

УДК 630\*863:602.4

## КОМПЛЕКСНАЯ ГИДРОЛИТИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ПЕНТОЗАНСОДЕРЖАЩЕЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ С ПОЛУЧЕНИЕМ ФУРФУРОЛА И БЕЛОКСОДЕРЖАЩЕЙ КОРМОВОЙ ДОБАВКИ (ОБЗОР)

© *В.С. Болтовский*

*Белорусский государственный технологический университет,  
ул. Свердлова, 13а, Минск, 220050 (Республика Беларусь),  
e-mail: v-boltovsky@rambler.ru*

Выполнен обзор способов комплексной гидролитической и микробиологической переработки растительной биомассы с получением фурфурола дегидратацией пентозных гидролизатов и белоксодержащей кормовой добавки биоконверсией целлолигнина твердофазной ферментацией.

*Ключевые слова:* растительная биомасса, гидролиз, СВЧ-энергия, фурфурол, целлолигнин, твердофазная ферментация, сырой протеин.

### **Введение**

В настоящее время в связи с прогрессирующим сокращением запасов ископаемых видов органического сырья в мире возрастает интерес к постоянно возобновляемой растительной биомассе, которая является одним из основных сырьевых ресурсов во многих странах.

Высокое содержание пентозанов в древесине лиственных пород (16–22%) [1], лиственной древесно-кустарниковой растительности (22–29%) [2] и растительных сельскохозяйственных отходах (например, 14–29% от массы абсолютно сухого сырья в лузге гречки [3, 4], 23–27% в стеблях кукурузы [5], 30–39% в стержнях кукурузных початков [3, 6]) определяет профиль производства (фурфуrolный, фурфуrolно-дрожжевой, ксилитно-дрожжевой) и ассортимент получаемой продукции.

Одним из перспективных, экономически целесообразных и актуальных направлений является гидролитическая и микробиологическая переработка пентозансодержащего растительного сырья с получением фурфурола и белоксодержащих кормовых добавок. Это обусловлено дефицитом кормового белка во многих странах и неудовлетворенной потребностью в фурфуроле, получаемом в промышленных масштабах только гидролизом растительной биомассы.

Применяемые в настоящее время в промышленности для их получения технологические процессы недостаточно эффективны, так как обеспечивают невысокий выход целевых продуктов, энергоемки и сопровождаются образованием значительного количества отходов, превышающих выход основной продукции, что вызывает необходимость их совершенствования.

### **Способы получения фурфурола и кормовых добавок и пути их совершенствования**

В настоящее время промышленным способом получения фурфурола является парофазный гидролиз пентозансодержащего растительного сырья.

---

*Болтовский Валерий Станиславович* – доцент кафедры химической переработки древесины, доктор технических наук, тел.: (017) 327-80-46, e-mail: v-boltovsky@rambler.ru

Технология фурфурола и кормовых дрожжей основана на получении фурфурола парофазным гидролизом пентозансодержащего растительного сырья [3, 7] и кормовых дрожжей биохимической перера-

боткой гидролизатов, получаемых жидкофазным гидролизом остатка после образования фурфурола (целлолигина) [8, 9].

Выход фурфурола в гетерогенных условиях при парофазных способах гидролиза сырья не превышает 50 [7] – 60% [10] от теоретически возможного.

Принципиально отличается от парофазных способов получения фурфурола предложенный Н.П. Мельниковым и Ю.А. Цирлиным метод [10], предусматривающий раздельное проведение операций гидролиза гемицеллюлоз и дегидратации пентоз: на первой стадии осуществляется гетерогенно-гомогенный гидролиз гемицеллюлоз в мягких условиях с получением пентозного гидролизата, на второй – дегидратация пентоз в гомогенных условиях и отгонка фурфурола.

Последующими исследованиями показано [11], что такая технология позволяет стабилизировать условия проведения реакции, особенно при осуществлении непрерывного процесса, существенно снизить потери фурфурола при дегидратации пентоз и получить его высокий выход.

Существуют предпосылки для повышения выхода фурфурола путем его получения из растворов гексозных моносахаридов, образующихся при гидролизе гексозанов [12, 13], что позволяет при использовании промышленных гексозных гидролизатов дополнительно получить 10–12% фурфурола из 1 т абсолютно сухого сырья [14].

Для обеспечения необходимых условий дегидратации моносахаридов в растворах при использовании традиционных способов подвода энергии требуются высокий расход технологического пара и длительный нагрев, приводящий к осмолению фурфурола и, как следствие, его потерям, снижению выхода (40–45% от количества пентоз, содержащихся в гидролизате) и карамелизации оборудования [10].

Нагрев через стенку аппарата для проведения процесса дегидратации растворов моносахаридов не обеспечивает быстрого нагревания жидкости до температуры дегидратации, требует больших площадей теплообменных поверхностей и также не позволяет получить высокий выход фурфурола. Предварительный нагрев жидкости паром при высокой температуре ускоряет процесс образования фурфурола, но увеличивает степень его разложения. При обработке предварительно нагретого перегретым паром в эжекторе пентозного гидролизата, содержащего 3,5% редуцирующих веществ и 0,7% серной кислоты, при температуре 240–242 °С и продолжительности 60–65 с выход фурфурола составил до 75% от теоретически возможного [15].

Следовательно, наиболее эффективным способом увеличения выхода фурфурола является дегидратация пентоз в гомогенных условиях. Для достижения высокой эффективности этого процесса необходимо обеспечить быстрый нагрев больших объемов гидролизата до температуры дегидратации пентоз и непрерывный (по мере образования) отвод фурфурола из зоны реакции.

Однако не решенной до настоящего времени проблемой, сдерживающей реализацию этого способа, является большая продолжительность нагрева при использовании в качестве теплоносителя технологического пара, что приводит к потерям фурфурола и требует значительных энергозатрат на нагрев больших объемов жидкости.

Одним из путей повышения эффективности и интенсификации процесса жидкофазной дегидратации пентоз в фурфурол является применение энергии сверхвысоких частот, позволяющей осуществлять интенсивный нагрев в массе материала и используемой, например, для сушки древесины [16], бумаги и картона [17], древесной стружки [18], окорки древесины [19], делигнификации древесины с целью получения целлюлозосодержащего продукта [20], карбоксиметилирования древесины [21], предварительной обработки лигноцеллюлозных материалов перед ферментативным гидролизом и биоконверсией в этанол [22–25] и белок [26, 27], осуществления гидролитической деструкции полисахаридов древесины [28–31] и других целей.

При осуществлении двухстадийного гидролиза растительной биомассы после первой стадии гидролиза гемицеллюлоз в мягких условиях для получения пентозного гидролизата (или фурфурола парофазным методом) остатком является целлолигин, содержащий практически не затронутую деструктивными процессами целлюлозу. Его переработка применявшимися ранее способами перколяционного гидролиза для получения гидролизатов, используемых для производства кормовых дрожжей, в настоящее время проблематична в связи с чрезвычайно высокими энергетическими затратами и образованием значительного количества отходов (главным образом гидролизного лигнина). Дефицит теплоносителей и постоянное увеличение цен на них приводят к росту стоимости кормовых дрожжей, что затрудняет их реализацию.

Одним из целесообразных способов переработки целлолигнина является его микробиологическая конверсия микроорганизмами в виде твердого субстрата для получения обогащенных белком кормовых добавок.

Основными преимуществами ферментализации по сравнению с кислотным гидролизом являются: специфичность ферментативного катализа, которая обуславливает избирательный гидролиз гликозидных связей полисахаридов; отсутствие вторичных деструкционных превращений образовавшихся моносахаридов, что в принципе позволяет получить их выход, близкий к теоретическому; возможность проведения процесса при невысоких температурах, т.е. без значительных энергетических затрат [32–35]. При этом для промышленной реализации представляет интерес твердофазная ферментация (ТФФ) крахмалсодержащих и лигноцеллюлозных субстратов (по сравнению с применяемой для производства кормовых дрожжей глубокой ферментацией гидролизатов) [36, 37].

Таким образом, перспективным направлением представляется переработка пентозансодержащей растительной биомассы, обеспечивающая комплексное использование ее компонентов, путем повышения эффективности и интенсификации процесса дегидратации пентоз в гомогенных условиях в фурфурол за счет применения энергии сверхвысоких частот и биоконверсии целлолигнина в белок методом твердофазной ферментации.

### ***Дегидратация пентоз в гомогенных условиях в фурфурол под действием СВЧ-энергии***

Применение СВЧ-энергии обеспечивает интенсивный объемный нагрев пентозосодержащих растворов и высокую скорость реакции образования фурфуrolа. При СВЧ-обработке модельных растворов ксилитозы с различным содержанием (0,5–4,5%) серной кислоты (катализатор) показано, что при ее концентрации, применяемой в промышленности для жидкофазного гидролиза растительного сырья (0,5%), температура, при которой обеспечивается дегидратация пентоз в фурфурол (160–165 °С), достигается при продолжительности СВЧ-воздействия 10 с, а при использовании предварительно нагретых до 100 °С растворов (что соответствует температуре пентозных гидролизатов после операции инверсии) – за 4 с [38].

При дегидратации ксилитозы в гомогенных условиях под действием СВЧ-энергии выход фурфуrolа составил не менее 82% от теоретически возможного при общей продолжительности процесса 30 с [39, 40].

Эффективность процесса СВЧ-дегидратации модельных растворов ксилитозы в фурфурол подтверждена при использовании пентозных гидролизатов, полученных гидролизом гемицеллюлоз древесины березы и древесно-кустарникового растительного сырья. Дегидратация пентозного гидролизата с содержанием редуцирующих веществ 3,5% и серной кислоты 0,5% в СВЧ-реакторе обеспечивает выход фурфуrolа до 82,5% от теоретически возможного [41, 42].

### ***Биоконверсия целлолигнина в белок твердофазной ферментацией***

В условиях термokatалитического гидролиза легкогидролизуемых полисахаридов растительного сырья происходит гидролитическое растворение гемицеллюлоз с образованием моносахаридов и частичная деструкция трудногидролизуемых полисахаридов [1]. В оставшемся целлолигнине содержится достаточное для переработки количество целлюлозы и значительно меньше гемицеллюлоз [43–45].

Такая обработка вместе с разрыхлением структуры целлолигнина при применяемом в промышленности способе удаления остатка после гидролиза из гидролизатора способствует его применению в качестве не требующего предварительной подготовки субстрата для биоконверсии методом твердофазной ферментации и является более эффективным способом повышения реакционной способности, гидролиземости трудногидролизуемых полисахаридов и эффективности их биоконверсии в белок, чем, например, механическим и химическим (1%-ным раствором гидроксида натрия) и сравнима с СВЧ-обработкой. После глубокой ферментации целлолигнина в виде суспензии с содержанием его в питательной среде в количестве 5% при использовании грибов вида *Trichoderma viride* содержание сырого протеина составило 15,58% от массы ферментируемого субстрата, а при применении симбиотической культуры микромицета *T. viride*, обеспечивающей деструкцию полисахаридов, и дрожжеподобных грибов *Candida tropicalis*, эффективно усваивающих моносахариды, – 18,52% от массы субстрата [44, 45].

Однако культивирование микроорганизмов на нерастворимых субстратах глубинным способом осуществляется при их невысоком содержании в культуральной жидкости, лимитируемом затратами на аэрацию

и перемешивание среды, что обуславливает необходимость применения оборудования большой емкости и существенного увеличения производственных площадей, а также последующего отделения твердого нерастворимого продукта от культуральной жидкости и очистки значительных объемов сточных вод.

Биоконверсия целлюлогина древесины березы (содержащего 58,5% полисахаридов и 38,4% лигнина) методом ТФФ с использованием микромицетов *Trichoderma viride* и *Aspergillus niger* приводит к накоплению 15,7% сырого протеина [46], а целлюлогина, полученного из древесно-кустарниковой растительности, с содержанием 46,5% полисахаридов и 48,4% лигнина – 9% [47].

Биоконверсия целлюлогина твердофазной ферментацией обеспечивает комплексное использование растительной биомассы при получении фурфурола и исключает образование основного крупнотоннажного отхода гидролизного производства – технического лигнина.

### **Технология комплексной гидролитической и микробиологической переработки растительной биомассы**

Разработана технология комплексной переработки пентозансодержащей растительной биомассы с получением фурфурола дегидратацией пентозных гидролизатов под действием СВЧ-энергии и белоксодержащей кормовой добавки ТФФ целлюлогина [48].

Пентозный гидролизат, полученный перколяционным гидролизом гемицеллюлоз растительного сырья при параметрах, соответствующих первой стадии двухстадийного гидролиза [1], после операций самоиспарения и инверсии с температурой около 100 °С направляется в аппарат для СВЧ-обработки, в котором под действием электромагнитных волн сверхвысокочастотного диапазона происходит его интенсивный объемный нагрев, приводящий к дегидратации пентоз в фурфурол.

СВЧ-нагрев гидролизата обеспечивает осуществление процесса дегидратации пентоз с большой скоростью, при этом существенно уменьшается возможность смолообразования, связанного с вторичными превращениями продуктов дегидратации [40, 41, 49, 50].

Содержащиеся в фурфуролсодержащем растворе высококипящие примеси отделяются в процессе самоиспарения фурфуролсодержащих паров в испарителе. После конденсации паров фурфуролсодержащий конденсат подвергается дальнейшему самоиспарению и направляется в ректификационное отделение для выделения, концентрирования и очистки фурфурола по типовой схеме, принятой в производстве фурфурола.

Преимущества нового [40, 41] способа получения фурфурола заключаются в следующем:

- обеспечивается выход фурфурола не менее 82% от теоретически возможного;
- процесс СВЧ-дегидратации пентоз в фурфурол осуществляется без применения технологического пара;
- непродолжительное пребывание фурфурола в реакционной зоне предотвращает его вторичные превращения и образование продуктов, приводящих к карамелизации оборудования;
- за счет использования гидролизата, имеющего после инверсии температуру около 100 °С, исключаются затраты тепла на его предварительный нагрев перед СВЧ-дегидратацией, что снижает энергоемкость процесса.

Целлюлогин выгружается из гидролизатора в циклон-сеежу путем быстрого снижения давления от 0,6–0,7 МПа до атмосферного, что приводит к его разрыхлению и дополнительному увеличению реакционной способности.

В отличие от применяемого ранее способа переработки целлюлогина путем последующего перколяционного гидролиза, его биоконверсия в виде твердого субстрата исключает энергоемкие операции гидролиза, подготовки гидролизата к биохимической переработке, глубокой ферментации субстрата, концентрирования дрожжевой суспензии и удаления воды высушиванием суспензии с содержанием дрожжей 22–25% для получения сухих дрожжей 10%-ной влажности.

Разработаны технологический процесс биоконверсии целлюлогина его твердофазной ферментацией мицелиальными грибами [48, 51] и аппарат для ТФФ непрерывного действия [52].

Биоконверсия целлюлогина твердофазной ферментацией микромицетами приводит к снижению содержания трудногидролизуемых полисахаридов и лигнина и обогащению его сырым протеином до 12–15% от массы абсолютно сухого субстрата, что соответствует его содержанию в кормовых добавках, получаемых при ферментации мицелиальными грибами растительных субстратов на основе отходов сельскохозяйственного производства [53].

### **Выводы**

Технология комплексной переработки растительной биомассы с получением фурфурола дегидратацией пентозных гидролизатов под действием СВЧ-энергии позволяет интенсифицировать процесс и обеспечить выход фурфурола не менее 82% от теоретически возможного, а применение целлюлогина в качестве субстрата для биоконверсии исключает энергоемкие операции, характерные для производства кормовых дрожжей на основе гидролизатов растительной биомассы, и образование лигнина.

### **Список литературы**

1. Холькин Ю.И. Технология гидролизных производств. М., 1989. 496 с.
2. Болтовский В.С. Ресурсы растительной биомассы Республики Беларусь для химической и биохимической переработки // Труды БГТУ. 2007. Сер. IV. Вып. XV. С. 143–148.
3. Морозов Е.Ф. Производство фурфурола. М., 1979. 200 с.
4. Дудник Л.И., Чикишева Л.И., Радостева М.Н., Дудник Г.Л. Получение гидролизатов из гречневой шелухи и ее смесей с подсолнечной лузгой для выращивания кормовых дрожжей // Гидролизная и лесохимическая промышленность. 1989. №3. С. 27–28.
5. Tortosa, J.F., Rubio M., Gomes D. Autohidrolisis de tallo de maiz en suspension acuosa // AFINIDAD. 1995. N457. Pp. 181–188.
6. Garrote G., Dominguer H., Parajo J.C. Fraccionamiento quimico de zuros de mair en medio acuosa // AFINIDAD. 2002. N500. Pp. 357–361.
7. Ведерников Н.А. Работы Института химии древесины по гидролизу растительного сырья с применением концентрированной серной кислоты и их дальнейшее развитие // Комплексное использование древесного сырья. Рига, 1984. С. 69–71.
8. Коломиец В.И., Самсонов П.И., Шкут В.М., Морозов Е.Ф. Получение фурфурола двухфазным гидролизом лиственной древесины с применением монокальцийфосфата // Гидролизная и лесохимическая промышленность. 1984. №6. С. 26–28.
9. Андреев А.А., Брызгалов Л.И. Производство кормовых дрожжей. М., 1986. 248 с.
10. Мельников Н.П., Цирлин Ю.А. Получение фурфурола из пентозных растворов // Сб. тр. ВНИИГС, М.; Л., 1959. Т. 7. С. 84–96.
11. Цирлин Ю.А. Дегидратация пентозных гидролизатов с получением фурфурола // Гидролизная и лесохимическая промышленность. 1991. №4. С. 12–14.
12. Слоняев В.П., Порубова А.Т., Холькин Ю.И. Получение фурфурола из гексоз // Гидролизная и лесохимическая промышленность. 1988. №4. С. 8–10.
13. Слоняев В.П., Порубова А.Т., Шкряева Ю.Ю. Получение фурфурола из гексозных моносахаридов // Гидролизная и лесохимическая промышленность. 1988. №8. С. 14–16.
14. Нестерова Е.В., Елкин В.А. Получение фурфурола из гексозных гидролизатов // Химия растительного сырья. 2010. №3. С. 43–46.
15. А. с. 1225841 (СССР). Непрерывный способ получения фурфурола / Мухин Б.П., Смоляков В.П., Кульневич В.Г. 13.11.1986.
16. Гареев Ф.А. СВЧ-сушка древесины: проблемы и перспективы // Шпindelъ. 2004. №1. С. 26–28.
17. Jones P.L. Dielectric moisture profile improvement of Typical papers and board // Paper Technology. 1973. N14. Pp. 38–41.
18. Торговников Г.И., Кодеба С.Д. Сушка древесной стружки в сверхвысокочастотном поле // Технология и материалы деревообрабатывающих производств. Научные труды Моск. гос. ун-та леса. М., 1983. Вып. 149. С. 31–33.
19. Торговников В.И., Мануйлов Н.А., Югов В.Г. Новый метод окорки лесоматериалов // Лесная промышленность. 1975. №11. С. 23.
20. Аутлов С.А., Базарнова Н.Г., Кушнер Е.Ю. Получение целлюлозосодержащего продукта под воздействием микроволнового излучения // Химия и полная переработка биомассы леса : тез. докл. I кластер. конф., СПб., 2010. С. 221.
21. Маркин В.И., Базарнова Н.Г., Колосов П.В., Чепрасова М.Ю., Москова Ю.С. Карбоксиметилирование древесины сосны после ее обработки в системе «уксусная кислота – пероксид водорода – вода – катализатор» под воздействием микроволнового излучения // Химия растительного сырья. 2012. №4. С. 55–60.
22. Azuma J., Tanaka F., Koshijima T. Enhancement of enzymic susceptability of lignocellulosic wastes by microwave irradiation // J. Ferment. Technol. 1984. Vol. 62, N4. Pp. 377–384.
23. Magara K., Azuma J., Koshijima T. Microwave irradiation of lignocellulosic materials. X. Conversion of microwave irradiated agricultural wastes into ethanol // Wood Res. 1989. №76. Pp. 1–9.
24. Azuma J., Koshijima T. Enzymatic saccharification of woody plant. II. Synergistic effects on enzymatic saccharification // Wood Res. 1984. N70. Pp. 17–24.
25. Azuma J., Katayama T., Koshijima T. Microwave irradiation of lignocellulosic materials. VIII. Microwave irradiation of the neutral fraction of pine bjorkman LCC // Wood Res. 1986. N72. Pp. 1–11.

26. Болтовский В.С., Цедрик Т.П., Гальперин А.С. Повышение эффективности гидролитической деструкции и биоконверсии растительных материалов путем их обработки в электромагнитном поле сверхвысоких частот // Строение, гидролиз и биотехнология растительной биомассы : тез. докл. Междунар. симп., СПб., 1992. С. 18–19.
27. Болтовский В.С. Гальперин А.С., Безъязычная А.В. Повышение эффективности биоконверсии древесины путем ее предварительной обработки в электромагнитном поле сверхвысоких частот // Химия древесины. 1991. №6. С. 57–61.
28. Болтовский В.С., Гальперин А.С. Гидролитическая деструкция полисахаридов древесины в поле СВЧ // Гидролизная и лесохимическая промышленность. 1993. №3. С. 5–6.
29. Boltovskii V.S., Gal'perin A.S. Hydrolytic destruction of wood polysaccharides in a microwave field // Hydrolysis and wood chemistry. 1993. №5. P. 14–18.
30. Некрасов Д.В., Цедрик Т.П., Болтовский В.С. Гидролитическая деструкция полисахаридов в электромагнитном поле сверхвысоких частот // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. Навук. 1995. №3. С. 54–57.
31. Болтовский В.С., Некрасов Д.В. Получение субстратов для производства биотехнологических продуктов СВЧ-гидролизом растительного сырья // Проблемы микробиологии и биотехнологии : материалы Междунар. конф. Минск, 1998. С. 109–110.
32. Клесов А.А. Ферментативная переработка целлюлозосодержащих материалов в сахара и жидкое топливо. М., 1987. Вып. 2. 28 с.
33. Лобанок А.Г., Бабицкая В.Г., Богдановская Ж.Н. Микробный синтез на основе целлюлозы. Белок и другие ценные продукты. Минск, 1988. 261 с.
34. Калунянец К.А., Шаненко Е.Ф., Зайцева Л.В. Современные способы ферментативного гидролиза целлюлозосодержащих материалов // Итоги науки и техники. Сер. Химия и технология пищевых продуктов. 1981. Т. 1. С. 185.
35. Синицын А.П., Гусаков А.В., Черноглазов В.М. Биоконверсия лигноцеллюлозных материалов. М., 1995. 224 с.
36. Виестур У.Э., Шмите И.А., Жилевич А.В. Биотехнология: Биологические агенты, технология, аппаратура. Рига, 1987. 263 с.
37. Смирнов К.А., Алашкевич Ю.Д., Решетова Н.С. Особенности твердофазной ферментации // Химия растительного сырья. 2009. №3. С. 161–164.
38. Остроух О.В., Болтовский В.С. Особенности СВЧ-нагрева пентозных растворов // Материалы. Технологии. Инструменты. 2009. Т. 4, №1. С. 87–89.
39. Остроух О.В., Болтовский В.С., Цедрик Т.П. Влияние сверхвысоких частот на образование фурфурола из ксилозы // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. 2002. №1. С. 59–61.
40. Патент 3346 (Респ. Беларусь). Способ получения фурфурола / В.С. Болтовский, Т.П. Цедрик, А.Э. Ариас. 20.12.99.
41. Патент 6997 (Респ. Беларусь). Способ получения фурфурола дегидратацией пентозных гидролизатов / В.С. Болтовский, О.В. Остроух, Т.П. Цедрик. 27.12.2004.
42. Болтовский В.С., Остроух О.В. СВЧ-дегидратация пентоз в фурфурол в гомогенных условиях // Химия и полная переработка биомассы леса : тез. докл. I кластер. конф. СПб., 2010. С. 16.
43. Шевчук М.О., Шишаков Е.П. Переработка отходов гидролизной промышленности с получением росторегулирующего вещества // Новые технологии рециклинга отходов производства и потребления : матер. Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 2008. С. 123–125.
44. Болтовский В.С., Цедрик Т.П. Повышение эффективности биоконверсии отходов деревообработки // Деревообрабатывающая промышленность. 1996. №3. С. 29–31.
45. Болтовский В.С., Цедрик Т.П., Некрасов Д.В. Повышение эффективности использования отходов лесопиления и деревообработки при биоконверсии // Лесная наука на рубеже XXI века : сб. науч. тр. Ин-та леса НАН Беларуси. Гомель, 1997. Вып. 46. С. 334–336.
46. Цедрик Т.П., Болтовский В.С., Некрасов Д.В. Биоконверсия целлюлозы мицелиальными грибами // Труды БГТУ. Сер. III. 1996. Вып. IV. С. 23–27.
47. 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.
48. Болтовский В.С. Новые технологические процессы гидролитической и биохимической переработки растительной биомассы. Минск, 2009. 193 с.
49. Болтовский В.С., Цедрик Т.П., Остроух О.В. Интенсификация технологических процессов гидролизного производства с использованием энергии электромагнитного поля СВЧ // Разработка импортзамещающих технологий и материалов в химической промышленности. матер. Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 1999. С. 247–249.
50. Остроух О.В., Болтовский В.С., Цедрик Т.П. Получение фурфурола дегидратацией пентозных растворов с использованием энергии СВЧ // Труды БГТУ. Сер. IV. 2002. Вып. X. С. 57–59.
51. Погорелова Ю.Н., Болтовский В.С., Цедрик Т.П. Энергосберегающая и экологически безопасная технология углеводно-белковой кормовой добавки на основе растительной биомассы // Система управления экологической безопасностью : сб. тр. II заоч. науч.-практ. конф. Екатеринбург, 2008. Т. 2. С. 89–93.
52. Патент 16946 (Респ. Беларусь). Аппарат для твердофазной ферментации / В.Н. Павлечко, В.С. Болтовский. 10.12.12.
53. Бакай С.М. Биотехнология обогащения кормов мицелиальным белком. Киев, 1987. 168 с.

*Boltovskij V.S. COMPLEX HYDROLYTIC PROCESSING OF PENTOSAN PLANT BIOMASS FOR PRODUCTION FURFURAL AND PROTEIN-CONTAINING FEED ADDITIVE (REVIEW)*

*Belarusian State Technological University, Sverdlova st., 13a, Minsk, 220050 (Republic of Belarus),*

*e-mail: v-boltovsky@rambler.ru*

The review is devoted to methods of complex hydrolytic and microbial processing for the production of furfural from pentose hydrolysates and protein-containing feed additives, said process comprising bioconversion the said pentose hydrolysates and protein-containing feed additives by solid-phase fermentation of lignocellulose.

*Keywords:* plant biomass, hydrolysis, microwave energy, furfural, lignocellulose, solid-phase fermentation, crude protein.

### References

1. Khol'kin Ju.I. *Tekhnologija gidroliznykh proizvodstv*. [Technology of production of hydrolytic]. Moscow, 1989, 496 p. (in Russ.).
2. Boltovskij V.S. *Trudy BGTU*, 2007, Ser. IV, no. XV, pp. 143–148. (in Russ.).
3. Morozov E.F. *Proizvodstvo furfurola*. [Production of furfural]. Moscow, 1979, 200 p. (in Russ.).
4. Dudnik L.I., Chikisheva L.I., Radosteva M.N., Dudnik G.L. *Gidroliznaja i lesohimicheskaja promyshlennost'*, 1989, no. 3, pp. 27–28. (in Russ.).
5. Tortosa, J.F., Rubio M., Gomes D. *AFINIDAD*, 1995, no. 457, pp. 181–188.
6. Garrote, G., Dominguer H., Parajo J.C. *AFINIDAD*, 2002, no. 500, pp. 357–361.
7. Vedernikov N.A. *Kompleksnoe ispol'zovanie drevesnogo syr'ja*. [Integrated use of wood raw material]. Riga, 1984, pp. 69–71. (in Russ.).
8. Kolomiec V.I., Samsonov P.I., Shkut V.M., Morozov E.F. *Gidroliznaja i lesohimicheskaja promyshlennost'*, 1984, no. 6, pp. 26–28. (in Russ.).
9. Andreev A.A., Bryzgalov L.I. *Proizvodstvo kormovykh drozhdzhej*. [Production of fodder yeast]. Moscow, 1986, 248 p. (in Russ.).
10. Mel'nikov N.P., Cirlin Ju.A. *Sbornik trudov VNIIGS*. [Proceedings of VNIIGS]. Moscow ; Leningrad, 1959, vol. 7, pp. 84–96. (in Russ.).
11. Cirlin Ju.A. *Gidroliznaja i lesohimicheskaja promyshlennost'*, 1991, no. 4, pp. 12–14. (in Russ.).
12. Sljunjaev V.P., Porubova A.T., Hol'kin Ju.I. *Gidroliznaja i lesohimicheskaja promyshlennost'*, 1988, no. 4, pp. 8–10. (in Russ.).
13. Sljunjaev V.P., Porubova A.T., Shkroeva Ju.Ju. *Gidroliznaja i lesohimicheskaja promyshlennost'*, 1988, no. 8, pp. 14–16. (in Russ.).
14. Nesterova E.V., Elkin V.A. *Himija rastitel'nogo syr'ja*, 2010, no. 3, pp. 43–46. (in Russ.).
15. Patent 1225841 (USSR). 1986. (in Russ.).
16. Gareev F.A. *Shpindel'*, 2004, no. 1, pp. 26–28. (in Russ.).
17. Jones P.L. *Paper Technology*, 1973, no. 14, pp. 38–41.
18. Torgovnikov G.I., Kodeba S.D. *Tehnologija i materialy derevoobrabatyvajushchih proizvodstv. Nauchnye trudy Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa*. [Technology and materials woodworking industries. Scientific works of Moscow State Forest University]. Moscow, 1983, no. 149, pp. 31–33. (in Russ.).
19. Torgovnikov V.I., Manujlov N.A., Jugov V.G. *Lesnaja promyshlennost'*, 1975, no. 11, p. 23. (in Russ.).
20. Autlov S.A., Bazarnova N.G., Kushner E.Ju. *Himija i polnaja pererabotka biomassy lesa: tezisy dokladov mezhdunarodnoj konferencii*. [Chemicals and complete processing of forest biomass: Abstracts of the International Conference]. St. Petersburg, 2010, pp. 221. (in Russ.).
21. Markin V.I., Bazarnova N.G., Kolosov P.V., Cheprasova M.Ju., Moskova Ju.S. *Himija rastitel'nogo syr'ja*, 2012, no. 4, pp. 55–60. (in Russ.).
22. Azuma J., Tanaka F., Koshijima T. *J. Ferment. Technol.*, 1984, vol. 62, no. 4, pp. 377–384.
23. Magara K., Azuma J., Koshijima T. *Wood Res.*, 1989, no. 76, pp. 1–9.
24. Azuma J., Koshijima T. *Wood Res.*, 1984, no. 70, pp. 17–24.
25. Azuma J., Katayama T., Koshijima T. *Wood Res.*, 1986, no. 72, pp. 1–11.
26. Boltovskij V.S., Cedrik T.P., Gal'perin A.S. *Stroenie, gidroliz i biotehnologija rastitel'noj biomassy: tezisy dokladov mezhdunarodnogo simpoziuma*. [Structure, the hydrolysis of plant biomass and biotechnology: Abstracts of the International Symposium]. St. Petersburg, 1992, pp. 18–19. (in Russ.).
27. Boltovskij V.S., Gal'perin A.S., Bezjazychnaja A.V. *Himija drevesiny*, 1991, no. 6, pp. 57–61. (in Russ.).
28. Boltovskij V.S., Gal'perin A.S. *Gidroliznaja i lesohimicheskaja promyshlennost'*, 1993, no. 3, pp. 5–6. (in Russ.).
29. Boltovskii V.S., Gal'perin A.S. *Hydrolysis and wood chemistry*, 1993, no. 5, pp. 14–18.
30. Nekrasov D.V., Tsedrik T.P., Boltovskii V.S. *Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. him. Navuk*, 1995, no. №3, pp. 54–57. (in Russ.).
31. Boltovskii V.S., Nekrasov D.V. *Problemy mikrobiologii i biotekhnologii: materialy mezhdunarodnoi konferentsii*. [Problems of Microbiology and Biotechnology: Proceedings of the International Conference]. Minsk, 1998, pp. 109–110. (in Russ.).
32. Klesov A.A. *Fermentativnaia pererabotka tselliulozosoderzhashchikh materialov v sakhara i zhidkoe toplivo*. [Enzymatic processing of cellulosic material into sugars and liquid fuels]. Moscow, 1987, no. 2, 28 p. (in Russ.).
33. Lobanok A.G., Babitskaia V.G., Bogdanovskaia Zh.N. *Mikrobnyi sintez na osnove tselliulozy. Belok i drugie tsennye produkty*. [Microbial synthesis of the cellulose. Protein and other valuable products]. Minsk, 1988, 261 p. (in Russ.).

34. Kalunians K.A., Shanenko E.F., Zaitseva L.V. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Khimiia i tekhnologiia pishchevykh produktov*, 1981, vol. 1, p. 185. (in Russ.).
35. Sinitsyn A.P., Gusakov A.V., Chernoglazov V.M. *Biokonversiiia lignotselliuloznykh materialov*. [Bioconversion of lignocellulosic materials]. Moscow, 1995, 224 p. (in Russ.).
36. Viestur U.E., Shmite I.A., Zhilevich A.V. *Biotehnologiia: Biologicheskie agenty, tekhnologiia, apparatura*. [Biotechnology: Biological agents, technology, equipment]. Riga, 1987, 263 p. (in Russ.).
37. Smirnov K.A., Alashkevich Iu.D., Reshetova N.S. *Khimiia rastitel'nogo syr'ia*, 2009, no. 3, pp. 161–164. (in Russ.).
38. Ostroukh O.V., Boltovskii V.S. *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty*, 2009, vol. 4, no. 1, pp. 87–89. (in Russ.).
39. Ostroukh O.V., Boltovskii V.S., Tsedrik T.P. *Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. him. navuk*, 2002, no. 1, pp. 59–61. (in Russ.).
40. Patent 3346 (BY). 1999. (in Russ.).
41. Patent 6997 (BY). 2004. (in Russ.).
42. Boltovskii V.S., Ostroukh O.V. *Himija i polnaja pererabotka biomassy lesa: tezisy dokladov mezhdunarodnoj konferencii*, [Chemicals and complete processing of forest biomass: Abstracts of the International Conference]. St. Petersburg, 2010, p. 16. (in Russ.).
43. Shevchuk M.O., Shishakov E.P. *Novye tekhnologii retsiklinga otkhodov proizvodstva i potrebleniia: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. [New technologies of recycling of waste production and consumption: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 2008, pp. 123–125. (in Russ.).
44. Boltovskii V.S., Tsedrik T.P. *Derevoobrabatyvaiushchaia promyshlennost'*, 1996, no. 3, pp. 29–31. (in Russ.).
45. Boltovskii V.S., Tsedrik T.P., Nekrasov D.V. *Lesnaia nauka na rubezhe KhKhI veka: sbornik nauchnykh trudov instituta lesa NAN Belarusi*. [Forest research at the turn of the twenty-first century: collection of scientific papers in woods Institute of NAS of Belarus]. Gomel, 1997, no. 46, pp. 334–336. (in Russ.).
46. Tsedrik T.P., Boltovskii V.S., Nekrasov D.V. *Trudy BGTU. Seriya III*. 1996, no. 4, pp. 23–27. (in Russ.).
47. Ostroukh O.V., Tsedrik T.P., Boltovskii V.S. *Ves. Nac. akad. navuk Belarusi. Ser. him. navuk*, 2002, no. 2, pp. 94–98. (in Russ.).
48. Boltovskii V.S. *Novye tekhnologicheskie protsessy gidroliticheskoi i biokhimicheskoi pererabotki rasti-tel'noi biomassy*. [New technological processes of hydrolytic and biochemical processing plant biomass]. Minsk, 2009, 193 p. (in Russ.).
49. Boltovskii V.S., Tsedrik T.P., Ostroukh O.V. *Razrabotka importozameshchaiushchikh tekhnologii i materialov v khimicheskoi promyshlennosti: materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii*. [Development of import-substituting technologies and materials in the chemical industry: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Minsk, 1999, pp. 247–249. (in Russ.).
50. Ostroukh O.V., Boltovskii V.S., Tsedrik T.P. *Trudy BGTU. Seriya IV*, 2002, no. X, pp. 57–59. (in Russ.).
51. Pogorelova Iu.N., Boltovskii V.S., Tsedrik T.P. *Sistema upravleniia ekologicheskoi bezopasnost'iu: sbornik trudov II zaочноi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. [The system of environmental control: Proceedings of the II part-time theoretical and practical conference]. Yekaterinburg, 2008, vol. 2, pp. 89–93. (in Russ.).
52. Patent 16946 (BY). 2012. (in Russ.).
53. Bakai S.M. *Biotehnologiia obogashcheniia kormov mitselial'nym belkom*. [Biotechnology enriching feeds mycelial protein]. Kiev, 1987, 168 p. (in Russ.).

Received May 26, 2013