

А.Р. Галиева, Е.В. Крякунова, Л.А. Мингазова, З.А. Канарская,
А.В. Канарский, А.Г. Кузнецов

ПОЛУЧЕНИЕ КОРМОВОГО ПРОДУКТА НА ОСНОВЕ АРАБИНОГАЛАКТАНА И БИОМАССЫ ДРОЖЖЕПОДОБНЫХ ГРИБОВ

Введение. На современном этапе развития сельское хозяйство испытывает дефицит кормового белка в рационе сельскохозяйственных животных. В настоящее время традиционные источники растительного белка не могут удовлетворить существующую потребность в кормовом белке по потребительским свойствам, что вызывает необходимость создания альтернативных источников кормового белка. Для укрепления здоровья и ускорения роста сельскохозяйственных животных все большее внимание животноводов привлекают белковые препараты микробиологического происхождения. В качестве источника полноценного кормового белка наиболее перспективной группой микроорганизмов в настоящее время считаются базидиальные грибы (*Basidiomycetes*) [Фоменко и др., 2021].

Базидиомицеты – высшие грибы с многоклеточным мицелием, насчитывающие около 30 тыс. видов как микроскопических грибов, так и грибов с крупными плодовыми телами [Куликова и др., 2011]. В современной таксономии выделяют три класса базидиальных дрожжеподобных грибов – *Ustilaginomycetes*, *Urediniomycetes* и *Hymenomycetes*. Представители этих классов дрожжей используются в качестве источников кормового белка при кормлении животных [Choudhary, Johri, 2009]. Применение микробной биомассы в качестве источника кормового белка является рациональным подходом, т.к. биомассу микроорганизмов можно производить круглогодично на дешевом сырье и вторичных ресурсах, производство не зависит от климатических и погодных условий, не требует посевных площадей, поддается автоматизации [Бабьева, Чернов, 2004]. В последние годы интенсивно разрабатываются новые направления в биотехнологии переработки лигноцеллюлозных материалов. В связи с этим большое внимание уделяется дереворазрушающим базидиальным грибам, которые обладают ферментативной системой, способной расщеплять полисахаридные и лигнинные компоненты субстрата [Мошкова, Бойцова, 2000].

При использовании микроорганизмов в качестве продуцентов кормового белка возможно одновременно решить две важные задачи – получения белковой массы и переработки вторичных ресурсов переработки растительного сырья, в частности, арабиногалактана.

Арабиногалактан представляет собой природный полисахарид, который содержится в тканях растений. Этот полисахарид проявляет широкий спектр биологической активности и имеет низкую токсичность, благодаря чему находит широкое применение в фармацевтической и косметической отраслях промышленности для создания препаратов с улучшенными свойствами [Pokatilov et al., 2022; Zvereva, Zhmurova, 2022]. Арабиногалактан также используется как компонент биологически активных добавок к пище и кормовых добавок [Фомичев и др., 2017; Никанова, 2019].

Целесообразно получать арабиногалактан из хвойных пород, в частности, лиственницы сибирской, в которой содержание арабиногалактана составляет в среднем 10–15% от массы древесины [Большакова и др., 1991]. При получении целлюлозы из древесины лиственницы арабиногалактан в растворенном виде переходит в щелок и может выделяться для дальнейшего получения биопродуктов.

Арабиногалактан благодаря хорошей растворимости в воде является перспективным полисахаридом для использования в качестве источника углерода в составе жидких питательных сред для выращивания микроорганизмов. В работах [Митина и др., 2012, 2013] показана возможность его применения в качестве единственного источника углерода при культивировании ряда фитопатогенных грибов. В работах [Неверова и др., 2010; Галаяудинова и др., 2016] показана способность дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, *Debaryomyces hansenii* и *Guehomyces pullulans* утилизировать арабиногалактан, полученный из древесины лиственницы. Известна возможность биоконверсии арабиногалактана макромицетами и микромицетами. Установлено, что внесение арабиногалактана в качестве стимулирующей биодобавки при биоконверсии остатков древесины макро- и микромицетами положительно влияет на их рост и развитие [Митина и др., 2013].

Следует отметить, что проведенные ранее исследования по биоконверсии арабиногалактана микроорганизмами не учитывают возможности создания кормовых продуктов, сочетающих физиологически активные свойства интактного арабиногалактана, микробиологических белков и других продуктов метаболизма микроорганизмов.

Цель исследования – изучение возможности получения биопродуктов кормового назначения посредством микробиологической конверсии арабиногалактана дрожжеподобными грибами *Trichosporon moniliiforme*.

Материалы и методика исследования. В работе использовались дрожжеподобные грибы – представители отдела Базидиомицетов – штаммы *Trichosporon moniliiforme* Н₃₉₃₂, Н₃₉₃₃, Н₃₇₆₂, Н₃₇₆₃, которые были предоставлены Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова, коллекция кафедры биологии почв.

Культивирование микроорганизмов проводили на питательных средах, в состав которых вносили арабиногалактан в концентрации 2,0%, 4,0 и 6,0% соответственно. Арабиногалактан предоставлен Санкт-Петербургским государственным университетом промышленных технологий и дизайна, кафедры технологии целлюлозы и композиционных материалов. Арабиногалактан представлял собой порошок с содержанием сухих веществ 92%, который был получен путем сушки на распылительной сушилке экстракта технологической щепы древесины лиственницы сибирской (Братский ЛПК) [Кузнецов и др., 2012; Митина и др., 2012, 2013; Галяутдинова и др., 2016]. Экстракт был получен двухступенчатой водной экстракцией при температуре 90–105 °С при гидромодуле 1:4, после чего дополнительно сконцентрирован с применением мембранной фильтрации до концентрации 25%.

Начальная концентрация редуцирующих веществ (РВ) в питательной среде составляла 0,02%, pH 5,8±0,1. В питательные среды вносили минеральные соли KH_2PO_4 и $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ в следующих концентрациях:

- при добавлении в питательную среду 2% арабиногалактана – 0,03 М $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и 0,01 сМ KH_2PO_4 ;
- при добавлении в питательную среду 4% арабиногалактана – 0,06 М $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и 0,3 сМ KH_2PO_4 ;
- при добавлении в питательную среду 6% арабиногалактана – 0,08 М $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и 0,5 сМ KH_2PO_4 .

Культивирование дрожжеподобных грибов осуществлялось в колбах Эрленмейера при температуре 30,0±1,0 °С при непрерывном перемешивании в течение 7 суток. Отбор проб проводили каждые 24 ч.

Содержание редуцирующих веществ определяли по методике, приведенной в работе [Морозова и др., 2012]. Биомассу дрожжеподобных грибов определяли весовым методом после удаления культуральной жидкости. Определение количества клеток дрожжеподобных грибов проводили в камере Горяева-Тома [Скиба, 2010]. Определение кинетических характеристик и выхода биомассы проводили по стандартным методикам [Практикум..., 2005]. β -галактозидазную активность дрожжеподобных грибов определяли фотометрическим методом с применением О-нитрофенил- β -D-галактопиранозид [Полыгалина и др., 2003].

Статистическая обработка результатов экспериментов проводилась с помощью программы Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение. В результате проведенных исследований было установлено, что в процессе культивирования наблюдается закономерное увеличение количества клеток дрожжеподобных грибов *T. moniliiforme*. Представленные на рис. 1 кривые роста различных штаммов *T. moniliiforme* отражают зависимость количества клеток в культуральной жидкости от времени культивирования и имеют характерную для подобных кривых S-образную форму.

В течение первых 3 суток культивирования у всех анализируемых штаммов происходит адаптация к питательной среде, затем начинается экспоненциальная фаза роста, которая переходит в стационарную на 5-е сутки. При этом у штаммов *T. moniliiforme* H_{3762} и H_{3763} наблюдается более активная пролиферация клеток в логарифмическую фазу роста по сравнению со штаммами *T. moniliiforme* H_{3932} и H_{3933} . Существенных различий в количестве клеток каждого анализируемого штамма дрожжеподобных грибов в зависимости от концентрации арабиногалактана в питательной среде выявлено не было.

Известно, что дрожжи и дрожжеподобные грибы, включая представителей р. *Trichosporon spp.*, способны ассимилировать различные моносахариды: быстрее всего усваивается глюкоза, затем манноза и ксилоза, медленнее всех усваиваются галактоза и арабиноза [Ramos et al., 2004].

В данной работе в питательную среду для культивирования дрожжеподобных грибов *T. moniliiforme* в качестве источника углерода добавляли арабиногалактан, полученный из древесины лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), произрастающей в Иркутской области. Структура молекулы используемого в данной работе арабиногалактана схожа с арабиногалактанами других видов лиственницы, например, западной (*Larix occidentalis* Nutt.), и представляет собой высокоразветвленную молекулу, основу которой представляют звенья β -D-галактопиранозы, соединённые 1–3-гликозидными связями. Большинство звеньев используемого в данной работе арабиногалактана имеет ответвления при C-6, представляющие собой цепочки из замещённых остатков β -D-галактопиранозы и β -L-арабинофуранозы, соединённых 1–6-гликозидными связями. Молекулярная масса арабиногалактана составляет 40 кДа [Антонова, Усов, 1984].

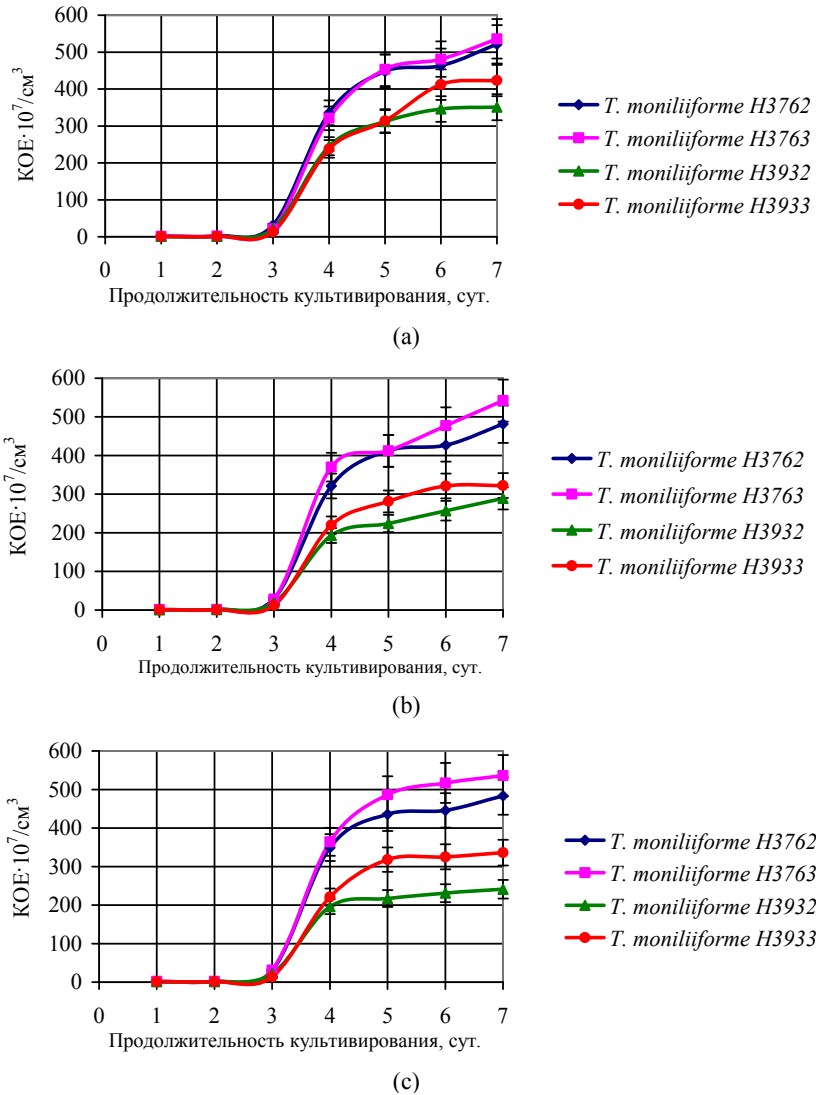


Рис. 1. Кинетика роста *T. moniliiforme* на питательных средах на основе арабиногалактана в концентрации: (а) 2%; (б) 4%; (с) 6%

Fig. 1. Growth kinetics of *T. moniliiforme* on nutrient media based on arabinogalactan at a concentration: (a) 2%; (b) 4%; (c) 6%

На рис. 2 представлена динамика изменения содержания редуцирующих веществ в питательной среде на основе арабиногалактана при культивировании различных штаммов *T. moniliiforme*. Очевидно, что наблюдаемый для всех анализируемых штаммов *T. moniliiforme* в первые сутки культивирования рост содержания редуцирующих веществ в питательной среде связан с отщеплением клетками микроорганизма от галактозного остова моносахаридов – шестиуглеродных пираноз и пятиуглеродных фураноз. На вторые сутки культивирования в среде не наблюдается увеличения содержания редуцирующих веществ в культуральной жидкости, т.к. в питательной среде начинает наблюдаться нехватка свободных сахаров и легкодоступных для отщепления боковых пиранозных и фуранозных цепей арабиногалактана, представленных арабинозой и галактозой. Начиная с 3 суток и вплоть до 6 суток культивирования происходит постепенное увеличение концентрации редуцирующих веществ в культуральной жидкости, очевидно, в результате глубокого гидролиза молекулы арабиногалактана. Увеличение концентрации редуцирующих веществ в этот временной промежуток соответствовало логарифмической фазе роста культуры, в которой происходит активная пролиферация клеток и рост биомассы.

Увеличение концентрации редуцирующих веществ в питательной среде в отсутствие внешнего источника углеводов является явным свидетельством наличия у дрожжеподобных грибов *T. moniliiforme* β -галактозидазной активности. Способность базидиомицетов гидролизовать арабиногалактан показана ранее [Галяутдинова и др., 2016]. Отсутствие роста концентрации редуцирующих веществ в последние сутки культивирования, очевидно, связано с истощением арабиногалактозного субстрата.

Поскольку наличие β -галактозидазного ферментного комплекса у дрожжеподобных грибов *T. moniliiforme* косвенно было показано по увеличению концентрации редуцирующих веществ в культуральной жидкости, следующим этапом исследований стало определение β -галактозидазной активности у данных микроорганизмов (рис. 3). Известно, что клетки дрожжевых культур продуцируют внутриклеточные β -галактозидазы, представленные олигомерами с молекулярной массой 200–600 кДа и оптимумом pH 6,8–7,2, активаторами фермента являются ионы магния [Рябцева, Скрипнюк, 2014], которые в виде примесей, видимо, присутствовали в арабиногалактане [Кушеев, 2018].

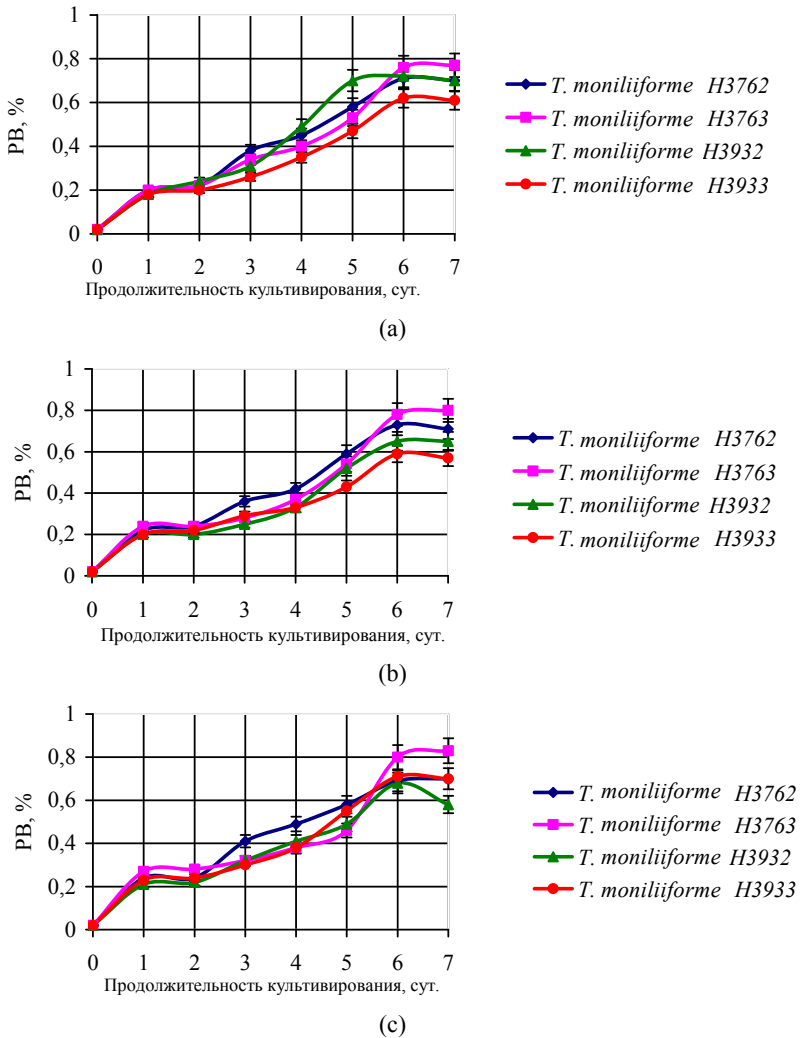


Рис. 2. Влияние продолжительности культивирования *T. moniliiforme* на содержание редуцирующих веществ в питательной среде на основе арабиногалактана в концентрации: (а) 2%; (б) 4%; (с) 6%

Fig. 2. Effect of *T. moniliiforme* cultivation time on the content of reducing substances in a nutrient medium based on arabinogalactan at a concentration: (a) 2%; (b) 4%; (c) 6%

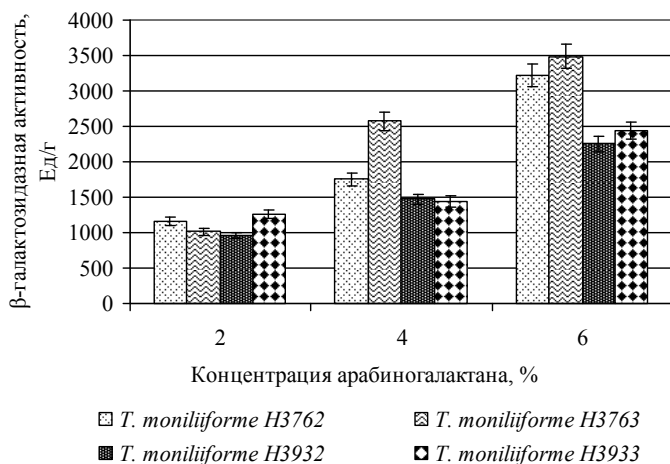


Рис. 3. Зависимость β -галактозидазной активности *T. moniliiforme* от концентрации арабиногалактана в питательной среде

Fig. 3. Dependence of *T. moniliiforme* β -galactosidase activity on the arabinogalactan concentration in the nutrient medium

Как видно из данных, представленных на рис. 3, для всех анализируемых штаммов *T. moniliiforme* характерно увеличение β -галактозидазной активности при увеличении концентрации арабиногалактана в питательной среде. При концентрации арабиногалактана 2% β -галактозидазная активность исследуемых штаммов была сопоставимой. При увеличении концентрации арабиногалактана до 4% β -галактозидазная активность штамма *T. moniliiforme* H₃₇₆₃ была в 1,5 раза выше, чем у других штаммов. При концентрации арабиногалактана 6% штамм *T. moniliiforme* H₃₇₆₃ также демонстрировал наибольшую среди всех штаммов ферментативную активность, однако сравнимые результаты при такой концентрации арабиногалактана были получены и для штамма *T. moniliiforme* H₃₇₆₂. Полученные результаты доказывают, что дрожжеподобные грибы *T. moniliiforme* способны ассимилировать даже такой сложный субстрат как арабиногалактан в отсутствие простых сахаров в питательной среде.

Были определены кинетические характеристики роста *T. moniliiforme* при культивировании на питательных средах на основе арабиногалактана, а именно удельная скорость роста, продолжительность генерации и выход биомассы (табл. 1). Вышеназванные показатели продуктивности культур дрожжеподобных грибов рассматривались в контексте пригодности для

получения кормового белка. В настоящее время в качестве промышленных продуцентов кормового белка широко используются следующие представители дрожжеподобных грибов: *Candida scottii*, *Hansenula anomala*, *Trichosporon cutaneum* [Ручай, Гребенчикова, 2014]. Поскольку среди наиболее продуктивных культур есть представитель р. *Trichosporon spp.*, то авторами было выдвинуто предположение о возможности использования исследуемых штаммов *T. moniliiforme* в качестве источника кормового белка. Известно, что белок кормовых дрожжей переваривается в организме животных на 95%. Источником углерода для образования кормовой биомассы в данной работе служил арабиногалактан, который под действием β -галактозидазы дрожжеподобных грибов расщеплялся до простых сахаров галактозы и арабинозы. Таким образом, полученная дрожжевая биомасса является потенциальным источником кормового белка, а микробиологическая утилизация арабиногалактана – вторичного ресурса целлюлозно-бумажной промышленности – новой ступенью биорефайнинга древесины.

Таблица 1

**Кинетические характеристики роста *T. moniliiforme*
при культивировании на питательной среде на основе арабиногалактана**
**Growth kinetic characteristics of *T. moniliiforme* cultivated
on a nutrient medium based on arabinogalactan**

Штамм	Показатели*	Концентрация арабиногалактана в питательной среде, %		
		2	4	6
<i>Trichosporon moniliiforme</i> Н ₃₇₆₂	μ , ч ⁻¹	0,047±0,005	0,047±0,005	0,045±0,005
	Q, ч	14,7±0,7	14,7±0,7	15,4±0,8
	B, %	6,2±0,3	7,3±0,4	7,8±0,4
<i>Trichosporon moniliiforme</i> Н ₃₇₆₃	μ , ч ⁻¹	0,046±0,005	0,047±0,005	0,045±0,005
	Q, ч	15,1±0,8	14,7±0,7	15,4±0,8
	B, %	8,6±0,1	10,1±0,5	11,8±0,6
<i>Trichosporon moniliiforme</i> Н ₃₉₃₂	μ , ч ⁻¹	0,042±0,005	0,046±0,005	0,043±0,005
	Q, ч	16,5±0,8	15,0±0,8	16,4±0,8
	B, %	5,7±0,3	6,0±0,3	5,8±0,3
<i>Trichosporon moniliiforme</i> Н ₃₉₃₃	μ , ч ⁻¹	0,043±0,005	0,042±0,005	0,043±0,005
	Q, ч	16,1±0,8	16,5±0,8	16,1±0,8
	B, %	6,1±0,3	6,2±0,3	6,6±0,3

Примечание: * μ – удельная скорость роста; Q – продолжительность генерации; B – выход биомассы дрожжеподобных грибов

Было установлено, что наиболее продуктивны при культивировании на питательных средах с арабиногалактаном штаммы дрожжеподобных грибов *T. moniliiforme* Н₃₇₆₃ и *T. moniliiforme* Н₃₇₆₂. В свою очередь, кинетические характеристики и выход биомассы для штаммов *T. moniliiforme* Н₃₉₃₂ и *T. moniliiforme* Н₃₉₃₃ уступают вышеназванным штаммам. Поскольку основной задачей данной работы являлось установление возможности микробиологической деструкции арабиногалактана с целью получения кормового продукта, то наиболее перспективным источником кормового белка среди проанализированных штаммов дрожжеподобных грибов следует назвать штамм *T. moniliiforme* Н₃₇₆₃, для которого был получен наибольший выход биомассы.

В работах [Торшков, 2010; Фомичев и др., 2017; Никанова, 2019] было показано благоприятное влияние арабиногалактана на прирост живой биомассы молодняка сельскохозяйственных животных (поросят, телят, крольчат), которых только начинали переводить с молочного кормления на комбикорма, соответственно, в желудочно-кишечном тракте этих животных оставались жизнеспособные бифидобактерии и лактобациллы. Поскольку данные микроорганизмы ответственны за расщепление лактозы в кишечнике млекопитающих в период молочного кормления, то вырабатываемая этими микроорганизмами β -галактозидаза (лактаза) способна расщеплять и гликозидные связи в молекуле арабиногалактана. Однако для животных, для которых не характерно вскармливание молоком (птица, рыба), прирост живой массы наблюдался лишь при использовании биофлавоноидного комплекса (дигидрокверцетина и арабиногалактана) [Торшков, 2010; Омаров, Агаркова, 2021]. Подобный эффект совместного действия арабиногалактана и дигидрокверцетина был описан и для поросят-отъемышей [Никанова, 2019]. Следовательно, можно сделать вывод, что интактный арабиногалактан в отсутствие микроорганизмов с β -галактозидазной ферментной системой животными усваивается незначительно. Поэтому для повышения усвояемости кормовой добавки арабиногалактан подвергался предварительной микробиологической ферментации дрожжеподобными грибами *T. moniliiforme* (рис. 4).

Как видно из данных, представленных на рис. 4, выход кормового продукта повышается с увеличением концентрации арабиногалактана в питательной среде, хотя разница между выходами кормового продукта, полученными при микробиологической ферментации 4% и 6% арабиногалактана, статистически незначительна. Значения выхода кормового продукта, полученного различными штаммами *T. moniliiforme* на одинаковых

концентрациях арабиногалактана, также сопоставимы. С увеличением концентрации арабиногалактана в питательной среде существенное увеличение выхода биомассы наблюдается лишь для штамма *T. moniliiforme* Н₃₇₆₃, который, как было показано выше, обладает и наибольшей β-галактозидазной активностью. У штамма *T. moniliiforme* Н₃₇₆₂ зависимость выхода биомассы от концентрации арабиногалактана в питательной среде выражена в гораздо меньшей степени, тогда как у штаммов *T. moniliiforme* Н₃₉₃₂ и *T. moniliiforme* Н₃₉₃₃ статистически значимых различий в количестве полученной биомассы на средах с разной концентрацией арабиногалактана выявлено не было.

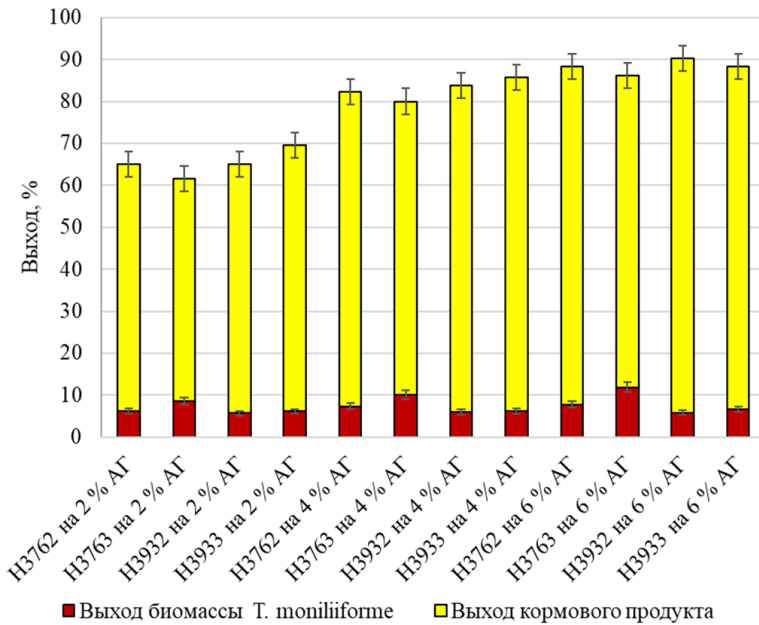


Рис. 4. Выход кормового продукта и биомассы *T. moniliiforme* при культивировании на питательных средах на основе арабиногалактаном (АГ)

Fig. 4. Yield of feed product and *T. moniliiforme* biomass after its cultivation on nutrient media based on arabinogalactan (AG)

Данный кормовой продукт, по мнению авторов, должен обладать повышенной биологической ценностью и усвояемостью, т.к. будет содержать кормовой белок дрожжевого происхождения, редуцирующие вещества

(простые сахара галактозу и арабинозу), возникшие в результате ферментативного гидролиза арабиногалактана β -галактозидазой *T. moniliiforme* (табл. 2). Также в кормовом продукте будут содержаться минеральные вещества и продукты неполного гидролиза арабиногалактана – олигомерные углеводные молекулы, легче поддающиеся деструкции ферментами желудочно-кишечного тракта сельскохозяйственных животных по сравнению с нативным арабиногалактаном.

Таблица 2

Компонентный состав кормового продукта на основе арабиногалактана**Component composition of a feed product based on arabinogalactan**

Штамм	Концентрация арабиногалактана в питательной среде, %	Состав кормового продукта, г/100 г		
		арабиногалактан	редуцирующие вещества	кормовой белок
<i>T. moniliiforme</i> Н ₃₇₆₂	2	89,4±4,5	1,1±0,1	9,5±0,5
	4	90,2±4,5	0,9±0,1	8,9±0,4
	6	90,4±4,5	0,8±0,1	8,8±0,4
<i>T. moniliiforme</i> Н ₃₇₆₃	2	84,7±4,2	1,3±0,1	14,0±0,7
	4	86,4±4,3	1,0±0,1	12,6±0,6
	6	85,3±4,3	1,0±0,1	13,7±0,7
<i>T. moniliiforme</i> Н ₃₉₃₂	2	90,1±4,5	1,1±0,1	8,8±0,4
	4	92,0±4,6	0,8±0,1	7,2±0,4
	6	93,0±4,7	0,6±0,1	6,4±0,3
<i>T. moniliiforme</i> Н ₃₉₃₃	2	90,3±4,5	0,9±0,1	8,8±0,4
	4	92,1±4,6	0,7±0,1	7,2±0,4
	6	91,7±4,6	0,8±0,1	7,5±0,4

Таким образом, установлено, что кормовой продукт содержал дрожжевой белок и редуцирующие вещества в наибольшей степени при использовании для биодеструкции арабиногалактана штамма *T. moniliiforme* Н₃₇₆₃, в меньшей степени – штамма *T. moniliiforme* Н₃₇₆₂. Использование для микробиологической деструкции арабиногалактана штаммов *T. moniliiforme* Н₃₉₃₂ и *T. moniliiforme* Н₃₉₃₃ нецелесообразно, т.к. эти штаммы дают наименьший выход кормового белка и редуцирующих веществ на всех проанализированных концентрациях арабиногалактана.

Заключение. Определена возможность использования арабиногалактана в качестве источника углерода в составе питательных сред для культивирования дрожжеподобных грибов *Trichosporon moniliiforme*. Показана перспективность использования дрожжеподобных грибов *T. moniliiforme* Н₃₇₆₃ для микробиологической деструкции арабиногалактана с получением кормового продукта, содержащего кормовой белок, редуцирующие вещества, β -галактозидазу и интактный арабиногалактан.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Антонова Г.Ф., Усов А.И. Структура арабиногалактана древесины лиственницы сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.) // Биоорганическая химия. 1984. Т. 10, № 12. С. 1664–1669.

Бабьева И.П., Чернов И.Ю. Биология дрожжей. М.: Т-во науч. изд. КМК, 2004. 239 с.

Большакова Н.Н., Сушкова О.В., Волкова О.А. Распределение арабиногалактана и дигидрокверцетина в древесине лиственницы лесосырьевой базы Усть-Илимского лесопромышленного комплекса // Химия древесины. 1991. № 4. С. 85–90.

Галяутдинова И.А., Канарский А.В., Канарская З.А., Кузнецов А.Г. Эффективность культивирования дрожжей *Debaryomyces hansenii* и *Guehomyces pullulans* на питательных средах из арабиногалактана // Вестник технологического университета. 2016. Т. 19, № 16. С. 96–98.

Кузнецов А.Г., Махотина Л.Г., Аким Э.Л. Использование биополимера арабиногалактана при производстве целлюлозных композиционных материалов // Дизайн. Материалы. Технология. 2012. №5 (25) С. 82–84.

Куликова Н.А., Кляйн О.И., Степанова Е.В., Королева О.В. Использование базидиальных грибов в технологиях переработки и утилизации техногенных отходов: фундаментальные и прикладные аспекты (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. 2011. Т. 47, № 6. С. 619–634.

Кушеев Ч.Б. Разработка ветеринарного препарата на основе биологически активных соединений биомассы лиственницы: отчёт о НИР. Иркутск: ИГАУ, 2018. 99 с.

Митина Г.В., Сокорнова С.В., Махотина Л.Г., Кузнецов А.Г., Аким Э.Л. Перспективы использования арабиногалактана для культивирования высших грибов и микроорганизмов – продуцентов средств защиты растений // Вестник защиты растений. 2012. № 3. С. 28–32.

Митина Г.В., Сокорнова С.В., Титова Ю.А., Махотина Л.Г., Кузнецов А.Г., Первушин А.Л. Использование макро- и микромицетов в биоконверсии растительного сырья // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. 2013. №163. С. 69–79.

Морозова Ю.А., Скворцов Е.В., Алимова Ф.К., Канарский А.В. Биосинтез ксиланаз и целлюлаз грибами рода *Trichoderma* на послеспиртовой барде // Вестник технологического университета. 2012. Т. 15, № 19. С. 120–122.

Мошкова Т.Б., Бойцова Т.А. Биотрансформация лигнинсодержащих отходов химической переработки древесины под влиянием дереворазрушающих базидиомицетов // Север: Экология. Екатеринбург, 2000. С. 117–127.

Неверова Н.А., Беловежец Л.А., Медведева Е.Н., Бабкин В.А. Метаболизм арабиногалактана лиственницы сибирской дрожжами *Saccharomyces cerevisiae* // Химия растительного сырья. 2010. №4. С. 57–62.

Никанова Л.А. Использование дигидрокверцетина и арабиногалактана в питании порослят-отъемышей // Вестник АПК Верхневолжья. 2019. № 3 (47). С. 47–50. DOI: 10.35694/YARCX.2019.47.3.010.

Омаров М.О., Агаркова Н.В. Дигидрокверцетин и арабиногалактан в стартерных кормах для осетровых рыб // Сборник научных трудов КНЦЗВ. 2021. Т. 10, № 1. С. 178–181. DOI: 10.48612/dab8-4xzg-dhe3.

Польгалина Г.В., Чередниченко В.С., Римарева Л.В. Определение активности ферментов: справочник. М.: ДеЛи принт, 2003. 375 с.

Практикум по микробиологии / под ред. А.И. Нетрусова. М.: Академия, 2005. 608 с.

Ручай Н.С., Гребенчикова И.А. Технология микробного синтеза. Минск: БГТУ, 2014. 167 с.

Рябцева С.А., Скрипнюк А.А. Современные методы получения β-галактозидаз // Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 3. С. 197–204.

Скиба Е.А. Технология производства дрожжей. Бийск: Изд-во Алтайского государственного технического университета, 2010. 121 с.

Ториков А.А. Влияние арабиногалактана на продуктивные качества цыплят-бройлеров // Известия ОГАУ. 2010. №27-1. С. 203–205.

Фоменко И.А., Дегтярев И.А., Иванова Л.А., Машенцева Н.Г. Получение белкового концентрата из дрожжевой биомассы *Kluyveromyces marxianus* Van der Walt (1965) // Сельскохозяйственная биология. 2021. Т. 56, № 6. С. 1172–1182. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.6.1172rus.

Фомичев Ю.П., Никанова Л.А., Дорожкин В.И., Ториков А.А., Романенко А.А., Еськов Е.К., Семенова А.А., Гоноцкий В.А., Дунаев А.В., Ярошевич Г.С., Лашин С.А., Стольная Н.И. Дигидрокверцетин и арабиногалактан – природные биорегуляторы в жизнедеятельности человека и животных, применение в сельском хозяйстве и пищевой промышленности. М.: Научная библиотека, 2017. 702 с.

Choudhary D.K., Johri B.N. Basidiomycetous Yeasts: Current Status // Yeast Biotechnology: Diversity and Applications. Springer, 2009. Chapter 2. P. 19–46. DOI: 10.1007/978-1-4020-8292-4_1.

Pokatilov F.A., Akamova H.V., Kizhnyaev V.N. Synthesis and properties of tetrazole-containing polyelectrolytes based on chitosan, starch, and arabinogalactan // E-Polymers. 2022. P. 203–213. DOI:10.1515/epoly-2022-0026.

Ramos J.M., Cuenca-Estrella M., Gutierrez F., Elia M., Rodriguez-Tudela J.L. Clinical Case of Endocarditis due to *Trichosporon inkin* and Antifungal Susceptibility Profile of the Organism // *Journal of Clinical Microbiology*. 2004. P. 2341–2344. DOI: 10.1128/JCM.42.5.2341-2344.2004.

Zvereva M.V., Zhmurova A.V. Synthesis, Structure, and Spectral Properties of ZnTe-Containing Nanocomposites Based on Arabinogalactan // *Russian Journal of General Chemistry*. 2022. P. 1995–2004. DOI: 10.1134/S1070363222100139.

References

Antonova G.F., Usov A.I. Structure of arabinogalactan from Siberian larch wood (*Larix sibirica* Ledeb.). *Bioorganic Chemistry*, 1984, vol. 10, no. 12, pp. 1664–1669. (In Russ.)

Bab'eva I.P., Chernov I.Yu. Biology of yeast. Moscow: Scientific Publications Association KMK, 2004. 239 p. (In Russ.)

Bolshakova N.N., Sushkova O.V., Volkova O.A. Distribution of arabinogalactan and dihydroquercetin in larch wood of the forest raw material base of the Ust-Ilimsk Forest Industry Complex. *Wood Chemistry*, 1991, no. 4, pp. 85–90. (In Russ.)

Choudhary D.K., Johri B.N. Basidiomycetous Yeasts: Current Status. *Yeast Biotechnology: Diversity and Applications*. Springer, 2009, chapter 2, pp. 19–46. DOI: 10.1007/978-1-4020-8292-4_1.

Fomenko I.A., Degtyarev I.A., Ivanova L.A., Mashenzeva N.G. Obtaining protein concentrate from yeast biomass *Kluyveromyces marxianus* Van der Walt (1965). *Agricultural biology*, 2021, vol. 56, no. 6, pp. 1172–1182. DOI: 10.15389/agrobiology.2021.6.1172rus. (In Russ.)

Fomichev Yu.P., Nikanova L.A., Dorozhkin V.I., Torshkov A.A., Romanenko A.A., Eskov E.K., Semenova A.A., Gonotsky V.A., Dunaev A.V., Yaroshevich G.S., Lashin S.A., Stolnaya N.I. Dihydroquercetin and arabinogalactan are natural bioregulators in human and animal life, used in agriculture and the food industry. Moscow: Scientific Library, 2017. 702 p. (In Russ.)

Galyautdinova I.A., Kanarskiy A.V., Kanarskaya Z.A., Kuznetsov A.G. Cultivation efficiency of yeast *Debaryomyces hansenii* and *Guehomyces pullulans* on nutrient media from arabinogalactan. *Bulletin of the Technological University*, 2016, vol. 19, no. 16, pp. 96–98. (In Russ.)

Kulikova N.A., Klein O.I., Stepanova E.V., Koroleva O.V. Use of basidiomycetes in technologies of processing and utilization of technogenic waste: fundamental and applied aspects (review). *Applied biochemistry and microbiology*, 2011, vol. 47, no. 6, pp. 619–634. (In Russ.)

Kusheev Ch.B. Development of a veterinary drug based on biologically active compounds of larch biomass: research report. Irkutsk: Irkutsk State Agrarian University, 2018. 99 p. (In Russ.)

Kuznetsov A.G., Makhotina L.G., Akim E.L. Use of arabinogalactan biopolymer in the production of cellulose composite materials. *Design. Materials. Technology*, 2012, no. 5 (25), pp. 82–84. (In Russ.)

Mitina G.V., Sokornova S.V., Makhotina L.G., Kuznetsov A.G., Akim E.L. Prospects for the use of arabinogalactan for the cultivation of higher fungi and microorganisms – producers of plant protection products. *Bulletin of Plant Protection*, 2012, no. 3, pp. 28–32. (In Russ.)

Mitina G.V., Sokornova S.V., Titova Yu.A., Makhotina L.G., Kuznetsov A.G., Pervushin A.L. Use of macro- and micromycetes in bioconversion of plant raw materials. *Bulletin of the Herzen State Pedagogical University*, 2013, no. 163, pp. 69–79. (In Russ.)

Morozova Yu.A., Skvortsov E.V., Alimova F.K., Kanarskiy A.V. Biosynthesis of xylanases and cellulases by fungi of the genus *Trichoderma* on post-alcohol stillage. *Bulletin of the Technological University*, 2012, vol. 15, no. 19, pp. 120–122. (In Russ.)

Moshkova T.B., Boytsova T.A. Biotransformation of lignin-containing waste from chemical wood processing under the influence of wood-destroying basidiomycetes. *North: Ecology*. Yekaterinburg, 2000, pp. 117–127. (In Russ.)

Neverova N.A., Belovezhets L.A., Medvedeva E.N., Babkin V.A. Metabolism of Siberian larch arabinogalactan by *Saccharomyces cerevisiae* yeast. *Chemistry of plant raw materials*, 2010, no. 4, pp. 57–62. (In Russ.)

Nikanova L.A. The use of dihydroquercetin and arabinogalactan in the diet of weaned piglets. *Bulletin of the APK of the Verkhnevolzhye*, 2019, no. 3 (47), pp. 47–50. DOI 10.35694/YARCX.2019.47.3.010. (In Russ.)

Omarov M.O., Agarkova N.V. Dihydroquercetin and arabinolactan in starter feed for sturgeon. *Collection of scientific papers of the KSCZV*, 2021, vol. 10, no. 1, pp. 178–181. DOI: 10.48612/dab8-4xzg-dhe3. (In Russ.)

Pokatilov F.A., Akamova H.V., Kizhnyayev V.N. Synthesis and properties of tetrazole-containing polyelectrolytes based on chitosan, starch, and arabinogalactan. *E-Polymers*, 2022, pp. 203–213. DOI:10.1515/epoly-2022-0026.

Polygalina G.V., Cherednichenko V.S., Rimareva L.V. Determination of enzyme activity: handbook. Moscow: DeLi print, 2003. 375 p. (In Russ.)

Practical training in microbiology / edited by A.I. Netrusov. Moscow: Academy, 2005. 608 p. (In Russ.)

Ramos J.M., Cuenca-Estrella M., Gutierrez F., Elia M., Rodriguez-Tudela J.L. Clinical Case of Endocarditis due to *Trichosporon inkin* and Antifungal Susceptibility Profile of the Organism. *Journal of Clinical Microbiology*, 2004, pp. 2341–2344. DOI: 10.1128/JCM.42.5.2341-2344.2004.

Ruchai N.S., Grebenchikova I.A. Microbial synthesis technology. Minsk: BSTU, 2014. 167 p. (In Russ.)

Ryabtseva S.A., Skripnyuk A.A. Modern methods for producing β -galactosidase. *Science. Innovations. Technologies*, 2014, no. 3, pp. 197–204. (In Russ.)

Skiba E.A. Technology of yeast production. Biysk: Altai State Technical University, 2010. 121 p. (In Russ.)

Torshkov A.A. Effect of arabinogalactan on the productive qualities of broiler-chicken. *Izvestia OSAU*, 2010, no. 27-1, pp. 203–205. (In Russ.)

Zvereva M.V., Zhmurova A.V. Synthesis, Structure, and Spectral Properties of ZnTe-Containing Nanocomposites Based on Arabinogalactan. *Russian Journal of General Chemistry*, 2022, pp. 1995–2004. DOI:10.1134/S1070363222100139.

Материал поступил в редакцию 25.02.2025

Галиева А.Р., Крякунова Е.В., Мингазова Л.А., Канарская З.А., Канарский А.В., Кузнецов А.Г. Получение кормового продукта на основе арабиногалактана и биомассы дрожжеподобных грибов // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2025. Вып. 253. С. 321–340. DOI: 10.21266/2079-4304.2025.253.321-340

Одной из наиболее острых проблем современного животноводства является обеспечение сбалансированных рационов для кормления сельскохозяйственных животных. Существующий в настоящее время дефицит белка приводит не только к перерасходу кормов, но и к снижению продуктивного потенциала животных. Применение микробной биомассы, в частности, биомассы базидиальных грибов, является перспективным направлением решения проблемы белкового дефицита. В статье базидиальные грибы рассматриваются в качестве перспективных деструкторов отходов переработки древесины, а именно арабиногалактана – природного полисахарида с разветвленной структурой. В работе была показана возможность использования арабиногалактана в качестве источника углерода в составе питательных сред для культивирования дрожжеподобных грибов *Trichosporon moniliiforme*. Было подтверждено наличие у *T. moniliiforme* β-галактозидазного ферментного комплекса, необходимого для расщепления молекулы арабиногалактана. В качестве источника кормового белка в составе кормового продукта наиболее перспективным штаммом дрожжеподобных грибов является штамм *T. moniliiforme* Н₃₇₆₃, продемонстрировавший наибольший выход биомассы и редуцирующих веществ при культивировании на питательных средах с различными концентрациями арабиногалактана. Установлено, что с увеличением концентрации арабиногалактана в питательной среде с 2% до 4% наблюдается увеличение выхода кормового продукта, но дальнейшее увеличение концентрации арабиногалактана до 6% не дает статистически значимого увеличения выхода кормового продукта. Таким образом, была показана перспективность использования дрожжеподобных грибов штамма *T. moniliiforme* Н₃₇₆₃ для микробиологической деструкции арабиногалактана с получением кормового продукта, содержащего кормовой белок, редуцирующие вещества, β-галактозидазу и интактный арабиногалактан.

Ключевые слова: арабиногалактан, кормовой продукт, β -галактозидаза, дрожжеподобные грибы *Trichosporon moniliiforme*, редуцирующие вещества.

Galieva A.R., Kryakunova E.V., Mingazova L.A., Kanarskaya Z.A., Kanarskiy A.V., Kuznetsov A.G. Obtaining of a feed product based on arabinogalactan and biomass of yeast-like fungi. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2025, iss. 253, pp. 321–340 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2025.253.321-340

One of the most pressing problems of modern animal husbandry is to provide balanced diets for feeding farm animals. The current protein deficiency leads not only to overconsumption of feed, but also to a decrease in the productive potential of animals. The use of microbial biomass, in particular the biomass of basidiomycetes, is a promising direction for solving the problem of protein deficiency. The article is considered basidiomycetes as promising destructors of wood processing waste, namely, arabinogalactan, a natural polysaccharide with a branched structure. The work demonstrated the possibility of using arabinogalactan as a carbon source in nutrient media for cultivating yeast-like fungi *Trichosporon moniliiforme*. The presence of a β -galactosidase enzyme complex in *T. moniliiforme*, which is necessary for the breakdown of the arabinogalactan molecule, was confirmed. As a source of feed protein in the feed product, the most promising strain of yeast-like fungi is the strain *T. moniliiforme* H3763, which demonstrated the highest yield of biomass and reducing substances after cultivation on nutrient media with different concentrations of arabinogalactan. It was found that the increasing of the arabinogalactan concentration in the nutrient medium from 2% to 4% is corresponding to an increase in the yield of the feed product. A further increasing in the concentration of arabinogalactan to 6% does not provide a statistically significant increase in the yield of the feed product. Thus, it was shown the prospect for using yeast-like fungi of the strain *T. moniliiforme* H₃₇₆₃ for the microbiological destruction of arabinogalactan for obtaining a feed product, which will contain feed protein, reducing substances, β -galactosidase and intact arabinogalactan.

Keywords: arabinogalactan, feed product, β -galactosidase, yeast-like fungi *Trichosporon moniliiforme*, reducing substances.

ГАЛИЕВА Айгуль Рафиковна – ассистент кафедры пищевой инженерии Казанского национального исследовательского технологического университета.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия.
E-mail: af.signal@mail.ru

GALIEVA Aigul R. – assistant of the Department of Food Engineering, Kazan National Research Technological University.

420015, K. Marksa str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: af.signal@mail.ru

КРЯКУНОВА Елена Вячеславовна – доцент кафедры пищевой инженерии Казанского национального исследовательского технологического университета, кандидат биологических наук. SPIN-код: 1321-1832. ORCID: 0000-0003-4563-9847.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: Oscillatoria@rambler.ru.

KRYAKUNOVA Elena V. – PhD (Biology), Associate Professor, Department of Food Engineering, Kazan National Research Technological University. SPIN-code: 1321-1832. ORCID: 0000-0003-4563-9847.

420015. K. Marksa str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: Oscillatoria@rambler.ru.

МИНГАЗОВА Лейсан Азатовна – старший преподаватель кафедры пищевой инженерии Казанского национального исследовательского технологического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 9532-4010. ORCID: 0000-0003-3289-3977.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: zleisan1@mail.ru.

MINGAZOVA Leysan A. – PhD (Technical), senior lecturer of the Department of Food Engineering, Kazan National Research Technological University. SPIN-code: 9532-4010. ORCID: 0000-0003-3289-3977.

420015. K. Marksa str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: zleisan1@mail.ru

КАНАРСКАЯ Зося Альбертовна – доцент кафедры пищевой биотехнологии Казанского национального исследовательского технологического университета, кандидат технических наук. SPIN-код: 2787-1694. ORCID: 0000-0002-8194-6185.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: zosya_kanarskaya@mail.ru

KANARSKAYA Zosya A. – PhD (Technical), Associate Professor, Department of Food Biotechnology, Kazan National Research Technological University. SPIN-code: 2787-1694. ORCID: 0000-0002-8194-6185.

420015. K. Marksa str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: zosya_kanarskaya@mail.ru

КАНАРСКИЙ Альберт Владимирович – профессор кафедры пищевой биотехнологии Казанского национального исследовательского технологического университета, доктор технических наук, профессор. SPIN-код: 2196-2000. ORCID: 0000-0002-3541-2588.

420015, ул. К. Маркса, д. 68, г. Казань, Республика Татарстан, Россия. E-mail: alb46@mail.ru

KANARSKIY Albert V. – DSc (Technical), Professor of the Department of Food Biotechnology of the Kazan National Research Technological University. SPIN-code: 2196-2000. ORCID: 0000-0002-3541-2588.

420015. K. Marksa str. 68. Kazan. Republic of Tatarstan. Russia. E-mail: alb46@mail.ru

КУЗНЕЦОВ Антон Геннадьевич – научный сотрудник кафедры технологии целлюлозы и композиционных материалов Высшей школы технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета промышленных технологий и дизайна, кандидат технических наук. SPIN-код: 6118-8553. ORCID: 0000-0003-1476-1065.

198095, ул. Ивана Черных, д. 4, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: anton.kuznetsov@hotmail.com

KUZNETSOV Anton G. – PhD (Technical), Researcher at Pulp and Composites Technology department, Higher School of Technology and Energy of Saint Petersburg State University of Industrial Technologies and Design. SPIN-code: 6118-8553. ORCID: 0000-0003-1476-1065.

198095. Ivana Chernykh str. 4. St. Petersburg. Russia. E-mail: anton.kuznetsov@hotmail.com.