

Оригинальная статья / Original article

УДК 661.746.2:663.1:633.13(045)

DOI: <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-99-106>



Получение молочной кислоты из шелухи овса

© Н.А. Шавыркина, Е.А. Скиба

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН,
г. Бийск, Российская Федерация

Резюме: Полилактиды занимают лидирующую позицию в технологии получения биоразлагаемых полимеров для производства упаковочных материалов. В последнее время все чаще предлагается использовать дешевое целлюлозосодержащее сырье для получения прекурсора полилактидов – молочной кислоты. Авторами настоящей работы впервые в качестве сырья использована шелуха овса. Предварительная химическая обработка шелухи овса проведена в две стадии авторскими способами с использованием разбавленных растворов азотной кислоты и гидроксида натрия с получением технической целлюлозы. Далее техническая целлюлоза была подвергнута ферментативному гидролизу, после чего полученный преимущественно глюкозный ферментативный гидролизат сбраживался продуцентом *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. Исследовано влияние на эффективность молочнокислого брожения активной кислотности среды, активизации закваски и дозирования дрожжевого экстракта. По результатам исследований рекомендуется поддерживать активную кислотность культуральной жидкости на уровне 6,5 ед. pH в течение всего процесса брожения, что позволяет повысить выход молочной кислоты в 1,7 раза по сравнению с процессом без корректировки pH. Показано, что активизация закваски путем пересева с молочной среды на глюкозную для переключения ферментативного аппарата продуцента с конверсии лактозы на конверсию глюкозы ускоряет процесс молочнокислого брожения в 2,2 раза и повышает константу сбраживания в 2,7 раза. Установлено, что внесение в среду дрожжевого экстракта в количестве 1% интенсифицирует молочнокислое брожение: процесс молочнокислого брожения ускоряется в 1,8 раза, константа сбраживания увеличивается в 1,4 раза, выход молочной кислоты повышается на 9,6% по сравнению с контролем и составляет 76,7%.

Ключевые слова: шелуха овса, молочная кислота, молочнокислые бактерии, полилактиды, ферментативный гидролизат

Благодарности: Исследование выполнено по бюджетному проекту ИПХЭТ СО РАН «Фундаментальные основы создания интегрированной технологии переработки легковозобновляемого непищевого растительного сырья в востребованные экономикой РФ продукты».

Для цитирования: Шавыркина Н.А., Скиба Е.А. Получение молочной кислоты из шелухи овса. Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2021. Т. 11. N 1. С. 99–106. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-99-106>

Obtaining lactic acid from oat husks

Nadezhda A. Shavyrkina, Ekaterina A. Skiba

Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies SB RAS,
Biysk, Russian Federation

Abstract: Polylactides are increasingly being used as biodegradable polymers in the production of packaging materials. It has been recently proposed to obtain a polylactide precursor – lactic acid – from inexpensive cellulose-containing raw materials. For the first time, the authors of the present work used oat husks for this purpose. Preliminary chemical treatment of oat husks was carried out in two stages using dilute solutions of nitric acid and sodium hydroxide to obtain technical cellulose, which was further subject to enzymatic hydrolysis. The as-obtained glucose enzymatic hydrolysate was fermented by the producer *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*. The effect of the active acidity of the medium, activation of the starter culture and dosage of the yeast extract on the efficiency of lactic acid fermentation was investigated. According to the obtained results, the active acidity of the culture should be maintained at a pH level of 6.5 during the entire fermentation process, which allows the yield of lactic acid to be increased by 1.7 times compared to the process without adjusting the pH. It was shown that the activation of the starter culture using a glucose medium instead of a milk medium, which switches the fermentation process from lactose conversion to glucose conversion, increases the rate of lactic acid fermentation by 2.2 times and the fermentation constant by 2.7 times. It was established that the introduction of yeast extract into the medium in an amount of 1% intensifies

lactic acid fermentation: the process of lactic acid fermentation accelerates by 1.8 times; the fermentation constant increases by 1.4 times; the yield of lactic acid increases by 9.6% compared to the control thus reaching 76.7%.

Keywords: *oat husks, lactic acid, lactic acid bacteria, polylactides, enzymatic hydrolysate*

Acknowledgments. *The research was carried out according to the budget project of IPCET SB RAS "Fundamentals of the creation of an integrated technology for the processing of easily renewable non-food plant raw materials into products demanded by the Russian economy".*

For citation: Shavyrkina NA, Skiba EA. Obtaining lactic acid from oat husks. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2021;11(1): 99–106. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2021-11-1-99-106>

ВВЕДЕНИЕ

Молочная кислота – это высокоценное химическое вещество, которое находит применение в пищевой промышленности (в качестве регулятора кислотности и консерванта), фармацевтике, косметологии, ветеринарии, а наиболее ценным техническим направлением является использование его полимерной формы – полилактида, являющегося основой биоразлагаемых пластмасс. Прогнозируется, что до 2025 г. рынок молочной кислоты продолжит расти, при этом совокупный годовой темп роста составит порядка 18,7% [1, 2]. Благодаря соответствию полилактидов критерию биоразлагаемости они используются в составе всевозможных упаковочных материалов [3–5]. Особую ценность биоразлагаемые полимеры на основе полилактидов приобрели ввиду доказанной возможности их применения в медицине – отрасли, крайне чувствительной к составу используемых материалов [6–9].

Несмотря на то что синтез полилактидов дороже, чем получение полимеров из нефти, экологичность данного производства определяет его несомненную приоритетность, а снижение затрат повышает конкурентоспособность производства. Поэтому отказ от получения полилактидов из пищевого сырья, являющегося либо дорогим, либо скоропортящимся, поиск иных сырьевых источников, а также новых технологических решений является актуальным и востребованным. Одним из самых перспективных направлений является получение полилактидов из непищевого целлюлозосодержащего сырья [2, 10–14].

Шелуха овса как крупнотоннажный целлюлозосодержащий сельскохозяйственный отход, имеющаяся в глобальных объемах, была предложена учеными Института проблем химико-энергетических технологий (ИПХЭТ) СО РАН для биотехнологической трансформации еще в 2012 г. [15], в настоящее время приоритет коллектива признан на международном уровне [16, 17]. В данной работе впервые шелуха овса рассматривается в качестве сырья для получения молочной кислоты.

Производство молочной кислоты основано на биотрансформации углеводов молочнокислыми бактериями в процессе молочнокислого брожения. Молочнокислые бактерии способны метаболизировать углеводы по гетероферментативному пути, конечными продуктами являются молочная кислота (порядка 50% от исходной массы углевода), а также уксусная кислота, этанол, углекислый газ и др. Гомоферментативные молочнокислые бактерии трансформируют гексозы в молочную кислоту практически полностью (порядка 98%). Многие молочнокислые бактерии интенсивно сбраживают пентозы, при этом кроме молочной кислоты образуется равное количество уксусной¹. Поэтому для технологических процессов получения лактата наиболее рационально использовать сырье, содержащее шестиуглеродные моносахариды, и в качестве продуцента применять гомоферментативные молочнокислые бактерии.

Опираясь на полученный нами опыт трансформации шелухи овса в ценные продукты биотехнологического синтеза, для получения молочной кислоты был выбран авторский способ предобработки сырья в две стадии разбавленными растворами азотной кислоты и гидроксида натрия при атмосферном давлении [18]. При этом получается химически чистый субстрат, ферментативный гидролиз которого позволяет получить преимущественно глюкозный гидролизат [14]. Доказано, что именно этот способ предобработки позволяет получить биологически доброкачественную среду, пригодную не только для жизнедеятельности дрожжей, которым свойственна устойчивость к неблагоприятным условиям [19], но и для крайне требовательных и чувствительных к составу питательных сред продуцентов бактериальной целлюлозы [20].

Предпосылкой культивирования молочнокислых бактерий на гидролизных углеводных средах является, помимо прочего, схожесть метаболического пути преобразования глюкозы дрожжами и гомоферментативными молочнокислыми бактериями. Из одного моля глюкозы по пути гликолиза

¹Квасников Е.И., Нестеренко О.А. Молочнокислые бактерии и пути их использования. М.: Наука, 1975. 384 с.

образуется два моля пировиноградной кислоты, затем ферментный комплекс дрожжей проводит декарбоксилирование пировиноградной кислоты до ацетальдегида (пируватдекарбоксилаза), который далее восстанавливается в этанол (алкогольдегидрогеназа), в то время как молочнокислые бактерии восстанавливают пировиноградную кислоту до молочной кислоты посредством лактатдегидрогеназы в одну стадию¹.

Целью данной работы являлось изучение молочнокислого брожения при получении молочной кислоты из шелухи овса. Для достижения поставленной цели было проведено изучение влияния на эффективность молочнокислого брожения таких факторов, как уровень активной кислотности среды, активизация закваски и использование дрожжевого экстракта в качестве стимулятора брожения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Предварительная химическая обработка шелухи овса осуществлялась в две стадии с использованием азотной кислоты и гидроксида натрия, использованы разбавленные 4% масс. растворы, процессы проведены при атмосферном давлении в стандартном емкостном оборудовании объемом 250 л [18]. Далее полученная техническая целлюлоза подвергалась ферментативному гидролизу в ферментере объемом 11 л, условия гидролиза подробно описаны в работе [14]. Концентрация редуцирующих веществ (РВ) после проведения гидролиза составила 41,7 г/л, в том числе пентоз – 1,6 г/л. Полученный нативный ферментативный водный гидролизат технической целлюлозы плодовых оболочек овса использовали как питательную среду. В качестве продуцента был использован штамм *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* 21В 2369 Всероссийской коллекции промышленных микроорганизмов.

Поскольку известно, что молочная кислота как продукт метаболизма бактерий по мере увеличения ее концентрации в среде приводит к ингибированию синтетической способности продуцента, была исследована возможность поддержания постоянного уровня кислотности в течение всего процесса брожения. Брожение велось в течение 9 суток при температуре 37 °С. Каждые сутки производили корректировку кислотности среды до уровня 6,5 ед. рН раствором гидроксида кальция концентрацией 10% масс. Для сравнения в контрольном опыте проводили сбраживание питательной среды без ежесуточной корректировки рН. Продуцент вносили в среду стерильного гидролизата в количестве 10% от объема гидролизата.

Далее была проведена серия экспериментов, направленных на повышение эффективности

конверсии редуцирующих веществ в молочную кислоту. Для этого подготовку посевного материала производили разными способами и вносили в питательную среду факторы роста.

Приготовление посевного материала производилось двумя способами:

– *одно субкультивирование*. В стерильное солодовое сусло (рН = 6,5) вносили 10% об. инокулята *L. bulgaricus*, полученного на стерилизованном молоке. Молоко натуральное приобретали в частных хозяйствах г. Бийска, затем подвергали сепарации до уровня жирности не более 0,5% масс. и автоклавировали при избыточном давлении 0,5 атм. в течение 30 мин. Далее молоко охлаждали до температуры культивирования (41 °С), вносили закваску *L. bulgaricus* и термостатировали при указанной температуре в течение 6–8 ч до получения плотного однородного сгустка. Культивирование продуцента на солодовом сусле проводили 24 ч при температуре 41 °С в статических условиях;

– *четыре субкультивирования*. С целью реактивации посевной культуры провели три субкультивирования инокулята на среде стерилизованного молока (каждое субкультивирование в течение 12 ч при 41 °С) и одно субкультивирование на среде стерильного солодового сусла (для переключения ферментов продуцента с утилизации лактозы на утилизацию глюкозы), субкультивирование проводили статически в течение 24 ч при температуре 41 °С.

Подготовленный двумя способами посевной материал вносили в количестве 10% от объема питательной среды в стерилизованный ферментативный гидролизат плодовых оболочек овса, стабилизированный по активной кислотности (6,5 ед. рН).

Как известно, молочнокислые бактерии чувствительны к факторам роста, поэтому была изучена динамика молочнокислого брожения гидролизных сред при наличии в их составе дрожжевого экстракта (д.э.) в концентрациях 1 и 3% масс. от объема среды. В состав дрожжевого экстракта входят витамины группы В и аминный азот, которые стимулируют метаболизм молочнокислых бактерий¹. В качестве контрольного использовался образец, в который дрожжевой экстракт не вносился. В данном опыте использовался посевной материал, активированный четырьмя субкультивированиями, дозировка составила 10% об. Молочнокислое брожение контролировалось по убыли РВ в среде и по накоплению продукта реакции – молочной кислоты. Концентрация РВ в процессе молочнокислого брожения определялась спектрофотометрически на UNICO UV-2804 с использованием динитросалицилового реактива в пересчете на глюкозу². Концентрация молочной

²Miller G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar // Analytical Chemistry. 1959. Vol. 31. Issue 3. P. 426–428. <https://doi.org/10.1021/ac60147a030>.

кислоты измерялась титриметрическим способом согласно ГОСТ 490-2006³. Численность микроорганизмов определяли по методу Мак-Креди⁴, при этом в качестве среды использовали стерилизованное обезжиренное молоко. Все опыты повторены трижды.

Работа выполнена при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования «Центр синтеза и исследований высокоэнергетических соединений и специальных материалов» СО РАН (Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, г. Бийск, Россия).

Расчет констант сбраживания $K_{сб}$ проводился по формуле:

$$K_{сб} = \frac{2,303}{\tau_{сб}} \cdot \lg \frac{s_0}{s} p,$$

где $K_{сб}$ – константа скорости сбраживания, $ч^{-1}$; $\tau_{сб}$ – фиксируемый период времени от начала брожения; s_0 и s – концентрация РВ в начале брожения и в момент времени $\tau_{сб}$ [21].

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Зависимость концентрации РВ в процессе брожения при изучении влияния уровня активной кислотности на процесс брожения приведена на рис. 1.

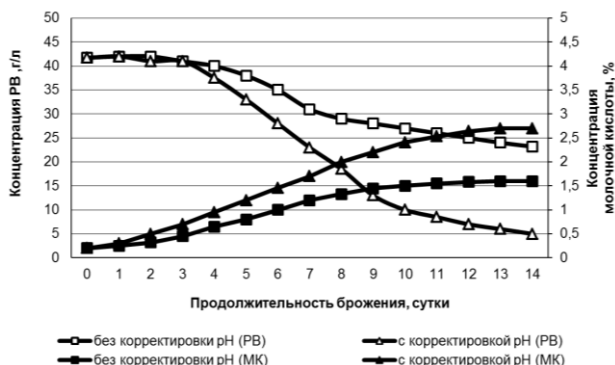


Рис. 1. Зависимость концентрации редуцирующих веществ и молочной кислоты в процессе сбраживания ферментативного гидролизата из шелухи овса от режима коррективы активной кислотности среды

Fig. 1. Dependence of reducing substances concentrations and lactic acid concentration in the oat husks enzymatic hydrolyzate fermentation on the mode of the active acidity correction of the medium

Анализируя полученные данные по влиянию уровня активной кислотности на динамику концентрации РВ, можно отметить наличие лаг-фазы брожения, которая составила 3-е суток. При этом концентрация редуцирующих веществ

в гидролизной среде в случае принудительной коррективы рН снизилась в 8,3 раза (с 41,7 до 5,0 г/л), в то время как в случае без ежесуточной коррективы кислотности среды произошло снижение концентрации РВ всего лишь в 1,8 раза (с 41,7 до 23,2 г/л). Соответственно, концентрация молочной кислоты в случае принудительной коррективы рН составила 2,7% масс. (что соответствует выходу молочной кислоты 67,1% от теоретически возможного); а без коррективы кислотности среды – 1,6% (38,4% от теоретически возможного), то есть в 1,7 раза ниже. Таким образом, при сбраживании гидролизных сред необходимо поддерживать рН на уровне 6,5 ед.

На рис. 2 представлены кривые убыви РВ и нарастания концентрации молочной кислоты в процессе молочнокислого брожения при различных способах подготовки посевного материала.

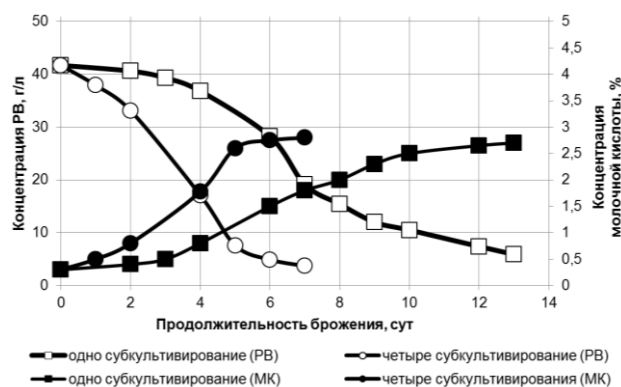


Рис. 2. Зависимость концентрации редуцирующих веществ и концентрации молочной кислоты в процессе молочнокислого брожения от способа подготовки посевного материала

Fig. 2. Dependence of reducing substances concentration and lactic acid concentration in the process of lactic acid fermentation on the method of seed preparation

Способ подготовки посевного материала в четыре субкультивирования позволяет избежать лаг-фазы и сократить продолжительность молочнокислого брожения в 2,2 раза: с 13 до 6 суток. При этом скорость утилизации субстрата возрастает в 2,7 раза: при субкультивировании в четыре стадии $K_{сб}$ составила 0,016 $ч^{-1}$, при субкультивировании в одну стадию – 0,006 $ч^{-1}$. Кроме того, установлено, что количество остаточных сахаров сокращается в 1,6 раза и составляет при субкультивировании в четыре стадии 3,7 г/л; при субкультивировании в одну стадию – 5,9 г/л. Однако конечная концентрация молочной кислоты изменилась незначительно: при субкультивировании в четыре стадии она составила

³ГОСТ 490-2006. Добавки пищевые. Кислота молочная Е270. Технические условия.

⁴Крусь Г.Н., Шалыгина А.М., Волокитина З.В. Методы исследования молока и молочных продуктов: учебник для студентов вузов. М.: Колос, 2000. 368 с.

2,8% масс. (что соответствует выходу молочной кислоты 64,7% от теоретически возможного); при субкультивировании в одну стадию – 2,7% масс. (67,1% от теоретически возможного).

На рис. 3 приведена зависимость концентраций РВ и молочной кислоты в процессе брожения от концентрации дрожжевого экстракта в питательной среде, а в таблице отражены основные показатели молочнокислого брожения при наличии и отсутствии в среде стимуляторов роста.

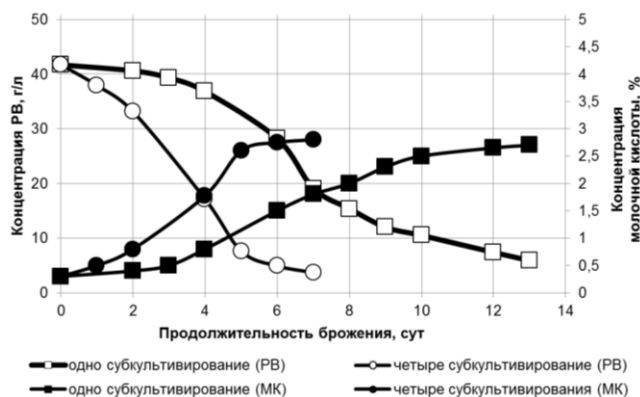


Рис. 3. Зависимость концентрации редуцирующих веществ и молочной кислоты в процессе молочнокислого брожения от концентрации дрожжевого экстракта в питательной среде

Fig. 3. Dependence of reducing substances concentration and lactic acid concentration in the process of lactic acid fermentation on yeast extract concentration in the nutrient medium

Внесение дрожжевого экстракта в качестве стимулятора также позволяет избежать лаг-фазы в процессе молочнокислого брожения и значительно интенсифицировать молочнокислое брожение: продолжительность молочнокислого брожения сокращается в 1,8 раза (с 9 до 5 суток), содержание остаточных РВ сокращается в 2,5 раза (с 3,7 до 1,5 г/л), константа сбраживания РВ повышается в 1,4 раза. При этом константа сбраживания при использовании дрожжевого экстракта не зависит от его концентрации, поэтому достаточно вносить его в среду в количестве 1% масс. Этот вывод подтверждается анализом численности микроорганизмов: добавление 1% дрожжевого экстракта стимулирует размножение клеток на ранней стадии, а добавление 3% масс. дрожжевого экстракта не оказывает значимого влияния на этот показатель.

Внесение дрожжевого экстракта приводит к повышению выхода молочной кислоты на 9,6% по сравнению с контролем (76,7 против 67,1%). Выход молочной кислоты на гидролизных средах существенно зависит от сырья, способа предобработки целлюлозосодержащего сырья и концентрации ингибиторов, обусловленных способом предобработки сырья [10]. Например, в работе [11] при сбраживании продуцентом *Lactobacillus*

plantarum сред, полученных из соломы пшеницы методом автогидролиза, концентрация молочной кислоты составила 2,4 г/л, что соответствует выходу 21% от теоретического. Авторами работы [22] был использован штамм *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus*, в качестве субстрата выбраны древесина бука и сосны, которые предварительно были обработаны окислительно-органосольвентным способом, и применена технология одновременного осахаривания и сбраживания. Выход молочной кислоты при использовании гидролизата буковой древесины составил 82,7% от теоретически возможного, при использовании в качестве питательной среды гидролизата древесины сосны – 41,4%.

Некоторые показатели молочнокислого брожения в зависимости от дозировки дрожжевого экстракта в среде

Some indicators of lactic acid fermentation depending on the yeast extract dosage in the medium

Показатель брожения	Дозировка дрожжевого экстракта, % масс.		
	1	3	0 (контроль)
Численность <i>L. bulgaricus</i> при продолжительности брожения, сутки:			
2	$5 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^7$
4	$5 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$
6	$5 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$
Константа сбраживания, $K_{сб}$, ч ⁻¹	0,026	0,026	0,019
Остаточная концентрация РВ после брожения, г/л	1,5	1,5	3,7
Выход молочной кислоты, % от теоретически возможного	76,7	76,7	67,1

Выбранный нами способ предобработки обеспечил получение преимущественно глюкозного биологически доброкачественного гидролизата, поэтому получен хороший выход целевого продукта. В то же время использованная двухстадийная обработка является довольно дорогостоящей, поэтому в дальнейшем нами будет рассмотрена возможность упрощения процесса предобработки и сокращения его трудоемкости при условии сохранения высокого выхода молочной кислоты.

ВЫВОДЫ

Таким образом, суммируя полученные в ходе исследований результаты, можно сделать следующие выводы:

1. При молочнокислом сбраживании ферментативных гидролизных сред необходимо в процессе брожения поддерживать кислотность на уровне 6,5 ед. рН, что позволяет повысить выход молочной кислоты в 1,7 раза по сравнению с процессом без корректировки рН.

2. Активизация закваски методом четырехкратного субкультивирования (3 пересева на стерильные молочные среды и 1 пересев на стерильную солодовую среду) позволяет в 2,2 раза сократить продолжительность молочнокислого брожения и

увеличить константу сбраживания в 2,7 раза.

3. Установлено, что внесение дрожжевого экстракта в количестве 1% масс. приводит к повышению выхода молочной кислоты на 9,6% по сравнению с контролем (76,7 против 67,1 %).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. De Oliveira R.A., Komesu A., Vaz Rossell C.E., Wolf Maciel M.R., Filho R.M. A study of the residual fermentation sugars influence on an alternative downstream process for first and second-generation lactic acid // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2020. Vol. 15. P. 100206. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2019.100206>
2. Mazzoli R. Metabolic engineering strategies for consolidated production of lactic acid from lignocellulosic biomass // *Biotechnology and Applied Biochemistry*. 2020. Vol. 67. Issue 1. P. 61–72. <https://doi.org/10.1002/bab.1869>
3. Arfat Y.A., Ahmed J., Ejaz M., Mullah M. Polylactide/graphene oxide nanosheets/clove essential oil composite films for potential food packaging applications // *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018. Vol. 107. Part A. P. 194–203. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.156>
4. Pagano N., Campana G., Fiorini M., Morelli R. Laser transmission welding of polylactide to aluminium thin films for applications in the food-packaging industry // *Optics & Laser Technology*. 2017. Vol. 91. P. 80–84. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.12.014>
5. Rapisarda M., Patanè C., Pellegrino A., Malvuccio A., Rizzo V., Muratore G., et al. Compostable Polylactide and Cellulose Based Packaging for Fresh-Cut Cherry Tomatoes: Performance Evaluation and Influence of Sterilization Treatment // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 15. P. 3432. <https://doi.org/10.3390/ma13153432>
6. Nashchekina Yu., Nikonov P., Nashchekin A., Mikhailova N. Functional Polylactide Blend Films for Controlling Mesenchymal Stem Cell Behaviour // *Polymers*. 2020. Vol. 12. Issue 9. P. 1969. <https://doi.org/10.3390/polym12091969>
7. Su Y., Nan G. Treatment of medial humeral epicondyle fractures in children using absorbable self-reinforced polylactide pins // *Medicine*. 2020. Vol. 99. Issue 17. P. e19861. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000019861>
8. Kolmakov A.G., Baikin A.S., Gudkov S.V., Belosludtsev K.N., Nasakina E.O., Kaplan M.A., et al. Polylactide-based stent coatings: biodegradable polymeric coatings capable of maintaining sustained release of the thrombolytic enzyme streptokinase // *Pure and Applied Chemistry*. 2020. Vol. 92. Issue 8. P. 1329–1340. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-1101>
9. Gherasim O., Grumezescu A.M., Grumezescu V., Iordache F., Vasile B.S., Holban A.M. Bioactive surfaces of polylactide and silver nanoparticles for the prevention of Microbial Contamination // *Materials*. 2020. Vol. 13. Issue 3. P. 768. <https://doi.org/10.3390/ma13030768>
10. Zynov'eva M.E., Shnaider K.L., Zaripova S.K. Production of lactic acid on enzymatic hydrolysates of cellulose-containing raw materials // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 421. P. 052011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/5/052011>
11. Верхотурова Е.В., Лозовая Т.С., Евстафьев С.Н. Биосинтез молочной кислоты на основе продуктов автогидролиза соломы пшеницы // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2016. Т. 6. N 3. P. 36–41. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-3-36-41>
12. Kobayashi K., et al. Method of producing chemical substance. Patent of United States, no. US 10,378,029 B2. 2019.
13. Stephanopoulos G., et al. Method for producing lactic acid from organic waste. Patent of United States, no. US 10,174,347 B2. 2019.
14. Kashcheyeva E.I., Gismatulina Yu.A., Budaeva V.V. Pretreatments of non-woody cellulosic feedstocks for bacterial cellulose synthesis // *Polymers*. 2019. Vol. 11. Issue 10. P. 1645. <https://doi.org/10.3390/polym11101645>
15. Сакович Г.В., Будаева В.В., Скиба Е.А., Макарова Е.И., Павлов И.Н., Кортусов А.Н. [и др.]. Опыт масштабирования ферментативного гидролиза технических целлюлоз мискантуса и плодовых оболочек овса // *Ползуновский вестник*. 2012. N 4. С. 173–176.
16. Chopda R., Ferreira J.A., Taherzadeh M.J. Biorefining oat husks into high-quality lignin and enzymatically digestible cellulose with acid-catalyzed ethanol organosolv pretreatment // *Processes*. 2020. Vol. 8. Issue 4. P. 435. <https://doi.org/10.3390/pr8040435>
17. Santos J., Ouadi M., Jahangiri H., Hornung A. Thermochemical conversion of agricultural wastes applying different reforming temperatures // *Fuel Processing Technology*. 2020. Vol. 203. P. 106402. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106402>
18. Sakovich G.V., Mikhailov Yu.M., Budaeva V.V., Korchagina A.A., Gismatulina Yu.A., Kozyrev N.V. Cellulose Nitrates from Unconventional Feedstocks // *Doklady Chemistry*. 2018. Vol. 483. Issue 1. P. 287–291. <https://doi.org/10.1134/S0012500818110101>
19. Скиба Е.А., Будаева В.В., Макарова Е.И., Павлов И.Н., Золотухин В.Н., Сакович Г.В. Биэтанол из целлюлозы плодовых оболочек овса // *Вестник Казанского технологического университета*. 2013. Т. 16. N 22. С. 202–205.
20. Гладышева Е.К., Скиба Е.А. Биосинтез бактериальной целлюлозы на ферментативном гидролизате технической целлюлозы из плодовых оболочек овса // *Известия вузов. Прикладная химия*

мия и биотехнология. 2017. Т. 7. N 1. С. 141–147. <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-1-141-147>

21. Технология спирта / В.Л. Яровенко, В.А. Маринченко, В.А. Смирнов [и др.]; под ред. проф. В.Л. Яровенко. М.: Колос-Пресс, 2002. 466 с.

22. Karnaouri A., Asimakopoulou G., Kalogi-

annis K.G., Lappas A., Topakas E. Efficient D-lactic acid production by *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bulgaricus* through conversion of organosolv pretreated lignocellulosic biomass // Biomass and Bioenergy. 2020. Vol. 140. P. 105672. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105672>

REFERENCES

1. De Oliveira RA, Komesu A, Vaz Rossell CE, Wolf Maciel MR, Filho RM. A study of the residual fermentation sugars influence on an alternative downstream process for first and second-generation lactic acid. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2020;15:100206. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2019.100206>

2. Mazzoli R. Metabolic engineering strategies for consolidated production of lactic acid from lignocellulosic biomass. *Biotechnology and Applied Biochemistry*. 2020;67(1):61–72. <https://doi.org/10.1002/bab.1869>

3. Arfat YA, Ahmed J, Ejaz M, Mullah M. Polylactide/graphene oxide nanosheets/clove essential oil composite films for potential food packaging applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2018;107:194–203. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.08.156>

4. Pagano N, Campana G, Fiorini M, Morelli R. Laser transmission welding of polylactide to aluminium thinfilms for applications in the food-packaging industry. *Optics & Laser Technology*. 2017;91:80–84. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.12.014>

5. Rapisarda M, Patanè C, Pellegrino A, Malvuccio A, Rizzo V, Muratore G, et al. Compostable Polylactide and Cellulose Based Packaging for Fresh-Cut Cherry Tomatoes: Performance Evaluation and Influence of Sterilization Treatment. *Materials*. 2020;13(15):3432. <https://doi.org/10.3390/ma13153432>

6. Nashchekina Yu, Nikonov P, Nashchekin A, Mikhailova N. Functional Polylactide Blend Films for Controlling Mesenchymal Stem Cell Behaviour. *Polymers*. 2020;12(9):1969. <https://doi.org/10.3390/polym12091969>

7. Su Y, Nan G. Treatment of medial humeral epicondyle fractures in children using absorbable self-reinforced polylactide pins. *Medicine*. 2020;99(17):e19861. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000019861>

8. Kolmakov AG, Baikin AS, Gudkov SV, Belosludtsev KN, Nasakina EO, Kaplan MA, et al. Polylactide-based stent coatings: biodegradable polymeric coatings capable of maintaining sustained release of the thrombolytic enzyme streptokinase. *Pure and Applied Chemistry*. 2020;92(8):1329–1340. <https://doi.org/10.1515/pac-2019-1101>

9. Gherasim O, Grumezescu AM, Grumezescu V, Iordache F, Vasile BS, Holban AM. Bioactive surfaces of polylactide and silver nanoparticles for the prevention of Microbial Contamination. *Materials*. 2020;13(3):768. <https://doi.org/10.3390/ma13030768>

10. Zynov'eva ME, Shnaider KL, Zaripova SK. Production of lactic acid on enzymatic hydrolysates of cellu-

lose-containing raw materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020;421:052011. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/421/5/052011>

11. Verkhoturova EV, Lozovaya TS, Evstafev SN. Biosynthesis of lactic acid via fermentation of wheat straw autohydrolysis products. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2016; 6(3):36–41. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2016-6-3-36-41>

12. Kobayashi K, et al. *Method of producing chemical substance*. Patent of United States, no. US 10,378,029 B2; 2019.

13. Stephanopoulos G, et al. *Method for producing lactic acid from organic waste*. Patent of United States, no. US 10,174,347 B2; 2019.

14. Kashcheyeva EI, Gismatulina YuA, Budaeva VV. Pretreatments of non-woody cellulosic feedstocks for bacterial cellulose synthesis. *Polymers*. 2019;11(10):1645. <https://doi.org/10.3390/polym11101645>

15. Sakovich GV, Budaeva VV, Skiba EA, Makarova EI, Pavlov IN, Kortusov AN, et al. Experience of scaling up the enzymatic hydrolysis of technical celluloses from miscanthus and oat hulls. *Polzunovskiy vestnik*. 2012;4:173–176. (In Russian)

16. Chopda R, Ferreira JA, Taherzadeh MJ. Bio-refining oat husks into high-quality lignin and enzymatically digestible cellulose with acid-catalyzed ethanol organosolv pretreatment. *Processes*. 2020;8(4):435. <https://doi.org/10.3390/pr8040435>

17. Santos J, Ouadi M, Jahangiri H, Hornung A. Thermochemical conversion of agricultural wastes applying different reforming temperatures. *Fuel Processing Technology*. 2020;203:106402. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106402>

18. Sakovich GV, Mikhailov YuM, Budaeva VV, Korchagina AA, Gismatulina YuA, Kozyrev NV. Cellulose Nitrates from Unconventional Feedstocks. *Doklady Chemistry*. 2018;483(1):287–291. <https://doi.org/10.1134/S0012500818110101>

19. Skiba EA, Budaeva VV, Makarova EI, Pavlov IN, Zolotukhin VN, Sakovich GV. Bioethanol from oat hulls cellulose. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University*. 2013;16(22):202–205 (In Russian)

20. Gladysheva EK, Skiba EA. Biosynthesis of bacterial cellulose on enzymatic hydrolyzate of oat hull pulp. *Izvestiya Vuzov. Prikladnaya Khimiya i Biotekhnologiya = Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2017;7(1):141–147. (In Russian) <https://doi.org/10.21285/2227-2925-2017-7-1-141-147>

21. Yarovenko VL. (ed.) *Alcohol technology*. Moscow: Kolos-Press; 2002. 466 p. (In Russian).

22. Karnaouri A, Asimakopoulou G, Kalogiannis KG, Lappas A, Topakas E. Efficient D-lactic acid production by *Lactobacillus delbrueckii* subsp. *bul-*

garicus through conversion of organosolv pretreated lignocellulosic biomass. *Biomass and Bioenergy*. 2020;140:105672. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105672>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шавыркина Надежда Александровна,
к.т.н., доцент, старший научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
✉ e-mail: 32nadina@mail.ru

Скиба Екатерина Анатольевна,
к.т.н., доцент, старший научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
e-mail: eas08988@mail.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад
в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили оконча-
тельный вариант рукописи.*

*Поступила в редакцию 26.10.2020.
Одобрена после рецензирования 08.12.2020.
Принята к публикации 28.02.2021.*

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Nadezhda A. Shavyrkina,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Senior Scientist,
Institute for Problems of Chemical and Energetic
Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
✉ e-mail: 32nadina@mail.ru

Ekaterina A. Skiba,
Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor,
Senior Scientist,
Institute for Problems of Chemical and Energetic
Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
e-mail: eas08988@mail.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Conflict interests

The authors declare no conflict of interests re-
garding the publication of this article.

*The final manuscript has been read and approved
by all the co-authors.*

*The article was submitted 26.10.2020.
Approved after reviewing 08.12.2020.
Accepted for publication 28.02.2021.*