

УДК 630*863

В. С. Болтовский

Белорусский государственный технологический университет

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЧ-ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГИДРОЛИТИЧЕСКОЙ
И БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ:
ВОЗМОЖНОСТИ, СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ (ОБЗОР)**

В статье приведен обзор литературы по изучению влияния электромагнитного излучения сверхвысокочастотного диапазона на целлюлозу и лигноцеллюлозную растительную биомассу и использованию СВЧ-энергии для гидролитической и биотехнологической переработки растительного сырья. Применение постоянно возобновляемой в процессе фотосинтеза растительной биомассы (фитомассы) взамен интенсивно сокращающихся запасов ископаемых видов органического сырья в настоящее время и на перспективу является актуальной задачей. Гидролитическая и биотехнологическая переработка растительного сырья обеспечивает получение этилового спирта, кормовых дрожжей, фурфурола, разнообразных фурановых производных на его основе, ксилита и других продуктов. Одним из перспективных способов повышения реакционной способности целлюлозы, эффективности процессов кислотного и ферментативного гидролиза, биоконверсии растительного сырья в биоэтанол и для обогащения его белком, дегидратации пентоз в гомогенных условиях в фурфурол является использование СВЧ-энергии.

Ключевые слова: целлюлоза, растительное сырье, СВЧ-энергия, полисахариды, гидролиз, биоконверсия, белок, биоэтанол, пентозы, фурфурол.

V. S. Boltovskiy

Belarusian State Technological University

**THE USE OF MICROWAVE ENERGY FOR HYDROLYTIC
AND BIOTECHNOLOGICAL PROCESSING OF VEGETABLE RAW MATERIALS:
THE OPPORTUNITIES AND PROSPECTS (REVIEW)**

The article provides a review of the literature on the study of the influence of electromagnetic waves of the ultra-high frequency range on cellulose and lignocellulose plant biomass and the use of electromagnetic field energy of ultra-high frequencies (microwave energy) for hydrolytic and biotechnological processing of plant raw materials. The use of constantly renewable in the process of photosynthesis of plant biomass (phytomass) instead of rapidly declining reserves of fossil organic raw materials is currently and in the future is an urgent task. Hydrolytic and biotechnological processing of vegetable raw materials ensures the production of ethyl alcohol, feed yeast, furfural, a variety of furan derivatives based on it, xylitol and other products. One of the perspective ways of increasing the reactivity of cellulose, the efficiency of the processes of acid and enzymatic hydrolysis, bioconversion of vegetable raw materials into bioethanol and for the enrichment of its protein, dehydration of pentoses in homogeneous conditions furfural is the use of microwave energy.

Key words: cellulose, vegetable raw materials, microwave energy, polysaccharides, hydrolysis, bioconversion, protein, bioethanol, pentoses, furfural.

Введение. В настоящее время и на перспективу актуальность промышленного использования постоянно возобновляемой в процессе фотосинтеза растительной биомассы (фитомассы) как альтернативного источника интенсивно сокращающихся запасов ископаемых видов органического сырья, по мнению большинства экспертов, не вызывает сомнений. Растительное сырье считается одним из ключевых возобновляемых ресурсов будущего [1, 2].

Основные по количественному содержанию высокомолекулярные компоненты растительной биомассы – целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин служат источником получения энергии, а также крупнотоннажного производства раз-

личных продуктов, многие из которых получают только из растительного сырья. Его глубокая и эффективная переработка – одно из важнейших направлений развития науки и техники в ближайшем будущем для решения энергетических, продовольственных и других задач. Этому способствует наличие во многих странах запасов растительного сырья и востребованность в продуктах его переработки. Особое внимание уделяется использованию не имеющего пищевой ценности лигноцеллюлозного растительного сырья (отходов деревопереработки и сельскохозяйственного производства).

При гидролитической и биотехнологической переработке различных видов раститель-

ного сырья получают этиловый спирт, кормовые дрожжи, фурфурол, разнообразные фурановые производные на его основе, ксилит и другие продукты.

Наибольшее развитие гидролизное производство, основанное на кислотном гидролизе растительного сырья, получило в СССР. Однако в настоящее время на постсоветском пространстве гидролизные предприятия перепрофилированы или, за исключением некоторых, прекратили свою деятельность вследствие высокой энергоемкости, невысокого выхода целевых продуктов, образования значительного количества отходов, превышающих по количеству основную продукцию, а также загрязненных сточных вод и выбросов в атмосферу [3].

В то же время востребованность на мировом рынке продуктов гидролизного производства возрастает, что обусловлено использованием этилового спирта в качестве топлива для автотранспорта, дефицитом во многих странах кормового белка, неудовлетворенной потребностью различных отраслей промышленности в фурфуроле и его фурановых производных и других видах продукции.

Поэтому в развитых странах проводятся исследования по разработке технологий их получения как различными способами кислотного [4–13], так и ферментативного гидролиза [14–18], в том числе реализованные в промышленных масштабах.

Ферментативный гидролиз устраняет наиболее существенные недостатки кислотного – обеспечивает выход моносахаридов, близкий к теоретически возможному при сравнительно невысоких температурах процесса. Однако его осуществление (как и процесса прямой биоконверсии растительной биомассы, особенно древесной) сдерживается длительностью, обусловленной трудной гидролизуемостью основного полисахаридного компонента растительного сырья – целлюлозы, что связано с особенностями ее строения и надмолекулярной структуры [19, 20], и требует предварительной обработки сырья для повышения реакционной способности [14, 21–29].

Решение указанных проблем может быть обеспечено за счет комплексного использования компонентов растительной биомассы и повышения эффективности ее гидролитической и ферментативной переработки на основе применения принципиально новых технологических и технических подходов.

Основная часть. Одним из перспективных способов повышения эффективности кислотного и ферментативного гидролиза является использование электромагнитного поля сверхвысоких частот (СВЧ-энергии).

Основы теории и практического применения СВЧ-энергии (за рубежом и в последние годы в русскоязычной литературе стал часто употребляться термин «микроволновое излучение») изложены в многочисленной специальной литературе, например [30–34].

Согласно ГОСТ 24375–80 «Термины и определения», виды радиоволн подразделяются по диапазонам (дециметровые, сантиметровые и т. п.), а в зависимости от распространения – по различным частотам (в частности, сверхвысокие). Диапазон электромагнитного излучения в области сверхвысоких частот – 300 ГГц – 300 МГц (длина волны от миллиметровых длиной 1 мм до дециметровых длиной 1 м). В Республике Беларусь разрешенными к применению для промышленных, медицинских и научных целей являются частоты (915 ± 13) МГц и более широко – (2450 ± 50) МГц.

Под воздействием СВЧ-энергии на диэлектрические материалы за счет электронной, ионной и преимущественно дипольно-релаксационной поляризации (заклЮчающейся в повороте дипольных молекул в направлении внешнего электрического поля) происходит преобразование электромагнитных волн в тепловую энергию, что обеспечивает интенсивный СВЧ-нагрев во всем объеме материала. Для полимерных макромолекул целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина дипольная полимеризация обусловлена смещением полярных групп $-OH$, $-CH_2OH$ относительно неподвижных частей макромолекул (дипольно-радикальная полимеризация) [35]. Существование помимо нагрева «специфического» эффекта СВЧ-воздействия на материалы в настоящее время однозначно не установлено.

Использование СВЧ-энергии обеспечивает интенсивный, равномерный и практически безынерционный нагрев в массе материала, исключает получение и применение традиционных теплоносителей и связанных с этим процессов и оборудования, а также загрязнение атмосферного воздуха.

В последние годы СВЧ-нагрев широко используется в самых различных отраслях промышленности [36].

Применение СВЧ-энергии в химической переработке растительного сырья систематизировано в обзоре [37]. Однако основное внимание в нем уделено выделению низкомолекулярных органических соединений и высокомолекулярных компонентов, сушке, пиролизу, химическому модифицированию полимеров растительного происхождения и сырья и в значительно меньшей степени – гидролизу растительного сырья. Отмечено также, что в публикациях по использованию микроволнового излучения преимущественно приводятся

результаты выполнения прикладных работ, но не объясняется его влияние на вещество.

В то же время следует отметить, что в литературе опубликованы результаты исследований по влиянию СВЧ-энергии на состав и свойства целлюлозы и лигноцеллюлозных материалов.

Подробная информация о диэлектрических характеристиках древесины и ее основных компонентов, влиянии содержания влаги и воздуха и характере воздействия СВЧ-энергии на древесину приведена в книге Г. И. Торговникова [35], которая не упоминается в обзорах [35, 36] и других работах по применению микроволнового излучения в химической переработке растительного сырья.

В работе [38] изучено влияние СВЧ-энергии на микроскопическое строение древесины. Методом капиллярного анализа показано, что при СВЧ-обработке зубчатого бука выше температуры 190°C резко возрастает число пор размером 3,5–11,0 нм, а при температуре выше 210°C их число размером меньше 3,5 нм уменьшается, а более 11,0 нм – возрастает, что объясняется деструкцией и удалением гемицеллюлоз. Значительное увеличение числа и размера пор в лигноцеллюлозных материалах после СВЧ-обработки имеет важное значение для обеспечения доступа гидролизующих агентов, в частности ферментов, и повышения за счет этого эффективности ферментативного гидролиза.

Структурные изменения древесины при облучении микроволнами в процессе ее карбонизации приведены в работе [39].

С использованием сканирующего электронного микроскопа, приборов инфракрасного и рентгеновского излучения выявлены изменения структуры и свойств волокон пшеничной соломы при микроволновой обработке. Показано [40], что степень кристалличности волокон уменьшается с 46,35 до 30,7%.

В монографии [41] обобщены опубликованные в различных источниках (в том числе защищенных патентами) исследования по изучению влияния СВЧ-энергии на различные виды целлюлозы и древесину и использованию для предварительной обработки целлюлозы и различных видов растительного сырья перед кислотным и ферментативным гидролизом, повышения эффективности процесса биоконверсии растительного сырья с целью его обогащения белком, осуществления кислотного гидролиза древесины и соломы (СВЧ-гидролиз), жидкофазной дегидратации пентозосодержащих растворов в фуфурол.

При исследовании влияния СВЧ-излучения на изменение кристаллической структуры в процессах отбеливания лиственной и хвойной сульфат-

ной целлюлозы на основании результатов ИК-спектроскопии и определения вязкости целлюлозы показано [42], что СВЧ-воздействие в исследованном диапазоне интенсивности не разрушает кристаллическую структуру целлюлозы.

В данном обзоре на основании анализа работ (в том числе изложенных в монографии [41]) и с учетом новых результатов проанализированы особенности применения СВЧ-энергии для интенсификации и повышения эффективности процессов гидролитической и биотехнологической переработки растительной биомассы.

Основным параметром, характеризующим СВЧ-нагрев (помимо мощности и частоты поля), является не только продолжительность, но и температура процесса. Однако в некоторых публикациях в качестве основного параметра СВЧ-обработки приводится только продолжительность, что не позволяет объективно и достоверно оценить эффективность процесса. Это обусловлено тем, что в экспериментах используют СВЧ-печи, в которых измерить температуру образцов в период их обработки не представляется возможным (можно при помощи инфракрасных термометров или других средств дистанционного измерения температуры только после окончания процесса).

Поэтому в экспериментах целесообразно применение СВЧ-установок и специальных приборов, обеспечивающих измерение температуры непосредственно в процессе обработки.

В авторских работах, систематизированных в монографии [41], исследования по СВЧ-обработке различных материалов (микросталлической целлюлозы, бленной сульфитной целлюлозы, древесины березы, соломы, смеси их с растворами серной кислоты различной концентрации, ксилосодержащих растворов и пентозных гидролизатов) проводили с использованием СВЧ-установки волнового типа, помещенной в изолированную камеру и обеспечивающей дистанционное измерение температуры.

При изучении динамики температуры нагрева, относительной потери массы и изменения содержания полисахаридов древесины березы [43] и микросталлической целлюлозы (МКЦ) [44] от продолжительности СВЧ-воздействия установлено, что зависимости изменения температуры при их СВЧ-нагреве от продолжительности аналогичны. Максимальное увеличение содержания легкогидролизуемых полисахаридов при обработке древесины березы и легкогидролизуемой фракции МКЦ достигается в диапазоне температур 160–180°C (продолжительность воздействия 2–3 мин). При повышении продолжительности обработки более 3 мин (температура от 245 до 270°C) наблю-

дается стабилизация температуры, обусловленная изменением диэлектрических свойств материала, существенная потеря массы и обугливание.

Определены константы скорости процесса термодеструкции целлюлозы с различным содержанием лигнина и целлолигнина, установлено отрицательное влияние лигнина на эффективность процесса [45]. Более высокая скорость СВЧ-нагрева древесины и целлюлозы обеспечивает значительное сокращение продолжительности процесса по сравнению с конвективным нагревом.

Для изучения закономерностей влияния СВЧ-энергии на целлюлозу и лигноцеллюлозные растительные материалы важное значение имеет измерение основных диэлектрических характеристик (диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь и удельной проводимости). Сравнение этих показателей микрокристаллической целлюлозы до и после СВЧ-обработки показало [46] следующее.

СВЧ-обработка МКЦ приводит к повышению диэлектрической проницаемости (максимально на 32%), что говорит об изменении структуры целлюлозы, так как известно [35], что значение диэлектрической проницаемости аморфной области целлюлозы выше, чем кристаллической. В большей степени изменяются температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь и удельной проводимости. Температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь показывают, что максимум диэлектрических потерь вызван колебаниями групп $-\text{CH}_2\text{OH}$, и свидетельствуют об увеличении доли подведенной мощности, поглощаемой материалом и преобразуемой в тепло при СВЧ-обработке. Характер зависимостей тангенса угла диэлектрических потерь и удельной электрической проводимости от температуры аналогичен, что позволило объяснить релаксационные пики на кривых тангенса угла диэлектрических потерь изменениями электропроводности при различных температурах. Снижение величины удельной магнитной восприимчивости микрокристаллической целлюлозы после СВЧ-обработки в 1,8 раз по сравнению с исходной говорит об уменьшении ее диамагнетизма в результате активации неоднородностей в кристаллической и аморфной областях и нарушениях симметрии в молекуле целлюлозы.

Анализ изменения диэлектрических параметров МКЦ позволяет сделать заключение о том, что воздействие СВЧ-энергии приводит к ее структурной перестройке, уменьшению температуры максимальной проводимости и снижению величины потенциальных барьеров между фрагментами макромолекул.

Результаты термогравиметрического анализа также свидетельствуют об аморфизации МКЦ под действием СВЧ-энергии вследствие разрушения надмолекулярной структуры.

Сравнение рассчитанной на основании данных термогравиметрического анализа эффективной энергии активации процесса деструкции МКЦ показало [45, 41], что ее величина после СВЧ-воздействия уменьшилась на 31,42 кДж/моль. Такое значение энергии активации соответствует температурному переходу, соотносимому с колебаниями групп $-\text{CH}_2\text{OH}$ в аморфных областях целлюлозы [48], и указывает на разрыв под действием СВЧ-энергии межмолекулярных водородных связей МКЦ (прочность которых составляет около 28 кДж/моль [19]), нарушение ее надмолекулярной структуры и, следовательно, повышение реакционной способности.

Установлено [49], что воздействие электромагнитного поля СВЧ приводит к нарушению структурной упорядоченности, разрыву межмолекулярных водородных связей и разрушению надмолекулярной структуры целлюлозы.

Большинство работ по применению СВЧ-энергии для гидролитической и микробиологической переработки растительного сырья посвящено осуществлению его предварительной обработки с целью повышения эффективности ферментативного гидролиза полисахаридов и последующего сбраживания моносахаридов в этанол, например [38, 50–53], что представляет несомненный интерес, учитывая перспективы его использования в качестве топлива для автотранспорта.

Необходимо, однако, отметить противоречивость некоторых результатов исследований по изучению влияния СВЧ-энергии на лигноцеллюлозные материалы, полученных различными авторами. В частности, показано [38], что при действии СВЧ-энергии обеспечивается более высокая эффективность предварительной обработки, чем при «паровом взрыве». Эффективность СВЧ-обработки повышается в присутствии раствора уксусной кислоты, что позволяет уменьшить температуру процесса [50, 51], а в среде фенола и воды – получить раствор лигноцеллюлозного материала, содержащего 12% нерастворившегося осадка [52].

В то же время в работе [53] утверждается, что СВЧ-нагрев древесины сосны до 230°C, бамбука до 228°C и рисовой соломы до 235°C оказывает меньший эффект на последующий ферментативный гидролиз, чем размалывание того же сырья до частиц размером 0,16–0,21 мм, что, очевидно, связано с высокой температурой СВЧ-обработки, а также возможными изменениями характера химических связей в цепи макромолекулы целлюлозы.

Указанные противоречия, вероятно, обусловлены применением различных видов лигноцеллюлозного растительного сырья и параметров обработки.

В меньшей степени в литературе приводится информация о возможности использования СВЧ-энергии для повышения эффективности биоконверсии растительной биомассы в белок и кислотного гидролиза, осуществления процессов гидролиза полисахаридов и дегидратации пентоз в фурфурол.

Так, показано [42–56], что предварительная СВЧ-обработка древесины березы способствует повышению эффективности процесса биоконверсии микромицетами с целью обогащения белком при твердофазной ферментации предварительно обработанного субстрата в 1,6 раза по сравнению с исходной, а при глубинном культивировании (с содержанием нерастворимого субстрата в культуральной жидкости 5%) – в 1,9 раза, достигая 11,2% от массы абсолютно сухого субстрата. Одной из возможных причин сравнительно невысокой эффективности накопления белка является изменение структуры целлюлозы после предварительной СВЧ-обработки.

Эффективность применения СВЧ-энергии для осуществления процессов кислотного гидролиза полисахаридов растительного сырья и дегидратации пентоз в фурфурол в гомогенных условиях обеспечивает существенную интенсификацию и повышение выхода целевых продуктов. Максимальный выход редуцирующих веществ (30,9%) при стационарном СВЧ-гидролизе древесины березы в присутствии 2%-ного раствора серной кислоты достигается при температуре 190°C и продолжительности процесса 9 с. Аналогичный выход редуцирующих веществ при кислотном гидролизе древесины традиционным способом с использованием для нагрева технологического пара обеспечивается при сопоставимых условиях при продолжительности 30–40 мин [57, 58].

СВЧ-гидролиз овсяной соломы и соломы тритикале с применением в качестве катализатора 2,5%-ного раствора серной кислоты (температура 140°C, продолжительность 9 с)

обеспечивает выход редуцирующих веществ соответственно 25,0 и 24,6% [56].

Перспективность использования микроволнового излучения для интенсификации процесса кислотного гидролиза растительного сырья подтверждена, например, в работах [59–61]. В частности, показано [60], что гидролиз целлюлозы при атмосферном давлении с применением 10–20%-ной серной кислоты под действием микроволнового излучения эффективнее в 3–4 раза по сравнению с традиционным нагревом.

Наибольшую эффективность обеспечивает использование СВЧ-энергии для осуществления процесса дегидратации пентоз в фурфурол в гомогенных условиях.

Применяемый в промышленности пароводяной гидролиз растительного сырья создает условия для достижения выхода фурфурола не более 60% от потенциального [62, 63]. Жидкофазная дегидратация пентоз позволяет получить его выход, близкий к теоретически возможному. Однако при использовании конвективного нагрева технологическим паром длительность процесса приводит к потерям фурфурола.

При СВЧ-дегидратации модельных растворов ксилозы, содержащих 0,5% серной кислоты, при температуре СВЧ-нагрева 160°C и продолжительности 10 с выход фурфурола достигает 73,4%, а при продолжительности 30 с – 82,38% от теоретически возможного [64, 65].

При СВЧ-дегидратации пентозных гидролизатов, полученных гидролизом гемицеллюлоз древесины березы и древесно-кустарникового сырья, достигнут выход фурфурола 82,5% от теоретически возможного, что существенно выше, чем при применении для нагрева технологического пара (74%) [66].

Заключение. Таким образом, использование СВЧ-энергии способствует повышению эффективности и интенсификации процессов гидролитической и биотехнологической переработки растительного сырья. Одной из проблем, сдерживающих это направление, является необходимость создания оборудования, обеспечивающего непрерывное осуществление процессов при соответствующих параметрах.

Литература

1. Карливан В. Л. Древесина – перспективное органическое сырье будущего // Перспективы использования древесины в качестве органического сырья будущего. Рига: Зинатне, 1982. С. 5–16.
2. Глубокая переработка биомассы и отходов сельскохозяйственного производства. Научный аналитический обзор / В. С. Тихонравов [и др.]. М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. 250 с.
3. Болтовский В. С. Актуальные проблемы гидролизного производства и пути их решения // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2017. № 2. С. 233–240.
4. Dilute acid hydrolysis of sugar cane bagasse at high temperature: A kinetic study of cellulose saccharification and glucose decomposition. Pt. I. Sulfuric acid as the catalyst / L. V. Gurgel [et al.] // Ind. and Eng. Chem. Res. 2012. Vol. 51, no. 3. P. 1173–1185.

5. Um Byung-Hwan, Bae Sung-Ho. Statistical methodology for optimizing the dilute acid hydrolysis of sugarcane bagasse // *Korean J. Chem. Eng.* 2011. Vol. 28, no. 5. P. 1172–1176.
6. Моделирование кинетики процессов высокотемпературного гидролиза растительного сырья / И. В. Логинова [и др.] // *Вестник Казан. технол. ун-та.* 2012. Т. 15, № 12. С. 102–104.
7. Mc. Donald Armando G., Clark Tomas A. Characterization of oligosaccharides released by steam explosion of sulphur dioxide impregnated *Pinus radiata* // *J. Wood Chem. and Technol.* 1992. Vol. 12, no. 1. P. 55–78.
8. Kupiainen L., Ahola J. Tanskanen Distinct effect of formic and sulfuric acids on cellulose hydrolysis at high temperature // *Ind. and Eng. Chem. Res.* 2012. Vol. 51, no. 8. P. 3295–3300.
9. Dilute acid hydrolysis of Loblolly pine: a comprehensive approach / T. Marzalletti [et al.] // *Ind. and Eng. Chem. Res.* 2008. Vol. 47, no. 19. P. 7131–7140.
10. Kim Tae Hyun. Sequential hydrolysis of hemicellulose and lignin in lignocellulosic biomass by two-stage percolation process using dilute sulfuric acid and ammonium hydroxide // *Korean J. Chem. Eng.* 2011. Vol. 28, no. 11. P. 2156–2162.
11. Zhang Z., Liu B., Zhao (Kent) Z. Efficient acid-catalyzed hydrolysis of cellulose in organic electrolyte solution // *Polym. Degrad. and Stab.* 2012. Vol. 97, no. 4. P. 573–577.
12. 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.
13. Ефремов А. А., Кротова И. В. Комплексная переработка древесины методом взрывного автогидролиза // *Сибирский химический журнал.* 1992. № 6. С. 29–33.
14. 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.* 1981. Т. 1. С. 185.
15. Лобанок А. Г., Бабицкая В. Г., Богдановская Ж. Н. Микробный синтез на основе целлюлозы. Белок и другие ценные продукты. Минск: Наука и техника, 1988. 261 с.
16. Sohrabi Morteza, Movagharnejad Kamyar. Modeling the process of enzymatic hydrolysis of cellulosic waste materials to fermentable sugars in solid-liquid systems // *18 International Congress of Chemical and Process Engineering, Prague, 24–28 Aug., 2008. Prague, 2008.* P. 2114–2115.
17. Enzymatic hydrolysis of cellulose with different crystallinities studied by means of SEG-MALLS / V. Zhang [et al.] // *Chin. J. Chem. Eng.* 2011. Vol. 19, no. 5. P. 773–778.
18. Иоелович М. Я. Изучение кинетики ферментативного гидролиза целлюлозных материалов // *Химия растительного сырья.* 2014. № 1. С. 61–64.
19. Фенгел Д., Вегенер Г. Древесина (химия, ультраструктура, реакции). М.: Лесная пром-сть, 1988. 512 с.
20. Коваленко В. И. Кристаллическая целлюлоза: структура и водородные связи // *Успехи химии.* 2010. Т. 79, № 3. С. 261–272.
21. Синицын А. П., Леонова И. Л., Наджемин Б. Сравнительный анализ реакционной способности целлюлозосодержащего сырья по отношению к ферментативному // *Прикладная биохимия и микробиология.* 1986. Т. 22, вып. 4. С. 517–525.
22. Голязимова О. В., Политов А. А., Ломовский О. И. Механическая активация ферментативного гидролиза лигноцеллюлозы // *Химия растительного сырья.* 2009. № 2. С. 59–63.
23. Синицын А. П., Ковалев С. Р. Сравнительное изучение влияния различных методов предобработки на скорость ферментативного гидролиза природных целлюлозосодержащих материалов // *Химия древесины.* 1984. № 5. С. 60–71.
24. Синицын А. П. Влияние физико-химических и структурных факторов целлюлозы на эффективность ее ферментативного гидролиза // *Микробиология и биохимия разложения растительных материалов.* М., 1988. С. 3–29.
25. Improved enzymatic hydrolysis of rice straw using electron beam irradiation pretreatment / J. S. Bak [et al.] // *Bioresour. Technol.* 2009. Vol. 100, no. 3. P. 1285–1290.
26. Enhanced enzymatic hydrolysis of poplar bark by combined use of gamma ray and dilute acid for bioethanol / Chung Byung Yeoup [et al.] // *Radiat. Phys. and Chem.* 2012. Vol. 81, no. 8. P. 1003–1007.
27. Enhancement of cellulose hydrolysis in sugarcane bagasse by the selective removal of lignin with sodium chlorite / Siqueira Germano [et al.] // *Appl. Energy.* 2013. Vol. 102. P. 399–402.
28. Improved enzyme efficiency of rapeseed straw through the two-stage fractionation process using sodium hydroxide and sulfuric acid / Choi Chang Ho [et al.] // *Appl. Energy.* 2013. Vol. 102. P. 640–646.
29. Методы подготовки растительного сырья к биоконверсии в кормовые продукты и биоэтанол / В. И. Сушкова [и др.] // *Химия растительного сырья.* 2016. № 1. С. 93–119.

30. СВЧ-энергетика: в 3 т. / под ред. Э. Окресса. М.: Мир, 1971. Т. 1: Генерирование. Передача. Выпрямление. 464 с.
31. СВЧ-энергетика: в 3 т. / под ред. Э. Окресса. М.: Мир, 1971. Т. 2: Применение энергии сверхвысоких частот в промышленности. 271 с.
32. СВЧ-энергетика: в 3 т. / под ред. Э. Окресса. М.: Мир, 1971. Т. 3: Применение энергии сверхвысоких частот в медицине, науке и технике. 367 с.
33. Рахманкулов Д. Л., Бикбулатов И. Х. Микроволновое излучение и интенсификация технологических процессов. М.: Химия, 2003. 220 с.
34. Диденко А. Н., Зверев Б. В. СВЧ-энергетика. М.: Наука, 2012. 264 с.
35. Торговников Г. И. Диэлектрические свойства древесины. М.: Лесная пром-сть, 1986. 128 с.
36. Молодцова М. А., Севастьянова Ю. В. Возможности и перспективы использования микроволнового излучения в промышленности (обзор) // Лесной журнал. 2017. № 2. С. 173–187.
37. Маркин В. И., Чепрасова М. Ю., Базарнова Н. Г. Основные направления использования микроволнового излучения при переработке растительного сырья (обзор) // Химия растительного сырья. 2014. № 4. С. 21–42.
38. Кошиджима Т. Ферментативное осахаривание лигноцеллюлозы в производстве спирта // Кэмикару эндзиньярингу. 1989. Т. 34, № 12. С. 943–949.
39. Saito Y., Sato M. Carbonaceous structural changes of wood induced by microwave irradiation // *Holzforschung*. 2012. Vol. 66, no. 1. P. 85–92.
40. Chen Q., San K., Zhang C. Using microwaves to process biomass // *Linchan huaxue yu gongye = Chem. and Ind. Forest Prod.* 2012. Vol. 32. P. 43–46.
41. Болтовский В. С. Теория и технология комплексной гидролитической переработки растительной биомассы. Минск: БГТУ, 2014. 267 с.
42. Молодцова М. А., Севастьянова Ю. В., Ладесов А. В. Исследование влияния электромагнитного сверхвысокочастотного (СВЧ) излучения в процессах отбеливания растительного сырья на изменение кристаллической структуры целлюлозы // Физикохимия растительных полимеров: материалы VII Междунар. конф., Архангельск, 3–6 июля 2017 г. / Северный (Арктический) федер. ун-т им. М. В. Ломоносова; под ред. К. Г. Боголицина. Архангельск, 2017. С. 155–159.
43. Boltovskii V. S., Gal'perin A. S., Tsedrik T. P. Effect of preliminary treatment in an electromagnetic field of microwave frequencies on efficiency of hydrolytic destruction of polysaccharides of wood and cellolignin // *Hydrolysis and Wood Chemistry*. 1993. No. 1. P. 7–16.
44. Болтовский В. С. Комплексная гидролитическая и микробиологическая переработка растительной биомассы с использованием энергии сверхвысоких частот и ферментативных процессов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.21.03. Минск, 2012. 230 л.
45. Болтовский В. С., Некрасов В. Д., Цедрик Т. П. Кинетические закономерности процесса термодеструкции целлюлозы в электромагнитном поле СВЧ // Разработка импортозамещающих технологий и материалов в химико-лесном комплексе: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 окт. 1997 г. / Белорус. гос. технол. ун-т; редкол.: Н. И. Воробьев [и др.]. Минск, 1997. С. 223–226.
46. Изучение влияния СВЧ-воздействия на микрокристаллическую целлюлозу / Д. В. Некрасов [и др.] // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и химическая технология. 1996. Вып. IV. С. 33–36.
47. Некрасов Д. В., Болтовский В. С., Цедрик Т. П. Термодеструкция микрокристаллической целлюлозы в электромагнитном поле СВЧ // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и химическая технология. 1996. Вып. IV. С. 3–6.
48. Якобсон М. К., Эриньщ П. П. Температурные переходы целлюлозы // Химия древесины. 1981. № 3. С. 3–20.
49. Болтовский В. С., Цедрик Т. П., Некрасов Д. В. Структурные превращения целлюлозы под действием электромагнитного поля СВЧ // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и химическая технология. 1997. Вып. V. С. 82–86.
50. Magara K., Azuma J., Koshijima T. Microwave irradiation of lignocellulosic materials. X. Conversion of microwave irradiated agricultural wastes into ethanol // *Wood Res.* 1989. No. 76. P. 1–9.
51. Магара К. Облучение лигноцеллюлозных материалов в микроволновом поле. IX. Конверсия облученной лигноцеллюлозы в этанол // *J. Jap. Wood Res.* 1988. Vol. 34, no. 5. P. 462–468.
52. Способ получения раствора лигноцеллюлозного материала с помощью микроволновой обработки: пат. 2-209901 Япония, МКИ5 С 08 В 1/00, С 07 G1/00. № 1-29757; заявл. 10.02.1989; опубл. 21.08.1990 // Коккай токке кохо. Сер. 3 (3). 1990. № 94. С. 1–7.

53. Azuma J., Koshijima T. Enzymatic saccharification of woody plant. II. Synergistic effects on enzymatic saccharification // *Wood Res.* 1984. No. 70. P. 17–24.

54. 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.

55. Болтовский В. С., Цедрик Т. П. Повышение эффективности биоконверсии отходов деревообработки // *Деревообрабатывающая промышленность.* 1996. № 3. С. 29–31.

56. Болтовский В. С. Повышение эффективности гидролитической переработки растительного сырья с использованием СВЧ-энергии // *Химия и химическая технология переработки растительного сырья: материалы Междунар. науч.-техн. конф., посвященной 100-летию со Дня рождения В. М. Резникова.* Минск, 10–12 окт. 2018 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. Минск, 2018. С. 23–27.

57. Boltovskii V. S., Gal'perin A. S. Hydrolytic destruction of wood polysaccharides in a microwave field // *Hydrolysis and Wood Chemistry.* 1993. No. 5. P. 14–18.

58. 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.

59. Кислотная предобработка стеблей кукурузы, усиленная микроволновым воздействием в процессе этанологенеза / Li Jing [et al.] // *Nongye gongcheng huebao = Nrans. Chin. Soc. Arg. Eng.* 2007. Vol. 23, no. 6. P. 199–202.

60. Перспективы использования микроволнового излучения в процессе переработки целлюлозосодержащего сырья / И. В. Кисурин [и др.] // *Башк. хим. журн.* 2010. Т. 17, № 3. С. 167–170.

61. Микроволновая интенсификация процесса гидролиза целлюлозосодержащего сырья для производства этанола / А. В. Савин [и др.] // *Башк. хим. журн.* 2011. Т. 18, № 4. С. 214–218.

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

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

64. 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.

65. Способ получения фурфурола: пат. 3346 Респ. Беларусь, МПК С 07 D 307/48. № 970377; заявл. 11.07.1997; опубл. 20.12.1999 // *Афіцыйны бюл.* 2000. № 2. С. 108.

66. Способ получения фурфурола дегидратацией пентозных гидролизатов: пат. 6997 Респ. Беларусь, МПК С 07 D 307/50. № а20001157; заявл. 26.12.2000; опубл. 27.12.2004 // *Афіцыйны бюл.* 2005. № 2. С. 166.

References

1. Karlivan V. L. Wood is a promising organic raw material of the future. *Perspektivy ispol'zovaniya drevesyiny v kachestve organicheskogo syr'ya budushchego* [Prospects for the use of wood as an organic raw material of the future]. Riga, Zinatne Publ., 1982, pp. 5–16 (In Russian).

2. Tikhonravov V. S., Fedorenko V. F., Buklagin D. S., Mishurov N. P. *Glubokaya pererabotka biomassy i otkhodov sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva. Nauchnyy analiticheskiy obzor* [Deep processing of biomass and agricultural waste. Scientific analytical review]. Moscow, FGBNU "Rosinform-agrotekh" Publ., 2014. 250 p.

3. Boltovskiy V. S. Actual problems of hydrolysis production and solutions. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series 2, Chemical engineering, biotechnologies, geocology, 2017, no. 2, pp. 233–240 (In Russian).

4. Gurgel L. V., Marabezi K., Zambom M. D., Curvelo A. Dilute acid hydrolysis of sugar cane bagasse at high temperature: A kinetic study of cellulose saccharification and glucose decomposition. Pt. I. Sulfuric acid as the catalyst. *Ind. and Eng. Chem. Res.*, 2012, vol. 51, no. 3, pp. 1173–1185.

5. Um Byung-Hwan, Bae Sung-Ho. Statistical methodology for optimizing the dilute acid hydrolysis of sugarcane bagasse. *Korean J. Chem. Eng.*, 2011, vol. 28, no. 5, pp. 1172–1176.

6. Loginova I. V., Emel'yanov V. M., Valeeva R. T., Mukhachev S. G. Kinetics modeling of high temperature hydrolysis of plant materials. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], 2012, vol. 15, no. 12, pp. 102–104 (In Russian).

7. Mc. Donald Armando G., Clark Tomas A. Characterization of oligosaccharides released by steam explosion of sulphur dioxide impregnated *Pinus radiata*. *J. Wood Chem. and Technol.*, 1992, vol. 12, no. 1, pp. 55–78.

8. Kupiainen L., Ahola J. Tanskanen Distinct effect of formic and sulfuric acids on cellulose hydrolysis at high temperature. *Ind. and Eng. Chem. Res.*, 2012, vol. 51, no. 8, pp. 3295–3300.
9. Marzioletti T., Olarte M., Sievers C., Hoskins T., Agrawal P., Jones C. Dilute acid hydrolysis of Loblolly pine: a comprehensive approach. *Ind. and Eng. Chem. Res.*, 2008, vol. 47, no. 19, pp. 7131–7140.
10. Kim Tae Hyun. Sequential hydrolysis of hemicellulose and lignin in lignocellulosic biomass by two-stage percolation process using dilute sulfuric acid and ammonium hydroxide. *Korean J. Chem. Eng.*, 2011, vol. 28, no. 11, pp. 2156–2162.
11. Zhang Z., Liu B., Zhao (Kent) Z. Efficient acid-catalyzed hydrolysis of cellulose in organic electrolyte solution. *Polym. Degrad. and Stab.*, 2012, vol. 97, no. 4, pp. 573–577.
12. Sasaki Chizuru, Keisuke Sumimoto, Chikako Asada, Yoshitoshi Nakamura. 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. 293–301.
13. Efremov A. A., Krotova I. V. Integrated wood processing by explosive autohydrolysis. *Sibirskiy khimicheskii zhurnal* [Siberian Chemical Journal], 1992, no. 6, pp. 29–33 (In Russian).
14. Kalunyants K. A., Shanenko E. F., Zaytseva L. V. Modern methods of enzymatic hydrolysis of cellulose-containing materials. *Itogi nauki i tekhniki. Ser. Khimiya i tekhnologiya pishchevykh produktov* [Results of science and technology. Ser. Chemistry and food technology], 1981, vol. 1, p. 185 (In Russian).
15. Lobanok A. G., Babitskaya V. G., Bogdanovskaya Zh. N. *Mikrobnyy sintez na osnove tsellyulozy. Belok i drugie tsennyye produkty* [Cellulose-based microbial synthesis. Protein and other valuable products]. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1988. 261 p.
16. Sohrabi Morteza, Movagharnjad Kamyar. Modeling the process of enzymatic hydrolysis of cellulosic waste materials to fermentable sugars in solid-liquid systems. *18 International Congress of Chemical and Process Engineering*. Prague, 2008, pp. 2114–2115.
17. Zhang V., Su R., Qi W., Du R., He Z. Enzymatic hydrolysis of cellulose with different crystallinities studied by means of SEG-MALLS. *Chin. J. Chem. Eng.*, 2011, vol. 19, no. 5, pp. 773–778.
18. Ioyelovich M. Ya. Studying the kinetics of enzymatic hydrolysis of cellulosic materials. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2014, no. 1, pp. 61–64 (In Russian).
19. Fengel D., Vegener G. *Drevesina (khimiya, ul'trastruktura, reaktsii)* [Wood (chemistry, ultrastructure, reactions)]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1988. 512 p.
20. Kovalenko V. I. Crystalline cellulose: structure and hydrogen bonds. *Uspekhi khimii* [Advances in Chemistry], 2010, vol. 79, no. 3, pp. 261–272 (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. Golyazimova O. V., Politov A. A., Lomovskiy O. I. Mechanical activation of enzymatic hydrolysis of lignocellulose. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2009, no. 2, pp. 59–63 (In Russian).
23. Sinitsyn A. P., Kovalyov S. R. Comparative study of the influence of various pretreatment methods on the rate of enzymatic hydrolysis of natural cellulose-containing materials. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of Wood], 1984, no. 5, pp. 60–71 (In Russian).
24. Sinitsyn A. P. The influence of physico-chemical and structural factors of cellulose on the efficiency of its enzymatic hydrolysis. *Mikrobiologiya i biokhimiya razlozheniya rastitel'nykh materialov* [Microbiology and biochemistry of decomposition of plant materials]. Moscow, 1988, pp. 3–29 (In Russian).
25. Bak J. S., Ko J. K., Han Y. H., Lee B. C., Choi I. G., Kim K. H. Improved enzymatic hydrolysis of rice straw using electron beam irradiation pretreatment. *Bioresour. Technol.*, 2009, vol. 100, no. 3, pp. 1285–1290.
26. Yung Yeoup Chung, Jae Taek Lee, Hyoung-Woo Bai, Ung-Jin Kim, Hyeun-Jong Bae, Seung Gon Wi, Jae-Young Cho. Enhanced enzymatic hydrolysis of poplar bark by combined use of gamma ray and dilute acid for bioethanol. *Radiat. Phys. and Chem.*, 2012, vol. 81, no. 8, pp. 1003–1007.
27. Germano Siqueira, Anikó Várnai, André Ferraz, Adriane M. F. Milagres. Enhancement of cellulose hydrolysis in sugarcane bagasse by the selective removal of lignin with sodium chlorite. *Appl. Energy*, 2013, vol. 102, pp. 399–402.
28. Choi Chang Ho, Um Byung Hwan, Kim Young Soo, Oh Kyeong Keun. Improved enzyme efficiency of rapeseed straw through the two-stage fractionation process using sodium hydroxide and sulfuric acid. *Appl. Energy*, 2013, vol. 102, pp. 640–646.
29. Sushkova V. I., Ustyuzhaninova L. V., Berezina O. V., Yarotskiy S. V. Methods of preparing plant materials for bioconversion into feed products and bioethanol. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2016, no. 1, pp. 93–119 (In Russian).

30. Okress E. *SVCh-energetika: v 3 tomakh* [Microwave power engineering: in 3 vol.]. Moscow, Mir Publ., 1971. Vol. 1: Generation. Broadcast. Straightening. 464 p.
31. Okress E. *SVCh-energetika: v 3 tomakh* [Microwave power engineering: in 3 vol.]. Moscow, Mir Publ., 1971. Vol. 2: The use of microwave energy in industry. 271 p.
32. Okress E. *SVCh-energetika: v 3 tomakh* [Microwave power engineering: in 3 vol.]. Moscow, Mir Publ., 1971. Vol. 3: The use of microwave energy in medicine, science and technology. 367 p.
33. Rakhmankulov D. L., Bikbulatov I. Kh. *Mikrovolnovoye izlucheniye i intensivifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov* [Microwave radiation and the intensification of technological processes]. Moscow, Khimiya Publ., 2003. 220 p.
34. Didenko A. N., Zverev B. V. *SVCh-energetika* [Microwave power engineering]. Moscow, Nauka Publ., 2012. 264 p.
35. Torgovnikov G. I. *Dielektricheskiye svoystva drevesiny* [Dielectric properties of wood]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986. 128 p.
36. Molodtsova M. A., Sevast'yanova Yu. V. Opportunities and prospects for the use of microwave radiation in industry (review). *Lesnoy zhurnal* [Forest Journal], 2017, no. 2, pp. 173–187 (In Russian).
37. Markin V. I., Cheprasova M. Yu., Bazarnova N. G. The main directions of the use of microwave radiation in the processing of plant materials (review). *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2014, no. 4, pp. 21–42 (In Russian).
38. Koshidzhima T. Enzymatic saccharification of lignocellulose in the production of alcohol. *Khemikaru ehndziniyaringu*, 1989, vol. 34, no. 12, pp. 943–949 (In Russian).
39. Saito Y., Sato M. Carbonaceous structural changes of wood induced by microwave irradiation. *Holzforschung*, 2012, vol. 66, no. 1, pp. 85–92.
40. Chen Q., San K., Zhang C. Using microwaves to process biomass. *Linchan huaxue yu gongye = Chem. and Ind. Forest Prod.*, 2012, vol. 32, pp. 43–46.
41. Boltovskiy V. S. *Teoriya i tekhnologiya kompleksnoy gidroliticheskoy pererabotki rastitel'noy biomassy* [Theory and technology of complex hydrolytic processing of plant biomass]. Minsk, BGTU Publ., 2014. 267 p.
42. Molodtsova M. A., Sevast'yanova Yu. V., Ladesov A. V. Study of the influence of electromagnetic microwave radiation in the processes of bleaching plant materials on the change in the crystalline structure of cellulose. *Materialy VII Mezhdunarodnoy konferentsii "Fizikokhimiya rastitel'nykh polimerov"* [Materials of the VII International conference "Physicochemistry of plant polymers"]. Arkhangelsk, 2017, pp. 155–159 (In Russian).
43. Boltovskii V. S., Gal'perin A. S., Tsedrik T. P. Effect of preliminary treatment in an electromagnetic field of microwave frequencies on efficiency of hydrolytic destruction of polysaccharides of wood and cellolignin. *Hydrolysis and Wood Chemistry*, 1993, no. 1, pp. 7–16.
44. Boltovskiy V. S. *Kompleksnaya gidroliticheskaya i mikrobiologicheskaya pererabotka rastitel'noy biomassy s ispol'zovaniem energii sverkhvysokikh chastot i fermentativnykh protsessov. Dis. dokt. tekhn. nauk* [Integrated hydrolytic and microbiological processing of plant biomass using microwave energy and enzymatic processes. Doct. Diss.]. Minsk, 2012. 230 p.
45. Boltovskiy V. S., Nekrasov V. D., Tsedrik T. P. Kinetic laws of the process of thermal destruction of cellulose in the microwave electromagnetic field. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii "Razrabotka importozameshchayushchikh tekhnologiy i materialov v khimiko-lesnom komplekse"* [Materials of the International scientific and technical conference "Development of import-substituting technologies and materials in the chemical-forest complex"]. Minsk, 1997, pp. 223–226 (In Russian).
46. Nekrasov D. V., Boltovskiy V. S., Vitkina Ts. Z., Tsedrik T. P. Studying the effect of microwave exposure on microcrystalline cellulose. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series III, Chemistry and chemical technology, 1996, issue IV, pp. 33–36 (In Russian).
47. Nekrasov D. V., Boltovskiy V. S., Tsedrik T. P. Thermal degradation of microcrystalline cellulose in the microwave electromagnetic field. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series III, Chemistry and chemical technology, 1996, issue IV, pp. 3–6 (In Russian).
48. Yakobson M. K., Erin'shch P. P. Cellulose temperature transitions. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of Wood], 1981, no. 3, pp. 3–20 (In Russian).
49. Boltovskiy V. S., Tsedrik T. P., Nekrasov D. V. Structural transformations of cellulose under the influence of the microwave electromagnetic field. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], series III, Chemistry and chemical technology, 1997, issue V, pp. 82–86 (In Russian).
50. Magara K., Azuma J., Koshijima T. Microwave irradiation of lignocellulosic materials. X. Conversion of microwave irradiated agricultural wastes into ethanol. *Wood Res.*, 1989, no. 76, pp. 1–9.
51. Magara K. Irradiation of lignocellulosic materials in a microwave field. IX. The conversion of irradiated lignocellulose to ethanol. *J. Jap. Wood Res.*, 1998, vol. 34, no. 5, pp. 462–468 (In Russian).

52. Nobua Siransi, Naokhiko Tsudzimoto, Seysi K. Odzi. *Sposob polucheniya rastvora lingotsellyuloznogo materiala s pomoshch'yu mikrovolnovoy obrabotki* [Method of obtaining a solution of lignocellulosic material using microwave processing]. Patent JP, no. 2-209901, 1990.

53. Azuma J., Koshijima T. Enzymatic saccharification of woody plant. II. Synergistic effects on enzymatic saccharification. *Wood Res.*, 1984, no. 70, pp. 17–24.

54. Boltovskiy V. S., Gal'perin A. S., Bez'yazychnaya A. V. Improving the efficiency of bioconversion of wood by pre-processing it in an electromagnetic field of microwave frequencies. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of Wood], 1991, no. 6, pp. 57–61 (In Russian).

55. Boltovskiy V. S., Tsedrik T. P. Improving the efficiency of bioconversion of woodworking waste. *De-revoobrabatyvayushchaya promyshlennost'* [Wood working industry], 1996, no. 3, pp. 29–31 (In Russian).

56. Boltovskiy V. S. Improving the efficiency of hydrolytic processing of plant materials using microwave energy. *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so Dnya rozhdeniya V. M. Reznikova "Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya pererabotki rastitel'nogo syr'ya"* [Materials of International scientific and technical conference, dedicated to the 100th birthday of V. M. Reznikova "Chemistry and chemical technology for the processing of plant materials"]. Minsk, 2018, pp. 23–27 (In Russian).

57. Boltovskiy V. S., Gal'perin A. S. Hydrolytic destruction of wood polysaccharides in a microwave field. *Hydrolysis and Wood Chemistry*, 1993, no. 5, pp. 14–18.

58. Nekrasov D. V., Tsedrik T. P., Boltovskiy V. S. Hydrolytic destruction of polysaccharides in an electromagnetic field of microwave frequencies. *Vestsi Natsiyanal'nay akademii navuk Belarusi* [Bulletin of the National Academy of Sciences of Belarus], series Chemical sciences, 1995, no. 3, pp. 54–57 (In Russian).

59. Li Jing, Yang Hongxia, Yang Yong, Liu Yau, Wie Sniqiang. Acid pretreatment of corn stalks enhanced microwave exposure during ethanologenesis. *Nongye gongcheng huebao = Trans. Chin. Soc. Arg. Eng.*, 2007, vol. 23, no. 6, pp. 199–202 (In Russian).

60. Kisurin I. V., Arapov K. A., Gushchin P. A., Ivanov E. V., Vinokurov V. A. Prospects for the use of microwave radiation in the process of processing cellulose-containing raw materials. *Bashkirskiy khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2010, no. 3, pp. 167–170 (In Russian).

61. Savin A. V., Gushchin P. A., Ivanov E. V., Vinokurov V. A. Microwave intensification of the process of hydrolysis of cellulose-containing raw materials for ethanol production. *Bashkirskiy khimicheskii zhurnal* [Bashkir Chemical Journal], 2011, no. 4, pp. 214–218 (In Russian).

62. Mel'nikov N. P., Tsirlin Yu. A. Obtaining furfural from pentose solutions. *Sbornik trudov VNIIGS* [Processing of All-Union Scientific Research Institute of Hydrolysis and Sulphite-Alcohol Industry], 1995, vol. 7, pp. 84–96 (In Russian).

63. Tsirlin Yu. A. Dehydration of pentose hydrolysates to produce furfural. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promyshlennost'* [Hydrolysis and wood chemical industry], 1991, no. 4, pp. 12–14 (In Russian).

64. Ostroukh O. V., Boltovskiy V. S., Tsedrik T. P. The influence of superhigh 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).

65. Boltovskiy V. S., Tsedrik T. P., Arias A. E. *Sposob polucheniya furfurola* [The method of producing furfural]. Patent BY, no. 3346, 2000.

66. Boltovskiy V. S., Ostroukh O. V., Tsedrik T. P. *Sposob polucheniya furfurola degidratatsiey pentoznykh gidrolizatov* [Method of producing furfural by dehydration of pentose hydrolysates]. Patent BY, no. 6997, 2004.

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 – DSc (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 17.09.2019