

Научная статья  
УДК 547.913:66.011:677.027.6  
EDN: FQLQAT  
DOI: 10.21285/achb.944



## Эмульсионные микро- и нанокапсулы в системе концентрат лактоглобулина / пектин с эфирным маслом лаванды *Lavandula angustifolia*, стабилизированные ультразвуком

Ш.Р. Алиева\*\*\*, Г.А. Кодирова\*, З.У. Шерова\*,  
С.Р. Усманова\*, З.К. Мухидинов\*✉

\*Институт химии им. В.И. Никитина Национальной академии наук Таджикистана,  
Душанбе, Республика Таджикистан

\*\*Научно-исследовательский центр экологии и окружающей среды Центральной Азии,  
Душанбе, Республика Таджикистан

**Аннотация.** В последние годы стремительно растет интерес к применению биоактивных соединений, выделенных из растительных источников, в качестве ингредиентов для функциональных пищевых продуктов и фармацевтических препаратов. Известно, что пищевая матрица, размер молекулы, внешние факторы и среда желудочно-кишечного тракта могут препятствовать биодоступности и абсорбции этих биоактивных соединений в организме. Защита данных соединений с помощью технологии наноинкапсуляции может повысить их стабильность. Представленная работа посвящена исследованию применения системы доставки на основе эмульсионных микро- и нанокапсул для защиты биоактивных соединений (эфирных масел) и изучению ультразвукового влияния различной амплитуды на стабильность эмульсионных микрокапсул в системе белок / пектин с эфирным маслом. Были вычислены: средний размер полученных микрокапсул, дзета-потенциал, удельная поверхность частиц и вязкость дисперсной системы. Показано, что действие ультразвука инициирует образование пектинового слоя с разной плотностью заряда на поверхности частиц эмульсии в зависимости от приложенной силы ультразвука. Найдено оптимальное значение амплитуды ультразвука, способствующее формированию частиц со средним размером и с высокой удельной поверхностью 32967 см<sup>2</sup> на 1 мл эмульсии. Полученные нано- и микрочастицы с эфирным маслом показали хорошую антимикробную, антигрибковую и антивирусную активность. Разработанные системы доставки на основе пищевых биополимеров с выявленными характеристиками вполне могут соответствовать требованиям рынка антибактериальных препаратов и найти свое применение в области создания функциональных продуктов.

**Ключевые слова:** нано- и микроэмульсия, эфирное масло, пектин, концентрат лактоглобулина, ультразвук, размер частиц

**Для цитирования:** Алиева Ш.Р., Кодирова Г.А., Шерова З.У., Усманова С.Р., Мухидинов З.К. Эмульсионные микро- и нанокапсулы в системе концентрат лактоглобулина / пектин с эфирным маслом лаванды *Lavandula angustifolia*, стабилизированные ультразвуком // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 4. С. 482–494. DOI: 10.21285/achb.944. EDN: FQLQAT.

## Emulsion micro- and nanocapsules of the lactoglobulin concentrate / pectin system with essential oil of *Lavandula angustifolia* stabilized by ultrasound

Shakhnozabonu R. Alieva<sup>\*,\*\*</sup>, Gulru A. Qodirova<sup>\*</sup>, Zamira U. Sherova<sup>\*</sup>,  
Surayo R. Usmanova<sup>\*</sup>, Zayniddin K. Muhidinov<sup>\*✉</sup>

<sup>\*</sup>Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin, National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe, Republic of Tajikistan

<sup>\*\*</sup>Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Dushanbe, Republic of Tajikistan

**Abstract.** Recent years have seen a rapidly growing interest in the use of plant-isolated bioactive compounds as ingredients in functional food and pharmaceuticals. It is known that food matrix, molecular size, external factors, and gastrointestinal environment can interfere with the bioavailability and absorption of such bioactive compounds in the body. The protection of specified compounds via nanoencapsulation technology can improve their stability. The present work is aimed at studying the application of a delivery system based on emulsion micro- and nanocapsules in the protection of bioactive compounds (essential oils), as well as examining the effect of ultrasound of different amplitudes on the stability of emulsion microcapsules in the protein/pectin system with essential oil. The following parameters were determined: average size of obtained microcapsules, zeta potential, specific surface area of the particles, and viscosity of the disperse system. Ultrasound is shown to initiate the formation of a pectin layer, with the charge density varying on the surface of emulsion particles depending on the applied ultrasonic force. The article presents the optimal ultrasound amplitude for the formation of medium-sized particles having a high specific surface area of 32967 cm<sup>2</sup> per 1 mL of the emulsion. The obtained nano- and microparticles with essential oil exhibit good antimicrobial, antifungal, and antiviral activities. The developed delivery systems based on food biopolymers with identified characteristics may well meet the requirements of the antibacterial drugs market and find their application in the field of functional food development.

**Keywords:** nano- and microemulsion, essential oil, pectin, lactoglobulin concentrate, ultrasound, particle size

**For citation:** Alieva Sh.R., Qodirova G.A., Sherova Z.U., Usmanova S.R., Muhidinov Z.K. Emulsion micro- and nanocapsules of the lactoglobulin concentrate / pectin system with essential oil of *Lavandula angustifolia* stabilized by ultrasound. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(4):482-494. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.944. EDN: FQLQAT.

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время исследователи сосредоточены на важности биоактивных соединений природного происхождения, которые представляют собой вторичные метаболиты, полученные из семян, продуктов питания и продуктов метаболизма на основе ферментации. Растет интерес к использованию биоактивных компонентов, выделенных из растительных источников, в качестве ингредиентов для функциональных пищевых продуктов и фармацевтических препаратов [1–3]. Утверждается, что многие из этих биоактивных фитохимических веществ способствуют здоровью и благополучию человека, улучшая его физическую или умственную работоспособность. Кроме того, они хорошо известны своим широким спектром полезных действий, включая антиоксидантное, противовоспалительное, антимикробное, противораковое, противовирусное и ранозаживляющее, потому могут стать компонентами функциональных пищевых добавок [1–6].

В то же время многие биоактивные соединения нерастворимы в воде и очень чувствительны к раз-

личным стрессовым факторам окружающей среды, воздействующим на них во время обработки и хранения пищевых продуктов, таким как тепло, свет и кислород воздуха, что ограничивает их применение в качестве нутриентов. Отмечается, что действие указанных факторов и связь с желудочно-кишечной средой могут препятствовать биодоступности и абсорбции этих биоактивных соединений в системах клеток-хозяев и на поврежденных участках организма [3, 7–9].

Кроме того, существует множество проблем, связанных с разработкой новых и более эффективных функциональных пищевых продуктов, обогащенных чистыми биологически активными соединениями в биологических составах, из-за их особых характеристик, то есть плохой биодоступности, неприятного вкуса, плохой растворимости, слабой физической и химической стабильности, обнаруживающейся при обработке и хранении пищевых продуктов. Для преодоления этих проблем существуют новые системы инкапсуляции и доставки с использованием липидных оболочек, эмульсионные нано- и микрокапсулы на основе биополимеров и физи-

ческие методы, например распылительная сушилка, электропрядение (электроспиннинг) [3, 10–13].

В указанном плане потенциал белково-полисахаридного комплекса как пищевого средства инкапсуляции и доставки биоактивных соединений, питательных веществ и лекарств привлек большое внимание в области пищевой, косметической и фармацевтической промышленности [10–14]. Полисахариды широкодоступны и имеют различную структуру с различными преимуществами, в том числе низкой токсичностью, легкоусвояемы, биосовместимы и могут оставаться стабильными в широком диапазоне pH и температур. Известно, что белки по своей природе являются поверхностно-активными веществами и благодаря своей амфифильной природе действуют как эмульгаторы, тогда как полисахариды с гидрофильной природой могут действовать как загустители и стабилизаторы [12–16]. Взаимодействие между белками и полисахаридами является естественным явлением в пищевых системах для улучшения текстуры, стабильности и качества широкого спектра коллоидных систем, включая эмульсии, гели, дисперсии, пены и их смешанные варианты [14].

Белково-полисахаридные наноструктуры обычно создаются в наномасштабе (менее 1000 нм) и могут иметь разнообразные морфологию и свойства в зависимости от материала, используемого в их конструкции. Небольшой размер этих наноструктур дает различные преимущества по сравнению с обычными системами доставки благодаря более высокому соотношению площади поверхности и объема, а также точному целенаправленному и контролируемому высвобождению нагруженных биоактивных соединений и других активных агентов в кишечном пространстве [3–5, 10–18]. Наноструктуры могут улучшать некоторые органолептические свойства (например, маскировать нежелательные запахи), повышать биодоступность, предотвращать окислительные реакции, сохранять биологическую активность и контролировать высвобождение биологически активных веществ или даже повышать их качество и стабильность, а также повышать их биологическую активность за счет снижения размеров материалов в наномасштабе [3–5, 11, 15].

Липофильные биологически активные соединения (эфирные масла, жирные кислоты, каротиноиды и др.) в пищевых продуктах также чувствительны к деградации под воздействием раздражителей окружающей среды, во время обработки, хранения и прохождения через желудочно-кишечный тракт. Эфирные масла имеют очень сложный химический состав, который включает преимущественно терпены, терпеноиды и фенилпропаноиды – эти основные компоненты эфирных масел составляют примерно 70% его состава. Оставшаяся часть содержит множество других соединений, таких как жирные кислоты, оксиды и производные серы, альдегиды и полифенолы [2, 19]. Известно, что защитная активность эфирного масла или его компонентов связана с сохранением антиоксидантной, антимикробной и противовоспалительной активности [19–24].

В индустрии ароматизаторов и отдушек наблюдался значительный рост продаж некоторых натуральных материалов во время вспышки коронавирусной инфекции COVID-19. Эфирные масла показали различную фармакологическую активность, в том числе и противо-

вирусную, поэтому предполагается, что они обладают потенциальной продуктивностью против SARS-CoV-2. В работе [25] отмечено, что благодаря своей лиофильности эфирные масла могут легко проникать через вирусную оболочку и вызывать ее разрыв.

Авторами работы [26] проверены ингибирующие свойства 538 образцов эфирных масел, ароматических экстрактов и их фракций в отношении двух очень хорошо охарактеризованных протеаз ( $M^{pro}$ ) и ( $PL^{pro}$ ), которые являются мишенями для лекарственных средств и играют ключевую роль в репликации и транскрипции вируса SARS-CoV-2. Эфирные масла с высоким содержанием монотерпенов и монотерпеноидов проявили низкую ингибирующую активность. Они обнаружили четкие различия, например, между эфирными маслами корня и листьев растений, где первое проявляет более высокую ингибирующую активность в отношении указанных протеаз SARS-CoV-2 [26].

Защита эфирных масел с помощью технологии наноинкапсуляции может повысить их стабильность. Технология наноинкапсуляции обеспечивает контролируемое высвобождение активных компонентов благодаря набуханию или деградации полисахаридной оболочки. Это способствует усилению антибактериальных свойств эфирных масел, снижению их чувствительности к различным факторам окружающей среды, а также уменьшению их влияния на вкус пищи. Следовательно, применение системы доставки на основе коллоидов может повышать растворимость, стабильность и биодоступность этих липофильных биоактивных соединений.

Целью проведенной работы являлось получение стабильных нано- и микрокапсул эфирных масел на основе белково-полисахаридного комплекса посредством изучения влияния ультразвуковой волны различной амплитуды на размер частиц и стабильность эмульсионных микрокапсул.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ**

**Материалы исследования.** Эфирные масла были получены из растения лаванды узколистной (*Lavandula angustifolia*), выращенной на экспериментальных участках Института ботаники, физиологии и генетики растений Национальной академии наук Таджикистана (ИБФГР НАНТ) и Института зоологии и паразитологии Национальной академии наук Таджикистана (ИЗП НАНТ). Для получения и стабилизации микро- и наноэмульсий в данной работе были использованы: низкометилированный пектин, полученный из яблочных выжимок, с содержанием галактуроновой кислоты 58,6%, степенью этерификации 38,0% и молекулярной массой  $M_w$  119 кДа (далее обозначенный как низкометилированный яблочный пектин (НМЯ)) [27], а также концентрат лактоглобулина (LgC), выделенный из молочной сыворотки [28], содержащий 37,35%  $\beta$ -LgA, 52,9%  $\beta$ -LgB и 9,7%  $\alpha$ -LgA. Растворы пектина и лактоглобулина перед использованием очищали на лабораторной ультрафильтрационной системе (мембранная система KrossFlow, США) в режиме диультрафильтрации с применением соответствующих мембран.

Все растворители и реагенты, использованные в этих экспериментах, такие как хлорид натрия, буферные соли, этанол и др., были химически чистыми.

Получение нано- и микрокапсул в системе концентрат лактоглобулина / низкометилированный яблочный пектин с эфирным маслом лаванды. Эмульсионные нано- и микрокапсулы получали по методике, описанной в работе [29], с некоторыми изменениями: в емкость, размещенную на водяной бане при температуре 60 °С, вносили 1–2 мл эфирного масла лаванды, предварительно разведенного в 2–3 мл подсолнечного масла («Олейна», Россия), и при перемешивании на цифровом гомогенизаторе IKA T-25 (Ultra Turrax, IKA-Werke GmbH & Co.KG, Германия) при скорости 12 тыс. об/мин добавляли 10 мл 0,4%-го водного раствора концентрата лактоглобулина молочной сыворотки. После 15 мин, не прерывая перемешивание, медленно (по каплям) добавляли рассчитанное количество 0,2%-го раствора яблочного пектина, растворенного в 0,1 М NaCl для получения вторичной эмульсии, и продолжили перемешивание еще 20 мин.

Ультразвуковая обработка. Далее полученная эмульсия была подвергнута действию ультразвука (EW-04714-53 Cole Parmer, США) с рабочей частотой 20 кГц и мощностью 130 Вт в течение 5–10 мин путем погружения ультразвукового пробника в эмульсию при различных амплитудах ультразвука (30, 50 и 70%). Перед обработкой ультразвуком эмульсионные микрокапсулы предварительно смешивали в химическом стакане с помощью магнитной мешалки. Мощность ультразвуковой волны была определена параллельно колориметрически при повышении температуры от 20 до 60 °С. Все эксперименты проводились трижды с использованием свежеприготовленных эмульсий, результаты представлены как средне-стандартно вычисленные.

Характеристика эмульсионных микрочастиц. Эмульсии хранили при комнатной температуре в течение 24 ч, затем проводили оценку устойчивости по объему, количеству микрокапсул в 1 мл, размеру и распределению частиц микроскопическим методом. Количество частиц и их размеры определялись с помощью микроскопа Olympus BX53 (Olympus U-TR30-2, Япония). Для вычисления значений средних диаметров  $d_{3,2}$  и  $d_{4,3}$ , характеризующих средневзвешенные размеры по массе и объему эмульсионных частиц, использовалась программа MS Excel. Все измерения проводились на трех свежеприготовленных образцах, данные представлены в виде средних значений.

Удельная поверхность капель масел в эмульсиях УП,  $\text{см}^2 \times \text{г}^{-1}$ , которая представляет собой площадь поверхности раздела масло – вода на единицу массы масла, была рассчитана с использованием следующего выражения [30]:

$$\text{УП} = 6 / (\rho_0 \times d_{3,2}),$$

где  $\rho_0$  – плотность масляной фазы,  $\text{г} \times \text{см}^{-3}$ ;  $d_{3,2}$  – средневзвешенный диаметр капли, мкм.

Определение дзета-потенциала микрочастиц. Дзета-потенциал измеряли по принципу электрофореза с использованием электрофоретической ячейки (ISCO, США) с капилляром из стекла, покрытым полидиметилсилоксаном (слоем толщиной 250 мкм), и рассчитывали на основе модели Смолуховского [31]. Перед введением исследуемого раствора в аппарат микроканальную ячейку и всю линию растворов промывали в двух направлениях би-дистиллированной водой несколько раз для удаления любых загрязнений (таких как электролиты, оставшиеся

после предыдущих экспериментов). После этого был инициирован второй 15-минутный цикл промывки с использованием рабочих эмульсий. Прозрачность поверхностей микроканалов позволяла визуально осматривать канал, чтобы убедиться, что все пузырьки удалены. Все образцы перед анализом разбавляли 5 мМ фосфатным буфером (рН = 7,0) и перемешивали с использованием магнитной мешалки при 300 об/мин в течение 1 мин при комнатной температуре, чтобы избежать эффектов многократного рассеяния. Для разделения в ячейке было установлено напряжение (400 В) на время не более 1 мин, после чего отключали питание и извлекали электроды из микроканальной ячейки. Все эксперименты повторяли в трехкратной повторности и проводили при комнатной температуре 25 °С.

Определение вязкости эмульсии. Измерения сдвиговой вязкости проводились с использованием реометра (цифровой вискозиметр Brookfield HBDE-V, США), оснащенного UL-адаптером, и при скорости сдвига в диапазоне от 0,1 до 100  $\text{с}^{-1}$  при температуре  $25,0 \pm 0,1$  °С.

Оценка стабильности эмульсии. Для изучения кинетики фазового разделения сразу после добавления всех компонентов эмульсии ( $18 \pm 0,5$  мл) разливались в градуированные стеклянные пробирки объемом 25 мл. Пробирки закрывались шлифованными крышками и хранились при комнатной температуре. Объем кажущейся стабильной эмульсии без слоя густого крема контролировался ежедневно в течение 2 недель.

Статистический анализ данных. Все эксперименты проводили с использованием трех свежеприготовленных образцов. Полученные результаты представляют собой средние значения и стандартные отклонения, которые были рассчитаны с использованием  $t$ -критерия Стьюдента для независимых выборок в программе Microsoft Excel.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эфирные масла из растений *L. Angustifolia* экстрагировали гидродистилляционным методом с использованием аппарата Клевенджера в течение 90 мин. Эфирные масла растений *L. Angustifolia* представляют бледно-желтую жидкость со специфическим запахом. Выход эфирных масел (в процентах от массы воздушно-сухого сырья) и основные физические свойства полученных масел из двух источников представлены в табл. 1.

Таблица 1. Выход и физические свойства эфирных масел, полученных из двух источников растений *Lavandula Angustifolia*, произрастающих в Таджикистане

Table 1. Yield and characteristic of essential oils obtained from two sources of *Lavandula Angustifolia* plants growing in Tajikistan

Название и источник растения	Выход масла, %	Плотность, $\text{г}/\text{см}^3$	Коэффициент преломления света при 20 °С
Эфирное масло лаванды ИБФГР НАНТ, 2020 г.	0,82	0,873	1,459
Эфирное масло лаванды ИЗП НАНТ, 2020 г.	1,18	0,879	1,464

Из данных табл. 1 следует, что выход эфирного масла лаванды, полученного на экспериментальном участке ИЗП НАНТ, больше (1,18%) по сравнению с выходом масла, полученного на участке ИБФГР НАНТ, хотя они имели почти одинаковые физические свойства по плотности и коэффициенту преломления света. В дальнейшем экспериментах по получению эмульсии были использованы образцы масла первого участка.

По нашим неопубликованным данным, в составе образцов с участков ИБФГР НАНТ и ИЗП НАНТ обнаружены 64 и 98 летучих соединений соответственно. В составе эфирного масла ИБФГР НАНТ найдены: линалоол (33,27%), линалилацетат (21,01%), (-)-4-терпинеол (6,89%),  $\alpha$ -терпинеол (6,62%), 4-гексен-1-ол (4,91%), геранилацетат и его изомер (4,32%), эукалиптол (1,88%), а также транс- $\beta$ -оцимен (2,24%). Состав эфирного масла ИЗП НАНТ отличался содержанием в нем оксида карофиллена (3,54%), лавандулола (3,97%) и ряда новых соединений.

Согласно данным работы [32], в растении *L. Angustifolia*, произрастающем в Таджикистане, было идентифицировано 59 соединений – в основном линалоол (31,44%), линалилацетат (31,78%),  $\alpha$ -терпинеол (8,43%), лавандулол (5,24%), эукалиптол (1,48%) и *b*-фарнесен (1,35%).

По данным другого источника [33], в растении *L. Angustifolia*, произрастающем в Египте, было идентифицировано 28 соединений в различных пропорциях. Химический состав эфирного масла, описанного в данной работе, был сравнен с составом масла в источнике [32] и содержал: линалоол (31,1%), линалилантранилат (16,8%), бензилацетат (12,9%) и 1,8-цинеол (10,1%). Другие компоненты были идентифицированы в промежуточных пропорциях, включая ацетат  $\alpha$ -терпинеола (4,92%),  $\alpha$ -терпинеол (3,89%), терп-4-ол (3,15%),  $\alpha$ -пинен (2,85%), дигидрокарвеол (2,34%), дигидромирценол (1,81%), лимонен (1,04%); остальные компоненты присутствовали в незначительных количествах.

Как было отмечено выше, инкапсулирование эфирных масел может улучшать органолептические свойства, повышать биодоступность, предотвращать окислительные реакции, сохранять биологическую активность и контролировать высвобождение биологически активных веществ. В данном исследовании были использованы разработанные нами системы доставки лекарственных веществ и пищевых ингредиентов на основе эмульсии типа масло в воде стабилизированными белком и пектином [18].

Нано- и микрокапсулы эфирных масел, стабилизированные доступными биополимерами (концентрат лактоглобулина молочной сыворотки и яблочного пектина), получали методом двухстадийного формирования в эмульсии типа масло в воде в присутствии противоионов натрия, как описано в работах [18, 29]. В данной работе мы использовали эмульсионные системы с LgC/НМЯ, так как нано- и микрокапсулы с низкометилированным пектином имели несколько высокий захват масла по сравнению с высокометилированными пектинами из цитрусовых, подсолнечника и яблок [18].

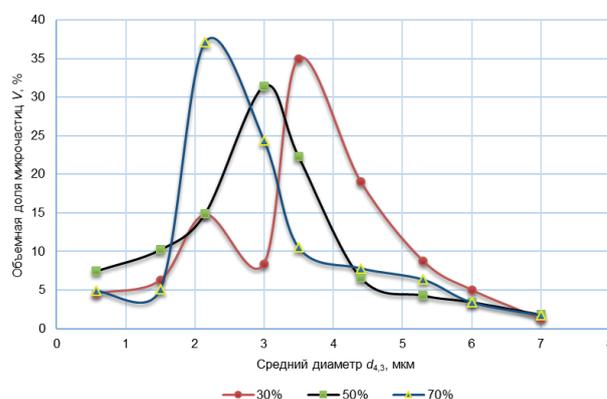
Таким образом, нами были найдены оптимальные условия получения стабильных нано- и микрокапсул в эмульсионной системе масло/вода при различных соотношениях LgC и НМЯ с минимальным размером,

эффективно захватывающие масляные частицы. В связи с этим для инкапсулирования эфирных масел в данной работе была выбрана система LgC/НМЯ с мольным соотношением 40:1.

Стабильность эмульсии против агрегации капель, покрытых белком, можно улучшить путем добавления одного или нескольких полисахаридов для покрытия протеинового слоя и увеличения их стабильности. Кроме того, для улучшения стабильности эмульсии существуют различные физические методы: пульсирующее электрическое поле [34], ультразвук [35, 36] и др. Результаты этих исследований показали, что действие пульсирующего электрического поля и ультразвуковой волны при найденных оптимальных условиях способствует раскрытию структуры белка и образованию более мелких агрегатов, тем самым предотвращает агрегацию капель и их коалесценцию и/или флокуляцию.

Нами изучено влияние амплитуды ультразвука на стабильность нано- и микрокапсул, размер частиц и их распределение в объеме эмульсии. Для получения информации о размере частиц проведена калибровка полученной на микроскопе области изображения одной капли разбавленной эмульсии. Количество микро-частиц и их размеры были определены с помощью компьютерной программы Olympus cellSens Standard. На основе полученных данных о размерах и объеме частиц были построены кривые распределения частиц микрокапсул.

На рис. 1 представлены кривые распределения (зависимость объемной доли микро-частиц от их размера) в эмульсионной системе LgC/НМЯ микро-частиц, содержащих эфирное масло лаванды, под действием ультразвука различной амплитуды: 30, 50 и 70%. Размеры частиц полученных эмульсий находились в пределах от 450 нм до 10,5 мкм.



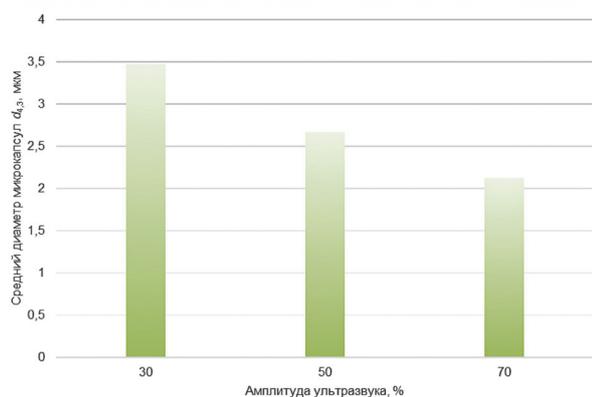
**Рис. 1.** Кривые распределения в эмульсионной системе концентрат лактоглобулина / яблочный пектин микро-частиц, содержащих эфирное масло лаванды, под действием ультразвука амплитуды 30, 50 и 70%

**Fig. 1.** Distribution curves of microparticles in the emulsion system of lactoglobulins concentrate / apple pectin containing lavender essential oil under the influence of ultrasound of amplitudes 30, 50 and 70%

Из кривых распределения в эмульсионной системе LgC/НМЯ микро-частиц, содержащих эфирное масло лаванды, видно, что полученные эмульсии под действием силы ультразвука с повышением амплитуды проявляют

бимодальное распределение частиц, плавно переходящее в мономодальное с возрастанием амплитуды ультразвука до 50 и 70%. При этом максимальный объем частиц с минимальным размером 2–3 мкм при действии ультразвука становится преобладающим (см. рис. 1).

На рис. 2 представлен средний диаметр микрокапсул  $d_{4,3}$  в зависимости от приложенной амплитуды ультразвука 30, 50 и 70%. Как видно из рис. 2, с возрастанием силы ультразвука размеры эмульсионных частиц плавно уменьшаются, а минимальное значение  $d_{4,3}$  можно достичь при 70%-й амплитуде ультразвукового воздействия на эмульсионные микрочастицы. Дальнейшее увеличение амплитуды ультразвука было нецелесообразно с точки зрения расхода энергии.



**Рис. 2.** Зависимость среднего диаметра микрокапсул от приложенной амплитуды ультразвука 30, 50 и 70%

**Fig. 2.** Relationship between the average diameter of microcapsules and applied ultrasound amplitude 30, 50 and 70%

Адсорбированные белковые молекулы стабилизируют эмульсионную систему за счет электростатического и/или стерического отталкивания, что, в свою очередь, предотвращает агрегацию и коалесценцию капель [3–5, 18]. С другой стороны, полисахариды действуют как стабилизаторы эмульсии в широком диапазоне условий окружающей среды, включая ионную силу, температуру, pH и т.д. Добавление полисахаридов в эмульсию даже регулирует реологию дисперсной фазы, влияя на стабильность эмульсии и свойства пенообразования [37].

Для оценки этих факторов мы исследовали плотность заряда на поверхности частиц путем определения значения дзета-потенциала полученных эмульсий до и после действия ультразвуковой волны. Согласно теории

двойного электрического слоя, дзета-потенциал – это разность потенциалов дисперсионной среды и неподвижного слоя жидкости, окружающего микрочастицу.

Дзета-потенциал границы раздела твердое тело – жидкость является важной величиной, характеризующей поверхность нано- и микрочастиц при разработке биомедицинских полимерных средств и устройств. В данном исследовании применена экспериментальная методика измерения дзета-потенциалов  $\zeta$  плоских поверхностей с использованием уравнения Смолуховского с измеренным наклоном зависимости тока от времени в электроосмотическом потоке, представленная в работе [31].

$$\zeta = \frac{\mu \times \text{slope} \times L}{\epsilon_r \times \epsilon_0 \times E_z^2 \times A_{cross} (\lambda_{b2} - \lambda_{b1})},$$

где  $\mu$  – электрофоретическая подвижность эмульсии;  $E$  – напряженность электрического поля;  $L$  – длина капилляра.

Этот метод является простым и точным по сравнению с традиционными методами проточного потенциала и электрофореза. Очевидно, что измерение полного электрического тока в электроосмотическом потоке проводится относительно просто и легко по сравнению с измерениями в методах электрофореза и потенциала течения.

Дзета-потенциал определяет степень и характер взаимодействия между частицами дисперсной системы. Для частиц, которые относительно малы, высокое значение потенциала означает стабильность, то есть дисперсная система будет устойчива к агрегации и коагуляции. Когда же дзета-потенциал низкий (близок к нулю), притяжение превышает отталкивание и устойчивость дисперсий будет нарушаться.

В табл. 2 представлены результаты определения среднего значения объемного диаметра частиц  $d_{4,3}$  и диаметра поверхности  $D_{3,2}$ , удельной поверхности, дзета-потенциала и вязкости эмульсионных нано- и микрочастиц, найденных в ходе проведенного исследования, в зависимости от приложенной амплитуды ультразвука.

Пектиновые биополимеры могут нести отрицательный заряд на остатках галактуроновой кислоты со свободными карбоксильными группами при C-6 пиранозного цикла, что влияет на их функциональные свойства. Плотность отрицательного заряда пектиновых микромолекул зависит от степени этерификации и pH окружающей дисперсной фазы [38]. Согласно данным работ [18, 39], физико-химические параметры пектина,

**Таблица 2.** Значения среднего объемного диаметра частиц и диаметра поверхности, удельной поверхности, дзета-потенциала и вязкости эмульсионных нано- и микрочастиц в зависимости от амплитуды ультразвука

**Table 2.** Average volume diameter of particle and surface diameter, specific surface area, zeta potential and viscosity of emulsion's nano- and microparticles depending on the ultrasound's amplitude

Амплитуда ультразвука, %	Средний объемный диаметр частиц, мкм	Диаметр поверхности, мкм	Удельная поверхность, $\text{см}^2 \times \text{г}^{-1}$	Дзета-потенциал, мВ	Вязкость, $\text{мПа} \times \text{с}$
30	3,48	3,43	19678	-21,3	2,9
50	2,53	2,36	27027	-25,7	2,2
70	2,07	2,01	32967	-29,6	1,8

в частности степень этерификации, и их распределение определяют способность образования комплекса между пектином и белком. Высокая плотность заряда низкометилированных пектинов позволяет формировать комплексы при высокой ионной силе по сравнению с высокометилированными пектинами, имеющими низкую локальную плотность заряда, что было учтено во время добавления электролита при формировании вторичного слоя эмульсионных частиц.

Ввиду вышесказанного можно сделать вывод, что дзета-потенциал пектина на внешней фазе нано- и микрочастиц эмульсии сильно зависит от наличия свободной карбоксильной группы. Из табл. 2 видно, что мощность ультразвука (амплитуда приложенного ультразвука) имеет тенденцию встраивать пектиновые цепи на поверхности частиц эмульсии, которые образуют более отрицательную плотность заряда на поверхности нано- и микрочастиц.

Как видно из данных табл. 2, при 30%-й амплитуде плотность заряда на поверхности частиц составляет -21,3 мВ, при 50%-й амплитуде она равняется -25,7 мВ, при 70%-й амплитуде же она возрастает до -29,6 мВ, что позволяет формировать частицы с наименьшим средним размером (2,07 мкм). Действие ультразвука инициирует образование на поверхности частиц эмульсии пектинового слоя с разной плотностью заряда в зависимости от приложенной силы ультразвука. Найденное оптимальное значение амплитуды ультразвука способствует формированию частиц, имеющих средний размер поверхности  $D_{3,2}$  и высокие удельные поверхности ( $32967 \text{ см}^2$  на 1 мл эмульсии).

Флокуляция была идентифицирована как основное явление дестабилизации в эмульсиях, стабилизированных пектиновыми микромолекулами посредством прилипания низкозарядных частиц, на что указывает и вязкость эмульсии: видно, что чем меньше вязкость, тем больше удельная поверхность и дзета-потенциал.

Показано, что эмульсии, стабилизированные НМЯ, при дополнительной обработке ультразвуком с амплитудой 70% оставались относительно стабильными в течение 14 дней хранения при рабочей температуре 10–20 °С. При этом можно констатировать, что наличие свободных карбоксильных групп в структуре пектина на поверхности белкового депозита и масляных капель приводит к более стабильным эмульсиям с наименьшими размерами частиц.

Таким образом, применение метода ультразвука позволяет стабилизировать эмульсию с получением частиц наименьшего диаметра с мономодальным распределением. Минимальное значение  $d_{4,3}$  достигается при 70%-й амплитуде ультразвукового воздействия на эмульсионные микрочастицы. Дальнейшее увеличение амплитуды ультразвука нежелательно с точки зрения энергетических затрат.

Сегодня лекарственных препаратов на основе только эфирных масел лаванды насчитывается более десятка наименований [40, 41]. Этот факт свидетельствует об

актуальности исследований в данном направлении и возможности расширения ассортимента лекарственных средств с эфирными маслами. Широкое распространение устойчивости к антибиотикам среди патогенных и условно-патогенных микроорганизмов делает актуальным изучение антимикробных свойств препаратов природного происхождения. Биоактивные соединения, в том числе и эфирные масла лекарственных растений, могут быть эффективным дополнением в комплексной терапии многих инфекционных заболеваний.

Согласно отчету Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) о лекарственной устойчивости за 2022 год<sup>1</sup>, наиболее серьезную озабоченность порождает резистентность микробных штаммов *Klebsiella pneumoniae* к цефалоспорином третьего поколения и карбапенемам, *Escherichia coli* – к цефалоспорином третьего поколения и фторхинолонам, *Staphylococcus aureus* – к метициллину, *Streptococcus pneumoniae* – к пенициллину, *Salmonella sp.* – к фторхинолонам. Среди грибковых инфекций наиболее распространенной проблемой является кандидоз, вызываемый в основном *Candida albicans* и реже *C. glabrata* и *C. parapsilosis*, причем более 20 видов *Candida* могут являться причиной инфицирования человека. Как отмечается в новом отчете ВОЗ<sup>2</sup>, в мире пока еще не разработаны крайне эффективные антибактериальные препараты, действие которых было бы достаточным в условиях растущего осознания серьезной и непосредственной угрозы антибиотикорезистентности. По данным ВОЗ, ни один из 43 антибиотиков, находящихся в настоящее время на стадии клинической разработки, не решает в достаточной степени проблему устойчивости самых опасных в мире бактерий к лекарственным средствам. В этом плане увеличение дозы антибиотиков нежелательно, так как оно отрицательно влияет на микрофлору кишечника и приводит к дисбактериозу. В то же время использование более безвредных антимикробных средств растительного происхождения может решить данную задачу.

Эфирное масло лаванды также является противомикробным средством, однако его использование в пищевых продуктах ограничено вследствие плохой растворимости в воде и высокой летучести. Например, китайские ученые включили эфирное масло лаванды в микропоры циклодекстрина. За счет применения носителя циклодекстрина антимикробная активность эфирного масла лаванды возросла в три раза [42].

В данной работе нами были изучены бактерицидные свойства эфирного масла лаванды и инкапсулированного эфирного масла лаванды в эмульсионных нано- и микрокапсулах (LgC/НМЯ-ЭМЛ). Систему доставки LgC/НМЯ-ЭМЛ испытывали на пяти микробных представителях: *Staphylococcus Epidermidis*, *Staphylococcus Aureus*, *Escherichia coli*, *Klebsiella* и дрожжевые грибы. Бактерицидные свойства изучали путем измерения зоны задержки роста микробов в 1 мм при внесении препарата в среду соответствующих штаммов. Наличие

<sup>1</sup> Эпиднадзор за устойчивостью к противомикробным препаратам в Европе, данные 2022 г. // Всемирная организация здравоохранения. Режим доступа: <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/376900/9789289060844-rus.pdf?sequence=1> (дата обращения: 29.11.2023).

<sup>2</sup> World Health Organization. Global database for the tripartite antimicrobial resistance country self-assessment survey. Geneva: WHO, 2024. Available at: <https://amrcountryprogress.org/> (дата обращения 03.12.2024).

роста вокруг препарата говорит об устойчивости данного микроба к препарату (табл. 3).

**Таблица 3.** Бактерицидные действия эфирного масла лаванды и эмульсионных микрокапсул лаванды системе концентрат лактоглобулина / яблочный пектин на микробные штаммы и дрожжевые грибы

**Table 3.** Bactericidal effects of lavender essential oil and emulsion microcapsules of lactoglobulins concentrate / apple pectin on microbial strains and yeast fungi

Наименование препарата	Зона задержки роста микробов, мм				
	<i>Staphylococcus Epidermidis</i>	<i>Staphylococcus Aureus</i>	<i>Escherichia coli</i>	<i>Klebsiella</i>	Дрожжевые грибы
ЭМЛ-Н <sub>2</sub> O	6	0	2	7	5
LgC/НМЯ-ЭМЛ (1:50)	11	7	10	13	16

Как видно из представленных в табл. 3 данных, эфирное масло лаванды узколистной в чистом виде слабо или вообще не оказывает бактерицидных свойств на представителей *Staph. Aureus* и слабо действует на *Klebsiella*, *Staph. Epidermidis* и штаммы дрожжевых грибов. В то же время капсулированное эфирное масло в виде нано- и микроэмульсий оказалось чувствительным ко всем видам изученных бактерий. Согласно данным табл. 3, препарат LgC/НМЯ-ЭМЛ при разбавлении (1:50) оказывает бактерицидные свойства на *Klebsiella*, *Staph. Epidermidis*. Штаммы дрожжевых грибов также оказались чувствительными к эмульсионным микрокапсулам эфирного масла лаванды.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из анализа обзора научных работ становится очевидным, что внимание исследователей нацелено на разработку коллоидных систем доставки для инкапсулирования фитохимических веществ с целью улучшения их диспергируемости в воде, химической стабильности, профилю высвобождения и биологической эффективности. Для использования в качестве фитохимических

пероральных систем доставки доступен широкий спектр различных видов систем, включая мицеллы, эмульсии, твердые липидные наночастицы, липосомы и биополимерные микрогели. Успешная доставка биоактивных фитохимических веществ пероральным путем сопряжена с рядом препятствий. Каждая из этих систем доставки имеет свои преимущества и недостатки для конкретного применения. Следовательно, производитель должен определить и оптимизировать наиболее подходящую коллоидную систему доставки фитохимических соединений для коммерческого продукта.

В данной работе нами изучено влияние амплитуды ультразвука на стабильность нано- и микрокапсул, размера частиц и их распределения в объеме эмульсии. Вычислены средний размер полученных микрокапсул, дзета-потенциал, удельная поверхность частиц и вязкость дисперсной системы. Показано, что действие ультразвука инициирует образование пектинового слоя с разной плотностью заряда на поверхности частиц эмульсии в зависимости от приложенной силы ультразвука. Найдено оптимальное значение амплитуды ультразвука, способствующее формированию частиц со средним размером и с высокой удельной поверхностью 32967 см<sup>2</sup> на 1 мл эмульсии. Полученные нано- и микрочастицы с эфирным маслом показали хорошую антимикробную и антигрибковую активности.

Состав, размер, заряд и характеристики загрузки коллоидных частиц должны быть выбраны таким образом, чтобы они были совместимы со средой матрицы конечного продукта – рН, ионной силой, взаимодействием ингредиентов, механическими нагрузками и термической стабильностью.

В рассмотренном плане разработанные нами системы доставки на основе пищевых биополимеров с выявленными характеристиками вполне могут соответствовать этим требованиям и найти применение в области создания функциональных продуктов для профилактических целей. Для внедрения этих систем в первую очередь важно установить количество и дозу биоактивных соединений, которые необходимы для желаемого эффекта, а также их безопасные и нетоксичные дозы с помощью исследований *in vitro* и *in vivo*.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Cicero A.F.G., Colletti A. Role of phytochemicals in the management of metabolic syndrome // *Phytomedicine*. 2016. Vol. 23, no. 11. P. 1134–1144. DOI: 10.1016/j.phymed.2015.11.009.
2. Banwo K., Olojede A.O., Adesulu-Dahunsi A.T., Verma D.K., Thakur M., Tripathy S., et al. Functional importance of bioactive compounds of foods with Potential Health Benefits: a review on recent trends // *Food Bioscience*. 2021. Vol. 43. P. 101320. DOI: 10.1016/j.fbio.2021.101320.
3. McClements D.J. Advances in nanoparticle and micro-particle delivery systems for increasing the dispersibility, stability, and bioactivity of phytochemicals // *Biotechnology Advances*. 2020. Vol. 38. P. 107287. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2018.08.004.
4. Araiza-Calahorra A., Akhtar M., Sarkar A. Recent advances in emulsion-based delivery approaches for curcumin: from encapsulation to bioaccessibility // *Trends in Food Science & Technology*. 2018. Vol. 71. P. 155–169. DOI: 10.1016/j.tifs.2017.11.009.
5. Lagoa R., Silva J., Rodrigues J.R., Bishayee A. Advances in phytochemical delivery systems for improved anticancer activity // *Biotechnology Advances*. 2020. Vol. 38. P. 107382. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2019.04.004.
6. Kaur V., Kumar M., Kumar A., Kaur K., Dhillon V., Kaur S. Pharmacotherapeutic potential of phytochemicals: implications in cancer chemo-prevention and future perspectives // *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2018. Vol. 97. P. 564–586. DOI: 10.1016/j.biopha.2017.10.124.
7. Barba F.J., Mariutti L.R.B., Bragagnolo N., Mercadante A.Z., Barbosa-Cánovas G.V., Orlén V. Bioaccessibility of bioactive compounds from fruits and vegetables after thermal and nonthermal processing // *Trends in Food Science & Technology*. 2017. Vol. 67. P. 195–206. DOI: 10.1016/j.tifs.2017.07.006.
8. Gleeson J.P. Diet, food components and the intes-

tinal barrier // Nutrition Bulletin. 2017. Vol. 42, no. 2. P. 123–131. DOI: 10.1111/nbu.12260.

9. Zhang R., Belwal T., Li L., Lin X., Xu Y., Luo Z. Recent advances in polysaccharides stabilized emulsions for encapsulation and delivery of bioactive food ingredients: a review // Carbohydrate Polymers. 2020. Vol. 242. P. 116388. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116388.

10. 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. Vol. 87. P. 691–702. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.09.008.

11. Nanobiotechnology. Human health and the environment / eds A. Dhawan, S. Singh, A. Kumar, R. Shanker. Boca Raton: CRC Press, 2018. 512 p. DOI: 10.1201/9781351031585.

12. Silva M.P., Fabi J.P. Food biopolymers-derived nanogels for encapsulation and delivery of biologically active compounds: a perspective review // Food Hydrocolloids for Health. 2022. Vol. 2. P. 100079. DOI: 10.1016/j.fhfh.2022.100079.

13. Wei Z., Huang Q. Assembly of protein – polysaccharide complexes for delivery of bioactive ingredients: a perspective paper // Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2019. Vol. 67, no. 5. P. 1344–1352. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b06063.

14. Anal K., Boonlao N., Ruktanonchai U.R. Emulsion systems stabilized with biopolymers to enhance oral bioaccessibility and bioavailability of lipophilic bioactive compounds // Current Opinion in Food Science. 2023. Vol. 50. P. 101001. DOI: 10.1016/j.cofs.2023.101001.

15. Semenova M. Protein – polysaccharide associative interactions in the design of tailor-made colloidal particles // Current Opinion in Colloid & Interface Science. 2017. Vol. 28. P. 15–21. DOI: 10.1016/j.cocis.2016.12.003.

16. Rezaei A., Fathi M., Jafari S.M. Nanoencapsulation of hydrophobic and low-soluble food bioactive compounds within different nanocarriers // Food Hydrocolloids. 2019. Vol. 88. P. 146–162. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.003.

17. Koksel H., Masatcioglu T., Kahraman K., Ozturk S., Basman A. Improving effect of lyophilization on functional properties of resistant starch preparations formed by acid hydrolysis and heat treatment // Journal of Cereal Science. 2008. Vol. 47, no. 2. P. 275–282. DOI: 10.1016/j.jcs.2007.04.007.

18. Мухидинов З.К., Бобокалонов Д.Т., Усманова С.Р. Пектин – основа для создания функциональной пищи. Душанбе: Изд-во ООО «СифатОфсет», 2019. 192 с.

19. Rezzoug M., Bakchiche B., Gherib A., Roberta A., Flamini Guido, Kilincarslan Ö., et al. Chemical composition and bioactivity of essential oils and ethanolic extracts of *Ocimum basilicum* L. and *Thymus algeriensis* Boiss. & Reut. from the Algerian Saharan Atlas // BMC Complementary and Alternative Medicine. 2019. Vol. 19. P. 146. DOI: 10.1186/s12906-019-2556-y.

20. Sharopov F., Setzer W.N. Medicinal plants of Tajikistan // Vegetation of Central Asia and environs / eds D. Egamberdieva, M. Öztürk. Cham: Springer, 2018. P. 163–209. DOI: 10.1007/978-3-319-99728-5\_7.

21. Yamani H.A., Pang E.C., Mantri N., Deighton M.A. Antimicrobial activity of Tulsi (*Ocimum tenuiflorum*) essential oil and their major constituents against three species of bacteria // Frontiers in Microbiology. 2016. Vol. 7. P. 681. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00681.

22. Rai M., Paralikar P., Jogee P., Agarkar G., Ingle A. P., Derita M., et al. Synergistic antimicrobial potential of essential oils in combination with nanoparticles: emerging trends and future perspectives // International Journal of Pharmaceutics. 2017. Vol. 519, no. 1-2. P. 67–78. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2017.01.013.

23. Sokmen A., Abdel-Baki A.-A.S., Al-Malki E.S., Al-Quraishy S., Abdel-Haleem H.M. Constituents of essential oil of *Origanum minutiflorum* and its in vitro antioxidant, scolicidal and anticancer activities // Journal of King Saud University – Science. 2020. Vol. 32, no. 4. P. 2377–2382. DOI: 10.1016/j.jksus.2020.03.018.

24. Yang K., Liu A., Hu A., Li J., Zen Z., Liu Y., et al. Preparation and characterization of cinnamon essential oil nanocapsules and comparison of volatile components and antibacterial ability of cinnamon essential oil before and after encapsulation // Food Control. 2021. Vol. 123. P. 107783. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107783.

25. Elsebai M.F., Albalawi M.A. Essential oils and COVID-19 // Molecules. 2022. Vol. 27, no. 22. P. 7893. DOI: 10.3390/molecules27227893.

26. Strub D.J., Talma M., Strub M., Rut W., Zmudzinski M., Brud W., et al. Evaluation of the anti-SARS-CoV-2 properties of essential oils and aromatic extracts // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 14230. DOI: 10.1038/s41598-022-18676-w.

27. Патент № 563, Республика Таджикистан. Флеш способ экстракции пектина из растительного сырья / З.К. Мухидинов, Х.И. Тешаев, А.С. Джонмуродов, Л.С. Лиу. Оpubл. 2013. Бюл. № 86.

28. Мухидинов З.К., Джонмуродов А.С., Тешаев Х.И., Бобокалонов Д.Т., Халикова М.Д., Касымова Г.Ф. [и др.]. Концентрат лактоглобулинов из молочной сыворотки и методы их выделения // Журнал здравоохранения Таджикистана. 2009. N 5. С. 44–49.

29. Shamsara O., Jafari S.M., Muhidionv Z.K. Development of double layered emulsion droplets with pectin/ $\beta$ -lactoglobulin complex for bioactive delivery purposes // Journal of Molecular Liquid. 2017. Vol. 243. P. 144–150. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.08.036.

30. Kharat M., Zhang G., McClements D.J. Stability of curcumin in oil-in-water emulsions: impact of emulsifier type and concentration on chemical degradation // Food Research International. 2018. Vol. 111. P. 178–186. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.05.021.

31. Sze A., Erickson D., Ren L., Li D. Zeta-potential measurement using the Smoluchowski equation and the slope of the current-time relationship in electroosmotic flow // Journal of Colloid and Interface Science. 2003. Vol. 261, no. 2. P. 402–410. DOI: 10.1016/S0021-9797(03)00142-5.

32. Sumalan R.M., Kuganov R., Obistioiu D., Popescu I., Radulov I., Alexa E., et al. Assessment of mint, basil and lavender essential oils vapor-phase in antifungal protection and lemon fruits quality // Molecules. 2020. Vol. 25, no. 8, P. 1831. DOI: 10.3390/molecules25081831.

33. Rashad Y.M., Abdel Razik E.S., Darwish D.B. Essential oil from *Lavandula angustifolia* elicits expression of three SbWRKY transcription factors and defense-related genes against sorghum damping-off // Scientific Reports. 2022. Vol. 12. P. 857. DOI: 10.1038/s41598-022-04903-x.

34. Wang R., Wang L.-H., Wen Q.-H., He F., Xu F.-Y., Chen B.-R., et al. Combination of pulsed electric field and pH shifting improves the solubility, emulsifying, foaming of

commercial soy protein isolate // *Food Hydrocolloids*. 2023. Vol. 134. P. 108049. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.108049.

**35.** O'Sullivan J., Murray B., Flynn C., Norton I. The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins // *Food Hydrocolloids*. 2016. Vol. 53. P. 141–154. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2015.02.009.

**36.** Shamsara O., Muhidinov Z.K., Jafari S.M., Bobokalonov J., Jonmurodov A., Taghvaei M., et al. Effect of ultrasonication, pH and heating on stability of apricot gum-lactoglobuline two-layer nanoemulsions // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2015. Vol. 81. P. 1019–1025. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2015.09.056.

**37.** Tippetts M., Shen F.K., Martini S. Oil globule microstructure of protein/polysaccharide or protein/protein bilayer emulsions at various pH // *Food Hydrocolloids*. 2013. Vol. 30, no. 2. P. 559–566. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2012.07.012.

**38.** Neckebroek B., Verkempinck S.H.E., Vaes G., Wouters K., Magnée J., Hendrickx M.E., et al. Advanced insight into the emulsifying and emulsion stabilizing capacity

of carrot pectin subdomains // *Food Hydrocolloids*. 2020. Vol. 102. P. 105594. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105594.

**39.** Devi N., Sharmah M., Khatun B., Maji T.K. Encapsulation of active ingredients in polysaccharide – protein complex coacervates // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2017. Vol. 239. P. 136–145. DOI: 10.1016/j.cis.2016.05.009.

**40.** Пономарева Е.И., Молохова Е.И., Холов А.К. Применение эфирных масел в фармации // *Современные проблемы науки и образования*. 2015. N 4. С. 567. EDN: UDXCBP.

**41.** Червоткина Д.Р., Борисова А.В. Антимикробные препараты природного происхождения: обзор свойств и перспективы применения // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2022. Т. 12. N 2. 254–267. DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-254-267. EDN: EKZZBE.

**42.** Yuan C., Wang Y., Liu Y., Cui B. Physicochemical characterization and antibacterial activity assessment of lavender essential oil encapsulated in hydroxypropyl-beta-cyclodextrin // *Industrial Crops and Products*. 2019. Vol. 130. P. 104–110. DOI: 10.1016/J.INDCROP.2018.12.067.

## REFERENCES

**1.** Cicero A.F.G., Colletti A. Role of phytochemicals in the management of metabolic syndrome. *Phytomedicine*. 2016;23(11):1134-1144. DOI: 10.1016/j.phymed.2015.11.009.

**2.** Banwo K., Olojede A.O., Adesulu-Dahunsi A.T., Verma D.K., Thakur M., Tripathy S., et al. Functional importance of bioactive compounds of foods with Potential Health Benefits: a review on recent trends. *Food Bioscience*. 2021;43:101320. DOI: 10.1016/j.fbio.2021.101320.

**3.** McClements D.J. Advances in nanoparticle and microparticle delivery systems for increasing the dispersibility, stability, and bioactivity of phytochemicals. *Biotechnology Advances*. 2020;38:107287. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2018.08.004.

**4.** Araiza-Calahorra A., Akhtar M., Sarkar A. Recent advances in emulsion-based delivery approaches for curcumin: from encapsulation to bioaccessibility. *Trends in Food Science & Technology*. 2018;71:155-169. DOI: 10.1016/j.tifs.2017.11.009.

**5.** Lagoa R., Silva J., Rodrigues J.R., Bishayee A. Advances in phytochemical delivery systems for improved anticancer activity. *Biotechnology Advances*. 2020;38:107382. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2019.04.004.

**6.** Kaur V., Kumar M., Kumar A., Kaur K., Dhillon V., Kaur S. Pharmacotherapeutic potential of phytochemicals: implications in cancer chemo-prevention and future perspectives. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2018;97:564-586. DOI: 10.1016/j.biopha.2017.10.124.

**7.** Barba F.J., Mariutti L.R.B., Bragagnolo N., Mercadante A.Z., Barbosa-Cánovas G.V., Orlie V. Bioaccessibility of bioactive compounds from fruits and vegetables after thermal and nonthermal processing. *Trends in Food Science & Technology*. 2017;67:195-206. DOI: 10.1016/j.tifs.2017.07.006.

**8.** Gleeson J.P. Diet, food components and the intestinal barrier. *Nutrition Bulletin*. 2017;42(2):123-131. DOI: 10.1111/mbu.12260.

**9.** Zhang R., Belwal T., Li L., Lin X., Xu Y., Luo Z. Recent advances in polysaccharides stabilized emulsions for encapsulation and delivery of bioactive food ingredients: a review. *Carbohydrate Polymers*. 2020;242:116388. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116388.

**10.** 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. Vol. 87. P. 691–702. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.09.008.

**11.** Dhawan A., Singh S., Kumar A., Shanker R. Nanobiotechnology. Human health and the environment. Boca Raton: CRC Press; 2018, 512 p. DOI: 10.1201/9781351031585.

**12.** Silva M.P., Fabi J.P. Food biopolymers-derived nanogels for encapsulation and delivery of biologically active compounds: a perspective review. *Food Hydrocolloids for Health*. 2022;2:100079. DOI: 10.1016/j.fhfh.2022.100079.

**13.** Wei Z., Huang Q. Assembly of protein – polysaccharide complexes for delivery of bioactive ingredients: a perspective paper. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2019;67(5):1344-1352. DOI: 10.1021/acs.jafc.8b06063.

**14.** Anal K., Boonlao N., Ruktanonchai U.R. Emulsion systems stabilized with biopolymers to enhance oral bioaccessibility and bioavailability of lipophilic bioactive compounds. *Current Opinion in Food Science*. 2023;50:101001. DOI: 10.1016/j.cofs.2023.101001.

**15.** Semenova M. Protein – polysaccharide associative interactions in the design of tailor-made colloidal particles. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*. 2017;28:15–21. DOI: 10.1016/j.cocis.2016.12.003.

**16.** Rezaei A., Fathi M., Jafari S.M. Nanoencapsulation of hydrophobic and low-soluble food bioactive compounds within different nanocarriers. *Food Hydrocolloids*. 2019;88:146-162. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2018.10.003.

**17.** Koxsel H., Masatcioglu T., Kahraman K., Ozturk S., Basman A. Improving effect of lyophilization on functional properties of resistant starch preparations formed by acid hydrolysis and heat treatment. *Journal of Cereal Science*. 2008;47(2):275-282. DOI: 10.1016/j.jcs.2007.04.007.

**18.** Muhidinov Z.K., Bobokalonov J.T., Usmanova S.R. *Pectin is the basis for creating functional foods*. Dushanbe: SifatOfset; 2019, 192 p. (In Russian).

**19.** Rezzoug M., Bakchiche B., Gherib A., Roberta A., Flamini Guido, Kilincarslan Ö., et al. Chemical composition and bioactivity of essential oils and ethanolic extracts of *Ocimum basilicum* L. and *Thymus algeriensis* Boiss. & Reut.

from the Algerian Saharan Atlas. *BMC Complementary and Alternative Medicine*. 2019;19:146. DOI: 10.1186/s12906-019-2556-y.

20. Sharopov F., Setzer W.N. Medicinal plants of Tajikistan. In: Egamberdieva D., Öztürk M. (eds). *Vegetation of Central Asia and environs*. Cham: Springer; 2018, p. 163-209. DOI: 10.1007/978-3-319-99728-5\_7.

21. Yamani H.A., Pang E.C., Mantri N., Deighton M.A. Antimicrobial activity of Tulsi (*Ocimum tenuiflorum*) essential oil and their major constituents against three species of bacteria. *Frontiers in Microbiology*. 2016;7:681. DOI: 10.3389/fmicb.2016.00681.

22. Rai M., Paralikar P., Jogee P., Agarkar G., Ingle A.P., Derita M., et al. Synergistic antimicrobial potential of essential oils in combination with nanoparticles: emerging trends and future perspectives. *International Journal of Pharmaceutics*. 2017;519(1-2):67-78. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2017.01.013.

23. Sokmen A., Abdel-Baki A.-A.S., Al-Malki E.S., Al-Quraishi S., Abdel-Haleem H.M. Constituents of essential oil of *Origanum minutiflorum* and its in vitro antioxidant, scolicidal and anticancer activities. *Journal of King Saud University – Science*. 2020;32(4):2377-2382. DOI: 10.1016/j.jksus.2020.03.018.

24. Yang K., Liu A., Hu A., Li J., Zen Z., Liu Y., et al. Preparation and characterization of cinnamon essential oil nanocapsules and comparison of volatile components and antibacterial ability of cinnamon essential oil before and after encapsulation. *Food Control*. 2021;123:107783. DOI: 10.1016/j.foodcont.2020.107783.

25. Elsebai M.F., Albalawi M.A. Essential oils and COVID-19. *Molecules*. 2022;27(22):7893. DOI: 10.3390/molecules27227893.

26. Strub D.J., Talma M., Strub M., Rut W., Zmudzinski M., Brud W., et al. Evaluation of the anti-SARS-CoV-2 properties of essential oils and aromatic extracts. *Scientific Reports*. 2022;12:14230. DOI: 10.1038/s41598-022-18676-w.

27. Mukhidinov Z.K., Teshaev Kh.I., Dzhonmurodov A.S., Liu L.S. *Flash method for extracting pectin from plant materials*. Patent RT, no. 563; 2013. (In Russian).

28. Muhidinov Z.K., Jonmurodov A.S., Teshaev Kh.I., Bobokalonov D.T., Khalikova M.D., Kasymova G.F., et al. Concentrate of lactoglobulins from whey and methods for their isolation. *Zhurnal zdavookhraneniya Tadzhikistana*. 2009;5:44-49. (In Russian).

29. Shamsara O., Jafari S.M., Muhidinov Z.K. Development of double layered emulsion droplets with pectin/ $\beta$ -lactoglobulin complex for bioactive delivery purposes. *Journal of Molecular Liquid*. 2017;243:144-150. DOI: 10.1016/j.molliq.2017.08.036.

30. Kharat M., Zhang G., McClements D.J. Stability of curcumin in oil-in-water emulsions: impact of emulsifier type and concentration on chemical degradation. *Food Research International*. 2018;111:178-186. DOI: 10.1016/j.foodres.2018.05.021.

31. Sze A., Erickson D., Ren L., Li D. Zeta-potential measurement using the Smoluchowski equation and the slope of the current-time relationship in electroosmotic flow.

*Journal of Colloid and Interface Science*. 2003;261(2):402-410. DOI: 10.1016/S0021-9797(03)00142-5.

32. Sumalan R.M., Kuganov R., Obistoiu D., Popescu I., Radulov I., Alexa E., et al. Assessment of mint, basil and lavender essential oils vapor-phase in antifungal protection and lemon fruits quality. *Molecules*. 2020;25(8):1831. DOI: 10.3390/molecules25081831.

33. Rashad Y.M., Abdel Razik E.S., Darwish D.B. Essential oil from *Lavandula angustifolia* elicits expression of three SbWRKY transcription factors and defense-related genes against sorghum damping-off. *Scientific Reports*. 2022;12:857. DOI: 10.1038/s41598-022-04903-x.

34. Wang R., Wang L.-H., Wen Q.-H., He F., Xu F.-Y., Chen B.-R., et al. Combination of pulsed electric field and pH shifting improves the solubility, emulsifying, foaming of commercial soy protein isolate. *Food Hydrocolloids*. 2023;134:108049. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2022.108049.

35. O'Sullivan J., Murray B., Flynn C., Norton I. The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins. *Food Hydrocolloids*. 2016;53:141-154. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2015.02.009.

36. Shamsara O., Muhidinov Z.K., Jafari S.M., Bobokalonov J., Jonmurodov A., Taghvaei M., et al. Effect of ultrasonication, pH and heating on stability of apricot gum-lactoglobuline two-layer nanoemulsions. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2015;81:1019-1025. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2015.09.056.

37. Tippetts M., Shen F.K., Martini S. Oil globule microstructure of protein/polysaccharide or protein/protein bilayer emulsions at various pH. *Food Hydrocolloids*. 2013;30(2):559-566. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2012.07.012.

38. Neckebroek B., Verkempinck S.H.E., Vaes G., Wouters K., Magnée J., Hendrickx M.E., et al. Advanced insight into the emulsifying and emulsion stabilizing capacity of carrot pectin subdomains. *Food Hydrocolloids*. 2020;102:105594. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105594.

39. Devi N., Sharmah M., Khatun B., Maji T.K. Encapsulation of active ingredients in polysaccharide – protein complex coacervates. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2017;239:136-145. DOI: 10.1016/j.cis.2016.05.009.

40. Ponomareva E.I., Molokhova E.I., Kholov A.K. The usage of essential oils in pharmacy. *Modern problems of science and education*. 2015;4:567. (In Russian). EDN: UDXCBP.

41. Chervotkina D.R., Borisova A.V. Antimicrobial substances of natural origin: a review of properties and prospects. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2022;12(2):254-267. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-254-267. EDN: EKZZBE.

42. Yuan C., Wang Y., Liu Y., Cui B. Physicochemical characterization and antibacterial activity assessment of lavender essential oil encapsulated in hydroxypropyl-beta-cyclodextrin. *Industrial Crops and Products*. 2019;130:104-110. DOI: 10.1016/J.INDCROP.2018.12.067.

**ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Алиева Шахнозобону Раджабековна,**  
аспирант,  
Институт химии им. В.И. Никитина  
Национальной академии наук Таджикистана,  
734065, г. Душанбе, ул. Айна, 299/2,  
Республика Таджикистан,  
химик-аналитик,  
Научно-исследовательский центр экологии  
и окружающей среды Центральной Азии,  
734025, г. Душанбе, ул. Айна, 267,  
Республика Таджикистан,  
sh\_bonu\_95@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-2778-0834>

**Кодирова Гулру Абдусаматовна,**  
научный сотрудник,  
Институт химии им. В.И. Никитина  
Национальной академии наук Таджикистана,  
734065, г. Душанбе, ул. Айна, 299/2,  
Республика Таджикистан,  
gulruqodirova525@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0009-2222-2329>

**Шерова Замира Умаралиевна,**  
научный сотрудник,  
Институт химии им. В.И. Никитина  
Национальной академии наук Таджикистана,  
734065, г. Душанбе, ул. Айна, 299/2,  
Республика Таджикистан,  
sh.zamira\_95@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0387-6297>

**Усманова Сураё Рахматжоновна,**  
к.х.н., ведущий научный сотрудник,  
Институт химии им. В.И. Никитина  
Национальной академии наук Таджикистана,  
734065, г. Душанбе, ул. Айна, 299/2,  
Республика Таджикистан,  
surayo.usmanova@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-4254-7699>

**Мухидинов Зайниддин Камарович,**  
д.х.н., профессор, главный научный сотрудник,  
Институт химии им. В.И. Никитина  
Национальной академии наук Таджикистана,  
734065, г. Душанбе, ул. Айна, 299/2,  
Республика Таджикистан,  
✉ zainy@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0023-2229>

**Вклад авторов**

Ш.Р. Алиева – проведение экспериментов,  
обработка данных.  
Г.А. Кодирова – проведение экспериментов.  
З. У. Шерова – получение и обработка данных.  
Усманова С. Р. – научное руководство,  
редактирование текста статьи.  
З. К. Мухидинов – научное руководство,  
разработка концепции исследования,  
развитие методологии, формулирование  
итоговых выводов, написание текста статьи.

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Shakhnozabonu R. Alieva,**  
Postgraduate Student,  
Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin,  
National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2, Aini St., Dushanbe, 734063,  
Republic of Tajikistan,  
Chemist,  
Research Center for Ecology  
and Environment of Central Asia,  
267, Aini St., Dushanbe, 734025,  
Republic of Tajikistan,  
sh\_bonu\_95@mail.ru  
<https://orcid.org/0009-0000-2778-0834>

**Gulru A. Qodirova,**  
Researcher,  
Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin,  
National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2, Aini St., Dushanbe, 734063,  
Republic of Tajikistan,  
gulruqodirova525@gmail.com  
<https://orcid.org/0009-0009-2222-2329>

**Zamira U. Sherova,**  
Researcher,  
Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin,  
National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2, Aini St., Dushanbe, 734063,  
Republic of Tajikistan,  
sh.zamira\_95@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0387-6297>

**Surayo R. Usmanova,**  
Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher,  
Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin,  
National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2, Aini St., Dushanbe, 734063,  
Republic of Tajikistan,  
surayo.usmanova@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0003-4254-7699>

**Zayniddin K. Muhidinov,**  
Dr. Sci. (Chemistry), Professor, Chief Researcher,  
Institute of Chemistry named after V.I. Nikitin,  
National Academy of Sciences of Tajikistan,  
299/2, Aini St., Dushanbe, 734063,  
Republic of Tajikistan,  
✉ zainy@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-0023-2229>

**Contribution of the authors**

Shakhnozabonu R. Alieva – conducting  
experiments, data processing.  
Gulru A. Qodirova – conducting experiments.  
Zamira U. Sherova – data processing.  
Surayo R. Usmanova – supervision,  
editing the text of manuscript.  
Zayniddin K. Muhidinov – scientific leadership,  
research concept and methodology development,  
supervision, writing the text of manuscript,  
final conclusions.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Информация о статье**

Поступила в редакцию 01.12.2023.  
Одобрена после рецензирования 09.09.2024.  
Принята к публикации 30.11.2024.

**Conflict interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Information about the article**

The article was submitted 01.12.2023.  
Approved after reviewing 09.09.2024.  
Accepted for publication 30.11.2024.