

МЕТОДОЛОГИЯ ТРЕХФАКТОРНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ДЛЯ СТАБИЛЬНОСТИ ЭМУЛЬСИОННЫХ ПИЩЕВЫХ СИСТЕМ С ДОБАВЛЕННОЙ ПОЛЕЗНОСТЬЮ

И.Ю. Потороко, *potorokoi@susu.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-1941-6754>

А.М.Я. Кади, *kadia@susu.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-2755-1497>

А.А. Руськина, *ruskinaaa@susu.ru*

А.В. Малинин, *malininav@susu.ru*

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Технологии эмульсионных пищевых продуктов в большей части ориентированы на применение эмульгирующих компонентов, которые направлены на обеспечение стабильности внутренней матрицы. В качестве альтернативного решения наблюдается растущий интерес к использованию эмульсий Пикеринга, стабилизированным твердыми растительными частицами. Создание пищевых ингредиентов на основе эмульсий Пикеринга строится на возможности их полифункционального применения в технологиях пищевых производств, как заменителей жира, доставки биологически активных веществ, что определяет преимущества в создании продуктов направленного профилактического действия. Цель исследования – детальное изучение возможностей последовательного использования нетепловых воздействий ультразвука при создании эмульсионных пищевых систем на основе биоактивных эмульсий Пикеринга. В данном исследовании проведена оценка кавитационных эффектов ультразвукового воздействия в качестве воздействующего фактора на множественные характеристики стабилизирующих частиц для эмульсий Пикеринга. Разработана методология трехфакторного воздействия для подтвержденной эффективности биоактивных компонентов, используемых для фортификации в эмульсионные пищевые системы. Проведение верификации методологического решения, построенного на поэтапном ведении процессов, обозначенных в методологическом подходе на примере моночастиц (фукоидана, альгината натрия, картофельного крахмала) и в композиционном комплексе с биоактивным экстрактом *T. cordifolia* (Гудучи) подтвердило их технологическую применимость. В качестве воздействующего фактора применяли нетепловые эффекты кавитации, генерируемые низкочастотным ультразвуком с частотой механических колебаний $(22 \pm 1,65)$ кГц и интенсивностью излучения не менее 10 Вт/см^2 . Сонохимическая трансформация для каждого вида частиц осуществлялась в установленном режиме воздействия, обеспечивала высокую эффективность коррекционных процессов. Использование биоактивной композиции с включением экстракта *T. cordifolia* обеспечивает повышение показателя АОА при сохранении стойкости эмульсии Пикеринга на основе резистентного крахмала, что определяет перспективность данной композиции. Сформированный в ходе экспериментальных исследований массив данных будет использован для прогностического анализа технологической пригодности новых эмульсий Пикеринга для пищевых эмульсионных систем с добавленной полезностью.

Ключевые слова: эмульсии Пикеринга, пищевые эмульсии, растительные полисахариды, биоактивные вещества, ультразвук

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФ 22-26-00079.

Для цитирования: Методология трехфакторного ультразвукового воздействия для стабильности эмульсионных пищевых систем с добавленной полезностью / И.Ю. Потороко, А.М.Я. Кади, А.А. Руськина, А.В. Малинин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Пищевые и биотехнологии». 2023. Т. 11, № 4. С. 65–73. DOI: 10.14529/food230407

Original article
DOI: 10.14529/food230407

THREE-FACTOR ULTRASONIC INFLUENCE METHODOLOGY FOR STABILITY OF EMULSION FOOD SYSTEMS WITH ADDED USEFULNESS

I.Yu. Potoroko, potorokoi@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1941-6754>

A.M.Y. Kadi, kadia@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2755-1497>

A.A. Ruskina, ruskinaaa@susu.ru

A.V. Malinin, malininav@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Largely focused on ensuring the stability of the internal matrix, emulsion food technologies utilize emulsifying components. As an alternative solution, there is growing interest in the use of Pickering emulsions stabilized by plant solids. The creation of food ingredients based on Pickering emulsions is based on the possibility of their multifunctional use in food production technologies as fat substitutes and in the delivery of biologically active substances, which determines the advantages in the creation of products with targeted preventive action. The purpose of the study is a detailed study of the possibilities of consistent use of non-thermal effects of ultrasound in the creation of emulsion food systems based on bioactive Pickering emulsions. This study evaluates the cavitation effects of ultrasonic exposure as an influencing factor on multiple characteristics of the stabilizing particles of Ale Pickering emulsions. We developed a three-factor methodology to confirm the effectiveness of bioactive components for fortification in emulsion food systems. Verification of a methodological solution based on the step-by-step implementation of processes outlined in the methodological approach using the examples of monparticles (fucoidan, sodium alginate, and potato starch) and a compositional complex with a bioactive extract of *T. cordifolia* (Guduchi) confirmed their technological applicability. Non-thermal cavitation effects generated by low-frequency ultrasound with a mechanical vibration frequency of (22 ± 1.65) kHz and a radiation intensity of at least 10 W/cm^2 were used as an influencing factor. Sonochemical transformation for each type of particle was carried out in the established mode of exposure, ensuring high efficiency in correction processes. Using a bioactive mixture with *T. cordifolia* extract guarantees a rise in AOA while keeping the stability of the Pickering emulsion based on resistant starch. This mixture's prospects are what makes it useful. The data set generated during the experimental studies will be used for predictive analysis of the technological suitability of new Pickering emulsions for food emulsion systems with added utility.

Keywords: Pickering emulsions, food emulsions, plant polysaccharides, bioactive substances, ultrasound

Acknowledgements. The research was carried out with financial support from the Russian Science Foundation grant 22-26-00079.

For citation: Potoroko I.Yu., Kadi A.M.Y., Ruskina A.A., Malinin A.V. Three-factor ultrasonic influence methodology for stability of emulsion food systems with added usefulness. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*, 2023, vol. 11, no. 4, pp. 65–73. (In Russ.) DOI: 10.14529/food230407

Введение

В настоящее время трудно назвать группы пищевых систем, для которых не применяются эмульсионные технологии с целью обеспечения целостности матрицы конечного продукта. Эмульсионное состояние пищевой системы при использовании процессов фортификации в их состав биологически активных компонентов позволяет дополнить линейку продуктов специального и профилактического действия.

Сегодня научным сообществом предлагаются передовые технологические решения для эмульсионных пищевых систем, ориентированные на получение частиц наноразмерного ряда, регулирование внутренней фазы пищевой системы, использование технологий Пикеринга и двойных эмульсий и др.

Изучение доступной информации и ее анализ позволяют выделить наиболее приемлемые подходы, предлагаемые в качестве технологических решений для обеспечения стабильности пищевых эмульсий, а также оценить методы, используемые для их достижения.

В настоящее время пищевые эмульсии, полученные с применением технологии Пикеринга, стабилизированные биоактивными органическими частицами, обеспечивают дуальное действие: устойчивость эмульсионной системы и обеспечивают добавленную полезность конечного продукта. С точки зрения технологических свойств, полученные по данной технологии эмульсии устойчивы к созреванию по Освальду и коалесценции, что обусловлено прочностью сцепления коллоидных частиц к поверхности капель [12].

Современные разработки в области поиска новых форм стабилизирующих органических частиц для пищевых эмульсий доказывают корреляционную зависимость влияния присутствия в составе эмульсий несферических частиц на их стабильность за счет коэффициента удлинения частиц. Важно также понимать, что функциональные свойства этих частиц возможно адаптировать для конкретных применений путем проведения определенных физических или химических модификаций.

Весьма эффективными для этих целей являются методы нетепловых воздействий на основе низкочастотного ультразвука. Значительный объем работ проводится учеными в области прикладной сонохимии, в частности в

Мельбурнском университете под руководством проф. Muthupandian Ashokkumara [9].

Физические эффекты, наблюдаемые при низких частотах (от 20 до 24 кГц), ответственны за процессы ультразвукового эмульгирования систем. Высокие силы сдвига при формировании микроструи на границе раздела жидкостей **вызывают выброс капель дисперсной фазы в дисперсионную среду** [1,6]. При продолжительном воздействии ультразвука интенсивные ударные волны и турбулентность, создаваемые кавитацией, еще больше разрушают капли в дисперсионной среде. Этот процесс приводит к стабильным наноэмульсиям с каплями размером от 20 до 200 нм [13].

Рассмотренные выше эффекты определяют **цель исследования** – необходимость детального изучения возможностей последовательного использования нетепловых воздействий ультразвука при создании эмульсионных пищевых систем на основе биоактивных эмульсий Пикеринга.

Материалы и методы

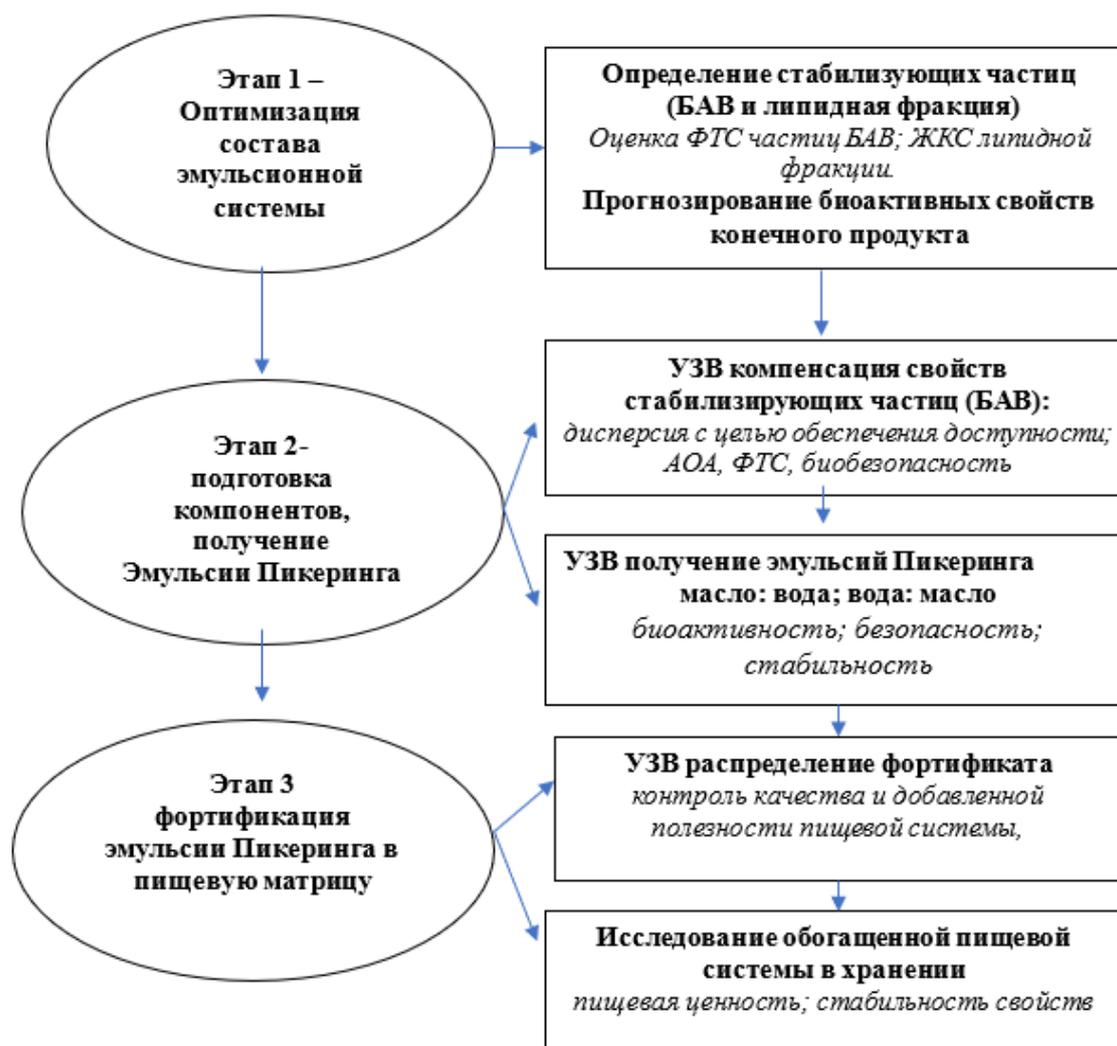
Для достижения поставленной цели в качестве **решаемых задач** были определены:

- разработка оптимальных условий, при которых эмульсии Пикеринга будут сохранять свои бифункциональные свойства;
- исследование применимости в производстве продуктов питания с заданной пищевой ценностью.

Методология решения задач построена на поэтапном исследовании прослеживания возможности применения эффектов ультразвукового воздействия для обеспечения стабильности биоактивных эмульсий Пикеринга в составе пищевых систем (см. рисунок).

Каждый из этапов содержал комплексные исследования, направленные на формирование объективного массива данных, подтверждающих состоятельность выдвинутой гипотезы о возможности исключения эмульгаторов при получении эмульсионных пищевых систем.

Объектами для апробации методологического подхода стали растительные полисахариды и их композиции с биоактивными веществами. Данная группа веществ включала: полисахариды бурых водорослей (фукоидан и альгинат); крахмал; экстрагированные фенольные вещества экстракта *T. cordifolia* (Гудучи); оксид цинка как антимикробный компонент.



Методология создания пищевых систем с добавленной полезностью при использовании трехфакторного ультразвукового воздействия

В качестве воздействующего фактора применяли нетепловые эффекты кавитации, генерируемые низкочастотным ультразвуком с частотой механических колебаний ($22 \pm 1,65$) кГц и интенсивностью излучения не менее 10 Вт/см^2 [8].

Результаты исследования и их обсуждение

На первом уровне исследований эффекты кавитации низкочастотного ультразвука (далее ЭКНУ) применяли для компенсации свойств стабилизирующих частиц с целью повышения эффективности полезности.

Исследуемые объекты после воздействия ЭКНУ оценивали на дисперсность, результаты оценки показали распределение частиц по размерному ряду (табл. 1).

Технологические характеристики стабилизирующих частиц для эмульсий Пикеринга, достигнутые после воздействия ЭКНУ, указывают на получение равномерной дисперсии частиц в разряде наночастиц, что с высокой степенью вероятности позволит обеспечить доступность для клеточных мембран. В дополнение к вышесказанному биоактивность подтверждается результатами оценки АОА (табл. 2), а функционально-технологические свойства – значением показателя вязкости.

Установлено, что вязкость крахмальных суспензий снижается в зависимости от параметров воздействия от 10 до 40 %. Растворимость крахмала в водной среде, и как следствие, вязкость крахмальных растворов зависят от количества амилозной фракции, содержа-

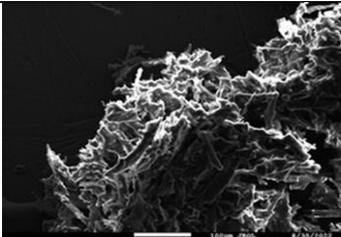
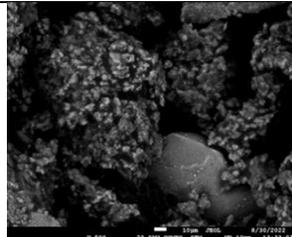
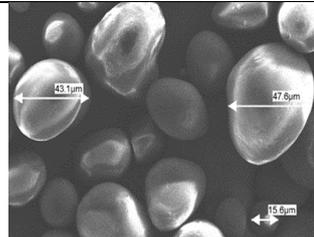
Таблица 1

Результаты оценки влияния ЭКНУ на дисперсность стабилизирующих частиц растительных полисахаридов для эмульсий Пикеринга (ЭП)

Наименование объекта	Результаты оценки размера частиц, %		Режимы ЭКНУ
	исходные данные	после ЭКНУ	
Фукоидан	32,14 мкм – 77,1 %; 103,90 мкм – 22,9 %	664 нм – 83,6 %; 2868 нм – 16,4 %	Мощность 630 Вт/л, экспозиция – 30 мин
Альгинат натрия (Alg-Na)	5,65 мкм – 100 %	5670 нм – 30,6 %; 502 нм – 53,4 %; 56,1 нм – 16 %	Мощность – 630 Вт/л, экспозиция – 18 мин
Крахмал картофельный (RS2)	37,0 мкм – 100 % (среднее медианное значение)	(52,32 ± 10) мкм – 23,97 % (62,23 ± 10) мкм – 20,19 %	Мощность – 630 Вт/л, экспозиция – 10 мин

Таблица 2

Результаты исследования стабилизирующих частиц ЭП на показатель биоактивности и ФТС после воздействия ЭКНУ

Наименование показателя	Наименование объектов		
	фукоидан	альгинат натрия (Alg-Na)	крахмал картофельный (RS2)
АОА, % DPPH	107,8	82,1	62,1
Вязкость, мПа/с	38,6	8,2	1,32
СЭМ-анализ морфологии			

ние которой в среднем увеличивается в 3–4 раза. Именно данный факт определяет биоактивность сонохимически модифицированной формы крахмала и позволяет с высокой степенью достоверности говорить о его полезности в составе эмульсии.

Результаты исследования морфологии стабилизирующих частиц с использованием СЭМ-анализа указывают на неоднородность состояния поверхности крахмальных зерен: частицы становятся значительно большего размера, а на их поверхности визуализируются поры и трещины. Анализ СЭМ-изображений образцов полисахаридов бурых водорослей показал, что КЭНУ обеспечивает структурные изменения: для частиц фукоидана визуализируются нитеподобные элементы с ячеистой структурой; в образцах альгината

присутствуют частицы разных размеров неправильной формы, скопления мелких частиц. Кроме того, для всех образцов зафиксирована деполимеризация крупных конгломератов на более короткие элементы [3, 4].

На втором уровне исследований оценивалось воздействие КЭНУ для получения стабилизированных эмульсий Пикеринга, включающее два последовательных процесса:

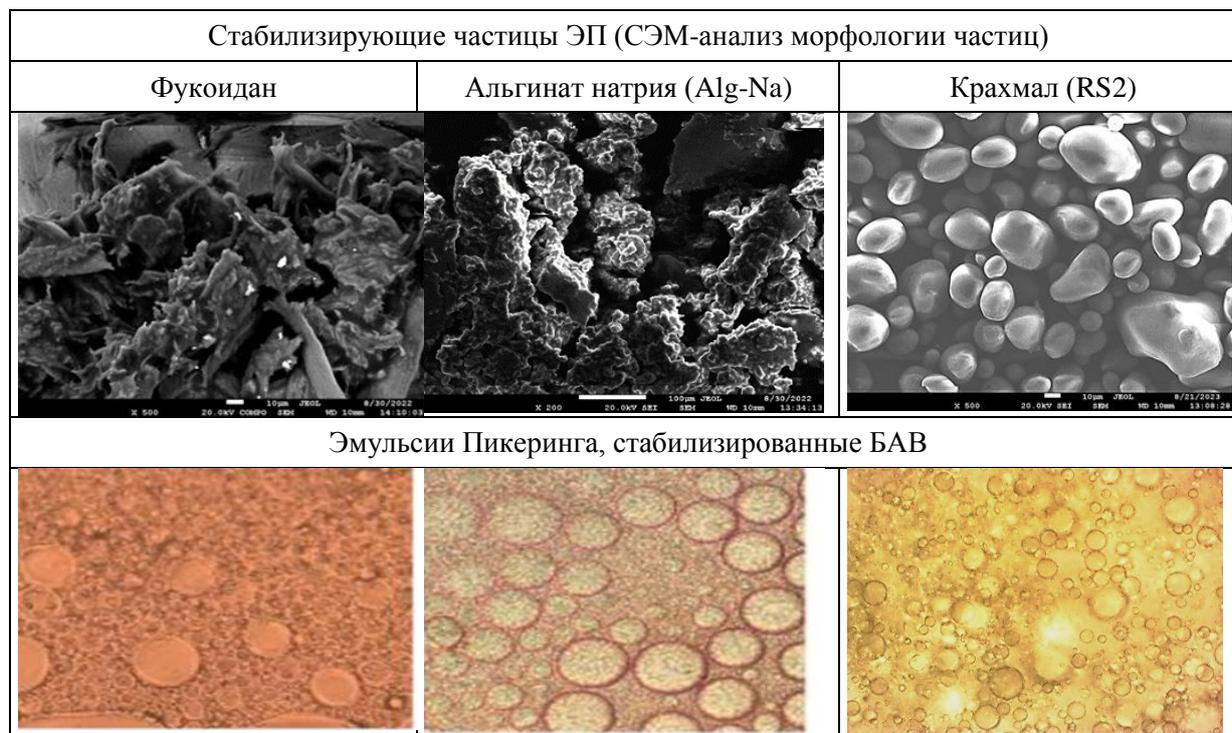
во-первых, технология получения водной суспензии, наполненной стабилизирующими частицами;

во-вторых, смешение водной суспензии с липидной фракцией с целью получения устойчивой эмульсии с применением технологии Пикеринга.

Результаты работы представлены ниже (табл. 3) и свидетельствуют о равномерности

Таблица 3

Результаты исследования морфологии стабилизирующих частиц растительных полисахаридов и их присутствие в составе эмульсий Пикеринга



полученного распределения липидной фазы в дисперсной среде водной суспензии, наполненной БАВ. Представленные микрофотографии СЭМ достоверно подтверждают образование эмульсии «масло-вода», капли дисперсной фазы масла в дисперсной среде распределяются равномерно без возникновения флокуляции.

Образовавшийся межфазный барьер из микро- и наноструктурированных биоактивных частиц фукоидана, Alg-Na и крахмала предотвращает коалесценцию эмульсии Пикеринга, это также подтверждают показатели ее стабильности при воздействии агрессивных факторов, что доказывает возможность использования ЭП, наполненных биоактивными частицами модифицированных растительных полисахаридов в составе пищевых систем.

Для доказательства возможности формирования стабилизирующих биоактивных комплексов с целью усиления полезности ЭП дополнительно к растительным полисахаридам в систему водной суспензии включен экстрагированный из *Tinospora cordifolia*. Пищевая ценность *T. cordifolia* составила 292,54 калории на 100 г, содержание белка и пищевых волокон

в гудучи имеет значительные уровни основных и второстепенных элементов, а именно Zn, Mn, Cl, K, Ca, Ti, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Br и Sr, которые играют важную роль в повышении желаемой ферментативной активности [5].

Экстракт *T. cordifolia* (Гудучи) действует как антистрессор и антидепрессант; повышая уровень моноаминов, блокирует моноаминоксидазу, ингибирует процессы глюконеогенеза и гликогенолиза; он также вызывает гипогликемический эффект, проявляет противодиабетическую активность, обладает иммуномодулирующей функцией и повышает устойчивость организма к болезням [2].

Оксид цинка был применен в составе эмульсий Пикеринга как вещество, проявляющее противовоспалительный и антисептический эффект, а также являющееся иммуномодулирующим микроэлементом. Оксид цинка способен образовывать альбуминаты и денатурирует белки. Оксид цинка участвует в широком спектре биологических процессов, таких как пролиферация и дифференцировка клеток, клеточный цикл, гомеостаз активных форм кислорода (АФК) и иммунологический ответ.

Соотношение компонентов в составе биоактивной стабилизирующей композиции определялось в ходе рекогносцировочных исследований, количество экстракта *T. Cordifolia* и оксида цинка составляло 0,2 % в дополнение к полисахаридам.

Прямое добавление *T. cordifolia* в пищевую матрицу продукта создает проблемы со стабильностью и низкой биодоступностью. Для решения этой проблемы нами предложена и создана система доставки *T. cordifolia*, использующая совместный потенциал биоактивных растительных компонентов (фукоидана, альгината и резистентного крахмала) эмульсия Пикеринга. Результаты исследования представлены в табл. 4.

Важно отметить, что при использовании биоактивных при включении экстракта *T. Cordifolia* и оксида цинка композиций для стабилизации ЭП на основе резистентного крахмала наблюдается повышение показателя АОА и сохранение стойкости полученных ЭП, что определяет перспективность данного направления для фортификации в пищевые системы [6, 7, 10, 11].

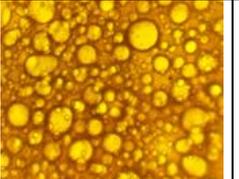
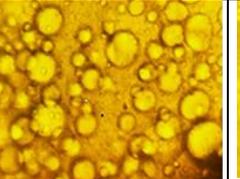
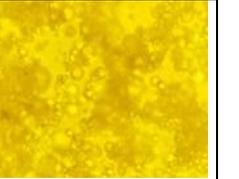
Преимущество включения сонохимически

модифицированного крахмала для стабилизации ЭП состоит в том, что в процессе модификации в нативном крахмале увеличивается доля амилозы, которая устойчива в процессах переваривания в тонкой части ЖКТ и ферментируется в толстом отделе. Высокая устойчивость ЭП, стабилизированных композицией крахмал (RS2) / гудучи (0,2 %) обусловлена функционально-технологическими свойствами RS2, в частности его эмульгирующей способностью [7].

Таким образом, методология создания пищевых систем с добавленной полезностью при использовании трехфакторного ультразвукового воздействия является состоятельной в случае соблюдения технологий прослеживаемости, а контролируемый показатель – устойчивость биоактивности разработанного стабилизирующего компонента.

Сформированный в ходе экспериментальных исследований массив данных будет использован для прогностического анализа технологической пригодности эмульсии Пикеринга в составе пищевых эмульсионных систем в рамках последующих исследований по данной теме.

Таблица 4
Результаты исследования показателей эмульсии Пикеринга стабилизированных композициями биоактивных частиц

Наименование показателя	Состав стабилизирующей композиции			
	Крахмал (RS2) / <i>T. cordifolia</i> (0,2 %)	Крахмал / ZnO (0,2 %)	Фукоидан / <i>T. cordifolia</i> (0,2 %)	Альгинат натрия / <i>T. cordifolia</i> (0,2 %)
Микроскопия ЭП (увеличение ×800)				
Вязкость ЭП	506 mPas	687 mPas	844 mPas	1,01 Pas
Стойкость ЭП, %	98	97	68	72
АОА, % DPPH	72	92	89	82

Список литературы / References

1. Abbas S., Hayat K., Karangwa E., Bashari M., Zhang X. An overview of ultrasound-assisted food-grade nanoemulsions. *Food Eng. Rev.*, 2013, 5, pp. 139–157. <http://dx.doi.org/10.1007/s12393-013-9066-3>
2. Anjum, V., Bagale, U., Kadi, A., Potoroko, I., Sonawane, S.H., Anjum, A. Unveiling Various Facades of *Tinospora cordifolia* Stem in Food: Medicinal and Nutraceutical Aspects. *Molecules*, 2023, 28, 7073. <https://doi.org/10.3390/molecules28207073>
3. Bagale U., Kadi A., Potoroko I., Malinin A. Impact of a Sonochemical Approach to the Structural and Antioxidant Activity of Brown Algae (Fucoïdan) Using the Box–Behnken Design Method. *Processes*, 2023, 11(7), 1884. <https://doi.org/10.3390/pr11071884>
4. Imbs T.I., & Ermakova S.P. Can Fucoïdians of Brown Algae Be Considered as Antioxidants? *Russian Journal of Marine Biology*, 2021, 47(3), 157–161. <https://doi.org/10.1134/S1063074021030056>
5. Kavya B., Kavya N., Ramarao V., Venkateshwarly G. *Tinospora cordifolia* (Willd.) Miers: Nutritional, ethnomedical and therapeutic utility. *Int. J. Res. Ayurveda Pharm.*, 2015, 6, 195–198. <http://dx.doi.org/10.7897/2277-4343.06240>
6. Koh H.S.A., Lu J., & Zhou W. Structure characterization and antioxidant activity of fucoïdan isolated from *Undaria pinnatifida* grown in New Zealand. *Carbohydrate polymers*, 2019, 212, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.040>
7. Patil K.G. Antidiabetic activity of *Tinospora cordifolia* (fam: menispermaceae) in alloxan treated albino rats. *Appl. Res. J.*, 2015, 1, 316–319.
8. Sivakumar M., Tang S.Y., Tan K.W. Cavitation technology – a greener processing technique for the generation of pharmaceutical nanoemulsions. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2014, 21, pp. 2069–2083. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2014.03.025>
9. Sivakumar M., Boffito D. Camilla, Erico M.M., Jean-Marc Leveque Flores, Pflieger Rachel, Bruno G., Ashokkumar Muthupandian. Ultrasonics and sonochemistry: Editors' perspective. *Ultrasonics Sonochemistry*, October 2023, Volume 99, 106540. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultsonch.2023.106540>
10. Sun Q.L., Li Y., Ni L.Q., Li Y.X., Cui Y.S., Jiang S.L., ... & Dong C.X. Structural characterization and antiviral activity of two fucoïdians from the brown algae *Sargassum henslowianum*. *Carbohydrate polymers*, 2020, 229, 115487. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115487>
11. Wang Y., Xing M., Cao Q., Ji A., Liang H., & Song S. Biological activities of fucoïdan and the factors mediating its therapeutic effects: A review of recent studies. *Marine Drugs*, 2019, 17(3), 183. <https://doi.org/10.3390/md17030183>
12. Xiao J., Li Y., Huang Q. Recent advances on food-grade particles stabilized Pickering emulsions: Fabrication, characterization and research trends. *Trends Food Sci. Technol.*, 2016, 55, 48–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2016.05.010>
13. Zhou L., Zhang J., Xing L., Zhang W. Applications and effects of ultrasound assisted emulsification in the production of food emulsions: A review. *Trends in Food Sci. Technol.*, 110 (2021), pp. 493–512. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tifs.2021.02.008>

Информация об авторах

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

Кадии Аммар Мохаммад Яхья, ассистент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, kadia@susu.ru

Руськина Елена Александровна, старший преподаватель кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, ruskinaaa@susu.ru

Малинин Артем Владимирович, ассистент кафедры «Пищевые и биотехнологии», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, malininav@susu.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, potorokoi@susu.ru

Ammar M.Y. Kadi, Assistant at the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, kadia@susu.ru

Alena A. Ruskina, Senior Academic at the Department of Food Technology and Biotechnology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, ruskinaaaa@susu.ru

Artem V. Malinin, Assistant at the Department of Food and Biotechnologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, malininav@susu.ru

Статья поступила в редакцию 14.09.2023

The article was submitted 14.09.2023