



РАЗДЕЛ 1. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ

Научная статья
4.3.3 – Пищевые системы (технические науки)
УДК664.34

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.001



СПОСОБ МИКРОИНКАПСУЛИРОВАНИЯ МАСЕЛ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИНЕНАСЫЩЕННЫЕ ЖИРНЫЕ КИСЛОТЫ, ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Виктория Сергеевна Ильина¹, Ольга Борисовна Соколова²,
Елена Дмитриевна Шуватова³, Пабло Аллох⁴, Роман Максимович Мельчаков⁵,
Артем Ильич Лепешкин⁶, Ирина Витальевна Александрова⁷,
Денис Александрович Бараненко⁸

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

¹ victoria.ilina@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6909-6819>

² obsokolova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7440-4572>

³ edshuvatova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7525-1937>

⁴ pabloalloh@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4954-9470>

⁵ roman.melchakov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0642-3325>

⁶ artem.lepeshkin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9118-1449>

⁷ ivaleksandrova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6598-3541>

⁸ denis.baranenko@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9284-4379>

Аннотация. С целью обогащения продуктов питания функциональными пищевыми ингредиентами для профилактики сахарного диабета 2 типа был разработан способ микроинкапсулирования масел, содержащих полиненасыщенные жирные кислоты. Объектами изучения были выбраны кунжутное, льняное и рыжиковое масла, согласно литературным данным, содержащие полиненасыщенные жирные кислоты в большом количестве. Исследовали содержание полиненасыщенных жирных кислот в образцах растительных масел методом газовой хромато-масс спектрометрии, наибольшее количество целевых жирных кислот оказалось в рыжиковом масле, которое было использовано при создании микрокапсул. Определяли параметры способа инкапсулирования масла с полиненасыщенными жирными кислотами с использованием инкапсулятора BUCHIB-390. Материалом матрицы капсул выбран 2,0 % раствор альгината натрия, раствор-отвердитель представлял собой 4,0 % раствор лактата кальция, количество биологически активного вещества составило 17 % (от общей смеси), диаметр отверстия форсунки инкапсулятора 150 мкм, частота 1600 Гц. Получен инкапсулированный пищевой ингредиент, содержащий полиненасыщенные жирные кислоты, размер капсул не превышает 350 мкм. По результатам физико-химических исследований доказано возможное использование пищевого ингредиента в составе функциональных пищевых продуктов – микрокапсулы выдерживают диапазон pH от 3 до 7 и возможность мгновенной пастеризации. Подтверждена возможность использования микрокапсул с полиненасыщенными жирными кислотами рыжикового масла в составе продуктов питания, обеспечивая их функциональность в отношении сахарного диабета 2 типа. Полученные результаты могут быть использованы для расширения ассортимента пищевой продукции функционального назначения.

© Ильина В. С., Соколова О. Б., Шуватова Е. Д., Аллох П., Мельчаков Р. М., Лепешкин А. И., Александрова И. В., Бараненко Д. А., 2023

Ключевые слова: пищевые технологии, функциональные продукты питания, инкапсулирование, биологически активные вещества, растительные масла, полиненасыщенные жирные кислоты, сахарный диабет 2 типа.

Для цитирования: Способ микроинкапсулирования масел, содержащих полиненасыщенные жирные кислоты, для использования в составе функциональных пищевых продуктов / В.С. Ильина [и др.] // Ползуновский вестник. 2023. № 2. С. 7–14. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.001. EDN: <https://elibrary.ru/LRFKWR>.

Original article

METHOD FOR MICROENCAPSULATION OF OILS CONTAINING POLYUNSATURATED FATTY ACIDS FOR USE IN FUNCTIONAL FOOD PRODUCTS

Victoria S. Ilina¹, Olga B. Sokolova², Elena D. Shuvatova³, Pablo Alloh⁴,
Roman M. Melchakov⁵, Artem I. Lepeshkin⁶, Irina V. Aleksandrova⁷,
Denis A. Baranenko⁸

1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ITMO University, Saint-Petersburg, Russia

¹ victoria.ilina@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6909-6819>

² obsokolova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7440-4572>

³ edshuvatova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7525-1937>

⁴ pabloalloh@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4954-9470>

⁵ roman.melchakov@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0642-3325>

⁶ artem.lepeshkin@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9118-1449>

⁷ ivaleksandrova@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6598-3541>

⁸ denis.baranenko@itmo.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9284-4379>

Abstract. To enrich food products with functional food ingredients for the prevention of type 2 diabetes mellitus, a method for microencapsulating oils containing polyunsaturated fatty acids was developed. The objects of study were sesame, linseed and camelina oils which according to the literature data contain large amounts of polyunsaturated fatty acids. The content of polyunsaturated fatty acids in plant oil samples was studied by gas chromatography-mass spectrometry, where the largest amount of target fatty acids was found in camelina oil which was used to create microcapsules. The parameters of the method for encapsulating oil with polyunsaturated fatty acids were determined using the BUCHI B-390 encapsulator - the 2.0% sodium alginate solution as material of the capsule matrix, the 4.0% calcium lactate as hardener solution, the amount of biologically active substance was 17% (from total mixture), encapsulator nozzle hole diameter 150 μm , frequency 1600 Hz. An encapsulated food ingredient containing polyunsaturated fatty acids has been obtained, the size of the capsules does not exceed 350 microns. According to the results of physical and chemical studies, the possible use of a food ingredient in the composition of functional foods has been proven - microcapsules withstand a pH range from 3 to 7 and possibility of shocking pasteurization. The possibility of using microcapsules with camelina oil polyunsaturated fatty acids in food products composition has been confirmed, providing their functionality in relation to type 2 diabetes mellitus. The results obtained can be used to expand the range of functional food products.

Keywords: food technology, functional foods, encapsulation, biologically active substances, plant oils, polyunsaturated fatty acids, type 2 diabetes mellitus.

For citation: Ilina, V.S., Sokolova, O.B., Shuvatova, E.D., Alloh, P., Melchakov, R.M., Lepeshkin, A.I., Aleksandrova, I.V. & Baranenko, D.A. (2023). Method for microencapsulation of oils containing polyunsaturated fatty acids for use in functional food products. *Polzunovskiy vestnik*, (2), 7-14. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2023.02.001. EDN: <https://elibrary.ru/LRFKWR>.

СПОСОБ МИКРОИНКАПСУЛИРОВАНИЯ МАСЕЛ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИНЕНАСЫЩЕННЫЕ ЖИРНЫЕ КИСЛОТЫ, ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

ВВЕДЕНИЕ

Зародившийся еще в 30-х годах 20 века метод инкапсулирования – процесс образования частиц (капсул) размером от нескольких микрон до нескольких миллиметров, при котором целевой материал включается в другой материал [1], – является хорошо изученным и перспективным для использования в разных отраслях промышленности. Разнообразие методов получения капсул позволяет исследователям и производителям использовать в качестве инкапсулируемого вещества соединения разной природы. Структура капсул состоит из стенки, образованной капсулирующим агентом, и целевого материала, при этом целевой материал может быть как сосредоточен в центре капсулы, образуя ядро, так и равномерно распределен в капсулирующем агенте. В зависимости от выбранных материалов может меняться и форма капсул [2]. Многообразие материалов, используемых в качестве капсулируемого агента, достаточно велико [3], и обширность выбора дает возможность для создания капсул, способных высвободить капсулят при разных условиях внешней среды [4].

Со-экструзия – метод, при котором в специальном оборудовании через концентрические форсунки разных диаметров под давлением проходят растворы капсулирующего агента и целевого материала. Раствор будущей стенки капсулы экструдирован через форсунку большего диаметра, окружая проходящий через внутреннее отверстие целевой компонент, после чего ламинарный поток обоих растворов разбивается на капли, размер которых зависит от выбранной частоты. В качестве капсулирующего агента исследователи применяют вещества, отвердевающие разными способами – для сахаров, восков используют охлаждение в воздухе или жидкости, для гидроколлоидов используют сушку горячим воздухом, для альгината и желатина – химическую обработку [5, 6]. Данный метод используется для снижения влияния внешней среды на капсулируемый компонент, для контроля высвобождения компонента, для сокрытия органолептических свойств компонента, а также для упрощения при использовании в технологическом процессе. В пищевой промышленности встречаются методы инкапсулирования, используемые для пищевых добавок, а также для ингредиентов – сухофруктов, орехов – при этом образуя макропоры [7].

Обогащение продуктов питания необходимыми микронутриентами и биологически

активными веществами не всегда возможно при прямом внесении данных веществ в продукт питания. Поэтому актуальна разработка методов, предотвращающих значительные количественные и качественные изменения в составе пищевых продуктов и ингредиентов, содержащих биологически активные вещества.

В настоящее время, по данным ВОЗ, 422 миллиона человек во всем мире страдают от сахарного диабета. Широко распространенный сахарный диабет 2 типа на данный момент нельзя вылечить, однако можно улучшить общее состояние человека и избежать осложнений, связанных с данным заболеванием, при помощи соблюдения ряда правил, таких как регулярные занятия спортом, снижение веса, определенный режим питания [8, 9]. Достаточно большой объем знаний в области патофизиологии диабета и наличие широкого спектра вариантов терапевтического лечения не привели к улучшению метаболического контроля заболевания, в связи с этим идет интенсивный поиск новых инновационных средств для лечения и профилактики диабета [10].

Научные данные свидетельствуют, что полиненасыщенные жирные кислоты – линоленовая, арахидоновая, эйкозопентаеновая, а также их метаболиты, такие как липоксин A4, эффективны в отношении сахарного диабета 2 типа и могут применяться для профилактики данного заболевания. Однако данные вещества крайне чувствительны к условиям внешней среды, поэтому необходимо разрабатывать способы их защиты от воздействия неблагоприятных факторов, одним из решений может быть создание микроинкапсулированного профилактического пищевого ингредиента на основе полиненасыщенных жирных кислот в составе растительных масел [11–15]. Насыщенные жиры – пальмитиновая и стеариновая – в свою очередь, являются провоспалительными компонентами, необходимо снижать их количество в рационе питания [13].

Существующие исследования в области микроинкапсулирования масел для их защиты от окисления доказывают рациональность и эффективность использования метода со-экструзии для этих целей [16]. Исследования по инкапсулированию имбирного масла с применением альгината в качестве капсулирующего агента показало самое низкое содержание продуктов окисления на протяжении периода хранения капсул, что свидетельствует о лучшей защите масла от воздействия кислорода воздуха [17]. Известен спо-

соб производства микрокапсулированного масла семян кенафа методом со-экструзии, материал капсулирующего агента – альгинат натрия с НМР пектином, показывающий эффективность инкапсулирования свыше 75 %, однако размеры капсул при этом находятся в диапазоне 450–575 мкм [18]. Описаны разработанные методом со-экструзии альгинатные микрокапсулы с эфирным маслом кедра с загрузкой 177,2 мг на 1 г капсул, при этом размер капсул составлял 600 мкм [19]. Был разработан способ микроинкапсулирования структурированных микрогелей, содержащих липиды, используя альгинат и каррагинан в качестве капсулирующих агентов, где внешний диаметр капсул составлял 2200–3400 мкм [20].

Известно, что применение инкапсулированных компонентов в составе продуктов питания имеет ряд ограничений: полученные капсулы не должны изменять свойственные продукту органолептические характеристики. Большинство исследователей, описывающих микрокапсулирование в пищевой промышленности, не уделяет внимание размеру полученных капсул, однако этот показатель является критически важным при их использовании. Размер капсул способен оказывать влияние на структуру и консистенцию продукта, что может отразиться на выборе потребителя в пользу других продуктов.

Таким образом, актуально исследование и разработка способов микроинкапсулирования компонентов, обладающих характеристиками, позволяющими их использование в составе функциональных пищевых продуктов, в том числе потенциально направленных на профилактику сахарного диабета 2 типа.

Цель работы – разработать способ инкапсулирования масел, богатых полиненасыщенными жирными кислотами, для использования в составе функциональных пищевых продуктов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- исследовать химический состав растительных масел, богатых полиненасыщенными жирными кислотами, сравнить полученный результат с информацией, представленной в литературе;
- разработать способ микроинкапсулирования масел, содержащих полиненасыщенные жирные кислоты, для использования в составе функциональных пищевых продуктов;
- оценить физико-химические свойства полученных инкапсулированных биологически активных ингредиентов для дальнейшего использования в составе продуктов питания.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в Университете ИТМО на базе лабораторий Мегафакультета Наук о жизни, а также Международного Научного Центра «Биотехнологии третьего тысячелетия» в период 2021–2022 гг.

Изучение научной информации по тематике проекта проводилось при помощи поиска высокорейтинговых статей в базах данных ВАК, Web Of Science и Scopus.

Материалом для исследований выступали приобретенные в сети розничной торговли растительные масла: масло кунжутное нерафинированное (ООО «Бизнесойл», Россия), масло льняное нерафинированное холодного отжима (ООО «Варненский комбинат хлебопродуктов», Россия) и масло рыжиковое нерафинированное холодного отжима (ООО «ПК «Вкусы здоровья», Россия).

Содержание жирных кислот в образцах определяли хромато-масс-спектрометрическим методом с использованием газового хроматографа-масс спектрометра GCMS-TQ8040 (производства Shimadzu, Япония). Условия проведения анализа представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Режим измерения эфиров жирных кислот на газовом хромато-масс-спектрометре

Table 1 – Mode of carboxylic acids esters measurement using gas chromatography-mass spectrometer

Характеристика	Показатель
Режим сканирования	Сканирование в режиме полного ионного тока (TIC)
интервал масс	45–500
температура ионного источника	200 °C
температура интерфейса	250 °C
хроматографическая колонка	Rxi-5SiMs (30 м x 0,25 мм x 0,25 μm)
газ-носитель	Гелий
скорость газа-носителя	1,03 мл/мин
режим газового потока	Split/splitless режим (splitless 1 мин, затем split 10:1)
температура инжектора	220 °C
режим программирования температуры колонки	начальный изотермический участок 50 °C 1 мин, затем подъем температуры колонки до 250 °C (10 °C/мин), конечный изотермический участок 250 °C 10 мин
объем вводимой пробы	1 мкл
общее время хроматографирования	40 мин

СПОСОБ МИКРОИНКАПСУЛИРОВАНИЯ МАСЕЛ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИНЕНАСЫЩЕННЫЕ ЖИРНЫЕ КИСЛОТЫ, ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

Инкапсулирование методом со-экструзии осуществлялось при помощи оборудования Buchi В-390 (Швейцария), где полимером, образующим стенку капсулы, был выбран альгинат натрия – наиболее распространенный полимерный материал для образования капсул с ядром липидной природы [1, 21].

Были оценены физико-химические свойства полученных капсул: термоустойчивость – для оценки возможности использования капсул в продуктах питания, проходящих термообработку, и рН – для оценки устойчивости капсул, и высвобождения инкапсулируемых биологически активных веществ в тонком кишечнике. Для определения термоустойчивости капсулы помещали в раствор хлорида кальция, раствор был доведен до кипения при атмосферном давлении и кипел в течение 30 мин. Для определения устойчивости к рН капсулы помещались в раствор HCl, имитирующий кислую среду желудка, с рН 3,0 на 3 ч. Для имитации щелочной среды кишечника

Таблица 2 – Содержание основных жирных кислот в исследуемых растительных маслах

Table 2 – The content of main fatty acids in the studied vegetable oils

Жирная кислота	Содержание жирных кислот в маслах (%)		
	Кунжутное масло	Льняное масло	Рыжиковое масло
Пальмитиновая (C16:0)	11,8	7,2	6,0
Стеариновая (C18:0)	4,4	3,2	2,0
Олеиновая (C18:1)	39,1	15,8	20,0
Линолевая (C18:2)	43,6	12,5	16,6
Линоленовая (C18:3)	–	49,7	37,2
Арахидоновая (C20:4)	–	–	0,8

Высокое содержание целевой полиненасыщенной линоленовой кислоты присутствует в льняном и рыжиковом масле. В рыжиковом масле также обнаружена биоактивная арахидоновая кислота. Таким образом, масло рыжика посевного было использовано в процессе инкапсулирования. Полученные данные по составу и содержанию жирных кислот в исследуемых маслах соответствуют данным, имеющимся в научных статьях [22–24], и соотносятся с данными ГОСТ 30623-2018 «Масла растительные и продукты со смешанным составом жировой фазы. Метод обнаружения фальсификации».

Был предложен способ по созданию микрокапсул, содержащих ПНЖК рыжикового масла, на инкапсуляторе BUCHIВ-390. При работе на инкапсуляторе материалом для

капсулы помещались в раствор NaOH с рН 9,0 на 6 ч. После оценивали целостность капсул в условиях микрофотографирования с применением светового микроскопа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе жирных кислот в образцах растительных масел использовалась их предколоночная дериватизация метиловым спиртом для получения метиловых эфиров жирных кислот. Для построения калибровочной зависимости в качестве исходного раствора использовали сертифицированный эталонный материал CRM 47885 Supelco 37 Component FAME Mix (производства Sigma-Aldrich, США), содержащий метиловые эфиры жирных кислот. Данный стандарт представляет собой раствор метиловых эфиров жирных кислот в дихлорметане. При исследовании химического состава растительных масел были получены результаты, представленные в таблице 2.

оболочек капсул был выбран альгинат натрия. Для создания капсул использовали раствор альгината натрия, липидную фракцию (рыжиковое масло с ПНЖК), раствор-отвердитель с лактатом кальция. Проведена серия опытов для обоснования параметров инкапсулирования, как оптимальные определены следующие параметры: в качестве материала стенки капсул – 2 % раствор альгината натрия; количество биологически активного вещества – 17 % (от общей смеси); форсунки диаметром 150 мкм; частота 1600 Гц; в качестве раствора-отвердителя – 4 % раствор лактата кальция. Такие параметры инкапсулирования обуславливаются консистенцией и свойствами выбранного рыжикового масла.

Полученные капсулы были рассмотрены под световым микроскопом Carl Zeiss Axio

Lab.A1 (режим: светлое поле, увеличение 40x) и электронным микроскопом Jeol JSM-6390 LA (режим: напряжение 5 kV, увеличение 55x) для выявления размера капсул. Фотографии, полученные в результате исследования, представлены на рисунке 1 и 2.

Полученные микрокапсулы имеют следующие физико-химические характеристики: размер до 350 мкм, выдерживают диапазон pH от 3 до 7, разрушаются при pH 9 – это означает, что, проходя кислую среду желудка, ПНЖК из капсул будут высвобождаться в необходимом для всасывания отделе желудочно-кишечного тракта – в тонком и толстом кишечнике.



Рисунок 1 – Микрокапсулы с ПНЖК рыжикового масла (световой микроскоп)

Figure 1 – Microcapsules with PUFA of camelina oil (light microscope)

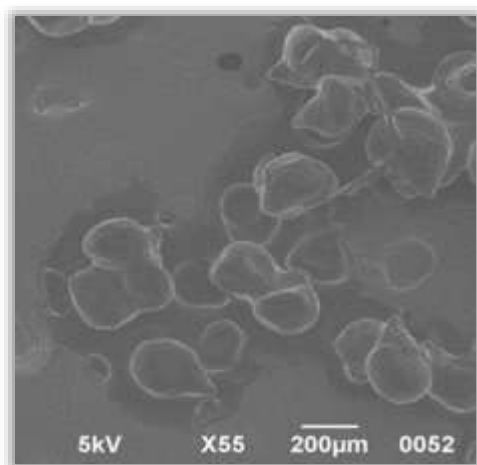


Рисунок 2 – Микрокапсулы с ПНЖК рыжикового масла после оценки термостабильности (электронный микроскоп)

Figure 2 – Microcapsules with PUFA of camelina oil after evaluation of thermal stability (electron microscope)

При исследовании микрокапсул с ПНЖК рыжикового масла результаты показали, что они термостабильны (выдерживают не менее 100 °С). Эти характеристики обеспечивают возможность термообработки продуктов питания, в которые будут внесены инкапсулированные пищевые ингредиенты. Например, возможность мгновенной пастеризации, так как внутри капсулы масла не подвержены воздействию кислорода воздуха, а нагрев не превышает 100 °С и длится не более 1 мин, то снижение качества масел в капсуле посредством окисления будет минимальным. Для значительного окисления масел требуется более высокая температура (150–180 °С) и длительное время нагрева [25].

Исследования по созданию и подбору оптимальных параметров создания капсул с растительными маслами на данном оборудовании доказывают возможное использование других материалов матрицы, таких как хитозан, где в качестве раствора-отвердителя выступает пятиосновный трифосфат натрия, применяемый в пищевой промышленности в качестве стабилизатора E451, однако существенный недостаток выбора данных материалов заключается в быстрой их деградации со временем [26].

Стоит отметить, что применение хитозана при инкапсулировании возможно для создания защитной оболочки-покрытия, предотвращающей окисление и улучшающей хранимоспособность масел, особенно при холодильном хранении [27], таким образом возможно дополнительное исследование с применением данной техники в настоящем способе производства капсул. Уменьшение вероятности окисления также возможно достичь при добавлении антиоксидантов в процессе создания инкапсулируемой эмульсии; исследования доказывают стабильность антоцианов в течение не менее 30 дней [28]. Известно использование смеси альгината и НМР пектина в качестве материала матрицы, что несмотря на высокую эффективность инкапсулирования, повышает размер капсул до 450–570 мкм [29], таким образом, значительно влияя на текстуру и консистенцию продукта при добавлении в него микрокапсул, поэтому использование альгината по предложенному способу остается предпочтительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам газовой хромато-масс спектрометрии наибольшее содержание целевых жирных кислот обнаруживается в ры-

СПОСОБ МИКРОИНКАПСУЛИРОВАНИЯ МАСЕЛ, СОДЕРЖАЩИХ ПОЛИНЕНАСЫЩЕННЫЕ ЖИРНЫЕ КИСЛОТЫ, ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СОСТАВЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

жиковом масле, которое было использовано для создания микрокапсул.

При инкапсулировании рыжикового масла были определены оптимальные параметры, а именно: 2 % раствор альгината натрия; 17 % масляной фракции (от общей смеси); диаметр форсунки 150 мкм; частота 1600 Гц; 4 % раствор лактата кальция; что обусловлено инкапсулируемым компонентом.

По результатам физико-химических анализов полученные в ходе работы микрокапсулы выдерживают нагрев до 100 °С и pH от 3 до 7, что позволит свободно вносить их в различные традиционные продукты питания.

При микроскопии полученных капсул выявлено, что размер капсул не превышает 350 мкм, таким образом внесение их в продукт питания незначительно повлияет на текстуру и консистенцию продукта.

Предложенный способ инкапсулирования может быть использован для создания пищевых ингредиентов, физиологически функциональных в отношении профилактики сахарного диабета 2 типа, и расширения ассортимента функциональных пищевых продуктов.

Необходимы дополнительные исследования для улучшения имеющейся методики инкапсулирования растительных масел с возможным применением их в составе пищевых продуктов.

Информация об авторах

В. С. Ильина – аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО.

О. Б. Соколова – к.х.н., доцент факультета биотехнологий Университета ИТМО.

Е. Д. Шуватова – студент факультета биотехнологий Университета ИТМО.

П. Аллох – аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО.

Р. М. Мельчаков – аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО.

А. И. Лепешкин – к.т.н., инженер факультета биотехнологий Университета ИТМО.

И. В. Александрова – аспирант факультета биотехнологий Университета ИТМО.

Д. А. Бараненко – к.т.н., доцент факультета биотехнологий, руководитель МНЦ «Биотехнологии третьего тысячелетия» Университета ИТМО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Bakry, A. M., Abbas, S., Ali, B., Majeed, H., Abouelwafa, M. Y., Mousa, A. & Liang, L. (2016). Microencapsulation of oils: A comprehensive review of benefits, techniques, and applications. *Comprehen-*

sive reviews in food science and food safety, 15 (1), 143-182.

2. Shahidi, F. & Han, X. Q. (1993). Encapsulation of food ingredients. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 33(6), 501-547.

3. Zuidam, N. J. & Nedovic, V. (Eds.). (2010). Encapsulation technologies for active food ingredients and food processing.

4. Ubbink, J. & Krüger, J. (2006). Physical approaches for the delivery of active ingredients in foods. *Trends in Food Science & Technology*, 17(5), 244-254.

5. Calvo, T. R. A., Perullini, M. & Santagapita, P. R. (2018). Encapsulation of betacyanins and polyphenols extracted from leaves and stems of beetroot in Ca (II)-alginate beads: A structural study. *Journal of food engineering*, 235, 32-40.

6. F. Gibbs, Selim Kermasha, Intezaz Alli, Catherine N. Mulligan, B. (1999). Encapsulation in the food industry: a review. *International journal of food sciences and nutrition*, 50(3), 213-224.

7. Desai, K. G. H. & Jin Park, H. (2005). Recent developments in microencapsulation of food ingredients. *Drying technology*, 23(7), 1361-1394.

8. Dedov, I. I. & Shestakova, M. V. (2011). Diabetes mellitus: diagnosis, treatment, prevention. Moscow: MIA, 808.

9. Dedov, I. I., Shestakova, M. V., Aleksandrov, A. A., Galstyan, G. R., Grigoryan, O. R. E., Esayan, R. M., ... & Yarek-Martynova, I. R. (2011). Algorithms of Specialized Medical Care for Diabetes Mellitus Patients. *Diabetes mellitus*, 14(3s), 2-72.

10. De Fronzo, R. A. (2009). From the triumvirate to the ominous octet: a new paradigm for the treatment of type 2 diabetes mellitus. *Diabetes*, 58(4), 773-795.

11. Das, U. N., Kumar, K. V. & Mohan, I. K. (1994). Lipid peroxides and essential fatty acids in patients with diabetes mellitus and diabetic nephropathy. *Journal of nutritional medicine*, 4(2), 149-155.

12. Das, U. N. (2013). Arachidonic acid and lipoxin A4 as possible endogenous anti-diabetic molecules. Prostaglandins, *Leukotrienes and Essential Fatty Acids*, 88(3), 201-210.

13. Das, U. N. (1995). Essential fatty acid metabolism in patients with essential hypertension, diabetes mellitus and coronary heart disease. *Prostaglandins, leukotrienes and essential fatty acids*, 52(6), 387-391.

14. Das, U. N. (2002). Long-chain polyunsaturated fatty acids and diabetes mellitus. *The American journal of clinical nutrition*, 75(4), 780-781.

15. Bathina, S. & Das, U. N. (2019). PUFAs, BDNF and lipoxin A4 inhibit chemical-induced cytotoxicity of RIN5F cells in vitro and streptozotocin-induced type 2 diabetes mellitus in vivo. *Lipids in health and disease*, 18(1), 1-25.

16. Menin, A., Zanoni, F., Vakarelova, M., Chignola, R., Donà, G., Rizzi, C., ... & Zoccatelli, G. (2018). Effects of microencapsulation by ionic gelation on the oxidative stability of flaxseed oil. *Food Chemistry*, 269, 293-299.

17. Atencio, S., Maestro, A., Santamaria, E., Gutiérrez, J. M. & Gonzalez, C. (2020). Encapsulation

of ginger oil in alginate-based shell materials. *Food Bioscience*, 37, 100714.

18. Chew, S. C. & Nyam, K. L. (2016). Microencapsulation of kenaf seed oil by co-extrusion technology. *Journal of food engineering*, 175, 43-50.

19. Ferrandiz, M., López, A., Franco, E., Garcia-Garcia, D., Fenollar, D. & Balart, R. (2017). Development and characterization of bioactive alginate microcapsules with cedarwood essential oil. *Flavour and Fragrance Journal*, 32(3), 184-190.

20. Ma, D., Tu, Z. C., Wang, H., Zhang, Z. & McClements, D. J. (2018). Microgel-in-microgel biopolymer delivery systems: Controlled digestion of encapsulated lipid droplets under simulated gastrointestinal conditions. *Journal of agricultural and food chemistry*, 66(15), 3930-3938.

21. Shahidi, F. & Han, X. Q. (1993). Encapsulation of food ingredients. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 33(6), 501-547.

22. Gamayurova, V. S. & Rzhechitskaya, L. E. (2011). Myths and reality in the food industry. II. Comparison of nutritional and biological value of vegetable oils. *Bulletin of the Kazan Technological University*, (18), 146-155.

23. Baydar, H. A. S. A. N., Marquard, R. & Turgut, I. (1999). Pure line selection for improved yield, oil content and different fatty acid composition of sesame, *Sesamum indicum*. *Plant Breeding*, 118(5), 462-464.

24. Ibrahim, F. M. & El Habbasha, S. F. (2015). Chemical composition, medicinal impacts and cultivation of camelina (*Camelinasativa*). *International Journal of Pharm Tech Research*, 8, 114-122.

25. Lamotkin, S. A. & Ilyina, G. N. (2017). Study of the resistance of vegetable oils to oxidation in the development of functional oil and fat products. Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical technologies, biotechnology, geoecology, (1 (193)), 10-14.

26. Lucia, C., Marcela, F. & Ainhoa, L. (2017). Encapsulation of Almond Essential Oil by Co-Extrusion/Gelling Using Chitosan as Wall Material.

Journal of Encapsulation and Adsorption Sciences, 7(01), 67.

27. Jutglar Núñez, A. (2019). Improvement of ginger oil stability by encapsulation in alginate-carrageenan-chitosan blended beads.

28. De Moura, S. C., Schettini, G. N., Garcia, A. O., Gallina, D. A., Alvim, I. D. & Hubinger, M. D. (2019). Stability of hibiscus extract encapsulated by ionic gelation incorporated in yogurt. *Food and Bioprocess Technology*, 12(9), 1500-1515.

29. Chew, S. C. & Nyam, K. L. (2016). Microencapsulation of kenaf seed oil by co-extrusion technology. *Journal of food engineering*, 175, 43-50.

Information about the authors

V.S. Ilyina – graduate student, faculty of biotechnologies (Bio Tech), ITMO University.

O.B. Sokolova – PhD in chemical sciences, associate professor, faculty of biotechnologies (Bio Tech), ITMO University.

E.D. Shuvatova – student, faculty of biotechnologies (Bio Tech), ITMO University.

P. Allokh – graduate student, faculty of biotechnologies (Bio Tech), ITMO University.

R.M. Melchakov – graduate student, faculty of biotechnologies (Bio Tech), ITMO University.

A.I. Lepeshkin – PhD in engineering, engineer, faculty of biotechnologies (Bio Tech), ITMO University.

I.V. Aleksandrova – graduate student, faculty of biotechnologies (Bio Tech), ITMO University.

D.A. Baranenko – PhD in engineering, associate professor, head of IRC "Biotechnologies of The Third Millennium", faculty of biotechnologies (Bio Tech), ITMO University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 18.10.2022; одобрена после рецензирования 13.05.2023; принята к публикации 11.06.2023.

The article was received by the editorial board on 18 Oct 2022; approved after editing on 13 May 2023; accepted for publication on 11 June 2023.