

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ, БИОТЕХНОЛОГИИ

CHEMICAL ENGINEERING, BIOTECHNOLOGIES

УДК 634.0.86

В. С. Болтовский

Белорусский государственный технологический университет

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АВТОГИДРОЛИЗА-ВЗРЫВА ПРИ ПЕРЕРАБОТКЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ

В данной статье выполнен анализ литературных источников по применению метода автогидролиза-взрыва при химической, механохимической и биотехнологической переработке постоянно возобновляемой лигноцеллюлозной растительной биомассы для ее делигнификации и активирования с целью получения древесноволокнистой массы, целлюлозы и микрокристаллической целлюлозы, древесноволокнистых и древесностружечных плит, повышения эффективности процессов ферментативного гидролиза и биоконверсии с получением различных продуктов и оценки перспектив его промышленной реализации.

Рассмотрены теоретические и прикладные аспекты метода взрывного автогидролиза растительной биомассы.

Взрывной автогидролиз-взрыв обеспечивает кратковременную высокотемпературную обработку исходного влажного лигноцеллюлозного материала при повышенном давлении с последующим мгновенным сбросом давления до атмосферного (эффект парового взрыва). При этом осуществляется гидролиз гемицеллюлоз без внесения катализаторов (автогидролиз), а также происходит деструкция лигнина и уменьшение его молекулярной массы. В результате быстрой декомпрессии автогидролизованного материала обеспечивается его фракционирование на продукты гидролиза гемицеллюлоз и низкомолекулярной фракции лигнина, а также твердый остаток, состоящий из целлюлозы и лигнина.

В настоящее время разработаны конструкции лабораторных, пилотных и опытно-промышленных установок для осуществления процесса автогидролиза-взрыва и разделения образующихся при этом компонентов.

Метод автогидролиза-взрыва является экологически безопасным и эффективным процессом высокотемпературной обработки лигноцеллюлозной растительной биомассы для получения различных видов востребованной продукции и представляет безусловный интерес для реализации в промышленности.

Ключевые слова: растительная биомасса, автогидролиз, декомпрессия (взрыв), гемицеллюлозы, моносахариды, целлюлоза, лигнин.

Для цитирования: Болтовский В. С. Применение метода автогидролиза-взрыва при переработке растительной биомассы (обзор) // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2021. № 2 (247). С. 5–12.

V. S. Boltovskiy

Belarusian State Technological University

APPLICATION OF THE AUTOHYDROLYSIS-EXPLOSION METHOD IN THE PROCESSING OF PLANT BIOMASS

This article analyzes the literature on the application of the auto-hydrolysis-explosion method in the chemical, mechanochemical and biotechnological processing of permanently renewable lignocellulosic plant biomass for its delignification and activation in order to obtain wood-fiber mass, cellulose and microcrystalline cellulose, wood-fiber and chipboard, increase the efficiency of enzymatic hydrolysis

and bioconversion processes to obtain various products and assess the prospects for industrial implementation.

The theoretical and applied aspects of the method of explosive autohydrolysis of growing biomass are considered.

Explosive autohydrolysis—an explosion provides a short-term high-temperature treatment of the initial wet lignocellulose material at an increased pressure and then an instantaneous pressure relief to atmospheric pressure (the effect of a steam explosion). In this case, the hydrolysis of hemicellulose and the amorphous part of cellulose is carried out without the introduction of catalysts (autohydrolysis), as well as the destruction of lignin and a decrease in its molecular weight. As a result of rapid decompression of the autohydrolyzed material, it is fractionated into the products of hydrolysis of hemicelluloses and low-molecular fraction of lignin and a solid residue consisting of cellulose and lignin.

At present, the designs of laboratory, pilot and pilot-industrial installations for the implementation of the process of autohydrolysis-explosion and separation of the components formed in this process have been developed

The autohydrolysis-explosion method is an environmentally safe and effective process of high-temperature processing of lignocellulosic plant biomass to obtain various types of popular products and is of absolute interest for implementation in industry.

Key words: plant biomass, autohydrolysis, decompression (explosion), hemicelluloses, monosaccharides, cellulose, lignin.

For citation: Boltovskiy V. S. Application of the autohydrolysis-explosion method in the processing of plant biomass (review). *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2021, no. 2 (247), pp. 5–12 (In Russian).

Введение. В настоящее время в связи с прогрессирующим сокращением запасов ископаемого органического сырья все большую актуальность приобретают возможности промышленного использования постоянно возобновляемой растительной биомассы (в литературе также часто применяется термин «лигноцеллюлозные материалы»).

Одним из наиболее перспективных направлений использования растительного сырья является его химическая, механохимическая и биотехнологическая переработка, обеспечивающая получение различной востребованной продукции, зачастую не получаемой другими способами.

Уникальные особенности состава и строения растительной биомассы, основными высокомолекулярными компонентами которой являются гемицеллюлозы, целлюлоза и лигнин, обуславливают необходимость применения эффективных методов ее делигнификации, гидролиза полисахаридов, повышения реакционной способности для получения разнообразных продуктов.

К числу таких методов относятся автогидролиз и автогидролиз-взрыв. Метод автогидролиза (при котором катализаторами процесса являются преимущественно уксусная кислота, образующаяся при деацетилировании гемицеллюлоз, и муравьиная кислота, получающаяся в значительно меньшем количестве при вторичных превращениях моносахаридов, но обладающая более высокой активностью) [1] применяется в промышленных масштабах для получения фурфурола парофазным гидролизом пентозансодержащего растительного сырья [2].

В настоящее время перспективным является метод автогидролиза-взрыва (взрывной автогидролиз, паровой взрыв, паровой крекинг, флеш-автогидролиз и т. п.), продолжительность которого (от нескольких секунд до нескольких минут) значительно меньше автогидролиза (2 ч и более), а эффект парового взрыва обеспечивает эффективное фракционирование основных компонентов лигнифицированной растительной биомассы – гемицеллюлоз, целлюлозы и лигнина.

В данной статье основное внимание уделено анализу прикладных аспектов применения метода автогидролиза-взрыва при химической, механохимической и биотехнологической переработке растительного сырья для его делигнификации и активирования с целью получения древесноволокнистой массы, целлюлозы и микрокристаллической целлюлозы, древесноволокнистых и древесностружечных плит, повышения эффективности процессов ферментативного гидролиза и биоконверсии с получением различных продуктов и оценке перспектив промышленной реализации.

Основная часть. Наиболее подробно теоретические и прикладные аспекты метода взрывного автогидролиза растительной биомассы, включающие историю и состояние проблемы, описание физической и технической сущности процесса, его кинетику и рекомендации по использованию, изложены в часто цитируемой различными авторами работе Гравитиса Е. А. [1], например, подробно – в статье [3] с подтверждением основных положений результатами собственных исследований.

Сущность взрывного автогидролиза заключается в кратковременной высокотемпературной обработке исходного влажного лигноцеллюлозного материала при повышенном давлении и последующем мгновенном сбросе давления до атмосферного (эффект парового взрыва). При этом осуществляется гидролиз гемицеллюлоз (а при режимах получения микрокристаллической целлюлозы – и аморфной части целлюлозы) без внесения катализаторов. Кроме того, при высокотемпературном взрывном автогидролизе происходит деструкция лигнина и уменьшение его молекулярной массы. В результате быстрой декомпрессии автогидролизованного материала обеспечивается его фракционирование на компоненты с последующим разделением на жидкую фазу, содержащую главным образом раствор моносахаридов и низкомолекулярные фракции лигнина (извлекаемые последующей экстракцией), и твердый остаток, состоящий из целлюлозы и лигнина.

При автогидролизе-взрыве за счет быстрого расширения перегретой воды и пара в клетках сырья при декомпрессии происходит разрыхление структуры древесины, увеличение ее удельной поверхности, образование водорастворимых продуктов, содержащих олигомеры ксилана, ксилозу и другие моносахариды, а также глюкуроновую кислоту, лигнин, таннины, экстрагируемые соединения, жирные кислоты и др. [4]. Увеличение скорости и глубины автогидролиза древесины объясняется [1] топологическими эффектами и изменениями в конформационной структуре цепей целлюлозы.

Эффективность применения автогидролиза-взрыва для расщепления волокон и костры конопля и льна и отделения гемицеллюлоз, лигнина, пектинов и восков последующей обработкой водой и 0,4%-ным раствором щелочи подтверждена в работе [5].

На основании исследования механизма разделения на волокна древесины паровзрывным методом показано [6] влияние условий обработки (температуры и продолжительности декомпрессии) на дисперсные свойства получаемого материала. Установлено, что с увеличением скорости (и, соответственно, сокращением продолжительности) декомпрессии наблюдается интенсивное уменьшение размера частиц и увеличение удельной поверхности материала. Быстрый перепад давления за счет увеличения скорости открывания клапана для сброса давления и удаления автогидролизованного материала обеспечивает высвобождение потенциальной энергии перегретой жидкости и необходимую силу разрыва частиц.

Эффект уменьшения размера частиц и увеличения удельной поверхности материала при

паровом взрыве имеет важное значение при использовании этого метода для предварительной обработки лигноцеллюлозных материалов перед их ферментативным гидролизом или прямой биоконверсией с целью получения обогащенных белком растительных углеводно-белковых кормовых добавок.

В настоящее время по приведенным в литературе схемам переработки лигноцеллюлозных материалов предусматривается комплексная переработка древесины хвойных и лиственных пород, включающая разделение водорастворимых продуктов после осуществления процесса взрывного автогидролиза, их каталитическую обработку (переработкой моносахаридов возможно производство фурфурола, ксилита, этанола и других продуктов), получение целлюлозо-содержащих полуфабрикатов, технической и высококачественной целлюлозы, а также – активных углей пиролитической переработкой остаточного лигнина [3, 7, 8].

Применение парового взрыва перспективно для получения целлюлозы и микрокристаллической целлюлозы, особенно из лигноцеллюлозных материалов [9]. Разработана технология получения микрокристаллической целлюлозы из активированного паровзрывной обработкой лигноцеллюлозного материала [10].

Показана эффективность применения взрывного автогидролиза для получения раствора моносахаридов из пентозансодержащего растительного сырья [11]. Установлено, что при 240°C, давлении 3,3 МПа и продолжительности 60 с обеспечивается максимальный выход сахаров после дополнительной инверсии водорастворимой фракции (29,3% от абс. сухого сырья), что составляет 73,6% от их потенциального количества в легкогидролизуемых полисахаридах сырья. Высокое содержание истинных сахаров (70–80% от редуцирующих веществ) и незначительное количество фурфурола обеспечивают возможность их микробиологической переработки, использования в качестве углеводного корма, а высокое содержание ксилозы (82% от суммы моносахаридов) – получения пищевого ксилита.

Методом высокотемпературного автогидролиза взрыва при сверхкритических параметрах процесса (давлении 6,2 МПа, что соответствует температуре 277,6°C) обеспечивается достаточно высокий выход моносахаридов даже при гидролизе наиболее трудногидролизуемой микрокристаллической целлюлозы (52,8%) и медноаммиачного шелка (67,77%), не содержащих легкогидролизуемых гемицеллюлоз [12].

При получении древесноволокнистой массы высокотемпературным (180°C, 1,7 МПа) паровзрывным автогидролизом лигноцеллюлозного

материала установлено [13], что при экстракции сахаров водным раствором автогидролизованной древесины при температуре 90°C в течение 15 мин выход сахаров составляет 6,84% от массы абсолютно сухого остатка после автогидролиза, а с применением системы этанол – вода (9 : 1) при аналогичных параметрах – 6,77%. Оптимальным экстрагентом лигнина из автогидролизованной древесины (из исследованных в качестве экстрагентов при различных параметрах и концентрациях растворов карбоната натрия и гидроксида натрия) является раствор гидроксида натрия концентрацией 0,1 н (0,4–2,0%) при температуре 20–25°C и продолжительности экстракции 30 мин. При таких параметрах обеспечивается наиболее полное удаление лигнина и исключение негативного воздействия на количественное содержание и качество α -целлюлозы.

Полученная методом сброса давления из древесных отходов и побочных отходов основного производства древесная масса может использоваться для получения древесноволокнистых и древесностружечных плит (в том числе древесных плит без применения связующего), различных плитных утеплителей на основе гидролизного лигнина [14].

Механохимическая модификация различных видов растительного сырья (солома злаковых культур, шелуха овса, лузга семян подсолнечника, зелень хвойных пород древесины и т. п.) методом взрывного автогидролиза в среде водяного пара при давлении 1,01–2,03 МПа приводит к частичному растворению в воде углеводов, урановых кислот, части лигнина и взаимодействию углеводов с фенилпропановыми звеньями лигнина. Это позволяет получить при последующем горячем прессовании остатка после автогидролиза-взрыва плитные материалы, не уступающие по основным характеристикам (прочностным свойствам, водопоглощению и разбуханию) традиционно изготовленным на основе древесностружечных и древесноволокнистых плит [15].

Разработаны режимные параметры трех направлений высокотемпературной паровзрывной обработки древесных отходов [16]:

– для предварительной обработки древесного сырья: температура пара – 160–180°C, давление 0,7–1,1 МПа, продолжительность выдерживания – 3–5 мин, декомпрессии – 0,2 с;

– для получения высокодисперсного волокнистого полуфабриката из древесины ели и сосны: температура пара – от 250°C, давление от 3,5 МПа, продолжительность выдерживания – от 10 мин, декомпрессии – от 0,05 до 0,2 с;

– для получения технической целлюлозы из древесины ели и сосны: температура пара –

210–230°C, давление 2,2–2,9 МПа, продолжительность выдерживания – 10 мин, декомпрессии – 0,2 с, экстракция низкомолекулярного лигнина 0,4–2,0%-ным раствором гидроксида натрия при температуре 20°C.

В дальнейшем автором [17] доказана целесообразность использования активированного лигноцеллюлозного материала, полученного после паровзрывной обработки древесины, в качестве сырья для получения целлюлозы и микрокристаллической целлюлозы, разработаны рекомендуемые параметры процесса:

– делигнификации для получения целлюлозы: температура обработки 190–210°C, давление 1,1–1,9 МПа, продолжительность выдерживания – 2–5 мин;

– гидролиза с получением микрокристаллической целлюлозы: температура пара 200–210°C, давление 1,1–1,9 МПа, продолжительность выдерживания – 2–5 мин.

Методом взрывного автогидролиза получены волокнистые древесно-полистирольные сорбенты для ликвидации нефтяных загрязнений, в которых наполнитель достаточно полно удерживается в полимерной матрице без связующих веществ [18]. Разработана установка и определены условия процесса (температура 125°C, давление 3,0 МПа, продолжительность выдержки – 60 с), обеспечивающие выход сорбента 95–98 мас. %.

Как видно из рассмотренных литературных источников, наиболее широко метод взрывного автогидролиза применяется для получения (помимо растворимых продуктов) древесноволокнистой массы, технической и чистой целлюлозы и микрокристаллической целлюлозы.

В то же время в качестве одного из перспективных направлений можно рассматривать применение этого метода для предварительной обработки лигноцеллюлозных материалов с целью удаления гемицеллюлоз и частично лигнина и повышения эффективности последующего ферментативного гидролиза и биоконверсии активированных лигноцеллюлозных субстратов в различные продукты.

Так, предварительная обработка паровым взрывом древесины осины при температуре 250°C в течение 20–60 с применена для ферментативного гидролиза фильтратами культуральной жидкости *Trichoderma reesei* RMTS-30 и *Trichoderma harzianum* E 58 с получением этанола и бутандиола [19], а багассы и рисовой соломы при температуре 231°C для повышения эффективности гидролиза целлюлазами [20].

Показано [21], что предварительная обработка жома сахарного тростника паровым взрывом является более эффективной для по-

следующей ферментации в этанол, чем его окисление во влажном состоянии в щелочной среде.

Обработка ячменной шелухи автогидролизом и пшеничной соломы паровым взрывом повышает эффективность ферментативного гидролиза [21, 22].

Предварительная обработка пшеничной соломы паровым взрывом повышает эффективность ферментативного гидролиза и сбраживания моносахаридов в этанол [23].

Проведены исследования по модернизации метода парового взрыва лигноцеллюлозных материалов. В частности показано [24], что автогидролиз-взрыв целлюлигноинового остатка древесины лиственницы в присутствии катализаторов (с добавлением 0,5%-ного раствора серной кислоты и 10%-го пероксида водорода) при температурах 200 и 220°C и продолжительности 2 и 5 мин помимо гидролиза гемицеллюлоз приводит к значительной деструкции целлюлозы при одновременном образовании псевдолигнина в твердом автогидролизованном остатке.

Осуществление автогидролиза в среде неконденсирующихся газов позволяет проводить процесс при относительно невысокой температуре (200°C). После автогидролиза в среде диоксида углерода при 6,9; 10,3 и 13,8 МПа давление газа использовалось для разгрузки автогидролизованного материала через дефибрирующее сопло при скоростях, близких к скорости звука. Давление диоксида углерода выше 4,8 МПа для дефибрирования достигалось вводом сжатого азота [25].

Основной проблемой, сдерживающей полномасштабное применение взрывного автогидролиза в промышленности, являются конструктивные сложности при создании аппарата, обеспечивающего практически мгновенное удаление полученного в процессе автогидролиза продукта.

В то же время разработаны конструкции лабораторных, пилотных и опытно-промышленных установок [8, 14, 26, 27] для осуществления автогидролиза-взрыва и разделения образующихся при этом компонентов.

Кроме того, для этой цели могут быть использованы сохранившиеся на некоторых гидролизных заводах гидролизаторы периодического действия, в которых удаление лигнина после жидкофазного перколяционного гидролиза растительного сырья или парофазного гидролиза при получении фурфурола осуществляется быстрым сбросом давления до атмосферного («выстрел»).

Заключение. Таким образом, автогидролиз-взрыв является экологически безопасным и эффективным процессом высокотемпературной обработки лигноцеллюлозной растительной

биомассы при получении сахаров, лигнина, древесноволокнистой массы, технической и чистой целлюлозы, микрокристаллической целлюлозы, а при использовании его в качестве предварительной обработки сырья перед последующей биотехнологической переработкой – для производства этанола и кормовых добавок.

В зависимости от вида применяемого в качестве сырья лигноцеллюлозного материала представляются целесообразными следующие схемы его химической (гидролитической), механической и биотехнологической переработки.

При использовании пентозансодержащего растительного сырья (отходов сельскохозяйственного производства и древесины лиственных пород), в котором содержание пентозанов в 2–3 раза больше, чем в древесине хвойных пород [2], предпочтительной является переработка следующим образом. Измельченное влажное или увлажненное сырье подвергается автогидролизу-взрыву при параметрах, обеспечивающих гидролиз легкогидролизуемых полисахаридов гемицеллюлоз. Автогидролизованная масса промывается водой для удаления растворенных моносахаридов (преимущественно пентоз) и затем раствором щелочи (гидроксида натрия) для экстрагирования низкомолекулярной фракции лигнина.

Водный раствор может быть использован для жидкофазной дегидратации пентоз в фурфурол, а твердый остаток после автогидролиза-взрыва (содержащий целлюлозу и лигнин) можно подвергать прямой биоконверсии мицелиальными грибами для обогащения белком и получения растительной углеводно-белковой кормовой добавки (при этом получаемый после экстракции водой раствор моносахаридов можно использовать для приготовления питательных сред и посевного материала).

В древесине хвойных пород преобладает содержание трудногидролизуемых полисахаридов (преимущественно целлюлозы), например в древесине ели и сосны – 48,0–47,7% [2]. Поэтому более рациональными направлениями ее переработки с использованием метода автогидролиза-взрыва является получение из автогидролизованного остатка после экстракции растворимых веществ древесноволокнистой массы, древесноволокнистых и древесностружечных плит, технической и чистой целлюлозы, микрокристаллической целлюлозы и/или осуществление его кислотного или ферментативного гидролиза с получением гексозного гидролизата и его последующей ферментацией в этанол. Оставшийся после гидролитической обработки технический лигнин можно подвергать переработке различными способами, например, для получения сорбентов и других продуктов.

Список литературы

1. Гравитис Я. А. Теоретические и прикладные аспекты взрывного автогидролиза растительной биомассы // *Химия древесины*. 1987. № 5. С. 3–21.
2. Холькин Ю. И. Технология гидролизных производств. М.: Лесная пром-сть, 1989. 496 с.
3. Ефремов А. А., Кротова И. В. Комплексная переработка древесных отходов с использованием метода взрывного автогидролиза // *Химия растительного сырья*. 1999. № 2. С. 19–39.
4. Xylan derivatives from steam-exploded lignocellulosic resources – structure and properties / N. Raushenberg [et al.] // *American Chemical Society, Polymer Preprints, Division of Polymer Chemistry*. 1990. Vol. 31, no. 1. P. 650–652.
5. Putnina A., Kukle S., Gravitis J. Steam explosion as the pretreatment method of lignocellulosic biomass // *Scientific Journal of RTU*. 2012. № 7. P. 80–83.
6. Просвирников Д. Б., Халитов Р. А., Лашков В. А. Исследование механизма паровзрывного диспергирования лигноцеллюлозного материала // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2014. № 1. С. 241–243.
7. Кузнецов Б. Н., Кузнецова С. А., Тарабанько В. Е. Новые методы получения химических продуктов из биомассы деревьев сибирских пород // *Рос. хим. журн*. 2004. Т. XLVIII, № 3. С. 4–20.
8. Комплексная переработка древесных отходов паровзрывным методом в аппарате высокого давления / Д. Ф. Зиятдинова [и др.] // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2011. № 2. С. 124–131.
9. Method for producing microcrystalline cellulose: pat. US 5769934, МПК C08B15/02. № 5769934; publ. date: 23.06.1998. URL: <https://patents.google.com/patent/US5769934A> (date of access: 03.03.2019).
10. Ахметшин И. Р. Получение микрокристаллической целлюлозы из лигноцеллюлозного материала, активированного паровзрывной обработкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.03. Казань, 2003. 133 л.
11. Исследование взрывного автогидролиза стержней початков кукурузы / А. М. Филатова [и др.] // *Гидролизная и лесохимическая пром-сть*. 1987. № 6. С. 3–6.
12. Direct hydrolysis of cellulose to glucose using ultra-high temperature and pressures team explosion / Sasaki Ch. [et al.] // *Carbohydr. Polym.: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides*. 2012. Vol. 89, no. 1. P. 298–301.
13. Зиятдинова Д. Ф., Сафин Р. Г., Просвирников Д. Б. Извлечение примесей из древесноволокнистой массы, полученной при обработке лигноцеллюлозного материала высокотемпературным паровзрывным автогидролизом // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2011. № 12. С. 70–77.
14. Зиятдинова Д. Ф., Сафин Р. Г., Зиятдинов Р. Р. Современное состояние техники и технологии производства древесной массы сбросом давления // *Вестн. Казан. технол. ун-та*. 2011. № 7. С. 53–57.
15. Химическая модификация отходов растительного происхождения методом взрывного автогидролиза / В. В. Коньшин [и др.] // XX Менделеевский съезд по общей и прикладной химии, Екатеринбург, 26–30 сент., 2016 г.: тез. докл.: в 5 т. Екатеринбург, 2016. Т. 4. С. 67.
16. Просвирников Д. Б. Совершенствование техники и технологии процесса паровзрывной обработки древесных отходов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 и 05.21.03. Казань, 2013. 19 с.
17. Просвирников Д. Б. Переработка лигноцеллюлозной биомассы, активированной методом паровзрывной обработки: автор. дис. ... докт. техн. наук: 05.21.03. Казань, 2019. 38 с.
18. Волокнистые древесно-полистирольные сорбенты для ликвидации нефтяных загрязнений / Е. В. Веприкова [и др.] // *Журнал Сибирского федерального университета. Химия*. 2011. № 4. С. 27–37.
19. Enzymatic hydrolysis pretreated lignocellulosic substrates and the fermentatijn of the sugars to ethanol and butandiol / J. N. Saddler [et al.] // *Biotechnol. Bioeng. Symp*. 1983. № 13. P. 225–238.
20. Ando S., Ono O., Kieto S. Production of ethanol from bagasse and rice straw treated by steam explosion // *Hanal hakko kogaku kaishi*. 1987. Vol. 65, no. 2. P. 137–141.
21. Investigation of cellulose convertibility and ethanolic fermentation of sugarcane bagasse pretreated by wet oxidation and steam explosion / C. Martin [et al.] // *J. Chem. Technol. and Biotechnol*. 2006. Vol. 81, no. 10. P. 1669–1677.
22. Enzymatic hydrolysis of autohydrolysed husks / L. A. Ares-Peon [et al.] // *J. Chem. Technol. and Biotechnol*. 2011. Vol. 86, no. 2. P. 251–260.
23. Untersuchung der Vorhydrolyse von Lignocellulose mittels Steam Explosion / J. Lindorfer [et al.] // *Chem. Ing. Techn*. 2010. Vol. 82, no. 8. P. 1169–1176.
24. Трофимов Н. Н., Бабкин В. А., Чемерис М. М. Катализируемый паровзрывной гидролиз целлолигнинового остатка древесины лиственницы // *Химия растительного сырья*. 2002. № 2. С. 53–56.
25. Purl V. D., Mammers H. Explosive pretreatment of lignocellulosic residues with high-pressure carbon dioxide for the production of fermentation substrates // *Biotechnol. and Bioeng*. 1983. Vol. 25, no. 12. P. 3149–3161.

26. Малхасян Л. Г., Кузнецов В. М. Лабораторная установка для проведения автогидролиза взрыва // Гидролизная и лесохимическая пром-сть. 1989. № 4. С. 17–18.

27. Зиятдинова Д. Ф., Сафин Р. Г., Просвирников Д. Б. Разработка опытно-промышленной установки для разделения лигноцеллюлозного материала на компоненты методом высокотемпературного парового гидролиза // Вестн. Казан. технол. ун-та. 2011. № 12. С. 93–101.

References

1. Gravitis Ya. A. Theoretical and applied aspects of explosive autohydrolysis of plant biomass. *Khimiya drevesiny* [Chemistry of Wood], 1987, no. 5, pp. 3–21 (In Russian).
2. Khol'kin Yu. I. *Tekhnologiya gidroliznykh proizvodstv* [Technology of hydrolysis production]. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1989. 496 p.
3. Efremov A. A., Krotova I. V. Complex processing of wood waste using the method of explosive autohydrolysis. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya* [Chemistry of plant raw materials], 1999, no. 2, pp. 19–39 (In Russian).
4. Raushenberg N., Dhara K., Palmer J., Glasser W. Xylan derivatives from steam-exploded lignocellulosic residues – structure and properties. *American Chemical Society, Polymer Preprints, Division of Polymer Chemistry*, 1990, vol. 31, no. 1, pp. 650–652.
5. Putnina A., Kukle S., Gravitis J. Steam explosion as the pretreatment method of lignocellulosic biomass. *Scientific Journal of Russian Technological University*, 2012, no. 7, pp. 80–83.
6. Prosvirnikov D. B., Khalitov R. A., Lashkov V. A. Investigation of the mechanism of steam-explosive dispersion of lignocellulose material. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [The Bulletin of the Kazan Technological University], 2014, no. 1, pp. 241–243 (In Russian).
7. Kuznetsov B. N., Kuznetsova S. A., Taraban'ko V. E. New methods for obtaining chemical products from the biomass of Siberian tree species. *Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal* [Russian Journal of General Chemistry], 2004, vol. XLVIII, no. 3, pp. 4–20 (In Russian).
8. Ziatdinova D. F., Prosvirnikov D. B., Safin R. G., Bilgildeeva E. I. Complex processing of wood waste by steam-explosive method in a high-pressure apparatus. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [The Bulletin of the Kazan Technological University], 2011, no. 2, pp. 124–131 (In Russian).
9. Manfred J., Bergfeld J. Method for producing microcrystalline cellulose. Patent US, no. 5769934, 1998. Available at: <https://patents.google.com/patent/US5769934A> (accessed 03.03.2019).
10. Akhmetshin I. R. *Polucheniye mikrokristallicheskoj tsellyulozy iz lignotsellyuloznogo materiala, aktivirovannogo parovzryvnoy obrabotkoy. Dis. kand. tekhn. nauk* [Obtaining microcrystalline cellulose from lignocellulosic material activated by steam explosion treatment. Cand. Diss.]. Kazan, 2003. 133 p.
11. Filatova A. M., Khomenko N. D., Glazman B. A., Papazov Yu. G., Gorelov A. V., Evlanova A. G. Investigation of explosive autohydrolysis of corn cob rods. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promyshlennost'* [Hydrolysis and forest chemical industry], 1987, no. 6, pp. 3–6 (In Russian).
12. Sasaki Ch., Sumimoto K., Asada Ch., Nakamura Yo. Direct hydrolysis of cellulose to glucose using ultra-high temperature and pressures team explosion. *Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides*, 2012, vol. 89, no. 1, pp. 298–301.
13. Ziatdinova D. F., Safin R. G., Prosvirnikov D. B. Extraction of impurities from wood-fiber mass obtained during the processing of lignocellulose material by high-temperature steam-explosive autohydrolysis. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [The Bulletin of the Kazan Technological University], 2011, no. 12, pp. 70–77 (In Russian).
14. Ziatdinova D. F., Safin R. G., Ziatdinov R. R. Modern state of technology and technology of wood mass production by pressure relief. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [The Bulletin of the Kazan Technological University], 2011, no. 7, pp. 53–57 (In Russian).
15. Kon'shin V. V., Afan'kov A. N., Beusheva O. S., Skurydin Yu. G., Skurydina E. M. Chemical modification of plant waste by explosive auto-hydrolysis. *XX Mendeleevskiy s'yezd po obshchey i prikladnoy khimii. V 5 tomach* [20 Mendeleev Congress on General and Applied Chemistry. In 5 vol.]. Yekaterinburg, 2016, vol. 4, p. 67 (In Russian).
16. Prosvirnikov D. B. *Sovershenstvovaniye tekhniki i tekhnologii protsessa parovzryvnoy obrabotki drevesnykh otkhodov. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Improving the technique and technology of the process of steam-explosive treatment of wood waste. Abstract of thesis cand. of tech. sci.]. Kazan, 2013. 19 p.
17. Prosvirnikov D. B. *Pererabotka lignotsellyuloznoy biomassy, aktivirovannoy metodom parovzryvnoy obrabotki. Avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk* [Processing of lignocellulose biomass, activated by steam-blast treatment. Abstract of thesis doct. of tech. sci.]. Kazan, 2019. 38 p.
18. Veprikova E. V., Tereshchenko E. A., Chesnokov N. V., Kuznetsov B. N. Fibrous wood-polystyrene sorbents for the elimination of oil pollution. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Khimiya* [Journal of Siberian Federal University. Chemistry], 2011, no. 4, pp. 27–37 (In Russian).

19. Saddler J. N., MesHartree M., Yu E. K. S., Brownell H. H. Enzymatic hydrolysis pretreated lignocellulosic substrates and the fermentatijn of the sugars to ethanol and butandiol. *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, 1983, no. 13, pp. 225–238.
20. Ando S., Ono O., Kieto S. Production of etanj from bagasse and rise straw treated by steam explosion. *Hanal hakko kogaku kaishi*, 1987, vol. 65, no. 2, pp. 137–141.
21. Martin C., González Yo., Fernández T., Thomsen A. B. Investigation of cellulose convertibility and ethanolic fermentation of sugarcane bagasse pretreated by wet oxidation and steam explosion. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2006, vol. 81, no. 10, pp. 1669–1677.
22. Ares-Peón I. A., Vila C., Garrote G., Parajó J. C. Enzymatic hydrolysis of autohydrolysed husks. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2011, vol. 86, no. 2, pp. 251–260.
23. Lindorfer J., Steinmüller H., Auer W., Jäger A., Eder A. Untersuchung der Vorhydrolyse von Lignocelluloseerthstolier mittels Steam Explosion. *Chemie Ingenieur Technik*, 2010, vol. 82, no. 8, pp. 1169–1176.
24. Trofimov N. N., Babkin V. A., Chemeris M. M. Catalyzed vapor-explosive hydrolysis of cello-lignin residue of larch wood. *Khimiya rastitel'no go syr'ya* [Chemistry of Plant Raw Materials], 2002, no. 2, pp. 53–56 (In Russian).
25. Purl V. D., Mammers H. Explosive pretreatment of lignocellulosic residues with high-pressure carbon dioxide for the production of fermentation substrates. *Biotechnology and Bioengineering*, 1983, vol. 25, no. 12, pp. 3149–3161.
26. Malkhasyan L. G., Kuznetsov V. M. Laboratory setup for autohydrolysis of explosion. *Gidroliznaya i lesokhimicheskaya promyshlennost'* [Hydrolysis and forest chemical industry], 1989, no. 4, pp. 17–18 (In Russian).
27. Ziatdinova D. F., Safin R. G., Prosvirnikov D. B. Development of a pilot plant for separating lignocellulosic material into components by high-temperature steam hydrolysis. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [The Bulletin of the Kazan Technological University], 2011, no. 12, pp. 93–101 (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 – 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 04.03.2021