

Р.И. Фаткуллин¹, ✉
И.В. Калинина¹,
Н.В. Наumenko¹,
Н.В. Попова¹,
Е.Е. Наumenko¹,
Е. Иваницова²,
Е.К. Васильева³

¹Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

²Словацкий сельскохозяйственный университет, Нитра, Словакия

³Российский университет транспорта, Москва, Россия

✉ fatkullinri@susu.ru

Поступила в редакцию:
07.04.2023

Одобрена после рецензирования:
04.05.2023

Принята к публикации:
18.05.2023

Rinat I. Fatkullin¹, ✉
Irina V. Kalinina¹,
Natalya V. Naumenko¹,
Natalia V. Popova¹,
Ekaterina E. Naumenko¹,
Eva Ivanišová²,
Elizaveta K. Vasileva³

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

²Slovak University of Agriculture, Nitra, Slovakia

³Russian University of Transport, Moscow, Russia

✉ fatkullinri@susu.ru

Received by the editorial office:
07.04.2023

Accepted in revised:
04.05.2023

Accepted for publication:
18.05.2023

Управляемая коацервация антиоксидантов как способ получения функциональных пищевых ингредиентов повышенной биодоступности

РЕЗЮМЕ

Актуальность. Полифенольное вещество куркумин является достаточно хорошо изученным и приобретающим популярность растительным антиоксидантом. На сегодняшний день известно достаточно много фармакологических свойств, которые куркумин способен демонстрировать в живых организмах. Однако барьерными факторами проявления биоактивного действия куркумина выступают его крайне выраженная гидрофобность, химическая нестабильность, способность значительно разрушаться под действием ферментов желудочно-кишечного тракта. Всё это требует поиска подходов минимизации негативного воздействия на куркумин в случае его использования как пищевого функционального ингредиента. Одним из таких подходов может стать инкапсуляция куркумина в природные биополимеры, в том числе методом комплексной коацервации. В основе исследования лежала оценка возможности применения комплексной коацервации для получения функционального ингредиента на основе куркумина с выраженными антиоксидантными свойствами.

Методы. В качестве объекта исследования был выбран куркумин, для инкапсулирующей системы использовали желатин говяжий и пектин цитрусовый. Первоначально была проведена оценка выхода белково-полисахаридных капсул при различных значениях pH. Оценена эффективность инкапсуляции куркумина в белково-полисахаридные капсулы при различном соотношении «куркумин — желатин». Изучены антиоксидантные свойства куркумина в исходном виде и инкапсулированном, а также проведена оценка сохранения этих свойств после процесса переваривания.

Результаты. Итоги исследования показали, что процесс образования белково-полисахаридных капсул достаточно эффективно управляется изменением pH системы. Так, при скачке pH от 7 до 3 было достигнуто наиболее высокое значение выхода белково-полисахаридных капсул (более 70 %). Эффективность же загрузки куркумина в желатин-пектиновые капсулы была максимальной при использовании соотношения «куркумин — желатин», равного 1:1. Однако даже максимальное значение эффективности инкапсуляции не превышало 50 %. Вместе с тем, использование технологии инкапсуляции позволило обеспечить сохранение антиоксидантных свойств куркумина. Потеря антиоксидантной активности неинкапсулированного куркумина после процесса переваривания *in vitro* составила практически 50 % по отношению к исходной неперваренной форме. Антиоксидантная же активность куркумина, инкапсулированного в белково-полисахаридные капсулы, сохранилась на уровне, близком к исходной форме. Полученные результаты подтвердили возможность и целесообразность использования предложенных подходов для получения пищевых ингредиентов с антиоксидантными свойствами на основе инкапсуляции куркумина. Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта РНФ 22-76-00059.

Ключевые слова: комплексная коацервация, куркумин, эффективность инкапсуляции, антиоксидантные свойства

Для цитирования: Фаткуллин Р.И. и др. Управляемая коацервация антиоксидантов как способ получения функциональных пищевых ингредиентов повышенной биодоступности. *Аграрная наука*. 2023; 371(6): 116–120, <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-116-120>

© Фаткуллин Р.И., Калинина И.В., Наumenko Н.В., Попова Н.В., Наumenko Е.Е., Иваницова Е., Васильева Е.К.

Controlled coacervation of antioxidants as a way to produce functional food ingredients with increased bioavailability

ABSTRACT

Relevance. The polyphenolic substance curcumin is a rather well-studied and gaining popularity plant antioxidant. To date, quite a few pharmacological properties that curcumin is capable of demonstrating in living organisms are known. However, the barrier factors for the bioactive action of curcumin are its extremely pronounced hydrophobicity, chemical instability, and the ability to be significantly degraded by gastrointestinal enzymes. All of this requires the search for approaches to minimize the negative effects on curcumin when it is used as a food functional ingredient. Encapsulation of curcumin in natural biopolymers, including by complex coacervation, could be one such approach. The study was based on an assessment of the possibility of using complex coacervation to obtain a curcumin-based functional ingredient with pronounced antioxidant properties.

Methods. Curcumin was chosen as the object of study, beef gelatin and citrus pectin were used for the encapsulating system. Initially, the yield of protein-polysaccharide capsules at different pH values was evaluated. The efficiency of encapsulation of curcumin in protein-polysaccharide capsules with a different ratio of "curcumin — gelatin" was evaluated. The antioxidant properties of curcumin in its original form and encapsulated were studied, and the preservation of these properties after the process of digestion was evaluated.

Results. The results showed that the process of protein-polysaccharide capsule formation was quite effectively controlled by changes in the pH of the system. Thus, a pH jump from 7 to 3 achieved the highest value of the protein-polysaccharide capsule yield (more than 70 %). The efficiency of loading curcumin into gelatin-pectin capsules was maximal when using a "curcumin — gelatin" ratio of 1:1. However, even the maximum encapsulation efficiency did not exceed 50%. At the same time, the use of encapsulation technology made it possible to preserve the antioxidant properties of curcumin. The loss of antioxidant activity of unencapsulated curcumin after the process of *in vitro* digestion was practically 50 % compared to the initial non-encapsulated form. The antioxidant activity of curcumin encapsulated in protein-polysaccharide capsules remained at the level close to the initial form. The results obtained confirmed the possibility and feasibility of using the proposed approaches to obtain food ingredients with antioxidant properties based on curcumin encapsulation. The research was supported by a grant from the Russian Science Foundation 22-76-00059.

Key words: complex coacervation, curcumin, encapsulation efficiency, antioxidant properties

For citation: Fatkullin R.I. *et al.* Controlled coacervation of antioxidants as a way to produce functional food ingredients with increased bioavailability. *Agrarian science*. 2023; 371(6): 116–120 (In Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2023-371-6-116-120>

© Fatkullin R.I., Kalinina I.V., Naumenko N.V., Popova N.V., Naumenko E.E., Ivanišová E., Vasileva E.

Введение / Introduction

Стратегией развития пищевой и перерабатывающей промышленности на период до 2030 года в числе ключевых целей обозначена необходимость увеличения производства обогащенной и специализированной пищевой продукции, которая бы позволила снижать уровень негативного внешнего влияния на организм человека, а также минимизировать риски алиментарно-зависимых заболеваний [1–3].

В этом ключе возрастает роль научного развития направления получения функциональных пищевых ингредиентов с доказанной эффективностью, в том числе антиоксидантного действия. Одним из возможных направлений решения этой задачи является использование технологий инкапсуляции известных и хорошо изученных антиоксидантов для их защиты от внешних агрессивных факторов воздействия и получения, таким образом, эффективных функциональных ингредиентов¹ с повышенным уровнем биодоступности и биоактивности [4–6].

Куркумин — природный полифенол, содержащийся в корневищах *Curcuma longa* L. (Zingiberaceae), является одним из многообещающих природных соединений, используемых для профилактики и лечения воспалительных заболеваний. Куркумин обладает также выраженными антиоксидантными свойствами и способен модулировать активность ключевых факторов транскрипции, связанных с воспалением, таких как ядерный фактор κB (NF-κB) [7–9].

В открытой литературе представлен достаточно весомый пласт исследований, подтверждающих такие свойства куркумина, как противораковые, противовоспалительные, антибактериальные и свойства нейропротекции [7, 8]. Кроме того, куркумин признан Всемирной организацией здравоохранения (ВОЗ) и Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA) как диетическая пищевая добавка. Однако практическое применение куркумина в качестве биологически активного ингредиента в функциональных продуктах питания было ограничено, что связано с его низкой биодоступностью, чрезвычайно низкой растворимостью в воде, а также с его быстрой деградацией и плохой абсорбцией. Для минимизации этих барьерных факторов сегодня предлагаются такие подходы, как микрокапсулирование куркумина [8, 10, 11].

Среди недорогих и доступных методов микрокапсулирования можно выделить технологию коацервации, при которой инкапсулируемое вещество, находящееся в фазе суспензии, покрывается тонкой нерастворимой оболочкой биополимера.

Сложности применения технологий инкапсуляции для получения пищевых ингредиентов обусловлены необходимостью использования приемлемых для пищевой промышленности сырья и подходов. При коацервации в качестве полимеров обычно используются макромолекулы белков и углеводов (желатин, пектин и др.), что допустимо для пищевых производств.

Коацервация позволяет получить продукт в виде порошка или суспензии с размером частиц от 10 до 800 мкм в зависимости от инкапсулируемых биологически активных веществ и используемых биополимеров. Оболочка капсулы нерастворима и разрушается только в результате механического воздействия [8, 10, 11].

В основе процесса коацервации лежит электростатическое взаимодействие в коллоидной системе, в ре-

Таблица 1. Свойства куркумина²
Table 1. Properties of curcumin²

Свойство	Значение
Растворимость в воде	0,0058 г/л
logP	3,62
Молекулярная масса	368,3799
Количество акцепторов водорода	6
Количество доноров водорода	2

зультате которого происходят агрегация молекул биополимеров и формирование капсул. Триггерным фактором воздействия, определяющим силу электростатического притяжения, является pH системы.

Цели исследования — оценка влияния регулирования pH системы на выход капсул, эффективность загрузки куркумина и свойства инкапсулированного антиоксиданта.

Материалы и методы исследований / Materials and methods

В качестве биологически активного вещества был использован растительный антиоксидант куркумин (производитель Octacosanol, Jiangsu, China).

Ключевые свойства куркумина как биологически активного вещества с учетом правила Липински представлены в табл. 1

Для получения коацерватов использовали желатин говяжий пищевой П-160 (изготовитель ОАО «Можелит», Республика Беларусь), пектин цитрусовый высокоэтерифицированный (степень этерификации выше 50) (HSC 105, Китай).

Определяли значение pH, наиболее благоприятное для формирования биополимерных капсул. Для этого первоначально готовили индивидуальные растворы каждого биополимера при pH 7,0. Смешивание же растворов полимеров проводили, снижая значения pH с использованием 1 моль/л HCl в диапазоне 6,0–2,0 с шагом 0,5.

На первом этапе исследований оценивали выход коацервированных капсул в сухом виде, определяли после высушивания по формуле [2] (Kaushik *et al.*, 2016):

$$X\% = (CB_{\text{с}})/(CB_{\text{исх}}) \times 100\%, \quad (1)$$

где $CB_{\text{с}}$ и $CB_{\text{исх}}$ — масса порошка, полученного после сушки, и начальная масса пектина и желатина, используемых для коацервации, соответственно.

Эффективность инкапсуляции (ЭИ) куркумина определяли как отношение вещества, инкапсулированного к количеству вещества, оставшегося на поверхности капсул, по методике [2].

Эффективность инкапсуляции (в %) рассчитывали по формуле:

$$\text{ЭИ} (\%) = \frac{X_1 - X_2}{X_2} \times 100, \quad (2)$$

где: X_1 — общее количество куркумина (после процедуры разрушения капсул), мг; X_0 — количество неинкапсулированного куркумина, мг; X_2 — количество куркумина, добавленного при инкапсуляции, мг.

Куркумин для инкапсуляции вносили в раствор желатина в массовых соотношениях «куркумин — желатин», равных 0,1:1, 0,5:1, 1:1, 1,5:1.

¹ Шаззо Р.И. Функциональные продукты питания / Р.И. Шаззо, Г.И. Касьянов. М.: КолосС. 2010; 248.

² Showing Compound Curcumin [Electronic resource]. — URL: <https://foodb.ca/> (accessed: 02/26/2023).

Общую антиоксидантную (антирадикальную) активность (АОА) куркумина определяли методом DPPH [1], после процедуры переваривания — по методике [13]. Для сравнения в качестве контрольного образца использовали неинкапсулированный куркумин (в исходной форме).

Статистическая обработка результатов исследования проводилась с применением общепринятых методов, полученные результаты считали достоверными при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение / Results and discussion

Комплексная (или сложная) коацервация представляет собой специфический тип комплексообразования, при котором ключевую роль в формировании полимерных капсул играет электростатическое взаимодействие. Это явление взаимодействия белков и полисахаридов, которое происходит в смеси растворов противоположно заряженных биополимеров из-за сил притяжения или формирования водородных связей [8, 10, 11–15]. Таким образом, этот процесс можно контролировать, меняя природу используемых биополимеров, состав растворов и значение pH системы. При создании необходимых условий образуются нерастворимые комплексы между биополимерами, которые могут использоваться для инкапсуляции, защиты и эффективной доставки биологически активных компонентов.

Результаты определения количества (выхода, %) капсул в зависимости от значения pH, используемого для процесса коацервации, представлены на рисунке 1.

Известно, что высокоэтерифицированный пектин преимущественно состоит из остатков галактуронозой кислоты и имеет отрицательный заряд из-за присутствия ионизированных карбоксильных групп вдоль его основной цепи. Однако при снижении pH раствора карбоксильные группы пектина постепенно протонируются и заряд становится менее отрицательным [8, 10].

Желатин является амфотерным полиэлектролитом, полученным в результате частичного гидролиза коллагена, структуру желатина формируют повторяющиеся последовательности глицина с пролином и гидропролином. Молекулы желатина могут обладать различными физическими характеристиками, и желатин может нести как суммарный положительный, так и отрицательный заряд. Именно это определяет необходимость подбирать значения pH для активации электростатического взаимодействия и запуска процесса коацервации [8, 10, 11, 16].

Как правило, растворимые однофазные комплексы белков и полисахаридов образуются, когда электростатические взаимодействия довольно слабы, а общий заряд относительно высок, тогда как сложные коацерваты образуются, когда электростатические взаимодействия сильнее, а общий заряд низок [10, 11, 16].

Исследования показали, что наиболее высокий выход коацервированных капсул наблюдается при значениях pH 3 и 3,5, 71,5% и 66,1% соответственно.

На следующем этапе исследований проводили инкапсуляцию куркумина в желатин-пектиновые капсулы,

Рис. 1. Выход коацервированных капсул, %

Fig. 1. Output coacervated capsules, %

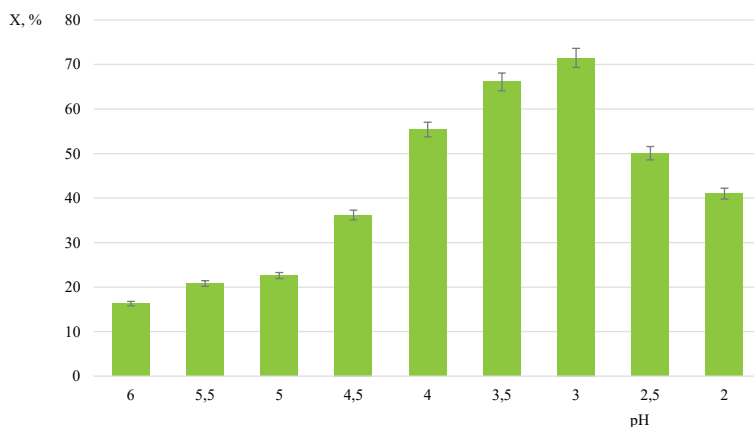
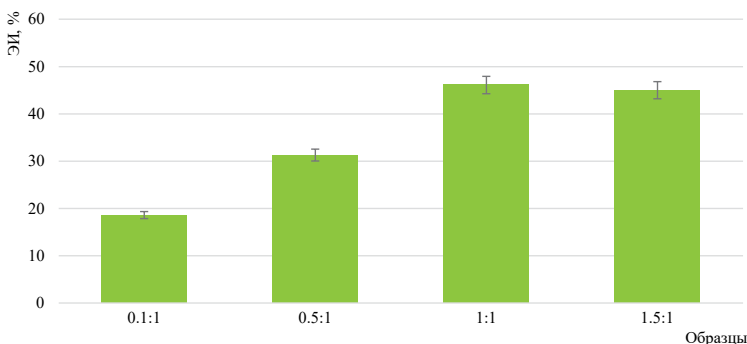


Рис. 2. Результаты определения эффективности инкапсуляции куркумина в зависимости от количества вносимого БАВ, %

Fig. 2. Results of determining the efficiency of curcumin encapsulation depending on the amount of BAS added, %



используя комплексную коацервацию. Для запуска процесса коацервации использовали формирование pH системы, равное 3.

Результаты определения эффективности инкапсуляции куркумина в зависимости от количества вносимого БАВ представлены на рис. 2.

Максимальные значения эффективности инкапсуляции куркумина в используемых условиях составили 46,1%, что было ниже ожидаемых значений и, вероятно, обусловлено низкой растворимостью куркумина в воде (табл. 1) и его способностью к агрегации частиц, что усложняет процесс инкапсуляции. Очевидно, для увеличения эффективности инкапсуляции куркумина процесс растворения биополимеров желатина проводить в органических растворителях, например спирте. Соответственно, это требует и подбора иных биополимеров.

Наиболее высокий уровень эффективности инкапсуляции был достигнут при соотношении «куркумин — желатин», равном 1:1. При использовании меньшего количества куркумина эффективность инкапсуляции значительно снижалась. Избыточное по отношению к желатину количество куркумина приводило к неустойчивому процессу коацервации, что, вероятно, связано с влиянием куркумина на изменение силы электростатического взаимодействия в системе «желатин — пектин».

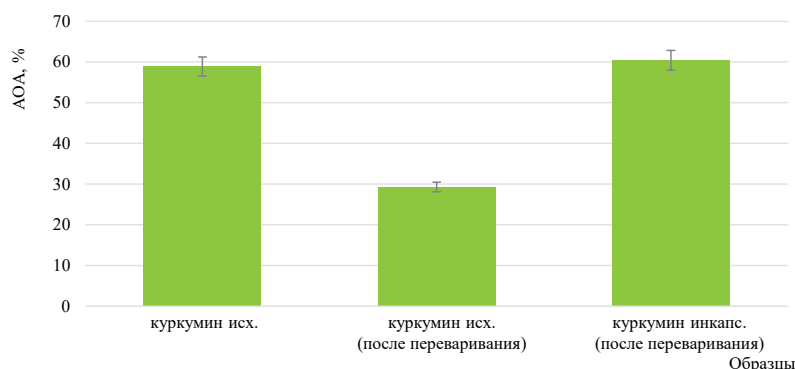
На заключительном этапе исследований была оценена целесообразность используемого подхода для обеспечения защиты и увеличения биодоступности куркумина в процессе его доставки в организм человека. Куркумин в исходной форме и инкапсулированный (использовали предварительно лиофильно высушенный

образец инкапсулированного куркумина, при получении которого соотношение «куркумин — желатин» составляло 1:1) подвергали процедуре переваривания *in vitro*. В полученных переваренных фракциях определяли значения AOA DPPH методом (результаты представлены на рис. 3).

Результаты показали, что антиоксидантная активность куркумина в дистиллированной воде составляет 58,9%, что обусловлено выраженной гидрофобностью вещества. Вместе с тем после процесса переваривания куркумин теряет свои антиоксидантные свойства практически вдвое. Это обусловлено его невысокой стойкостью к действию ферментов, сильно кислым условиям ($pH = 2-2,5$ в желудочной фазе), резкому изменению pH при переходе в фазу кишечника ($pH = 7$). Воздействие стрессовых факторов приводит к потере количества куркумина в биоактивной форме.

Известно, что антиоксидантные свойства куркумина обусловлены последовательной потерей протонов и переносом электронов [11, 16, 17]. Связывание куркумина с белком (желатином) посредством гидрофобного взаимодействия может способствовать переносу электрона, что увеличивает антиоксидантные свойства комплекса. Кроме того, в процессе пищеварения белково-полисахаридная капсула защищает значительную часть куркумина от внешних стрессовых воздействий. Всё это в комплексе обеспечило сохранение антиоксидантных свойств инкапсулированного куркумина на уровне, близком к куркумину до процесса переваривания [13, 16].

Рис. 3. Результаты исследований растворов куркумина, %
Fig. 3. Results of studies of curcumin solutions, %



Выводы / Conclusion

Таким, образом, исследования показали возможность регулирования процесса коацервации путем изменения значений pH. Так, использование pH системы, равного 3,0, позволило добиться увеличения выхода коацервированных капсул до уровня более 70%.

Результаты продемонстрировали, что используемые подходы инкапсуляции куркумина в белково-полисахаридные комплексы могут являться эффективными при разработке функциональных ингредиентов с выраженными антиоксидантными свойствами.

Вместе с тем следует отметить, что увеличить эффективность функциональных ингредиентов на основе инкапсулированного куркумина можно, регулируя растворимость биологически активного вещества либо подбирая более подходящие по свойствам для куркумина белки и полисахариды, что в целом требует дополнительных исследований.

Все авторы несут ответственность за свою работу и представленные данные.

Все авторы внесли равный вклад в эту научную работу. Авторы в равной степени участвовали в написании рукописи и несут равную ответственность за плагиат. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

All authors bear responsibility for the work and presented data.

All authors have made an equal contribution to this scientific work. The authors were equally involved in writing the manuscript and bear the equal responsibility for plagiarism. The authors declare no conflict of interest.

ФИНАНСИРОВАНИЕ:

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта РФФИ 22-76-00059

FUNDING:

The research was supported by the Russian Science Foundation (RSF) grant 22-76-00059

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сербина Н.В., Позняковский В.М., Фаткуллин Р.И., Калинина И.В., Журавлева Д.Н., Воропай И. Оценка стабильности антиоксидантных свойств обогащенных напитков при хранении. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2022; 10(1): 49–57. <https://www.elibrary.ru/clwpaq>
2. Фаткуллин Р.И., Васильев А.К., Калинина И.В., Брызгалова А.Д., Семиздралов И.А. Влияние процесса инкапсуляции на сохранение антиоксидантных свойств флавоноидов. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2021; 9(1): 38–47. <https://www.elibrary.ru/qypyon>
3. Нилова Л.П., Малиутенкова С.М., Арсирей А.Г. Нутриенты апельсиновых соков и нектаров, роль в формировании антиоксидантных свойств. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2021; 9(3): 72–80. <https://www.elibrary.ru/xfziae>
4. Шатилов А.В., Богданова О.Г., Коробов А.В. Роль антиоксидантов в организме в норме и при патологии. *Ветеринарная патология*. 2007; (2): 207–211. <https://www.elibrary.ru/oezjxj>
5. Sarkar T. et al. Minor tropical fruits as a potential source of bioactive and functional foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Published online: 14 Feb 2022. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2033953>
6. Рамазанов И.А., Панасенко С.В., Сейфуллаева М.Э., Майорова Е.А. Инновационно-цифровые перспективы развития агропродовольственного сектора и сферы обращения. *Аграрная наука*. 2022; (4): 109–117. <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-358-4-109-117>
7. Plavcová Z., Šalamúnová P., Saloň I., Štěpánek F., Hanuš J., Hošek J. Curcumin encapsulation in yeast glucan particles promotes its anti-inflammatory potential *in vitro*. *International Journal of Pharmaceutics*. 2019; 568: 118532. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.118532>

REFERENCES

1. Serbina N.V., Poznyakovskiy V.M., Fatkullin R.I., Kalinina I.V., Zhuravleva D.N., Voropai I. Assessment of stability of antioxidant properties of enriched beverages during storage. *Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2022; 10(1): 49–57 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/clwpaq>
2. Fatkullin R.I., Vasiliev A.K., Kalinina I.V., Bryzgalova A.D., Semizdralov I.A. Effect of the encapsulation process on the preservation of the antioxidant properties of flavonoids. *Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2021; 9(1): 38–47 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/qypyon>
3. Nilova L.P., Malyutenkova S.M., Arsirii A.G. Nutrients of orange juices and nectars, role in the formation of antioxidant properties. *Bulletin of South Ural State University. Series: Food and Biotechnology*. 2021; 9(3): 72–80 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/xfziae>
4. Shatilov A.V., Bogdanova O.G., Korobov A.V. The role of antioxidants in the body in normal and pathological conditions. *Veterinary pathology*. 2007; (2): 207–211 (In Russian). <https://www.elibrary.ru/oezjxj>
5. Sarkar T. et al. Minor tropical fruits as a potential source of bioactive and functional foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*. Published online: 14 Feb 2022. <https://doi.org/10.1080/10408398.2022.2033953>
6. Ramazanov I.A., Panasenkov S.V., Seyfullaeva M.E., Mayorova E.A. Innovative digital prospects of the agri-food sector and distribution chains development. *Agrarian science*. 2022; (4): 109–117 (In Russian). <https://doi.org/10.32634/0869-8155-2022-358-4-109-117>
7. Plavcová Z., Šalamúnová P., Saloň I., Štěpánek F., Hanuš J., Hošek J. Curcumin encapsulation in yeast glucan particles promotes its anti-inflammatory potential *in vitro*. *International Journal of Pharmaceutics*. 2019; 568: 118532. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2019.118532>

8. Nguyen D.H. *et al.* Microencapsulation of curcumin by ionotropic gelation with surfactants: Characterization, release profile and antioxidant activity. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2022; 76: 103812. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103812>
9. Nacz M., Shahidi F. Extraction and analysis of phenolics in food. *Journal of Chromatography A*. 2004; 1054(1–2): 95–111. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.08.059>
10. Yan J.-N., Xue S., Du Y.N., Wang Y.Q., Xu S.Q., Wu H.-T. Influence of pH and blend ratios on the complex coacervation and synergistic enhancement in composite hydrogels from scallop (*patinopecten yessoensis*) protein hydrolysates and κ -carrageenan/xanthan gum. *LWT*. 2022; 154: 112745. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112745>
11. Xue J., Luo Y. Protein-polysaccharide nanocomplexes as nanocarriers for delivery of curcumin: a comprehensive review on preparation methods and encapsulation mechanisms. *Journal of Future Foods*. 2023; 3(2): 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.12.002>
12. Курегян А.Г., Степанова Э.Ф., Печинский С.В., Оганесян Э.Т. Модель стабилизации субстанций каротиноидов. *Хранение и переработка сельскохозяйственной продукции*. 2020; (4): 55–66. <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.345>
13. Wang S. *et al.* Application of nanotechnology in improving bioavailability and bioactivity of diet-derived phytochemicals. *The Journal of Nutritional Biochemistry*. 2014; 25(4): 363–376. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2013.10.002>
14. Agati G., Azzarello E., Pollastri S., Tattini M. Flavonoids as antioxidants in plants: Location and functional significance. *Plant Science*. 2012; 196: 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.07.014>
15. Muhoza B., Qi B., Harindintwali J.D., Koko M.Y.F., Zhang S., Li Y. Combined plant protein modification and complex coacervation as a sustainable strategy to produce coacervates encapsulating bioactives. *Food Hydrocolloids*. 2022; 124(B): 107239. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107239>
16. Liang H. *et al.* Fabrication of zein/quaternized chitosan nanoparticles for the encapsulation and protection of curcumin. *RSC Advances*. 2015; 5(18): 13891–13900. <https://doi.org/10.1039/C4RA14270E>
17. Zhang H. *et al.* Structure-solubility relationships and thermodynamic aspects of solubility of some flavonoids in the solvents modeling biological media. *Journal of Molecular Liquids*. 2017; 225: 439–445. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.11.036>
8. Nguyen D.H. *et al.* Microencapsulation of curcumin by ionotropic gelation with surfactants: Characterization, release profile and antioxidant activity. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*. 2022; 76: 103812. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2022.103812>
9. Nacz M., Shahidi F. Extraction and analysis of phenolics in food. *Journal of Chromatography A*. 2004; 1054(1–2): 95–111. <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2004.08.059>
10. Yan J.-N., Xue S., Du Y.N., Wang Y.Q., Xu S.Q., Wu H.T. Influence of pH and blend ratios on the complex coacervation and synergistic enhancement in composite hydrogels from scallop (*patinopecten yessoensis*) protein hydrolysates and κ -carrageenan/xanthan gum. *LWT*. 2022; 154: 112745. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112745>
11. Xue J., Luo Y. Protein-polysaccharide nanocomplexes as nanocarriers for delivery of curcumin: a comprehensive review on preparation methods and encapsulation mechanisms. *Journal of Future Foods*. 2023; 3(2): 99–114. <https://doi.org/10.1016/j.jfutfo.2022.12.002>
12. Kuregyan A., Stepanova E., Pechinsky S., Oganeyan E. Carotenoid Substance Stabilization Model. *Storage and Processing of Farm Products*. 2020; (4): 55–66 (In Russian). <https://doi.org/10.36107/spfp.2020.345>
13. Wang S. *et al.* Application of nanotechnology in improving bioavailability and bioactivity of diet-derived phytochemicals. *The Journal of Nutritional Biochemistry*. 2014; 25(4): 363–376. <https://doi.org/10.1016/j.jnutbio.2013.10.002>
14. Agati G., Azzarello E., Pollastri S., Tattini M. Flavonoids as antioxidants in plants: Location and functional significance. *Plant Science*. 2012; 196: 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2012.07.014>
15. Muhoza B., Qi B., Harindintwali J.D., Koko M.Y.F., Zhang S., Li Y. Combined plant protein modification and complex coacervation as a sustainable strategy to produce coacervates encapsulating bioactives. *Food Hydrocolloids*. 2022; 124(B): 107239. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107239>
16. Liang H. *et al.* Fabrication of zein/quaternized chitosan nanoparticles for the encapsulation and protection of curcumin. *RSC Advances*. 2015; 5(18): 13891–13900. <https://doi.org/10.1039/C4RA14270E>
17. Zhang H. *et al.* Structure-solubility relationships and thermodynamic aspects of solubility of some flavonoids in the solvents modeling biological media. *Journal of Molecular Liquids*. 2017; 225: 439–445. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.11.036>

ОБ АВТОРАХ:

Ринат Ильгидарович Фаткуллин,

кандидат технических наук, доцент кафедры пищевых и биотехнологий,
Южно-Уральский государственный университет,
пр. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия
fatkullinri@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1498-0703>

Ирина Валерьевна Калинина,

доктор технических наук, профессор кафедры пищевых и биотехнологий, доцент,
Южно-Уральский государственный университет,
пр. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия
kalinaiv@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6246-9870>

Наталья Владимировна Науменко,

доктор технических наук, доцент кафедры пищевых и биотехнологий, доцент,
Южно-Уральский государственный университет,
пр. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия
naumenkonv@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9520-3251>

Наталья Викторовна Попова,

кандидат технических наук, доцент кафедры пищевых и биотехнологий,
Южно-Уральский государственный университет,
пр. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия
nvpopova@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7665-5984>

Екатерина Евгеньевна Науменко,

студент,
Южно-Уральский государственный университет,
пр. Ленина, 76, Челябинск, 454080, Россия
9193122375@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0213-1595>

Ева Иванисова,

PhD, доцент:
Институт пищевых наук;
Словацкий сельскохозяйственный университет,
2 Trieda Andreja Hlinku, Nitra, 94976, Словакия
eva.ivanisova@uniag.sk
<https://orcid.org/0000-0001-5193-2957>

Елизавета Константиновна Васильева,

студент,
Российский университет транспорта (МИИТ),
ул. Образцова, д. 9, стр. 9, Москва, 127994, Россия
VasilevaE.04@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-9559-8137>

ABOUT THE AUTHORS:

Rinat Ilgidarovich Fatkullin,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Food and Biotechnology,
South Ural State University,
76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia
fatkullinri@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1498-0703>

Irina Valerievna Kalinina,

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
of Food and Biotechnology, Associate Professor,
South Ural State University,
76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia
kalinaiv@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6246-9870>

Natalya Vladimirovna Naumenko,

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
of Food and Biotechnology, Associate Professor,
South Ural State University,
76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia
naumenkonv@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0002-9520-3251>

Natalia Viktorovna Popova,

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
of the Department of Food and Biotechnology,
South Ural State University,
76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia
nvpopova@susu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-7665-5984>

Ekaterina Evgenievna Naumenko,

student,
South Ural State University,
76 Lenin Ave., Chelyabinsk, 454080, Russia
9193122375@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-0213-1595>

Eva Ivanišová,

PhD, Associate Professor:
Institute of Food Sciences;
Slovak University of Agriculture,
2 Trieda Andreja Hlinku, Nitra, 94976, Slovakia
eva.ivanisova@uniag.sk
<https://orcid.org/0000-0001-5193-2957>

Elizaveta Konstantinovna Vasileva,

student,
Russian university of transport (MIIT),
9/9 Obraztsov str., Moscow, 127994, Russia
VasilevaE.04@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0000-9559-8137>