

БИОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 630*863:602.4

В. С. Болтовский

Белорусский государственный технологический университет

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГИДРОЛИЗНОГО ПРОИЗВОДСТВА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

На основании обзора научно-технической литературы приведена информация по проблемам сырьевой базы для гидролизного производства, характеристике и ассортименту основных видов выпускаемой продукции, состоянию, проблемам и наиболее перспективным направлениям технологических решений и путей развития гидролитической и микробиологической переработки лигноцеллюлозной растительной биомассы.

Показана целесообразность комплексной переработки растительного сырья, основанной на сочетании его кислотного и ферментативного гидролиза и биоконверсии. Комплексная химическая и микробиологическая конверсия растительной биомассы обеспечивает глубокую переработку полисахаридных компонентов с получением фурфурола, этилового спирта или обогащенного белком кормового продукта, исключает энергоемкие стадии кислотного гидролиза целлюлозы и образования основного крупнотоннажного отхода гидролизного производства – технического лигнина.

Перспективы развития гидролизного производства в значительной степени определяются наличием необходимой сырьевой базы, уровнем применяемых ресурсо-, энергосберегающих и экологически безопасных технологий и оборудования. В Республике Беларусь имеются необходимые предпосылки (материально-техническая база, более чем полувековой опыт работы гидролизной промышленности и квалифицированные кадры) и возможности, которые создают условия для возрождения и развития гидролизной промышленности и организации выпуска востребованной в республике и за рубежом продукции.

Ключевые слова: растительная биомасса, гидролиз, биоконверсия, гидролизное производство, продукция, перспективы.

V. S. Boltovskiy

Belarusian State Technological University

ACTUAL PROBLEMS OF HYDROLYSIS OF PRODUCTION AND WAYS OF THEIR SOLUTION

Based on a review of scientific literature provides information on the problems of raw material base for the hydrolysis of production, characteristics of products, status, challenges and most promising areas of technological solutions and ways of development of hydrolytic and microbiological processing of lignocellulosic plant biomass. The expediency of complex processing of vegetable raw materials, based on the combination of acid and enzymatic hydrolysis and bioconversion.

Comprehensive chemical and microbiological conversion of plant biomass provides deep processing of polysaccharide components with obtaining of furfural, ethyl alcohol or protein-enriched feed product, with the exception of energy-intensive stages of acid hydrolysis of cellulose and lignin and education the main large-tonnage waste hydrolysis of production – technical lignin.

Prospects for the development of hydrolytic production are largely determined by the availability of the necessary resource base, level of applied, resource- and energy-saving and environmentally safe technologies and equipment. In the Republic of Belarus has the necessary prerequisites (the material-technical base, more than half a century of experience hydrolysis industries and a skilled workforce) and opportunities that create the conditions for the revival and development of hydrolysis industries and organizations in demand in the country and abroad products.

Key words: plant biomass, hydrolysis, bioconversion, hydrolysis production, products, prospects.

Введение. Прогрессирующее сокращение запасов ископаемых видов органического сырья в настоящее время обуславливает возрастающий интерес к использованию постоянно возобновляемой растительной биомассы.

Одним из эффективных направлений ее промышленной переработки является гидролизное производство, которое наиболее интенсивно развивалось в СССР с 1936 г. до начала XXI в. и являлось высокорентабельной подотраслью микробиологической промышленности, осуществлявшей многотоннажный выпуск фурфурола, разнообразных фурановых производных на его основе, ксилита, этилового спирта, кормовых дрожжей и других продуктов.

Однако характерные для гидролизного производства недостатки (высокая энергоемкость технологических процессов, низкий выход целевых продуктов, образование значительного количества отходов, превышающих по количеству основную продукцию, загрязненных сточных вод и выбросов в атмосферу) [1], а также устаревшие оборудование и технология привели к приостановке работы гидролизных заводов и/или их перепрофилированию.

В настоящее время фактически единственным крупным предприятием данного профиля на постсоветском пространстве считается ООО «БиоХимЗавод» (г. Киров), основными видами продукции которого являются фурфурол и этиловый спирт.

В Республике Беларусь РУП «Речицкий опытно-промышленный завод» прекратил свою деятельность, а одно из старейших предприятий отрасли БРУП «Гидролизный завод» (ныне ОАО «Бобруйский завод биотехнологий») перепрофилировано: основными видами продукции являются спирт этиловый ректификованный из пищевого сырья и технический из мелассы, в меньших объемах осуществляется производство дрожжей кормовых, кормовой добавки из зерновой послеспиртовой барды, диоксида углерода, топливных брикетов из гидролизного лигнина и других видов продукции. С целью уменьшения потребления энергоносителей на заводе организовано получение биогаза анаэробным сбраживанием меласной послеспиртовой барды.

Вместе с тем в последние годы в связи с необходимостью решения сырьевых, энергетических и экологических проблем сохраняется и даже возрастает потребность в топливном этаноле, фурфуроле, белоксодержащих кормовых добавках и других продуктах гидролизного производства, в связи с чем в различных странах активно проводятся исследования и ведутся разработки технологий их получения.

Основная часть. Перспективы развития гидролизного производства в значительной степени определяются наличием необходимой сырьевой базы, уровнем применяемых ресурсов и энергосберегающих и экологически безопасных технологий и оборудования, обеспечивающих экономически оправданную целесообразность организации производства востребованной на внутреннем и конкурентоспособной на внешнем рынке продукции.

Сырьевая база. Исключительно важным является то, что в качестве сырья для гидролизного и микробиологического производства используется постоянно возобновляемая растительная биомасса, причем в виде отходов деревопереработки и сельского хозяйства.

В настоящее время в промышленно развитых странах все большее значение приобретает использование лигноцеллюлозной биомассы (древесных отходов и растительных отходов сельскохозяйственного производства – соломы зерновых и масличных культур и др.), не конкурирующей с сырьем, применяемым в пищевых целях, и которая в отличие от так называемого сырья первого поколения (крахмал- и сахаросодержащего) не создает угрозу продовольственной безопасности.

В научной зарубежной литературе для не имеющего пищевой ценности лигноцеллюлозного сырья часто применяется термин «сырье второго поколения» [2, 3]. Следует отметить, что древесина (в виде отходов лесопиления и деревообработки) и растительные отходы сельскохозяйственного производства использовались в гидролизном производстве СССР еще с 30-х гг. XX в. и на протяжении последующих более чем 50 лет.

Основной по количеству растительной биомассой в большинстве стран является древесина. Однако, несмотря на значительные запасы (мировые составляют 330–370 млрд. м³ и благодаря приросту ежегодно увеличиваются на 5,5 млрд. м³ [4], в Республике Беларусь к 2020 г. общий запас древесины в лесах прогнозируется в объеме 1,9 млрд. м³, отходов лесозаготовок – 1,9 млн. м³ [5]) и возобновляемость, необходимо отметить некоторые основные в настоящий период времени проблемы:

– неравномерность древостоев по группам возраста – молодняки занимают 20,3% площади лесов, средневозрастные насаждения – 48,6%, припевающие – 20,8%, спелые и перестойные – 10,5% [5]. Основное количество составляют молодые и средневозрастные леса, которые являются только потенциальными источниками сырья, а спелые, наиболее применяемые для промышленной переработки, представлены в значительно меньшей степени;

- ухудшение качества сырья;
- широкое использование деловой древесины и отходов деревообработки для производства древесноволокнистых и древесностружечных плит и топливных брикетов (пеллет) [6, 7];
- нерациональное сжигание в топках паровых котлов;
- значительное количество древесины будет использоваться на строящемся в Республике Беларусь (г. Светлогорск) заводе по производству сульфатной целлюлозы мощностью 400 тыс. т целлюлозы в год;
- повышение стоимости древесины и отходов ее переработки, что существенно влияет на себестоимость продукции, так как в зависимости от профиля гидролизного производства она составляет около 30% [1].

Основными путями решения проблем обеспечения сырьем могут быть рациональное использование и глубокая переработка основных компонентов традиционно применяемых видов сырья, привлечение для промышленной переработки растительных отходов сельскохозяйственного производства, а также потенциальных сырьевых ресурсов (древесно-кустарниковой растительности, верхового малоразложившегося торфа) и в перспективе – организация культурных плантаций быстрорастущих пород древесины (тополя).

Продукция. Одним из наиболее востребованных продуктов гидролитической и микробиологической переработки растительной биомассы является *этанол*. В последние годы все больший интерес представляет его применение в качестве добавки к бензину или в чистом виде в качестве автомобильного топлива, что обусловлено перспективностью перехода на новые возобновляемые виды энергии и позволяет экономить нефтяные ресурсы, а также снизить количество вредных выбросов в атмосферу.

Лидерами по производству топливного биоэтанола из сахаро- и крахмалсодержащего сырья (сахарный тростник, сахарная свекла, кукуруза, пшеница и др.) являются США (54%, преимущественно из кукурузы) и Бразилия (34%, в основном из сахарного тростника). Интенсивно развивается производство топливного этанола в ЕС и Китае [8, 9].

В Бразилии практически весь автотранспорт работает либо на бензине с добавкой этанола (при добавлении его в количестве до 15% не требуется модификация двигателя), либо на чистом этиловом спирте (в этом случае необходима модификация двигателя). В Европе действует стандарт E5, по которому в бензин добавляется 5% этанола [9, 10].

В настоящее время во многих странах наметилась тенденция его получения из лигноцел-

люлозной биомассы (отходов древесины и сельскохозяйственного производства), не конкурирующей с продовольственным сырьем.

В США (в соответствии с государственными программами) уже работают десятки демонстрационных, пилотных и коммерческих заводов по производству топливного этанола из древесных отходов и пшеничной соломы [11].

Одна из основных проблем получения этилового спирта из лигноцеллюлозной растительной биомассы – более высокая стоимость гидролизного спирта по сравнению с получаемым из пищевых видов сырья.

Цена 1 л топливного этанола из пищевых видов сырья (на 2008 г.) составила в США 0,55 долл. США (при себестоимости 0,505 долл. США с перспективой снижения до 0,318 долл. США), а в Бразилии – 0,61 долл. США. При этом стоимость 1 л бензина на данный период времени составила в США 0,72 долл. США, а в Бразилии – 1,63 долл. США [8].

В настоящее время стоимость производства этанола из лигноцеллюлозной биомассы выше, чем из пищевых видов сырья [10]. Но по прогнозу в ближайшие годы цена гидролизного спирта из лигноцеллюлозной биомассы будет сопоставима и даже меньше по сравнению с получаемым из пищевого сырья.

Для стран, не обладающих значительными запасами углеводородного сырья и испытывающих дефицит в автомобильном бензине, например, для Республики Беларусь производство биоэтанола имеет особенно важное значение и актуальность.

Для многих стран не менее актуальной является проблема восполнения дефицита *кормового белка*.

В нашей стране частично потребность в белоксодержащих кормовых добавках может быть восполнена за счет использования концентрата или сухой послеспиртовой барды, а также шрота и жмыха масличных культур, однако это не обеспечивает потребность в них в полном объеме.

Производство кормовых дрожжей из гидролизатов растительного сырья требует значительных энергетических затрат, что фактически привело к прекращению их выпуска. Основные по энергопотреблению операции, кроме собственно гидролиза сырья, – глубинное культивирование дрожжей, концентрирование дрожжевой суспензии (особенно сепарирование и выпаривание) и сушка дрожжей.

Одним из перспективных направлений решения проблемы является получение белоксодержащих кормовых добавок прямой микробиологической конверсией растительной биомассы.

Целесообразность организации их производства таким способом обусловлена следующими причинами [12]:

1) традиционные белоксодержащие кормовые добавки в настоящее время не обеспечивают их потребности в кормопроизводстве;

2) белок, получаемый микробным синтезом, имеет сбалансированный состав по аминокислотам и другим питательным веществам и используется для получения высококачественных кормовых добавок;

3) микробный белок может многотоннажно выпускаться в промышленных масштабах вне зависимости от климатических условий на сравнительно небольших производственных площадях;

4) скорость накопления микробной биомассы в десятки и сотни раз больше по сравнению с растительным и животным белком;

5) микробный белок может быть получен при использовании сравнительно дешевого и доступного постоянно возобновляемого растительного сырья;

6) организация производства белоксодержащих кормовых добавок микробиологическим синтезом из местных источников возобновляемого растительного сырья позволит избежать зависимости от стран-импортеров.

Одним из востребованных продуктов гидролитической (химической) переработки растительного сырья в мире является *фурфурол*, потребности которого, особенно в Европе, превышают производство. Фурфурол – единственный мономер для органического синтеза, получаемый не из нефти, а из возобновляемого пентозансодержащего растительного сырья. В промышленном масштабе он производится только способом гидролиза. Ежегодная потребность в фурфуроле в Европе составляет около 110 тыс. т и удовлетворяется только на 90% практически за счет импорта из Китая, Доминиканской Республики и Южной Африки, так как европейский объем производства (около 7 тыс. т) обеспечивается тремя заводами в Испании, Австрии и Словении [13].

Одним из перспективных направлений совершенствования технологических процессов гидролитической и микробиологической переработки лигноцеллюлозной растительной биомассы является сочетание ее кислотного и ферментативного гидролиза.

При этом совершенствование процесса кислотного гидролиза может быть обеспечено, например, применением гидролизаторов непрерывного действия, осуществлением процессов высокотемпературного гидролиза и автогидролиза-взрыва [1, 14–16].

Получение *этилового спирта* гидролитической переработкой лигноцеллюлозной расти-

тельной биомассы перспективно путем ферментативного гидролиза с использованием выпускаемых в промышленных масштабах ферментных препаратов, обладающих в настоящее время достаточно высокой активностью и сравнительно невысокой стоимостью [3, 9, 10, 17, 18].

Основные преимущества ферментативного гидролиза по сравнению с кислотным – селективность ферментативного катализа, обеспечивающего избирательный гидролиз гликозидных связей полисахаридов и отсутствие вторичных превращений образовавшихся моносахаридов (что позволяет получать их выход, близкий к теоретически возможному), и проведение процесса при сравнительно невысоких температурах.

Однако ферментативный гидролиз и осуществление процесса прямой биоконверсии растительной биомассы (особенно древесной) в виде твердого нерастворимого субстрата существенно затруднено вследствие особенностей химического состава и строения основных компонентов, что требует проведения ее предварительной обработки для повышения реакционной способности.

Известны различные методы предварительной обработки целлюлозы и лигноцеллюлозной биомассы (главным образом с использованием сравнительно благоприятных для биоконверсии видов – багассы, соломы и др.) [19–23]. Однако в настоящее время фактически нет способов в достаточной степени эффективных и в то же время экономически оправданных.

Кроме необходимости осуществления предварительной обработки растительного сырья, промышленное использование способов ферментативного гидролиза и прямой биоконверсии сдерживают значительная продолжительность процесса, отсутствие высокопроизводительных ферментаторов и отсутствие высокоэффективных штаммов микроорганизмов для прямой биоконверсии растительной биомассы в виде твердого субстрата.

Получение *белоксодержащих кормовых добавок* прямой биоконверсией растительной биомассы менее энергоемко по сравнению с технологией кормовых дрожжей из гидролизатов растительного сырья.

Выход *фурфурола* по применяемому в промышленности парофазному способу гидролиза пентозансодержащего растительного сырья составляет не более 60% от теоретического (потенциального) [24]. При дегидратации пентоз в гомогенных условиях его выход близок к теоретически возможному [25, 26]. Интенсификацию дегидратации пентозных гидролизатов и снижение потерь фурфурола при длительном нагреве по сравнению с традиционно применяемым технологическим паром обеспечивает осуществление процесса под действием СВЧ-энергии [27, 28].

При получении основных видов продукции гидролизного производства перспективным является осуществление кислотного гидролиза гемицеллюлоз пентозансодержащей растительной биомассы с использованием пентозного гидролизата для дегидратации в фурфурол в гомогенных условиях и ферментативного гидролиза содержащихся в оставшемся целлюлозном полисахаридах (в основном целлюлозы) для получения моносахаридов с последующим сбраживанием их в этанол или прямой биоконверсии целлюлозы в белок под действием микроорганизмов [29–31].

Использование комплексной химической и микробиологической конверсии растительной биомассы обеспечивает глубокую переработку полисахаридных компонентов с получением фурфурола, этилового спирта или обогащенного белком кормового продукта, исключает энергоемкие стадии кислотного гидролиза цел-

люлозы и образования основного крупнотоннажного отхода гидролизного производства – технического лигнина [32].

Заключение. Таким образом, имеющиеся во многих странах, в том числе в Республике Беларусь, запасы возобновляемой растительной биомассы, спрос на продукцию ее гидролитической переработки на мировом рынке, а также современные направления и технологии обеспечивают в настоящее время перспективы развития гидролизного производства.

В Беларуси сохраняются важные предпосылки (материально-техническая база, более чем полувековой опыт работы гидролизной промышленности и квалифицированные кадры) и возможности, которые создают условия для возрождения и развития гидролизной промышленности. Необходимым условием для этого является государственная поддержка отрасли.

Литература

1. Холькин Ю. И. Технология гидролизных производств. М.: Лесная пром-сть, 1989. 496 с.
2. Поколения растительного биотоплива. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Биотопливо> (дата обращения: 06.02.2017).
3. Елисеева Е. М., Гордин А. А., Молчанова И. В. Современное состояние мирового производства биотоплива второго поколения из растительного сырья и отходов деревообработки // Научные труды (Вестник МАТИ). 2012. № 19. С. 342–345.
4. Географический словарь // Академик. М., 2000. URL: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geo/158/0 (дата обращения: 16.07.2011).
5. Шатравко В. Г. Современное состояние лесных ресурсов Беларуси // Лесной ресурс Беларуси: материалы респ. науч.-практ. конф. РУП «Белгослес», Минск, 22 дек. 2011 г. / М-во лес. хоз-ва Респ. Беларусь. Минск, 2011. С. 9–16.
6. Боровская М. Е., Кузина М. В. Эффективность производства топливных гранул (пеллет) в Республике Беларусь // Новейшие достижения в химической промышленности и производстве строительных материалов: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 нояб. 2012 г.: в 2 ч. Ч. 2 / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2012. С. 166–170.
7. Сычева Н. А., Хмызов И. А., Соловьева Т. А. Влияние породного состава древесины на показатели качества пеллет // Материалы. Технологии. Инструменты. 2015. Т. 20, № 2. С. 70–74.
8. Мирзоев В., Пушик Е. Бензин и этанол – мировые перспективы. Способы получения, стандарты, обзор мирового рынка и производителей топлива. URL: <http://www.samoupravlenie.ru/40-10.php> (дата обращения: 04.10.2015).
9. Карпов С. А. Этанол как высокооктановый экологически чистый компонент автомобильных топлив // Химия и технология топлив и масел. 2007. № 5. С. 3–7.
10. Дебабов В. Г. Биотопливо // Биотехнология. 2008. № 1. С. 3–14 (обзор).
11. Глубокая переработка биомассы и отходов сельскохозяйственного производства: науч.-аналит. обзор / В. С. Тихонравов [и др.]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 252 с.
12. Болтовский В. С. Гидролитическая переработка полисахаридных компонентов растительной биомассы: проблемы и перспективы // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. хим. наук. 2014. № 1. С. 118–123 (обзор).
13. Будем производить заменитель нефти? URL: <http://arhiv.bb.lv/index.php?p=1&i=4490&s=1&a=163572&v=print> (дата обращения: 15.02.2017).
14. Гравитис Я. А. Теоретические и прикладные аспекты метода взрывного автогидролиза растительной биомассы // Химия древесины. 1987. № 5. С. 3–21.
15. Ефремов А. А., Кротова И. В. Комплексная переработка древесных отходов с использованием метода взрывного автогидролиза // Химия растительного сырья. 1990. № 2. С. 19–39.

16. Direct hydrolysis of cellulose to glucose using ultra-high temperature and pressure steam explosion / Sasaki Chizuru [et al.] // *Carbohydr. Polym.: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides*. 2012. Vol. 89, no. 1. P. 293–301.

17. Болтовский В. С. Перспективы производства этилового спирта гидролитической и микробиологической переработкой лигноцеллюлозной биомассы // *Материалы. Технологии. Инструменты*. 2014. Т. 19, № 2. С. 68–73.

18. Studies on cellulose ethanol production for sustainable of liquid fuel in China / Q. Yinbo [et al.] // *Biotechnol.* 2006. Vol. 1, no. 11. P. 1235–1240.

19. Калунянц К. А., Шаненко Е. Ф., Зайцева Л. В. Современные способы ферментативного гидролиза целлюлозосодержащих материалов // *Итоги науки и техники. Сер. Химия и технология пищевых продуктов*. 1988. Т. 1. 185 с.

20. Сравнительное изучение влияния различных методов предобработки на скорость ферментативного гидролиза природных целлюлозосодержащих материалов / А. П. Сеницын [и др.] // *Химия древесины*. 1984. № 5. С. 60–71.

21. Сеницын А. П., Леонова И. Л., Наджемин Б. Сравнительный анализ реакционной способности целлюлозосодержащего сырья по отношению к ферментативному гидролизу // *Прикладная биохимия и микробиология*. 1986. Т. 22, вып. 4. С. 517–525.

22. Сеницын А. П. Влияние физико-химических и структурных факторов целлюлозы на эффективность ее ферментативного гидролиза // *Микробиология и биохимия растительных материалов*. М.: Наука, 1988. С. 3–29.

23. Методы подготовки растительного сырья к биоконверсии в кормовые продукты и биоэтанол. Обзор / В. И. Сушкова [и др.] // *Химия растительного сырья*. 2016. № 1. С. 93–119.

24. Морозов Е. Ф. Производство фурфурола. М.: Лесная пром-сть, 1988. 200 с.

25. Мельников Н. П., Цирлин Ю. А. Получение фурфурола из пентозных растворов // *Сб. тр. ВНИИГС*. 1959. Т. 7. С. 84–96.

26. Цирлин Ю. А. Дегидратация пентозных гидролизатов с получением фурфурола // *Гидролизная и лесохимическая промышленность*. 1991. № 4. С. 12–14.

27. Остроух О. В., Болтовский В. С., Цедрик Т. П. Влияние сверхвысоких частот на образование фурфурола из ксилоры // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. 2002. № 1. С. 59–61.

28. Способ получения фурфурола дегидратацией пентозных гидролизатов: пат. 6997 Респ. Беларусь, МПК С 07 D 307/50 / В. С. Болтовский, О. В. Остроух, Т. П. Цедрик; заявитель Белорус. гос. технол. ун-т. № а20001157; заявл. 26.12.2000; опубл. 27.12.2004 // *Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. 2005. № 2. С. 166.

29. Болтовский В. С. Комплексная гидролитическая переработка пентозансодержащей растительной биомассы с получением фурфурола и белоксодержащей кормовой добавки // *Химия растительного сырья*. 2014. № 2. С. 5–12.

30. Цедрик Т. П., Болтовский В. С., Некрасов Д. В. Биоконверсия целлюлогина мицелиальными грибами // *Труды БГТУ. Сер. III, Химия и химическая технология*. 1996. Вып. IV. С. 23–27.

31. Остроух О. В., Цедрик Т. П., Болтовский В. С. Обогащение белком лигноцеллюлозных субстратов в процессе прямой биоконверсии микроорганизмами // *Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук*. 2002. № 2. С. 94–98.

32. Болтовский В. С. Технология получения фурфурола и кормовой добавки комплексной переработкой растительного сырья // *Материалы. Технологии. Инструменты*. 2013. Т. 18, № 3. С. 91–95.

References

1. Hol'kin Yu. I. *Tekhnologiya gidroliznykh proizvodstv* [Hydrolysis technology industries]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 496 p.

2. *Pokoleniya rastitel'nogo biotopliva* [Generation of biofuel plants]. Available at: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Biofuel> (accessed 06.02.2017).

3. Eliseeva E. M., Gordin A. A., Molchanova I. V. Modern state of world production of second generation biofuels from plant raw materials and wastes of wood processing. *Nauchnyye trudy (Vestnik MATI)* [Scientific works (Bulletin of MATI)], 2012, no. 19, pp. 342–345 (In Russian).

4. *Geograficheskiy slovar'* [Geographical dictionary]. Available at: http://dic.academic.ru/dic.nsf/enc_geo/158/0 (accessed 16.07.2011).

5. Shatravko V. G. [Modern condition of forest resources of Belarus]. *Materialy respublikanskoj konferentsii (Lesnoy resurs Belarusi)* [Materials of the Republican Scientific and Practical Conference (Forest resource of Belarus)]. Minsk, 2011, pp. 9–16 (In Russian).

6. Borovskaya M. E., Kuzina M. V. [Efficiency of production of fuel granules (pellets) in the Republic of Belarus]. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Noveyshiye dostizheniya v khimicheskoy promyshlennosti i proizvodstve stroitel'nykh materialov* [Materials of the International Scientific and Technical Conference (Latest advancements in chemical industry and production of construction materials)]. Minsk, 2012, pp. 166–170 (In Russian).

7. Sycheva N. A., Khmyzov I. A., Solov'yeva T. A. Influence of species composition of wood quality parameters of pellets. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technology. Tools], 2015, vol. 20, no. 2, pp. 70–74 (In Russian).

8. Mirzoev V., Pushchik E. *Benzin i etanol – mirovyye perspektivy. Sposoby polucheniya, standarty, obzory mirovogo rynka i proizvoditeley topliva* [Gasoline and ethanol – world perspectives. Methods of obtaining, standards, review of the world market and fuel producers]. Available at: <http://www.samoupravlenie/ru/40-10.php> (accessed 04.10.2015).

9. Karpov S. A. Ethanol as high-octane environmentally clean component of automotive fuels. *Khimiya i tekhnologiya topliv i masel* [Chemistry and technology of fuels and oils], 2007, no. 5, pp. 3–7 (In Russian).

10. Debabov V. Biofuels. *Biotehnologiya* [Biotechnology], 2008, no. 1, pp. 3–14 (review) (In Russian).

11. Tikhonravov V. S., Fedorenko V. F., Buklagin D. S., Mishurov N. P. *Glubokaya pererabotka biomassy i otkhodov sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva: nauchno-analiticheskiy obzor* [Deep processing of biomass and agricultural waste: scientific. analit. review]. Moscow, FGBNU “Rosinformagrotekh” Publ., 2014. 252 p.

12. Boltovskiy V. S. Hydrolytic processing of the polysaccharide components of plant biomasse: problems and prospects. *Vestsi Natsiyanal'nay akademii navuk Belarusi* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus], 2014, no. 1, pp. 118–123 (review) (In Russian).

13. *Budem proizvodit' zamenitel' nefiti?* [Will produce a substitute for oil?]. Available at: <http://arhiv.bb.lv/index.php?p=1&i=4490&s=1&a=163572&v=print> (accessed 15.02.2017).

14. Gravitis Ya. A. Theoretical and applied aspects of the method explosive autohydrolysis plant biomass. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of wood], 1987, no. 5, pp. 3–21 (In Russian).

15. Efremov A. A., Krotova I. V. Complex processing of wood waste using the method of explosive autohydrolysis. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of vegetable raw materials], 1990, no. 2, pp. 19–39 (In Russian).

16. Sasaki Chizuru, Susimoto Keisuke, Asada Chikako, Nakamura Yoshitishi. Direct hydrolysis of cellulose to glucose using ultra-high temperature and pressure steam explosion. *Carbohydr. Polym.: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides*, 2012, vol. 89, no. 1, pp. 298–301.

17. Boltovskiy V. S. Prospects for the production of ethyl alcohol by hydrolytic and microbiological processing of lignocellulosic biomass. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technology. Tools], 2014, vol. 19, no. 2, pp. 68–73 (In Russian).

18. Yinbo Q., Zhu M., Liu K., Bao X., Lin J. Studies on cellulosic ethanol production for sustainable of liquid fuel in China. *Biotechnol.*, 2006, vol. 1, no. 11, pp. 1235–1240.

19. Kalunyants K. A., Shanenko E. F., Zaytseva L. V. Modern methods of enzymatic hydrolysis of cellulosic materials. *Itogi nauki i tekhniki* [Results of science and technology], series chemistry and technology of food products, 1988, vol. 1. 185 p.

20. Sinitsyn A. P., Kovalyov V. G., Mesa-Mapresa S. R. Comparative study of the effect of different pretreatment techniques on the rate of enzymatic hydrolysis of natural cellulosic materials. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of wood], 1984, no. 5, pp. 60–71 (In Russian).

21. Sinitsyn A. P., Leonova I. L., Nadzhemin B. Comparative analysis of the reactivity of cellulose-containing raw materials in relation to enzymatic hydrolysis. *Prikladnaya biokhimiya i mikrobiologiya* [Applied biochemistry and microbiology], 1986, vol. 22, issue 4, pp. 517–525 (In Russian).

22. Sinitsyn A. P. Influence of physicochemical and structural factors of cellulose on the efficiency of its enzymatic hydrolysis. *Mikrobiologiya i biokhimiya rastitel'nykh materialov* [Microbiology and biochemistry of plant materials]. Moscow, Nauka Publ., 1988, pp. 3–29 (In Russian).

23. Sushkova V. I., Stuzhaninova L. V., Berezina O. V., Yarotskiy S. V. Methods of preparation of plant materials to bioconversion in feed products and ethanol. Review. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of vegetable raw materials], 2016, no. 1, pp. 93–119 (In Russian).

24. Morozov E. F. *Proizvodstvo furfurola* [Manufacture of furfural]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 200 p.

25. Mel'nikov N. P., Tsirlin Yu. A. Preparation of furfural from bentosnykh solutions. *Sbornik trudov VNIIGS* [Proceedings of VNIIGT], 1959, vol. 7, pp. 84–96 (In Russian).

26. Tsirlin Yu. A. Dehydration bentosnykh hydrolysates with obtaining furfural. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promyshlennost'* [Hydrolytic and wood chemical industry], 1991, no. 4, pp. 12–14 (In Russian).

27. Ostroukh O. V., Boltovskiy V. S., Tsedrik T. P. Effect of ultrahigh frequencies on the formation of furfural from xylose. *Vestsi Natsiyanal'nay akademii navuk Belarusi* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus], series chemical sciences, 2002, no. 1, pp. 59–61 (In Russian).

28. Boltovskiy V. S., Ostroukh O. V., Tsedrik T. P. *Sposob polucheniya furfurola degidratatsiey pentoznykh gidrolizatov* [Method of producing furfural by dehydration bentosnykh hydrolysates]. Patent BY, no. a20001157, 2005.

29. Boltovskiy V. S. Complex hydrolytic processing pentasaccharide plant biomass with obtaining furfural and protein-containing feed additives. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of vegetable raw materials], 2014, no. 2, pp. 5–12 (In Russian).

30. Tsedrik T. P., Boltovskiy V. S., Nekrasov D. V. Bioconversion of tsellolignina mycelial fungi. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series III, Chemistry and chemical technology, 1996, issue IV, pp. 23–27 (In Russian).

31. Ostroukh O. V., Tsedrik T. P., Boltovskiy V. S. Protein enrichment of lignocellulosic substrates in the process of bioconversion by microorganisms. *Vestsi Natsiyanal'nay akademii navuk Belarusi* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus], series chemical sciences, 2002, no. 2, pp. 94–98 (In Russian).

32. Boltovskiy V. S. Technology of furfural and feed additives complex processing of vegetable raw materials. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Proceedings. Technology. Tools], 2013, vol. 18, no. 3, pp. 91–95 (In Russian).

Информация об авторе

Болтовский Валерий Станиславович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры химической переработки древесины. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: v-boltovsky@rambler.ru

Information about the author

Boltovskiy Valeriy Stanislavovich – PhD (Engineering), Associate Professor, Professor, the Department of Chemical Processing of Wood. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v-boltovsky@rambler.ru

Поступила 03.05.2017