

Обзор

Обзорная статья

УДК 664.8/9.022

<https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11933>**Стабилизация пищевых эмульсий полисахаридами и белок-полисахаридными комплексами. Краткий обзор**М. С. Лавлинская¹, А. В. Сорокин¹, М. Г. Холявка^{1,2✉}, Ю. Ф. Зуев³, В. Г. Артюхов¹¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»,
Университетская пл., 1, Воронеж 394018, Российская Федерация²ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Студенческая, 33, Севастополь 299053, Российская Федерация³Казанский институт биохимии и биофизики Федерального исследовательского центра
«Казанский научный центр Российской академии наук»,
ул. Лобачевского, 2/31, Казань 420111, Российская Федерация**Аннотация**

Эмульсии – гетерогенные системы, состоящие из двух несмешивающихся жидкостей, широко распространены в пищевой промышленности как основа некоторых продуктов (майонезы, соусы и др.) и в качестве компонентов для создания функциональных продуктов питания, содержащие системы адресной доставки биологически активных веществ (витаминов, нутрицевтиков, флавоноидов и др.). С термодинамической точки зрения эмульсии – неустойчивые системы, обладающие избыточной поверхностной энергией, поэтому для них характерно быстрое разрушение путем фазового разделения. Для решения этой проблемы применяются эмульгаторы – дифильные молекулы различной природы, снижающие поверхностное натяжение, т. е. обладающие поверхностной активностью. Однако большая часть таких стабилизаторов является синтетическими и токсичными продуктами, что значительно ограничивает области их использования в пищевой промышленности. Природные биополимеры, такие как полисахариды и белки, а также их комплексы являются амфифильными макромолекулами, сочетающими в себе как полярные, так и гидрофобные фрагменты, обладают поверхностно-активными свойствами, низкой токсичностью и отличной биосовместимостью, поэтому они могут рассматриваться в качестве перспективных стабилизаторов эмульсий пищевого назначения. Особое место среди полисахаридов занимают хитозаны и альгинаты, которые, кроме прочих названных выше достоинств, являются доступными и дешевыми материалами.

Целью настоящей работы является краткий обзор перспектив использования хитозана, альгината натрия и белок-полисахаридных комплексов в качестве стабилизаторов эмульсий и пен пищевого назначения. В работе обсуждены возможности применения хитозана, альгината натрия, пропиленгликоль альгината, а также различных белок-полисахаридных комплексов в качестве стабилизаторов гетерогенных систем пищевого назначения – пен и эмульсий, являющихся основой многих пищевых продуктов. Кроме того, особое внимание в работе уделяется перспективам внедрения эмульгаторов на основе полисахаридов в промышленное производство и отмечены проблемы, которые предстоит решить для успешной разработки эмульсий, стабилизированных биополимерами, являющихся основой для создания функциональных продуктов питания.

Ключевые слова: хитозан, альгинат натрия, белок-полисахаридные комплексы, пищевые эмульсии, стабилизация**Источник финансирования:** работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 23-64-10020.✉ Холявка Марина Геннадьевна, e-mail: holyavka@rambler.ru

© Лавлинская М. С., Сорокин А. В., Холявка М. Г., Зуев Ю. Ф., Артюхов В. Г., 2024



Для цитирования: Лавлинская М. С., Сорокин А. В., Холявка М. Г., Зуев Ю. Ф., Артюхов В. Г. Стабилизация пищевых эмульсий полисахаридами и белок-полисахаридными комплексами. Краткий обзор. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2024;26(2): 187–196. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11933>

For citation: Lavlinskaya M. S., Sorokin A. V., Holyavka M. G., Zuev Yu. F., Artyukhov V. G. Stabilization of food emulsion by polysaccharides and protein-polysaccharide complexes: a short review. *Condensed Matter and Interphases*. 2024;26(2): 187–196. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2024.26/11933>

1. Введение

Эмульсии, представляющие собой гетерогенные дисперсные системы, обычно состоят из двух несмешивающихся жидкостей, где одна из них – дисперсная фаза – распределяется в виде капель в другой – непрерывной фазе [1]. Применение эмульсионных систем широко распространено в пищевой промышленности, например, для улучшения вкусо-ароматических характеристик продуктов, защиты и доставки биологически активных веществ, а также они являются основой некоторых продуктов питания, таких как майонезы, соусы и сливки [2].

Главной проблемой, возникающей при получении и практическом использовании эмульсий, является их термодинамическая нестабильность, выражающаяся в дестабилизации и расслоении фаз [3]. Внесение эмульгаторов с поверхностно-активными и/или загущающими свойствами обеспечивает образование стабильной эмульсии. В настоящее время для стабилизации эмульсий широко применяются синтетические поверхностно-активные вещества, однако, их использование может оказывать негативное влияние на организм потребителей [4]. Так, возможное связывание анионных ПАВ с белками, ферментами и фосфолипидными мембранами может привести к изменению структуры белков человека, дисфункции ферментов и фосфолипидных мембран [5]. По данным испытаний на цитотоксичность неионогенные ПАВ оказывают меньшее токсическое действие, чем катионные, анионные и амфотерные, при этом токсичность катионных ПАВ наиболее высока [6]. Следовательно, замена синтетических поверхностно-активных веществ на биосовместимые амфифильные соединения является ключевым моментом в расширении сфер применения эмульсий при создании функциональных продуктов питания.

Использование природных полимеров, таких как белки, полисахариды или их комплексы в качестве эмульгаторов и/или стабилизаторов пищевых эмульсий представляется перспективным подходом к получению хорошо усвояемых продуктов [3]. Наиболее распространенные эмульгаторы, применяемые в настоящее время

в пищевой промышленности, представляют собой смесь низкомолекулярного ПАВ, природного амфифильного полимера и вспомогательного соэмульгатора [7]. В качестве амфифильных полимеров используют полисахариды, такие как пектин, различные камеди, галактоманнаны и др. [8, 9]. Выбор полисахарида в качестве натурального компонента обусловлен тем, что по сравнению с белком – стабилизатором большинства эмульсий природного происхождения, полисахариды образуют более объемный гидратный слой, приводящий к повышению стабильности эмульсий за счет структурного фактора [10]. Кроме того, низкая усвояемость полисахаридов в желудочно-кишечном тракте приведет к замедлению скорости высвобождения биологически активных веществ [11].

Таким образом, используемые в настоящее время в пищевой промышленности эмульсии на основе полисахаридов представляют собой многокомпонентные смеси, содержащие различные синтетические низкомолекулярные соединения. Поэтому поиск новых альтернативных ПАВ является актуальной задачей для современной пищевой промышленности, направленной на создание функциональных продуктов питания, сочетающих в себе не только энергетическую ценность, но и биологически активные добавки. Перспективными полимерами здесь являются хитозаны и альгинаты – полисахариды морского происхождения, растворы которых обладают достаточной вязкостью для стабилизации двухкомпонентных эмульсионных систем. В то же время использование белок-полисахаридных комплексов позволяет сочетать в себе свойства обоих компонентов системы, регулируя как реологические и поверхностно-активные свойства системы, так и сродство к биологически активным веществам, расширяя спектр функциональных компонентов (витамины, антиоксиданты, флавоноиды и др.), внедряемых в конечный продукт.

Целью настоящей работы является краткий обзор перспектив использования хитозана, альгината натрия и белок-полисахаридных комплексов в качестве стабилизаторов эмульсий и пен пищевого назначения.

2. Использование хитозана, альгинатов и белок-полисахаридных комплексов в качестве эмульгаторов

2.1. Хитозан и его применение в качестве стабилизатора пищевых эмульсий

Хитозан – это статистический сополимер D-глюкозамина и N-ацетил-D-глюкозамина, соединенных между собой 1,4-β-гликозидными связями, представляет собой продукт деацетилирования природного полимера хитина – поли-N-ацетил-D-глюкозамина, одного из самых распространенных природных полисахаридов, обнаруженного в составе панцирей ракообразных и клеточных стенок грибов [12]. Значительный научный и практический интерес к хитину и хитозану обусловлен такими их уникальными свойствами, как биосовместимость, низкая токсичность, биodeградируемость, высокая сорбционная способность по отношению к тяжелым металлам и радионуклидам [13].

На свойства хитозана значительное влияние оказывает его молекулярная масса (ММ), которая для немодифицированных полимеров, полученных из природного хитина, находится в диапазоне 2–1000 кДа. Другим не менее важным параметром, определяющим способность хитозана растворяться в кислых средах, является степень деацетилирования (СД). Для полисахарида с СД более 55 % характерно растворение в 1 %-ном растворе уксусной кислоты. Растворимость обусловлена протонированием первичной аминогруппы в положении С-2 звена D-глюкозамина, таким образом, в кислой среде хитозан превращается в поликатион, что является достаточно редким явлением для природных полисахаридов [13].

Полимер ограниченно растворим в воде, этот параметр определяется степенью деацетилирования и величиной молекулярной массы. Согласно литературным данным, хитозан с ММ менее 50 кДа и СД более 80 % растворим при кислых и нейтральных значениях рН, а при СД более 55 % – при рН ниже 6.5 (величина pK_a для хитозана) вне зависимости от величины молекулярной массы [13].

Разнообразная биологическая активность хитозана наряду с его безопасностью для человека обуславливает широкое применение этого полисахарида в пищевой промышленности. Антиоксидантная и антимикробная активности хитозана, а также его способность к взаимодействию с различными соединениями [14–16] позволяют использовать его для разработки «ум-

ных упаковок», увеличивающих сроки хранения пищевых продуктов, высокая эмульгирующая способность дает возможность заменить синтетические поверхностно-активные вещества в пищевых технологиях. Самое раннее упоминание использования хитозана в пищевой промышленности в патентных данных датируется 1956 годом: в патенте гидрохлорид хитозана использовался авторами в качестве модифицирующего агента при приготовлении и создании жевательной резинки [13].

Хитозан является эффективным эмульгатором для стабилизации гетерогенных систем типа «масло-в-воде». Полисахарид увеличивает вязкость дисперсионной фазы, затрудняя диффузию дисперсных частиц и снижая скорость агрегации капель. Кроме того, положительно заряженные аминогруппы делают хитозан амфифильным поверхностно-активным полимером. Хитозан можно использовать в качестве единственного эмульгатора, однако, получаемые эмульсии обратимы из-за чувствительности к значениям рН среды. В кислой среде с $pH < pK_a$ протонированный хитозан образует полиэлектролитные комплексы (ПЭК), взаимодействуя с карбонильными группами триглицеридов, а в случае повышения значений рН до значений выше pK_a происходит разрушение ПЭК и потеря эмульгирующей способности. С увеличением значений рН растворимость хитозана снижается, а эмульсия остается стабильной за счет адсорбированных на частицах хитозана капель масляной фазы. При обратном повышении кислотности среды хитозан переходит в растворимую форму, десорбируя диспергированные капли масла, и эмульсия обратимо расслаивается [17]. Эмульгирующая способность хитозана в значительной степени зависит от степени деацетилирования и молекулярной массы: повышается у низкомолекулярных хитозанов при СД менее 60 % и более 86 %, тогда как при значениях СД от 65 до 77 % эти свойства существенно зависят от концентрации полисахарида [18]. В большинстве практических исследований по применению хитозана в качестве эмульгатора он рассматривается в составе сложных композиций, содержащих другие ПАВ. Наличие как хитозана, так и белковых эмульгаторов, делает гетерогенную систему более стабильной. Использование смеси хитозана с соевым белковым изолятом может повысить усвояемость и стабильность эмульгированных каротиноидов [19]. Комплекс, содержащий хитозан, модифицированный волокнами β-лак-

тоглобулина, стабилизирует эмульсию рыбьего жира в воде [20]. Также показано, что устойчивые эмульсии Пикеринга – эмульсии, в которых в качестве стабилизатора выступают твердые частицы, содержащие кукурузное масло, образуются при применении в качестве эмульгатора продукта электростатического взаимодействия хитозана с желатином [21]. Способность хитозана образовывать полиэлектролитные комплексы в водных растворах может быть использована для повышения устойчивости легко разрушающихся соединений, таких как каротиноиды [22] и антоцианы [23].

2.2. Альгинаты и их применение для стабилизации пищевых эмульсий

Альгинат натрия – натриевая соль альгиновой кислоты – признанный пищевой ингредиент, широко используемый в производстве функциональных продуктов питания. В качестве пищевого ингредиента применение альгината основано на трех основных свойствах: способности образовывать вязкие растворы, геле- и пленкообразование. Рассматриваемый полисахарид находит широкое применение при создании множества новых функциональных продуктов питания, таких как пищевой кисель, реструктурированное мясо, упаковочные и защитные материалы для фасованных, нарезанных или подготовленных фруктов, овощей и др. Кроме того, новые сферы применения альгината натрия могут появиться после его химических, физических и биологических модификаций, приводящих к получению производных с требуемыми функциональными свойствами.

Альгинат натрия является полисахаридом, выделяемым из бурых водорослей, где он находится в виде компонента клеточной стенки, выполняя структурные функции, подобные каррагинанам и агару [24]

Являясь полимерной кислотой, альгинат состоит из остатков 1,4-связанной α -L-гулурановой кислоты (G-звенья) и β -D-маннуроновой кислоты (M-звенья). Эти два кислотных остатка сильно различаются по стереохимии по атому C-5. Альгинаты, полученные из различных видов водорослей, различаются по содержанию G- и M-звеньев, которые присутствуют в полимерной цепи в виде блоков GG, MM и MG/GM в различных соотношениях, что приводит к различиям в физических свойствах альгинатных гелей [25] и особенностей соответствующих продуктов на основе альгината [24].

Широкое практическое применение альгината основывается на его трех основных свойствах. Во-первых, это способность повышать вязкость водных растворов. Второе – это его способность превращаться в гель при добавлении солей двухвалентных катионов различных металлов [25, 26] к водному раствору альгината натрия. В отличие от гелей каррагинана или агара, для образования термостабильного альгинатного геля не требуется изменения температуры, что экономит не только энергию, но и защищает биологически активные вещества от термодеструкции. Третьим практически значимым свойством альгината натрия является способность образовывать пленки и волокна. Кроме того, уникальная структура этого полимера обладает биосовместимостью [27].

Как природный водорастворимый полимер, альгинат образует вязкие водные растворы. Загущающие свойства альгината обычно используются при производстве джемов, мармеладов и фруктовых соусов, поскольку взаимодействия альгината и пектина обратимы при нагревании и обеспечивают более высокую вязкость, чем любой отдельный компонент. Альгинаты также используются для загущения десертов и соусов, например, майонеза. Использование альгината отдельно или в сочетании с другими загустителями улучшает органолептические характеристики ряда пищевых продуктов с низким содержанием жира. Гидрофильная природа альгината помогает удерживать воду и улучшает текстуру пищи, что приводит к улучшению ее восприятия потребителями [28].

В качестве гелеобразующего агента альгинат образует устойчивые гели в широком интервале температур и при низком значении pH, что может быть использовано в пищевой промышленности. Введение альгинатов в рецептуру кулинарных кремов придает им устойчивость к замораживанию/оттаиванию и уменьшает разделение твердых и жидких компонентов. В мороженом альгинат часто используется в сочетании с другими гидроколлоидами для загущения и стабилизации, что позволяет контролировать вязкость продукта, повышая устойчивость к тепловому шоку, уменьшая усадку и образование кристаллов льда. Кроме того, альгинат широко используется при создании искусственных продуктов, например, аналога рыбьей икры [28].

В качестве эмульгатора в промышленности в настоящее время предлагается использование не альгиновой кислоты или ее соли, а продукт хи-

мической модификации – пропиленгликоль альгинат (ПГА) (рис. 1). Это соединение представляет собой этерифицированное производное альгината, которое широко используется в пищевой промышленности и производстве напитков. ПГА был впервые получен Kelco в 1949 году [29].

Поскольку в этом соединении карбоксильная группа альгиновой кислоты замещена эфиром пропиленгликоля, ПГА растворяется в кислой среде до pH 3-4, в условиях, при которых альгинат натрия выпадает в осадок в виде альгиновой кислоты. Устойчивость в кислой среде и к ионной силе раствора делает пропиленгликоль альгинат ценным компонентом в пищевых продуктах и напитках с высокой кислотностью или содержанием ионов двухвалентных металлов. Кроме того, ПГА также обладает высокой липофильностью и эмульгирующей способностью за счет пропиленгликольного фрагмента, содержащегося в его молекулах.

Внесение 0.1 % пропиленгликоль альгината повышает коллоидную стабильность фруктовых и овощных соков, не ухудшая их вкус и состав. Благодаря высоким эмульгирующим характеристикам пропиленгликоль альгината, можно получать концентраты и соки, обогащённые сухими веществами (мякотью и др.), как гидрофильного, так и липофильного характера, что благоприятно сказывается на потребительских характеристиках конечного продукта [28].

В литературе также имеются сведения об использовании пропиленгликоль альгината в смеси с некоторыми другими полисахаридами (карбоксиметилцеллюлоза, некоторые камеди и др.) в качестве стабилизатора протеиновых напитков, пивной пены, соевого молока [28]. Отмечается, что требуемое количество стабилизатора не превышает 0.5 %, из них более 60 % приходится на пропиленгликоль альгинат, что не сказывается на вкусе и консистенции конечного продукта.

Кроме того, пропиленгликоль альгинат рекомендовал себя как стабилизатор йогуртов с фруктовыми наполнителями. Из-за кислотных значений pH выбор стабилизаторов подобных систем довольно ограничен, но, кроме поддержания высокой однородности системы и устойчивости к расслоению, эмульгатор способствует приданию продукту товарного вида [28].

Благодаря наличию гидрофобных фрагментов в макромолекулах пропиленгликоль альгината, последний выступает в качестве эффективного стабилизатора заправок для салатов, улучшает внешние и органолептические харак-

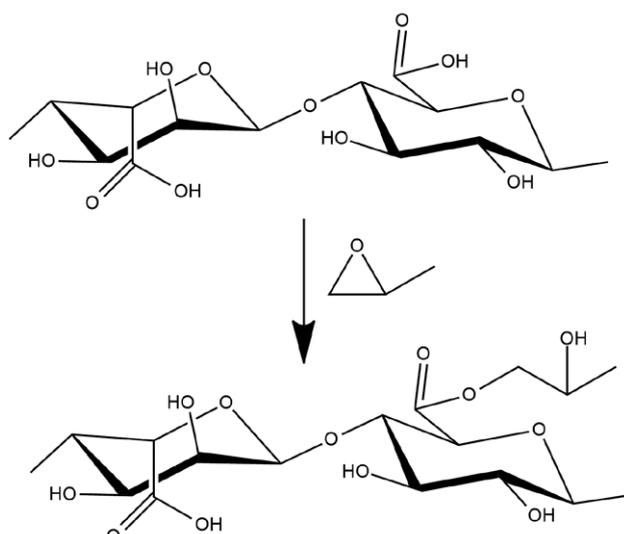


Рис. 1. Схема процесса синтеза пропиленгликоль альгината

теристики хлеба и текстуру макаронных изделий, снижая их ломкость [28, 30].

2.3. Стабилизация пищевых эмульсий и пен белок-полисахаридными комплексами

Белок-полисахаридные комплексы сочетают в себе физико-химические и функциональные свойства входящих в их состав макромолекул, сочетая их гидрофобные и гидрофильные свойства. Следовательно, они могут успешно использоваться в качестве агентов, стабилизирующих границу раздела фаз воздух/вода или масло/вода в сложных пищевых системах [31].

Schmitt и др. [32] изучали поверхностно-активные свойства на границе раздела воздух/вода комплексов β -лактоглобулин/камедь акации, полученных при pH 4.2 и соотношении компонентов 2:1, и сравнивали их с поведением β -лактоглобулина. Поверхностная активность комплексов была аналогичной для величины, соответствующей белку, однако, комплексы формировали более прочные вязкоупругие пленки толщиной около 250 Å на границе раздела фаз. В результате этого газопроницаемость пленок, получаемых из ассоциатов, была ниже по сравнению с пленками из нативного β -лактоглобулина. Кроме того, за счет снижения скорости агрегации пузырьков воздуха комплексы стабилизировали водно-воздушные пены. Полученные результаты были использованы для составления рецептуры сложных пищевых продуктов, например, фруктовых мороженого и щербета, для которых стабильность пузырьков воздуха в пене коррелирует с улучшением органолептических пара-

метров продукта. Аналогичные свойства проявляют и комплексы изолята сывороточного протеина и камеди акации, что позволяет заменять животный желатин при создании вегетарианских продуктов [33].

Комплексы на основе β -лактоглобулина и пектинов также применяются для стабилизации границы раздела воздух/вода [34]. В этом случае плотность заряда пектина, т.е. степень его метилирования, и соотношение компонентов определяют размер образующихся комплексов и, следовательно, их поверхностную активность. Вязкоупругие свойства границы раздела воздух/вода определяются либо адсорбцией комплекса, либо последовательной адсорбцией компонентов. В последнем случае наблюдалось образование вязкоупругих пленок. Исследование структуры образующихся пленок показало, что оба полученных образца содержат плотный слой вблизи границы воздух/вода, который, вероятно, состоит из β -лактоглобулина. Однако толщина пленки, полученной с последовательно адсорбированными компонентами, больше, чем для адсорбированных комплексов. Стоит отметить, что ассоциаты на основе овальбумина и пектина или β -лактоглобулина и карбоксилированного пуллулана также проявляют поверхностно-активные свойства на границе вода-воздух и могут быть использованы для стабилизации пены. Показано, что напин – белок, выделенный из рапсовой муки, образует комплексы с пектинами, также стабилизирующими водные пены и обладающими более высокой поверхностной активностью по сравнению с нативным белком [35].

Эмульсии, широко распространенные в пищевой промышленности, также могут быть стабилизированы белок-полисахаридными комплексами. Если комплекс формируется на этапе эмульгирования, происходит образование смешанной эмульсии [31]. Существует также послойная техника стабилизации эмульсии: в этом случае первичная эмульсия стабилизируется белком, а затем вносят дисперсию полисахарида, индуцируя межфазное комплексообразование, приводящее к образованию так называемых двуслойных эмульсий [36]. Подобный подход наиболее часто используется в промышленных масштабах, так как он способствует образованию устойчивых эмульсий для широкого спектра соединений. Исследование реологического поведения комплекса казеинат натрия-декстрансульфат показало, что образующиеся межфазные слои на границе раздела гораздо

более вязкоупруги в случае смешанных эмульсий [37]. Интересно, что полученные эмульсии показали различную pH-стабильность, особенно в кислой среде: смешанные эмульсии оказались гораздо более устойчивыми к флокуляции по сравнению с двуслойными. Эти результаты имеют практическое применение для контроля липолиза *in vivo*. Ducel и соавторы [38] сообщили о высокой поверхностной активности в системе масло/вода для комплексов горохового глобулина или α -глиадина с камедью акации. Полученные пленки характеризовались длительным временем релаксации и высокой эластичностью. Кроме того, комплексы, полученные при более низком значении pH, эффективнее стабилизируют эмульсии из-за более высокой растекаемости масляных капель на поверхности.

Cho и McClements [39] подчеркнули важность контроля соотношения белка и полисахарида и концентрации последнего для обеспечения коллоидной стабильности двуслойной эмульсии, получаемой в присутствии комплекса β -лактоглобулин и пектин при pH 3.5. Слишком низкое (<0.02 %) или высокое (>0.1 %) содержание пектина приводило к образованию нестабильной эмульсии, обусловленному флокуляцией. В другом исследовании было показано, что в присутствии 100 мМ NaCl и комплекса β -лактоглобулин/цитрусовый пектин образуются более устойчивые эмульсии при pH 3–4 по сравнению с эмульсиями, стабилизированными только β -лактоглобулином. Это объясняется тем, что в присутствии электролита достигается экранирование межфазного заряда [40]. Некоторые другие комплексы белок-полисахарид (β -лактоглобулин с альгинатом, ι -каррагинаном или камедью акации) использовали для получения кислотоустойчивой двуслойной эмульсии и для промышленного производства напитков [41, 42].

Использование поликатионного хитозана позволяет получать стабильные эмульсии на основе изолята сывороточного протеина при pH 6.0 [43]. Как и для других описанных систем, важную роль в стабилизации играет соотношение белка и полисахарида в используемом комплексе. Интересно, что подобные системы образуются при гораздо более низком pH (около 3.0) и могут снижать поверхностное натяжение также, как и чистые белки. Устойчивые концентрированные эмульсии, содержащие до 40 % рапсового масла, можно получить при использовании широкого диапазона концентраций биополимера в диапазоне от 3.8 до 11.2 %, что позволяет допол-

нительно контролировать объемную вязкость образующегося продукта. Стабильность эмульсии, содержащей 15 % подсолнечного масла, стабилизированной изолятом сывороточного белка, повышается при использовании комплекса хитозана и камеди акации при pH 3.0. Использование комплекса приводит к образованию монодисперсных капель, гелеобразных эмульсий или скопления масляных капель в зависимости от соотношения хитозан/камедь акации [44].

Исследование эмульгирующих свойств комплекса изолята сывороточного белка и карбоксиметилцеллюлозы выявило зависимость от соотношения белок/полисахарид для гетерогенных систем, содержащих 10 и 20 % масляной фракции. Следует отметить, что использование этих комплексов позволяет получать термостойкие эмульсии, чего не наблюдается в случае стабилизации чистым белком [45].

Комплексы изолята соевого белка и гидрофобно-модифицированного пектина стабилизируют эмульсии при pH 5.5. Было также показано, что белок-полисахаридные комплексы способны стабилизировать внешнюю границу раздела эмульсий В/М/В, полученных при $\text{pH} \leq 6.0$ [45].

3. Проблемы и перспективы использования полисахаридов для стабилизации пищевых эмульсий

Сложные составы пищевых систем определяют высокие требования, предъявляемые к эмульгаторам, среди которых особенно важны безопасность для организма и окружающей среды, а также возможность сохранять эмульгирующие свойства во время обработки пищевых продуктов. Исследователи, предлагающие полисахариды для стабилизации эмульсий, сталкиваются с проблемами их взаимодействия с прочими компонентами систем (электростатические взаимодействия с солями и белками, образование водородных связей с другими макромолекулами, гидрофобное взаимодействие с полифенолами и др.), а также они подвергаются термической деструкции в результате обработки продуктов питания. Несмотря на то, что принципы воздействия внешних факторов на эмульгирующие свойства полисахаридов, казалось бы, уже окончательно установлены, сильно различающаяся молекулярная структура полисахаридов приводит к значительным вариациям их эмульгирующих свойств. Поэтому в случае использования нового, ранее неопisanного полисахарида в качестве пищевого эмульгатора, необходимо

полностью изучить его коллоидно-химические характеристики. Кроме того, в литературе практически отсутствует информация об изменении эмульгирующих свойств полисахаридов при обработке пищевых продуктов (термических или нетермических), а также о молекулярных механизмах этих изменений. Таким образом, внедрение природных полисахаридов в качестве эмульгаторов пищевых продуктов, несомненно, является трудоемкой задачей.

В настоящее время эмульсионные системы, полученные с использованием полисахаридов в качестве эмульгаторов, применяются, в основном, для создания функциональных продуктов питания, способных адресно доставлять и стабилизировать активные вещества, а также для изучения механизмов их действия, высвобождения, переваривания, всасывания и транспортировки. Поэтому разработка функционального продукта должна также включать в себя множество этапов исследования, таких как определение структурных характеристик и межфазного поведения полисахарида, характеристик эмульсии (устойчивость, размеры капель и др.), а также изучение кинетики метаболизма и биодоступности высвобождаемых биологически активных веществ. Результаты решения этих задач могут быть использованы для создания эмульсионных систем, которые могли бы адресно доставлять оптимальное количество биологически активных веществ, защищая их от деструкции во время движения по желудочно-кишечному тракту [31].

4. Заключение

Таким образом, полисахариды, в частности хитозан и производные альгиновой кислоты, а также белок-полисахаридные комплексы являются перспективными кандидатами для разработки мультифункциональных эмульсионных систем, способных не только поддерживать устойчивость гетерогенной системы в течение длительного времени, но и также придавать им функциональные свойства, например, являться нано- и микроконтейнерами для биологически активных веществ. Внедрение стабилизаторов на основе полисахаридов в массовое производство пищевых продуктов затруднено ввиду трудоемкости процессов создания подобных систем. Однако тот факт, что альгинат натрия и хитозан уже успешно применяются в пищевых технологиях в качестве загустителей и компонентов для «умной» и экологически

чистой упаковки продуктов питания, увеличивает возможности этих полисахаридов найти скорейшее применение и в других отраслях пищевой промышленности.

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных финансовых конфликтов интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

Список литературы

1. Королева М. Ю., Юртов Е. В. Эмульсии Пикеринга: структура, свойства, использование в качестве коллоидосом и стимул-чувствительных эмульсий. *Успехи химии*. 2022;91(5): 1–33. <https://doi.org/10.1070/RCR5024>
2. Багале У., Калинина И. В., Науменко Н. В., Кади Я. А. М., Малинин А. В., Цатуров А. В. Возможности применения двойных эмульсий в пищевой промышленности. Часть 2: формирование пищевых систем нового формата. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2023;11(1): 27–34. <https://doi.org/10.14529/food230103>
3. Стужук А. Н., Грицкова И. А., Горбатов П. С., Школьников А. В., Кузнецов А. А. Влияние условий диспергирования и природы эмульгатора на дисперсность и устойчивость искусственных полимерных суспензий на основе полиэфиримида. *Известия Академии наук. Серия химическая*. 2022;71(2): 382–388. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48176340>
4. Нуштаева А. В., Вилкова Н. Г. Гидрофобизация частиц кремнезема различными катионными поверхностно-активными веществами. *Известия высших учебных заведений. Серия химия и химическая технология*. 2021;64(3): 41–45. <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20216403.6321>
5. Paciello S., Russo T., De Marchi L., ... Freitas R. Sub-lethal effects induced in *Mytilus galloprovincialis* after short-term exposure to sodium lauryl sulfate: Comparison of the biological responses given by mussels under two temperature scenarios. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. 2023;70: 109644. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2023.109644>
6. Han W., Long W., Peng L., Zhang W., Shi B. Effect of nonionic and anionic surfactant on ecotoxicity and micellization behaviors of dodecyl trimethyl ammonium bromide (DTAB). *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*. 2023;671: 131588. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131588>
7. Amiri-Rigi A., Kesavan Pillai S., Naushad Emambux M. Development of hemp seed oil nanoemulsions loaded with ascorbyl palmitate: Effect of operational parameters, emulsifiers, and wall materials. *Food Chemistry*. 2023;400: 134052. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134052>
8. Feng S., Guo Y., Liu F., ... Zhang Y. The impacts of complexation and glycated conjugation on the performance of soy protein isolate gum Arabic composites at the O/W interface for emulsion-based delivery systems. *Food Hydrocolloids*. 2023;135: 108168. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.108168>
9. Niu H., Hou K., Chen H., Fu X. A review of sugar beet pectin-stabilized emulsion: Extraction, structure, interfacial self-assembly and emulsion stability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. 2022;64(3): 852–872. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2109586>
10. Lin J., Guo X., Ai C., Zhang T., Yu S. Genipin crosslinked sugar beet pectin whey protein isolate/bovine serum albumin conjugates with enhanced emulsifying properties. *Food Hydrocolloids*. 2020;105: 105802. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105802>
11. Anal A. K., Shrestha S., Sadiq, M. B. Biopolymeric based emulsions and their effects during processing, digestibility and bioaccessibility of bioactive compounds in food systems. *Food Hydrocolloids*. 2019;87: 691–702. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.09.008>
12. Сорокин А. В., Холявка М. Г., Лавлинская М. С. Синтез и свойства водных растворов графт-сополимеров хитозана и N-винилимидазола. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2021;23(4): 570–577. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2021.23/3676>
13. Kabanov V. L., Novinyuk L. V. Chitosan application in food technology: a review of recent advances. *Пищевые системы*. 2020;3(1):10–15. <https://doi.org/10.21323/2618-9771-2020-3-1-10-15>
14. Ольшанникова С. С., Редько Ю. А., Лавлинская М. С., Сорокин А. В., Холявка М. Г., Юдин Н. Е., Артюхов В. Г. Исследование протеолитической активности ассоциатов фицина с наночастицами хитозана. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2022;24(4): 523–528. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2022.24/10556>
15. Гончарова С. С., Редько Ю. А., Лавлинская М. С., Сорокин А. В., Холявка М. Г., Кондратьев М. С., Артюхов, В. Г. Биокатализаторы на основе ассоциатов папаина с наночастицами хитозана. *Конденсированные среды и межфазные границы*. 2023;25(2): 173–181. <https://doi.org/10.17308/kcmf.2023.25/11098>

16. Мальхина Н. В., Ольшанникова С. С., Холяв-ка М. Г., Сорокин А. В., Лавлинская М. С., Артюхов В. Г., Файзуллин Д. А., Зувев Ю. Ф. Получение комплексов фицина с карбоксиметилхитозаном и N-(2-гидрокси)пропил-3-триметиламмонийхитозаном и изучение их структурных особенностей. *Биоорганическая химия*. 2023;49(1): 93–104. <https://doi.org/10.31857/S0132342322060173>
17. Liu H., Wang C., Zou S., Wei Z., Tong Z. Simple, reversible emulsion system switched by pH on the basis of chitosan without any hydrophobic modification. *Langmuir*. 2012;28(30): 11017–11024. <https://doi.org/10.1021/la3021113>
18. Rodríguez M. S., Albertengo L. A., Agulló E. Emulsification capacity of chitosan. *Carbohydrate Polymers*. 2002;48(3): 271–276. [https://doi.org/10.1016/s0144-8617\(01\)00258-2](https://doi.org/10.1016/s0144-8617(01)00258-2)
19. Zhang C., Xu W., Jin W., Shah B. R., Li Y., Li B. Influence of anionic alginate and cationic chitosan on physicochemical stability and carotenoids bioaccessibility of soy protein isolate-stabilized emulsions. *Food Research International*. 2015;77: 419–425. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.09.020>
20. Chang H. W., Tan T. B., Tan P. Y., Nehdi I. A., Sbihi H. M., Tan C. P. Microencapsulation of fish oil-in-water emulsion using thiol-modified β -lactoglobulin fibrils-chitosan complex. *Journal of Food Engineering*. 2020;264: 109680. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.07.027>
21. Ji C., Luo Y. Plant protein-based high internal phase Pickering emulsions: Functional properties and potential food applications. *Journal of Agriculture and Food Research*. 2023;12: 100604. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100604>
22. Roll Zimmer T. B., Barboza Mendonça C. R., Zambiasi R. C. Methods of protection and application of carotenoids in foods – A bibliographic review. *Food Bioscience*. 2022;48: 101829. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101829>
23. He B., Ge J., Yue P., ... Ga X. Loading of anthocyanins on chitosan nanoparticles influences anthocyanin degradation in gastrointestinal fluids and stability in a beverage. *Food Chemistry*. 2017;221: 1671–1677. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.120>
24. Антипова А. П., Сорокин А. В., Лавлинская М. С. Разработка способа получения графт-сополимера на основе альгината натрия для потенциального биомедицинского применения. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация*. 2022; 4: 5–11. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49963545>
25. Makarova A. O., Derkach S. R., Khair T., Kazantseva M. A., Zuev Yu. F., Zueva O. S. Ion-induced polysaccharide gelation: peculiarities of alginate egg-box association with different divalent cations. *Polymers*. 2023;15: 1243. <https://doi.org/10.3390/polym15051243>
26. Zueva O. S., Khair T., Derkach S. R., Kazantseva M. A., Zuev Yu. F. Strontium-induced gelation of sodium alginate in the presence of carbon nanotubes: elemental analysis and gel structure. *Journal of Composites Science*. 2023;7: 286. <https://doi.org/10.3390/jcs7070286>
27. Леньшина Н. А., Конев А. Н., Батенькин М. А., ... Чесноков С. А. Функционализация альгината для микроинкапсуляции инсулин-продуцирующих клеток. *Высокомолекулярные соединения. Серия Б*. 2021;63(6): 365–382. <https://doi.org/10.31857/S2308113921060127>
28. Qin Y., Zhang G., Chen H. The applications of alginate in functional food products. *Journal of Nutrition and Food Science*. 2020;3(1): 13. Режим доступа: <https://www.henrypublishinggroups.com/wp-content/uploads/2020/05/the-applications-of-alginate-in-functional-food-products.pdf>
29. Steiner A. B. *Manufacture of glycol alginates*. US Patent No. 2426215A. Publ. 26.08.1947.
30. Ногаева У. В., Наумова А. А., Новиньков А. Г., ... Абрисимова О. Н. Сравнительное изучение реологических свойств гелей и кремов на различных основах-носителях. *Разработка и регистрация лекарственных средств*. 2022;11(3): 121–129. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2022-11-3-121-129>
31. Ai C. Recent advances on the emulsifying properties of dietary polysaccharides. *eFood*. 2023;4(4): e106. <https://doi.org/10.1002/efd2.106>
32. Schmitt C., Kolodziejczyk E., Leser M. E. Interfacial and foam stabilization properties of β -lactoglobulin-acacia gum electrostatic complexes. In: *Food colloids: interactions, microstructure and processing*. E. Dickson (ed.). Royal Society of Chemistry; 2005. p. 284–300. <https://doi.org/10.1039/9781847552389-00284>
33. Schmitt C., Kolodziejczyk E. Protein-polysaccharide complexes: from basics to food applications. In: *Gums and stabilisers for the food industry*, 15. Williams P. A., Phillips G. O. (eds.). Royal Society of Chemistry; 2010. p. 211–222. <https://doi.org/10.1039/9781849730747-00211>
34. Ganzevles R. A., Cohen Stuart M. A., van Vliet T., de Jongh H. H. J. Use of polysaccharides to control protein adsorption to the air–water interface. *Food Hydrocolloids*. 2006;20: 872–878. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2005.08.009>
35. Schmidt I., Novales B., Boué F., Axelos M. A. V. Foaming properties of protein/pectin electrostatic complexes and foam structure at nanoscale. *Journal of Colloid and Interface Science*. 2010;345:316–324. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2010.01.016>

36. McClements D. J. Non-covalent interactions between proteins and polysaccharides. *Biotechnology Advances*. 2006;24: 621–625. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.07.003>

37. Jourdain L. S., Schmitt C., Leser M. E., Murray B. S., Dickinson E. Mixed layers of sodium caseinate + dextran sulfate: influence of order of addition to oil-water interface. *Langmuir*. 2009;25: 10026–10037. <https://doi.org/10.1021/la900919w>

38. Ducloux V., Richard J., Popineau Y., Boury F. Rheological interfacial properties of plant protein Arabic gum coacervates at the oil-water interface. *Biomacromolecules*. 2005;6:790–796. <https://doi.org/10.1021/bm0494601>

39. Cho Y. H., McClements D. J. Theoretical stability maps for guiding preparation of emulsions stabilized by protein-polysaccharide interfacial complexes. *Langmuir*. 2009;25: 6649–6657. <https://doi.org/10.1021/la8006684>

40. Guzey D., Kim H. J., McClements D. J., Factors influencing the production of o/w emulsions stabilized by β -lactoglobulin-pectin membranes. *Food Hydrocolloids*. 2004;18: 967–975. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2004.04.001>

41. Harnsilawat T., Pongsawatmanit R., McClements D. J. Stabilization of model beverage cloud emulsions using protein-polysaccharide electrostatic complexes formed at the oil-water interface. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2006;54: 5540–5547. <https://doi.org/10.1021/jf052860a>

42. Guzey D., McClements D. J. Formation, stability and properties of multilayer emulsions for application in the food industry. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2006;128–130: 227–248. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2006.11.021>

43. Laplante S., Turgeon S. L., Paquin P. Effect of pH, ionic strength, and composition on emulsion stabilising properties of chitosan in a model system containing whey protein isolate. *Food Hydrocolloids*. 2005;19: 721–729. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2004.08.001>

44. Moschakis T., Murray B. S., Biliaderis C. Modifications in stability and structure of whey protein-coated o/w emulsions by interacting chitosan and gum arabic mixed dispersions. *Food hydrocolloids*. 2010;24: 8–17. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2009.07.001>

45. Schmitt C., Turgeon S. L. Protein/polysaccharide complexes and coacervates in food systems. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2011;167(1–2): 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2010.10.001>

Информация об авторах

Лавлинская Мария Сергеевна, к. х. н., с. н. с. кафедры биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-9058-027X>
maria.lavlinskaya@gmail.com

Сорокин Андрей Викторович, к. б. н., с. н. с. кафедры биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0001-5268-9557>
andrew.v.sorokin@gmail.com

Холявка Марина Геннадьевна, д. б. н., доцент, профессор кафедры биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет; профессор кафедры физика Севастопольского государственного университета (Воронеж, Севастополь, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-1390-4119>
holyavka@rambler.ru

Зуев Юрий Федорович, д. х. н., профессор, руководитель лаборатории биофизической химии наносистем, Казанский институт биохимии и биофизики, Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук» (Казань, Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-6715-2530>
yufzuev@mail.ru

Артюхов Валерий Григорьевич, д. б. н., профессор, заведующий кафедрой биофизики и биотехнологии, Воронежский государственный университет (Воронеж Российская Федерация).

<https://orcid.org/0000-0002-5872-8382>
artyukhov@bio.vsu.ru

Поступила в редакцию 13.09.2023; одобрена после рецензирования 06.11.2023; принята к публикации 15.11.2023; опубликована онлайн 25.06.2024.