

Влияние ферментативного гидролиза и СВЧ-обработки на свойства композита растворимых и нерастворимых клетчаток

Т. Н. Данильчук, М. Аль Дарвиш

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), Москва, Россия

Корреспонденция:

Данильчук Т. Н.,

Российский биотехнологический университет (РОСБИОТЕХ), 125080, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, 11
E-mail: danilchuktn@mgupp.ru

Конфликт интересов:

авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила: 19.02.2026

Поступила после

рецензирования: 04.05.2026

Принята: 30.06.2026

Copyright: © 2026 Авторы

АННОТАЦИЯ

Введение. Пищевые волокна критически важны для здоровья желудочно-кишечного тракта, нормализации обмена веществ, контроля веса и профилактики хронических заболеваний, поскольку питают микрофлору, снижают уровень холестерина и сахара, улучшают пищеварение. Большинство людей потребляют пищевые волокна недостаточно, что делает обогащение ими продуктов питания весьма актуальной задачей. Для получения обогащенных продуктов с хорошими потребительскими качествами актуальным является разработка способов модификации свойств пищевых волокон различного происхождения, а также создание пищевых систем на их основе. Одним из перспективных направлений повышения функционально-технологических свойств пищевых волокон является их биотехнологическая модификация. Ферментативный гидролиз рассматривается как эффективный способ увеличения растворимости и биодоступности волокон за счет частичного разрушения полисахаридных структур. Актуальным является также изучение влияния физических факторов на свойства ферментов.

Цель. Изучение влияния ферментативного гидролиза в сочетании с СВЧ-обработкой на функционально-технологические свойства композитов растворимых и нерастворимых пищевых волокон для их последующего применения в технологии мясных продуктов.

Материалы и методы. Объектами исследования являлись волокнистые композиты на основе пшеничной клетчатки Vitacel® WF 200 и инулина Fibruline® Instant. Для модификации свойств клетчатки использовали ферментативный гидролиз с применением препарата Celluclast®, обладающего целлюлолитической активностью. По окончании гидролиза систему подвергали термической обработке двумя способами: СВЧ-нагревом, нагревом на водяной бане. Изучали свойства композитов с различным соотношением «клетчатка/инулин», а также влияние способа растворения инулина на свойства композитов. Функционально-технологические свойства композитов оценивали по степени набухания и водоудерживающей способности.

Результаты. Установлено, что комплексная модификация пшеничной клетчатки, основанная на ферментативном гидролизе с последующим СВЧ-нагревом, является эффективным подходом к улучшению её функционально-технологических свойств, а также свойств её композитов с инулином, в частности, степени набухания и водоудерживающей способности. Установлено, что способ получения раствора инулина оказывает существенное влияние на водоудерживающую способность композита. Соотношение пшеничной клетчатки и инулина 1:1 обеспечивает наилучшие показатели исследуемых свойств.

Выводы. Полученные результаты подтверждают эффективность применения разработанного подхода при создании функциональных мясных продуктов и других пищевых систем, требующих повышения водоудерживающей способности, текстурной стабильности и пищевой ценности. Использование предложенных композитов может быть рекомендовано для оптимизации технологических процессов и повышения качества готовой продукции.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

пшеничная клетчатка, ферментативный гидролиз, инулин, СВЧ-нагрев, пищевые волокна, водоудерживающая способность, мясные продукты



Для цитирования: Данильчук, Т. Н., & Аль Дарвиш, М. (2026). Влияние ферментативного гидролиза и СВЧ-обработки на свойства композита растворимых и нерастворимых клетчаток. *Health, Food & Biotechnology*, 8(2), 51-65. <https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i2.s309>

<https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i2.s309>

The Effect of Enzymatic Hydrolysis and Microwave Treatment on the Properties of a Composite of Soluble and Insoluble Dietary Fibres

Tatiana N. Danilchuk, Mais Al Darwish

Russian Biotechnological University
(BIOTECH University), Moscow, Russia

Correspondence:

Tatiana N. Danilchuk,
Russian Biotechnological University,
11, Volokolamskoe highway, Moscow,
125080, Russia
E-mail: danilchuktn@mgupp.ru

Declaration of competing interest:
none declared.

Received: 19.02.2026

Received in revised form: 04.05.2026

Accepted: 30.06.2026

Copyright: © 2026 The Authors

ABSTRACT

Introduction. Dietary fibre is crucial for gastrointestinal health, metabolic regulation, weight control, and the prevention of chronic diseases, as it nourishes the gut microbiota, lowers cholesterol and blood sugar levels, and improves digestion. Most people do not consume enough dietary fibre, making the enrichment of food products with it a highly relevant task. To obtain fortified products with desirable consumer qualities, it is important to develop methods for modifying the properties of dietary fibers from various sources and to create food systems based on them. One promising approach to enhancing the functional and technological properties of dietary fibres is their biotechnological modification. Enzymatic hydrolysis is considered an effective method for increasing the solubility and bioavailability of fibres through the partial breakdown of polysaccharide structures. The study of the influence of physical factors on the properties of enzymes is also of current interest.

Purpose. To study the influence of enzymatic hydrolysis in combination with microwave treatment on the functional and technological properties of composites of soluble and insoluble dietary fibres for their subsequent use in meat product technology.

Materials and Methods. We studied fibrous composites based on Vitacel® WF 200 wheat fibre and Fibruline® Instant inulin. Enzymatic hydrolysis using the Celluclast® preparation, which possesses cellulolytic activity, was employed to modify the properties of the cellulose. Upon completion of hydrolysis, the system was subjected to heat treatment using two methods: microwave heating and heating in a water bath. The properties of composites with varying fibre-to-inulin ratios were investigated, as well as the effect of the inulin dissolution method on the properties of the composites. The functional-technological properties of the composites were evaluated based on the degree of swelling and water-holding capacity.

Results. It has been established that the complex modification of wheat fibre, based on enzymatic hydrolysis followed by microwave heating, is an effective approach to improving its functional-technological properties, as well as the properties of its composites with inulin, particularly the swelling degree and water-holding capacity. The study revealed that the method of preparing the inulin solution significantly affects the water-holding capacity of the composite. A 1:1 ratio of wheat fibre to inulin yields the best results for the properties under investigation.

Conclusions. The results obtained confirm the effectiveness of the developed approach in creating functional meat products and other food systems requiring enhanced water-holding capacity, textural stability, and nutritional value. The use of the proposed composites can be recommended for optimising technological processes and improving the quality of the finished product.

KEYWORDS

wheat fibre, enzymatic hydrolysis, inulin, microwave heating, dietary fibre, water-holding capacity, meat products



To cite: Danilchuk, T. N., & Al Darwish, M. (2026). The effect of enzymatic hydrolysis and microwave treatment on the properties of a composite of soluble and insoluble dietary fibres. *Health, Food & Biotechnology*, 8(2), 51-65. <https://doi.org/10.36107/hfb.2026.i2.s309>

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы наблюдается устойчивый рост интереса к разработке функциональных продуктов питания, обогащенных пищевыми волокнами, что обусловлено их доказанной ролью в поддержании здоровья человека и профилактике хронических неинфекционных заболеваний. Пищевые волокна представляют собой сложные углеводы, не перевариваемые в желудочно-кишечном тракте человека, однако выполняющие важные физиологические функции, включая регуляцию работы кишечника, поддержание баланса микробиоты и снижение риска сердечно-сосудистых заболеваний, диабета и некоторых видов онкологических патологий (Alahmari, 2024; Fu, 2022). В зависимости от растворимости пищевые волокна подразделяются на растворимые, образующие вязкие гелеобразные структуры и способствующие снижению уровня сахара и холестерина, и нерастворимые, стимулирующие перистальтику кишечника и предотвращающие запоры (Barber, 2020; Stanišić, 2025).

Современные научные исследования в области пищевой технологии направлены на расширение использования пищевых волокон в составе продуктов массового потребления, включая мясные изделия, с целью повышения их пищевой ценности и соответствия концепции здорового питания. Особый интерес представляют исследования по комбинированию растворимых и нерастворимых волокон, а также применению биотехнологических и физических методов их модификации для улучшения функционально-технологических свойств, таких как водоудерживающая способность, текстура и стабильность пищевых систем (Zhang, 2019; Stanišić, 2025).

Несмотря на доказанные преимущества пищевых волокон, их применение в мясных продуктах остается ограниченным вследствие отрицательного влияния немодифицированных волокон на органолептические характеристики и технологическую совместимость с компонентами мясных систем. Немодифицированные растительные волокна, включая пшеничную клетчатку, характеризуются плотной молекулярной структурой и низкой растворимостью, что затрудняет их равномерное распределение в пищевых матрицах и снижает функциональную эффективность (Stanišić, 2025). Одновременно сохраняется разрыв между рекомендуемым уровнем потребления пищевых волокон (25–38 г/сут) и их фактическим поступлением с рационом питания (Alahmari, 2024), что обуславливает необходимость поиска новых технологических решений для их эффективного включения в продукты питания.

В этой связи актуальным научным направлением является структурная модификация пищевых волокон с ис-

пользованием комбинированных методов обработки. Ферментативный гидролиз способствует частичному разрушению полисахаридных структур и повышению доли растворимых фракций, тогда как микроволновая обработка изменяет морфологию волокон и увеличивает доступность функциональных групп для взаимодействия с водой и другими компонентами пищевых систем (Li, 2025; Cantu-Jungles, 2021). Однако вопросы комплексного применения ферментативного гидролиза в сочетании с СВЧ-обработкой для получения композитов растворимых и нерастворимых пищевых волокон, предназначенных для технологии мясных продуктов, остаются недостаточно изученными, что формирует существующий научный пробел.

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

В современной пищевой промышленности, включая мясную отрасль, пищевые волокна рассматриваются как важные функциональные ингредиенты, позволяющие одновременно повышать пищевую ценность продуктов и улучшать их технологические характеристики. Введение растворимых и нерастворимых пищевых волокон способствует снижению содержания жира и энергетической ценности мясных продуктов, повышению влаго- и жирудерживающей способности, улучшению текстурных характеристик и увеличению выхода готовой продукции после тепловой обработки. В связи с этим мясные продукты, обогащенные пищевыми волокнами, всё чаще рассматриваются как функциональные продукты питания (Mehta, 2015).

Особое место среди функциональных ингредиентов занимает инулин — растворимое пищевое волокно, обладающее выраженной пребиотической активностью и способностью стимулировать рост полезной кишечной микрофлоры. Инулин широко применяется в технологии функциональных продуктов в качестве заменителя жира и сахара при разработке низкокалорийных рецептур (Khetu, 2023). По своей химической природе инулин представляет собой фруктан растительного происхождения, состоящий из остатков фруктозы, соединенных β -(2→1)-гликозидными связями, что обуславливает его устойчивость к перевариванию в верхних отделах желудочно-кишечного тракта и последующую ферментацию микробиотой толстого кишечника. В результате проявляется выраженный пребиотический эффект, связанный со стимуляцией роста бифидобактерий и улучшением микробиологического баланса кишечника.

Технологическая ценность инулина определяется его способностью образовывать гелеобразные структуры и микрокристаллические сети, способные удерживать воду и жир, имитируя текстуру жировой фазы.

Функциональные свойства инулина во многом зависят от степени полимеризации: длинноцепочечные фракции характеризуются высокой гелеобразующей способностью, тогда как короткоцепочечные повышают растворимость и обеспечивают более мягкую структуру продукта. Результаты исследований показывают, что использование инулина в мясных изделиях в качестве частичного или полного заменителя жира позволяет снижать энергетическую ценность продукции, повышать водоудерживающую способность и выход после тепловой обработки при сохранении сенсорных характеристик продукта. Наиболее эффективными считаются концентрации инулина в диапазоне 3,5–10 %, тогда как увеличение содержания до 12,5–15 % может приводить к избыточному уплотнению структуры и ухудшению органолептических показателей. Установлено также, что форма введения инулина оказывает существенное влияние на его функциональную эффективность: гелеобразные и эмульсионные системы демонстрируют более выраженные структурообразующие свойства по сравнению с порошкообразной формой (Illipangama, 2022; Jackson, 2022; Zaky, 2024; Montoya, 2022; Ряхимов, 2021; Kamil, 2024).

Наряду с инулином, в технологии мясных продуктов широко применяются пшеничные пищевые волокна, способствующие улучшению пищеварения и усилению чувства насыщения, что повышает пищевую ценность продукции (Stanišić, 2025). Пшеничная клетчатка, используемая в виде отрубей или порошкообразных волокон, обладает выраженными функционально-технологическими свойствами. Она способствует удержанию влаги и жира в процессе тепловой обработки, снижению энергетической ценности за счет частичной замены животных жиров, а также обогащению продуктов пищевыми волокнами. Благодаря доступности сырья и сравнительно низкой стоимости пшеничная клетчатка является объектом многочисленных исследований, направленных на разработку функциональных мясных изделий (Mehta, 2015).

Современные исследования демонстрируют перспективность использования пшеничных волокон при создании жировых имитаторов. Так, в работе Nikolić (2023) показано, что применение пшеничных волокон в концентрации 1–10 % в присутствии стабилизаторов и эмульгаторов позволяет формировать системы с реологическими характеристиками, близкими к животному жиру. Полученные результаты подтверждают возможность использования пшеничной клетчатки при разработке мясных продуктов с пониженным содержанием жира при сохранении традиционных текстурных свойств.

Следует отметить, что при разработке конечных мясных продуктов содержание пищевых волокон обычно ограничивается уровнем 1–2 % для сохранения вы-

соких органолептических показателей. Однако в модельных исследованиях, направленных на изучение структурообразующих механизмов и создание жировых имитаторов, применяются более высокие концентрации (до 5–10 %), что позволяет детально исследовать функциональное и технологическое поведение волоконных систем и в дальнейшем оптимизировать их применение в рецептурах низкожирных мясных продуктов (Stanišić, 2025).

Одним из перспективных направлений повышения функциональных свойств пищевых волокон является их биотехнологическая модификация. Ферментативный гидролиз рассматривается как эффективный способ увеличения растворимости и биодоступности волокон за счет частичного разрушения полисахаридных структур клеточных стенок растительного сырья. Использование ферментов, таких как целлюлазы и ксиланазы, приводит к увеличению доли растворимых фракций и изменению микроструктуры волокон, что способствует улучшению их функционально-технологических свойств (Li, 2025).

К современным физическим методам модификации относится микроволновая обработка, под воздействием которой происходит разрушение трехмерной структуры волокон, увеличение удельной поверхности и повышение доступности функциональных групп для взаимодействия с водой и ферментами. Кроме того, микроволновое воздействие повышает ферментируемость волокон кишечной микробиотой и способствует образованию короткоцепочечных жирных кислот, оказывающих положительное влияние на состояние желудочно-кишечного тракта (Cantu-Jungles, 2021).

Комбинированное применение ферментативного гидролиза и микроволновой обработки рассматривается как перспективная стратегия направленной модификации пищевых волокон. Ферментативная обработка обеспечивает расщепление высокомолекулярных полисахаридных цепей, тогда как микроволновое воздействие изменяет морфологию волокон и повышает их структурную доступность. В результате возможно получение композитов с оптимизированным соотношением растворимых и нерастворимых фракций, обладающих улучшенными функциональными характеристиками (Li, 2025).

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных применению инулина и пшеничных волокон в мясных продуктах, в доступной научной литературе практически отсутствуют работы, направленные на изучение комплексной модификации их свойств посредством последовательного сочетания ферментативного гидролиза и СВЧ-обработки. В частности, недостаточно исследовано влияние комбинирован-

ной обработки на формирование структуры композитов растворимых и нерастворимых пищевых волокон и их функционально-технологические свойства в модельных мясных системах. При этом практически отсутствуют сведения о взаимодействии растворимых и нерастворимых пищевых волокон в составе подобных композитов. Таким образом, существует научный пробел, связанный с отсутствием системного подхода к получению и оценке модифицированных волокнистых композитов.

В связи с этим актуальной научной задачей является разработка и теоретическое обоснование технологии получения функционального композита на основе пшеничной клетчатки и инулина с использованием ферментативного гидролиза и СВЧ-нагревания.

Целью настоящего исследования являлось изучение влияния ферментативного гидролиза в сочетании с СВЧ-обработкой на функционально-технологические свойства композитов растворимых и нерастворимых пищевых волокон для их последующего применения в технологии мясных продуктов. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Подготовить модельные волокнистые композиты на основе пшеничной клетчатки и инулина в различных соотношениях компонентов.
2. Получить волокнистые композиты инулина и пшеничной клетчатки, подвергнутой ферментативной обработке с последующим СВЧ-нагреванием, в различных соотношениях.
3. Получить волокнистые композиты инулина и пшеничной клетчатки, подвергнутой ферментативной обработке с последующим нагреванием на водяной бане, в различных соотношениях.
4. Оценить функционально-технологические свойства полученных волокнистых композитов, включая степень набухания и водоудерживающую способность.
5. Определить оптимальное соотношение пшеничной клетчатки и инулина, а также оценить эффективность СВЧ-обработки по сравнению с нагреванием на водяной бане после ферментативной модификации.
6. Изучить влияние содержания инулина и способа его растворения на водоудерживающую способность волокнистого композита.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объект

Объектом исследования являлись волокнистые композиты на основе растворимых и нерастворимых пищевых волокон — инулина и пшеничной клетчатки.

Материалы

Пшеничная клетчатка Vitacel® WF 200 (JRS Pharma GmbH & Co. KG, Германия), полученная из вегетативных частей пшеницы, с содержанием пищевых волокон не менее 97 % на 100 г продукта.

Инулин Fibruline® Instant (Cosucra Groupe Warcoing S.A., Бельгия), полученный из корня цикория, содержащий 86 г пищевых волокон на 100 г продукта и обладающий пребиотическими свойствами. Продукт соответствует требованиям ТР ТС 021/2011 «О безопасности пищевой продукции» и ТР ТС 022/2011 «Пищевая продукция в части её маркировки».

Исследуемые ингредиенты были приобретены в готовом виде и использованы без дополнительной очистки.

Для ферментативной обработки применяли ферментный препарат Celluclast® 1.5 L (Novozymes, Дания), обладающий целлюлолитической активностью. В соответствии с технической документацией производителя активность препарата составляла 4000 ед/мл; оптимальный диапазон pH = 3,5–4,5; оптимальная температура 50–65 °С.

Все эксперименты проводились в лабораториях кафедры «Технологии и биотехнологии мяса и мясных продуктов».

Оборудование

В работе использовали следующее лабораторное оборудование:

- центрифуга DLAB DM0412 (DLAB Scientific Co., Китай), скорость вращения до 2000 об/мин;
- центрифужные пробирки объемом 14 мл (масса пустой пробирки — 6,0 г);
- микроволновая печь Midea EM720CEE, объем 20 л, мощность 800 Вт (Китай);
- водяная баня LABTEX (Россия) для нагревания образцов при температуре 90 °С;
- лабораторный термометр (диапазон измерений 0–100 °С);
- градуированные цилиндры объемом 50 мл.

Методы исследования

Ферментативная обработка пшеничной клетчатки

Обработка пшеничной клетчатки проводилась с использованием раствора ферментного препарата Celluclast® 1.5 L. Исходный препарат разбавляли до активности 500 ед/мл. Для проведения ферментативного гидролиза к одной части пшеничной клетчатки добавляли десять частей раствора ферментного препарата, т. е. соотношение компонентов составляло 1 : 10. Процесс осуществляли при комнатной температуре (20–25 °С) в течение 1–1,5 часа. После завершения ферментативного гидролиза образцы разделили на две экспериментальные группы (n = 4 в каждой группе). Первая группа подвергалась микроволновой обработке, вторая – нагреванию на водяной бане по окончании процесса гидролиза.

Оба метода тепловой обработки применялись для кратковременной активации фермента с последующей его полной термической инактивацией, а также для сравнительной оценки их эффективности и технологической целесообразности с целью выбора наиболее оптимального способа, обеспечивающего получение требуемых функциональных свойств

Нагревание на водяной бане

После ферментативной обработки сосуды с образцами пшеничной клетчатки помещали в водяную баню, нагретую до температуры около 90 °С. Контроль температуры осуществляли с помощью термометра, установленного в центральной части сосуда, что позволяло измерять температуру непосредственно в массе образца. При достижении температуры (70 ± 1) °С в середине объема образцы извлекали и подготавливали к последующим аналитическим испытаниям. Общее время выдержки на водяной бане составляло 20 минут. Данный режим обеспечивал завершение ферментативной реакции и последующую термическую инактивацию ферментов.

Микроволновый нагрев

После ферментативной обработки пшеничную клетчатку подвергали микроволновому нагреву в течение 2 минут. Данный способ относится к объемным и быстрым методам теплопередачи, обеспечивающим повышение температуры во всем объеме образца за короткий промежуток времени. При мощности приложенного воздействия

800 Вт температура образцов составляла (92 ± 2) °С, что являлось достаточным для термической инактивации целлюлазы и предотвращения её дальнейшего воздействия на компоненты исследуемой системы.

Метод определения набухания волокон

Определение степени набухания проводили объемным методом согласно общепринятым методикам исследования пищевого сырья¹.

В сухие градуированные цилиндры объемом до 50 мл вносили навески по 5 г каждого образца, после чего добавляли дистиллированную воду температурой (20 ± 2) °С до метки 50 мл. Содержимое цилиндров осторожно перемешивали стеклянной палочкой, затем выдерживали в течение 40 минут при температуре (20 ± 2) °С (без дополнительного перемешивания).

Степень набухания образцов вычисляли по формуле:

$$Q_v = \frac{V - V'}{V'} \cdot 100, \quad (1)$$

где Q_v – степень набухания, %;

V' – начальный объем образца до набухания, мл;

V – объем образца после набухания, мл;

100 – коэффициент перевода в проценты.

Метод определения водоудерживающей способности (ВУС)

Водоудерживающую способность определяли центрифужным методом по методикам физико-химического анализа пищевых продуктов².

Навеску образца массой 5 г помещали в центрифужные пробирки и центрифугировали при 2000 об/мин в течение 10 минут.

После центрифугирования свободную воду аккуратно удаляли, после чего пробирки с осадком взвешивали. Количество отделенной воды определяли как разность между массой центрифужной пробирки с образцом до центрифугирования и массой той же пробирки после центрифугирования и удаления отделившейся воды (свободной влаги).

Массу образца после центрифугирования определяли как разность между массой центрифужной пробир-

¹ Башкеева, Г. Е., & Мухаметчина, Н. У. (2015). Физико-химические методы анализа продуктов питания: учебно-методическое пособие. Нижнекамск: НХТИ ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 102 с.

² Базарнова, Ю. Г. (2013). Методы исследования сырья и готовой продукции: учебно-методическое пособие. СПб.: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 76 с.

ки с осадком и массой пустой пробирки. Массу сухого вещества в навеске 5 г определяли расчетным путем исходя из известного соотношения компонентов (пшеничная клетчатка, инулин и вода) в исходной модельной системе. Количество удержанной воды находили как разность между массой образца после центрифугирования и удаления свободной воды и массой сухого вещества.

ВУС рассчитывали как отношение количества удержанной воды к массе сухого вещества образца. Полученные значения выражали в г/г.

Процедура проведения исследования

Исследование проводилось в два последовательных этапа.

Первый этап исследования

Для выявления оптимального соотношения пшеничной клетчатки и инулина, а также выбора наиболее эффективного способа тепловой обработки после ферментативной модификации пшеничной клетчатки на первом этапе была выполнена оценка функционально-технологических свойств волокнистых композитов (количество вариантов $n = 12$), а именно: степени набухания и водоудерживающей способности. Эти физико-химические характеристики определяют поведение клетчатки при производстве продуктов питания, а также их влияние на структуру, качество и выход готовых изделий.

На данном этапе использовали пшеничную клетчатку в трех различных состояниях:

- нативная пшеничная клетчатка (без обработки);
- пшеничная клетчатка после ферментативной обработки с последующим микроволновым нагревом (СВЧ);
- пшеничная клетчатка после ферментативной обработки с последующим нагреванием на водяной бане.

Каждый вариант пшеничной клетчатки смешивали с инулином, внесенным в сухом виде, при различных массовых соотношениях компонентов. Соотношение пшеничной клетчатки к инулину (по массе) составляло:

- 1 : 1;
- 1 : 1,5;
- 1 : 3;
- 1 : 4.

Выбор указанных соотношений был обусловлен необходимостью оценки влияния постепенного увеличения доли растворимого пищевого волокна (инулина) относительно нерастворимой пшеничной клетчатки на формирование функционально-технологических свойств волокнистых композитов. Соотношение 1 : 1 было принято в качестве базового, обеспечивающего равное содержание растворимой и нерастворимой фракций пищевых волокон и позволяющего оценить их синергетическое взаимодействие.

Дальнейшее увеличение содержания инулина осуществлялось ступенчато. Первый шаг изменения (1 : 1 → 1 : 1,5) составлял 0,5, что позволяло выявить начальные изменения структурообразования системы при небольшом увеличении доли растворимого компонента. Последующие шаги (1 : 1,5 → 1 : 3 → 1 : 4) составляли 1,0–1,5, что обеспечивало исследование более выраженного влияния инулина на ВУС и степень набухания композитов в области повышенных концентраций растворимых волокон.

Такой диапазон соотношений позволил охватить как область сбалансированных систем, так и область доминирования инулина, что необходимо для определения оптимального состава волокнистого композита с точки зрения функционально-технологических свойств.

Второй этап исследования

На втором этапе исследования изучали влияние количества добавляемого инулина относительно пшеничной клетчатки (обработанной и необработанной) и влияние способа получения геля инулина с использованием тепловой СВЧ-обработки на ВУС волокнистых композитов.

Во всех образцах количество добавляемой воды было равным, что позволило создать одинаковые условия эксперимента и исследовать различные соотношения инулина к воде в диапазоне, обеспечивающем формирование гелевой структуры. Согласно литературным данным (Franck, 2002), образование геля инулина происходит при его концентрации в водной системе на уровне приблизительно 10–25 % (мас./мас.). Исходя из указанных концентраций, соответствующее соотношение инулина и воды, необходимое для формирования гелевой структуры и эффективной гидратации, составляет примерно от 1 : 4 до 1 : 10 (инулин/вода).

Для исследования подготовлено 8 модельных образцов, состав которых представлен в Таблице 1.

Таблица 1
Состав исследуемых образцов
Table 1
Composition of the Studied Samples

№ образца	Состав				Способ подготовки инулина
	Пшеничные клетчатки (г)	Инулин (г)	Вода (см³)	Соотношение клетчатка/инулин	
1	2,5 г обработанные	5	20	1 : 2	Совместный СВЧ- нагрев воды с инулином
2	2,5 г обработанные	2,5	20	1 : 1	Совместный СВЧ- нагрев воды с инулином
3	2,5 г необработанные	5	20	1 : 2	Совместный СВЧ- нагрев воды с инулином
4	2,5 г необработанные	2,5	20	1 : 1	Совместный нагрев воды с инулином в СВЧ
5	2,5 г обработанные	5	20	1 : 2	Предварительный СВЧ-нагрев воды с последующим добавлением инулина
6	2,5 г обработанные	2,5	20	1 : 1	Предварительный СВЧ-нагрев воды с последующим добавлением инулина
7	2,5 г необработанные	5	20	1 : 2	Предварительный СВЧ-нагрев воды с последующим добавлением инулина
8	2,5 г необработанные	2,5	20	1 : 1	Предварительный СВЧ-нагрев воды с последующим добавлением инулина

Статистическая обработка полученных результатов

Все эксперименты проводили в трехкратной повторности для обеспечения достоверности и воспроизводимости полученных результатов и обрабатывали методами математической статистики. При проверке статистических гипотез применяли уровень доверительной вероятности 0,95.

Среднее квадратичное отклонение определяли по формуле:

$$S = \pm \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_{cp})^2}{n - 1}}, \tag{2}$$

где S – среднее квадратичное отклонение;
 $\sum (x_i - x_{cp})^2$ – сумма квадратов вариаций от средней арифметической;
n – общее число вариантов (количество параллельных опытов);
n – 1 – число степеней свободы.

Средняя арифметическая вариаций определялась по формуле:

$$x_{cp} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n}, \tag{3}$$

где $x_1, x_2, x_3 \dots x_n \dots$ – вариации (отдельные результаты опытов);
n – общее число вариантов (количество параллельных опытов).

РЕЗУЛЬТАТЫ

В данном разделе представлены экспериментальные результаты исследования функционально-технологических свойств волокнистых композитов на основе пшеничной клетчатки и инулина. Оценивались степень набухания и ВУС образцов в зависимости от соотношения компонентов, способа модификации пшеничных волокон и условий подготовки инулина. Полученные данные позволили определить оптимальные параметры формирования композита и выявить факторы, оказывающие наибольшее влияние на его технологические характеристики.

1. Исследование физико-химических характеристик волокнистых композитов:

На Рисунке 1 представлен внешний вид пшеничной клетчатки до и после ферментативной обработки с последующим СВЧ-нагревом.

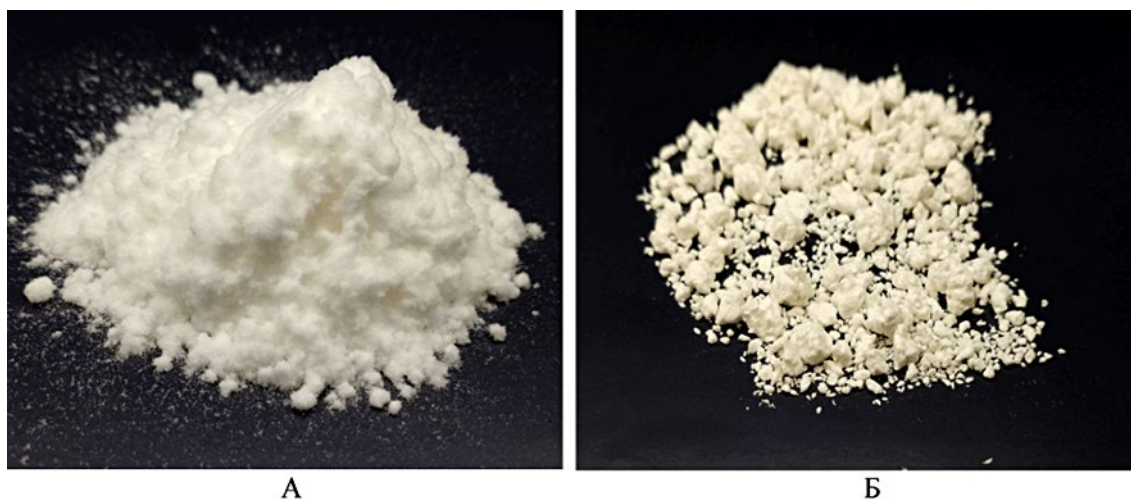
Пшеничная клетчатка до ферментативной обработки имела вид легкого, белого, тонкодисперсного, пушистого порошка (Рисунок 1А). При взаимодействии с раствором ферментного препарата клетчатка образовывала густую, вязкую, кремовую массу (мелкодисперсную кашу), которая удерживала воду в количестве 1 : 10 благодаря своей капиллярно-волокнуистой структуре. После высушивания ферментированная клетчатка трансформировалась обратно в мелкозернистый сыпучий порошок кремового цвета (Рисунок 1Б), который не слипался в монолитный кусок, сохраняя сыпучесть.

Рисунок 1

Внешний вид пшеничной клетчатки

Figure 1

Appearance of Wheat Fibre



Примечание. А — до ферментативной обработки и СВЧ-нагрева; Б — после ферментативной обработки и СВЧ-нагрева

Note. A — before enzymatic treatment and microwave heating; B — after enzymatic treatment and microwave heating

Результаты сравнительного анализа степени набухания композита пшеничной клетчатки и инулина с использованием обработанных и необработанных пшеничных волокон представлены на Рисунке 2.

После изучения способности к набуханию образцы композитов были извлечены из градуированных цилиндров,

отфильтрованы от избытка непоглощенной воды и подвергнуты исследованию ВУС по описанной выше методике. Результаты экспериментальных данных представлены на Рисунке 3.

Анализ полученных данных показал, что образцы пшеничных волокон, подвергнутые ферментативной об-

Рисунок 2

Степень набухания композита пшеничной клетчатки и инулина

Figure 2

Swelling Degree of the Wheat Fibre and Inulin Composite

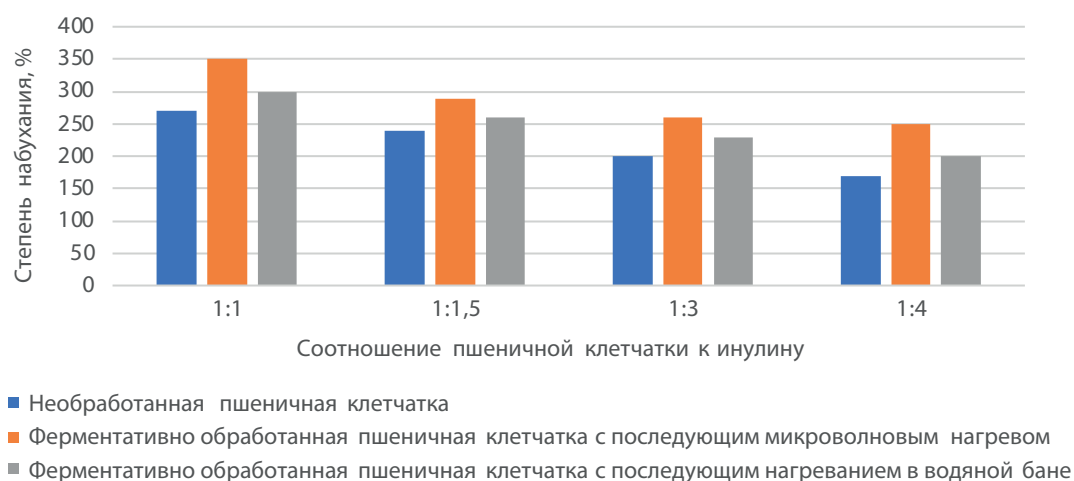


Рисунок 3

Водоудерживающая способность композита пшеничной клетчатки и инулина

Figure 3

Water-Holding Capacity of a Wheat Fibre and Inulin Composite



работке с последующим нагреванием (водяная баня и СВЧ), характеризуются более высокой степенью набухания и повышенной ВУС по сравнению с необработанными волокнами при всех исследуемых соотношениях компонентов. Для обработанных образцов наблюдалось достоверное увеличение исследуемых показателей, что свидетельствует об улучшении функционально-технологических свойств волокнистого композита. Видимо, частичная гидролитическая деструкция целлюлозных волокон под действием ферментов приводит к разрыхлению структуры и высвобождению дополнительных гидрофильных групп, способных эффективно связывать воду, следствием чего является улучшение физико-химических характеристик композитов.

Сравнительный анализ экспериментальных данных позволил сделать вывод о том, что максимальные значения степени набухания и ВУС обеспечиваются соотношением пшеничной клетчатки и инулина 1 : 1 при любом способе постферментативной термической обработки. При этом более эффективным в качестве такой обработки является использование СВЧ-нагрева, что может быть связано с дополнительным действием на фермент колебательного фактора электромагнитного излучения.

2. Изучение влияния способов получения композитов на их водоудерживающую способность:

Как отмечалось выше, со ссылкой на литературные данные, форма введения инулина в пищевую систему может

значительно влиять на свойства системы. Предпочтительнее введение инулина в виде геля из-за более выраженных структурообразующих свойств геля по сравнению с порошкообразной формой. В этой связи на втором этапе исследований изучение влияния на свойства композитов ферментативной обработки клетчатки и соотношения клетчатка/инулин проводили с использованием гелей инулина, полученных с применением различных технических приемов. Для получения гелей инулина использовали СВЧ-нагрев, эффективность которого была показана на первом этапе исследований. Применяли следующие приемы для растворения порошка инулина: совместный нагрев воды и инулина в микроволновой печи (СВЧ) в течение 2 минут; предварительный нагрев воды в микроволновой печи (СВЧ) в течение 2 минут с последующим внесением инулина. Использовали обработанную и необработанную ферментом клетчатку с постферментативной СВЧ-обработкой.

Визуальный анализ гелей показал, что совместный нагрев воды с инулином обеспечивает более равномерное растворение по сравнению со способом предварительного нагрева воды с последующим внесением инулина (Рисунок 4). Данное наблюдение было подтверждено количественной оценкой ВУС волокнистых композитов.

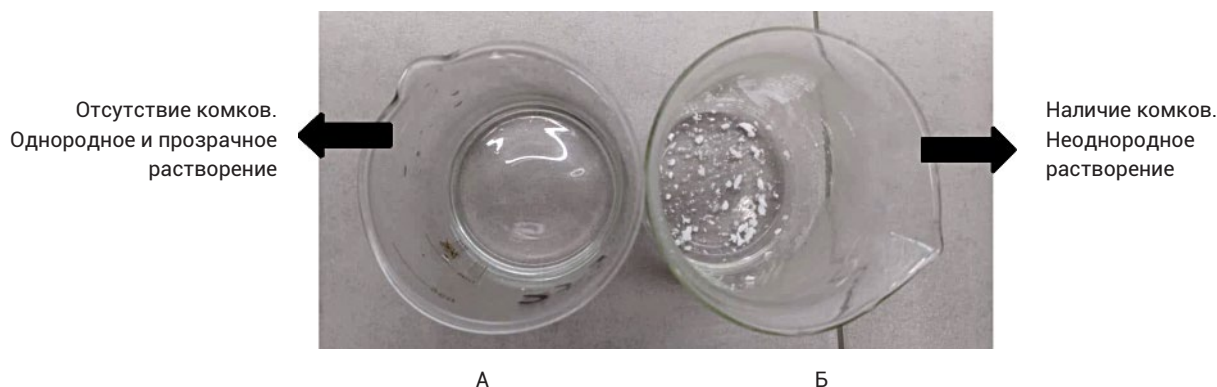
Результаты совокупного влияния обработки пшеничных волокон, количества инулина и способа его подготовки представлены на Рисунке 5. Номера образцов указаны

Рисунок 4

Различия в характере растворения инулина

Figure 4

Differences in the Dissolution Characteristics of Inulin



Примечание. А) при совместном СВЧ-нагревании с водой; Б) при введении инулина в предварительно нагретую водную фазу.

Note: A) during simultaneous microwave heating with water; B) upon addition of inulin to the preheated aqueous phase.

в Таблице 1, образцы различаются способом подготовки раствора инулина и соотношением клетчатка/инулин.

На втором этапе исследования были подтверждены результаты, полученные на первом этапе: содержание инулина в композите более 50 % (в пересчете на сухое вещество) приводит к понижению величины ВУС как при использовании инулина в виде порошка, так и при использовании геля инулина. Показано, что введение инулина в виде геля способствует увеличению ВУС композитов в сравнении с введением в виде порошка. Это доказывает, что развитая гелеобразная структура инулина обладает повышенной способностью удерживать воду.

Кроме того установлено, что способ растворения инулина оказывает существенное влияние на свойства системы: совместный СВЧ-нагрев воды и инулина обеспечивает более равномерную гидратацию (Рисунок 4) и более высокие значения ВУС (Рисунок 5) по сравнению с раздельным способом (предварительный СВЧ-нагрев воды с последующим добавлением инулина). Максимальное значение ВУС достигается при использовании ферментативно обработанной пшеничной клетчатки и равномерно гидратированного инулина при соотношении 1 : 1.

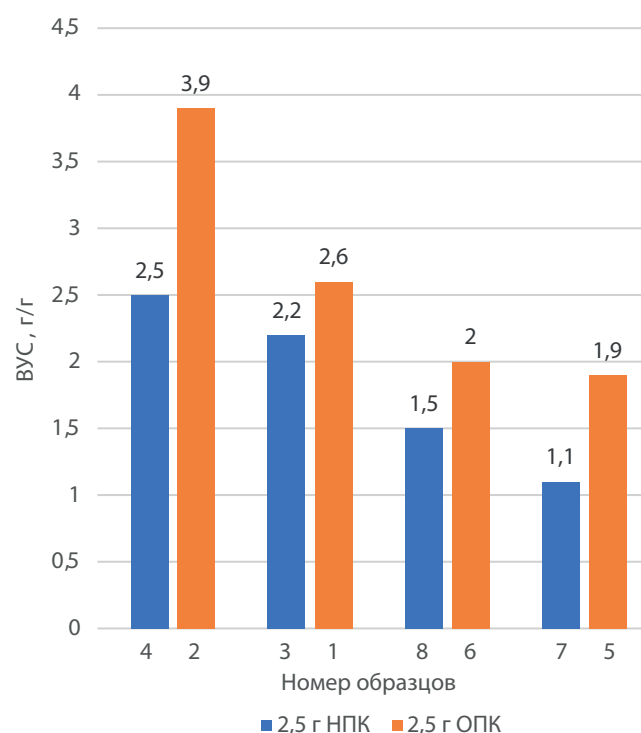
На основании проведенного сравнительного анализа результатов установлено, что для получения композитов пшеничной клетчатки Vitacel® WF 200 и инулина Fibruline® Instant, способных равномерно распределяться в пищевых матрицах и повышать их функционально-технологические свойства, целесообразно использовать клетчатку, модифицированную действием целлюлолитического фермента с последующим кратковременным СВЧ-нагревом, и раствор инулина, полу-

Рисунок 5

Влияние обработанных пшеничных волокон, количества инулина и способа его подготовки на водоудерживающую способность композиционной системы

Figure 5

Effect of Processed Wheat Fibres, Inulin Content, and Inulin Preparation Method on the Water-Holding Capacity of the Composite System



Примечание. НПК — необработанная пшеничная клетчатка, ОПК — обработанная пшеничная клетчатка.

Note. НПК — unprocessed wheat fibre, ОПК — processed wheat fibre.

ченный совместным СВЧ-нагревом воды и инулина. Рекомендовано использовать соотношение клетчатки и инулина 1 : 1 (в пересчете на сухое вещество).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты свидетельствуют о том, что ферментативная обработка пшеничной клетчатки приводит к существенному улучшению её физико-химических характеристик, в частности степени набухания и ВУС. Согласно литературным данным, этот эффект обусловлен изменением компонентов клеточной стенки, таких как целлюлоза и гемицеллюлоза, что способствует разрыхлению структуры, увеличению пористости и росту удельной поверхности волокон. Аналогичные изменения структуры растительных волокон под действием ферментативной обработки ранее были описаны в исследованиях Elleuch (2011).

Приведенные в настоящей работе экспериментальные данные согласуются с указанными результатами, однако наблюдаемое улучшение функциональных показателей оказалось более выраженным, что может быть связано с применением комбинированного подхода, включающего не только ферментативную обработку, но и последующее тепловое воздействие.

Кроме того, дополнительная обработка микроволновым излучением (СВЧ) усиливает эффект ферментативной обработки. Более высокие значения степени набухания и ВУС по сравнению с нагреванием на водяной бане могут быть объяснены особенностями микроволнового нагрева, обеспечивающего быстрый объемный нагрев и вызывающего изменения микроструктуры волокон, что способствует улучшению их функциональных свойств. Положительное влияние физических методов обработки, включая СВЧ, на свойства пищевых волокон было отмечено в ряде исследований, в частности в исследовании (Cantu-Jungles, 2021). Преимущественно рассматривалось воздействие отдельных методов обработки. В настоящей работе показано более выраженное улучшение свойств за счет синергетического эффекта ферментативной обработки с последующим СВЧ-нагревом.

Как показали результаты, влияние инулина носит концентрационно-зависимый характер. Соотношение пшеничной клетчатки и инулина 1 : 1 обеспечивает баланс между растворимыми и нерастворимыми пищевыми волокнами, способствующий формированию стабильной структуры композита. В ранее проведенных исследованиях подчеркивается важность баланса между растворимыми и нерастворимыми пищевыми волокна-

ми для формирования функциональных свойств пищевых систем (Guillon & Champ, 2000; Franck, 2002), однако в них не рассматривалось непосредственное получение аналогичных композитов или применение комбинированной обработки, использованной в настоящей работе. В этой связи в настоящем исследовании установлено, что именно данное соотношение компонентов обеспечивает максимальную структурную стабильность и наилучшие показатели водоудерживающей способности.

Кроме того, увеличение доли инулина влияет на структурную организацию композита вследствие его высокой растворимости и способности связывать воду, что соответствует современным представлениям о поведении растворимых пищевых волокон в водных системах (Franck, 2002). Вместе с тем в настоящем исследовании установлено, что повышение содержания инулина приводит к относительному ослаблению структурной целостности композита, что, вероятно, связано с особенностями взаимодействия инулина с предварительно модифицированной пшеничной клетчаткой.

В настоящем исследовании установлено, что способ подготовки инулина имеет существенное значение. Совместный нагрев инулина с водой в микроволновом поле (СВЧ) способствует более равномерному распределению влаги и улучшает взаимодействие компонентов системы, что приводит к повышению ВУС. Полученные результаты согласуются с данными литературы о влиянии условий гидратации на свойства растворимых полисахаридов (Mensink, 2015), однако в настоящем исследовании дополнительно показано, что способ растворения инулина может рассматриваться как важный технологический фактор формирования структуры волокнистых композитов.

Таким образом, результаты исследования не только подтверждают ранее полученные данные о возможности модификации пищевых волокон биотехнологическими методами, но и расширяют существующие научные представления, демонстрируя эффективность комплексного подхода, включающего сочетание биохимических и физических воздействий и оптимизацию состава при разработке функциональных пищевых систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенного исследования подтверждают эффективность комплексного подхода к модификации пищевых волокон, основанного на сочетании ферментативной обработки и микроволнового воздействия, и демонстрируют его потенциал для целенаправленного управления функционально-технологическими свойствами пищевых волокон.

Научная новизна работы заключается в установлении синергетического эффекта комбинированной обработки пшеничной клетчатки, а также в обосновании значимости соотношения растворимых и нерастворимых компонентов и способа подготовки инулина как факторов формирования структуры композита.

Практическая значимость работы заключается в возможности применения разработанного подхода при создании функциональных мясных продуктов и других пищевых систем, требующих повышения водоудерживающей способности, текстурной стабильности и пищевой ценности. Использование предложенных композитов может быть рекомендовано для оптимизации технологических процессов и повышения качества готовой продукции.

Перспективы дальнейших исследований связаны с изучением влияния разработанных композитов на реологические и органолептические характеристики пищевых систем, а также их стабильность при хранении, что по-

зволит расширить возможности промышленного применения предложенной технологии.

ВКЛАД АВТОРОВ

Данильчук Т. Н.: разработка концепции; научное руководство; написание рукописи — рецензирование и редактирование.

Аль Дарвиш Маис: разработка концепции; проведение исследования; визуализация; написание черновика рукописи.

AUTHORS CONTRIBUTION

Danilchuk T.N.: conceptualization; supervision; writing — review & editing.

Al Darwish Mais: conceptualization; investigation; visualization; writing — original draft.

ЛИТЕРАТУРА

- Ряхимов, Р. Р., Лисицын, А. Б., Кидяев, С. Н., & Литвинова, Е. В. (2021). Инулин как основа создания гетерогенной композиции для использования в технологии мясных продуктов пониженной калорийности. *Вестник ВГУИТ*, 83(4), 219–225.
- Alahmari, L. A. (2024). Dietary fiber influence on overall health, with an emphasis on CVD, diabetes, obesity, colon cancer, and inflammation. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1510564. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1510564>
- Barber, T. M., Kabisch, S., Pfeiffer, A. F. H., & Weickert, M. O. (2020). The health benefits of dietary fibre. *Nutrients*, 12(10), 3209. <https://doi.org/10.3390/nu12103209>
- Cantu-Jungles, T. M., Zhang, X., Kazem, A. E., Iacomini, M., Hamaker, B. R., & Cordeiro, L. M. C. C. (2021). Microwave treatment enhances human gut microbiota fermentability of isolated insoluble dietary fibers. *Food Research International*, 143, 110293. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110293>
- Elleuch, M., et al. (2011). Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications. *Food Chemistry*, 124(2), 411–421.
- Franck, A. (2002). Technological functionality of inulin and oligofructose. *British Journal of Nutrition*, 87(S2), S287–S291. <https://doi.org/10.1079/BJN2002550>
- Fu, L., Zhang, G., Qian, S., Zhang, Q., & Tan, M. (2022). Associations between dietary fiber intake and cardiovascular risk factors: An umbrella review of meta-analyses of randomized controlled trials. *Frontiers in Nutrition*, 9, 972399. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.972399>
- Guillon, F., & Champ, M. (2000). Structural and physical properties of dietary fibres. *Food Research International*, 33(3–4), 233–245. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00038-7)
- Illippangama, A. U., Jayasena, D. D., Jo, C., & Mudannayake, D. C. (2022). Inulin as a functional ingredient and their applications in meat products. *Carbohydrate Polymers*, 275, 118706. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118706>
- Jackson, P. P. J., Wijeyesekera, A., & Rastall, R. A. (2022). Inulin-type fructans and short-chain fructooligosaccharides—their role within the food industry as fat and sugar replacers and texture modifiers—what needs to be considered! *Food Science & Nutrition*, 11, 17–38. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3040>
- Kamil, M. M., Mohamed, G. F., Ali, H. S., Ragb, G. H., & Zaky, A. A. (2024). Evaluation of inulin as a fat replacer in meat burger. *Egyptian Journal of Chemistry*, 67(3), 13–23. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2023.213926.8039>

- Kheto, A., Bist, Y., Awana, A., Kaur, S., Kumar, Y., & Sehrawat, R. (2023). Utilization of inulin as a functional ingredient in food: Processing, physicochemical characteristics, food applications, and future research directions. *Food Chemistry Advances*, 3, 100443. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100443>
- Li, X., Xu, Q., Tan, B., & Wang, L. (2025). Individual and combined effects of cold plasma and enzymatic hydrolysis modification on soluble dietary fiber in wheat bran: Structural, physicochemical and functional properties. *Journal of Cereal Science*, 123, 104196. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.104196>
- Mehta, N., Ahlawat, S. S., Sharma, D. P., & Dabur, R. S. (2015). Novel trends in development of dietary fiber rich meat products—A critical review. *Journal of Food Science and Technology*, 52(2), 633–647.
- Mensink, M. A., Frijlink, H. W., van der Voort Maarschalk, K., & Hinrichs, W. L. J. (2015). Inulin physicochemical characteristics. *Carbohydrate Polymers*, 130, 405–419. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.05.026>
- Montoya, L., Quintero, N., Ortiz, S., Lopera, J., Millán, P., & Rodríguez-Stouvenel, A. (2022). Inulin as a fat-reduction ingredient in pork and chicken meatballs: Its effects on physicochemical characteristics and consumer perceptions. *Foods*, 11(8), 1066. <https://doi.org/10.3390/foods11081066>
- Nikolić, I., Tomić, A., Pezo, L., Tasić, T., Šoronja-Simović, D., & Filipčev, B. (2023). Technological characteristics of wheat-fiber-based fat mimetics in combination with food additives. *Sustainability*, 15(3), 1887. <https://doi.org/10.3390/su15031887>
- Stanišić, N., Kurćubić, V. S., Stajić, S. B., Tomasevic, I. D., & Tomasevic, I. (2025). Integration of dietary fibre for health benefits, improved structure, and nutritional value of meat products and plant-based meat alternatives. *Foods*, 14(12), 2090. <https://doi.org/10.3390/foods14122090>
- Zhang, M.-Y., Liao, A.-M., Thakur, K., Huang, J.-H., Zhang, J.-G., & Wei, Z.-J. (2019). Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution. *Food Chemistry*, 297, 124983. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124983>

REFERENCES

- Alahmari, L. A. (2024). Dietary fiber influence on overall health, with an emphasis on CVD, diabetes, obesity, colon cancer, and inflammation. *Frontiers in Nutrition*, 11, 1510564. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1510564>
- Barber, T. M., Kabisch, S., Pfeiffer, A. F. H., & Weickert, M. O. (2020). The health benefits of dietary fibre. *Nutrients*, 12(10), 3209. <https://doi.org/10.3390/nu12103209>
- Cantu-Jungles, T. M., Zhang, X., Kazem, A. E., Iacomini, M., Hamaker, B. R., & Cordeiro, L. M. C. C. (2021). Microwave treatment enhances human gut microbiota fermentability of isolated insoluble dietary fibers. *Food Research International*, 143, 110293. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110293>
- Elleuch, M., et al. (2011). Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications. *Food Chemistry*, 124(2), 411–421.
- Franck, A. (2002). Technological functionality of inulin and oligofructose. *British Journal of Nutrition*, 87(S2), S287–S291. <https://doi.org/10.1079/BJN2002550>
- Fu, L., Zhang, G., Qian, S., Zhang, Q., & Tan, M. (2022). Associations between dietary fiber intake and cardiovascular risk factors: An umbrella review of meta-analyses of randomized controlled trials. *Frontiers in Nutrition*, 9, 972399. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.972399>
- Guillon, F., & Champ, M. (2000). Structural and physical properties of dietary fibres. *Food Research International*, 33(3–4), 233–245. [https://doi.org/10.1016/S0963-9969\(00\)00038-7](https://doi.org/10.1016/S0963-9969(00)00038-7)
- Illippangama, A. U., Jayasena, D. D., Jo, C., & Mudannayake, D. C. (2022). Inulin as a functional ingredient and their applications in meat products. *Carbohydrate Polymers*, 275, 118706. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118706>
- Jackson, P. P. J., Wijeyesekera, A., & Rastall, R. A. (2022). Inulin-type fructans and short-chain fructooligosaccharides—their role within the food industry as fat and sugar replacers and texture modifiers—what needs to be considered! *Food Science & Nutrition*, 11, 17–38. <https://doi.org/10.1002/fsn3.3040>
- Kamil, M. M., Mohamed, G. F., Ali, H. S., Ragb, G. H., & Zaky, A. A. (2024). Evaluation of inulin as a fat replacer in meat burger. *Egyptian Journal of Chemistry*, 67(3), 13–23. <https://doi.org/10.21608/EJCHEM.2023.213926.8039>
- Kheto, A., Bist, Y., Awana, A., Kaur, S., Kumar, Y., & Sehrawat, R. (2023). Utilization of inulin as a functional ingredient in food: Processing, physicochemical characteristics, food applications, and future research directions. *Food Chemistry Advances*, 3, 100443. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100443>

- Li, X., Xu, Q., Tan, B., & Wang, L. (2025). Individual and combined effects of cold plasma and enzymatic hydrolysis modification on soluble dietary fiber in wheat bran: Structural, physicochemical and functional properties. *Journal of Cereal Science*, 123, 104196. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2025.104196>
- Mehta, N., Ahlawat, S. S., Sharma, D. P., & Dabur, R. S. (2015). Novel trends in development of dietary fiber rich meat products—A critical review. *Journal of Food Science and Technology*, 52(2), 633–647.
- Mensink, M. A., Frijlink, H. W., van der Voort Maarschalk, K., & Hinrichs, W. L. J. (2015). Inulin physicochemical characteristics. *Carbohydrate Polymers*, 130, 405–419. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.05.026>
- Montoya, L., Quintero, N., Ortiz, S., Lopera, J., Millán, P., & Rodríguez-Stouvenel, A. (2022). Inulin as a fat-reduction ingredient in pork and chicken meatballs: Its effects on physicochemical characteristics and consumer perceptions. *Foods*, 11(8), 1066. <https://doi.org/10.3390/foods11081066>
- Nikolić, I., Tomić, A., Pezo, L., Tasić, T., Šoronja-Simović, D., & Filipčev, B. (2023). Technological characteristics of wheat-fiber-based fat mimetics in combination with food additives. *Sustainability*, 15(3), 1887. <https://doi.org/10.3390/su15031887>
- Ryakhimov, R. R., Lisitsyn, A. B., Kidyayev, S. N., & Litvinova, Ye. V. (2021). Inulin kak osnova sozdaniya geterogennoy kompozitsii dlya ispol'zovaniya v tekhnologii myasnykh produktov ponizhennoy kaloriynosti. *Vestnik VGUIT*, 83(4), 219–225.
- Stanišić, N., Kurćubić, V. S., Stajić, S. B., Tomasevic, I. D., & Tomasevic, I. (2025). Integration of dietary fibre for health benefits, improved structure, and nutritional value of meat products and plant-based meat alternatives. *Foods*, 14(12), 2090. <https://doi.org/10.3390/foods14122090>
- Zhang, M.-Y., Liao, A.-M., Thakur, K., Huang, J.-H., Zhang, J.-G., & Wei, Z.-J. (2019). Modification of wheat bran insoluble dietary fiber with carboxymethylation, complex enzymatic hydrolysis and ultrafine comminution. *Food Chemistry*, 297, 124983. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.124983>