

# Пищевые ингредиенты, сырье и материалы Food ingredients, raw materials and materials

Научная статья

УДК 554.774

DOI: 10.14529/food230104

## БИОАКТИВНОСТЬ ЭМУЛЬСИЙ ПИКЕРИНГА В ПИЩЕВОЙ МАТРИЦЕ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

**И.Ю. Потороко**<sup>1</sup>, [potorokoiy@susu.ru](mailto:potorokoiy@susu.ru)

**А.В. Паймулина**<sup>2</sup>, [aaaminaaa@mail.ru](mailto:aaaminaaa@mail.ru)

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия

**Аннотация.** В настоящее время во всем мире наблюдается экспоненциально растущий интерес к устойчивым эмульсиям Пикеринга (ЭП), стабилизированным твердыми частицами. По сравнению с обычными эмульсиями Пикеринга обладают многими преимуществами, такими как возможность сокращения количества используемых эмульгаторов, биосовместимость и более высокая безопасность. При этом потенциальное применение их в пищевых системах стало рассматриваться с высокой степенью применимости для технологии линейки продуктов профилактической направленности. Методы разработки таких эмульсий должны базироваться на комплексном решении сохранения биоактивных свойств при встраивании нагруженных композиций в пищевую матрицу продукта (ПМП). Цель данной работы состоит в обоснованном подходе практической реализации разработанных процессов фортификации, основанных на использовании технологий Пикеринга для получения биоактивных, устойчивых во времени пищевых эмульсий. Авторами сформирован дуальный подход от теории к практике и определены задачи, включающие обобщение последних достижений в области создания пищевых эмульсий Пикеринга. В первой части работы описаны свойства биоактивных фортификатов (БАФ), определяющие их пригодность для технологии эмульсий Пикеринга. Выделены наиболее перспективные биоактивные фортификаты-стабилизаторы для пищевых эмульсий Пикеринга и технологии стабилизации. На основании обобщения теоретических данных определены потенциальные претенденты-образцы для пилотных исследований в цепочке БАФ > ЭП > ПМП. Исследования планируется направить на установление оптимальных сырьевых компонентов для стабилизации эмульсии Пикеринга, а также липидной фракции с учетом жирно-кислотного состава и витаминного комплекса отдельных видов жиров; прослеживание устойчивости показателей биоактивности используемого стабилизатора в системе полученного пищевого продукта; моделирование эффективной конструкции эмульсии Пикеринга, с учетом образующихся типов связей и определения их устойчивости в пищевых матрицах.

**Ключевые слова:** эмульсии Пикеринга, пищевые эмульсии, стабильные эмульсии, наночастицы, частицы Пикеринга, пищевые системы

**Благодарности.** Статья выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научно-го фонда (РНФ) в рамках проекта 22-26-00079.

**Для цитирования:** Потороко И.Ю., Паймулина А.В. Биоактивность эмульсий Пикеринга в пищевой матрице: теория и практика // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2023. Т. 11, № 1. С. 35–45. DOI: 10.14529/food230104

Original article  
DOI: 10.14529/food230104

## BIOACTIVITY OF PICKERING EMULSIONS IN FOOD MATRIX: THEORY AND PRACTICE

I. Yu. Potoroko<sup>1</sup>, potorokoiy@susu.ru  
A. V. Paymulina<sup>2</sup>, aaaminaaa@mail.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup> Siberian Federal Scientific Center of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk, Russia

**Abstract.** There is currently an exponentially growing interest worldwide in particulate-stabilized stable Pickering emulsions (EP). Compared to conventional emulsions, Pickering emulsions offer many advantages such as the ability to reduce the amount of emulsifiers used, biocompatibility and higher safety. At the same time, their potential application in food systems began to be considered with a high degree of applicability for the technology of a preventive product line. Methods for the development of such emulsions should be based on a comprehensive solution for the preservation of bioactive properties when embedding loaded compositions into the food matrix of the product (FMA). The purpose of this work is to provide a reasonable approach to the practical implementation of the developed fortification processes based on the use of Pickering technologies to obtain bioactive, time-stable food emulsions. The authors formed a dual approach from theory to practice and defined tasks, including generalization of the latest achievements in the field of creating Pickering food emulsions. The first part of the work describes the properties of bioactive fortificates (BAF) that determine their suitability for the technology of Pickering emulsions. The most promising bioactive fortificates-stabilizers for Pickering's food emulsions and stabilization technologies have been identified. Based on the generalization of theoretical data, potential candidate models for pilot studies in the BAF>EP>FMA chain were identified. Research is planned to be aimed at establishing the optimal raw materials for stabilizing the Pickering emulsion, as well as the lipid fraction, taking into account the fatty acid composition and vitamin complex of certain types of fats; monitoring the stability of the indicators of the bioactivity of the stabilizer used in the system of the obtained food product; modeling the effective design of the Pickering emulsion, taking into account the types of bonds formed and determining their stability in food matrices.

**Keywords:** Pickering emulsions, food emulsions, stable emulsions, nanoparticles, Pickering particles, food systems

**Acknowledgments.** The article was financially supported by a grant from the Russian Science Foundation (RSF) within the framework of project 22-26-00079.

**For citation:** Potoroko I. Yu., Paymulina A. V. Bioactivity of Pickering emulsions in food matrix: theory and practice. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2023, vol. 11, no. 1, pp. 35–45. (In Russ.) DOI: 10.14529/food230104

### Введение

Рынок пищевых продуктов, пригодных для профилактики рисков возникновения тех или иных заболеваний, в настоящее время активно развивается, производители все чаще дополняют ассортиментную линейку продуктов для «здорового питания». Среди такого рода предложений заметно увеличилась доля продуктов, обогащенных биологически активными и функциональными компонентами. Вместе с тем, используемые для фортификации пищевые ингредиенты в большинстве

своем плохо встраиваются в пищевую матрицу продукта (ПМП), что снижает ожидаемые эффекты их биодоступности и препятствует встраиванию активных компонентов в процессы метаболизма.

В качестве перспективного инструмента для достижения поставленных целей с высокой степенью эффективности могут быть применены эмульсии Пикеринга (ЭП). В этом контексте наблюдается огромный рост интереса исследователей всего мира к эмульсиям, полученным по технологиям Пикеринга,

представляющим собой систему, стабилизированную твердыми частицами [20, 23]. Впервые они были описаны в 1907 году С. Пикерингом и В. Рамсденом, обнаружившими стабилизирующий эффект твердых частиц на границе раздела фаз в эмульсиях [16, 17].

Кроме того, эмульсии Пикеринга по сравнению с обычными пищевыми эмульсиями имеют ряд доказанных преимуществ [7, 25]:

– могут оставаться стабильными на протяжении длительного времени при изменении рН среды, действия ионных сил, вариации температур и состава масляной фазы системы;

– требуют меньшего количества стабилизаторов, а поверхностно-активные вещества могут быть заменены на частицы природного происхождения, что делает возможным применение их в пищевой промышленности;

– обладают хорошей биосовместимостью с пищевой матрицей продукта, могут использоваться в качестве носителей для доставки биологически активных веществ в соответствующие системы организма человека.

Однако потенциальное применение ЭП в технологии пищевых производств стало рассматриваться сравнительно недавно [9, 10, 11, 13, 19]. Рассматривая возможности применения ЭП как эффективного средства доставки биоактивных компонентов, прежде всего следует учитывать наиболее значимые свойства самих обогащающих компонентов (фортификаторов): химическую нестабильность, переменную растворимость, что безусловно взаимосвязано с их биодоступностью и эффективностью действующего начала.

Следовательно, разработка и применение ЭП для доставки биоактивных соединений в составе ПМП должны базироваться на комплексном решении сохранения биоактивности при ведении процесса фортификации. Немаловажно оценивать влияние технологических операций, осуществляемых при производстве продуктов для «здорового питания», сопровождаемых механическими и физико-химическими воздействиями. На основании чего для практической реализации научно разработанных процессов фортификации ЭП нагруженных биоактивными композициями веществ в пищевую матрицу продукта в качестве основной цели исследования определен дуальный подход от теории к практике.

Для достижения поставленной цели на первом этапе исследований определены следующие задачи:

– изучить свойства фортификаторов, определяющие их пригодность для получения биоактивных эмульсий Пикеринга;

– исследовать влияние фортификаторов в качестве стабилизирующих частиц для эмульсий Пикеринга.

#### **Свойства биоактивных фортификаторов пищевых эмульсий Пикеринга. Теоретические аспекты**

Механизм стабилизации эмульсий Пикеринга твердыми частицами, которые физически стабилизируют границу раздела масла и воды, отличается от действия поверхностно-активных веществ в обычных эмульсиях [18]. Существует множество факторов, обуславливающих стабильность свойств эмульсий Пикеринга, в совокупности которых выделены наиболее значимые: амфифильность, концентрация, размер и форма загружаемых в эмульсионную систему частиц.

Твердые частицы должны в ЭП прежде всего создавать физический барьер, препятствующий слиянию капель [24], что достижимо за счет применения в качестве стабилизаторов амфифильных частиц Януса, способных значительно улучшать межфазную стабильность в эмульсии. Иначе говоря, вносимые в ЭП частицы должны обладать *двойной смачиваемостью*, т. е. иметь гидрофильное и гидрофобное полушария [15]. Такая частица будет располагаться на границе раздела масла и воды в зависимости от ее относительного сродства к обеим фазам, которое можно охарактеризовать краевым углом  $\theta$  (более или менее  $90^\circ$ ) [3]. Следовательно, частицы будут заставлять границу раздела прогибаться в сторону той фазы, к которой их сродство ниже, т. е. частицы, преимущественно смачиваемые водой (гидрофильные), будут пригодны для образования эмульсий масло-в-воде, тогда как частицы, преимущественно смачиваемые маслом (липофильные), будут пригодны для образования эмульсий вода-в-масле (рис. 1).

Особенностью стабилизации по Пикерингу является высокая энергия, необходимая для удаления частицы, адсорбированной на границе раздела, которая зависит от размера частицы и краевого угла [3]:

$$G = \pi r^2 \gamma (1 - |\cos \theta|)^2, \quad (1)$$

где  $G$  – свободная энергия десорбции;  $r$  – радиус твердой частицы Пикеринга;  $\gamma$  – поверхностное натяжение между фракциями;  $\theta$  – краевой угол.

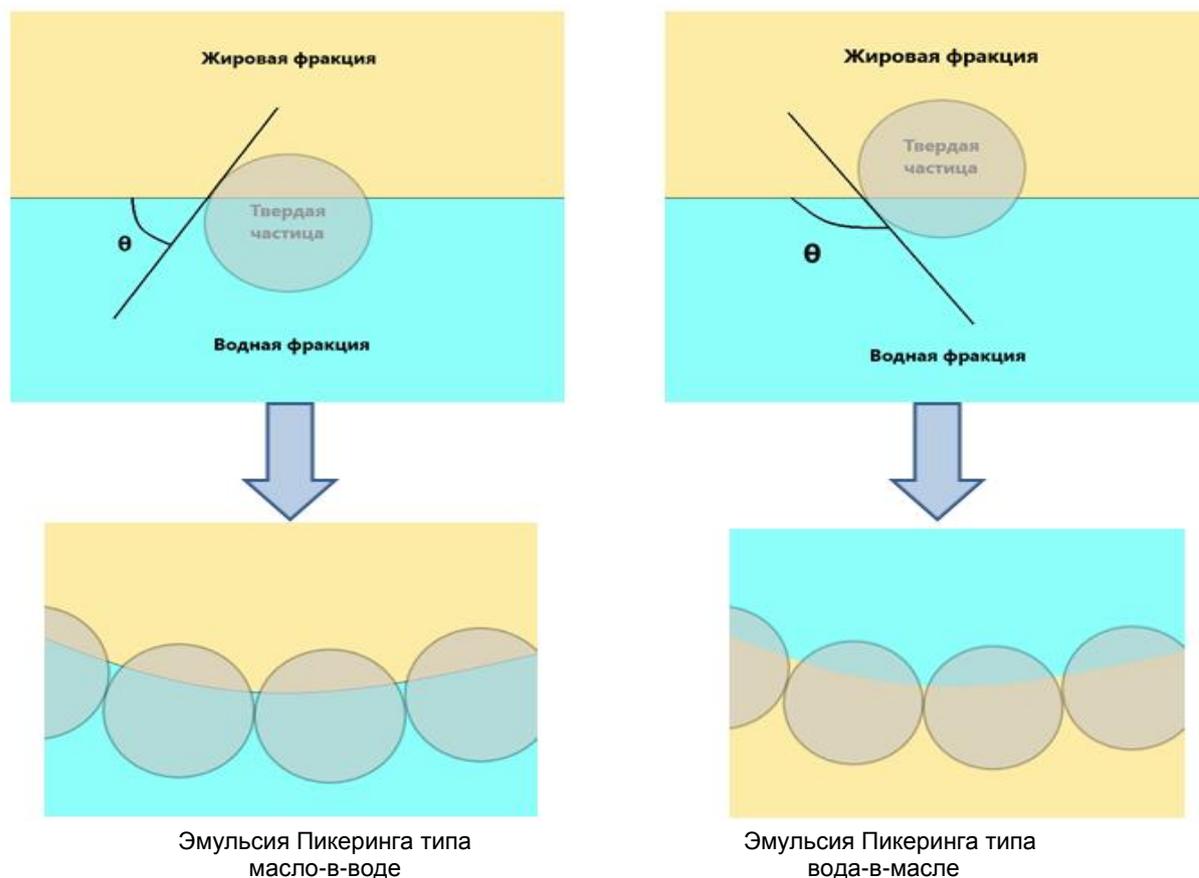


Рис. 1. Механизм образования эмульсии Пикеринга в зависимости от положения твердой частицы на границе раздела фаз при краевом угле ( $\theta$ ) более или менее  $90^\circ$

Из уравнения (1) следует, что наиболее важным фактором, влияющим на энергию десорбции, а соответственно, стабильность эмульсии Пикеринга, является **размер частиц**. С увеличением размера частиц энергия связи увеличивается [12]. При этом размер частиц Пикеринга должен быть как минимум в 10 раз меньше размера капель фракций эмульсии, чтобы адсорбироваться на границе раздела [4]. Частицы малых размеров могут образовывать более мелкие капли с большей стабильностью по сравнению с крупными частицами [8], а также предотвращать коалесценцию капель фракции из-за низкой диффузионной способности, что приводит к медленной кинетике адсорбции более крупных [6]. Устойчивость эмульсий к осаждению и расслоению также снижалась с увеличением диаметра частиц [5]. Поэтому процессы наноэмульгирования вызывают значительный интерес по сравнению с процессами микроэмульгирования.

Помимо размера частиц важным факто-

ром для стабильности эмульсий Пикеринга является **конфигурация частиц**, которая может быть сферической, волокнистой, многоугольной, эллипсоидной и стержнеобразной [24]. Форма частиц описывается соотношением их сторон, которое представляет собой отношение наибольшего диаметра к наименьшему диаметру, ортогональному ему. Более полное покрытие поверхности капель фракции препятствует коалесценции их при столкновении, т. е. частицы с большей поверхностью соприкосновения подходят для стабилизации эмульсий Пикеринга [21].

Величина поверхностного заряда важна для определения стабильности коллоидной дисперсии, которую можно проанализировать путем измерения дзета-потенциала ( $Z_p$ ) суспензии частиц. Как правило, когда суспензия имеет значение  $Z_p > \pm 30$  мВ, взаимодействие между частицами происходит путем электростатического отталкивания из-за высокого поверхностного заряда, следовательно, агломерация частиц может быть подавлена. С дру-

гой стороны, дисперсии с диапазоном  $-30 \text{ мВ} < Z_p < 30 \text{ мВ}$  относятся к области с низким поверхностным зарядом, где сила притяжения Ван-дер-Ваальса доминирует в подвешенной системе и, таким образом, приводит к небольшой степени агрегации дисперсных частиц. Для образования эмульсии Пикеринга поверхностный заряд играет важную роль не только для коллоидных свойств твердых частиц, но и для адсорбции твердых частиц на границе раздела фаз. Когда твердые частицы обладают высоким значением  $Z_p$ , частицы имеют тенденцию отталкиваться друг от друга, а не прочно адсорбироваться на границах раздела масло/вода. Уменьшение  $Z_p$  до низкочarged области вызывает агрегацию твердых частиц, что дополнительно укрепляет сетку частиц в непрерывной фазе и улучшает стабилизацию эмульсии [14].

Минимальная **концентрация частиц**, необходимая для стабилизации эмульсии Пикеринга, должна быть прямо пропорциональна среднему диаметру частиц [12, 22]. При

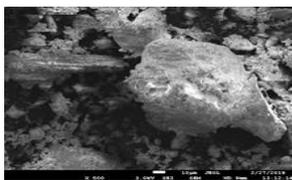
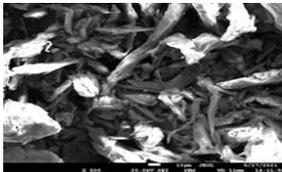
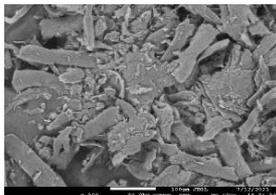
постоянной концентрации более мелкие частицы имеют более высокую поверхность соприкосновения, чем крупные частицы. При ограниченной концентрации частиц более мелкие частицы могут стабилизировать больший объем эмульсий по сравнению с более крупными частицами.

**Влияние биоактивных растительных частиц на стабильность эмульсий Пикеринга. Результаты исследований и их обсуждение.** Для исследования влияния стабилизирующих частиц на получение эмульсий Пикеринга были определены следующие свойства частиц, загружаемых в эмульсионную систему: амфифильность, концентрация, размер и форма.

В качестве стабилизирующих частиц (СЧ) использовали полисахариды бурых водорослей (фукоидан и альгинат натрия) и льняную целлюлозу. Характеристика свойств стабилизирующих частиц на основании теоретических данных представлена в таблице.

С целью регулирования размера частиц и

**Характеристика свойств стабилизирующих частиц  
(по данным открытых источников информации и собственных исследований)**

Наименование образца СЧ	Физические свойства			Биоактивные свойства
	Амфифильность	Размер частиц	Форма частиц	
Фукоидан	В чистом виде водорастворим, но в присутствии полифенолов гидрофильность частично утрачивается	100–1000 кДа  32,14 мкм – 77,1 %; 103,90 мкм – 22,9 %	 иррациональная	Способен проявлять иммуномодулирующую, противоопухолевую, антиоксидантную, антивирусную и антимикробную активность
Альгинат натрия	Способность адсорбции воды и формировать коллоидные суспензии	в среднем 2700 кДа  5,65 мкм – 100 %	 иррациональная	Способен проявлять антиоксидантные, антирадиационные, антиоксидантные, иммуномодулирующие и антимикробные свойства
Целлюлоза льняная	Не растворима в воде	700–2000 кДа  более 100 мкм	 волокнистая	Обладает сорбционными свойствами в отношении радионуклидов и тяжелых металлов

формы использовали нетермические кавитационные эффекты низкочастотного ультразвука при следующих параметрах воздействия: для фукоидана – 630 Вт/л, в течение 30 мин; для альгината натрия и льняной целлюлозы – 630 Вт/л; в течение 18 мин.

В исследованиях использовали: для оценки дисперсного состава метод динамического рассеяния света на лазерном анализаторе размера частиц серии Nanotracs Ultra и Microtracs S3500 (Microtracs Inc., США); для визуального восприятия морфологических характеристик при разных увеличениях применяли метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) высокого разрешения (растровый электронный микроскоп Jeol JSM-7001F, Япония).

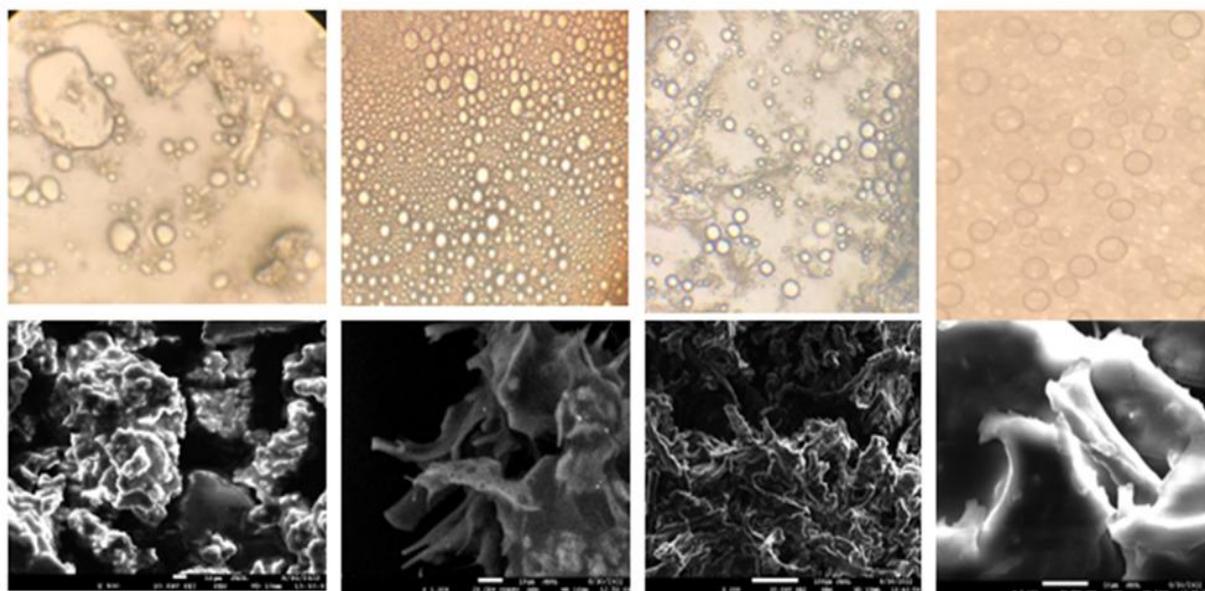
В ходе ультразвукового воздействия дисперсный состав частиц и их конфигурация значительно изменяется, происходит процесс деполимеризации, и как следствие переход в смесь мономеров. Разрушение (фрагментация) макромолекул ускоряется при воздействии кавитационных эффектов.

Результаты исследований доказывают (рис. 2), что показатель дисперсии частиц, близкий к диапазону 200–500 нм, дает основание определить, например, льняную целлюлозу как идеального кандидата на роль стабилизаторов эмульсий Пикеринга [2, 26]. При этом конфигурация капель находится в зависимости от пространственного состояния частиц стабилизаторов.

Биоактивные полисахариды бурых водорослей – фукоидан и альгинат натрия, обладая гидрофильными свойствами, проникают в водную фазу, создавая стерический барьер, который предотвращает близкое сближение капель друг с другом. Кроме того, может также иметь место электростатическое отталкивание между каплями, покрытыми полисахаридом, в результате заряженных групп в полисахаридных цепях. Однако достаточно большой и неравномерный размер частиц полисахаридов в дисперсии может являться ограничительным фактором для создания стабильных эмульсионных систем. Для минимизации вышеуказанных барьерных проблем применяются разного рода воздействия, в том числе сонохимическая деполимеризация (рис. 3).

Микроструктурированные полисахариды бурых водорослей – фукоидан и альгинат натрия представляют собой частицы иррациональной формы с гладкой структурой поверхности, которые адсорбированы на границе раздела масло-вода (рис. 4).

Таким образом, частицы, полученные на основе растительных полисахаридов, имеют высокий исследовательский интерес благодаря присущим им биохимическим свойствам, которые позволяют получить конструкцию эмульсии Пикеринга (КЭП), улучшить стабильность и доставку биоактивных веществ. Различные типы конструкции ЭП (эмульсии



**Рис. 2. Эмульсии Пикеринга, стабилизированные льняной целлюлозой при разных режимах УЗВ получения дисперсии стабилизатора**

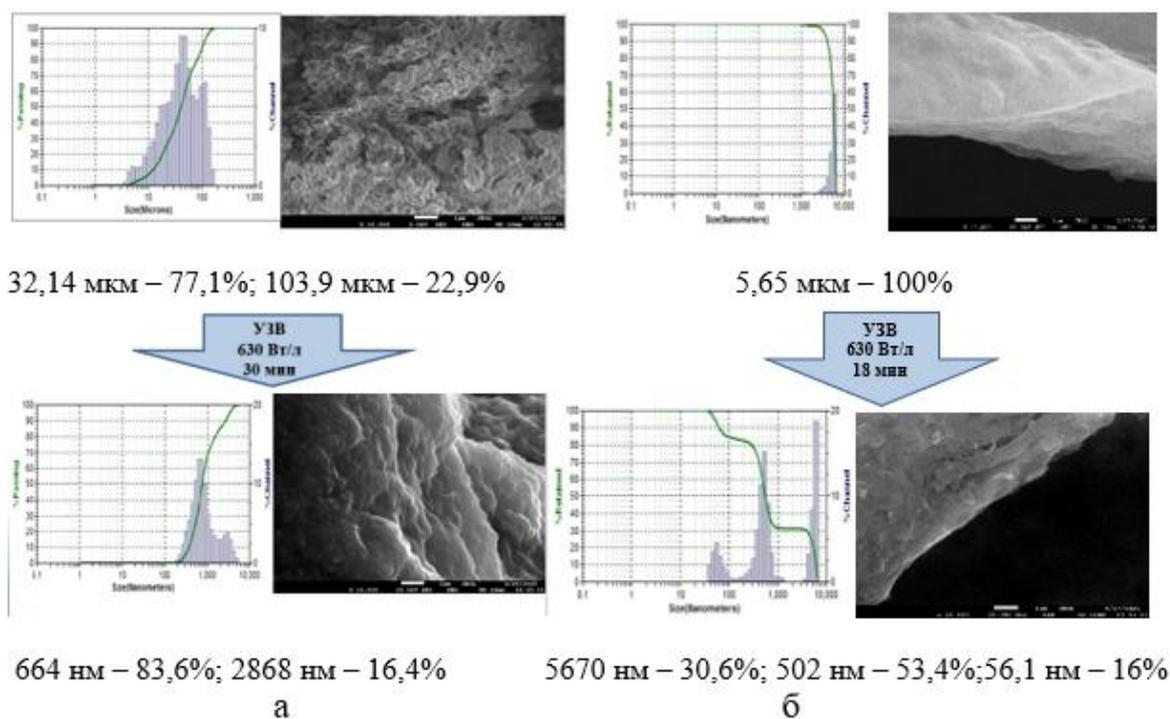


Рис. 3. Дисперсный состав и микроструктура полисахаридов бурых водорослей до и после сонохимической деполимеризации: а) фукоидан; б) альгинат натрия [1]

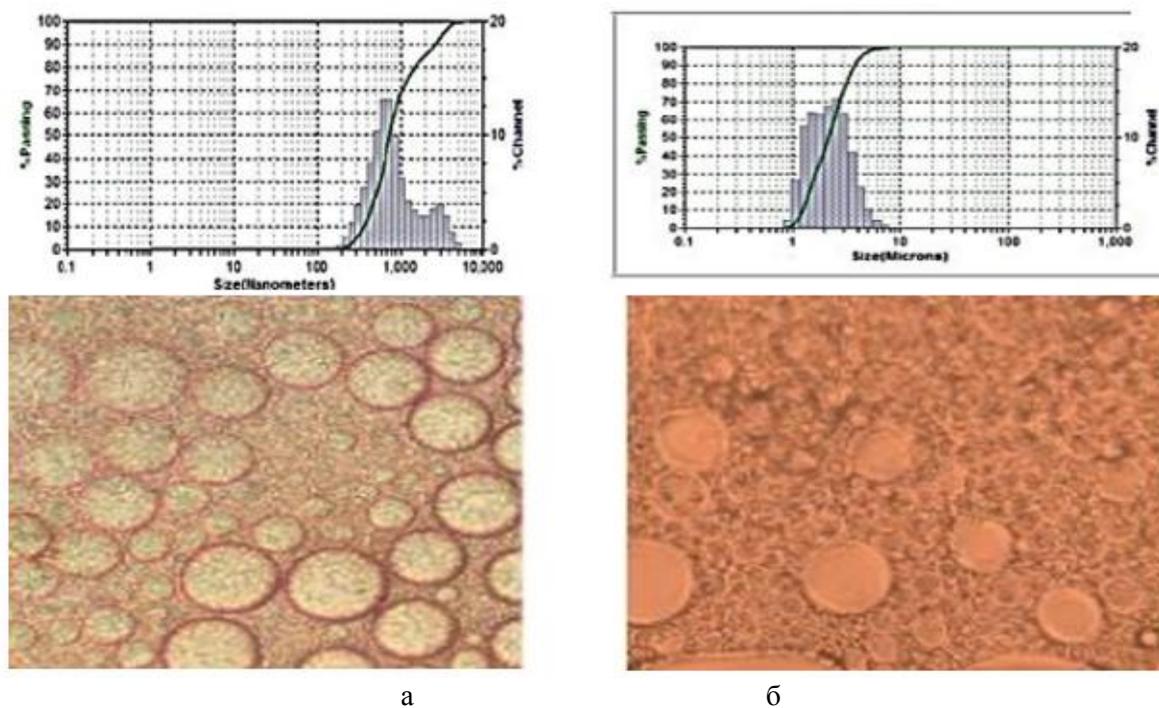


Рис. 4. Эмульсии Пикеринга, нагруженные полисахаридами бурых водорослей: а) фукоидан (600–700 нм); б) альгинат натрия (2–5 мкм)

М/В или В/М, двойные эмульсии М/В/М или В/М/В, эмульгель, эмульсия с высокой внутренней фазой и микрокапсулы) являются универсальным транспортом для инкапсуляции липофильных и гидрофильных БАФ.

Будущие исследования будут сосредоточены на выяснении механизма высвобождения

биоактивных веществ и оценке совместимости с реальными пищевыми системами, а также эффективности и безопасности. Разработка КЭП в нежидком состоянии также должна быть в центре внимания, что обеспечит минимизацию разрыва в цепочке теория > исследования > рынок.

### Список литературы

1. Потороко, И.Ю. Прогнозирование стабильности свойств эмульсий Пикеринга структурированных биоактивными растительными частицами / И.Ю. Потороко, И.В. Калинина, А.В. Паймулина // *Индустрия питания*. 2022. Т. 7, № 4. С. 111–119. DOI: 10.29141/2500-1922-2022-7-4-13.
2. Потороко, И.Ю. Сонохимически наноструктурированные растительные полисахариды: новые стабилизирующие ингредиенты для пищевых эмульсий / И.Ю. Потороко, А.М.Я. Кади, О.Н. Красуля, А.В. Паймулина // *Мясная индустрия*. 2022. № 12. С. 20–23. DOI: 10.37861/2618-8252-2022-12-20-23.
3. Aveyard R., Binks B.P., Clint J.H. Emulsions stabilised solely by colloidal particles // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2003. Vol. 100. P. 503–546. DOI: 10.1016/s0001-8686(02)00069-6
4. Berton-Carabin C.C., Schroën K. Pickering emulsions for food applications: background, trends, and challenges // *Annual review of food science and technology*. 2015. Vol. 6. P. 263–297. DOI: 10.1146/annurev-food-081114-110822
5. Binks B.P. Particles as surfactants – similarities and differences // *Current opinion in colloid & interface science*. 2002. Vol. 7. № 1-2. P. 21–41. DOI: 10.1016/s1359-0294(02)00008-0
6. Capek I. Degradation of kinetically-stable o/w emulsions // *Advances in colloid and interface science*. 2004. Vol. 107. № 2-3. P. 125–155. DOI: 10.1016/s0001-8686(03)00115-5
7. Chen L. et al. Food-grade Pickering emulsions: Preparation, stabilization and applications // *Molecules*. 2020. Vol. 25. № 14. P. 3202. DOI: 10.3390/molecules25143202
8. Dickinson E. Food emulsions and foams: Stabilization by particles // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2010. Vol. 15. № 1-2. P. 40–49. DOI: 10.1016/j.cocis.2009.11.001
9. Gisle Ø.Y.E. et al. Trends in Food Emulsion Technology: Pickering, Nano and Double Emulsions // *Current Opinion in Food Science*. 2023. Art. 101003. DOI: 10.1016/j.cofs.2023.101003
10. Hossain K.M.Z., Deeming L., Edler K.J. Recent progress in Pickering emulsions stabilised by bioderived particles // *RSC advances*. 2021. Vol. 11, № 62. P. 39027–39044. DOI: 10.1039/d1ra08086e
11. Kempin M.V., Kraume M., Drews A. W/O Pickering emulsion preparation using a batch rotor-stator mixer – Influence on rheology, drop size distribution and filtration behavior // *Journal of colloid and interface science*. 2020. Vol. 573. P. 135–149. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.03.103
12. Linke C., Drusch S. Pickering emulsions in foods-opportunities and limitations // *Critical reviews in food science and nutrition*. 2018. Vol. 58. № 12. P. 1971–1985. DOI: 10.1080/10408398.2017.1290578
13. López-Pedrouso M. et al. Potential applications of Pickering emulsions and high internal-phase emulsions (HIPEs) stabilized by starch particles // *Current Opinion in Food Science*. 2022. Vol. 46. Art. 100866. DOI: 10.1016/j.cofs.2022.100866
14. Low L.E. et al. Recent advances of characterization techniques for the formation, physical properties and stability of Pickering emulsion // *Advances in colloid and interface science*. 2020. Vol. 277. Art. 102117. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102117
15. Ortiz D.G. et al. Current trends in Pickering emulsions: Particle morphology and applications // *Engineering*. 2020. Vol. 6. № 4. P. 468–482. DOI: 10.1016/j.eng.2019.08.017
16. Pickering S.U. CXCVI. – Emulsions // *Journal of the Chemical Society, Transactions*. 1907. Vol. 91. P. 2001–2021.

17. Ramsden W. Separation of solids in the surface-layers of solutions and “suspensions” (observations on surface-membranes, bubbles, emulsions, and mechanical coagulation) // Preliminary account. Proceedings of the royal Society of London. 1904. Vol. 72, no. 477–486. P. 156–164. DOI: 10.1098/rspl.1903.0034.
18. Sarkar A., Dickinson E. Sustainable food-grade Pickering emulsions stabilized by plant-based particles // *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2020. Vol. 49. P. 69–81. DOI: 10.1016/j.cocis.2020.04.004
19. Tenorio-Garcia E. et al. Recent advances in design and stability of double emulsions: Trends in Pickering stabilization // *Food Hydrocolloids*. 2022. Art. 107601. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107601
20. Thompson K.L., Armes S.P., York D.W. Preparation of pickering emulsions and colloidosomes with relatively narrow size distributions by stirred cell membrane emulsification // *Langmuir*. 2011. Vol. 27, № 6. P. 2357–2363. DOI: 10.1021/la104970w
21. Wang D. et al. Fabrication and application of pickering emulsion stabilized by high pressure homogenization modified longan shell nanofiber // *Journal of Food Engineering*. 2023. Vol. 339. Art. 111264. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111264
22. Wu J., Ma G. H. Recent studies of Pickering emulsions: particles make the difference // *Small*. 2016. Vol. 12, № 34. P. 4633–4648. DOI: 10.1002/smll.201600877
23. Xia T., Xue C., Wei Z. Physicochemical characteristics, applications and research trends of edible Pickering emulsions // *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 107. P. 1–15. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.11.019
24. Xiao J., Li Y., Huang Q. Recent advances on food-grade particles stabilized Pickering emulsions: Fabrication, characterization and research trends // *Trends in Food Science & Technology*. 2016. Vol. 55. P. 48–60. DOI: 10.1016/j.tifs.2016.05.010
25. Zhao H. et al. A review of multiple Pickering emulsions: Solid stabilization, preparation, particle effect, and application // *Chemical Engineering Science*. 2022. Vol. 248. Art. 117085. DOI: 10.1016/j.ces.2021.117085
26. Zhou L. et al. Applications and effects of ultrasound assisted emulsification in the production of food emulsions: A review // *Trends in Food Science & Technology*. 2021. Vol. 110. P 493–512. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.02.008

### References

1. Potoroko I.Yu., Kalinina I.V., Paimulina A.V. Properties Stability Forecast of Pickering Emulsion Structured by Bioactive Plant Particles. *Food Industry*, 2022, vol. 7, no. 4, pp. 111–119. (In Russ.) DOI: 10.29141/2500-1922-2022-7-4-13.
2. Potoroko I.Yu., Kadi A.M.Y., Krasulya O.N., Paimulina A.V. Sonochemically nanostructured plant polysaccharides: new stabilizing ingredients for food emulsions. *Meat Industry*, 2022, no. 12, pp. 20–23. (In Russ.) DOI: 10.37861/2618-8252-2022-12-20-23.
3. Aveyard R., Binks B.P., Clint J.H. Emulsions stabilised solely by colloidal particles. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2003, vol. 100, pp. 503–546. DOI: 10.1016/s0001-8686(02)00069-6
4. Berton-Carabin C.C., Schroën K. Pickering emulsions for food applications: background, trends, and challenges. *Annual review of food science and technology*, 2015, vol. 6, pp. 263–297. DOI: 10.1146/annurev-food-081114-110822
5. Binks B. P. Particles as surfactants – similarities and differences. *Current opinion in colloid & interface science*, 2002, vol. 7, no. 1-2, pp. 21–41. DOI: 10.1016/s1359-0294(02)00008-0
6. Capek I. Degradation of kinetically-stable o/w emulsions. *Advances in colloid and interface science*, 2004, vol. 107, no. 2-3, pp. 125–155. DOI: 10.1016/s0001-8686(03)00115-5
7. Chen L. et al. Food-grade Pickering emulsions: Preparation, stabilization and applications. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 14, pp. 3202. DOI: 10.3390/molecules25143202
8. Dickinson E. Food emulsions and foams: Stabilization by particles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2010, vol. 15, no. 1-2, pp. 40–49. DOI: 10.1016/j.cocis.2009.11.001
9. Gisle Ø.Y.E. et al. Trends in Food Emulsion Technology: Pickering, Nano and Double Emulsions. *Current Opinion in Food Science*, 2023. Art. 101003. DOI: 10.1016/j.cofs.2023.101003

10. Hossain K.M.Z., Deeming L., Edler K.J. Recent progress in Pickering emulsions stabilised by bioderived particles. *RSC advances*, 2021, vol. 11, no. 62, pp. 39027–39044. DOI: 10.1039/d1ra08086e
11. Kempin M.V., Kraume M., Drews A. W/O Pickering emulsion preparation using a batch rotor-stator mixer – Influence on rheology, drop size distribution and filtration behavior. *Journal of colloid and interface science*, 2020, vol. 573, pp. 135–149. DOI: 10.1016/j.jcis.2020.03.103
12. Linke C., Drusch S. Pickering emulsions in foods-opportunities and limitations. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2018, vol. 58, no. 12, pp. 1971–1985. DOI: 10.1080/10408398.2017.1290578
13. López-Pedrouso M. et al. Potential applications of Pickering emulsions and high internal-phase emulsions (HIPEs) stabilized by starch particles. *Current Opinion in Food Science*, 2022, vol. 46. Art. 100866. DOI: 10.1016/j.cofs.2022.100866
14. Low L.E. et al. Recent advances of characterization techniques for the formation, physical properties and stability of Pickering emulsion. *Advances in colloid and interface science*, 2020, vol. 277. Art. 102117. DOI: 10.1016/j.cis.2020.102117
15. Ortiz D.G. et al. Current trends in Pickering emulsions: Particle morphology and applications. *Engineering*, 2020, vol. 6, no. 4, pp. 468–482. DOI: 10.1016/j.eng.2019.08.017
16. Pickering S.U. CXCVI. – Emulsions. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 1907, vol. 91, pp. 2001–2021.
17. Ramsden W. Separation of solids in the surface-layers of solutions and “suspensions” (observations on surface-membranes, bubbles, emulsions, and mechanical coagulation). *Preliminary account. Proceedings of the royal Society of London*, 1904, vol. 72, no. 477–486, pp. 156–164. DOI: 10.1098/rspl.1903.0034.
18. Sarkar A., Dickinson E. Sustainable food-grade Pickering emulsions stabilized by plant-based particles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2020, vol. 49, pp. 69–81. DOI: 10.1016/j.cocis.2020.04.004
19. Tenorio-Garcia E. et al. Recent advances in design and stability of double emulsions: Trends in Pickering stabilization. *Food Hydrocolloids*, 2022. Art. 107601. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.107601
20. Thompson K.L., Armes S.P., York D.W. Preparation of pickering emulsions and colloidosomes with relatively narrow size distributions by stirred cell membrane emulsification. *Langmuir*, 2011, vol. 27, no. 6, pp. 2357–2363. DOI: 10.1021/la104970w
21. Wang D. et al. Fabrication and application of pickering emulsion stabilized by high pressure homogenization modified longan shell nanofiber. *Journal of Food Engineering*, 2023, vol. 339. Art. 111264. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111264
22. Wu J., Ma G. H. Recent studies of Pickering emulsions: particles make the difference. *Small*, 2016, vol. 12, no. 34, pp. 4633–4648. DOI: 10.1002/sml.201600877
23. Xia T., Xue C., Wei Z. Physicochemical characteristics, applications and research trends of edible Pickering emulsions. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, vol. 107, pp. 1–15. DOI: 10.1016/j.tifs.2020.11.019
24. Xiao J., Li Y., Huang Q. Recent advances on food-grade particles stabilized Pickering emulsions: Fabrication, characterization and research trends. *Trends in Food Science & Technology*, 2016, vol. 55, pp. 48–60. DOI: 10.1016/j.tifs.2016.05.010
25. Zhao H. et al. A review of multiple Pickering emulsions: Solid stabilization, preparation, particle effect, and application. *Chemical Engineering Science*, 2022, vol. 248. Art. 117085. DOI: 10.1016/j.ces.2021.117085
26. Zhou L. et al. Applications and effects of ultrasound assisted emulsification in the production of food emulsions: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, vol. 110. P 493–512. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.02.008

*Информация об авторах*

**Потороко Ирина Юрьевна**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, potoroiko@susu.ru

**Паймулина Анастасия Валерияновна**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Сибирский федеральный научный центр агробиотехнологий Российской академии наук, Новосибирская область, р.п. Краснообск, Россия, aaaminaaa@mail.ru

*Information about the authors*

**Irina Yu. Potoroko**, Doctor of Sciences (Engineering), Professor of the Department of Food Technology and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, potoroiko@susu.ru

**Anastasia V. Paymulina**, PhD (Engineering), Leading Researcher of the Federal Scientific Center of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk, Russia, aaaminaaa@mail.ru

*Статья поступила в редакцию 20.12.2022*

*The article was submitted 20.12.2022*