

Физико-химические свойства и липидосвязывающая способность бактериальной целлюлозы, синтезированной на молочной сыворотке

Наталья А. Погорелова	¹	na.pogorelova@omgau.org		0000-0001-8495-3869
Наталья А. Сарницкая	¹	na.sarnitskaya@omgau.org		0000-0002-1614-5090
Константин К. Полянский	³	mto.vrn@mail.ru		0000-0002-8817-1466
Анна А. Дерканосова	²	aa-derk@ya.ru		0000-0002-9726-9262
Сергей А. Коновалов	¹	sa.konovarov@omgau.org		0000-0003-3537-8081

1 Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, ул. Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Россия

2 Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

3 Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, Карла Маркса, 67А. Воронеж, 394030, Россия

Аннотация. Бактериальная целлюлоза (БЦ) имеет значительный потенциал применений в пищевой промышленности, в результате ее способности стабилизировать пищевые дисперсные системы. В данной работе исследовали эффективность биосинтеза БЦ на отходах молочной промышленности, изучены параметры процесса: количество субстрата, титруемая кислотность, масса синтезируемой целлюлозы. Определены физико-химические свойства и липидосвязывающая способность полученных гель пленок и дегидратированных образцов полисахарида. Бактериальную целлюлозу получали в статических условиях, на жидкой питательной среде – молочной сыворотке. Предварительно лактозу молочной сыворотки гидролизовали ферментным препаратом LACTA FREE до количества глюкозы 1.93%. Масса продуцируемой целлюлозы в статических условиях симбиотического консорциумом *Medusomyces gisevii* составила 3.84 г/л в течение 21-х суток при T=31°C. Отмечена корреляция низких количеств глюкозы культуральной жидкости на 6-е сутки биосинтеза со снижением значений титруемой кислотности. Степень конверсии глюкозы ферментированной молочной сыворотки на массу продуцируемой бактериальной целлюлозы составила 22.6%. Максимальная скорость биосинтеза 0.181 г СВ/л×сут установлена на 15-е сутки процесса. Определена водоудерживающая способность синтезированных гель пленок бактериальной целлюлозы – 82.35 ± 0.63 г/г. Лиофилизированные образцы бактериальной целлюлозы характеризовались большей водопоглощающей способностью (22.44 г/г) в сравнении с дегидратированными при T=50°C образцами (5.42 г/г). Установлено, что регидратированные образцы лиофилизированной целлюлозы обладали в 3.43 раза большим показателем отношения количества свободной и связанной влаги в сравнении с высушиваемыми образцами БЦ. Определена насыпная плотность дезагрегированной целлюлозы: лиофилизированной - 20 кг/м³, термически высушенной - 170 кг/м³. В работе дана сравнительная характеристика липидосвязывающей способности БЦ и хитозана. Определены микробиологические показатели дезагрегированной бактериальной целлюлозы.

Ключевые слова: бактериальная целлюлоза, водоудерживающая способность, насыпная плотность, липидосвязывающая способность, пищевая добавка.

Physico-chemical properties and lipid binding capacity of bacterial cellulose synthesized on whey

Natalia A. Pogorelova	¹	na.pogorelova@omgau.org		0000-0001-8495-3869
Natalia A. Sarnitskaya	¹	na.sarnitskaya@omgau.org		0000-0002-1614-5090
Konstantin K. Polyansky	³	mto.vrn@mail.ru		0000-0002-8817-1466
Anna A. Derkanosova	²	aa-derk@ya.ru		0000-0002-9726-9262
Sergey A. Konovarov	¹	sa.konovarov@omgau.org		0000-0003-3537-8081

1 Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya Ploshchad, 1 str., Omsk, 644008, Russia

2 Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

3 Voronezh Branch of the Plekhanov Russian University of Economics

Abstract. Bacterial cellulose (BC) has significant potential for applications in the food industry due to its ability to stabilize food dispersion systems. In this work, the efficiency of BC biosynthesis on dairy industry waste was investigated, and these process parameters were studied: amount of substrate, titratable acidity, mass of synthesized cellulose. The physico-chemical properties and lipid binding capacity of the obtained gel films and dehydrated polysaccharide samples were determined. Bacterial cellulose was obtained under static conditions, in a liquid nutrient medium – whey. Lactose from whey was preliminarily hydrolyzed with the enzyme preparation LACTA FREE to a glucose content of 1.93%. The mass of cellulose produced under static conditions by the symbiotic consortium *Medusomyces gisevii* was 3.84 g/l over 21 days at T=31°C. A correlation was noted between low amounts of glucose in the culture fluid on the 6th day of biosynthesis and a decrease in titratable acidity. The degree of conversion of glucose from fermented whey to the mass of produced bacterial cellulose was 22.6%. The maximum biosynthesis rate of 0.181 gL⁻¹×day⁻¹ (dry weight) was established on the 15th day of the process. The water retention capacity of the synthesized bacterial cellulose gel films was determined to be 82.35 ± 0.63 g/g. Lyophilized samples of bacterial cellulose were characterized by a higher water absorption capacity (22.44 g/g) compared to samples dehydrated at T=50°C (5.42 g/g). It was found that rehydrated samples of lyophilized cellulose had a 3.43 times higher ratio of free and bound moisture compared to dried BC samples. The bulk density of disaggregated cellulose was determined: lyophilized - 20 kg/m³, thermally dried - 170 kg/m³. The work provides a comparative analysis of the lipid binding capacity of BC and chitosan. Microbiological parameters of disaggregated bacterial cellulose were determined.

Keywords: bacterial cellulose, water retention capacity, bulk density, lipid binding capacity, food additive.

Для цитирования

Погорелова Н.А., Сарницкая Н.А., Полянский К.К. Дерканосова А.А., Коновалов С.А. Физико-химические свойства и липидосвязывающая способность бактериальной целлюлозы, синтезированной на молочной сыворотке // Вестник ВГУИТ. 2024. Т. 86. № 3. С. 166–174. doi:10.20914/2310-1202-2024-3-166-174

For citation

Pogorelova N.A., Sarnitskaya N.A., Polyansky K.K. Derkanosova A.A., Konovarov S.A. Physico-chemical properties and lipid binding capacity of bacterial cellulose synthesized on whey. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2024. vol. 86. no. 3. pp. 166–174. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2024-3-166-174

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

Введение

В настоящее время природные полисахариды и их производные привлекают все большее внимание с точки зрения их практического применения. Хитозан, крахмал и целлюлоза, наиболее распространенные полисахариды, благодаря своим уникальным свойствам, таким как способность к биологическому разложению, биосовместимость и низкая токсичность делает их перспективными для производства средств медицинского назначения и пищевых добавок. Область исследований структурных и надструктурных характеристик целлюлозы бактериального происхождения дает возможность создания новых наноразмерных материалов. Химическая структура растительной и бактериальной целлюлозы одинакова, однако для последней, как показали исследования, характерна высокая степень кристалличности, большая длина и меньший диаметр волокон полимера. Образцы целлюлозы бактериального происхождения с большими значениями соотношений сторон волокон, по сравнению с их растительными аналогами, обладают большей влагоудерживающей и адсорбционной способностью, способствуют эффективной стабилизации как пен, так и эмульсий [1–4].

В работе Daniela Martins изучена стабилизирующая способность БЦ пен, образованных как животными, так и растительным белками. Пенообразующая способность белка и стабильность пены возрастала при введении в состав дисперсной системы более крупных хлопьев целлюлозы [5].

Особую роль играет бактериальная целлюлоза не только в качестве пищевой добавки, решающей технологические задачи, но и как компонент функциональных продуктов. Так окрашенные композиты БЦ, полученные при ферментации с *Monascus purpureus* были представлены *Purwadaria* в качестве сырья для производства новых функциональных продуктов питания, в основном в рецептуре искусственного мяса [6, 7].

Формирование 3d фибриллярной структуры бактериальной целлюлозы в процессе ее биосинтеза и возможность ее модификации, определяет прочностные и вязкоупругие свойства биоразлагаемого полимера, который является потенциальной альтернативой пластиковой упаковке [8, 9].

Несмотря на то, что существует множество интересных применений БЦ в производстве пищевых продуктов и их упаковки, на данный момент исследованы лишь некоторые из них, поскольку высокая стоимость синтеза БЦ является ограничивающим фактором. С другой стороны, было предложено несколько экономически эффективных питательных сред, способствующих снижению затрат на производство БЦ [10].

Тем не менее, ежегодно продолжают фундаментальные исследования биосинтеза и применения БЦ в различных направлениях. В связи с этим наша работа посвящена исследованию производства БЦ на молочной сыворотке, тем самым мы расширяем круг природных питательных сред для биосинтеза полимера и возможности утилизации отходов молочной промышленности. Характеристика БЦ с точки зрения пищевой добавки и практическое обоснование ее применения в различных пищевых системах, может помочь технологам и ученым-диетологам в разработке новых рецептур и упаковочных материалов для пищевых продуктов [11].

Материалы и методы

Состав питательной среды и процесс биосинтеза. Симбиотический микробный консорциум *Medusomyces gisevii*, это устойчивое микробное сообщество, состоящее из 15–30 родов, представленных дрожжами (преимущественно *Zygosaccharomyces* sp.) и уксуснокислыми бактериями (в основном *Gluconacetobacter xylinus*, обычно известными как *Acetobacter xylinum*). Более точный видовой состав чайного гриба культура подробно описана в других работах [12–14].

Гидролиз молочной сыворотке. Молочную сыворотку с массовой долей лактозы 4,5% использовали в качестве питательной среды для культивирования *Medusomyces gisevii*. Предварительно лактозу сыворотки гидролизвали ферментным препаратом (ФП) LACTA FREE «Biochem Srl» до 100% степени ее конверсии (содержания глюкозы 2,36%). Далее вносили растительный экстракт зеленого чая из расчета 4 г на 1 литр питательной среды. Объемное соотношение питательной среды и посевного материала (симбиота) составило 1:0,3. Процесс производства гель-пленок БЦ проводили в статическом режиме культивирования симбиотического консорциума *Medusomyces gisevii*.

Очистка и сушка целлюлозы. Каждые 3-е суток культивирования собирали и исследовали гель пленки БЦ. После окончания периода культивирования содержимое емкости интенсивно перемешивали в течение 10–15 минут, чтобы уменьшить количество прикрепившихся микробных клеток. Гель пленки БЦ на границе раздела воздух/жидкость вручную отделяли от культуральной жидкости, аккуратно отжимали и промывали деионизированной водой до достижения нейтральных значений pH. Каждый полученный образец геля отбирали и анализировали в трех экземплярах (т. е. из трех разных резервуаров для культивирования). Децеллюризацию промытого материал осуществляли в равных количествах объема 0,1 М NaOH при 28 °C в течение 3-х суток. Смену раствора щелочи

повторяли четыре раза, до получения бесцветной прозрачной пленки БЦ. Полученную пленку ВС нейтрализовали слабым раствором уксусной кислоты и промывали деионизированной водой до достижения нейтрального значения pH ($7,0 \pm 0,6$). Вес целлюлозных гелевых пленок во влажном состоянии измеряли с помощью лабораторных весов. После промывки образцы целлюлозы подвергали дегидратации двумя способами: (а) предварительно замораживали при температуре -70°C в течение 6 ч, а затем подвергали лиофилизации (лиофилизировали) при температуре -75°C в течение 48 часов с использованием опытной сублимационной сушилки на полке Jaba-Lyoph-Pride (Южная Корея), и (б) БЦ давали высохнуть в комнатных условиях (температура $24 \pm 2^\circ\text{C}$, влажность $65 \pm 1\%$) до получения постоянной массы. Далее в тексте первый и второй методы называются RT-методом (при комнатной температуре) и FD-методом (сублимационная сушка).

Определение водопоглощающей и набухающей способности. Водопоглощающую способность определяли в соответствии с монографией Британской Фармакопеи для альгинатных повязок и упаковки. Образцы гель-пленок БЦ разрезали на прямоугольники размером $2 \cdot 4$ см и взвешивали в качестве исходного веса (W_0). После этого образцы переносили в центрифужную пробирку, дно которой заполняли вязаной марлей для поглощения отжатой воды и подвергали центрифужной дегидратации в течение 15 мин при 1200 об / мин. Эти образцы были взвешены еще раз (W_1). Вес полностью высушенных образцов (W_4) измеряли после сушки при 105°C до постоянной массы.

Набухающую способность высушенной гель-пленки БЦ определяли следующим образом: образцы высушивали при 50°C или вымораживанием до постоянной массы и затем замачивали в растворе, содержащем 2,5 моль/л $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ и 142 ммоль/л NaCl в течение 30 минут. После инкубации образцы поднимали пинцетом в течение 30 с для удаления поверхностной жидкости и взвешивали (значение W_2). Для определения количества жидкости, удерживаемой между фибриллами, набухшие образцы обезвоживали центрифугированием, как описано выше, и взвешивали (W_3). Емкость удерживания воды (WHC) и емкость поглощения воды (WAC) были высчитаны как:

$$\text{WHC} = (W_0 - W_4) / W_4, \quad (1)$$

$$\text{WAC} = (W_2 - W_4) / W_4, \quad (2)$$

где W_0 – масса гель-пленки БЦ; W_1 – масса гель-пленки БЦ после центрифужной дегидратации; W_2 – масса гель-пленки БЦ после набухания;

W_3 – масса набухшей гель-пленки БЦ после центрифугирования; W_4 – масса высушенной гель-пленки БЦ.

Жидкость, в образцах БЦ, рассматривалась как состоящая из двух частей:

а) удерживаемая между волокнами ($W_0 - W_1$ для нативных гель-пленок БЦ) и ($W_2 - W_3$ для дегидратированных образцов БЦ);

б) удерживаемая внутри отдельных волокон ($W_1 - W_4$ для нативных гель-пленок БЦ) и ($W_3 - W_4$ для дегидратированных образцов БЦ).

Определение липидсвязывающей способности. *In vitro* липидсвязывающая способность (ЛСС) полисахаридов определялась трехкратно по установленной методике [15, 16].

Каждый образец полисахарида (20 мг) растворяли в 1,25 мл 0,6 моль l^{-1} HCl и инкубировали в течение 30 мин на водяной бане 37°C с постоянным встряхиванием. Затем в каждую пробирку добавляли по 25 г оливкового масла, вихривали и инкубировали в одинаковых условиях в течение 2 ч. После инкубации добавляли 8 мл фосфатного буфера ($\text{pH} = 7,4$) и корректировали pH раствора до 6,8 с 1 моль l^{-1} NaOH и инкубировали снова в течение 30 мин, чтобы имитировать дуоденальные состояния. Далее пробирки центрифугировали при 697 g в течение 10 мин, а супернатант, представляющий несвязанные липиды, измеряли гравиметрически. Липидсвязывающая способность (ЛСС) образцов была рассчитана по уравнению (3):

$$\text{ЛСС} = \frac{25 - m_1}{m_2}, \quad (3)$$

где 25 – масса оливкового масла, взятого для определения ЛСС, г; m_1 – масса несвязанного оливкового масла, г; m_2 – масса полисахарида, г.

Концентрацию глюкозы культуральной жидкости гидролизованной молочной сыворотки определяли тест системой «Глюкоза-GOD» производства «Вектор-Бест». Титруемую кислотность определяли по ГОСТ 33957–2016. Результаты измерения синтезированной гель-пленки БЦ, расчеты степени конверсии, скорости биосинтеза субстратов математически обработаны.

Степень конверсии (СК, %) была рассчитана по уравнению (4):

$$\text{СК} = \frac{m_{\text{БЦ}}}{m_1 - m_2}, \quad (4)$$

где $m_{\text{БЦ}}$ – масса синтезированной БЦ в пересчете на сухие вещества с 1 л культуральной жидкости, г СВ/л; m_1 – начальное количество глюкозы в 1 л культуральной жидкости, г; m_2 – количество глюкозы в 1 л культуральной жидкости после биосинтеза БЦ, г.

Результаты

Биосинтез бактериальной целлюлозы на гидролизованной молочной сыворотке проводили в конические колбах Эрленмейера в термостатируемых условиях $T = 31 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Начальное количество глюкозы питательной

среды 1,7%, продолжительность биосинтеза 21-и сутки. Каждые 3-е суток культивирования оценивали массу полученной БЦ, определяли изменение параметров биосинтеза: титруемая кислотность, pH, количество глюкозы питательной среды (рисунок 1).

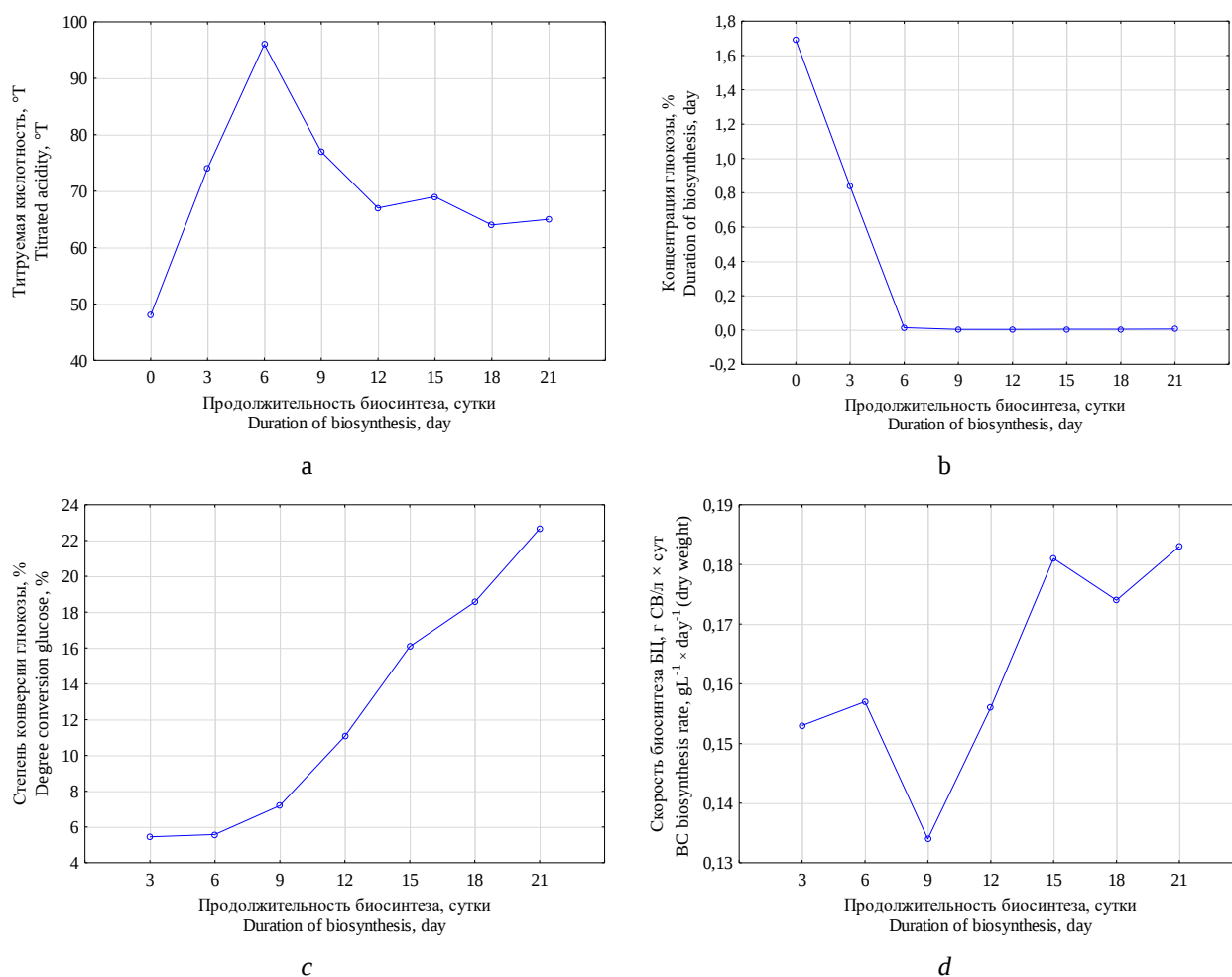


Рисунок 1. Изменение титруемой кислотности (a), концентрации (b) и степени конверсии глюкозы (c); скорости биосинтеза БЦ (d) на гидролизованной молочной сыворотке в зависимости от продолжительности процесса

Figure 1. Changes in titrated acidity (a), concentration (b) and degree of glucose conversion (c); the rate of BC biosynthesis (d) on hydrolyzed whey, depending on the duration of the process

На рисунке 1, а представлено изменение титруемой кислотности культуральной жидкости в течение 21-х суток биосинтеза. Титруемая кислотность культуральной жидкости увеличивалась в два раза в течение шести суток культивирования и достигла 96°T , что может быть связано с развитием уксуснокислых бактерий. Интересно, что более длительный процесс биосинтеза БЦ симбиотическим консорциумом *Medusomyces gisevii*, на 9-е сутки и в последующем, характеризуется снижением титруемой кислотности до 65°T . Значение активной кислотности (pH) достигало максимального значения 2,72 так же на 6-е сутки, но в отличие от показателей титруемой кислотности

более длительное культивирование не приводило к снижению pH.

Определено резкое снижение количества глюкозы культуральной жидкости на 6-е сутки биосинтеза до 0,013%, что подтверждает преимущественное использование глюкозы целлюлозосинтезирующими бактериями симбиота *Medusomyces gisevii* как субстрата в биосинтезе полисахарида (рисунок 1, b). Низкие значения количества глюкозы в процессе культивирования коррелируют со снижением показателя титруемой кислотности в этот период, что подтверждает возможность использования органических кислот продуцентами в биосинтезе БЦ.

Степень конверсии глюкозы культуральной жидкости первые 6-ть суток процесса не превышает 6% (рисунок 1, с). Однако начиная с 9-х суток культивирования степень конверсии, рассчитанная по глюкозе, возрастает до 22,6%, что может быть связано вовлечение в биосинтез бактериальной целлюлозы других веществ в качестве субстратов, это подтверждается и низкими значениями количества глюкозы в этот период. Степень конверсии, рассчитанная по количеству синтезированной БЦ и негидролизованной лактозы молочной сыворотки до ферментации, на 21-е сутки культивирования составила 10,5%.

Определено наименьшее значение скорости биосинтеза БЦ на 9-е сутки процесса 0,134 г СВ / л × сут, на 15-е, 21-е сутки показатели биосинтеза достигли максимальных значений 0,181 г СВ/л×сут и 0,183 г СВ/л×сут соответственно (рисунок 1, d).

Биосинтез бактериальной целлюлозы происходил в течение 21-х суток, максимальное количество полисахарида достигло 3,84 г с 1 литра питательной среды в пересчете на сухие вещества (рисунок 2).

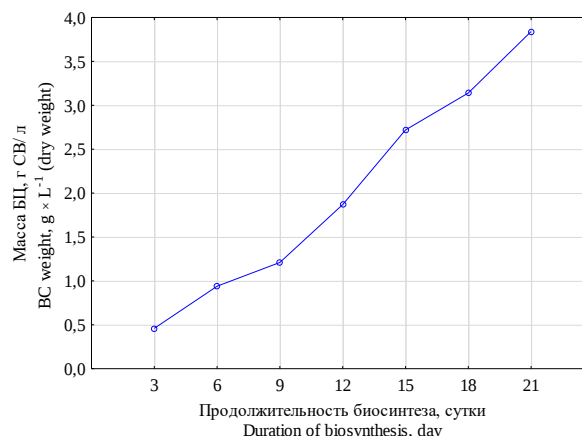


Рисунок 2. Изменение массы (в пересчете на СВ) синтезированной БЦ на гидролизованной молочной сыворотке в зависимости от продолжительности процесса

Figure 2. The change in mass (in terms of dry matter) of synthesized BC on hydrolyzed whey, depending on the duration of the process

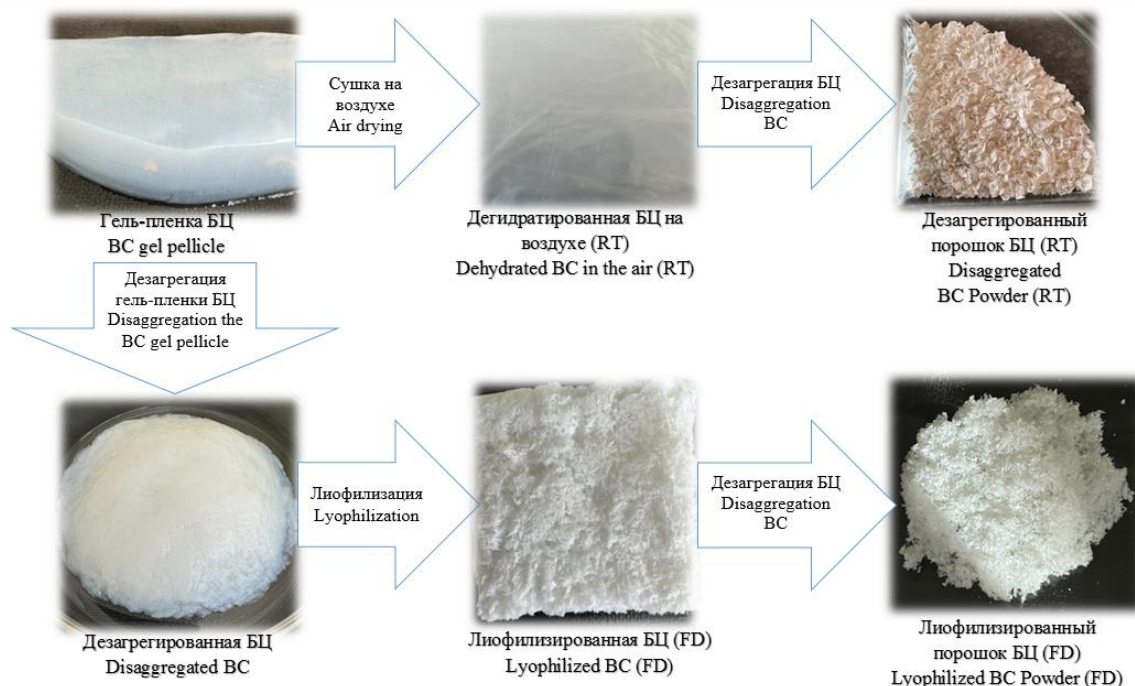


Рисунок 3. Внешний вид дезагрегированного дегидратированного образца БЦ, синтезированного на гидролизованной молочной сыворотке

Figure 3. The appearance of a disaggregated dehydrated BC sample synthesized on hydrolyzed whey

Полученные образцы гелевых пленок БЦ очищали от остатков культуральной среды и продуцентов в растворе гидроксида натрия, промывали дистиллированной водой до нейтральных значений pH, стерилизовали. После лиофилизации БЦ (FD) дезагрегировали на лабораторной мельнице циклонного типа TAGLER ЛМЦ-5

«Циклон» (рисунок 3) с получением сухого порошка. Дезагрегировали на мельнице так же образцы БЦ (RT) высушенные до постоянной массы на воздухе при $T = 24^\circ\text{C}$.

Определено, что насыпная плотность порошка лиофилизированной БЦ в 8,5 раз меньше, чем высушенного на воздухе (таблица 1).

По результатам исследований физико-химических свойств БЦ водоудерживающая способность синтезированных гель пленок бактериальной целлюлозы составила $82,35 \pm 0,63$ г/г (таблица 1).

Таблица 1.
Физико-химические параметры БЦ
на гидролизованной молочной сыворотке

Table 1.
Physico-chemical parameters of BC
on hydrolyzed whey

Физико-химические свойства Physico-chemical properties	Значения Values
Водоудерживающая способность гель-пленок БЦ Water-holding capacity of BC gel films	$82,35 \pm 0,33$ г/г (g/g)
Водопоглощающая способность Water absorption capacity:	
Температурная сушка Temperature Drying	$5,42 \pm 0,45$ г/г (g/g)
Сублимационная сушка Freeze - dried	$22,44 \pm 0,21$ г/г (g/g)
Насыпная плотность Bulk density:	
Температурная сушка Temperature Drying	$170,00 \pm 0,95$ кг/м ³ (kg/m ³)
Сублимационная сушка Freeze - dried	$20,00 \pm 0,75$ кг/м ³ (kg/m ³)
Микробиологические показатели Microbiological indicators:	
Дрожжи, КОЕ/г (см ³)* Yeast, CFU/g (cm ³)*	Не обнаружено Not detected
КМАФАнМ, КОЕ/г (см ³)** QMAFAnM, CFU/g (cm ³)*	$1,2 \times 10^2$

*ГОСТ 10444.12–2013 Микробиология пищевых продуктов и кормов для животных. Методы выявления и подсчета количества дрожжей и плесневых грибов | Standard 10444.12–2013 is the national standard Microbiology of food and animal feed. Methods for detecting and counting the number of yeast and mold fungi

**ГОСТ 10444.15–94 Продукты пищевые. Методы определения количества мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов | Standard 10444.15–94 is the national standard Food products. Methods for determining the number of mesophilic aerobic and facultative anaerobic microorganisms

Далее определяли водопоглощающую (набухающую) способность дегидратированных образцов пленок бактериальной целлюлозы RT и FD. Процесс набухания полимеров проходит в два этапа – набухание стенок фибрилл целлюлозы и разрушение слабых связей, которые образуются между макро- и микрофибриллами за счет их сближения в процессе дегидратации. Это приводит к увеличению объема и возникновению дополнительного пространства для молекул растворителя как между фибриллами, так и внутри макрофибрилл целлюлозы. Набухающая способность целлюлозы будет определяться способностью

молекул растворителя взаимодействовать с гидроксильными группами полимера и образовывать водородные связи. Установлено, что образцы целлюлозы RT синтезированные на молочной сыворотке обладают низкой набухающей способностью $5,42 \pm 0,45$ г/г (таблица 1). Медленная скорость потери воды целлюлозой определяет значительные структурные надструктурные изменения полимера. Они в меньшей степени выражены для лиофилизированной целлюлозы FD, что определяет большую в 4,1 раза водопоглощающую способность, в сравнении с образцами целлюлозы RT.

Вода в 3d сетчатой структуре гель пленок и регидратированных образцов БЦ удерживается в межфибрилярном пространстве, это капиллярная влага. Она может перемещаться внутри пространства материала. Другой вид жидкости, находящийся в структуре БЦ, удерживается фибриллами, это связанная вода, ее количество определяет продолжительность дегидратации целлюлозы. Соотношение количества свободной и связанной влаги важный показатель БЦ при включении полисахарида в рецептуру замороженных продуктов с целью регуляции активности воды в них. Установлено, что регидратированные образцы RT целлюлозы обладали в 3,43 раза большим показателем отношения количества свободной и связанной влаги в сравнении с FD образцами.

Было доказано, что бактериальная целлюлоза имеет фибриллярное строение, длина фибрилл намного больше, чем у растительной целлюлозы при их меньшем диаметре, что определяет значительную удельную поверхность. Нерастворимость, отсутствие ферментов у человека гидролизующих целлюлозу, и большая ее удельная поверхность дает возможность полисахариду эффективно связывать жир. Считается, что связанный жир хуже усваивается *in vivo* и выводится с калом [15]. Способность БЦ напрямую связывать жир может определять ее общую гипополипидемическую активность. В этом исследовании оценивался жиросвязывающий потенциал порошка лиофилизированной БЦ и коммерческого препарата хитозана [16, 17].

Определена большая липидосвязывающая способность (рисунок 4) бактериальной целлюлозы – $108,1 \pm 3,2$ г масла на 1 г полисахарида в сравнении с хитозаном – $78,8 \pm 1,8$ г масла на 1 г полисахарида. Эти данных указывают на то, что бактериальная целлюлоза может оказывать гипополипидемическое действие и позитивно влиять на здоровье человека.

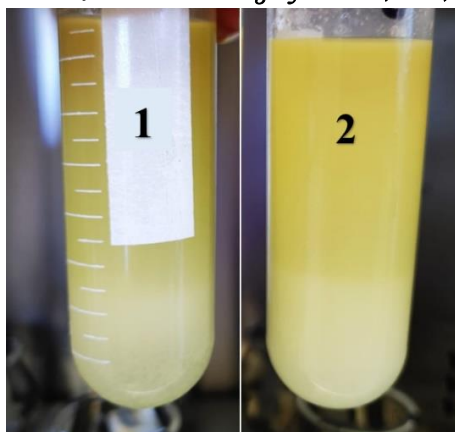


Рисунок 4. Исследование липидосвязывающей способности образцов (1) коммерческого хитозана, (2) дезагрегированной дегидратированной БЦ

Figure 4. Investigation of the lipid-binding method-news of samples of (1) commercial chitosan, (2) disaggregated dehydrated BC

Обсуждение

Результаты нашего исследования демонстрируют успешное применение гидролизованной молочной сыворотки в качестве питательной среды для культивирования симбиотического консорциума *Medusomyces gisevii*. Несмотря на низкое количество глюкозы (1,7%) питательной среды, на основе ферментированной молочной сыворотки, масса синтезированной бактериальной целлюлозы составило 3,84 г СВ/л. Наши результаты показателей эффективности биосинтеза

полисахарида на отходах молочной промышленности сравнимы или превышают данные [1, 18] производства целлюлозы на полусинтетических питательных средах, [19] на мелассе, [20] на селективной питательной среде Hestrin–Schramm (HS). Стоит отметить высокую водоудерживающую способность ($82,35 \pm 0,33$ г/г) нативных гелевых пленок бактериальной целлюлозы при сохранении высоких прочностных характеристик. Дегидратация БЦ сублимационной сушкой в меньшей степени оказывает влияние на структурные и надструктурные изменения 3d матрицы полисахарида, это выражается в большей набухающей способности $22,44 \pm 0,21$ г/г и насыпной плотности $20,00 \pm 0,75$ кг/м³. Большая удельная поверхность лиофилизированной БЦ определяет способность связывать липиды (ЛСС = 108,1 г масла на 1 г полисахарида). Учитывая полученные данные характеризующие БЦ, синтезированную на молочной сыворотке, и ее микробиологические показатели может помочь в обсуждении ее применения в различных пищевых системах, может помочь технологам и ученым-диетологам в разработке новых рецептов и упаковочных материалов для пищевых продуктов.

Благодарности

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23–24–10052 от 20.04.2023).

Литература

- 1 Pogorelova, N., Rogachev, E., Akimbekov, N. et al. Effect of dehydration method on the micro – and nanomorphological properties of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii* on different substrates // *J Mater Sci*. 2024. V. 59. P. 6614–6626. doi: 10.1007/s10853-024-09596-3
- 2 Pinto Nayra O.F., Bourbon A-I., Martins D., Pereira A. et al. Bacterial cellulose nanocrystals or nanofibrils as Pickering stabilizers in low-oil emulsions: A comparative study // *Food Hydrocolloids*. 2024. V. 157. P. 110427. doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.110427
- 3 Calvo V., Fuentes L., Berdejo D., González-Domínguez J.M. et al. Oil-in-Water Pickering Emulsions Stabilized with Nanostructured Biopolymers: A Venue for Templating Bacterial Cellulose // *Int. J. Mol. Sci*. 2023. V. 24. P. 13141. doi: 10.3390/ijms241713141
- 4 Sommer A., Staroszczyk H. Bacterial cellulose vs. bacterial cellulose nanocrystals as stabilizer agents for O/W pickering emulsions // *Food Hydrocolloids*. 2023. V. 145. P. 109080. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.109080
- 5 Martins D., Khodamoradi N., Silva-Carvalho R., Gama M. et al. Effect of bacterial cellulose on the foaming properties of egg white and soy proteins // *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*. 2024. V. 7. P. 100517. doi: 10.1016/j.carpta.2024.100517
- 6 Kamal T., Ul-Islam M., Fatima A., Ullah MW, Manan S. Cost-Effective Synthesis of Bacterial Cellulose and Its Applications in the Food and Environmental Sectors // *Gels*. 2022. V. 8(9). P. 552. doi: 10.3390/gels8090552
- 7 Lin D., Liu Zh., Shen R., Chen S. et al. Bacterial cellulose in food industry: Current research and future prospects // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. V. 158. P. 1007–1019. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.04.230
- 8 Jang E.J., Padhan B., Patel M., Pandey J.K. et al. Antibacterial and biodegradable food packaging film from bacterial cellulose // *Food Control*. 2023. V. 153. P. 109902. doi: 10.1016/j.foodcont.2023.109902
- 9 Gromovykh T.I. et al. Structural organization of bacterial cellulose: The origin of anisotropy and layered structures. *Carbohydrate polymers*. 2020. V. 237. P. 116140. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116140
- 10 Azeredo H.M.C., Barud H., Farinas C.S., Vasconcellos V.M. et al. Bacterial cellulose as a raw material for food and food packaging applications // *Front. Sustain. Food Syst*. 2019. V. 3(7). doi: 10.3389/fsufs.2019.00007
- 11 Pogorelova N.A., Sarnitskaya N.A. Polysaccharides as food system stabilizers // *BIO Web of Conferences*. International Conference Scientific and Technological Development of the Agro-Industrial Complex for the Purposes of Sustainable Development (STDAIC-2023). Bishkek, 2024. P. 01009. doi:10.1051/bioconf/20248301009

- 12 Bishop P., Pitts E.R., Budner D., Thompson-Witrick K.A. Kombucha: Biochemical and microbiological impacts on the chemical and flavor profile // Food Chemistry Advances. 2022. V. 1. 100025. doi: 10.1016/j.focha.2022.100025
- 13 Diez-Ozaeta I., Astiazaran O.J. Recent advances in Kombucha tea: Microbial consortium, chemical parameters, health implications and biocellulose production // Int J Food Microbiol. 2022. V. 16(377). P. 109783. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109783
- 14 Wang B., Rutherford-Markwick K., Zhang X-X., Mutukumira A.N. Kombucha: Production and Microbiological Research // Foods. 2022. V. 11(21). P. 3456. doi: 10.3390/foods11213456
- 15 Malm M., Liceaga A.M. Physicochemical properties of chitosan from two commonly reared edible cricket species, and its application as a hypolipidemic and antimicrobial agent // Polysaccharides. 2021. V. 2(2). P. 339–353. doi: 10.3390/polysaccharides2020022
- 16 May Kellie L., Tangso Kristian J., Hawley A., Boyd Ben J. et al. Interaction of chitosan-based dietary supplements with fats during lipid digestion // Food Hydrocolloids. 2020. V. 108. 105965. doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.105965
- 17 Silva I.M.V., Machado F., Moreno M.J., Nunes C. et al. Polysaccharide Structures and Their Hypocholesterolemic Potential // Molecules. 2021. V. 26(15). P. 4559. doi: 10.3390/molecules26154559
- 18 Shavyrkina N.A. et al. Scale-up of biosynthesis process of bacterial nanocellulose // Polymers. 2021. V. 13. №. 12. P. 1920. doi: 10.3390/polym13121920
- 19 Revin V. V. et al. Characterizing bacterial cellulose produced by Komagataeibacter sucrofermentans H-110 on molasses medium and obtaining a biocomposite based on it for the adsorption of fluoride // Polymers. 2021. V. 13. №. 9. P. 1422. doi: 10.3390/polym13091422
- 20 Hamed D.A., Maghrawy H.H., Abdel Kareem H. Biosynthesis of bacterial cellulose nanofibrils in black tea media by a symbiotic culture of bacteria and yeast isolated from commercial kombucha beverage // World Journal of Microbiology and Biotechnology. 2023. V. 39. №. 2. P. 48. doi: 10.1007/s11274-022-03485-0

References

- 1 Pogorelova, N., Rogachev, E., Akimbekov, N. et al. Effect of dehydration method on the micro – and nanomorphological properties of bacterial cellulose produced by *Medusomyces gisevii* on different substrates. J Mater Sci. 2024. vol. 59. pp. 6614–6626. doi: 10.1007/s10853-024-09596-3
- 2 Pinto Nayra O.F., Bourbon A-I., Martins D., Pereira A. et al. Bacterial cellulose nanocrystals or nanofibrils as Pickering stabilizers in low-oil emulsions: A comparative study. Food Hydrocolloids. 2024. vol. 157. pp. 110427. doi: 10.1016/j.foodhyd.2024.110427
- 3 Calvo V., Fuentes L., Berdejo D., González-Domínguez J.M. et al. Oil-in-Water Pickering Emulsions Stabilized with Nanostructured Biopolymers: A Venue for Templating Bacterial Cellulose. Int. J. Mol. Sci. 2023 vol. 24. pp. 13141. doi: 10.3390/ijms241713141
- 4 Sommer A., Starszczyk H. Bacterial cellulose vs. bacterial cellulose nanocrystals as stabilizer agents for O/W pickering emulsions. Food Hydrocolloids. 2023. vol. 145. pp. 109080. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.109080
- 5 Martins D., Khodamoradi N., Silva-Carvalho R., Gama M. et al. Effect of bacterial cellulose on the foaming properties of egg white and soy proteins. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications. 2024. vol. 7. pp. 100517. doi: 10.1016/j.carpta.2024.100517
- 6 Kamal T, Ul-Islam M, Fatima A, Ullah MW, Manan S. Cost-Effective Synthesis of Bacterial Cellulose and Its Applications in the Food and Environmental Sectors. Gels. 2022. vol. 8. no. 9. pp. 552. doi: 10.3390/gels8090552
- 7 Lin D., Liu Zh., Shen R., Chen S. et al. Bacterial cellulose in food industry: Current research and future prospects. International Journal of Biological Macromolecules. 2020. vol. 158. pp. 1007–1019. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.04.230
- 8 Jang E.J., Padhan B., Patel M., Pandey J.K. et al. Antibacterial and biodegradable food packaging film from bacterial cellulose. Food Control. 2023. vol. 153. pp. 109902. doi: 10.1016/j.foodcont.2023.109902
- 9 Gromovykh T.I. et al. Structural organization of bacterial cellulose: The origin of anisotropy and layered structures. Carbohydrate polymers. 2020. vol. 237. pp. 116140. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.116140
- 10 Azeredo H.M.C., Barud H., Farinas C.S., Vasconcellos V.M. et al. Bacterial cellulose as a raw material for food and food packaging applications. Front. Sustain. Food Syst. 2019. vol. 3. no. 7. doi: 10.3389/fsufs.2019.00007
- 11 Pogorelova N.A., Sarnitskaya N.A. Polysaccharides as food system stabilizers. BIO Web of Conferences. International Conference Scientific and Technological Development of the Agro-Industrial Complex for the Purposes of Sustainable Development (STDAIC-2023). Bishkek, 2024. pp. 01009. doi: 10.1051/bioconf/20248301009
- 12 Bishop P., Pitts E.R., Budner D., Thompson-Witrick K.A. Kombucha: Biochemical and microbiological impacts on the chemical and flavor profile. Food Chemistry Advances. 2022. vol. 1. pp. 100025. doi: 10.1016/j.focha.2022.100025
- 13 Diez-Ozaeta I., Astiazaran O.J. Recent advances in Kombucha tea: Microbial consortium, chemical parameters, health implications and biocellulose production. Int J Food Microbiol. 2022. vol. 16. no. 377. pp. 109783. doi: 10.1016/j.ijfoodmicro.2022.109783
- 14 Wang B., Rutherford-Markwick K., Zhang X-X., Mutukumira A.N. Kombucha: Production and Microbiological Research. Foods. 2022. vol. 11. no. 21. pp. 3456. doi: 10.3390/foods11213456
- 15 Malm M, Liceaga AM. Physicochemical properties of chitosan from two commonly reared edible cricket species, and its application as a hypolipidemic and antimicrobial agent. Polysaccharides. 2021. vol. 2. no. 2. pp. 339–353. doi: 10.3390/polysaccharides2020022
- 16 May K.L., Tangso K.J., Hawley A., Boyd B.J. et al. Interaction of chitosan-based dietary supplements with fats during lipid digestion. Food Hydrocolloids. 2020. vol. 108. pp. 105965. doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.105965

17 Silva I.M.V., Machado F., Moreno M.J., Nunes C. et al. Polysaccharide Structures and Their Hypocholesterolemic Potential. *Molecules*. 2021. vol. 26. no. 15. pp. 4559. doi: 10.3390/molecules26154559

18 Shavyrkina N.A., Budaeva V.V., Skiba E.A., Mironova G.F. et al. Scale-Up of Biosynthesis Process of Bacterial Nanocellulose. *Polymers*. 2021. vol. 13. no 12. pp. 1920. doi: 10.3390/polym13121920

19 Revin V.V. et al. Characterizing bacterial cellulose produced by *Komagataeibacter sucrofermentans* H-110 on molasses medium and obtaining a biocomposite based on it for the adsorption of fluoride. *Polymers*. 2021. vol. 13. no. 9. pp. 1422. doi: 10.3390/polym13091422

20 Hamed D.A., Maghrawy H.H., Abdel Kareem H. Biosynthesis of bacterial cellulose nanofibrils in black tea media by a symbiotic culture of bacteria and yeast isolated from commercial kombucha beverage. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*. 2023. vol. 39. no. 2. pp. 48. doi: 10.1007/s11274-022-03485-0

Сведения об авторах

Наталья А. Погорелова к.б.н., доцент, кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, ул. Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Россия, na.pogorelova@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0001-8495-3869>

Наталья А. Сарницкая аспирант, кафедры продуктов питания и пищевой биотехнологии, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, ул. Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008, Россия, na.sarnitskaya@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0002-1614-5090>

Константин К. Полянский д.т.н., профессор, кафедра управления социально-экономическими системами и бизнес-процессами, Воронежский филиал Российского экономического университета имени Г.В. Плеханова, ул. Карла Маркса, 67А, Воронеж, 394030, Россия, mto.vrn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8817-1466>

Анна А. Дерканосова д.т.н., профессор, кафедра сервиса и ресторанного бизнеса, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революций, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, aa-derk@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9726-9262>

Сергей А. Коновалов к.т.н., доцент, кафедра продуктов питания и пищевой биотехнологии, Омский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина, Институтская площадь, 1, г. Омск, 644008 Россия, sa.konovalev@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0003-3537-8081>

Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about authors

Natalia A. Pogorelova Cand. Sci. (Biol.), associate professor, nutrition and food biotechnology departments, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Ploshchad str., Omsk, 644008, Russia, na.pogorelova@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0001-8495-3869>

Natalia A. Sarnitskaya graduate student, nutrition and food biotechnology departments, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, 1 Institutskaya Ploshchad str., Omsk, 644008, Russia, na.sarnitskaya@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0002-1614-5090>

Konstantin K. Polyansky Dr. Sci. (Engin.), professor, management of socio-economic systems and business processes department, Voronezh branch of the Russian Economic University named after G.V. Plekhanov, Karla Marksa, 67A, Voronezh, 394030, Russia, mto.vrn@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8817-1466>

Anna A. Derkanosova Dr. Sci.(Engin.), professor, service and restaurant business department, Voronezh State University of Engineering Technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, aa-derk@ya.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-9726-9262>

Sergey A. Konovalev Cand. Sci (Engin.), associate professor, food and food biotechnology department, Omsk State Agrarian University named after P.A. Stolypin, Institutskaya square, 1, Omsk, 644008, Russia, sa.konovalev@omgau.org

 <https://orcid.org/0000-0003-3537-8081>

Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 30/07/2024	После редакции 15/08/2024	Принята в печать 02/09/2024
Received 30/07/2024	Accepted in revised 15/08/2024	Accepted 02/09/2024