

УДК 633.521; 582.751.42; 665.941

ГИДРОКОЛЛОИДЫ СЕМЯН ЛЬНА: СИНЕРГИЗМ ИХ СМЕСЕЙ В ПИЩЕВЫХ СИСТЕМАХ (ОБЗОР)

© В.И. Ущаповский*, А.А. Яковлева, И.Э. Миневич

Федеральный научный центр лубяных культур, Комсомольский пр., 17/56,
Тверь, 170041, Россия, v.uschapovsky@fnclk.ru

К гидроколлоидам относят полисахариды и протеины, строение которых определяют особенности поведения каждого из них. Они обладают широким спектром функционально-технологических свойств и влияют на текстуру растворов и пищевых продуктов. Их используют для стабилизации, желирования, загущения, увлажнения, предотвращения кристаллизации и регулирования аромата. Льняные гидроколлоиды – высокомолекулярные полисахариды, сконцентрированные в льняной слизи, которая покрывает оболочку семян льна. На основе широкого спектра таких функциональных свойств как растворимость, пеностойчивость, вязкость, а также эмульгирующая и стабилизирующая способность, льняные гидроколлоиды можно использовать в качестве загустителя, стабилизатора и влагоудерживающего агента. В промышленности преимущественно применяют смеси гидроколлоидов, поскольку это позволяет нивелировать недостатки отдельных компонентов и получать продукты с уникальными характеристиками. В смесях полисахариды семян льна влияют на физико-химические, технологические и реологические свойства пищевой системы. Это может приводить к изменениям таких параметров, как водоудерживающая способность, эластичность, жесткость, вязкость, набухаемость, упругость и растворимость комплекса. Исследование взаимодействия льняных полисахаридов семян льна с гидроколлоидами в разных дисперсных системах и поиск синергетических эффектов могут служить основой для создания инновационных и устойчивых ингредиентов с заданными характеристиками востребованных в производстве продуктов. Для создания стабильных смесей гидроколлоидов необходимо учитывать характеристики каждого компонента и их совместное взаимодействие в продукте. В работе представлен обзор химического состава и функциональные свойства полисахаридов семян льна, а также их смесей с промышленными гидроколлоидами.

Ключевые слова: полисахариды семян льна, гидроколлоиды, камеди, синергизм, ассоциативное взаимодействие гидроколлоидов, функционально-технологические свойства.

Для цитирования: Ущаповский В.И., Яковлева А.А., Миневич И.Э. Гидроколлоиды семян льна: синергизм их смесей в пищевых системах (обзор) // Химия растительного сырья. 2025. №4. С. 25–40. <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250416916>.

Введение

В настоящее время производство основных видов продуктов питания, как традиционных, так и детского, диетического, специализированного, спортивного питания, невозможно без применения технологических и функциональных ингредиентов. Их использование связано с разнообразием технологических функций и возможностью создавать продукты заданного состава, аромата, вкуса, текстуры и качества в течение всего срока годности. Потребителями являются практически все отрасли пищевой промышленности: мясоперерабатывающая, хлебопекарная, кондитерская, молочная, масложировая.

Среди пищевых ингредиентов большой объем потребления приходится на гидроколлоиды. Под термином «гидроколлоид» обозначают некрахмальные полисахариды – гетерогенную группу длинноцепочечных полимеров [1].

В структуре глобального рынка пищевых ингредиентов гидроколлоиды занимают почти пятую часть от общего объема (рис. 1).

В России при производстве пищевой продукции используют более 50 наименований гидроколлоидов, не считая комплексных пищевых добавок, ассортимент которых постоянно увеличивается [3]. При таком большом значении гидроколлоидов для отечественного пищевого производства российский рынок пищевых ингредиентов по-прежнему зависит от импорта. Например, в 2022 г. импорт пектина составлял 4.5 тыс. т,

* Автор, с которым следует вести переписку.

гуаровой камеди – 3.3 тыс. т, гуммиарабика – 1.7 тыс. т, каррагинана из водорослей – 1.5 тыс. т [4]. В связи с этим развитие отечественного производства гидроколлоидов, поиск и изучение новых перспективных источников, их комплексов и синергетических смесей становится стратегически важным шагом для снижения зависимости от импорта.

Производство семян льна в России, по данным ФГБУ «Центр Агроаналитики», составляет свыше 1.5 млн тонн [5]. Россия является мировым лидером по экспорту семян масличного льна. В связи с чем увеличение комплексной переработки семян льна на отечественных предприятиях, создание конкурентоспособной продукции из этого сырья является актуальной задачей.

Большое значение гидроколлоидов для пищевой промышленности связано с их разнообразными функционально-технологическими свойствами. Они характеризуются высокими структурообразующими, влагоудерживающими, стабилизирующими свойствами, регулируя при этом реологические свойства и структуру готового продукта. Несмотря на то, что их концентрации в рецептурах составляют обычно не более 1%, гидроколлоиды оказывают значительное влияние на текстурные и органолептические свойства пищевых продуктов [6].

Гидроколлоиды повышают вязкость, контролируют синерезис, стабилизируют pH, повышают устойчивость к воздействию солей и нагреванию. При простоте использования им характерны высокое пленко- и гелеобразование, стабилизация эмульсий, способность к суспензированию, прозрачность, связующие свойства.

Гидроколлоиды в большой степени обеспечивают требуемое современным рынком качество продуктов и возможность создавать популярные в настоящее время низкокалорийные «легкие», узкоспециализированные – вегетарианские, безглютеновые продукты.

Существует несколько классификаций гидроколлоидов: по происхождению, функциональным свойствам, растворимости и пр. Классификация по происхождению дает наиболее полное представление о разнообразии веществ, объединенных в группу гидроколлоидов (рис. 2).

По происхождению гидроколлоиды разделяют на три основные группы: растительные, животные и продуцируемые микроорганизмами. К гидроколлоидам, продуцируемым микроорганизмами, относят ксантановую и геллановую камеди, а животного происхождения – желатин и хитин [8].

Большую группу гидроколлоидов представляют продукты переработки растительного сырья – растворимые в воде или набухающие в ней полимеры, относящиеся к классу полисахаридов, состоящие из ряда моносахаридов – глюкозы, галактозы, арабинозы, маннозы, рамнозы, глюкуроновых кислот. Растительные гидроколлоиды полисахаридного происхождения в свою очередь, подразделяют на три категории [9–11]:

- экссудаты (смолы, выделяемые растениями);
- камеди и слизи (из различных семян);
- гидроколлоиды плодов и овощей (производные, получаемые модификацией полисахаридов природного происхождения, например, клетчатки, крахмала).

Гидроколлоиды, полученные из водорослей, выделяют как отдельную категорию. Примерами могут быть агар, каррагинан (карраген), альгинат.

По химическому строению гидроколлоиды представляют собой биополимеры, варьирующиеся от гетерополисахаридов до гликопротеинов, и имеют структуры от неразветвленных цепей до развитленных молекулярных форм [12].

Разнообразие свойств растительных полисахаридов определяется их химической структурой. Гидроколлоиды обладают высокой молекулярной массой и легко растворяются (или частично растворяются) в воде, образуя вязкие дисперсии или гели. Их поведение в растворах зависит от pH среды, термической обработки, условий хранения и т.д.

В последнее время в пищевой промышленности для улучшения функционально-технологических свойств готовой продукции активно используются различные комбинации гидроколлоидов с синергическим эффектом. Например, при комбинировании ксантановой камеди с гуаровой повышается вязкость растворов, что особенно важно при разработке стабильных эмульсий и суспензий. Подобный эффект наблюдается и при сочетании 1-каррагинана с крахмалом, где усиление вязкости раствора улучшает структуру конечного продукта. Другие комбинации гидроколлоидов направлены на создание гелеобразующих систем. Так, камедь рожкового дерева или конжакового маннана в сочетании с к-каррагинаном или ксантановой камедью способствует формированию плотных гелей [13].

Тип гидроколлоида, его состав, условия обработки и концентрация влияют на его физико-химические и реологические свойства и на результат взаимодействия с другими гидроколлоидами [3]. Один и тот же гидроколloid в зависимости от его концентрации может выступать или как загуститель, или как гелеобразователь [14]. Гелеобразование происходит в результате переплетения и перекрестного связывания полимерных цепей, что приводит к формированию трехмерной сетчатой структуры – устойчивой матрицы, которая способна удерживать значительное количество воды и обеспечивать гелю его характерные реологические свойства [15].

Ассоциативное взаимодействие различных гидроколлоидов позволяет получать синергические смеси для создания структурно-сложных систем с улучшенными технологическими свойствами. В зависимости от комбинации гидроколлоидов раствор может перейти в гелеобразное состояние, выпадать в осадок или не проявлять ассоциаций. При высоких концентрациях и отсутствии ассоциаций раствор со временем может разделиться на две жидкие фазы, каждая из которых будет обогащена одним из гидроколлоидов [16]. На рисунке 3 представлены результаты взаимодействия различных растворов гидроколлоидов.

Изменение свойств гидроколлоидов возможно путем модификации (пример, модифицированный крахмал), комбинирования или введения дополнительных фракций гидроколлоидов. Введение дополнительного гидроколлоида возможно как механическим смешиванием полисахаридов, так и путем создания химически сплитых полисахаридов [14]. При комбинировании нежелирующих загустителей с гелеобразователями синерезис геля понижается и растет стабильность при размораживании замороженного продукта.

Для формирования стабильной смеси, то есть комбинирования гидроколлоидов, необходимы данные о характеристиках каждого компонента в отдельности и их влияния на свойства друг друга.

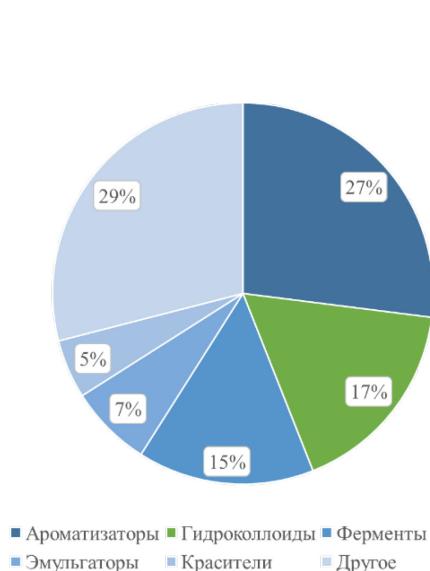


Рис. 1. Структура глобального рынка пищевых добавок (адаптировано из [2])



Рис. 2. Классификация гидроколлоидов по происхождению (адаптировано из [7])

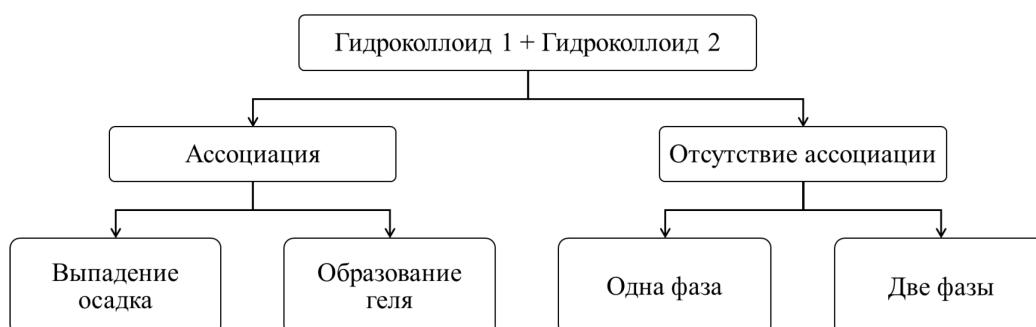


Рис. 3. Схема взаимодействий гидроколлоидов

С целью расширения ассортимента отечественных ингредиентов класса гидроколлоидов рассмотрены химический состав, функциональные свойства и смеси гидроколлоидов семян льна, проявляющие синергетический эффект.

Области применения льняных гидроколлоидов

Перспективы использования в Российской Федерации льняных гидроколлоидов в пищевых системах обусловлены доступностью сырья, простотой экстракции целевых веществ из семян льна и удовлетворительными функционально-технологическими свойствами данных полисахаридов. Полисахарида семян льна рекомендуют использовать при производстве хлебобулочных и мучных кондитерских изделий для повышения показателей качества и пищевой ценности [17]. Полисахарида семян льна могут выступать в качестве связующих, водоудерживающих агентов и текстурантов. В лечебном деле полисахариды применяют для уменьшения раздражения при воспалительных и язвенных процессах на слизистых оболочках, а также в качестве обволакивающего и смягчающего средства [18]. Благодаря своей структуре и наличию фенольных соединений, таких как кофейная кислота, *n*-кумаровая кислота, эпикатехин, эллаговая, коричная и ванилиновая кислоты полисахарида семян льна обладают антиоксидантной активностью. Это оказывает положительный эффект при профилактике диабета, снижая гликемический индекс и уровень холестерина в крови [19]. Помимо пищевых и фармацевтических целей полисахарида семян льна в сочетании с другими гидроколлоидами могут выступать в качестве биофлокулянтов для очистки вод и реагентов в буровых растворах [20].

Состав, структура и свойства гидроколлоидов семян льна

Гидроколлоиды семян льна представляют собой полисахариды, являющиеся основным компонентом слизи, которая образуется во вторичной клеточной стенке эпидермальных клеток оболочки семян льна (2 на рисунке 4). На рисунке 4 представлен поперечный срез оболочки семени льна.

Содержание полисахаридов слизи семян льна варьирует в интервале 3–10% от общего веса семени [22–24] и составляет 83% от массы самой слизи [25]. Льняные полисахариды представляют собой цепи из чередующихся остатков D-галактуроновой кислоты, L-рамнозы и D-арabinозы с боковыми цепями, состоящими из остатков D-галактозы, L-рамнозы и D-ксилозы [26]. Полисахаридный комплекс в слизи семян льна состоит из двух фракций: нейтральной ~75% (арбиноксилановые и галактоглюкановые кислоты) и кислой ~25% (в основном галактуроновые кислоты). Нейтральные полисахариды или арабиноксиланы состоят из остатков ксилана, соединенных β -(1→4) связями в основной цепи, и в основном L-арabinозы в боковых цепях. Кислая фракция содержит L-рамнозу, D-галактозу, D-галактуроновую кислоту. Главная цепь кислой фракции, которая представлена в основном рамногалактуронаном I типа, устроена сложнее. Она имеет разветвленную структуру и состоит из повторяющегося дисахаридного звена. Опорными скелетными полисахаридами кислой фракции считаются полисахариды из остатков рамнозы, соединенных в положении α (1→2), и полисахарид из остатков галактуроновой кислоты. Боковые цепи образованы большей частью галактозой [27]. Соотношение моноз полисахаридов льняных слизей (ксилоза, глюкоза, галактоза, рамноза, фукоза и галактуроновая кислота) определяется сортовыми различиями, условиями выделения полисахаридного комплекса льняной слизи: температурой, ионной силой, pH растворов, продолжительности экстракции [19, 28, 29], поэтому единой канонической формулы у полисахаридов семян льна нет. Структура основных полисахаридов нейтральной и кислой фракций льняных слизей, определенная методами различных видов гидролиза авторами [30, 31], схематично представлена на рисунке 5.

В зависимости от генотипа, технологии производства и условий хранения семян состав полисахаридного продукта, выделенного из льняных слизей, варьирует: 60–90% углеводов, 2–20% белков и 5–12% зольных веществ [24–26]. Его усредненный состав представлен на рисунке 6.

Содержание белка в составе гидроколлоидов семян льна играет немаловажную роль в их функциональных свойствах. В исследовании [32] было показано, что удаление белков из полисахаридного комплекса льняных слизей снижает поверхностную активность и эмульгирующую стабильность. Помимо этого, на функциональные свойства системы белок-полисахарид оказывает влияние само взаимодействие белков и полисахаридов, которое зависит от их соотношения, способа обработки, изоэлектрической точки белка, pH и температуры раствора [33]. При этом, по данным авторов [34], белок находится в ассоциатах с полисахаридами кислой фракции, а в нейтральной фракции белок не определен.

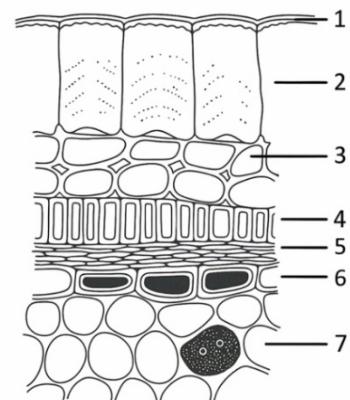


Рис. 4. Клеточная структура оболочки семени льна:
1 – слой кутикулы, 2 – слизистый эпидермис,
3 – толстостенные клетки гиподермы, 4 – одревесневшие
клетки, 5 – пленчатый слой, 6 – пигментные клетки,
7 – алейроновый слой (адаптировано из [21])

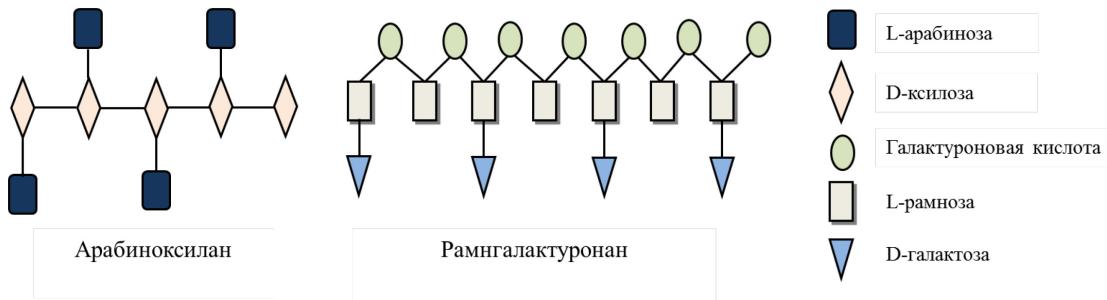


Рис. 5. Структура нейтральной и кислой фракций полисахаридов льняных слизей

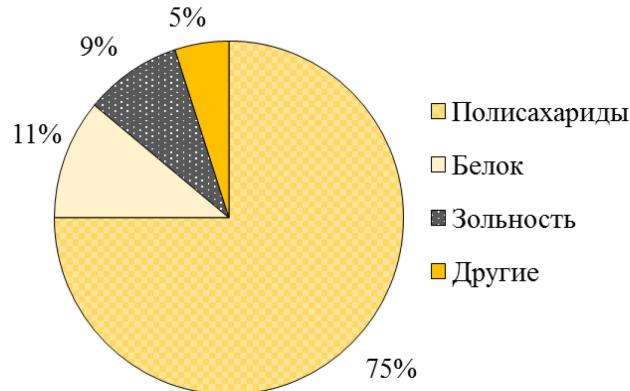


Рис. 6. Компонентный состав гидроколлоидов семян льна

Для пищевых систем большое значение имеют такие свойства гидроколлоидов, как реологическое поведение в растворах, функционально-технологические свойства: водо- и жироудерживающая способности, эмульгирующая способность, гелеобразование и др.

Свойства гидроколлоидов семян льна, их реологическое поведение в растворах, функциональные свойства в большой степени определяются соотношением нейтральной и кислой фракции, содержанием белка, который экстрагируется совместно с полисахаридами из семян льна и способом сушки [35, 36].

Гидроколлоиды семян льна характеризуются низкой вязкостью, например, на 50% ниже вязкости гуаровой камеди и камеди рожкового дерева [37].

По данным авторов [38], гидроколлоиды семян льна проявляют псевдопластичное поведение во всем диапазоне скоростей сдвига с уменьшением вязкости. Однако растворы их кислой фракции демонстрируют Ньютона тип поведения [29, 39].

Анализ опубликованных данных свидетельствует, что поведение гидроколлоидов семян льна в водных системах определяется составом полисахаридов: они могут быть вязкими, эластичными или вязкоупругими в зависимости от количества нейтральных или кислых компонентов в различных сортах. Таким

образом, реологические показатели полисахаридов льняной слизи являются результатом синергетического взаимодействия нейтральной и кислой фракций. Гидроколлоиды семян льна характеризуются высокой водоудерживающей способностью, которая сравнима с аналогичным показателем гуаровой камеди [40, 41].

В работе [42] показан удовлетворительный уровень таких свойств гидроколлоидов семян льна, как растворимость, пеноустойчивость, что позволяет рассматривать их в качестве аналога гуммиарабика.

Высокая водоудерживающая способность и способностью к загущению позволяют их использовать в качестве загустителя в составе напитков и агентов для удержания влаги в хлебобулочных изделиях [19].

Кислая фракция гидроколлоидов семян льна может использоваться в качестве гелеобразователя в пищевой и фармацевтической промышленности (например, для создания желе, стабилизаторов или пленок). Нейтральная фракция больше подходит для повышения вязкости, например, в напитках или соусах. Гели и пленки на основе льняных гидроколлоидов могут использоваться в различных пищевых и медицинских целях [43].

На основе широкого спектра функциональных свойств они могут быть использованы в самых различных направлениях: заменителя жира в выпечке [44], модификатора текстуры для молочных продуктов (сыров, йогурта, мороженого) [45, 46], структурообразующего агента для хлебобулочных изделий [47], стабилизатора мороженого и эмульсии типа «масло в воде» (заправка для салатов) [48, 49].

Синергетические смеси льняных гидроколлоидов с промышленными

По своим физико-химическим свойствам льняные гидроколлоиды близки к гуммиарабику [50]. В контексте их сходства с растительными камедями анализ исследований их взаимодействия с другими гидроколлоидами является важным для понимания их функциональной значимости в синергетических смесях.

Классическим представителем гидроколлоидов, способным эффективно взаимодействовать с камедями и растительными полисахаридами является агар-агар. Он нерастворим в холодной воде и растворяется только при температуре выше 90 °C, образуя прозрачный и ограниченно вязкий коллоидный раствор. При охлаждении до температур 35–40 °C агар становится чистым и крепким гелем, который является термообратимым [51]. Агар-агар представляет собой смесь полисахаридов, образованных линейно связанными право- и левовращающими галактозами, которые позволяют агарозе формировать трёхмерные гелевые сети за счет водородных связей. [16]. Агароза создает жесткие гели при охлаждении, так как водородные связи и гидрофобные взаимодействия стабилизируют ее структуру. Агар, как самостоятельный гелеобразователь, широко используется в пищевой промышленности, биотехнологии (например, для культивирования клеток и тканей), а также в электрофорезе и хроматографии [52].

Для придания желаемых функционально-технологических и органолептических свойств агар зачастую комбинируют с другими гидроколлоидами. Например, добавление камеди рожкового дерева к агару увеличивает прочность, эластичность и деформируемость геля, снижая синерезис. Смешивание агарозы с галактоманнаном создает отчетливую структуру геля, а введение альгината натрия снижает прочность геля за счет образования поперечных связей. Добавление каррагинана снижает плотность, прочность и хрупкость геля из агара [53].

Комбинированное агара и полисахаридов семян льна способно улучшать механическую прочность и эластичность гелевых структур, что необходимо при разработке биокомпозитов для пищевой упаковки. По данным [54], прочность гелей при использовании агара с полисахаридами льна увеличивается в 8 раз, а растворимость композита снижается со 100 до 53% в сравнении с контрольным гелем из чистых полисахаридов льна. В свою очередь, льняные полисахариды в комплексе с агаром придают гелям эластичность и способность к деформации, так как агар создает жесткие и стабильные гели, но ограниченно эластичные, что необходимо при создании упаковочных материалов. Данный синергетический эффект актуален при разработке экологически чистой пищевой пленки, которая должна быть прочной и обладать высокой устойчивостью к деформациям и разрывам. В работе [55] биокомпозитные пленки получали сочетанием агара и крахмала с использованием полисахаридов семян льна как связующего агента. В результате было отмечено антибактериальное действие полисахаридов семян льна в составе биокомпозитных пленок, благодаря наличию в слизи льна таких функциональных групп как полифенолы и лигнаны, которые могут разрушать клеточные стенки и мембранны бактерий. Наличие антибактериальных свойств у биокомпозитных пленок как из чистых полисахаридов семян льна, так и в составе комплексов (например, с хитозаном), было показано также и в других работах [43, 56, 57].

Эффективные пленки для покрытия сыра, фруктов и овощей на основе бинарных смесей льняных гидроколлоидов с ксантаном, хитозаном, альгинатами разработаны в работах [58–60].

В производстве продуктов питания еще одним распространенным и универсальным технологическим ингредиентом является крахмал. Его химический состав, физико-химические, технологические и функциональные свойства зависят от синтеза и исходного сырья: картофель, кукуруза, пшеница, рожь, рис, гречиха и др. [61]. Крахмал состоит из двух основных полисахаридов: амилозы (линейной) и амилопектина (разветвленной структуры). Растворимость крахмала и способность к гелеобразованию зависит от содержания амилозы, так как ее молекулы могут образовывать водородные связи между собой. Сила набухания и водоудерживающая способность зависят от количества амилопектина из-за его разветвленной структуры. Неповрежденные крахмальные зерна нерастворимы в воде при комнатной температуре и слабом нагревании, в горячей воде он набухает и частично растворяется, образуя коллоидный раствор – крахмальный клейстер. Крахмал обладает слабой структурой и ограниченным применением в пищевых технологиях, поэтому его модифицируют путем сшивания, стабилизации или ферментативной конверсии. Предварительная модификация крахмала иногда необходима для перевода крахмала в растворимую форму для полного диспергирования и быстрой скорости образования гелеобразного и вязкого состояния [62].

Для улучшения свойств крахмала его часто смешивают с другими гидроколлоидами, создавая полисахаридные комплексы. Эти смеси используются в качестве загустителей, стабилизаторов или для связывания воды, что улучшает обработку продуктов и повышает их стабильность. Гидроколлоиды, которые обладают высокой водоудерживающей способностью, могут замедлять ретроградацию крахмала. Кроме этого, гидрофильтральная природа камедей способна приводить к снижению жироудерживающей способности в смесях с крахмалом, что может быть актуальным при разработке диетических продуктов питания.

Тип гидроколлоида, который используется в сочетании с крахмалом, значительно влияет на функциональные и реологические свойства композитной смеси. В работе [63] показано, что смесь картофельного крахмала и ксантановой камеди (в соотношении 80 : 1) значительно улучшила кислотостойкость и вязкость томатной пасты, обеспечивая улучшенные загущающие свойства и органолептические характеристики по сравнению с чистым или модифицированным крахмалом. При сравнении гуаровой и ксантановой камедей в сочетаниях с крахмалом было определено, что композиты с ксантановой камедью обладают лучшей водоудерживающей способностью, клейстеризацией и растворимостью [64].

В исследовании [65] продемонстрировано влияние полисахаридов семян льна на реологические свойства крахмалов, в результате чего кажущая вязкость комплекса росла с увеличением содержания льняных полисахаридов (при температуре 25 °C коэффициент консистенции вырос с 10 до 40 Па·с) из-за взаимодействия молекул полисахарида с молекулами крахмала. Данная работа показала, что льняные полисахариды увеличивают показатель упругости и вязкости смесей кукурузного крахмала и делают их более прочными без изменения самой структуры крахмала, однако термическая стабильность у комплексов снижается. Таким образом, сочетание полисахаридов семян льна с кукурузным крахмалом влияет на термическую стабильность смеси, делая ее более жесткой, но менее стабильной при росте температур.

В работе [66] изучали смесь гидроколлоидов из рисового крахмала и льняных полисахаридов с целью улучшения свойств крахмала без модификаций для удовлетворения рыночного спроса на доступные и безопасные пищевые ингредиенты. В результате исследования было отмечено, что рост вязкости (на 56%), упругости (с 0.3 до 1.0) и адгезии (с 0.1 до 0.4 мДж) прямо пропорционален увеличению содержания полисахаридов льна в составе комплекса, а синерезис гелей обратно пропорционален и был минимален (0.6%) при максимальном количестве полисахаридов льна (12%) в смеси в первые 4 дня до повторного замораживания. Вероятно, повышение концентрации льняных полисахаридов приводит к улучшению вязкости гелей при набухании крахмальных гранул, что указывает на способность полисахаридов загустевать. В работе также было отмечено снижение температуры клейстеризации смеси на 14 °C в присутствии полисахаридов семян льна.

В работе [62] полисахариды семян льна были смешаны с модифицированным крахмалом и/или ксантановой камедью для оценки их влияния на реологические и органолептические свойства пищевых комплексов, которые используются в лечебно-профилактических целях. По данным автором основным фактором в комплексах, влияющим на вязкостные характеристики загустителя, необходимого для создания продукта с целью лечения дисфагии, было наличие полисахаридов семян льна в смеси гидроколлоидов. Также сочетание льняных полисахаридов с крахмалом и ксантановой камедью способствовало достижению требуемых показателей текстуры смеси с использованием меньшего количества сырья в сравнении с коммерческими гидроколлоидами. Синергетическое взаимодействие модифицированного крахмала с полисахаридами семян льна также способствовало формированию более прочной структуры геля.

Добавление льняных полисахаридов не только повышает функциональные свойства крахмала (повышают их стабильность и снижают ретроградацию), но и способствует улучшению текстуры готовых продуктов. Синергетические эффекты, вероятно, происходят благодаря взаимодействию льняных полисахаридов с молекулами крахмала, где гидрофильные свойства и водородные взаимодействия усиливают гелеобразование, стабилизируют структуру и препятствуют кристаллизации крахмала при охлаждении. Данное сочетание может быть использовано для улучшения текстуры и продления срока годности крахмалосодержащих продуктов. Комплекс крахмал-полисахарид будет актуальным при использовании в качестве пищевой добавки в таких продуктах как супы, замороженные десерты и соусы.

К широко используемым гидроколлоидам также относятся галактоманнаны, такие как камедь гуара, рожкового дерева и кустарника тары [51]. Гуаровая камедь представляет собой измельченный эндосперм семян дерева гуара *Cyamopsis tetragonoloba* L. У гуара количество галактоманнана составляет до 35% от сухой массы семени [67]. Гуаровую камедь используют в качестве пищевой добавки (Е-412) в молочных, мясных и хлебобулочных изделиях благодаря своим загущающим и стабилизирующими свойствам [68]. Галактоманнаны гуара легко растворяются в холодной воде с образованием вязкого коллоидного раствора даже при малых концентрациях. В отличие от других гидроколлоидов гуаровая камедь – неионогенный полисахарид и не влияет на ионную силу среды, изменение которой может повлиять на свойства гелей. Молекула гуара образована прямой цепью маннозы с присоединенными боковыми группами галактозы [67]. Молекула галактоманнана гуаровой камеди имеет наибольшую молекулярную массу среди водорастворимых натуральных гидроколлоидов.

Исследования показывают, что сочетание гуаровой камеди с другими гидроколлоидами значительно улучшает технологические свойства пищевых продуктов. Например, в работе [69] увеличение содержания гуаровой камеди на 0.5% в смеси с каппа-каррагинаном снижает синерезис 1% геля на 20.5% по сравнению с 1% гелем чистого каррагинана. В исследовании [70] показали, что смешивание в равных пропорциях гуаровой камеди с гуммиарабиком (0.4% добавка) улучшало реологические (вязкость и консистенция) и органолептические свойства молочного напитка.

Смеси на основе полисахаридов льна и гуаровой камеди также способны оказывать положительное влияние на структуру и свойства продукта с использованием комплексного загустителя. При исследовании смеси с полисахаридами семян льна (0.5%) и гуаровой камедью в различных концентрациях было обнаружено, что происходит увеличение водоудерживающей способности с 47% у чистых полисахаридов льна до 84% и 92% при добавлении 0.25% и 1.0% гуаровой камеди соответственно [71]. Реологические свойства данного комплекса прямо пропорционально увеличиваются от концентрации гуара в составе смеси. Введение 1% гуаровой камеди в смесь не изменяет текстуру геля (жесткость гидрогеля незначительно снижается с 291 до 287 г), а упругость гелей снижалась с 0.978 до 0.901. Упругость гидрогеля оставалась такой же, как и у полисахаридов льна, при введении гуара в комплекс до 0.5%. Прочность (деформация при разрыве) сложного геля из гуара и полисахаридов льна была ниже 50%, в то время как у гелей из чистых полисахаридов льна она составляла от 50 до 75%. Твердость гелей на основе полисахаридов льна растет с увеличением концентрации гуара. По данным авторов, смесь имеет практическую значимость в пищевых продуктах, требующих увеличения удержания влаги и снижения твердости или упругости. Таким образом, полисахариды семян льна в комплексе с гуаровой камедью улучшают водоудерживающую способность, модифицируют текстуру и способны улучшать эмульгирующие свойства, что может быть использовано для создания стабильных эмульсионных продуктов.

Кроме галактоманнанов популярным представителем маннанов, полисахаридов, состоящих из моносахаридов маннозы, являются глюкоманнаны. Глюкоманнаны – углеводные полимеры, широко распространенные как в лиственных, так и в хвойных растениях, выполняющие запасающие и структурные функции. Полимерная последовательность линейна и состоит из остатков сахаров (1→4)- β -d-глюкопиранозы и (1→4)- β -d-маннозы в соотношении 1 : 6 [72]. Конжаковая камедь (конъячная камедь), которая относится к группе глюкоманнанов, является представителем нейтральных полисахаридов. Это частично ацетилированный полисахарид, получаемый из клубней *Amorphophallus konjac*, который используется в пищевой промышленности на протяжении многих лет, особенно в Индии, Пакистане и Японии. Конжаковый маннан содержится в клубнях порядка 8–10% [16]. Образование гелей и физико-химические показатели конжакового маннана зависят от ацетильных групп. Гелеобразование конжака происходит в процессе деацетилирования глюкозного остатка [73].

Камедь конжака служит как для гелеобразования, так и для загущения, придания текстуры и связывания воды. Конжаковая камедь способна проявлять синергетические эффекты с другими биополимерами [74], образуя при этом эластичные и термообратимые гели. Гели из чистой конжаковой камеди обладают «живительной» текстурой. Примерами синергетических эффектов с образованием эластичного геля с использованием камеди конжака могут быть комплексы с ксантановой камедью и сывороточным белком [75].

В работе [76] изучали раствор загустителя (2.4%), состоящий из 2.0% смеси полисахаридов семян льна, конжакового глюкоманнана в разных концентрациях и 0.4% агара, который выступал в качестве компонента, который формирует жесткую гелевую структуру и сохраняет форму гелеобразных агентов. В результате было показано, что соотношение льняных полисахаридов, конжаковой камеди и агара 6 : 4 и 4 : 6 улучшало водоудерживающую способность в 2.3–2.5 раза в сравнении с контрольными образцами из чистых растворов полисахаридов семян льна и конжакового глюкоманнана, увеличение коэффициента конжака снижало растворимость комплексного геля. Кроме этого, авторы отметили, что способность к набуханию загустителя, которая связана с плотностью и структурой матрицы гидроколлоидов, а также взаимодействием полимер-растворитель [77] была оптимальной у образцов также с соотношением 6 : 4 и 4 : 6. Введение полисахаридов льна в сложную смесь гидроколлоидов с камедью конжака увеличивало эластичность, что может быть связано с водоудерживающей способностью льняными полисахарида [78].

В другой работе [79] отмечено, что лучший показатель водоудерживающей способности и способности к набуханию был у комплекса с соотношением конжакового глюкоманнана и полисахаридов льна 5 : 5. Синергетическое взаимодействие между данными гидроколлоидами способствовало увеличению вязкости раствора геля (0.5%), и наиболее выраженный эффект наблюдался в геле с соотношением полисахаридов льна и конжаковой камеди 4 : 6.

Изменения в физико-химических показателях может быть обусловлено разной структурой данных гидроколлоидов. Камедь конжака является более гидрофильной и обладает сильно полярной структурой из-за большого количества гидроксильных групп [80], в то время как полисахариды семян льна содержат в своем составе больше карбоксильных групп [81]. В результате водоудерживающая способность смеси гидроколлоидов будет расти с увеличением содержания конжаковой камеди с образованием более жесткого геля.

Результаты работ по исследованию эффективности смесей гидроколлоидов семян льна, рассмотренных в настоящем обзоре, были проанализированы и представлены в таблице.

Эффекты бинарных смесей гидроколлоидов семян льна (ГКЛ) в пищевых системах

Состав гидроколлоидной смеси	Изменение функционально-технологических свойств комплекса гидроколлоида	Перспективная оценка использования в пищевых системах
ГКЛ + Агар	<ul style="list-style-type: none"> – улучшение механической прочности гелей; – снижение растворимости композитов; – повышение эластичности и деформационной способности гелей; – развитие антибактериальных свойств гелей 	Высокая
ГКЛ + Крахмал	<ul style="list-style-type: none"> – повышение вязкости и адгезии; – увеличение упругости геля; – снижение термической стабильности; – снижение температуры клейстеризации 	Высокая
ГКЛ + Гуар	<ul style="list-style-type: none"> – увеличение водоудерживающей способности; – снижение твердости и прочности гелей 	Средняя
ГКЛ + Конжак	<ul style="list-style-type: none"> – увеличение водоудерживающей способности; – повышение растворимости; – повышение эластичности; – увеличение вязкости 	Средняя

Заключение

Производство полисахаридов семян льна приобретает все большую актуальность благодаря их уникальным свойствам, а также широким возможностям применения в различных отраслях промышленности. Анализ значительного числа научных исследований, представленных в мировой научной литературе, свидетельствует, что льняные гидроколлоиды и их смеси с промышленными гидроколлоидами обладают значительным технологическим потенциалом. Благодаря синергетическим эффектам, смеси, состоящие из нескольких гидроколлоидов, являются более эффективными и доступными за счет суммирования их свойств.

Введение полисахаридов семян льна изменяет физико-химические, технологические и реологические показатели смесей гидроколлоидов. В зависимости от используемого промышленного гидроколлоида с полисахаридами льна можно изменять физико-технологические параметры: твердость и жесткость, растворимость, набухаемость, упругость и текучесть продукта. Использование сочетания различных комбинаций гидроколлоидов открывает новые возможности для создания новых добавок и комплексных материалов. Однако важно учитывать характеристики каждого компонента и их взаимное влияние при создании стабильной смеси гидроколлоидов. Дальнейшие исследования могут сосредоточиться на изучении взаимодействия смесей гидроколлоидов с белками и липидами в пищевых системах, а также разработке новых продуктов с использованием данных комплексов и оценке их влияния на пищевую ценность и усвояемость продуктов.

В целом, использование семян масличного льна в качестве источника гидроколлоидов для пищевых систем является перспективным направлением импортозамещения для отечественной пищевой промышленности.

Финансирование

Данная работа финансировалась за счет средств бюджета Минобрнауки РФ в рамках государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК (FGSS-2022-0007).

Конфликт интересов

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Открытый доступ

Эта статья распространяется на условиях международной лицензии Creative Commons Attribution 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), которая разрешает неограниченное использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии, что вы дадите соответствующие ссылки на автора(ов) и источник и предоставите ссылку на Лицензию Creative Commons и укажете, были ли внесены изменения.

Список литературы

1. Saha D., Bhattacharya S. Hydrocolloids as thickening and gelling agents in food: A critical review // Journal of Food Science and Technology. 2010. Vol. 47(6). Pp. 587–597. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0162-6>.
2. Мехедъкин А.А. Структура рынка желатина в Российской Федерации // Управление рисками в АПК. 2020. №3. С. 63–68.
3. Муханова М.А., Якубова О.С., Бекешева А.А., Айзатулина Н.Р. Сравнительная характеристика камедей и перспективы их применения для загущения соусов // Индустрия питания. 2021. Т. 6, №3. С. 58–68. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-3-7>.
4. Семенова П. Рынок пищевых гидроколлоидов в России: рост, тенденции, влияние Covid-19 и прогнозы (2022–2027 гг.) [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/russia-food-hydrocolloids-market-industry>.
5. Масличные, экспорт и импорт [Электронный ресурс]. URL: <https://specagro.ru/news/202303/rossiya-yavlyayetsya-liderom-sredi-mirovykh-eksporterov-maslichnogo-ina>.
6. Донченко Л.В., Сокол Н.В., Красноселова Е.А. Пищевая химия. Гидроколлоиды: учеб. пособие для вузов. М., 2018. 180 с.
7. Миневич И.Э., Осипова Л.Л. Гидроколлоиды семян льна: характеристика и перспективы использования в пищевых технологиях // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Процессы и аппараты пищевых производств. 2017. №3. С. 16–25. <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2017-10-3-16-25>.
8. Симон В.А., Шляпина К.А., Баранова Е.Р., Ворошилин Р.А. Виды и классификация гидроколлоидов из сырья животного происхождения // Пищевые инновации и биотехнологии: сборник тезисов X Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Кемерово, 2022. Т. 1. С. 321–322.
9. Soukoulis C., Gaiani C., Hoffmann L. Plant seed mucilage as emerging biopolymer in food industry applications // Current Opinion in Food Science. 2018. Vol. 22. Pp. 28–42. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.01.004>.
10. Hamdani A.M., Wani I.A., Bhat N.A. Sources, structure, properties and health benefits of plant gums: A review // International Journal of Biological Macromolecules. 2019. Vol. 135. Pp. 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.103>.
11. Дамодаран Ш., Паркин К.Л., Феннема О.Р. Химия пищевых продуктов. СПб, 2017. 1040 с.
12. Pirsa S., Hafezi K. Hydrocolloids: Structure, preparation method, and application in food industry // Food Chemistry. 2023. Vol. 399. 133967. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133967>.
13. Дымар О.В., Ефимова Е.В. Синергетические эффекты взаимодействия добавок в технологиях производства пищевых продуктов // Актуальные вопросы переработки мясного и молочного сырья. 2014. Т. 1, №9. С. 47–58.
14. Кадникова И.А. Гидроколлоиды морских водорослей: применение в биотехнологии и технологии пищевых продуктов // Рыбпром: технологии и оборудование для переработки водных биоресурсов. 2010. №3. С. 47–50.
15. Burey P., Bhandari B., Howes T., Gidley M. Hydrocolloid gel particles: formation, characterization, and application // Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 2008. Vol. 48(5). Pp. 361–377. <https://doi.org/10.1080/10408390701347801>.
16. Филлипс Г.О., Вильямс П.А. Справочник по гидроколлоидам. СПб, 2006. 536 с.

17. Куц А.А. Применение гидрогеля из льна и семян конопли при производстве безглютеновых хлебобулочных изделий // Студенческая наука: актуальные вопросы, достижения и инновации: сборник статей X Международной научно-практической конференции в 2 частях. Пенза, 2022. Т. 1. С. 115–118.
18. Бойцова Т.М., Назарова О.М. Обоснование условий экстракции полисахаридов из настоя семени льна // Фундаментальные исследования. 2015. №8. С. 14–18.
19. Lorenc F., Jarošová M., Bedrníček J., Smetana P., Bártá J. Structural Characterization and Functional Properties of Flaxseed Hydrocolloids and Their Application // Foods. 2022. Vol. 11(15). 2304. <https://doi.org/10.3390/foods11152304>.
20. Venegas-García D.J., Wilson L.D. Utilization of Bioflocculants from Flaxseed Gum and Fenugreek Gum for the Removal of Arsenicals from Water // Materials. 2022. Vol. 15(23). 8691. <https://doi.org/10.3390/ma15238691>.
21. Ziolkovska A. Laws of flaxseed mucilage extraction // Food Hydrocolloids. 2011. Vol. 26 (1). Pp. 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.022>.
22. Hadad S., Goli S.A.H. Fabrication and characterization of electrospun nanofibers using flaxseed (*Linum usitatissimum*) mucilage // International Journal of Biological Macromolecules. 2018. Vol. 114. Pp. 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.03.154>.
23. Наумова Н.Л., Бец Ю.А. Химический состав и пищевая ценность семян льна и продуктов его переработки // Modern Science. 2020. №11-4. С. 27–33.
24. Roulard R., Petit E., Mesnard F., Rhazi L. Molecular investigations of flaxseed mucilage polysaccharides // International Journal of Biological Macromolecules. 2016. Vol. 86. Pp. 840–847. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.093>.
25. Пороховинова Е.А., Павлов А.В., Брач Н.Б., Морван К. Углеводный состав слизи из семян льна и его связь с морфологическими признаками // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52, №1. С. 161–171. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.161rus>.
26. Safdar B., Pang Z., Liu X., Jatoi M.A., Mahmood A., Rashid M.T., Ali N., Naveed M. Flaxseed gum: Extraction, bioactive composition, structural characterization, and its potential antioxidant activity // Journal of Food Biochemistry. 2019. Vol. 43(11). <https://doi.org/10.1111/jfbc.13014>.
27. Цыганова Т.Б., Миневич И.Э., Осипова Л.Л. Полисахариды семян льна: практическое применение // Хранение и переработка сельхозсырья. 2019. №2. С. 24–36. <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.151>.
28. Puligundla P. Lim S. A Review of Extraction Techniques and Food Applications of Flaxseed Mucilage // Foods. 2022. Vol. 11(12). 1677. <https://doi.org/10.3390/foods11121677>.
29. Qian K.Y., Cui S.W., Nikiforuk J., Goff H.D. Structural elucidation of rhamnogalacturonans from flaxseed hulls // Carbohydrate Research. 2012. Vol. 362. Pp. 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2012.08.005>.
30. Emaga T.H., Rabefatika N., Blecker C., Paquot M. Kinetics of the hydrolysis of polysaccharide galacturonic acid and neutral sugars chains from flaxseed mucilage // Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement. 2012. Vol. 16(2). Pp. 139–147.
31. Alix S., Marais S., Morvan C., Lebrun L. Biocomposite materials from flax plants: preparation and properties // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 2008. Vol. 39(12). Pp. 1793–1801. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.08.008>.
32. Qian K.Y., Cui S.W., Wu Y., Goff H.D. Flaxseed gum from flaxseed hulls: Extraction, fractionation, and characterization // Food Hydrocolloids. 2012. Vol. 28(2). Pp. 275–283. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.12.019>.
33. Mi H., Li Y., Wang C., Yi S., Li X., Li J. The Interaction of StarchGums and Their Effect on Gel Properties and Protein Conformation of Silver Carp Surimi // Food Hydrocolloids. 2021. Vol. 112. 106290. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106290>.
34. Qian K.Y. Structure-Function Relationship of Flaxseed Gum from Flaxseed Hulls. A Thesis Presented to The University of Guelph In partial fulfilment of requirements for the degree of Doctor of Philosophy In Food Science Guelph. Ontario, Canada, 2014. 107 p.
35. Troschynska Y., Bleha R., Synytsya A., Štětina J. Chemical Composition and Rheological Properties of Seed Mucilages of Various Yellow- and Brown-Seeded Flax (*Linum usitatissimum L.*) Cultivars // Polymers. 2022. Vol. 14(10). 2040. <https://doi.org/10.3390/polym14102040>.
36. Миневич И.Э., Осипова Л.Л. Влияние условий экстракции на функциональные свойства полисахаридов семян льна // Хлебопродукты. 2019. №4. С. 48–51. <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2019-28-4-48-50>.
37. Vieira J., Mantovani R., Raposo M., Coimbra M., Vicente A., Cunha R. Effect of extraction temperature on rheological behavior and antioxidant capacity of flaxseed gum // Carbohydrate Polymers. 2019. Vol. 213. Pp. 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.078>.
38. Kaur M., Kaur R., Punia S. Characterization of mucilages extracted from different flaxseed (*Linum usitatissimum L.*) cultivars: A heteropolysaccharide with desirable functional and rheological properties // International Journal of Biological Macromolecules. 2018. Vol. 117. Pp. 919–927. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.010>.
39. Naran R., Chen G., Carpita N.C. Novel rhamnogalacturonan I and arabinoxylan polysaccharides of flax seed mucilage // Plant Physiology. 2008. Vol. 148(1). Pp. 132–141. <https://doi.org/10.1104/pp.108.123513>.
40. Sun J., Li X., Xu X., Zhou G. Influence of Various Levels of Flaxseed Gum Addition on the Water-Holding Capacities of Heat-Induced Porcine Myofibrillar Protein // Journal of Food Science. 2011. Vol. 76(3). Pp. 472–478. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02094.x>.
41. Singer F.A.W., Taha F.S., Mohamed S.S., Gibriel A., El-Nawawy M. Preparation of Mucilage/Protein Products from Flaxseed // American Journal of Food Technology. 2011. Vol. 6(4). Pp. 260–278. <https://doi.org/10.3923/ajft.2011.260.278>.

42. Barbary O.M., Al-Sohaimy S.A., El-Saadani M.A. Extraction, Composition and Physicochemical Properties of Flaxseed Mucilage // Journal of the Advances in Agricultural Researches. 2009. Vol. 14(3). Pp. 605–621.
43. Tee Y.B., Wong J., Tan M.C., Talib R.A. Development of edible film from flaxseed mucilage // BioResources. 2016. Vol. 11(4). Pp. 10286–10295. <https://doi.org/10.15376/biores.11.4.10286-10295>.
44. Bitaghirs M., Kadivar M., Shahedi M. Investigation of the possibility of producing low-calorie cake containing flaxseed mucilage as fat replacer // Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology. 2014. Vol. 9(3). Pp. 73–82.
45. Basiri S., Haidary N., Shekarforoush S.S., Niakousari M. Flaxseed mucilage: A natural stabilizer in stirred yogurt // Carbohydrate Polymers. 2018. Vol. 187. Pp. 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.049>.
46. Arabshahi-Delouee S., Rahati Ghochani S., Mohammadi A. Effect of flaxseed (*Linum usitatissimum*) mucilage on physicochemical and sensorial properties of semi-fat set yoghurt // Journal of Food Biosciences and Technology. 2020. Vol. 10, no. 2. Pp. 91–100.
47. Korus J., Witczak T., Ziobro R., Juszczak L. Linseed (*Linum usitatissimum L.*) mucilage as a novel structure forming agent in gluten-free bread // LWT - Food Science and Technology. 2015. Vol. 62(1). Pp. 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.040>.
48. Wang D.W., Zhang Y.R., Huang H.F. A study on application of flaxseed gum in ice cream // Journal of Jilin Agricultural University. 2003. Vol. 25(2). Pp. 224–227.
49. Stewart S., Mazza G. Effect of flaxseed gum on quality and stability of a model salad dressing // Journal of Food Quality. 2000. Vol. 23(4). Pp. 373–390. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2000.tb00565.x>
50. Chen H., Xu S., Wang Z. Gelation properties of flaxseed gum // Journal of Food Engineering. 2006. Vol. 77(2). Pp. 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.033>
51. Ивлева А.Р., Канарская З.А. Применение полисахаридов в качестве гидроколлоидов в пищевых продуктах // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, №14. С. 418–422.
52. Selby H.H., Whistler R.L. Agar // Industrial Gums (Third Edition). Polysaccharides and Their Derivatives. Academic Press, 1993. Pp. 87–103. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-092654-4.50009-7>.
53. Norziah M.H., Foo S.L., Karim A.A. Rheological studies on mixtures of agar (*Gracilaria changii*) and κ-carrageenan // Food Hydrocolloids. 2006. Vol. 20(2-3). Pp. 204–217. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.03.020>.
54. Prado N.S., da Silva I.S.V., de Almeida Nascimento J.A., Pasquini D. Flaxseed gum/agar blends and nanocomposites: preparation and physical properties // Iranian Polymer Journal. 2021. Vol. 30. Pp. 821–830. <https://doi.org/10.1007/s13726-021-00933-w>.
55. Swapna M.N.S., Oscar A., Korte D., Sankararaman S.I. Towards Greener Packaging: Tapioca Starch-Based Biocomposites with Siam Weed Extract and Flax Seed Gel as Sustainable Antibacterial Packaging Material // Applied Sciences. 2024. Vol. 14(4). 1419. <https://doi.org/10.3390/app14041419>.
56. Karami N., Kamkar A., Shahbazi Y., Misaghi A. Edible films based on chitosan-flaxseed mucilage: In vitro antimicrobial and antioxidant properties and their application on survival of food-borne pathogenic bacteria in raw minced trout fillets // Pharmaceutical and Biomedical Research. 2019. Vol. 5(2). Pp. 10–16. <https://doi.org/10.18502/pbr.v5i2.1580>.
57. Treviño-Garza M.Z., Yañez-Echeverría S.A., García S., Mora-Zúñiga A.E., Arévalo-Niño K. Physico-mechanical, barrier and antimicrobial properties of linseed mucilage films incorporated with *H. virginiana* extract // Revista Mexicana de Ingeniería Química. 2020. Vol. 19, no. 2. Pp. 983–996. <https://doi.org/10.24275/rmiq/Bio872>.
58. Soleimani-Rambod A., Zomorodi S., Raeisi S.N., Asl A.K., Shahidi S. The effect of xanthan gum and flaxseed mucilage as edible coatings in Cheddar cheese during ripening // Coatings. 2018. Vol. 8(2). <https://doi.org/10.3390/coatings8020080>.
59. Rodrigues F.J., Cedran M.F., Garcia S. Influence of linseed mucilage incorporated into an alginate-base edible coating containing probiotic bacteria on shelf-life of fresh-cut yacon (*Smallanthus sonchifolius*) // Food and Bioprocess Technology. 2018. Vol. 11(8). Pp. 1605–1614. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2128-z>.
60. Treviño-Garza M., Correa-Cerón R., Ortiz-Lechuga E., Solís-Arévalo K., Castillo-Hernández S., Gallardo-Rivera C., Niño K.A. Effect of linseed (*Linum usitatissimum*) mucilage and chitosan edible coatings on quality and shelf-life of fresh-cut cantaloupe (*Cucumis melo*) // Coatings. 2019. Vol. 9(6). Pp. 1–15.
61. Бородина З.М., Лукин Н.Д., Папахин А.А., Гулакова В.А. О ферментативной атакуемости различных видов крахмала // Пищевая промышленность. 2019. №5. С. 27–32. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10067>.
62. Vieira J., Andrade C., Santos T., Okuro P., Garcia S., Rodrigues M., Vicente A., Cunha R. Flaxseed gum-biopolymers interactions driving rheological behaviour of oropharyngeal dysphagia-oriented products // Food Hydrocolloids. 2020. Vol. 111. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106257>.
63. Cai X., Du X., Zhu G., Cai Z., Cao C. The use of potato starch/xanthan gum combinations as a thickening agent in the formulation of tomato ketchup // CyTA - Journal of Food. 2020. Vol. 18(1). Pp. 401–408. <https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1760943>.
64. Yadav K., Yadav B.S., Yadav R.B., Dangi N. Physicochemical, pasting and rheological properties of colocasia starch as influenced by the addition of guar gum and xanthan gum // Journal of Food Measurement and Characterization. 2018. Vol. 12(4). Pp. 2666–2676. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9884-3>.
65. Wang Y., Wang L., Li D., Özkan N., Chen X. D., Mao Z. Effect of flaxseed gum addition on rheological properties of native maize starch // Journal of Food Engineering. 2008. Vol. 89(1). Pp. 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.04.005>.
66. Hussain S. Native rice starch and linseed gum blends: effect on the pasting, thermal and rheological properties // Czech Journal of Food Sciences. 2015. Vol. 33(6). Pp. 556–563.

67. Дзюбенко Н.И., Дзюбенко Е.А., Потокина Е.К., Булынцев С.В. Гуар *Cyamopsis tetragonoloba (L.) Taub.*: характеристика, применение, генетические ресурсы и возможность интродукции в России // Сельскохозяйственная биология. 2017. Т. 52, №6. С. 1116–1128. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.6.1116rus>.
68. Pathak R. Clusterbean: physiology, genetics and cultivation. Springer Singapore, 2015. Pp. 33–60. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-907-3>.
69. Афанасьева Ю.И. Влияние камедей на синерезис каррагинана // Пищевые системы. 2021. Т. 4, №3S. С. 17–21. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-17-21>.
70. Jadhav B.A., Pawar V.S. Influence of incorporation of blends of guar gum and acacia gum in the preparation of chocolate flavoured milk // Asian Journal of Dairy and Food Research. 2016. Vol. 35(3). <https://doi.org/10.18805/ajdfr.v3i1.3575>.
71. Zou X., Zheng L., Jiang B., Pan Y., Hu J. Effect of three soluble dietary fibers on the properties of flaxseed gum-based hydrogels: A comparison study and mechanism illustration // Food Hydrocolloids. 2024. Vol. 148(A). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109458>.
72. Cescutti P., Campa C., Delben F., Rizzo R. Structure of the oligomers obtained by enzymatic hydrolysis of the glucomannan produced by the plant *Amorphophallus konjac* // Carbohydrate research. 2002. Vol. 337(24). [https://doi.org/10.1016/s0008-6215\(02\)00332-4](https://doi.org/10.1016/s0008-6215(02)00332-4).
73. Wu D., Yu S., Liang H., He C., Li J., Li B. The influence of deacetylation degree of konjac glucomannan on rheological and gel properties of konjac glucomannan/k-carrageenan mixed system // Food Hydrocolloids. 2020. Vol. 101. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105523>.
74. Sun Y., Xu X., Zhang Q., Zhang D., Xie X., Zhou H., Wu Z., Liu R., Pang J. Review of Konjac glucomannan structure, properties, gelation mechanism, and application in medical biology // Polymers. 2023. Vol. 15(8). <https://doi.org/10.3390/polym15081852>.
75. Неповинных Н.В. Изучение ассоциативных взаимодействий пищевых гидроколлоидов при создании продуктов на молочной основе // Молочнохозяйственный вестник. 2017. №1(25). С. 100–109.
76. Yang J., Choi Y.J., Hahn J. Development of flaxseed gum/konjac glucomannan with agar as gelling agents with enhanced elastic properties // Food Science and Biotechnology. 2023. Vol. 32. Pp. 181–192. <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01179-9>.
77. Sangnark A., Noomhorm A. Effect of particle sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse // Food chemistry. 2003. Vol. 80(2). Pp. 221–229. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(02\)00257-1](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(02)00257-1).
78. Chand M., Chopra R., Talwar B., Homroy S., Singh P.K., Dhiman A., Payyanni A.W. Unveiling the potential of linseed mucilage, its health benefits, and applications in food packaging // Frontiers in Nutrition. 2024. Vol. 11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1334247>.
79. Jiang Y., Reddy C.K., Huang K., Chen L., Xu B. Hydrocolloidal properties of flaxseed gum/konjac glucomannan compound gel // International Journal of Biological Macromolecules. 2019. Vol. 133. Pp. 1156–1163. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.187>.
80. Zhang C., Chen J., Yang F. Konjac glucomannan, a promising polysaccharide for OCDDS // Carbohydrate Polymers. 2014. Vol. 104. Pp. 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.081>.
81. Guo Q., Shan Z., Shao Y., Wang N., Qian K., Goff H.D., Wang Q., Cui S.W., Ding H.H. Conformational Properties of Flaxseed Rhamnogalacturonan-I and Correlation between Primary Structure and Conformation // Polymers. 2022. Vol. 14(13). <https://doi.org/10.3390/polym14132667>.

Поступила в редакцию 17 февраля 2025 г.

После переработки 4 сентября 2025 г.

Принята к публикации 9 октября 2025 г.

Ushchapovskiy V.I., Yakovleva A.A., Minevich I.E. FLAX SEED HYDROCOLLOIDS: SYNERGISM OF THEIR BLENDS IN FOOD SYSTEMS (REVIEW)*

Federal Scientific Center for Bast Crops, Komsomolsky Ave., 17/56, Tver, 170041, Russia, v.uschapovsky@fncl.ru

Hydrocolloids include polysaccharides and proteins, the structure of which determines the specific behaviour of each of them. They have a wide range of functional and technological properties and influence the texture of solutions and food products. They are used for stabilising, gelling, thickening, moistening, preventing crystallisation and regulating flavour. Flax hydrocolloids are high molecular weight polysaccharides concentrated in flax mucilage, which coats the flax seed hull. Based on a wide range of functional properties such as solubility, foamability, viscosity as well as emulsifying and stabilising ability, flax hydrocolloids can be used as a thickening, stabilising and moisture retaining agent. Hydrocolloid blends are predominantly used in industry, as it allows levelling the disadvantages of individual components and obtaining products with unique characteristics. In blends, flax seed polysaccharides affect the physicochemical, technological and rheological properties of the system. This can lead to changes in parameters such as water-holding capacity, elasticity, hardness, viscosity, swelling, elasticity and solubility of the complex. The study of interaction of flax seed polysaccharides with hydrocolloids in different disperse systems and the search for synergistic effects can be used as a substrate for the creation of innovative and stable ingredients with specified characteristics

* Автор, с которым следует вести переписку.

of products in demand. To create stable mixtures of hydrocolloids, it is necessary to consider the characteristics of each component and their combined interaction in the product. This work presents a review of the chemical composition and functional properties of flax seed polysaccharides and their mixtures with industrial hydrocolloids.

Keywords: flax seed polysaccharides, hydrocolloids, gum, synergism, associative interaction of hydrocolloids, functional and technological characteristics.

For citing: Ushchapovskiy V.I., Yakovleva A.A., Minevich I.E. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2025, no. 4, pp. 25–40. (in Russ.). <https://doi.org/10.14258/jcprm.20250416916>.

References

1. Saha D., Bhattacharya S. *Journal of Food Science and Technology*, 2010, vol. 47(6), pp. 587–597. <https://doi.org/10.1007/s13197-010-0162-6>.
2. Mekhed'kin A.A. *Upravleniye riskami v APK*, 2020, no. 3, pp. 63–68. (in Russ.).
3. Mukhanova M.A., Yakubova O.S., Bekesheva A.A., Ayzatulina N.R. *Industriya pitaniya*, 2021, vol. 6, no. 3, pp. 58–68. <https://doi.org/10.29141/2500-1922-2021-6-3-7>. (in Russ.).
4. Semenova P. *Rynok pishchevykh gidrokolloidov v Rossii: rost, tendentsii, vliyaniye Sovid-19 i prognozy (2022–2027 gg.)* [The food hydrocolloids market in Russia: growth, trends, impact of Covid-19 and forecasts (2022–2027)]. URL: <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/russia-food-hydrocolloids-market-industry>. (in Russ.).
5. *Maslichnyye, eksport i import* [Oilseeds, export and import]. URL: [https://specagro.ru/news/202303/rossiya-yavlyayetsya-liderom-sredi-mirovykh-eksporterov-maslichnogo-lna](https://specagro.ru/news/202303/rossiya-yavlyayetsya-liderom-sredi-mirovykh-eksporterov-maslichnogo-lina). (in Russ.).
6. Donchenko L.V., Sokol N.V., Krasnoselova Ye.A. *Pishchevaya khimiya. Gidrokolloidy: ucheb. posobiye dlya vuzov*. [Food Chemistry. Hydrocolloids: a textbook for universities]. Moscow, 2018, 180 p. (in Russ.).
7. Minevich I.E., Osipova L.L. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv*, 2017, no. 3, pp. 16–25. <https://doi.org/10.17586/2310-1164-2017-10-3-16-25>. (in Russ.).
8. Simon V.A., Shlyapina K.A., Baranova Ye.R., Voroshilin R.A. *Pishchevyye innovatsii i biotekhnologii: sbornik tezisov X Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh*. Kemerovo, 2022, vol. 1, pp. 321–322. (in Russ.).
9. Soukoulis C., Gaiani C., Hoffmann L. *Current Opinion in Food Science*, 2018, vol. 22, pp. 28–42. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2018.01.004>.
10. Hamdani A.M., Wani I.A., Bhat N.A. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, vol. 135, pp. 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.103>.
11. Damodaran Sh., Parkin K.L., Fennema O.R. *Khimiya pishchevykh produktov*. [Food Chemistry]. St. Petersburg, 2017, 1040 p. (in Russ.).
12. Pirsa S., Hafezi K. *Food Chemistry*, 2023, vol. 399, 133967. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133967>.
13. Dymar O.V., Yefimova Ye.V. *Aktual'nyye voprosy pererabotki myasnogo i molochnogo syr'ya*, 2014, vol. 1, no. 9, pp. 47–58. (in Russ.).
14. Kadnikova I.A. *Rybeprom: tekhnologii i oborudovaniye dlya pererabotki vodnykh bioresursov*, 2010, no. 3, pp. 47–50. (in Russ.).
15. Burey P., Bhandari B., Howes T., Gidley M. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2008, vol. 48(5), pp. 361–377. <https://doi.org/10.1080/10408390701347801>.
16. Fillips G.O., Vil'yams P.A. *Spravochnik po gidrokolloidam*. [Handbook of hydrocolloids]. St. Petersburg, 2006, 536 p. (in Russ.).
17. Kuts A.A. *Ctudencheskaya nauka: aktual'nyye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statey X Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii v 2 chastyakh*. [Student science: current issues, achievements and innovations: collection of articles from the X International scientific and practical conference in 2 parts]. Penza, 2022, vol. 1, pp. 115–118. (in Russ.).
18. Boytsova T.M., Nazarova O.M. *Fundamental'nyye issledovaniya*, 2015, no. 8, pp. 14–18. (in Russ.).
19. Lorenc F., Jarošová M., Bedrníček J., Smetana P., Bárta J. *Foods*, 2022, vol. 11(15), 2304. <https://doi.org/10.3390/foods11152304>.
20. Venegas-García D.J., Wilson L.D. *Materials*, 2022, vol. 15(23), 8691. <https://doi.org/10.3390/ma15238691>.
21. Ziolkovska A. *Food Hydrocolloids*, 2011, vol. 26 (1), pp. 197–204. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.022>.
22. Hadad S., Goli S.A.H. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, vol. 114, pp. 408–414. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.03.154>.
23. Naumova N.L., Bets Yu.A. *Modern Science*, 2020, no. 11-4, pp. 27–33. (in Russ.).
24. Rouillard R., Petit E., Mesnard F., Rhazi L. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, vol. 86, pp. 840–847. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.01.093>.
25. Porokhovinova Ye.A., Pavlov A.V., Brach N.B., Morvan K. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2017, vol. 52, no. 1, pp. 161–171. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.1.161rus>. (in Russ.).
26. Safdar B., Pang Z., Liu X., Jatoi M.A., Mehmood A., Rashid M.T., Ali N., Naveed M. *Journal of Food Biochemistry*, 2019, vol. 43(11). <https://doi.org/10.1111/jfb.13014>.
27. Tsyananova T.B., Minevich I.E., Osipova L.L. *Khraneniye i pererabotka sel'khozsyrya*, 2019, no. 2, pp. 24–36. <https://doi.org/10.36107/spfp.2019.151>. (in Russ.).
28. Puligundla P. Lim S. *Foods*, 2022, vol. 11(12), 1677. <https://doi.org/10.3390/foods11121677>.
29. Qian K.Y., Cui S.W., Nikiforuk J., Goff H.D. *Carbohydrate Research*, 2012, vol. 362, pp. 47–55. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2012.08.005>.

30. Emaga T.H., Rabetafika N., Blecker C., Paquot M. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 2012, vol. 16(2), pp. 139–147.
31. Alix S., Marais S., Morvan C., Lebrun L. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2008, vol. 39(12), pp. 1793–1801. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.08.008>.
32. Qian K.Y., Cui S.W., Wu Y., Goff H.D. *Food Hydrocolloids*, 2012, vol. 28(2), pp. 275–283. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.12.019>.
33. Mi H., Li Y., Wang C., Yi S., Li X., Li J. *Food Hydrocolloids*, 2021, vol. 112, 106290. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106290>.
34. Qian K.Y. *Structure-Function Relationship of Flaxseed Gum from Flaxseed Hulls. A Thesis Presented to The University of Guelph In partial fulfilment of requirements for the degree of Doctor of Philosophy In Food Science Guelph*. Ontario, Canada, 2014, 107 p.
35. Troshchynska Y., Bleha R., Synytsya A., Štětina J. *Polymers*, 2022, vol. 14(10), 2040. <https://doi.org/10.3390/polym14102040>.
36. Minevich I.E., Osipova L.L. *Khleboprodukty*, 2019, no. 4, pp. 48–51. <https://doi.org/10.32462/0235-2508-2019-28-4-48-50>. (in Russ.).
37. Vieira J., Mantovani R., Raposo M., Coimbra M., Vicente A., Cunha R. *Carbohydrate Polymers*, 2019, vol. 213, pp. 217–227. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.078>.
38. Kaur M., Kaur R., Punia S. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, vol. 117, pp. 919–927. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.06.010>.
39. Naran R., Chen G., Carpita N.C. *Plant Physiology*, 2008, vol. 148(1), pp. 132–141. <https://doi.org/10.1104/pp.108.123513>.
40. Sun J., Li X., Xu X., Zhou G. *Journal of Food Science*, 2011, vol. 76(3), pp. 472–478. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2011.02094.x>.
41. Singer F.A.W., Taha F.S., Mohamed S.S., Gibriel A., El-Nawawy M. *American Journal of Food Technology*, 2011, vol. 6(4), pp. 260–278. <https://doi.org/10.3923/ajft.2011.260.278>.
42. Barbary O.M., Al-Sohaimy S.A., El-Saadani M.A. *Journal of the Advances in Agricultural Researches*, 2009, vol. 14(3), pp. 605–621.
43. Tee Y.B., Wong J., Tan M.C., Talib R.A. *BioResources*, 2016, vol. 11(4), pp. 10286–10295. <https://doi.org/10.1537/biores.11.4.10286-10295>.
44. Bitaghirs M., Kadivar M., Shahedi M. *Iranian Journal of Nutrition Sciences and Food Technology*, 2014, vol. 9(3), pp. 73–82.
45. Basiri S., Haidary N., Shekarforoush S.S., Niakousari M. *Carbohydrate Polymers*, 2018, vol. 187, pp. 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.01.049>.
46. Arabshahi-Delouee S., Rahati Ghochani S., Mohammadi A. *Journal of Food Biosciences and Technology*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 91–100.
47. Korus J., Witczak T., Ziobro R., Juszczak L. *LWT - Food Science and Technology*, 2015, vol. 62(1), pp. 257–264. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.01.040>.
48. Wang D.W., Zhang Y.R., Huang H.F. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2003, vol. 25(2), pp. 224–227.
49. Stewart S., Mazza G. *Journal of Food Quality*, 2000, vol. 23(4), pp. 373–390. <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2000.tb00565.x>
50. Chen H., Xu S., Wang Z. *Journal of Food Engineering*, 2006, vol. 77(2), pp. 295–303. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.06.033>
51. Ivleva A.R., Kanarskaya Z.A. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 14, pp. 418–422. (in Russ.).
52. Selby H.H., Whistler R.L. *Industrial Gums (Third Edition). Polysaccharides and Their Derivatives*. Academic Press, 1993, pp. 87–103. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-092654-4.50009-7>.
53. Norziah M.H., Foo S.L., Karim A.A. *Food Hydrocolloids*, 2006, vol. 20(2-3), pp. 204–217. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.03.020>.
54. Prado N.S., da Silva I.S.V., de Almeida Nascimento J.A., Pasquini D. *Iranian Polymer Journal*, 2021, vol. 30, pp. 821–830. <https://doi.org/10.1007/s13726-021-00933-w>.
55. Swapna M.N.S., Oscar A., Korte D., Sankararaman S.I. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14(4), 1419. <https://doi.org/10.3390/app14041419>.
56. Karami N., Kamkar A., Shahbazi Y., Misaghi A. *Pharmaceutical and Biomedical Research*, 2019, vol. 5(2), pp. 10–16. <https://doi.org/10.18502/pbr.v5i2.1580>.
57. Treviño-Garza M.Z., Yañez-Echeverría S.A., García S., Mora-Zúñiga A.E., Arévalo-Niño K. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 2020, vol. 19, no. 2, pp. 983–996. <https://doi.org/10.24275/rmq/Bio872>.
58. Soleimani-Rambod A., Zomorodi S., Racisi S.N., Asl A.K., Shahidi S. *Coatings*, 2018, vol. 8(2). <https://doi.org/10.3390/coatings8020080>.
59. Rodrigues F.J., Cedran M.F., Garcia S. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, vol. 11(8), pp. 1605–1614. <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2128-z>.
60. Treviño-Garza M., Correa-Cerón R., Ortiz-Lechuga E., Solís-Arévalo K., Castillo-Hernández S., Gallardo-Rivera C., Niño K.A. *Coatings*, 2019, vol. 9(6), pp. 1–15.
61. Borodina Z.M., Lukin N.D., Papakhin A.A., Gulakova V.A. *Pishchevaya promyshlennost'*, 2019, no. 5, pp. 27–32. <https://doi.org/10.24411/0235-2486-2019-10067>. (in Russ.).
62. Vieira J., Andrade C., Santos T., Okuro P., Garcia S., Rodrigues M., Vicente A., Cunha R. *Food Hydrocolloids*, 2020, vol. 111. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106257>.

63. Cai X., Du X., Zhu G., Cai Z., Cao C. *CyTA - Journal of Food*, 2020, vol. 18(1), pp. 401–408. <https://doi.org/10.1080/19476337.2020.1760943>.
64. Yadav K., Yadav B.S., Yadav R.B., Dangi N. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, vol. 12(4), pp. 2666–2676. <https://doi.org/10.1007/s11694-018-9884-3>.
65. Wang Y., Wang L., Li D., Özkan N., Chen X. D., Mao Z. *Journal of Food Engineering*, 2008, vol. 89(1), pp. 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2008.04.005>.
66. Hussain S. *Czech Journal of Food Sciences*, 2015, vol. 33(6), pp. 556–563.
67. Dzyubenko N.I., Dzyubenko Ye.A., Potokina Ye.K., Bulyntsev S.V. *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2017, vol. 52, no. 6, pp. 1116–1128. <https://doi.org/10.15389/agrobiology.2017.6.1116rus>. (in Russ.).
68. Pathak R. *Clusterbean: physiology, genetics and cultivation*. Springer Singapore, 2015, pp. 33–60. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-907-3>.
69. Afanas'yeva Yu.I. *Pishchevyye sistemy*, 2021, vol. 4, no. 3S, pp. 17–21. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2021-4-3S-17-21>. (in Russ.).
70. Jadhav B.A., Pawar V.S. *Asian Journal of Dairy and Food Research*, 2016, vol. 35(3). <https://doi.org/10.18805/aj-dfr.v3i1.3575>.
71. Zou X., Zheng L., Jiang B., Pan Y., Hu J. *Food Hydrocolloids*, 2024, vol. 148(A). <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109458>.
72. Cescutti P., Campa C., Delben F., Rizzo R. *Carbohydrate research*, 2002, vol. 337(24). [https://doi.org/10.1016/s0008-6215\(02\)00332-4](https://doi.org/10.1016/s0008-6215(02)00332-4).
73. Wu D., Yu S., Liang H., He C., Li J., Li B. *Food Hydrocolloids*, 2020, vol. 101. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105523>.
74. Sun Y., Xu X., Zhang Q., Zhang D., Xie X., Zhou H., Wu Z., Liu R., Pang J. *Polymers*, 2023, vol. 15(8). <https://doi.org/10.3390/polym15081852>.
75. Nepovinnykh N.V. *Molochnokhozyaystvennyy vestnik*, 2017, no. 1(25), pp. 100–109. (in Russ.).
76. Yang J., Choi Y.J., Hahn J. *Food Science and Biotechnology*, 2023, vol. 32, pp. 181–192. <https://doi.org/10.1007/s10068-022-01179-9>.
77. Sangnark A., Noomhorm A. *Food chemistry*, 2003, vol. 80(2), pp. 221–229. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(02\)00257-1](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(02)00257-1).
78. Chand M., Chopra R., Talwar B., Homroy S., Singh P.K., Dhiman A., Payyanni A.W. *Frontiers in Nutrition*, 2024, vol. 11. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1334247>.
79. Jiang Y., Reddy C.K., Huang K., Chen L., Xu B. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, vol. 133, pp. 1156–1163. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.04.187>.
80. Zhang C., Chen J., Yang F. *Carbohydrate Polymers*, 2014, vol. 104, pp. 175–181. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.12.081>.
81. Guo Q., Shan Z., Shao Y., Wang N., Qian K., Goff H.D., Wang Q., Cui S.W., Ding H.H. *Polymers*, 2022, vol. 14(13). <https://doi.org/10.3390/polym14132667>.

Received February 17, 2025

Revised September 4, 2025

Accepted October 9, 2025

Сведения об авторах

Ушаповский Валентин Игоревич – младший научный сотрудник лаборатории переработки лубяных культур, v.uschapovsky@fnclk.ru

Яковлева Агата Анатольевна – младший научный сотрудник лаборатории молекулярно-генетических исследований и клеточной селекции, a.goncharova@fnclk.ru

Миневич Ирина Эдуардовна – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории переработки лубяных культур, i.minevich@fnclk.ru

Information about authors

Ushchapovsky Valentin Igorevich – Junior Researcher, Bast Crops Processing Laboratory, v.uschapovsky@fnclk.ru

Yakovleva Agata Anatolyevna – Junior Researcher, Molecular Genetic Research and Cell Selection Laboratory, a.goncharova@fnclk.ru

Minevich Irina Eduardovna – Doctor of Technical Sciences, Chief Researcher, Bast Crops Processing Laboratory, i.minevich@fnclk.ru