или ограничениями в питании из-за проблем со здоровьем (пищевые аллергии). В этой связи производство белковых препаратов из растительного сырья и продуктов на их основе имеет важное экономическое значение и представляет собой актуальную задачу как для исследователей, так и для производителей пищевой продукции.

Белковые препараты, в частности изоляты белка, относятся к одним из наиболее востребованных продуктов на мировом и отечественном рынках пищевых ингредиентов. Изоляты – высокоочищенная форма белкового продукта, содержащая не менее 85–90 % белка и хорошо усваиваемая организмом. Изоляты имеют вид сухого тонкоизмельченного порошкообразного продукта однородной консистенции с цветом и запахом, свойственным используемому сырью, либо обладают нейтральными органолептическими характеристиками [5, 13].

На сегодняшний день мировое промышленное производство белковых препаратов практически полностью базируется на переработке сои [14, 15]. Вместе с тем пристальное внимание уделяется получению белков из других растительных источников, которые отличаются полноценным составом, хорошо перевариваются и усваиваются организмом человека, а также не вызывают аллергических реакций. [12]. Одним из таких перспективных сырьевых источников для создания пищевого белка является горох (*Pisum sativum* L.).

Горох – важная сельскохозяйственная культура, используемая для получения пищевого и кормового сырья. В его состав входят ценные соединения биологической природы, различающиеся по химическому строению и биологической активности. Среди источников растительного белка горох привлекает повышенное внимание на агропродовольственном рынке, поскольку потребители воспринимают продукты на растительной основе как этичные (без тестирования на животных), полезные и экологически чистые [16, 17]. Горох является второй по значимости бобовой культурой, охватывающей более трети (34,2 %) от общей площади посева бобовых [12]. Также горох считается основной зернобобовой культурой в России. По данным Росстата, валовой сбор гороха в России составляет около 2–3 млн т/г². Данная культура не относится к генетически модифицированным растениям и ценится за высокое содержание белка, сложных углеводов, фолиевой кислоты, витаминов, а также минеральных веществ – калия и железа. Среднее содержание белка в высушенном горохе в зависимости от сорта составляет 23–31 %,

липидов – 1,0–2,0 %, углеводов (включая крахмал, пищевые волокна и сахара) – 60–65 %, золы – около 3 % [12, 18].

Гороховый протеин занимает особое положение на рынке белковых препаратов, т. к. не входит в списки приоритетных аллергенных продуктов, считается полезным видом белка для большинства людей [19] и имеет общепризнанный безопасный статус (GRAS) для использования в широком спектре пищевых продуктов³. Согласно ряду исследований, усвояемость горохового белка близка к усвояемости животных белков [20, 21] и выше, чем у многих других растительных продуктов [22–24]. При этом аллергия на горох не относится к широко распространенной, а ее точные масштабы не установлены [25]. Большинство зарегистрированных случаев аллергии встречаются редко и могут возникать в результате перекрестной реакции [26].

В настоящее время производство высокобелковых продуктов из гороха в России развивается слабо. Глубокой переработкой гороха на территории страны занимаются лишь несколько предприятий, включая ООО «Евро технологии» и АО «ОХК Уралхим»⁴ [27]. В то же время существует значительный потенциал для создания таких белковых препаратов и ингредиентов. В основном горох реализуют в торговых сетях в замороженном, высушенном (крупа), измельченном (гороховая мука) и консервированном виде. Внедрение технологии производства горохового белка в пищевую промышленность – действенный способ по замене зарубежных аналогов отечественной продукцией, не уступающей ей в качестве и обладающей более низкой стоимостью.

Актуальность проблемы замещения белков животного происхождения весьма велика, как и значимость развития технологии получения горохового белка, в т. ч. как основы для включения в широкий спектр пищевой продукции [28]. Гороховый протеин способен стать хорошей альтернативой животным белкам, его можно использовать для производства продуктов детского, спортивного и диетического питания, хлебопекарной продукции, а также продуктов на растительной основе, например аналогов мясных, молочных или рыбных продуктов. Кроме того, он применим в животноводстве и аквакультуре [16, 29, 30].

Белки из гороха получают с использованием различных химических и физических методов: щелочная экстракция с изoeлектрическим осаждением [31], ультрафильтрация с диафильтрацией [32, 33], воздушная классификация и трибоэлектрическое разделение, соле-

³ Martin RL, Thomas JA, Soni MG. Evaluation of the Generally Recognized as Safe (GRAS) Status of Pea Protein. U. S. Food and Drug Administration (FDA). 2018. URL: <https://www.fda.gov/files/food/published/GRAS-Notice-GRN-788-Pea-protein-concentrate.pdf> (дата обращения 09.09.2025).

⁴ Первый российский завод по глубокой переработке гороха. Комбикорма. 2019. № 2. С. 32–33. URL: https://kombi-korma.ru/sites/default/files/2/02_19/02_2019_32-33.pdf (дата обращения 09.09.2025).

² Рыбакова Д. Э. Горох. Посевные площади, валовые сборы и урожайность в 2023 году. Экспертно-аналитический центр агробизнеса. 2024. URL: <https://ab-centre.ru/news/goroh-posevnye-ploschadi-valovye-sbory-i-urozhaynost-v-2023-godu> (дата обращения: 09.09.2025).

вая экстракция и мицеллизация, мягкое фракционирование с использованием гибридного подхода и др. [20]. Несмотря на значительное количество исследований, направленных на получение высококонцентрированных белковых продуктов из гороха, до сих пор остается недостаточно изученной проблема отсутствия в технологии обезжиривания сырья – одной из основных технологических операций, используемых в различных областях, включая пищевую промышленность и производство нутрицевтиков, для повышения качества и функциональности продукции. Обезжиривание предполагает применение растворителя для экстракции и удаления липидов (жиров) из богатых белком пищевых источников, что позволяет получить белковый изолят с более высокой чистотой и пониженным содержанием жира.

При промышленном получении горохового белка сырье не проходит стадию обезжиривания в связи с небольшим количеством липидов, в отличие, например от семян сои, содержащих 15–25 % липидов [34, 35]. Тем не менее отсутствие данной операции затрудняет процесс выделения целевого продукта [36], способствует окислению жирорастворимых соединений, которые вносят значительный вклад в образование специфического (бобового) запаха [37], и сокращает срок годности готового продукта [38]. В связи с этим совершенствование технологии получения горохового белка за счет введения дополнительной операции по подготовке сырья, а именно обезжиривания, может стать эффективным решением для увеличения содержания белка в продукте, улучшения его цвета и запаха и продления срока годности. При этом необходимо учитывать влияние обработки на качество готового продукта.

Обезжиривание может проводиться механическим способом – прессованием сырья, а также путем экстракции с использованием органических растворителей, что является наиболее эффективным методом, несмотря на некоторые экологические, экономические и безопасные недостатки. В работе A. Gravel *et al.* [39] установлено, что обезжиривание гороховой муки с использованием гексана не оказало значительного влияния на белковый профиль, но улучшило пенообразующие свойства изолята. L. L'hocine *et al.* [40] продемонстрировали, что обезжиривание соевого шрота с использованием органических растворителей имело денатурирующий эффект на соевый белок по сравнению с водной экстракцией. S. Dirr *et al.* [41] оценили влияние н-гексана на физико-химические свойства растительных белков из семян чиа. Обезжиривание позволило добиться высокого выхода белка, улучшило стабильность пены, влаго- и жиростойкость, однако растворимость при нейтральном pH снизилась [41].

Производители совершенствуют технологии получения белковых препаратов за счет внедрения прогрессивных методов обработки сырья для того, чтобы

создать безопасный продукт с высоким качеством и функциональными свойствами. Таким образом, цель исследования – изучить возможность использования стадии обезжиривания сырья в технологии получения изолята горохового белка и выбрать наиболее эффективный растворитель на основе оценки влияния данной операции на качество получаемого высокобелкового продукта.

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены с использованием коммерческой муки из гороха (ООО «Гарнец», Владимир, Россия), которая отвечает требованиям ТУ 9293-009-89751414-10 «Мука гороховая, нутовая, чечевичная. Технические условия». В качестве объектов исследования на разных этапах работы выступали образцы гороховой муки и белковые изоляты из гороховой муки. Для экстрагентов жиров были выбраны н-гексан, ацетон и этанол как наиболее используемые растворители в пищевой промышленности для производства обезжиренной муки и белковых продуктов в связи с их высокой эффективностью и легкой доступностью⁵ [42].

Внешний вид и микроструктура используемой гороховой муки представлены на рисунке 1. Фотография получена с использованием камеры смартфона (Apple, США) (рис. 1a). Микрофотография сделана с помощью оптического микроскопа Olympus CX43 (Olympus Corporation, Япония) с фотонасадкой при увеличении $\times 4$ (рис. 1b). Мука из желтого гороха (*Pisum sativum* L.) представляла собой тонкоизмельченный порошкообразный продукт однородной консистенции с наличием небольших комочков, от кремово-желтого до светло-желтого цвета с легким запахом и вкусом свежего гороха, без посторонних ароматов и привкусов.

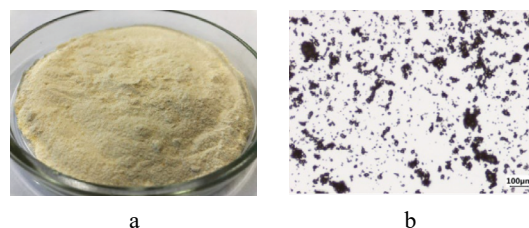


Рисунок 1. Внешний вид и микроструктура гороховой муки: а – фотография; б – микрофотография

Figure 1. Appearance and microstructure of pea flour: a – photograph; b – micrograph

⁵ Решение Совета Евразийской экономической комиссии от 20.07.2012 N 58 (ред. от 29.08.2023) «О принятии технического регламента Таможенного союза "Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств"» (вместе с «ТР ТС 029/2012. Технический регламент Таможенного союза. Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств»). URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_133445/ (дата обращения 09.09.2025).

Гороховая мука до переработки хранилась в сухом, проветриваемом помещении в течение 2–3 месяцев при комнатной температуре 23–25 °С.

Для производства образцов белкового изолята использовали водные растворы гидроксида натрия (NaOH) с концентрацией 2 М и соляной кислоты (HCl) с концентрацией 1 М, приготовленные из химически чистых реактивов, отвечающих требованиям ГОСТ 4328-77 «Натрия гидроокись. Технические условия» и ГОСТ 3118-77 «Реактивы. Кислота соляная. Технические условия».

Для изучения влияния обезжиривания на качественные показатели сырья и белкового изолята была проведена экстракция липидов из гороховой муки с использованием органических растворителей: н-гексан, ацетон и этанол. Технические характеристики выбранных растворителей представлены в таблице 1.

Для получения белкового изолята из гороховой муки использовали метод щелочной экстракции с электрохимическим осаждением [43]. На рисунке 2 изображена усовершенствованная технологическая схема, иллюстрирующая этапы получения белкового изолята по данному методу. За основу была принята базовая технология производства изолята из аналогичного растительного сырья [44–46], в соответствии с которой получали контрольный образец. Для повышения массовой доли белка в готовом продукте и улучшения качественных показателей дополнительно вводили в технологию новую стадию – обезжиривание гороховой муки с помощью растворителей: н-гексана, ацетона и этанола. Данная технологическая операция выделена сиреневым цветом на схеме. Процесс обезжиривания проводился в аппарате Сокслета путем многократной экстракции муки органическими растворителями в течение 8 ч до исчезновения окрашивания регенерированного растворителя. Обезжиренную гороховую муку высушивали путем естественной сушки при температуре 23–25 °С в течение 12 ч до полного исчезновения запаха растворителя. В качестве образцов сравнения (контроль) использовали необработанную (необезжиренную) гороховую муку и белковый изолят, полученный из нее.

Отбор и подготовку проб для исследований осуществляли согласно ГОСТ 27668-88 «Мука и отруби.

Приемка и методы отбора проб» и ГОСТ 15113.0-77 «Концентраты пищевые. Правила приемки, отбор и подготовка проб».

Химический состав объектов исследования, который включал массовые доли воды, жира, белка и золы на сырую массу анализировали по методикам, признанными стандартными. Массовую долю влаги определяли с использованием метода высушивания образца в сушильном шкафу до постоянной массы согласно ГОСТ 9404-88 «Мука и отруби. Метод определения влажности» и ГОСТ 15113.4-2021 «Концентраты пищевые. Гравиметрические методы определения массовой доли влаги». Массовую долю жира устанавливали методом экстракции образца диэтиловым эфиром (х. ч.) в аппарате Сокслета по ГОСТ 29033-91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения жира» и ГОСТ 15113.9-77 «Концентраты пищевые. Методы определения жира». Массовую долю общего азота выявляли методом Кьельдаля по ГОСТ 10846-91 «Зерно и продукты его переработки. Метод определения белка». Для расчета массовой доли белка использовали коэффициент пересчета общего азота на белок для семян бобовых культур и продуктов их переработки – 6,25. Массовую долю золы находили гравиметрическим методом после сжигания навески образца в муфельной печи LOIP LF-7/11-G1 до получения светло-серого остатка по ГОСТ Р 51411-99 «Зерно и продукты его переработки. Определение зольности (общей золы)» и ГОСТ 15113.8-77 «Концентраты пищевые. Методы определения золы».

Массовую долю углеводов, %, вычисляли расчетным методом по формуле (1):

$$U = 100 - (B + \beta + \mathcal{J} + 3) \quad (1)$$

где B , β , $\mathcal{J}$, 3 – массовые доли воды, белка, жира и золы в продукте соответственно, %.

Эффективность обезжиривания (ЭО, %) рассчитывали по формуле (2):

$$\text{ЭО} = \frac{M_1 \times \mathcal{J}_1 - M_2 \times \mathcal{J}_2}{M_1 \times \mathcal{J}_1} \times 100 \quad (2)$$

где M_1 , M_2 – масса гороховой муки до и после обезжиривания соответственно, $\mathcal{J}_1$ и $\mathcal{J}_2$ – массовая доля жира в гороховой муке до и после обезжиривания, %.

Таблица 1. Технические характеристики органических растворителей, используемых для обезжиривания гороховой муки

Table 1. Technical characteristics of organic solvents used as defatters

Растворитель	Степень чистоты	Массовая доля основного химического вещества, %	ГОСТ / ТУ
н-гексан	Химический чистый	99,0	ТУ 2631-158-44493179-13 «Гексан. Технические условия» (ЗАО «ЭКОС-1», Россия)
Ацетон	Чистый для анализа	99,8	ГОСТ 2603-79 «Реактивы. Ацетон. Технические условия»
Этиловый спирт (этанол)	Технический	95,0	ГОСТ 17299-78 «Спирт этиловый технический. Технические условия»

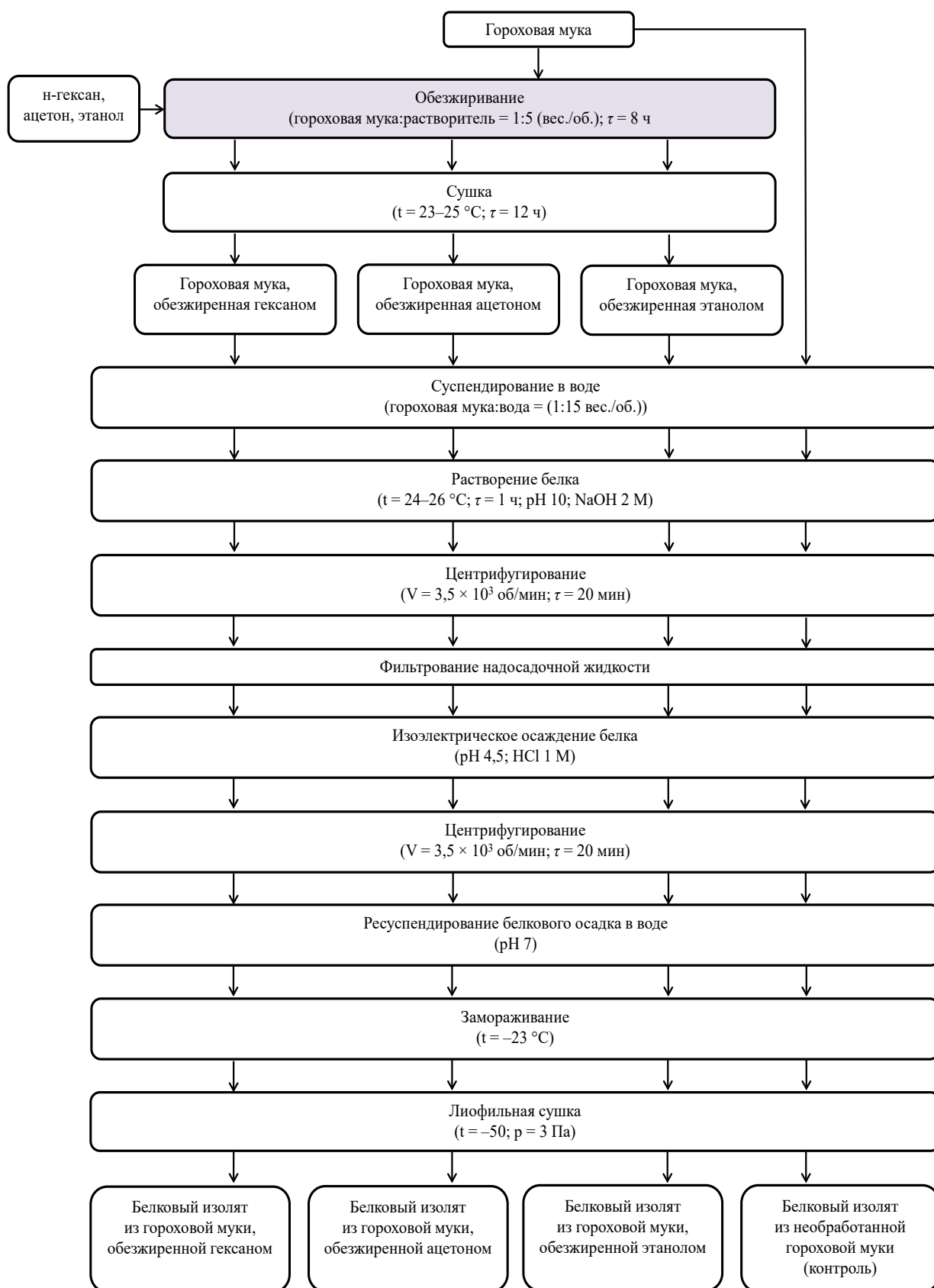


Рисунок 2. Получение образцов белкового изолята с использованием метода щелочной экстракции с осаждением в изоэлектрической точке

Figure 2. Obtaining protein isolate samples by alkaline extraction with isoelectric precipitation

Выход продукта (ВП, %) рассчитывали по формуле (3):

$$ВП = \frac{m}{M} \times 100 \quad (3)$$

где m – масса белкового изолята, г; M – масса гороховой муки, г.

Выход белка (ВБ, %) выявляли по формуле (4):

$$ВБ = \frac{m \times B_1}{M \times B_2} \times 100 \quad (4)$$

где m – масса белкового изолята, г; B_1 – массовая доля белка в белковом изоляте, %; M – масса гороховой муки, г; B_2 – массовая доля белка в гороховой муке, %.

Растворимость образцов белкового изолята в воде находили гравиметрическим методом по ГОСТ 7636-85 «Рыба, морские млекопитающие, морские беспозвоночные и продукты их переработки. Методы анализа», основанным на весовом определении нерастворимой части белка в воде.

Фотофиксацию образцов гороховой муки и белкового изолята осуществляли с использованием камеры смартфона (Apple, США). Образцы в чашках Петри помещали на лист фильтровальной бумаги, фотосъемку производили под прямым углом к плоскости фотографируемого объекта с использованием искусственного освещения (холодный белый свет). Расстояние от камеры до объекта 10–15 см.

Белизну образцов гороховой муки определяли с помощью прибора КЕТТ С-100 (KETT Electric Laboratory, Япония) в соответствии с методикой, приведенной в руководстве по эксплуатации прибора.

Количественный аминокислотный анализ белков образцов гороховой муки и белкового изолята проводили методом ВЭЖХ-УФ. В данном методе применяли хроматографическое разделение аминокислот, подвергнутых дериватизации с использованием ортофталевого альдегида (ОРА) в присутствии ФМОС-реагента, и определение его количества детектированием в ультрафиолетовом спектре. Использовали жидкостный хроматограф Agilent 1260 Infinity II с диодно-матричным детектором (Agilent Technologies, США), колонка Agilent Eclipse Plus C18 (3,5 мкм, 4,6×150 мм). Градиентное разделение осуществляли с использованием подвижных фаз А (ацетонитрил:метанол:вода 45:45:10) и Б (10 мМ Na₂HPO₄, 10 мМ Na₂B₄O₇, pH 8,2); скорость потока элюента 1 мл/мин, температура колонки 30 °С. Длины волн для детектирования – 338 и 262 нм. Для калибровки прибора задействовали стандартную смесь аминокислот Supelco (Merck KGaA, Германия). Перед анализом исследуемые образцы высушивали при 100 °С и обезжиривали хлороформом. Гидролиз образцов осуществляли в кислой среде (6 М HCl) в течение 24 ч при температуре 120 °С. После гидролиза пробирки охлаждажали, содержимое упаривали в ротаторном испарителе. Сухой остаток растворяли в 1 мл буферного раствора (pH 2,2). Раствор пропускали через шприцевой фильтр

с диаметром пор 0,45 мкм в хроматографическую вials объемом 2 мл и применяли для анализа.

Для идентификации полученных образцов белкового изолята задействовали метод ИК-спектроскопии. Спектры поглощения записывали на инфракрасном спектрофотометре с Фурье-преобразованием IRT-racer-100 (Shimadzu, Япония) в диапазоне частот от 4000 до 600 см⁻¹, при разрешении 4 см⁻¹ (число сканирований – 250). Предварительно исследуемые образцы измельчали на планетарной микромельнице Pulverisette 7 (FRITSCH GMBH, Германия) в течение 30 мин при 500 об/мин, смешивали с КВг в соотношении 1:75 по массе и выдерживали в сушильном шкафу при температуре 60 ± 1 °С в течение 6–8 ч для удаления остатков влаги. Затем смесь прессовали под давлением 650 кгс/см² 1 мин при комнатной температуре. ИК-спектры снимали сразу после прессования. Для того чтобы свести к минимуму влияние следов влаги (паров воды), из полученных спектров вычитали спектр водяного пара.

ИК-спектр в области поглощения полосы Амид I (1600–1700 см⁻¹) был обработан с использованием графической программы OriginPro 9.0. Анализ вторичной структуры белковых макромолекул проводили методом второй производной. Для получения количественной информации полосу Амид I раскладывали на несколько компонент с помощью распределения Гаусса. Количественный вклад каждой конформации (компоненты) вторичной структуры вычисляли как соотношение интегральной интенсивности соответствующей полосы к общей интегральной интенсивности полосы Амид I до разложения.

Комплексный показатель качества обезжиривания (КПК, %) рассчитывали по формуле (5):

$$\begin{aligned} \text{КПК} = & 0,2 \times \text{ЭО} + 0,1 \times \frac{БМ \times 100}{87,3} + 0,2 \times \frac{СБ \times 100}{(100 - СБ)} + \\ & + 0,2 \times \text{ВП} + 0,2 \times \text{ВБ} + 0,1 \times P \end{aligned} \quad (5)$$

где ЭО – эффективность обезжиривания гороховой муки, %; БМ – белизна образцов гороховой муки, усл. ед. прибора; 87,3 – эталонное значение показателя белизны, усл. ед. прибора; СБ, СВ – массовая доля белка и воды в белковом изоляте, %; ВП – выход продукта, %; ВБ – выход белка, %; P – растворимость продукта в воде, %; 0,1 и 0,2 – коэффициенты значимости параметров обезжиривания, определенные экспертным методом.

Экспериментальные работы в рамках исследования выполнены на базе научно-исследовательской лаборатории «Химия и технология морских биоресурсов» Мурманского арктического университета (Мурманск, Россия). Аминокислотный состав белков гороховой муки и образцов белкового изолята определяли в лаборатории научно-методических работ, биологических и аналитических исследований Научно-

исследовательского испытательного центра ФГБНУ «ФНЦ пищевых систем им. В. М. Горбатова» РАН (Москва, Россия). ИК-спектры образцов белкового изолята получены в лаборатории химико-аналитических исследований Полярного филиала ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» (Мурманск, Россия).

Все эксперименты выполняли в трехкратной повторности. Полученные результаты выражали в виде среднего арифметического значения $\pm$ стандартное отклонение. Доверительная вероятность (P) была установлена на уровне не менее 0,95. Для статистической обработки экспериментальных данных использовали однофакторный дисперсионный анализ (ANOVA). Различия между средними значениями считались статистически значимыми при α -уровне не более 0,05 ($\alpha = 1 - P$). Статистический анализ проводили с использованием программы Microsoft Office Excel 2021.

Результаты и их обсуждение

Обезжиривание сырья играет важную роль в получении высокобелковых ингредиентов, таких как изоляты, и может повлиять на физико-химические и функционально-технологические показатели, а также внешний вид получаемого продукта. Чтобы комплексно оценить влияние используемых растворителей на качественные характеристики белкового изолята, исследования проводили в два этапа.

Первый этап характеризовался изучением влияния обезжиривания гороховой муки на ее химический состав, внешний вид и белизну. Второй этап включал изучение химического состава образцов белкового изолята, определение выхода продукта и белка, оценку внешнего вида и цвета, анализ аминокислотного состава белков и ИК-спектров.

При изготовлении белкового изолята требуется знание общего молекулярного химического состава сырья, т. к. содержание отдельных групп веществ оказывает влияние не только на пищевую ценность

готового продукта, но и обуславливает выбор технологических режимов его изготовления.

В таблице 2 представлен химический состав исследуемых образцов гороховой муки и эффективность их обезжиривания в зависимости от используемых растворителей. Анализ данных показывает, что исходное сырье можно охарактеризовать главным образом как высокоуглеводное (65,9 %), со значительным содержанием белка (22,2 %) и низким уровнем жира (1,3 %). Такой химический состав подтверждает целесообразность использования гороховой муки для получения высокоценных белковых продуктов, а также крахмала, сахаров и клетчатки. Предварительная обработка сырья продемонстрировала высокую эффективность: обезжиривание позволяет удалить липидорастворимые соединения из муки и на 1,7–2,2 % увеличить содержание белка в ней. Методы на основе обезжиривания широко используются в пищевой промышленности для извлечения растительных масел из семян и муки. В работах других авторов органические растворители, такие как гексан [41], этанол и изопропанол [47], также показали высокую степень интенсивности при экстракции фракций масел из растительного сырья, используемого для производства белковых продуктов.

Известно, что групповой состав липидов нативного зерна гороха включает в себя полярные липиды и фосфолипиды (39,7 %), триацилглицериды (46,2 %), свободные жирные кислоты (11,6 %), стерин и эфиры стерина (2,5 %) [48]. Наблюдаемые отличия в остаточном содержании жира в обработанной гороховой муке могут объясняться различной полярностью и температурой кипения используемых растворителей. Чем ниже температура кипения растворителя, тем больше циклов за единицу времени он может совершить в экстракционном аппарате. Наиболее эффективным растворителем в данном эксперименте оказался ацетон, который имеет низкую температуру кипения и сочетает свойства полярного и неполярного растворителя, что делает его более универсальным для растворения жиров.

Таблица 2. Химический состав и эффективность обезжиривания образцов гороховой муки

Table 2. Chemical composition and effectiveness of degreasing of pea flour defatting

Показатель	Растворитель			
	Контроль (без обработки)	н-гексан	Ацетон	Этанол
воды	8,32 $\pm$ 0,05	4,40 $\pm$ 0,04	4,61 $\pm$ 0,01	6,78 $\pm$ 0,01
белка	22,15 $\pm$ 1,32	23,84 $\pm$ 0,06	24,22 $\pm$ 0,21	24,35 $\pm$ 0,92
жира	1,32 $\pm$ 0,06	0,21 $\pm$ 0,01	0,03 $\pm$ 0,01	0,19 $\pm$ 0,02
зола	2,41 $\pm$ 0,02	2,47 $\pm$ 0,01	2,39 $\pm$ 0,03	2,19 $\pm$ 0,01
углеводов	65,80 $\pm$ 1,43	69,08 $\pm$ 0,07	68,75 $\pm$ 0,23	66,49 $\pm$ 0,92
Эффективность обезжиривания, %	–	85,42 $\pm$ 0,29	97,61 $\pm$ 0,06	86,09 $\pm$ 0,05

Примечание: данные представлены в виде среднего арифметического значения $\pm$ стандартное отклонение для группы $n = 3$ при доверительной вероятности $P \geq 0,95$. Средние значения в строках имеют значимые различия при уровне значимости $\alpha < 0,05$.

Note: The data are arithmetic means $\pm$ standard deviation ($n = 3$; $P \geq 0.95$). The mean values in the rows are significantly different at $\alpha < 0.05$.

Внешний вид пищевых продуктов, определяемый веществами, как входящими в состав сырья и ингредиентов, так и образующимися в процессе их производства и хранения, является одним из основных факторов, влияющих на визуальную оценку качества товара потребителями [49]. Цветовые качества гороха обусловлены тремя классами соединений: ксантофиллами – кислородсодержащими каротиноидами, хлорофиллами и их производными, а также углеводородными каротиноидами [50]. Изменение цвета позволяет проанализировать влияние на продукт различных факторов, в т. ч. обезжиривания.

На рисунке 3 представлен внешний вид гороховой муки до и после обезжиривания. Гороховая мука до обезжиривания обладает светло-желтым цветом, что обусловлено высоким содержанием каротиноидов, остающихся после созревания и переработки гороха, когда хлорофилл разрушается [51, 52]. По своей природе эти пигменты относятся к группе липидов и эффективно растворяются в органических растворителях. Обезжиривание приводит к удалению из сырья каротиноидных пигментов и, как следствие, к обесцвечиванию муки. Так, образец гороховой муки, обезжиренный н-гексаном, приобрел светло-бежевый цвет, а после обработки ацетоном и этанолом – белый. Визуальная оценка цвета муки позволила определить степень извлечения каротиноидов в зависимости от используемого растворителя. В работах [53, 54] показано, что в горохе присутствуют высокие количества лютеина (в среднем 14,6 мкг/г) – желтого пигмента, относящегося к группе гидроксилированных каротиноидов – ксантофиллов. Лютеин содержит гидроксильные группы и обладает полярностью, поэтому хорошо растворим в этаноле и ацетоне, что обеспечивает получение муки с белым цветом. Таким образом, обезжиривание гороховой муки улучшает ее цвет благодаря экстракции природных пигментов. Стоит также отметить, что за счет отделения жирорастворимых вкусовых и ароматических веществ снижается бобовый аромат муки, что может положительно повлиять на органолептические показатели готового продукта.

Инструментальные методы по сравнению с визуальной оценкой цвета позволяют достоверно и с высокой точностью проанализировать изменение оптических свойств муки после обезжиривания, а также количественно выразить полученный результат независимо от физического состояния дегустатора. С этой целью использовали прибор для определения показателя белизны. На рисунке 4 представлено изменение белизны образцов муки в зависимости от используемых растворителей. Показатель белизны муки при обезжиривании увеличивается на 2,5 усл. ед. прибора при использовании н-гексана, на 4,2 усл. ед. прибора – ацетона и на 5,1 усл. ед. прибора – этанола. Полученные результаты согласуются с визуальной оценкой, которая показала, что использование ацетона и этанола приводит к улучшению цвета гороховой муки, а именно

к ее обесцвечиванию (рис. 2). Аналогичные наблюдения были опубликованы в работах [41, 55], авторы которых отмечают, что цветовые характеристики белкового сырья и продуктов изменяются после обезжиривания в сторону увеличения показателя светлоты.

Одним из широко применяемых способов получения белкового изолята является метод щелочной экстракции с последующим изоэлектрическим осаждением белковых веществ. Данный способ позволяет добиться высокого выхода продукта и обеспечивает хорошую степень очистки белка от сопутствующих

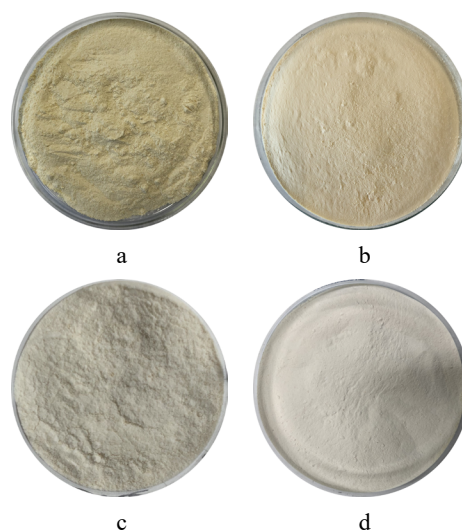


Рисунок 3. Внешний вид образцов гороховой муки: а – до обезжиривания; б – после обезжиривания н-гексаном; с – после обезжиривания ацетоном; d – после обезжиривания этанолом

Figure 3. Pea flour samples: a – before defatting; b – after defatting n-hexane; c – after defatting acetone; and d – after defatting ethanol

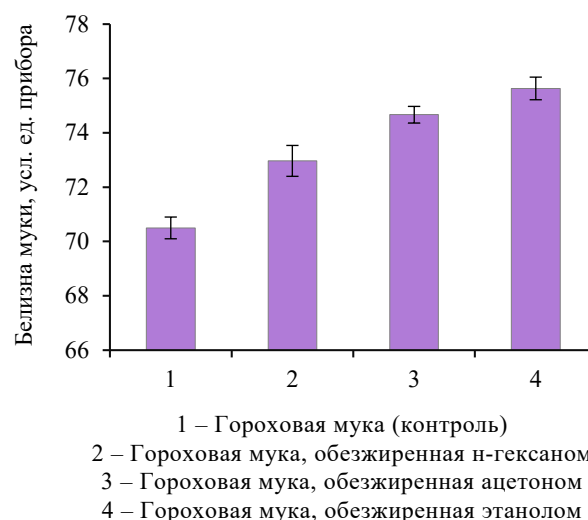


Рисунок 4. Показатель белизны образцов гороховой муки

Figure 4. Whiteness index of pea flour samples

веществ за счет его экстракции и концентрирования водными растворами различной ионной силы. В его основе лежит принцип, различной растворимости белковых веществ, которая максимальна в щелочной среде ($\text{pH} > 7$) и минимальна вблизи изоэлектрической точки [5, 12]. В лабораторных условиях были смоделированы процессы производства белкового изолята из полученных образцов гороховой муки указанным способом.

В настоящее время в России отсутствует отдельный государственный стандарт, устанавливающий технические требования к качеству растительных белковых изолятов, в т. ч. из гороха. Качество таких продуктов регулируется отдельными ТУ, которые разрабатываются производителями. Коммерческие образцы изолятов горохового белка обычно имеют массовую долю белка 80–85 %, что, согласно классификации Министерства сельского хозяйства США (USDA), а также ГОСТ 34006-2016, соответствует белковому концентрату (при содержании белка менее 90 %). Это создает определенные трудности при идентификации данного вида продукта, поэтому повышение содержания белка в нем является важной технологической задачей.

Степень очистки фракций растительных белков от сопутствующих веществ (жиров, углеводов и др.) выступает важным показателем при контроле качества получаемых изолятов, что подтверждается изучением химического состава продукта. Химический состав образцов белкового изолята, полученных из необезжиренной и обезжиренной муки, представлен в таблице 3. Удаление жира из муки с помощью растворителей и последующее ее использование в производстве белкового изолята привело к увеличению содержания белка в продукте: на 3,9 % при использовании н-гексана, на 8,0 % – ацетона и на 8,8 % – этанола. Содержание жира в образцах белкового изолята напрямую зависит от его количества в сырье, а также от условий получения изолятов. Так, в образцах белкового изолята, полученных из обезжиренной муки, концентрация остаточного жира была низкой (0,2 %) по сравнению

с контрольным образцом белкового изолята (5,8 %). Различное содержание углеводов между образцами свидетельствует о том, что удаление углеводных соединений в процессе получения продукта происходит эффективнее из обезжиренной муки, что положительно сказывается на чистоте белка. Следует также отметить, что технологические условия получения белкового изолята приводят к образованию солей, являющихся компонентом золы: после щелочного растворения белка (при $\text{pH} 10$) pH раствора доводили до значений, необходимых для осаждения белковых веществ ($\text{pH} 4,5$), при этом в процессе нейтрализации раствора происходит выделение хлорида натрия. Увеличение содержания золы в образцах из обезжиренной муки на 1–2 %, вероятно, связано с буферными свойствами белковых веществ и, как следствие, необходимостью добавления в суспензию большего количества раствора гидроксида натрия для растворения белка. Аналогичные результаты получены A. Gravel *et al.* [39]. Таким образом, использование стадии обезжиривания в технологии получения белкового изолята повышает степень извлечения белка из гороховой муки, что может быть полезно с точки зрения совершенствования технологии и улучшения качественных характеристик продукта.

Выход продукта и белка – ключевые показатели эффективности технологического процесса, играющие важную роль при обосновании использования новых производственных операций. Под выходом продукта понимается отношение массы полученного изолята горохового белка к массе использованной гороховой муки. Под выходом белка – количество извлеченного из гороховой муки целевого компонента (белка) в изоляте по отношению к общему количеству белка, присутствовавшему в исходном сырье. Выход белка обычно служит мерой оценки степени извлечения белка из сырья в процессе экстракции. Указанные показатели рассчитывали по формулам (3) и (4).

Изменение выхода продукта и белка в зависимости от используемого растворителя на стадии обезжиривания сырья представлено на рисунке 5. Установлено,

Таблица 3. Химический состав образцов белкового изолята из гороховой муки, обезжиренной различными растворителями

Table 3. Chemical composition of protein isolate samples from pea flour, skimmed with various solvents

Массовая доля, %	Растворитель			
	Контроль (без обработки)	н-гексан	Ацетон	Этанол
воды	$4,00 \pm 0,34$	$6,72 \pm 0,06$	$5,15 \pm 0,05$	$5,18 \pm 0,03$
белка	$80,79 \pm 1,08$	$84,65 \pm 0,45$	$88,01 \pm 0,14$	$89,59 \pm 0,13$
жира	$5,75 \pm 0,14$	$0,21 \pm 0,01$	$0,19 \pm 0,02$	$0,23 \pm 0,05$
золы	$2,99 \pm 0,14$	$4,02 \pm 0,03$	$4,16 \pm 0,01$	$4,89 \pm 0,09$
углеводов	$6,47 \pm 1,19$	$4,41 \pm 0,45$	$2,49 \pm 0,21$	$0,12 \pm 0,03$

Примечание: данные представлены в виде среднего арифметического значения $\pm$ стандартное отклонение для группы $n = 3$ при доверительной вероятности $P \geq 0,95$. Средние значения в строках имеют значимые различия при уровне значимости $\alpha < 0,05$.

Note: The data are arithmetic means $\pm$ standard deviation ($n = 3$; $P \geq 0.95$). The mean values in the rows are significantly different at $\alpha < 0.05$.

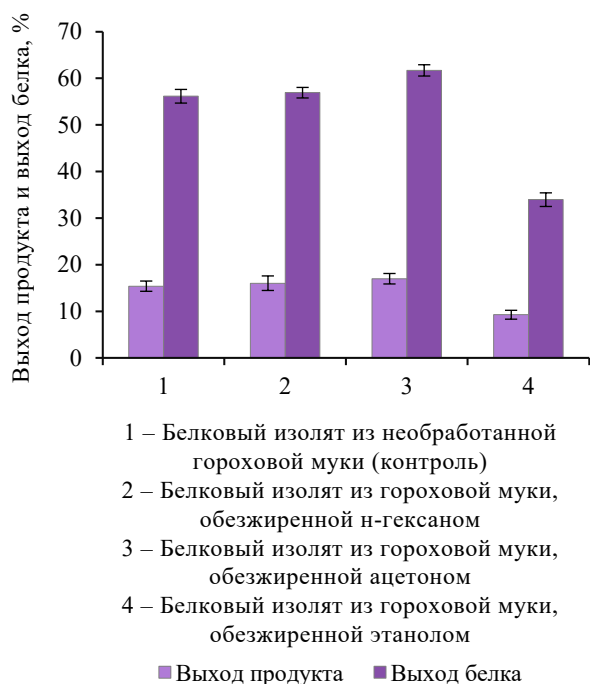


Рисунок 5. Выход продукта и белка в зависимости от растворителя, использованного для обезжиривания гороховой муки

Figure 5. Product yield and protein yield for different solvents

что обезжиривание гороховой муки влияет на эти показатели. Наблюдается увеличение выхода продукта: на 0,6 % при использовании муки, обезжиренной н-гексаном, и на 1,6 % – муки, обезжиренной ацетоном. Выход белка, в свою очередь, увеличился на 0,8 % при использовании муки, обезжиренной н-гексаном, и на 5,6 % – муки, обезжиренной ацетоном. При использовании этанола в качестве растворителя отмечается снижение выхода продукта на 6,1 % и выхода белка на 22,2 %. По-видимому, это связано с тем, что этанол имеет низкую диэлектрическую проницаемость, что может легко нарушить нековалентные взаимодействия в белке и вызвать его необратимую денатурацию, а также способствовать агрегации белковых частиц, которые теряются в процессе обработки [56]. При этом концентрация этанола играет решающую роль в данном процессе [57, 58]. Полученные результаты показывают, что использование этанола на стадии обезжиривания сырья не позволяет получить белковый изолят с высокими показателями выхода продукта и выхода белка. Для получения изолята горохового белка целесообразно использовать в качестве растворителей н-гексан или ацетон.

На рисунке 6 показан внешний вид образцов белкового изолята в зависимости от используемых растворителей на стадии обезжиривания сырья. Образцы представляли собой сухой порошкообразный продукт с однородной консистенцией, содержащий еди-

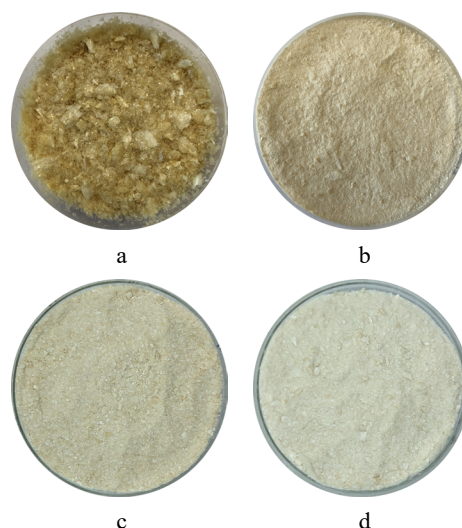


Рисунок 6. Внешний вид образцов белкового изолята в зависимости от используемого растворителя на стадии обезжиривания гороховой муки: а – контроль; б – н-гексан; с – ацетон; д – этанол

Figure 6. Appearance of protein isolate samples from different solvents: a – control; b – n-hexane; c – acetone; and d – ethanol

ничные или отдельные агломерированные частицы и комочки, рассыпающиеся при легком надавливании. Цвет продукта изменялся от желтого до светло-бежевого, что соответствовало цвету сырья, используемого при производстве (рис. 3). Продукт обладал запахом, свойственным гороховой муке с легким бобовым ароматом. Интенсивность горохового запаха была снижена у образцов белкового изолята, полученных из обезжиренной муки. В работе [58] промывка концентрата горохового белка водно-спиртовыми растворами позволила удалить из него летучие соединения, способствующие появлению неприятного привкуса.

Аминокислотный состав сырья и образцов белкового изолята, полученных из гороховой муки, обезжиренной с использованием различных растворителей, представлен в таблице 4. Аминокислотный профиль гороховой муки включает широкий спектр незаменимых и заменимых аминокислот. В белках гороха преобладает содержание таких незаменимых аминокислот, как изолейцин, лейцин, лизин, метионин, треонин и фенилаланин. Аминокислотный профиль горохового белка аналогичен аминокислотному составу других видов бобовых, за исключением некоторых незначительных изменений в нескольких аминокислотах.

Суммарно доля всех аминокислот в образцах белкового изолята увеличилась по сравнению с исходным сырьем, что обусловлено их концентрированием после удаления сопутствующих веществ. Основными аминокислотами, обнаруженными в белковом изоляте, были глутаминовая и аспарагиновая кислоты, аланин, лейцин и треонин. Результаты экспериментов показали, что включение в технологический процесс стадии обез-

Таблица 4. Аминокислотный состав белков гороховой муки и образцов белкового изолята в зависимости от используемого растворителя на стадии обезжиривания сырья, г/100 г продукта

Table 4. Amino acid composition of pea flour proteins and protein isolate samples from different solvents, g/100 g

Показатель	Контроль		Белковый изолят из гороховой муки, обезжиренной различными растворителями		
	Гороховая мука	Белковый изолят из необработанной гороховой муки	н-гексан	Ацетон	Этанол
Незаменимые аминокислоты					
Валин	0,16 ± 0,02	1,81 ± 0,27	2,13 ± 0,32	2,36 ± 0,35	2,40 ± 0,36
Изолейцин	0,69 ± 0,10	2,82 ± 0,42	3,03 ± 0,45	3,45 ± 0,52	6,13 ± 0,92
Лейцин	0,66 ± 0,10	5,56 ± 0,83	6,43 ± 0,96	7,29 ± 1,09	7,61 ± 1,14
Лизин	0,65 ± 0,10	4,68 ± 0,70	5,37 ± 0,81	10,11 ± 1,52	9,57 ± 1,44
Метионин	0,53 ± 0,08	1,70 ± 0,26	1,69 ± 0,25	1,69 ± 0,25	2,45 ± 0,37
Треонин	0,85 ± 0,13	5,13 ± 0,77	4,86 ± 0,73	3,78 ± 0,57	3,23 ± 0,48
Фенилаланин	0,58 ± 0,09	3,78 ± 0,57	4,20 ± 0,63	4,89 ± 0,73	2,65 ± 0,40
Гистидин	0,34 ± 0,05	2,27 ± 0,34	2,95 ± 0,44	4,09 ± 0,61	2,10 ± 0,31
Сумма незаменимых аминокислот	4,46	27,75	30,66	37,66	36,14
Заменимые аминокислоты					
Аланин	0,43 ± 0,07	7,88 ± 1,18	9,01 ± 1,35	6,88 ± 1,03	5,88 ± 0,88
Аргинин	0,83 ± 0,13	2,19 ± 0,33	2,33 ± 0,35	3,57 ± 0,54	3,51 ± 0,53
Аспарагиновая кислота	0,68 ± 0,10	5,77 ± 0,87	7,15 ± 1,07	9,69 ± 1,45	12,05 ± 1,81
Глицин	0,21 ± 0,03	2,42 ± 0,36	2,91 ± 0,44	3,20 ± 0,48	2,85 ± 0,43
Глутаминовая кислота	13,55 ± 2,03	21,19 ± 3,18	18,32 ± 2,75	12,60 ± 1,89	14,00 ± 2,10
Пролин	0,55 ± 0,08	4,18 ± 0,63	4,70 ± 0,70	5,14 ± 0,77	6,26 ± 0,94
Серин	0,53 ± 0,08	3,71 ± 0,56	4,01 ± 0,60	3,55 ± 0,53	3,48 ± 0,52
Тирозин	0,66 ± 0,10	4,01 ± 0,60	3,51 ± 0,53	3,96 ± 0,59	3,61 ± 0,54
Цистин	0,25 ± 0,04	1,68 ± 0,25	2,05 ± 0,31	1,76 ± 0,26	1,82 ± 0,27
Сумма заменимых аминокислот	17,69	53,03	53,99	50,35	53,46

Примечание: данные представлены в виде среднего арифметического значения ± стандартное отклонение для группы n = 3 при доверительной вероятности $P \geq 0,95$. Средние значения в строках имеют значимые различия при уровне значимости $\alpha < 0,05$.

Note: The data are arithmetic means ± standard deviation (n = 3; $P \geq 0.95$). The mean values in the rows are significantly different at $\alpha < 0.05$.

жирования сырья влияет на аминокислотный профиль конечного продукта. Количество треонина, глутаминовой кислоты и тирозина снизилось во всех образцах, полученных из обезжиренной муки. Наблюдается снижение содержания отдельных аминокислот в белке: фенилаланина и гистидина – в белковом изоляте из гороховой муки, обезжиренной в этаноле, а также аланина и серина – в образцах из гороховой муки, обезжиренной ацетоном и этанолом. По-видимому, это связано с тем, что не все растительные белки, богатые данными аминокислотами, растворяются в щелочном растворе и затем осаждаются на стадии изоэлектрического осаждения после обработки сырья выбранными растворителями [56], что может быть вызвано денатурацией и утратой растворимости белковых молекул, изменяя конечный аминокислотный состав продукта. Напротив, содержание остальных аминокислот в образцах белкового изолята, полученных из обезжиренного сырья,

увеличилось, что положительно сказалось на суммарном количестве незаменимых аминокислот, определяющих пищевую и биологическую ценность белка.

Далее была изучена вторичная структура белков. Для ИК-спектра белка характерно наличие нескольких основных полос поглощения, которые соответствуют колебательным переходам в пептидной цепи. В таблице 5 представлены основные полосы поглощения функциональных групп белковых молекул.

Анализ ИК-Фурье-спектров показал, что изменение условий предварительной подготовки сырья (обезжиривание гороховой муки растворителями) в процессе получения белкового изолята не приводит к смещению пиков. Спектры типичны для белковых веществ и сопоставимы с данными для белковых изолятов из растительного сырья [59, 60].

Обезжиривание сырья в технологии получения белкового изолята с использованием органических

Таблица 5. Основные полосы поглощения функциональных групп белковых молекул

Table 5. Primary absorption bands of functional groups in protein molecules

Полоса	Частота, ν , см^{-1}	Тип
Amid A	3400–3300	валентные колебания атомов N–H связей
Amid B	3000–2900	валентные колебания атомов N–H связей
Amid I	1700–1600	валентные колебания связи C=O – 80 % и валентные колебания C–N
Amid II	1575–1480	деформационные колебания N–H связей – 80 % и валентные колебания C–N
Amid III	1300–1230	валентные колебания C–N

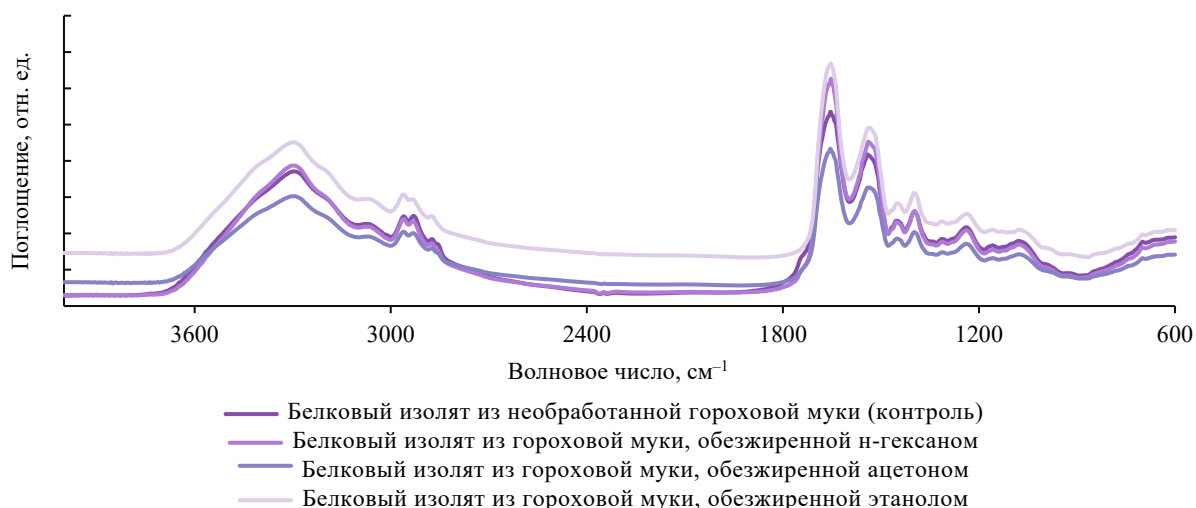


Рисунок 7. ИК-Фурье-спектры поглощения образцов белкового изолята в зависимости от растворителя, использованного для обезжиривания гороховой муки

Figure 7. IR-Fourier absorption spectra of protein isolate samples for different solvents

Таблица 6. Содержание основных компонентов полосы Амид I в образцах белковых изолятов из гороховой муки, обработанной различными растворителями, %

Table 6. Primary components of Amide I band in protein isolates from pea flour treated with various solvents, %

Разложение полосы Амид I		Образец			
Элемент вторичной структуры	ν , см^{-1}	Контроль	н-гексан	Ацетон	Этанол
β -повороты / β -слои	1626–1633	17,4 $\pm$ 0,8	9,1 $\pm$ 0,6	20,1 $\pm$ 1,0	15,4 $\pm$ 0,7
Неупорядоченные структуры (клубок)	1650–1655	57,0 $\pm$ 1,5	60,4 $\pm$ 2,0	56,9 $\pm$ 1,5	56,1 $\pm$ 1,5
α -спираль	1664–1676	18,4 $\pm$ 0,5	22,0 $\pm$ 0,9	18,1 $\pm$ 0,5	20,2 $\pm$ 0,6
β -повороты / β -слои	1685–1687	5,6 $\pm$ 0,2	6,4 $\pm$ 0,3	7,8 $\pm$ 0,3	6,3 $\pm$ 0,3
	1692–1694	1,6 $\pm$ 0,1	2,1 $\pm$ 0,1	2,8 $\pm$ 0,2	2,0 $\pm$ 0,1

Примечание: данные представлены в виде среднего арифметического значения $\pm$ стандартное отклонение для группы $n = 3$ при доверительной вероятности $P \geq 0,95$. Средние значения в строках имеют значимые различия при уровне значимости $\alpha < 0,05$.

Note: The data are arithmetic means $\pm$ standard deviation ($n = 3$; $P \geq 0.95$). The mean values in the rows are significantly different at $\alpha < 0.05$.

растворителей может вызывать изменения во вторичной, третичной и четвертичной структуре белков и их агрегатов. Растворители, как и другие денатурирующие факторы, нарушают слабые связи, стабилизирующие пространственную структуру белка, что приводит к потере его функциональности и возможной агрегации молекул. Межмолекулярные взаимодействия влияют на вторичную структуру белка, изменяя соотношение между различными конформационными состояниями участков молекулы белка: β -поворотами, β -слоями,

неупорядоченными структурами (клубок) и α -спиралями [61]. Известно, что полоса Амид I, соответствующая валентным колебаниям связей C=O полипептидной цепи, наиболее чувствительна к изменениям вторичной структуры.

Для анализа вторичной структуры белка был проведен анализ ИК-спектров методом второй производной в области поглощения полосы Амид I. С целью количественной оценки доли макромолекулярной цепи, находящейся в той или иной конформации, определяли

интегральную интенсивность соответствующих пиков. Для этого полосу Амид I раскладывали с помощью распределения Гаусса. В таблице 6 представлено содержание основных компонентов вторичной структуры белка (полоса Амид I) для образцов белкового изолята.

Анализ данных, представленных в таблице 6, показал, что предварительная обработка гороховой муки органическими растворителями не приводит к изменению вторичной структуры белков. Все образцы характеризуются одинаковым составом: количество неупорядоченных структур в 2,7–3,0 раза больше, чем количество α -спиралей.

Далее изучили влияние физико-химических свойств образцов белкового изолята на функционально-технологические показатели белков. Наиболее распространенным показателем при оценке качества белковых продуктов обычно является растворимость, которая зависит от pH среды, ионной силы, температуры, размера частиц препарата и условий его производства. Использование органических растворителей в процессе обезжиривания сырья позволяет эффективно удалить липиды и тем самым влияет на растворимость белка.

На рисунке 8 представлена растворимость образцов белкового изолята в воде. Полученные результаты показывают, что растворимость белкового продукта увеличилась на 4,3 % при использовании в качестве сырья для производства изолята гороховой муки, обезжиренной н-гексаном, на 4,0 % – гороховой муки, обезжиренной ацетоном, и на 38,0 % при использовании гороховой муки, обезжиренной этанолом. Наблюдаемое повышение растворимости можно объяснить тем, что обработка сырья растворителями удаляет липофильные вещества, образующие с белками комплексы, которые затрудняют гидратацию белка водой. В результате гидрофильные группы белка получают больший доступ к воде, что приводит к лучшему образованию гидратной оболочки вокруг молекул. Примечательно, что растворимость образца белкового изолята, полученного из гороховой муки, обработанной этанолом, является самой высокой в эксперименте (99,1 %). Известно, что гороховые белки главным образом состоят из альбуминов (8,0–21,5 %) и глобулинов (58,6–76,6 %) [28]. Вероятно, высокая растворимость данного белкового изолята в воде обусловлена тем, что он в основном состоит из водорастворимой фракции белков – альбуминов. В то же время большая часть глобулинов была денатурирована этанолом в процессе обезжиривания сырья и в дальнейшем, при получении белкового изолята, удалена при центрифугировании вместе с нерастворимым осадком. Полученные результаты согласуются с данными на рисунке 5, где самый низкий выход белка продемонстрировал образец белкового изолята из гороховой муки, обработанной этанолом.

Растворимость – важная характеристика высокобелковых продуктов, определяющая их дальнейшее применение, поскольку она влияет на другие функциональные свойства, такие как эмульгирующая спо-

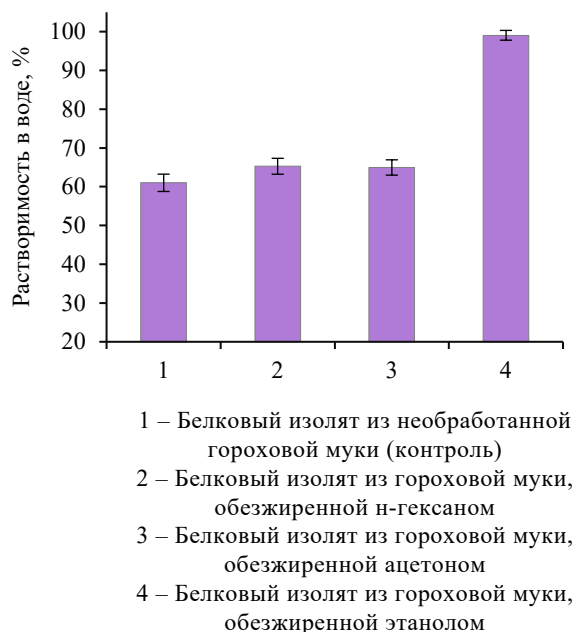


Рисунок 8. Изменение растворимости образцов белкового изолята в воде в зависимости от растворителя, использованного для обезжиривания муки

Figure 8. Water solubility of protein isolates for different solvents

собность, пенообразование и термические свойства. В дальнейшем предполагается продолжить комплексное исследование функционально-технологических свойств белкового изолята из гороховой муки при использовании его в рецептурах пищевых продуктов, например в качестве замены традиционных ингредиентов (яичных белков или мяса).

Завершающий этап исследования заключался в обобщении полученных результатов и определении наиболее эффективного растворителя в технологии получения белкового изолята из гороховой муки, который обеспечит высокую степень обезжиривания сырья, улучшение цвета, а также высокий выход продукта, содержание белка и хорошие функционально-технологические свойства. На рисунке 9 представлено изменение комплексного показателя качества обезжиривания, который представляет собой суммарную оценку эффективности от использования выбранных растворителей в технологии получения белкового изолята. Максимум комплексного показателя качества обезжиривания (67,8 %) наблюдался при применении ацетона. Это объясняется тем, что ацетон показал хорошие результаты при обезжиривании сырья, а его применение в производстве белкового изолята обеспечило высокий выход продукта и выход белка.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что использование в технологии получения изолята горохового белка стадии обезжиривания сырья увеличивает выход и концентрацию белковых веществ в конечном продукте за счет удаления липидов из горо-

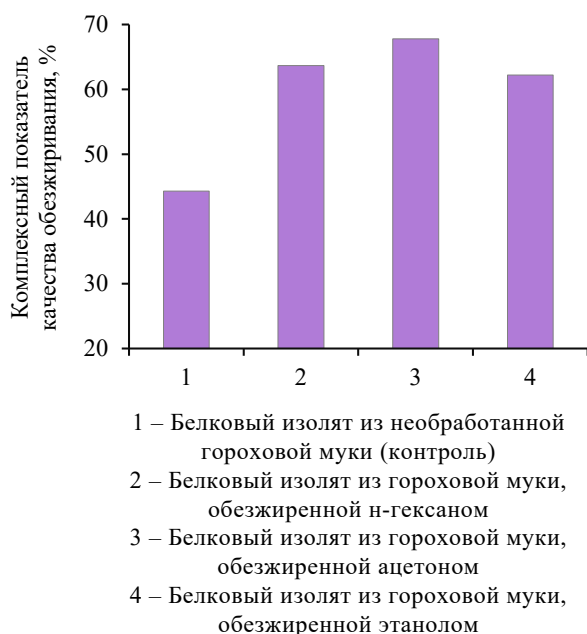


Рисунок 9. Изменение комплексного показателя качества обезжиривания гороховой муки в зависимости от используемого растворителя

Figure 9. Complex defatting quality indicator of pea flour for different solvents

хой муки, а также улучшает цвет, снижает интенсивность бобового аромата, повышает растворимость без существенного влияния на структуру белка. Данные результаты могут быть востребованы на пищевых предприятиях, занимающихся глубокой переработкой зернобобовых культур, для повышения эффективности использования сырья, получения ценных белковых ингредиентов и продуктов. Комплексная переработка гороха позволяет получить пищевые белки с возможностью извлечения целого ряда других сопутствующих продуктов: растительного масла, крахмала, пищевых волокон и др. Совершенствование таких технологий будет способствовать развитию пищевой отечественной отрасли в целом.

Выводы

Горох – перспективное растительное сырье для получения функциональных пищевых ингредиентов и продуктов питания на их основе благодаря высокому содержанию белка, включающего широкий спектр полезных для организма человека аминокислот.

В представленной работе определена возможность совершенствования технологии получения изолята горохового белка за счет обезжиривания сырья н-гексаном, ацетоном и этанолом. Данная обработка обеспечивает высокий уровень пищевой безопасности вследствие предотвращения образования и накопления в белковом изоляте продуктов гидролиза и окисления липидов. В результате проведенных исследований было установлено, что процесс обезжиривания положительно

влияет на физико-химические свойства гороховой муки и белковых изолятов: наблюдается улучшение цвета и повышение белизны, увеличивается содержания белка и незаменимых аминокислот, при этом сохраняется вторичная структура белковых молекул. Использование в технологии получения изолята обезжиренной муки, обработанной н-гексаном и ацетоном, позволяет добиться повышенного выхода продукта и белка. Растворимость продукта в воде вместе с тем увеличивается. Самую высокую растворимость в эксперименте показал образец белкового изолята из гороховой муки, обработанной этанолом. Следует отметить, что идеального растворителя не существует, поэтому необходимо искать компромисс между функциональными свойствами и высоким выходом продукта. Оценка комплексного показателя качества обезжиривания позволила определить, что оптимальным вариантом является применение ацетона для обработки сырья с точки зрения эффективности удаления жиров, обеспечения максимального выхода продукта и белка, а также улучшения цвета.

Результаты исследования носят предварительный характер, однако позволяют предположить, что создание новых видов пищевых продуктов с использованием разработанного белкового изолята позволит обогатить рацион питания человека незаменимыми аминокислотами, необходимыми для роста, восстановления и правильного функционирования организма, что существенно расширит возможности укрепления здоровья людей разных возрастных категорий.

Научная новизна работы заключается в получении пищевой продукта в виде белкового препарата – изолята белка из гороховой муки с высоким содержанием целевого компонента и улучшенными органолептическими показателями – за счет введения в технологию стадии обезжиривания сырья и выбора наиболее эффективного растворителя.

Критерии авторства

А. Ю. Глухарев – обоснование проблемы, определение цели и постановка задач, поиск и анализ литературных источников, проведение экспериментальной работы, анализ и описание полученных данных, подготовка и редактирование статьи. Ю. А. Кучина – проведение ИК-спектроскопии белков и анализ данных, описание результатов, редактирование текста статьи. С. Р. Деркач – научное консультирование, рецензирование и редактирование статьи. А. С. Князева, Д. А. Утянов – анализ аминокислотного состава образцов, описание результатов, редактирование текста статьи. Все авторы одобрили окончательный вариант рукописи и несут равную ответственность за целостность, достоверность материалов и отсутствие плагиата.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования РФ за поддержку научно-исследовательской лаборатории «Химия и технология морских биоресурсов» Мурманского арктического университета, созданной в рамках национального проекта «Наука и университеты» (FENR-2024-0001, соглашение № 075-03-2024-024/1 от 15.02.24).

Contribution

A.Yu. Glukharev set the research goal, wrote the review, conducted the experimental work, analyzed the results, and wrote the manuscript. Yu.A. Kuchina conducted the IR spectroscopy and data analysis, described the results, and proofread the manuscript. S.R. Derkach provided scientific consulting and proofread the article. A.S. Knyazeva and D.A. Utianov analyzed the amino

acid composition, described the results, and proofread the manuscript. All authors approved the final version of the manuscript and share equal responsibility for its integrity, accuracy, and originality.

Conflict of interest

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

Acknowledgments

The authors would like to thank the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation for the support of the Murmansk Arctic University's Chemistry and Technology of Marine Bioresources Research Laboratory, established as part of the national Science and Universities Project (FENR-2024-0001, Agreement No. 075-03-2024-024/1, March 15, 2024).

Список литературы / References

1. Глухарев А. Ю., Бордиян В. В., Кузина Т. Д., Кучина Ю. А., Деркач С. Р. Получение и использование белка из створок раковин мидий в сухом рыбном соусе. Пищевые системы. 2025. Т. 8. № 1. С. 134–143. [Glukharev AYu, Bordiyan VV, Kuzina TD, Kuchina YuA, Derkach SR. Production and use of mussel shell protein in dry fish sauce. Food Systems. 2025;8(1):134–143. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2025-8-1-134-143>
2. Wan M-C, Qin W, Lei C, Li Q, Meng M, et al. Biomaterials from the sea: Future building blocks for biomedical applications. *Bioactive Materials*. 2021;6(12):4255–4285. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2021.04.028>
3. Wu G. Dietary protein intake and human health. *Food & Function*. 2016;7(3):1251–1265. <https://doi.org/10.1039/c5fo01530h>
4. Derkach SR, Grokhovsky VA, Kuranova LK, Volchenko VI. Nutrient analysis of underutilized fish species for the production of protein food. *Foods and Raw Materials*. 2017;5(2):15–23. <http://doi.org/10.21603/2308-4057-2017-2-15-23>
5. Derkach SR, Kuchina YA, Kolotova DS, Petrova LA, Volchenko VI, et al. Properties of protein isolates from marine hydrobionts obtained by isoelectric solubilisation/precipitation: Influence of temperature and processing time. *International Journal of Molecular Sciences*. 2022;23:14221. <https://doi.org/10.3390/ijms232214221>
6. Saeed F, Zohra KT, Naveed K, Zia A, Khaliq M, et al. Algal Proteins for sustainable nutrition and functional food innovation. *Applied Food Research*. 2025;100752. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2025.100752>
7. Xu X, Sharma P, Shu S, Lin T, Ciais P, et al. Global greenhouse gas emissions from animal-based foods are twice those of plant-based foods. *Nature Food*. 2021;2(9):724–732. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00358-x>
8. Henthion M, Hayes M, Mullen AM, Fenelon M, Tiwari B. Future protein supply and demand: Strategies and factors influencing a sustainable equilibrium. *Foods*. 2017;6(7):53. <https://doi.org/10.3390/foods6070053>
9. Aidoo R, Abe-Inge V, Kwofie EM, Baum JI, Kubow S. Sustainable healthy diet modeling for a plant-based dietary transitioning in the United States. *npj Science of Food*. 2023;7:61. <https://doi.org/10.1038/s41538-023-00239-6>
10. Smith K, Watson AW, Lonnie M, Peeters WM, Oonincx D, et al. Meeting the global protein supply requirements of a growing and ageing population. *European Journal of Nutrition*. 2024;63:1425–1433. <https://doi.org/10.1007/s00394-024-03358-2>
11. Gharaviri M, Aleksanochkin DI, Ahangaran M, Fomenko IA, Kovalev LI, et al. Chickpea protein hydrolysates: Production, bioactivity, functional profile, and technological properties. *Foods and Raw Materials*. 2026;14(1):198–213. <https://doi.org/10.21603/2308-4057-2026-1-666>
12. Boukid F, Rosell CM, Castellari M. Pea protein ingredients: A mainstream ingredient to (re)formulate innovative foods and beverages. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;110:729–742. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.040>
13. Meganaharshini M, Sudhakar V, Bharathi ND, Deepak S. Review on recent trends in the application of protein concentrates and isolates – a food industry perspective. *Food and Humanity*. 2023;1:308–325. <https://doi.org/10.1016/j.fooHum.2023.05.022>
14. Zhang T, Dou W, Zhang X, Zhao Y, Zhang Y, et al. The development history and recent updates on soy protein-based meat alternatives. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;109:702–710. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.060>
15. Хрулёв А. А., Бесчетникова Н. А., Федотов И. А. Тенденции развития и экономические аспекты производства горохового протеина. *Пищевая промышленность*. 2016. № 4. С. 24–29. [Khrulyov AA, Beschetikova NA, Fedotov IA. Development tendencies and economic aspects of the pea protein production. *Food Industry*. 2016;4:24–29. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/TWSNMN>

16. Aschemann-Witzel J, Gantriis RF, Fraga P, Perez-Cueto FJA. Plant-based food and protein trend from a business perspective: Markets, consumers, and the challenges and opportunities in the future. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2020;61(18):3119–3128. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1793730>
17. Ismail BP, Senaratne-Lenagala L, Stube A, Brackenridge A. Protein demand: Review of plant and animal proteins used in alternative protein product development and production. *Animal Frontiers*. 2020;10(4):53–63. <https://doi.org/10.1093/af/vfaa040>
18. Shanthakumar P, Klepacka J, Bains A, Chawla P, Dhull SB, *et al.* The current situation of pea protein and its application in the food industry. *Molecules*. 2022;27:5354. <https://doi.org/10.3390/molecules27165354>
19. Taylor SL, Baumert JL. Worldwide food allergy labeling and detection of allergens in processed foods. *Chemical Immunology and Allergy*. 2015;101:227–234. <https://doi.org/10.1159/000373910>
20. Guillin FM, Gaudichon C, Guérin-Deremaux L, Lefranc-Millot C, Azzout-Marniche D, *et al.* Multi-criteria assessment of pea protein quality in rats: A comparison between casein, gluten and pea protein alone or supplemented with methionine. *British Journal of Nutrition*. 2021;125(4):389–397. <https://doi.org/10.1017/S0007114520002883>
21. Guillin FM, Gaudichon C, Guérin-Deremaux L, Lefranc-Millot C, Airinei G, *et al.* Real ileal amino acid digestibility of pea protein compared to casein in healthy humans: A randomized trial. *The American Journal of Clinical Nutrition*. 2022;115(2):353–363. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqab354>
22. Porzucek H, Larsson-Raźnikiewicz M, Klepacka M. *In vitro* protein digestibility of flours and protein isolates from seeds of some leguminous plants. *Swedish Journal of Agricultural Research*. 1991;21(2):49–53.
23. Melchior S, Moretton M, Alongi M, Calligaris S, Nicoli MC, Anese M. Comparison of protein in vitro digestibility under adult and elderly conditions: The case study of wheat, pea, rice, and whey proteins. *Food Research International*. 2023;163:112147. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112147>
24. Santos-Hernández M, Alfieri F, Gallo V, Miralles B, Masi P, *et al.* Compared digestibility of plant protein isolates by using the INFOGEST digestion protocol. *Food Research International*. 2020;137:109708. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109708>
25. Taylor SL, Marsh JT, Koppelman SJ, Kabourek JL, Johnson PE, *et al.* A perspective on pea allergy and pea allergens. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;116:186–198. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.07.017>
26. Abi-Melhem R, Hassoun Y. Is pea our hidden allergen? An American pediatric case series. *Journal of Allergy and Clinical Immunology: Global*. 2023;2(2):100090. <https://doi.org/10.1016/j.jacig.2023.100090>
27. Ивашенко Л. В., Амбарцумов Т. Г., Захарова У. Е. Анализ возможности производства горохового изолята: материалы XII конгресса молодых ученых. Санкт-Петербург, 2023. С. 26–28. [Ivashchenko LV, Ambartsumov TG, Zakharova UE. Analysis of the possibility of producing pea isolate: Proceedings of the XII Congress of Young Scientists. Saint Petersburg, 2023;26–28. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/HORZXH>
28. Колпакова В. В., Куликов Д. С., Уланова Р. В., Чумикина Л. В. Пищевые и кормовые белковые препараты из гороха и нута: производство, свойства, применение. *Техника и технология пищевых производств*. 2021. №. 2. С. 333–348. [Kolpakova VV, Kulikov DS, Ulanova RV, Chumikina LV. Food and feed protein preparations from peas and chickpeas: Production, properties, application. *Food Processing: Techniques and Technology*. 2021;51(2):333–348. (In Russ.)] <https://doi.org/10.21603/2074-9414-2021-2-333-348>
29. Береулов М. III. Основы переработки семян сои. М.: ДеЛи принт, 2006. 181 с. [Begeulov MSh. Fundamentals of soybean seed processing. Moscow: DeLi print; 2006. 181 p. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/QNGPGD>
30. Долгополов В. Г. Растительный белок. М.: Агропромиздат, 1991. 684 с. [Dolgoplov VG. Vegetable protein. Moscow: Agropromizdat; 1991. 684 p. (In Russ.)]
31. Gao Z, Shen P, Lan Y, Cui L, Ohm JB, *et al.* Effect of alkaline extraction pH on structure properties, solubility, and beany flavor of yellow pea protein isolate. *Food Research International*. 2020;131:109045. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109045>
32. Vogelsang-O'Dwyer M, Zannini E, Arendt EK. Production of pulse protein ingredients and their application in plant-based milk alternatives. *Trends in Food Science & Technology*. 2021;110:364–374. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.01.090>
33. Alemu TM, Janssen AE, Padt A, Boom RM. Micro-and ultrafiltration of pea proteins from a water-only extraction process. *Separation and Purification Technology*. 2025;133663. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.133663>
34. Sharma S, Kaur M, Goyal R, Gill BS. Physical characteristics and nutritional composition of some new soybean (*Glycine max* (L.) Merrill) genotypes. *Journal of Food Science and Technology*. 2014;51(3):551–557. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0517-7>
35. Esteves EA, Martino HSD, Oliveira FCE, Bressan J, Costa NMB. Chemical composition of a soybean cultivar lacking lipoxygenases (LOX2 and LOX3). *Food Chemistry*. 2010;122(1):238–242. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2010.02.069>
36. Gravel A, Marciniak A, Couture M, Doyen A. Effects of hexane on protein profile, solubility and foaming properties of defatted proteins extracted from *Tenebrio molitor* larvae. *Molecules*. 2021;26(2):351. <https://doi.org/10.3390/molecules26020351>
37. Trindler C, Kopf-Bolan KA, Denkel C. Aroma of peas, its constituents and reduction strategies – effects from breeding to processing. *Food Chemistry*. 2022;376:131892. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131892>

38. Wang D, Xiao H, Lyu X, Chen H, Wei F. Lipid oxidation in food science and nutritional health: A comprehensive review. *Oil Crop Science*. 2023;8(1):35–44. <https://doi.org/10.1016/j.ocsci.2023.02.002>
39. Gravel A, Dubois-Laurin F, Doyen A. Effects of hexane on protein profile and techno-functional properties of pea protein isolates. *Food Chemistry*. 2023;406:135069. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.135069>
40. L'hocine L, Boye JI, Arcand Y. Composition and functional properties of soy protein isolates prepared using alternative defatting and extraction procedures. *Journal of Food Science*. 2006;71(3):137–145. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2006.tb15609.x>
41. Dirr S, Karslioglu OO, Ates EG, Oztop MH. Defatting strategies for chia protein production: Effects on physicochemical properties. *Future Foods*. 2025;100729. <https://doi.org/10.1016/j.fufo.2025.100729>
42. Russin TA, Boye JI, Arcand Y, Rajamohamed SH. Alternative techniques for defatting soy: A practical review. *Food and Bioprocess Technology*. 2011;4(2):200–223. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0367-8>
43. Апыянцева Ю. В., Борисова И. И., Бараненко Д. А. Обзор технологий выделения белка из нута. *Ползуновский вестник*. 2024. № 2. С. 27–36. [Apyantseva YV, Borisova II, Baranenko DA. A review of chickpea isolation technology. *Polzunovskiy Vestnik*. 2024;(2):27–36. (In Russ.)] <https://doi.org/10.25712/astu.2072-8921.2024.02.004>
44. Berghout JAM, Boom RM, Van Der Goot AJ. The potential of aqueous fractionation of lupin seeds for high-protein foods. *Food Chemistry*. 2014;159:64–70. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.02.166>
45. Wanniarachchi PC, Mocerino M, Hackett MJ, Nesbit M, Shea G, et al. Comparative analysis of thermal, structural and rheological properties of protein isolates and kernel flour from Australian sweet lupin varieties using soy as a reference. *Food Hydrocolloids*. 2026;172(Part 2):112000. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.112000>
46. Liang G, Chen W, Guo K, Zhaojun W, Qiuming C, et al. The impact of pH-shifting and heat treatment on soy protein isolates: Structural changes and foaming properties. *Food Bioscience*. 2025;74:107844. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.107844>
47. Capellini MC, Giacomini V, Cuevas MS, Rodrigues CE. Rice bran oil extraction using alcoholic solvents: Physicochemical characterization of oil and protein fraction functionality. *Industrial Crops and Products*. 2017;104:133–143. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.017>
48. Никифорова Т. А., Севериненко С. М., Куликов Д. А., Пономарев С. Г. Потенциальные возможности побочных продуктов крупяных производств. *Вестник Оренбургского государственного университета*. 2010. № 5 (111). С. 141–144. [Nikiforova TA, Severinenko SM, Kulikov DA, Ponomarev SG. Potentialities of cereal industries by-products. *Vestnik Orenburg State University*. 2010;5(111):141–144. (In Russ.)] <https://elibrary.ru/MSOJSD>
49. Wei S-T, Ou L-C, Luo MR, Hutchings JB. Optimisation of food expectations using product colour and appearance. *Food Quality and Preference*. 2012;23(1):49–62. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2011.07.004>
50. Edelenbos M, Christensen LP, Grevsen K. HPLC determination of chlorophyll and carotenoid pigments in processed green pea cultivars (*Pisum sativum* L.). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2001;49(10):4768–4774. <https://doi.org/10.1021/jf010569z>
51. Cheng M, McPhee KE, Baik BK. Bleaching of green peas and changes in enzyme activities of seeds under simulated climatic conditions. *Journal of Food Science*. 2004;69(7):511–518. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2004.tb13644.x>
52. Steet JA, Tong CH. Degradation kinetics of green color and chlorophylls in peas by colorimetry and HPLC. *Journal of Food Science*. 1996;61(5):924–928. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1996.tb10903.x>
53. Ashokkumar K, Diapari M, Jha AB, Tar'an B, Arganosa G, et al. Genetic diversity of nutritionally important carotenoids in 94 pea and 121 chickpea accessions. *Journal of Food Composition and Analysis*. 2015;43:49–60. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2015.04.014>
54. Ashokkumar K, Tar'an B, Diapari M, Arganosa G, Warkentin TD. Effect of cultivar and environment on carotenoid profile of pea and chickpea. *Crop Science*. 2014;54(5):2225–2235. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.12.0827>
55. Ndiritu AK, Kinyuru JN, Kenji GM, Gichuhi PN. Extraction technique influences the physico-chemical characteristics and functional properties of edible crickets (*Acheta domesticus*) protein concentrate. *Journal of Food Measurement and Characterization*. 2017;11(4):2013–2021. <https://doi.org/10.1007/s11694-017-9584-4>
56. Senarathna SC, Malalgoda M. Impact of defatting method on oat protein isolate structure-function characteristics. *Journal of Cereal Science*. 2024;117:103876. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.103876>
57. Feng Y, Ma X, Kong B, Chen Q, Liu Q. Ethanol induced changes in structural, morphological, and functional properties of whey proteins isolates: Influence of ethanol concentration. *Food Hydrocolloids*. 2021;111:106379. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106379>
58. Tan JX, Tan CC, Dharmawan J, Leong SSJ. Effects of ethanol washing on off-flavours removal and protein functionalities of pea protein concentrate. *Food and Bioprocess Technology*. 2023;141:73–80. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2023.07.004>
59. Ma H, Li J, Guan Y, Song Z, Chen H, et al. A systematic study of the influence of structural differences in soy protein isolates on gel properties: A comparison based on different cultivars. *Food Bioscience*. 2025;69:106987. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2025.106987>

60. Hanley L, Dobson S, Stobbs J, Marangoni AG. Physicochemical and functional characterization of plant protein isolates and their influence on plant-based mozzarella cheese performance. *Food Hydrocolloids*. 2025;164:111222. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2025.111222>
61. Derkach SR, Voron'ko NG, Sokolan NI, Kolotova DS, Kuchina YA. Interactions between gelatin and sodium alginate: UV and FTIR studies. *Journal of Dispersion Science and Technology*. 2019;41(5):690–698. <https://doi.org/10.1080/01932691.2019.1611437>

Дополнительная информация об авторах / Additional information about the authors

Глухарев Андрей Юрьевич / Andrei Yu. Glukharev ORCID 0000-0002-6083-546X; eLIBRARY SPIN 8485-0558
Кучина Юлия Анатольевна / Yuliya A. Kuchina ORCID 0000-0003-3419-1442; eLIBRARY SPIN 3121-3735
Деркач Светлана Ростиславовна / Svetlana R. Derkach ORCID 0000-0002-5871-9320; eLIBRARY SPIN 2263-7685
Князева Александра Сергеевна / Alexandra S. Knyazeva ORCID 0000-0002-3754-0938; eLIBRARY SPIN 5380-5932
Утьянов Дмитрий Александрович / Dmitry A. Utyanov ORCID 0000-0001-7693-3032; eLIBRARY SPIN 5859-6339