

## Использование плазмолизированных дрожжей для инкапсуляции и повышения биодоступности растительных антиоксидантов

И. В. Калинина<sup>✉</sup>, Р. И. Фаткуллин, Н. В. Науменко  
Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия  
<sup>✉</sup>E-mail: kalininaiv@susu.ru

**Аннотация.** Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* находят широкое применение во многих ферментативных процессах пищевых производств. При этом отработанная биомасса дрожжей, полученная после процессов производства, формирует значительные объемы отходов. Так, в пивоваренной промышленности остаточные пивные дрожжи представляют собой второй по величине объем отходов, что составляет примерно 3 % от объема сваренного пива. Утилизация этих отходов достаточно сложна и требует от предприятий дополнительных затрат. В этих условиях направления дополнительного использования отработанной дрожжевой массы вызывают высокий интерес. Одним из таких направлений может стать использование плазмолизации отработанных дрожжей и дальнейшее их использование для инкапсуляции биологически активных веществ. Среди биологически активных соединений важное место занимают растительные полифенолы – вещества, обладающие выраженными антиоксидантными свойствами. **Новизна исследований.** В рамках настоящего исследования рассматриваются дигидрокверцетин, рутин и куркумин в исходной и наноструктурированной формах. Для данных соединений установлен обширный перечень фармакологических свойств, таких как противовоспалительные, антиоксидантные, капилляропротекторные и другие. Вместе с тем эти соединения характеризуются низким уровнем биодоступности. **Цель** исследования – изучение возможности использования отработанных, плазмолизированных клеток пивоваренных дрожжей *Saccharomyces* для инкапсуляции растительных полифенолов (дигидрокверцетина, рутина и куркумина) и оценка влияния такого подхода на биодоступность биологически активных веществ в модели переваривания *in vitro*. **Результаты.** В результате проведенных исследований установлено, что плазмолизированные клетки дрожжей способны выступать в качестве «системы доставки» растительных антиоксидантов. Используя предлагаемые подходы, возможно добиться эффективности инкапсуляции примерно 57–64 % при условии предварительного ультразвукового наноструктурирования полифенолов. Анализ потенциальной биодоступности инкапсулированных форм растительных антиоксидантов в модели желудочного переваривания *in vitro* показал, что технология инкапсуляции в клетки дрожжей позволила обеспечить сохранность растительных антиоксидантов около 80 %. В сравнении с исходными формами биологически активных веществ, инкапсуляция позволила обеспечить увеличение биодоступности примерно на 30–40 %.

**Ключевые слова:** плазмолизированные дрожжи, инкапсуляция, растительные антиоксиданты, наноструктурирование, биодоступность.

**Для цитирования:** Калинина И. В., Фаткуллин Р. И., Науменко Н. В. Использование плазмолизированных дрожжей для инкапсуляции и повышения биодоступности растительных антиоксидантов // Аграрный вестник Урала. 2023. Т. 23, № 12. С. 65–73. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-12-65-73.

**Дата поступления статьи:** 13.10.2023, **дата рецензирования:** 28.10.2023, **дата принятия:** 07.11.2023.

## Use of plasmolysed yeast to encapsulate and enhance the bioavailability of plant antioxidants

I. V. Kalinina<sup>✉</sup>, R. I. Fatkullin, N. V. Naumenko  
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia  
<sup>✉</sup>E-mail: kalininaiv@susu.ru

**Abstract.** The yeast *Saccharomyces cerevisiae* is widely used in many fermentative processes of food production. At the same time, the spent yeast biomass obtained after production processes generates significant amounts of waste. Thus, in the brewing industry residual brewer's yeast is the second largest volume of waste, which is about 3% of the volume of brewed beer. Utilization of these wastes is rather complicated and requires additional costs from the enterprises. Under these conditions, the directions of additional utilization of spent yeast mass are of high interest. One of such directions can be the use of plasmolysis of spent yeast and its further use for encapsulation of biologically active substances. Among biologically active compounds, plant polyphenols – substances with pronounced antioxidant properties – occupy an important place. **Scientific novelty.** This study examines dihydroquercetin, rutin and curcumin in their original and nanostructured forms. For these compounds an extensive list of pharmacological properties such as anti-inflammatory, antioxidant, capillaroprotective and others has been established. At the same time, these compounds are characterized by a low level of bioavailability. **The purpose** of the study was to investigate the possibility of using spent, plasmolysed cells of brewer's yeast *Saccharomyces* to encapsulate plant polyphenols: dihydroquercetin, rutin and curcumin, and to evaluate the effect of such an approach on the bioavailability of biologically active substances in an *in vitro* digestion model. **Results.** As a result of these studies, it was found that plasmolysed yeast cells are able to act as a “delivery system” of plant antioxidants. Using the proposed approaches, it is possible to achieve an encapsulation efficiency of approximately 57–64 %, provided that the polyphenols are ultrasonically nanostructured beforehand. Analysis of the potential bioavailability of encapsulated forms of plant antioxidants in an *in vitro* gastric digestion model showed that the technology of encapsulation into yeast cells allowed to ensure the preservation of plant antioxidants about 80 %. In comparison with the initial forms of biologically active substances, encapsulation allowed to provide an increase in bioavailability by about 30–40 %.

**Keywords:** plasmolysed yeast, encapsulation, plant antioxidants, nanostructuring, bioavailability.

**For citation:** Kalinina I. V., Fatkullin R. I., Naumenko N. V. The use of plasmolyzed yeast for encapsulation and increasing the bioavailability of plant antioxidants // Agrarian Bulletin of the Urals. 2023. Vol. 23, No. 12. Pp. 65–73. DOI: 10.32417/1997-4868-2023-23-12-65-73. (In Russian.)

**Date of paper submission:** 13.10.2023, **date of review:** 28.10.2023, **date of acceptance:** 07.11.2023.

### Постановка проблемы (Introduction)

Дрожжи *Saccharomyces* – это одноклеточные эукариотические грибы, основным способом размножения которых является почкование, а иногда и деление. На сегодняшний день известно около 1500 видов дрожжей. Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* являются наиболее используемыми в пищевой промышленности микроорганизмами. Традиционно применяемые при производстве алкогольных напитков (таких как пиво, вино и сидр), хлебобулочных изделий, безалкогольных напитков (таких как квас), дрожжи в настоящее время находят дополнительное применение: используются в производстве возобновляемого топлива (биоэтанола), пищевых ингредиентов и фармацевтических препаратов [1; 2].

Необходимый в промышленных масштабах объем клеток *Saccharomyces cerevisiae* можно легко обеспечить, поскольку дрожжи являются побочным продуктом крупных ферментационных производств. В процессе брожения биомасса дрожжей увеличивается в среднем в 3–6 раз. При типичном брожении пива типа лагер образуется примерно 2,6 кг избыточных сухих дрожжей на кубический метр произведенного пива [2]. В отличие от биомассы, получаемой в фармацевтической промышленности, дрожжевые клетки ферментационных производств стабильны и не подвергаются ради-

кальной обработке, связанной с процессом восстановления первичного продукта.

Остаточные пивные дрожжи, образующиеся в процессе производства пива, несмотря на повторное их использование в технологическом процессе до 6 раз, представляют собой второй по величине объем отходов, образующихся в пивоваренной промышленности, что составляет примерно 3 % объема сваренного пива. Из-за своего состава остаточные пивные дрожжи имеют высокий уровень химической потребности в кислороде (210 000 мг/л) и биохимической потребности в кислороде (140 000 мг/л). Дополнительные направления использования отработанной массы дрожжей являются особенно перспективными еще и потому, что неправильная утилизация остаточных дрожжей наносит ущерб окружающей среде, а окончательная утилизация влечет за собой дополнительные затраты для отрасли [2].

Альтернативное использование клеток *Saccharomyces cerevisiae* может быть связано с их применением в качестве защитного материала для биологически активных веществ при получении функциональных пищевых ингредиентов методами инкапсуляции.

Штаммы *Saccharomyces cerevisiae* являются общепризнанными безопасными организмами, что

повышает их привлекательность для производства пищевых ингредиентов [3; 4]. Важным преимуществом дрожжей, особенно *Saccharomyces cerevisiae*, является то, что они представляют собой подходящую модель для проведения фундаментальных исследований. Дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* представляют собой эукариотические клетки, которые можно легко культивировать и манипулировать ими, а также они имеют полностью секвенированный геном [3; 5].

В рамках настоящего исследования предполагается использование отработанной массы дрожжей для инкапсуляции растительных антиоксидантов дигидрокверцетина, рутина и куркумина, которые являются перспективными природными соединениями, используемым для профилактики и лечения воспалительных заболеваний.

Дигидрокверцетин (таксифолин) – флаванол, добываемый из комлевой части лиственницы (*Larix gmelinii*). Экстракт *Larix gmelinii* с содержанием дигидрокверцетина более 90 % хорошо изучен и рекомендован к использованию в качестве пищевых добавок для взрослого населения (Группа EFSA по диетическим продуктам, 2017). Согласно критическим обзорам, обобщенным в работе [6], дигидрокверцетин продемонстрировал высокий уровень противораковой активности как в экспериментах *in vitro*, так и *in vivo*. Кроме того, дигидрокверцетин проявляет антиоксидантную, противовоспалительную, противомикробную, гепатопротекторную, противовослевающую активность и т. д.

Флавоноид рутин получают из растений, содержащих полифенольные гликозиды, включая гречиху, спаржу, софору и другие. Он обладает различными фармакологическими свойствами, включая противоопухолевые, антибактериальные и противовоспалительные. Рутин обладает антиоксидантным действием, благодаря своим восстановительным свойствам по отношению к различным окислителям, включая супероксидные, пероксильные и гидроксильные радикалы. Учитывая его нетоксичную природу, рутин может найти широкое применение в качестве функционального пищевого ингредиента [7–9].

Куркумин представляет собой химическое вещество, содержащееся в корневище восточно-индийского растения *Curcuma longa L.* и относящееся к семейству диарилгептаноидов (куркуминоидов). Куркумин – гидрофобный полифенол – выделяется среди многих вторичных метаболитов, вырабатываемых растением. Установлено, что куркумин обладает антиоксидантными и противовоспалительными свойствами, позволяющими предотвращать и лечить некоторые заболевания, такие как рак, болезни сердца, неврологические расстройства и воспаления [7; 10].

Несмотря на то что в литературе представлено огромное количество исследований, подтверждающих фармакологический потенциал описанных полифенолов, реальная ценность этих соединений ограничена их плохой растворимостью в воде, физической неоднородностью частиц, низкой скоростью абсорбции, и быстрым метаболизмом [11]. Однако эти проблемы можно решить, используя более эффективные системы доставки [10; 11]. В качестве такого подхода может рассматриваться технология инкапсуляции полифенолов в клетки дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*.

В литературе представлен ряд исследований по инкапсуляции полифенолов в живые клетки дрожжей, в плазмоллизированные дрожжи, в стенки дрожжевой клетки. Достижимые результаты эффективности инкапсуляции в значительной степени подвержены колебаниям от 20 до 60 %, и в первую очередь определяются методом инкапсуляции и инкапсулируемым соединением [10; 12]. При этом использование предварительной обработки полифенолов, в частности ультразвукового наноструктурирования, для повышения эффективности их инкапсуляции в исследованиях не отражено, что определяет новизну настоящей работы.

**Целью** исследования было изучение возможности использования отработанных, плазмоллизированных клеток пивоваренных дрожжей *Saccharomyces* для инкапсуляции растительных полифенолов: дигидрокверцетина, рутина и куркумина, и оценка влияния такого подхода на биодоступность биологически активных веществ в модели переваривания *in vitro*.

#### **Методология и методы исследования (Methods)**

Объектами исследования были определены дрожжи *Saccharomyces cerevisiae* (штамм W68), отработанные после трех циклов пивоварения (более 80 % мертвых клеток).

В качестве биологически активных веществ использовали коммерчески доступные препараты дигидрокверцетина, рутина и куркумина с чистотой не менее 93 %.

Биологически активные вещества инкапсулировали в наноструктурированном виде. Процесс наноструктурирования вели с использованием аппарата ультразвукового погружного типа по разработанной нами методике, описанной ранее [13]. Если вкратце, то 0,1-процентная (мас/об) смесь полифенолов с дистиллированной водой в общем объеме 100 мл обрабатывали ультразвуком в режиме 630 Вт/л в течение 10 мин. Порошок наноструктурированного антиоксиданта получали после лиофильной сушки.

*Плазмолиз* дрожжей проводили с использованием 10-процентного раствора NaCl в течение 24 ч при 55 °С. Затем дрожжи центрифугировали в течение 10 мин. при скорости 2000 об/мин. Осадок трехкратно промывали дистиллированной водой

для удаления NaCl. В заключение дрожжевые клетки промывали изопропанолом, подвергали замораживанию, а затем лиофилизации.

**Условия инкапсуляции.** Инкапсуляцию полифенолов в клетки дрожжей проводили с использованием метода простой диффузии посредством механического перемешивания компонентов в термостатируемом встряхивателе при массовом соотношении дрожжей и полифенола 1 : 1 при температуре 40 °С в течение 24 ч.

Номенклатура показателей и методы анализа. Морфологию и структуру образцов полифенолов в исходном и наноструктурированном виде изучали с использованием инвертированного микроскопа Альтами ИНВЕРТ 3 (×600).

Физиологическое и морфологическое состояние дрожжевых клеток определяли методом светлопольной микроскопии и путем окрашивания дрожжей метиленовым синим для установления количества мертвых клеток (×650).

Эффективность инкапсуляции (ЭИ) определяли, как количество полифенола, которое было инкапсулировано, по отношению к общему количеству полифенола, добавленного в систему. Значение показателя определяли по формуле:

$$\text{ЭИ (\%)} = [(X1 - X0) / X2] \times 100, \quad (1)$$

где X1 – общее содержание полифенола после разрушения, мг;

X0 – содержание неинкапсулированного полифенола, мг;

X2 – количество полифенола, добавленное при инкапсуляции, мг.

Потенциальную биодоступность полифенолов в исходной форме и инкапсулированных определяли на основе расчета индекса биодоступности (ИБД) по методике [2]. Для проведения эксперимента использовали методику моделирования желудочного переваривания *in vitro*. Для создания желудочной фазы использовали желчные соли и фермент пепсин, pH доводили до 2,5 с помощью соляной кислоты. Через

120 минут выдерживания в темноте при температуре 37 °С в полученной переваренной фракции определяли количество соответствующего полифенола.

Индекс биодоступности (ИБД, %) рассчитывали, используя формулу:

$$\text{ИБД} = (X_{\text{кон}}/X_{\text{исх}}) \times 100, \quad (2)$$

где X<sub>кон</sub> – содержание биологически активного вещества после процесса переваривания *in vitro*;

X<sub>исх</sub> – содержание биологически активного вещества до процесса переваривания *in vitro*.

Экстракцию и количественное определение полифенолов проводили следующим образом. Полифенолы экстрагировали 1 мл метанола из 0,01 г дрожжевого микронесителя (в пересчете на влажную основу). Затем образцы встряхивали, обрабатывали в ультразвуковой ванне в течение 10 мин. и центрифугировали при 16 × 100 g в течение 10 мин. Количество полифенола определяли, используя метод Фолина – Чакольеу, спектрофотометрически.

### Результаты (Results)

Наиболее распространенной формой клеток дрожжей вида *Saccharomyces cerevisiae* является овальная, округлая, яйцевидная или слегка удлинённая форма. Особенности морфологии клеток подвержены значительным изменениям в зависимости от степени зрелости культуры. В наших исследованиях использовалась неоднократно отработанная в пивоваренном производстве дрожжевая культура, в которой, как правило, содержится большое количество мертвых клеток [1; 3]. Такие дрожжи уже непригодны для дальнейшего использования в биотехнологических процессах производства и требуют утилизации.

Для установления количества содержания мертвых клеток в исследуемой культуре мы использовали технологию окраски препарата дрожжей красителем метиленовым синим. Известно, что, попадая в клеточную цитоплазму живых дрожжевых клеток под действием ферментов редуктаз, этот краситель восстанавливается до бесцветных соединений. Мерт-

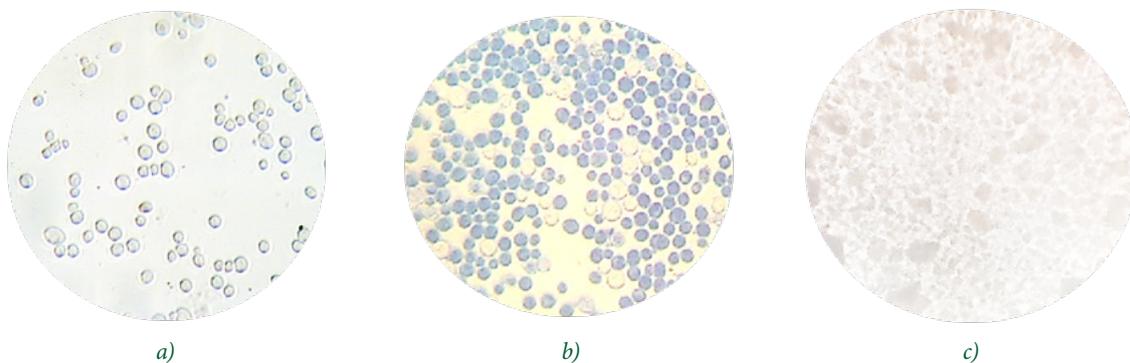


Рис. 1. Результаты оценки физиологического состояния дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*: а) неокрашенный препарат дрожжей в исходной форме; б) окрашенный препарат дрожжей в исходной форме; в) неокрашенный препарат плазмолитизированных дрожжей

Fig. 1. Results of assessing the physiological state of the yeast *Saccharomyces cerevisiae*: a) unstained preparation of yeast in the original form; b) colored preparation of yeast in the original form; c) unstained preparation of plasmolyzed yeast

вые же клетки окрашиваются в синий цвет. На рис. 1 представлена визуализация микроскопических исследований дрожжевой культуры. Первоначально был получен неокрашенный препарат дрожжей, который демонстрирует стандартное состояние дрожжевой культуры без особенностей (рис. 1, а). Клетки дрожжей имеют овальную форму, просматриваются единичные почкующиеся клетки. Окраска метиленовым синим (рис. 1, б) показала присутствие более 80 % мертвых клеток. На рис. 1, с представлена визуализация дрожжевых клеток после процедуры плазмолиза. При такой процедуре значительно меняется морфология дрожжевых клеток. Многие клетки разрушены, преобладают отдельные части клеточных структур.

В дальнейших исследованиях для инкапсуляции полифенолов использовались плазмоллизированные дрожжи.

Известно, что полифенольные соединения – это вещества, склонные к реакциям полимеризации, которые в результате образуют крупные скопления частиц неправильной формы. Такие вещества являются крайне гидрофобными, степень их растворимости в воде обычно не превышает 2 %. Кроме того, крупные размеры частиц являются ограничительным фактором для их проникновения через мембраны клеток в организме человека и, как следствие, для проявления биологически активного действия.

Для минимизации ограничительных факторов и улучшения свойств исследуемых образцов полифенолов нами применялась технология ультразвуковой обработки, так называемое наноструктурирование. Озвучивание низкоконцентрированных суспензий полифенолов в установленных режимах позволило изменить дисперсный состав частиц антиоксидантов, что визуализировано микрофотографиями, представленными на рис. 2 (на примере дигидрокверцетина).

Использование эффектов ультразвука для наноструктурирования полифенолов показало возможность многократного уменьшения размеров частиц обрабатываемых веществ, а также изменение морфологии. Крупные кристаллы неправильной формы, которыми представлены исходные виды полифенолов под действием ультразвука переходят в состояние мелкокристаллическое, близкое к аморфному.

Предложенная технология ультразвукового наноструктурирования необходима, в первую очередь, для выравнивания размера частиц полифенолов, обеспечения выравненности препарата. Таким образом решается задача увеличения растворимости биологически активных веществ за счет увеличения площади, контактирующей с растворителем [13]. Это, в свою очередь, позволяет добиться потенциально более высокой проницаемости через мембраны клеток и биодоступности полифенолов.

Кроме того, мы предположили, что ультразвуковое наноструктурирование полифенолов должно существенно облегчить процесс их инкапсуляции в плазмоллизированные дрожжи методом пассивной диффузии, поскольку после процесса плазмолиза остаются преимущественно части дрожжевых стенок.

Для проверки этой гипотезы была проведена оценка эффективности инкапсуляции исследуемых образцов в исходной и наноструктурированной форме в условиях: температура 40 °С, соотношение БАВ и дрожжи, равное 1 : 1 по массе, продолжительность 24 ч (рис. 3).

Полученные результаты показали рост значений эффективности инкапсуляции при использовании наноструктурированных форм полифенолов более чем в 2 раза в сравнении с исходной формой независимо от вида полифенола.

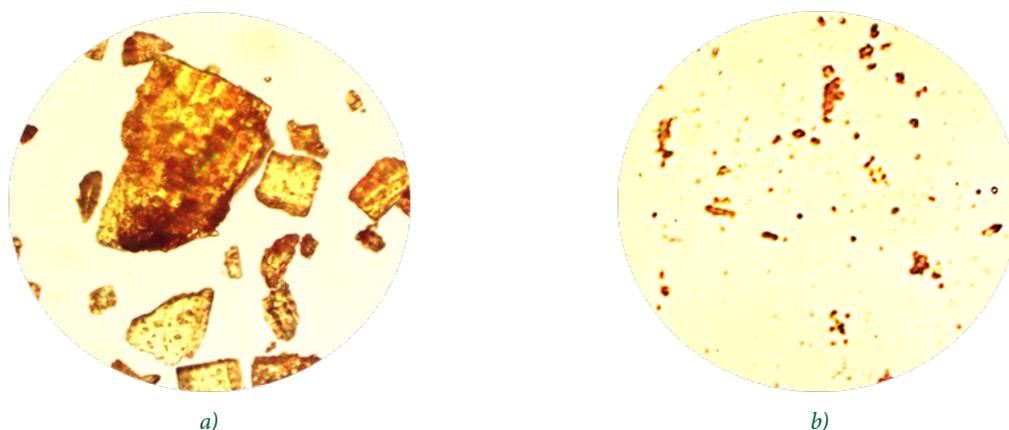


Рис. 2. Результаты инвертированной микроскопии раствора дигидрокверцетина ( $\times 600$ ):

а) дигидрокверцетин исходный; б) дигидрокверцетин УЗВ 630 Вт 10 мин.

Fig. 2. Results of inverted microscopy of a dihydroquercetin solution ( $\times 600$ ):

а) initial dihydroquercetin; б) dihydroquercetin US 630 W 10 min.

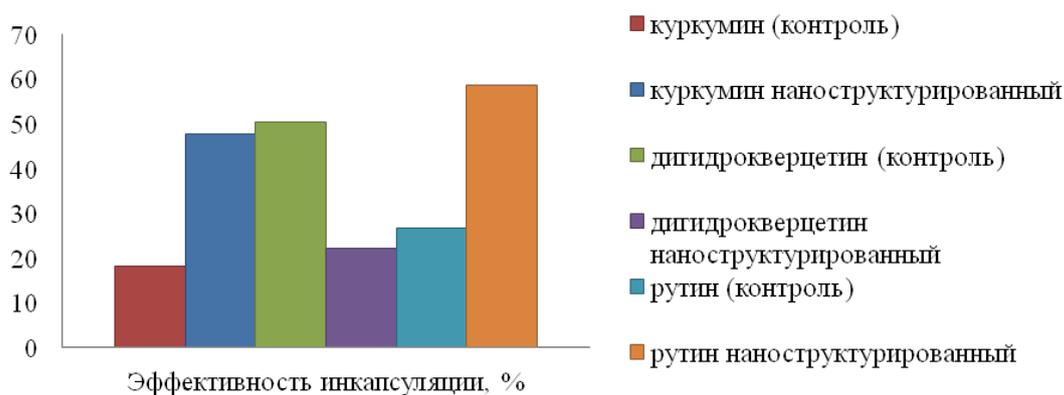


Рис. 3. Результаты определения эффективности инкапсуляции полифенолов в исходной и наноструктурированной форме в клетки дрожжей, %

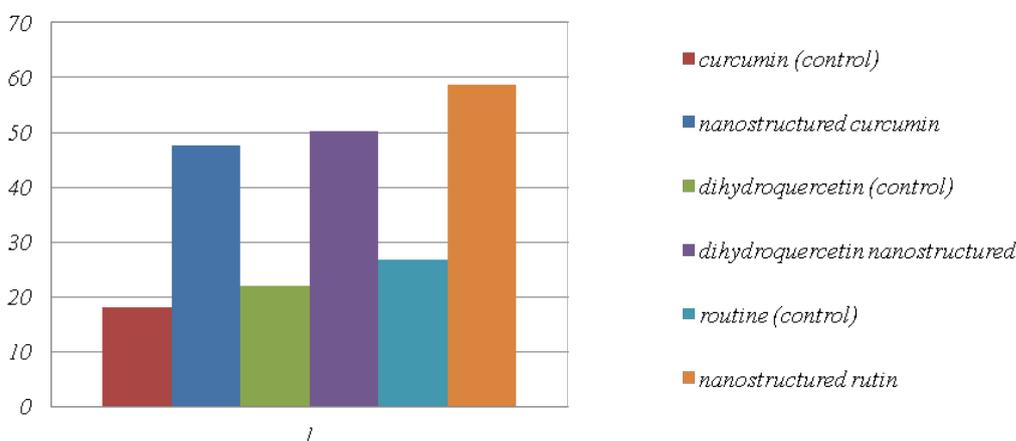


Fig. 3. Results of determining the effectiveness of encapsulation polyphenols in original and nanostructured form into yeast cells, %

Объяснением этому факту может являться изменение дисперсного состава полифенолов под действием ультразвука и, как следствие, их более высокая растворимость в воде и проницаемость через клеточные мембраны дрожжевых клеток. Основная масса клеточной стенки дрожжей представляет собой комплекс полисахаридов, белков и липидов. В качестве ключевых компонентов можно выделить хитин, бета-глюкан, маннаны. Именно эти соединения вступают во взаимодействие с полифенолами, играя роль лиганда и образуя достаточно устойчивые комплексы с инкапсулируемыми веществами.

Применительно к плазмоллизированным дрожжам основные механизмы инкапсуляции обусловлены метаболически независимыми процессами, основанными преимущественно на физико-химическом взаимодействии между инкапсулируемым веществом и функциональными группами, присутствующими на поверхности клеток дрожжей.

Ключевая цель инкапсуляции биологически активных веществ – это их защита от внешних разрушающих воздействий, в том числе в процессе желудочного переваривания. При непосредственном потреблении биологически активных веществ

человеком эти соединения претерпевают жесткие разрушающие воздействия: механические, химические, биохимические. Все это приводит к преждевременной деградации биологически активных веществ и ограничению проявления их полезного действия в организме человека. Инкапсуляция придает активному соединению некоторую степень стабилизации, поскольку материал защитной капсулы действует как физический барьер для механического разрушения; для кислорода, предотвращая окислительные процессы; для ферментов и кислот, что в процессе переваривания предотвращает преждевременное включение активного вещества в метаболические процессы [8; 14; 15].

Для оценки эффективности технологии инкапсуляции полифенолов в плазмоллизированные дрожжи была использована модель переваривания *in vitro*. Результаты определения индекса биодоступности для каждого из полифенолов в исходном и инкапсулированном виде представлены на рис. 4. Проведенные исследования показали, что инкапсуляция полифенолов в отработанные дрожжевые клетки после процедуры желудочного переваривания *in vitro* позволяет сохранить более 80 % биоло-

гически активных веществ. Вероятно, установленные в процессе переваривания потери инкапсулированных полифенолов, в первую очередь, связаны с разрушением биологически активных веществ, оставшихся (прилипших) на поверхности клеточной стенки дрожжей.

Количественные потери при переваривании исходных форм полифенолов составили около 40 % независимо от вида полифенола.

Защита биологически активных веществ с использованием плазмолизированных дрожжевых клеток может быть обусловлена рядом факторов, среди которых ключевую роль играет хорошая устойчивость бета-глюкана и маннопротеинов, которые составляют основу каркаса клеточной стенки дрожжей, к действию пепсина и желудочного сока. Это позволяет обеспечить ограниченное высвобождение полифенолов, инкапсулированных полифенолов в фазе желудочного переваривания.

#### Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Таким образом, проведенные исследования подтвердили возможность и перспективность технологии инкапсуляции полифенолов в обработанные и

предварительно плазмолизированные клетки дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* методом простой диффузии. Используя технологию подготовки полифенолов с помощью ультразвука, можно увеличить эффективность их инкапсуляции в клетки дрожжей более чем в два раза в сравнении с исходными формами. А дальнейшее инкапсулирование модифицированных полифенолов в плазмолизированные дрожжевые клетки продемонстрировало эффективную защиту этих соединений в отношении разрушительных воздействий процессов желудочного пищеварения, и позволило снизить потери биологически активных веществ в среднем на 30–40 % в сравнении с неинкапсулированными формами.

Вместе с тем для более глубокого понимания процессов инкапсуляции биологически активных веществ в плазмолизированные клетки дрожжей необходимы дополнительные исследования, направленные на установление молекулярных взаимодействий полифенолов с отдельными структурными элементами дрожжевой клетки.

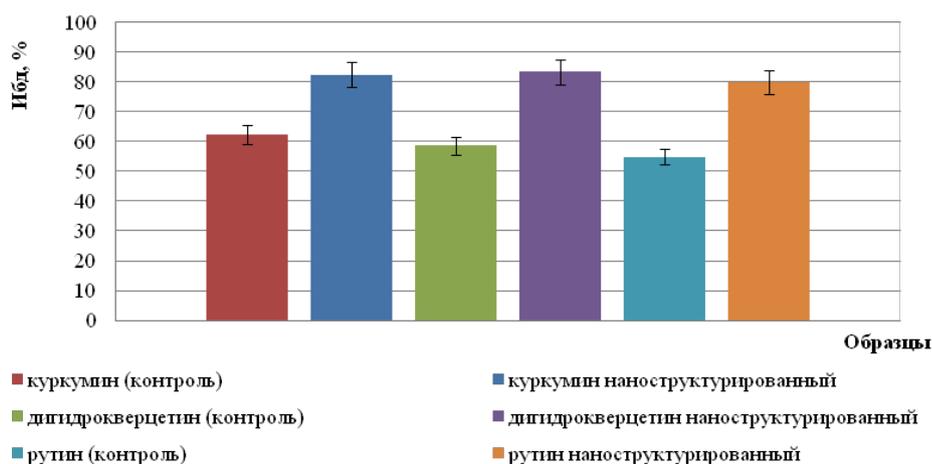


Рис. 4. Потенциальная биодоступность (индекс биодоступность  $I_{БД}$ ) полифенолов в исходной форме и инкапсулированных в клетки дрожжей

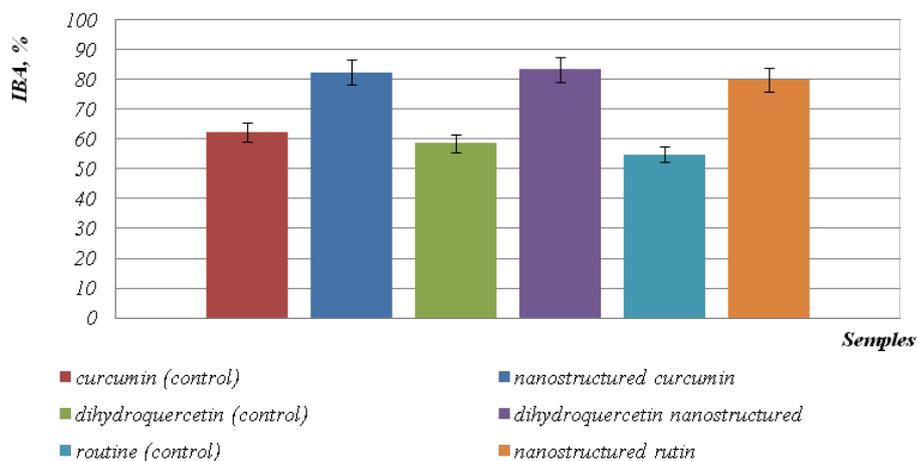


Fig. 4. Potential bioavailability (bioavailability index  $I_{BA}$ ) of polyphenols in their original form and encapsulated in yeast cells

**Благодарности (Acknowledgements)**

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда, номер проекта 22-26-00097.

**Библиографический список**

1. Gonçalves G. da C., Nakamura P. K., Furtado D. F., Veit M. T. Utilization of brewery residues to produce granular activated carbon and bio-oil // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 168. Pp. 908–916. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.089.
2. Schlabitz C., Lehn D. N., Volken de Souza C. F. A review of *Saccharomyces cerevisiae* and the applications of its byproducts in dairy cattle feed: Trends in the use of residual brewer's yeast // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 332. Article number 130059. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130059.
3. Исламмагомедова Э. А., Халилова Э. А., Абакарова А. А. Некоторые биохимические и морфологические свойства дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* в условиях стресса (обзор) // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2022. № 3 (215). С. 129–138. DOI: 10.18522/1026-2237-2022-3-129-138.
4. Павличенко А. И. Влияние пищевых производств на экологическую обстановку // *Актуальные проблемы формирования здорового образа жизни студенческой молодежи: сборник трудов XIII международной межвузовской научно-практической конференции студентов*. Смоленск, 2022. С. 262–265.
5. Coradello G., Tirelli N. Yeast cells in microencapsulation. General features and controlling factors of the encapsulation process // *Molecules*. 2021. No. 26 (11). Article number 3123. DOI: 10.3390/molecules26113123.
6. Ying Li, Hang Su, Wenjun Wang, Zhongping Yin, Jing'en Li, En Yuan, Qingfeng Zhang. Fabrication of taxifolin loaded zein-caseinate nanoparticles and its bioavailability in rat // *Food Science and Human Wellness*. 2023. Vol. 12. Iss. 6. Pp. 2306–2313. DOI: 10.1016/j.fshw.2023.03.034.
7. Нилова Л. П., Малютенкова С. М., Арсирый А. Г. Нутриенты апельсиновых соков и нектаров, роль в формировании антиоксидантных свойств // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии*. 2021. Т. 9. № 3. С. 72–80. DOI: 10.14529/food210308.
8. Comunian T. A., Silva M. P., Souza C. J. F. The use of food by-products as a novel for functional foods: Their use as ingredients and for the encapsulation process // *Trends in Food Science & Technology*. 2021. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.01.003.
9. Shi G., Rao L., Yu H. et al. Yeast-Cell-Based Microencapsulation of Chlorogenic Acid as a Water-Soluble Antioxidant // *Journal of Food Engineering*. 2007. Vol. 80. Iss. 4. Pp. 1060–1067. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.06.038.
10. Paramera E. I., Konteles S. J., Karathanos V. T. Microencapsulation of curcumin in cells of *Saccharomyces cerevisiae* // *Food Chemistry*. 2011. Vol. 125 (3). Pp. 892–902. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.09.063.
11. FoodDB [e-resource]. URL: <http://foodb.ca> (date of reference: 25.05.2023).
12. Young S., Rai R., Nitin N. Bioaccessibility of curcumin encapsulated in yeast cells and yeast cell wall particles // *Food Chemistry*. 2020. Vol. 309. Article number 125700. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125700.
13. Fatkullin R. I., Kalinina I. V., Vasiliev A. K., Naumenko E. E., Botvinnikova V. V. The Effect of Ultrasonic Microstructuring of Biologically Active Substances on the Efficiency of their Encapsulation Process // *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*. 2021. Vol. 9 (4). DOI: 10.14529/food210411.
14. Калинина И. В., Фаткуллин Р. И., Науменко Н. В., Попова Н. В., Науменко Е. Е., Степанова Д. С. Биодоступность куркумина, инкапсулированного в клетки дрожжей *saccharomyces cerevisiae* // *Индустрия питания*. 2023. Т. 8. № 3. С. 97–104. DOI: 10.29141/2500-1922-2023-8-3-10.
15. Kalinina I., Fatkullin R., Naumenko N., Ruskina A., Popova N., Naumenko E. Increasing the efficiency of taxifolin encapsulation in *Saccharomyces cerevisiae* yeast cells based on ultrasonic microstructuring // *Fermentation*. 2022. Vol. 8 (8). Article number 378. DOI: 10.3390/fermentation8080378.

**Об авторах:**

Ирина Валерьевна Калинина, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры пищевых и биотехнологий, ORCID 0000-0002-6246-9870, AuthorID 220975; +7 (351) 267-93-80, [kalininaiv@susu.ru](mailto:kalininaiv@susu.ru)  
 Ринат Ильгидарович Фаткуллин, кандидат технических наук, доцент кафедры пищевых и биотехнологий, ORCID 0000-0002-1498-0703; AuthorID 776685; +7 (351) 267-93-80, [fatkullinri@susu.ru](mailto:fatkullinri@susu.ru)  
 Наталья Владимировна Науменко, доктор технических наук, доцент, доцент кафедры пищевых и биотехнологий, ORCID 0000-0002-9520-3251, AuthorID 624622; +7 (351) 267-93-80, [naumenkonv@susu.ru](mailto:naumenkonv@susu.ru)

## References

1. Gonçalves G. da C., Nakamura P. K., Furtado D. F., Veit M. T. Utilization of brewery residues to produce granular activated carbon and bio-oil // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 168. Pp. 908–916. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.089.
2. Schlabit C., Lehn D. N., Volken de Souza C. F. A review of *Saccharomyces cerevisiae* and the applications of its byproducts in dairy cattle feed: Trends in the use of residual brewer's yeast // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 332. Article number 130059. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130059.
3. Islammagomedova E. A., Khalilova E. A., Abakarova A. A. Nekotorye biokhimicheskie i morfologicheskie svoystva drozhzhey *Saccharomyces cerevisiae* v usloviyakh stressa (obzor) [Some biochemical and morphological properties of the yeast *Saccharomyces cerevisiae* under stress conditions (review)] // *Bulletin of Higher Education Institutes. North Caucasus region. Natural sciences*. 2022. No. 3 (215). Pp. 129–138. DOI: 10.18522/1026-2237-2022-3-129-138. (In Russian.)
4. Pavlichenko A. I. Vliyanie pishchevykh proizvodstv na ekologicheskuyu obstanovku [The influence of food production on the environmental situation] // *Aktual'nye problemy formirovaniya zdorovogo obraza zhizni studencheskoy molodezhi: sbornik trudov KhIII mezhdunarodnoy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov. Smolensk, 2022*. Pp. 262–265. (In Russian.)
5. Coradello G., Tirelli N. Yeast cells in microencapsulation. General features and controlling factors of the encapsulation process // *Molecules*. 2021. No. 26 (11). Article number 3123. DOI: 10.3390/molecules26113123.
6. Ying Li, Hang Su, Wenjun Wang, Zhongping Yin, Jing'en Li, En Yuan, Qingfeng Zhang. Fabrication of taxifolin loaded zein-caseinate nanoparticles and its bioavailability in rat // *Food Science and Human Wellness*. 2023. Vol. 12. Iss. 6. Pp. 2306–2313. DOI: 10.1016/j.fshw.2023.03.034.
7. Nilova L. P., Malyutenkova S. M., Arsiy A. G. Nutrienty apel'sinovykh sokov i nektarov, rol' v formirovani antioksidantnykh svoystv [Nutrients of orange juices and nectars, their role in the formation of antioxidant properties] // *Bulletin of South Ural State University, Series "Food and Biotechnology"*. 2021. Vol. 9. No. 3. Pp. 72–80. DOI: 10.14529/food210308. (In Russian.)
8. Comunian T. A., Silva M. P., Souza C. J. F. The use of food by-products as a novel for functional foods: Their use as ingredients and for the encapsulation process // *Trends in Food Science & Technology*. 2021. DOI: 10.1016/j.tifs.2021.01.003.
9. Shi G., Rao L., Yu H. et al. Yeast-Cell-Based Microencapsulation of Chlorogenic Acid as a Water-Soluble Antioxidant // *Journal of Food Engineering*. 2007. Vol. 80. Iss. 4. Pp. 1060–1067. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.06.038.
10. Paramera E. I., Konteles S. J., Karathanos V. T. Microencapsulation of curcumin in cells of *Saccharomyces cerevisiae* // *Food Chemistry*. 2011. Vol. 125 (3). Pp. 892–902. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.09.063.
11. FooDB [e-resource]. URL: <http://foodb.ca> (date of reference: 25.05.2023).
12. Young S., Rai R., Nitin N. Bioaccessibility of curcumin encapsulated in yeast cells and yeast cell wall particles // *Food Chemistry*. 2020. Vol. 309. Article number 125700. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.125700.
13. Fatkullin R. I., Kalinina I. V., Vasiliev A. K., Naumenko E. E., Botvinnikova V. V. The Effect of Ultrasonic Microstructuring of Biologically Active Substances on the Efficiency of their Encapsulation Process // *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Food and Biotechnology*. 2021. Vol. 9 (4). DOI: 10.14529/food210411.
14. Kalinina I. V., Fatkullin R. I., Naumenko N. V., Popova N. V., Naumenko E. E., Stepanova D. S. Biodostupnost' kurkumina, inkapsulirovannogo v kletki drozhzhey *saccharomyces cerevisiae* [Bioavailability of curcumin encapsulated in cells of the yeast *saccharomyces cerevisiae*] // *Food Industry*. 2023. Vol. 8. No. 3. Pp. 97–104. DOI: 10.29141/2500-1922-2023-8-3-10. (In Russian.)
15. Kalinina I., Fatkullin R., Naumenko N., Ruskina A., Popova N., Naumenko E. Increasing the efficiency of taxifolin encapsulation in *Saccharomyces cerevisiae* yeast cells based on ultrasonic microstructuring // *Fermentation*. 2022. Vol. 8 (8). Article number 378. DOI: 10.3390/fermentation8080378.

**Authors' information:**

Irina V. Kalinina, doctor of technical sciences, associate professor, professor of the food and biotechnology department, ORCID 0000-0002-6246-9870, AuthorID 220975; +7 (351) 267-93-80, [kalininaiv@susu.ru](mailto:kalininaiv@susu.ru)  
 Rinat I. Fatkullin, candidate of technical sciences, associate professor of the food and biotechnology department, ORCID 0000-0002-1498-0703 Author ID 776685; +7 (351) 267-93-80, [fatkullinri@susu.ru](mailto:fatkullinri@susu.ru)  
 Natalya V. Naumenko, doctor of technical sciences, associate professor, associate professor of the food and biotechnology department, ORCID 0000-0002-9520-3251, AuthorID 624622; +7 (351) 267-93-80, [naumenkonv@susu.ru](mailto:naumenkonv@susu.ru)  
 South Ural State University, Chelyabinsk, Russia