

Биохимический и пищевой инжиниринг Biochemical and food engineering

Научная статья
УДК 664.346+544.773.32
DOI: 10.14529/food220306

ЭКОТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОДОВОЛЬСТВЕННЫХ РЕСУРСОВ В ТЕХНОЛОГИИ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ. ЧАСТЬ 2: ТЕХНОЛОГИЯ БИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЭМУЛЬСИЙ ПИКЕРИНГА

И.Ю. Потороко¹, potorokoiy@susu.ru
Н.В. Науменко¹, naumenkonv@susu.ru
А.М.Я. Кади¹, ammarka89@gmail.com
А.В. Паймулина², aaaminaaa@mail.ru

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

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

Аннотация. В настоящее время актуальным направлением современных исследований является создание пищевых добавок отечественного производства на основе экотехнологий, обладающих заданными функционально-технологическими и биоактивными свойствами. Эмульсии Пикеринга, благодаря своей повышенной физической и химической стабильности, являются весьма перспективными в качестве транспортного средства доставки биологически активных веществ в организм человека. Целью данной работы являлось исследование применимости ультразвукового воздействия как инструмента для получения биоактивной коллоидной системы эмульсии Пикеринга с использованием в качестве структурирующих компонентов полисахаридов бурых водорослей или льняной целлюлозы. В качестве объектов исследования выступали эмульсии Пикеринга, стабилизированные фукоиданом или альгинатом натрия или льняной целлюлозой, на основе липидной фракции: купажа подсолнечного масла и масла корицы; либо липидной фракцией на основе льняного масла, которые обрабатывали ультразвуком мощностью 630 Вт/л в течение 16 мин (последовательно по 4 мин с перерывом 3 мин) при контроле температуры 50 °С. Полученные результаты доказывают эффективность применения ультразвукового воздействия для получения биоактивной коллоидной системы эмульсии Пикеринга: наиболее высокие значения АОА ($5,120 \pm 0,005$ DPPH, %) имели эмульсии с липидной фазой на основе льняного масла, при использовании в качестве стабилизирующего компонента – сульфатированного гетерополисахарида фукоидана, при этом прирост значений показателя АОА в образцах эмульсий на основе льняного масла составил от 30 до 100 % по отношению к образцам эмульсий на основе купажа липидной фазы. Вязкоупругие свойства эмульсий Пикеринга с различными фракциями масла значительно разнятся для вносимых структурообразующих компонентов (на основе масляного купажа диапазон значений от $8,95 \pm 0,5$ до $200 \pm 1,50$ мПа*с, для эмульсий на основе льняного масла от $72,8 \pm 0,50$ до $580 \pm 1,50$ мПа*с). Предлагаемый подход ультразвукового воздействия позволяет создавать биоактивную коллоидную систему эмульсии Пикеринга с использованием в качестве структурирующих компонентов полисахаридов бурых водорослей и льняной целлюлозы.

Ключевые слова: эмульсии Пикеринга, ультразвуковое воздействие, фукоидан, альгинат натрия, целлюлоза льна

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

Для цитирования: Экотехнологии для эффективного использования продовольственных ресурсов в технологии пищевых систем. Часть 2: Технология бифункциональных пищевых систем на основе эмульсий Пикеринга / И.Ю. Потороко, Н.В. Науменко, А.М.Я. Кади, А.В. Паймулина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2022. Т. 10, № 3. С. 55–63. DOI: 10.14529/food220306

© Потороко И.Ю., Науменко Н.В., Кади А.М.Я., Паймулина А.В., 2022

ECOTECHNOLOGIES FOR EFFICIENT USE OF FOOD RESOURCES IN FOOD SYSTEM TECHNOLOGY. PART 2: BIFUNCTIONAL FOOD SYSTEMS TECHNOLOGY BASED ON PICKERING EMULSIONS

I.Yu. Potoroko¹, potorokoiy@susu.ru
N.V. Naumenko¹, naumenkonv@susu.ru
A.M.Y. Kadi¹, ammarka89@gmail.com
A.V. Paymulina², aaaminaaa@mail.ru

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Federal Scientific Center of Agro-Bio Technologies of the Russian Academy of Sciences, Krasnoobsk, Novosibirsk region, Russia

Abstract. Currently, an important area of modern research is the creation of domestically produced food additives based on eco-technologies with given functional-technological and bioactive properties. Pickering emulsions, due to their increased physical and chemical stability, are very promising as a vehicle for the delivery of biologically active substances to the human body. The aim of this work was to investigate the applicability of ultrasound as a tool for producing a bioactive colloidal Pickering emulsion system using brown algae polysaccharides or flax cellulose as structuring components. The subjects were Pickering emulsions stabilised with fucoidan or sodium alginate or linseed cellulose, based on a lipid fraction: sunflower oil and cinnamon oil blend; or a linseed oil-based lipid fraction, which were treated with ultrasound at 630W/1 for 16 min (4 min in sequence, 3 min apart) at a temperature control of 50 °C. The obtained results prove the efficiency of application of ultrasound exposure to produce bioactive colloidal system of Pickering emulsion: The highest AOA values (5.120 ± 0.005 DPPH, %) had emulsions with a lipid phase based on linseed oil, when used as a stabilizing component – sulfated heteropolysaccharide fucoidan, with an increase in AOA values in emulsion samples based on linseed oil from 30 to 100 % relative to emulsion samples based on a blend of lipid phase. Viscoelastic properties of Pickering emulsions with different oil fractions varied significantly for the incorporated structure-forming components (for oil-based blends the range of values was from 8.95 ± 0.5 to 200 ± 1.50 mPa*s, for linseed oil-based emulsions from 72.8 ± 0.50 to 580 ± 1.50 mPa*s). The proposed approach of ultrasound exposure allows to create bioactive colloidal system of Pickering emulsions using brown algae polysaccharides and flax cellulose as structuring components.

Keywords: Pickering emulsions, ultrasound exposure, fucoidan, sodium alginate, flax cellulose

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., Naumenko N.V., Kadi A.M.Y., Paymulina A.V. Ecotechnologies for efficient use of food resources in food system technology. Part 2: Bifunctional food systems technology based on Pickering emulsions. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2022, vol. 10, no. 3, pp. 55–63. (In Russ.) DOI: 10.14529/food220306

Введение

Для предприятий пищевой индустрии гарантия стабильности производства является важной многофакторной задачей, а множественные проблемы для их решения в текущий момент обострены серьезными изменениями в логистике поставок сырьевых ингредиентов, таких привычных для промышленников. В течение длительного времени выстроилась политика формирования качества пищевой продукции на основе применения пищевых

функционально-технологических добавок, большая часть которых производилась за рубежом. Наполненность рынка пищевыми добавками, обладающими функционально-технологическими свойствами, резко сократилась, в таких условиях производитель вынужден искать альтернативные решения, что сопряжено с ограниченностью товарных предложений, способных закрыть возникающие проблемы [1, 3, 13].

Мировой опыт создания пищевых эмульсий предлагает множество подходов, но при этом существуют наиболее популярные технологии и предложения в части использования разнообразных структурообразующих сырьевых компонентов. В то же время для обеспечения комплекса свойств конечного продукта, обеспечивающих потребительское предпочтение, как правило, применяют различные сочетания пищевых добавок. Такие приемы, заявленные в технологических инструкциях, должны учитывать высокую вариативность исходного сырья [2].

Возникает вопрос о возможности создания многофункциональных пищевых ингредиентов, способных обеспечивать решение множественных задач, а также устойчивость их во времени, в том числе в агрессивных условиях. В связи с чем, нагружая пищевой ингредиент биоактивными веществами, важно учитывать их совместимость в сложной системе конечного продукта, возможность сохранения ожидаемых свойств.

Рассматривая эмульсии в качестве транспортного средства доставки биологически активных веществ (БАВ), прежде всего необходимо обеспечить их высокую стабильность, исключить нежелательные процессы в условиях изменения pH, температуры, ионизирующего излучения и др. [9]. Для минимизации обозначенной проблемы возможно применять в качестве стабилизирующих ингредиентов разбавленных эмульсий природные вещества – модифицированные крахмалы, наноцеллюлозу, и другие полисахариды, водонерастворимые белки [4, 6].

Весьма перспективна стабилизация пищевых эмульсий за счет малой молекулярной массы поверхностно-активных веществ или путем создания физического барьера через биологически активные коллоидные частицы, что обеспечит снижение межфазного напряжения и позволит получить функциональные пищевые эмульсии Пикеринга [10]. В международных базах данных и системах цитирования Scopus и Web of Science выявлено 33 800 документов научных исследований в области «Pickering emulsions».

Для достижения указанных эффектов в технологии получения эмульсии Пикеринга может быть применено низкочастотное ультразвуковое воздействие (УЗВ). В условиях кавитационных воздействий ультразвука наблюдается повышение биодоступности пище-

вых ингредиентов, а доставка в организм человека в составе пищевых систем на основе эмульсий демонстрируют хорошую их эффективность в контролируемом высвобождении в «адресной доставке» [8].

Применение кавитационных эффектов ультразвука в рациональных режимах позволяет обеспечить модификацию полимерных частиц (дисперсность, биодоступность, вязкость) для равномерного распределения в межфазном пространстве эмульсии Пикеринга и сформировать устойчивую ее конструкцию [7].

Целью данного исследования являлся поиск решения конкретной задачи – применимости ультразвукового воздействия как инструмента для получения биоактивной коллоидной системы эмульсии Пикеринга с использованием в качестве структурирующих компонентов полисахаридов бурых водорослей и льняной целлюлозы.

Решение поставленных задач (рис. 1) может сформировать оптимальные условия, при которых эмульсии Пикеринга будут сохранять свои свойства в составе пищевых продуктов на протяжении всего срока хранения.

Объекты и методы исследований

В качестве объектов исследования выступали эмульсии Пикеринга, стабилизированные наночастицами растительных полисахаридов: сульфатированным гетерополисахаридом фукоиданом (ТУ 9284-067-02698170-2010, ТИБОХ ДВО РАН, Россия) из бурых водорослей *Fucus evanescens*, альгинатом натрия (Alg-Na) из бурых водорослей *Laminaria Digitata* и *Laminaria Saccharina* (ТУ 15-544-83, TOPSPICE, Россия) и льняная целлюлоза (производитель ООО «Линум», Россия).

На основе полисахаридов готовили водные стабилизирующие суспензии, которые вводили в липидную фракцию двух видов: 1 – купаж из подсолнечного масла и масла корицы пищевого и 2 – льняное масло.

Подготовленные таким образом водно-жировые смеси обрабатывали низкочастотным ультразвуком в режиме – мощность 630 Вт (100 % от паспортного значения), длительность воздействия – 16 мин (последовательно по 4 мин с перерывом 3 мин) при контроле температуры 50 °С.

Для исследования получены следующие образцы эмульсий с купажа липидной фракцией (подсолнечное масло и масло корицы):

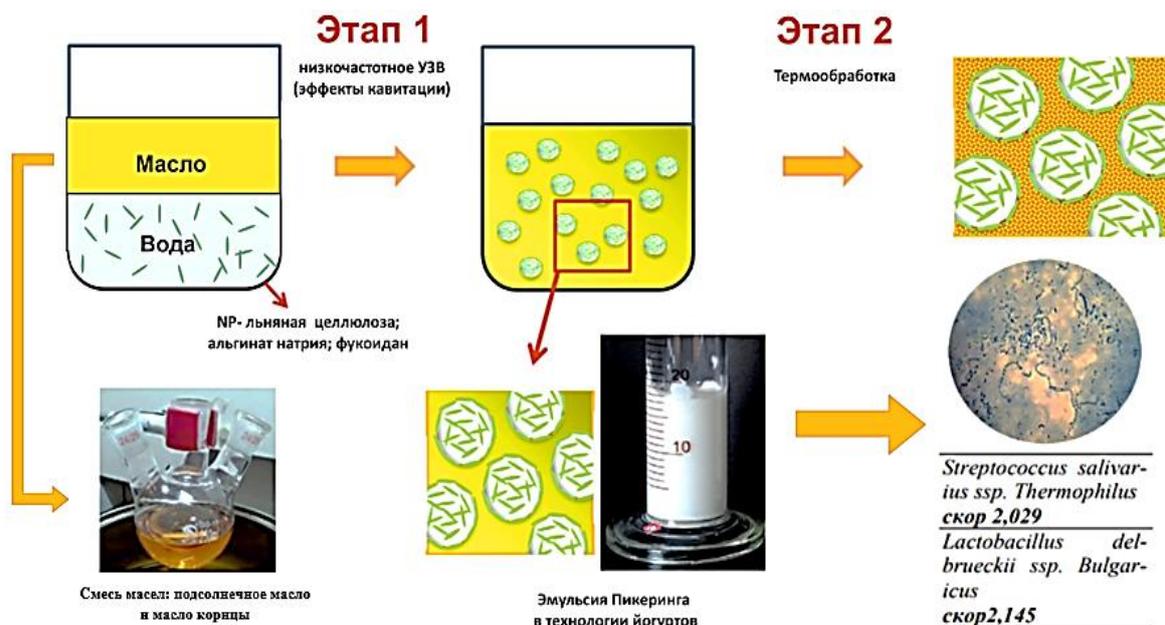


Рис. 1. Графическое отображение логики экспериментальных исследований разработки технологий получения эмульсий Пикеринга

Образец 1а – эмульсия Пикеринга, структурированная стабилизирующей суспензией на основе льняной целлюлозы (далее ЭПС-ЛЩкупаж);

Образец 2а – эмульсия Пикеринга, структурированная стабилизирующей суспензией на основе фукоидана (далее ЭПСФукупаж);

Образец 3а – эмульсия Пикеринга, структурированная стабилизирующей суспензией на основе альгината натрия (далее ЭПСАНкупаж).

Для исследования получены следующие образцы эмульсий с липидной фракцией на основе льняного масла (холодный отжим сорта селекции «Уральский лен»):

Образец 1б – эмульсия Пикеринга, структурированная стабилизирующей суспензией на основе льняной целлюлозы (далее ЭПС-ЛЩлен);

Образец 2б – эмульсия Пикеринга, структурированная стабилизирующей суспензией на основе фукоидана (далее ЭПСФлен);

Образец 3б – эмульсия Пикеринга, структурированная стабилизирующей суспензией на основе альгината натрия (далее ЭПСАНлен).

Для достижения цели исследования и решения поставленных задач определена следующая номенклатура показателей оценки полученных эмульсий Пикеринга:

– стойкость эмульсий, % (индекс расслоения использовали в качестве показателя

оценки физической стабильности эмульсий Пикеринга после воздействия агрессивных факторов – нагревание и центрифугирование);

– pH (определяли потенциометрически);

– вязкость, мПа*с (на вискозиметре серии SV-10, A&D, Япония);

– общая антиоксидантная активность АОА, DPPH, % (оценивали путем определения поглощающей способности свободного радикала 1,1-дифенил-2-пикрилгидразила спектрофотометрически при 515 нм с использованием метанольного раствора DPPH (по модификации X. Sui) [12];

– дисперсный состав (методом динамического рассеяния света на лазерном анализаторе размера частиц серии Microtrac S3500, Microtrac Inc., США);

– изображения микроструктуры наночастиц растительных полисахаридов (получены с применением метода сканирующей электронной микроскопии СЭМ на растровом электронном микроскопе высокого разрешения Jeol JSM-7001F, Япония).

– морфологию стабилизированных эмульсий Пикеринга определяли с помощью оптического микроскопа (Olympus Co., Япония).

Результаты и их обсуждение

На первом этапе исследования в соответствии с целью было оценено влияние липидной фракции (купаж подсолнечного масла и масла корицы; монолипидной фракции на

основе льняного масла местной селекции), используемой для получения эмульсий, на показатели их биоактивности и функционально-технологические свойства. Учитывая, что технологии и стабилизирующие компоненты, используемые для получения эмульсий, были идентичными, то видимые различия в значениях показателей (см. таблицу) обусловлены прежде всего свойствами структурообразующих полисахаридных компонентов и различием жирнокислотного состава липидной фракции.

Анализируя полученные данные по показателю АОА, DPPH, %, было установлено, что наиболее высокие значения антиоксидантной активности ($5,120 \pm 0,005$ DPPH, %) имели ЭПСФлен, с липидной фазой на основе льняного масла, при использовании в качестве стабилизирующего компонента сульфатированного гетерополисахарида фукоидана. В среднем прирост значений показателя АОА в образцах эмульсий на основе льняного масла составил от 30 до 100 % по отношению к образцам эмульсий на основе купажа липидной фазы, что указывает на значительный вклад растительных масел.

Недавние исследования показали, что использование наночастиц относительно малых размеров и однородных по дисперсии наиболее оптимально в качестве стабилизаторов эмульсий Пикеринга [11]. В то же время, согласно данным S. Varanasi и др., размер ка-

пель эмульсий Пикеринга обычно должен быть как минимум на один порядок больше, чем у стабилизирующих наночастиц [14].

Полученные СЭМ-микрофотографии растительных полисахаридов (рис. 2), используемых для стабилизации эмульсий Пикеринга, показывают, что размер частиц их составляет 10–50 мкм для льняной целлюлозы, 2–5 мкм для альгината натрия и 200–500 нм для фукоидана. Все частицы имеют иррациональную форму (целлюлоза льна и альгинат натрия представляют собой стержнеобразные частицы, фукоидан – частицы неопределенной формы). Полученные результаты доказывают гипотезу о том, что при использовании стабилизирующих частиц меньших размеров образуется более устойчивая система эмульсии. Так, в образцах ЭПСФкупаж и ЭПСФлен, стабилизированных фукоиданом, наблюдается самое высокое значение стойкости эмульсии (см. таблицу).

Наиболее важными свойствами эмульсий Пикеринга в технологическом аспекте являются показатели стойкости эмульсии и вязкости, как реологическая составляющая пищевой системы. Известно, эмульсии Пикеринга определяются как эмульсии, стабилизированные твердыми частицами вместо классических эмульгаторов [5]. Твердые низкомолекулярные растительные частицы на границе раздела сред образуют слой с высокой механической прочностью (рис. 3), предотвраща-

Результаты исследований показателей качества и АОА опытных образцов эмульсий Пикеринга

| Результаты оценки свойств эмульсий на основе купажа масел | | | |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| Наименование | ЭПСЛЦкупаж | ЭПСФкупаж | ЭПСАНкупаж |
| Стойкость эмульсии, % | $40,0 \pm 1,6$ | $96,0 \pm 01,5$ | $70,0 \pm 1,4$ |
| pH | $6,60 \pm 0,05$ | $3,70 \pm 0,05$ | $5,20 \pm 0,05$ |
| Вязкость, мПа*с | $8,95 \pm 0,50$ | $18,5 \pm 0,8$ | $200 \pm 1,50$ |
| АОА, DPPH, % | $1,882 \pm 0,007$ | $4,334 \pm 0,005$ | $2,989 \pm 0,006$ |
| Результаты оценки свойств эмульсий на основе льняного масла | | | |
| Наименование | ЭПСЛЦлен | ЭПСФлен | ЭПСАНлен |
| Стойкость эмульсии, % | $45,0 \pm 1,6$ | $100,2 \pm 01,5$ | $94,0 \pm 1,4$ |
| pH | $6,20 \pm 0,05$ | $3,70 \pm 0,05$ | $6,00 \pm 0,05$ |
| Вязкость, мПа*с | $72,8 \pm 0,5$ | $20,5 \pm 0,8$ | $580,0 \pm 1,5$ |
| АОА, DPPH, % | $3,684 \pm 0,005$ | $5,120 \pm 0,005$ | $4,162 \pm 0,004$ |

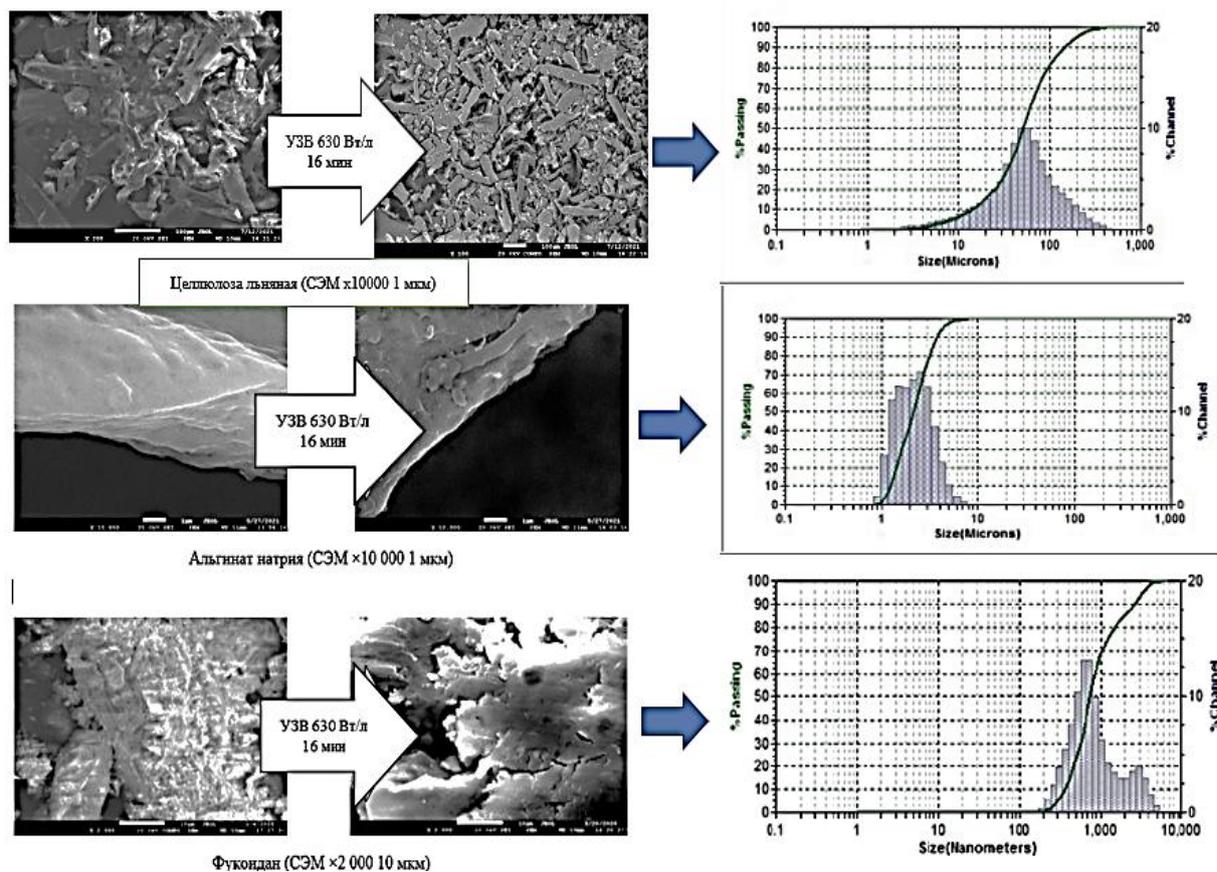


Рис. 2. Сканирующая электронная микроскопия частиц структурообразующих композитов и размерность их в дисперсии

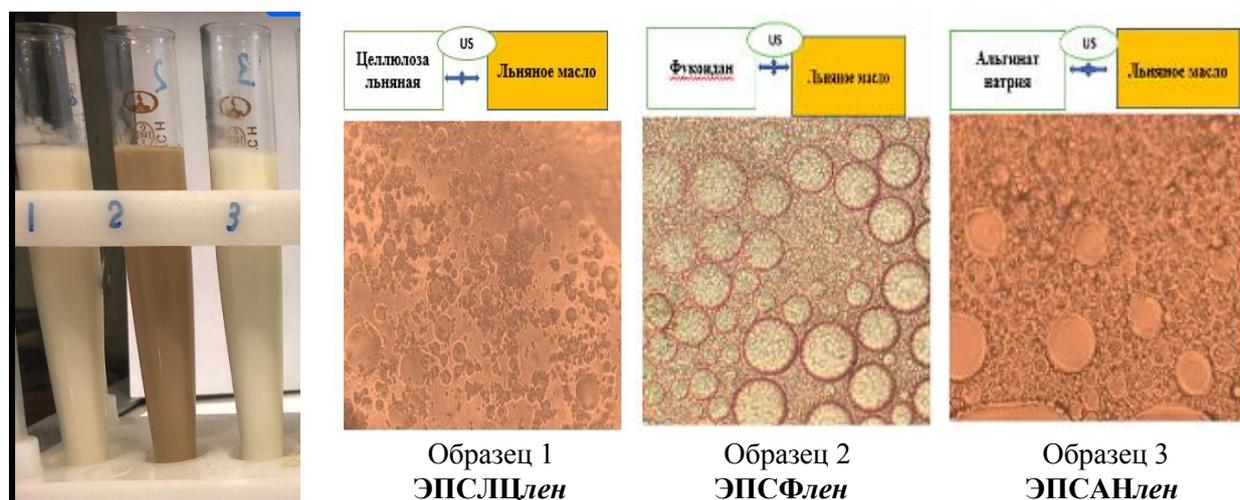


Рис. 3. Микрофотографии (увеличение: 1500×) частиц структурообразующих композитов в системе эмульсии Пикеринга на основе льняного масла

ют слияние капель, выступают в качестве стабилизаторов и обладают превосходной стабильностью и функциональными свойствами [15].

Внутренняя часть капель наполнена масляной фазой, а поверхность раздела была окрашена в красный цвет, что свидетельствует о присутствии наночастиц на поверхности раздела капель масла. Микрофотографии достоверно подтверждают образование эмульсии масло-в-воде, капли масла распределяются равномерно без возникновения флокуляции. Образовавшийся межфазный барьер предотвратил коалесценцию эмульсии Пикеринга, что также подтверждают показатели стабильности эмульсий Пикеринга при воздействии агрессивных условий.

Вязкоупругие свойства эмульсий Пикеринга с различными фракциями масла значительно разнятся для вносимых структурообразующих компонентов. Так, для эмульсий, полученных на основе масляного купажа, диапазон значений от $8,95 \pm 0,5$ до $200 \pm 1,50$ мПа*с, а для эмульсий на основе льняного масла от $72,8 \pm 0,50$ до $580 \pm 1,50$ мПа*с. Такой разброс

значений показателя обусловлен химической природой используемых полисахаридов, при этом наиболее привлекательными являются полисахариды бурых водорослей.

Таким образом, доказана применимость ультразвукового воздействия как инструмента для получения биоактивной коллоидной системы эмульсии Пикеринга с использованием в качестве структурирующих компонентов полисахаридов бурых водорослей и льняной целлюлозы.

Эмульсии Пикеринга могут стать эффективным инструментом в получении пищевых систем эмульсионного типа высокой степени устойчивости, обладающих биоактивным действием.

Последующие исследования будут направлены на исследование биобезопасности эмульсий Пикеринга и полученных пищевых систем, а также раскрытие механизмов образования наночастиц эмульсий Пикеринга в зависимости от рН многокомпонентной пищевой системы (ферментированных молочных продуктов).

Список литературы

1. Возможности использования экотехнологий для минимизации продовольственных потерь / Н.В. Науменко, В.В. Ботвинникова, Л.П. Нилова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2020. Т. 8, № 4. С. 69–76. DOI: 10.14529/food200409
2. Потороко И.Ю., Паймулина А.В., Кади А.М.Я. Перспективы применения эмульсий Пикеринга в пищевых системах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2022. Т. 10, № 1. С. 15–22. DOI: 10.14529/food220102
3. Ресурсосберегающие технологии переработки зерновых культур как основа продовольственной безопасности Российской Федерации / Н.В. Науменко, И.Ю. Потороко, К.С. Гаврилова и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2021. Т. 9, № 4. С. 23–29. DOI: 10.14529/food210403
4. Bai L., Huan S., Xiang W., Rojas O.J. Pickering emulsions by combining cellulose nanofibrils and nanocrystals: Phase behavior and depletion stabilization // Green Chemistry, 20 (7) (2018), pp. 1571–1582.
5. Chevalier Y., Bolzinger M. Emulsions stabilized with solid nanoparticles: Pickering emulsions // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2013. № 439. P. 23–34. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2013.02.054
6. Han Lu et al. Development of whey protein isolate – phytosterols complexes stabilized oil-in-water emulsion for β -carotene protection and delivery / Lu Han, Xiao Peng, Shijiao Zhou, Yuyang Huang, Shuang Zhang, Yang Li // Food Research International journal. Volume 160, October 2022, 111747.
7. Jie W., Ma G. Recent Studies of Pickering Emulsions: Particles Make the Difference // Small, 12 (34). 2016. P. 4582–4587. DOI: 10.1002/smll.201600877
8. Kentish S., Ashokkumar M. The physical and chemical effects of ultrasound. In Ultrasound technologies for food and bioprocessing // Food Engineering Series book series (FSSES). 2010. P. 1–12. DOI: 10.1007/978-1-4419-7472-3_1

9. Lai H. Influence of particle size and ionic strength on the freeze-thaw stability of emulsions stabilized by whey protein isolate // *Food Science and Human Wellness* 11. 2022. P. 922–932.
10. Pickering S.U. Cxvii.-emulsions // *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 91. 1907. P. 2001–2021. DOI: 10.1039/CT9079102001
11. Song X. et al. Comparative study of Pickering emulsions stabilised by starch particles from different botanical origins / X. Song, F. Ma, F. Zheng, H. Ren, H. Gong // *International Journal of Food Science and Technology*, 55 (6). 2020. P. 2408–2418.
12. Sui X., Bary S., Zhou W. Changes in the color, chemical stability and antioxidant capacity of thermally treated anthocyanin aqueous solution over storage // *Food Chemistry*. 2016. Vol. 192. P. 516–524. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.07.021
13. Thirumdas R. Influence of low pressure cold plasma on cooking and textural properties of brown rice / R. Thirumdas, C. Saragapani, M.T. Ajinkya [et al.] // *Innovative food science & emerging technologies*. 2016. Vol. 37, pt. A. P. 53–60. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.08.009
14. Varanas, S. et al. Pickering emulsions electrostatically stabilized by cellulose nanocrystals / S. Varanasi, L. Henzel, L. Mendoza, R. Prathapan, W. Batchelor, R. Tabor, G. Garnier // *Frontiers of Chemistry*, 6 (September). 2018. P. 1–9.
15. Xu T. et al. Characteristics of starch-based Pickering emulsions from the interface perspective / T. Xu, J. Yang, S. Hua, Y. Hong, Z. Gu, L. Cheng, Z. Li, C. Li // *Trends in Food Science & Technology*. 2020 (August). 105. P. 334–346.

References

1. Naumenko N.V., Botvinnikova V.V., Nilova L.P., Sergeev A.A., Naumenko E.E., Stepanova D.S. Minimization of Food Losses with Ecotechnology Approaches Being Used. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2020, vol. 8, no. 4, pp. 69–76. (In Russ.) DOI: 10.14529/food200409
2. Potoroko I.Yu., Paymulina A.V., Kadi A.M.Y. Prospects for application of pickering emulsions in food systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2022, vol. 10, no. 1, pp. 15–22. (In Russ.) DOI: 10.14529/food220102
3. Naumenko N.V., Potoroko I.Yu., Gavrilova K.S., Naumenko E.E., Liksunova A.D. Resource-Saving Grain Processing Technologies as a Basis of Food Security in the Russian Federation. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2021, vol. 9, no. 4, pp. 23–29. (In Russ.) DOI: 10.14529/food210403
4. Bai L., Huan S., Xiang W., Rojas O.J. Pickering Pickering emulsions by combining cellulose nanofibrils and nanocrystals: Phase behavior and depletion stabilization. *Green Chemistry*, 20 (7) (2018), pp. 1571–1582.
5. Chevalier Y., Bolzinger M. Emulsions stabilized with solid nanoparticles: Pickering emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013, no. 439, pp. 23–34. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2013.02.054
6. Han Lu, Peng Xiao, Zhou Shijiao, Huang Yuyang, Zhang Shuang, Li Yang. Development of whey protein isolate – phytosterols complexes stabilized oil-in-water emulsion for β -carotene protection and delivery. *Food Research International journal*, Volume 160, October 2022, 111747.
7. Jie W., Ma G. Recent Studies of Pickering Emulsions: Particles Make the Difference. *Small*, 12 (34). 2016, pp. 4582–4587. DOI: 10.1002/smll.201600877
8. Kentish S., Ashokkumar M. The physical and chemical effects of ultrasound. In *Ultrasound technologies for food and bioprocessing. Food Engineering Series book series (FSES)*, 2010, pp. 1–12. DOI: 10.1007/978-1-4419-7472-3_1
9. Lai H. Influence of particle size and ionic strength on the freeze-thaw stability of emulsions stabilized by whey protein isolate. *Food Science and Human Wellness*, 11. 2022, pp. 922–932.
10. Pickering S.U. Cxvii.-emulsions. *Journal of the Chemical Society, Transactions*, 91, 1907, pp. 2001–2021. DOI: 10.1039/CT9079102001
11. Song X., Ma F., Zheng F., Ren H., Gong H. Comparative study of Pickering emulsions stabilised by starch particles from different botanical origins. *International Journal of Food Science and Technology*, 55 (6), 2020, pp. 2408–2418.

12. Sui X., Bary S., Zhou W. Changes in the color, chemical stability and antioxidant capacity of thermally treated anthocyanin aqueous solution over storage. *Food Chemistry*, 2016, vol. 192, pp. 516–524. DOI: 10.1016/j.foodchem.2015.07.021
13. Thirumdas R., Saragapani C., Ajinkya M.T. et al. Influence of low pressure cold plasma on cooking and textural properties of brown rice. *Innovative food science & emerging technologies*, 2016, vol. 37, pt. A, pp. 53–60. DOI: 10.1016/j.ifset.2016.08.009
14. Varanas S., Henzel L., Mendoza L., Prathapan R., Batchelor W., Tabor R., Garnier G. Pickering emulsions electrostatically stabilized by cellulose nanocrystals. *Frontiers of Chemistry*, 6, (September). 2018, pp. 1–9.
15. Xu T., Yang J., Hua S., Hong Y., Gu Z., Cheng L., Li Z., Li C. Characteristics of starch-based Pickering emulsions from the interface perspective. *Trends in Food Science & Technology*, 2020 (August), 105, pp. 334–346.

Информация об авторах

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

Науменко Наталья Владимировна, доктор технических наук, доцент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, Naumenko_natalya@mail.ru

Кади Аммар Мохаммад Яхья, аспирант кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, ammarka89@gmail.com

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, irina_potoroko@mail.ru

Natalia V. Naumenko, Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Food Technology and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, Naumenko_natalya@mail.ru

Ammar M.Y. Kadi, Post-graduate student at the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, ammarka89@gmail.com

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

Статья поступила в редакцию 20.02.2022.

The article was submitted 20.02.2022.