



Предварительная гидротермическая обработка и паровой взрыв целлюлозосодержащего сырья для последующей биотехнологической трансформации: обзор

Е.К. Гладышева

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

Аннотация. Использование возобновляемых источников целлюлозосодержащего сырья для получения продуктов с высокой добавленной стоимостью является актуальной темой. Целлюлозосодержащее сырье представляет собой природную матрицу, состоящую из целлюлозы (38–50%) лигнина (10–25%), гемицеллюлоз (23–32%). Для ее разрушения необходимо использовать предварительную обработку с удалением гемицеллюлоз и лигнина. Такого рода воздействие позволяет изменить химический состав и структуру целлюлозы, а также повысить пористость. В обзоре представлен анализ информации по гидротермической обработке и паровому взрыву целлюлозосодержащего сырья (солома подсолнечника, газонная трава, опилки тополя, сено, тростник, осина, гигантский тростник, силос и т.д.) с целью конверсии в субстраты для синтеза биотехнологических продуктов (белок, биоводород, биогаз, леулиновая кислота, метан, молочная кислота, этанол, янтарная кислота). При гидротермической обработке сырье обрабатывают при температуре 160–240 °С в воде под высоким давлением. Давление используется для поддержания воды в жидком состоянии. При паровом взрыве сырье подвергается обработке паром при умеренной температуре и давлении в течение определенного времени. Затем давление быстро сбрасывается, при этом происходит расширение волокон целлюлозосодержащего сырья. Эффективность процессов гидротермической обработки и парового взрыва зависит как от типа сырья (химический состав, концентрация твердого вещества, свойства твердого вещества), так и от условий проведения гидротермической обработки и парового взрыва.

Ключевые слова: целлюлозосодержащее сырье, гидротермическая обработка, паровой взрыв, редуцирующие вещества, гемицеллюлозы, кислотонерастворимый лигнин

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках госзадания ИПХЭТ СО РАН (код научной темы FUFЕ-2024-0008, регистрационный номер 124021200031-4).

Для цитирования: Гладышева Е.К. Предварительная гидротермическая обработка и паровой взрыв целлюлозосодержащего сырья для последующей биотехнологической трансформации: обзор // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2024. Т. 14. N 2. С. 184–194. DOI: 10.21285/achb.919. EDN: IDUAXB.

PHYSICOCHEMICAL BIOLOGY

Review article

Preliminary hydrothermal treatment and steam explosion of cellulosic feedstock for the subsequent biotechnological transformation: A review

Evgenia K. Gladysheva

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

Abstract. The use of renewable sources of cellulosic feedstock to produce high value-added products is a relevant issue. Cellulosic feedstock constitutes a natural matrix comprising cellulose (38–50%), lignin (10–25%), and

hemicelluloses (23–32%). In order to break it down, pretreatment involving the removal of hemicelluloses and lignin is required. This process can change the chemical composition and structure of cellulose while increasing porosity. This review article provides an analysis of data on the hydrothermal treatment and steam explosion of cellulosic feedstock (sunflower straw, lawn grass, poplar sawdust, hay, reed, aspen, giant reed, silage, etc.) intended to convert it into substrates for the synthesis of biotechnological products (protein, biohydrogen, biogas, levulinic acid, methane, lactic acid, ethanol, and succinic acid). Hydrothermal treatment involves treating raw materials at 160–240 °C in water under high pressure. Pressure keeps water in a liquid state. During steam explosion, feedstock is treated with steam at a moderate temperature and pressure for a certain amount of time. Then, the pressure is rapidly released, and the fibers of cellulosic feedstock expand. The effectiveness of hydrothermal treatment and steam explosion depends both on the type of feedstock (chemical composition, solids concentration, and properties of solids) as well as on the conditions of hydrothermal treatment and steam explosion.

Keywords: cellulosic feedstock, hydrothermal treatment, steam explosion, reducing agents, hemicelluloses, acid-insoluble lignin

Funding. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the state assignment for IPCET SB RAS (Research Theme Code: FUFЕ-2024-0008, Registration ID: 124021200031-4).

For citation: Gladysheva E.K. Preliminary hydrothermal treatment and steam explosion of cellulosic feedstock for the subsequent bio-technological transformation: A review. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2024;14(2):184-194. (In Russian). DOI: 10.21285/achb.919. EDN: IDUAXB.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с высоким спросом на энергию и сокращением запасов ископаемого топлива интерес мировых исследований направлен на использование возобновляемых источников целлюлозосодержащего сырья с целью получения продуктов с высокой добавленной стоимостью. Данная концепция биопереработки растительного сырья разрабатывается для производства биопродуктов, удовлетворяющих общественные потребности, включая энергетическую безопасность и решение экологических проблем [1, 2]. Целлюлозосодержащее сырье является наиболее распространенным источником углерода на Земле, но состав сырья может варьироваться в зависимости от вида растений, сезона сбора урожая и географического положения. Известно, что растительное сырье в нативном виде представляет собой природную матрицу, состоящую из целлюлозы (38–50%) лигнина (10–25%), гемицеллюлоз (23–32%) [3].

Растительное сырье обладает «сопротивляемостью биомассы», которая зависит от структуры ткани растения, сложности компонентов клеточной стенки, степени лигнификации, степени кристалличности и полимеризации целлюлозы и гетерогенности биомассы [4]. Для преодоления «сопротивляемости биомассы» и максимального использования углеводов растительного сырья необходимо использовать эффективные стратегии предварительной обработки [5]. Предварительная обработка позволяет изменить структурные и композиционные препятствия, такие как пористая структура (размер и объем пор, размер частиц и удельная поверхность), химический состав (содержание гемицеллюлоз, лигнина и пектина) и структура целлюлозы (кристалличность целлюлозы и ее степень полимеризации) [6], и таким образом улучшить скорость гидролиза, увеличить выход редуцирующих веществ [7]. Редуцирующие вещества, полученные из целлюлозосодержащего сырья, имеют высокий потенциал для производства продуктов с высокой добавленной стоимостью.

Одними из методов предварительной обработки растительного сырья являются гидротермическая обработка (ГТО) и паровой взрыв (ПВ) [8, 9]. Данные

методы обработки являются эффективными, имеют низкие затраты на производство и меньшее воздействие на окружающую среду [10, 11]. ГТО и ПВ используются для получения продуктов с высокой добавленной стоимостью (таблица). В данном обзоре мы приведем подробное описание этих двух способов обработки.

ГИДРОТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

При ГТО сырье подвергается высокотемпературной обработке в воде под высоким давлением. Давление используется для поддержания воды в жидком состоянии при повышенных температурах 160–240 °C [26]. Цель ГТО состоит в том, чтобы удалить гемицеллюлозы, сделать целлюлозу более доступной для взаимодействия с ферментами и избежать образования ингибиторов. При данном способе гемицеллюлозы в основном деполимеризуются, а продукты их деструкции растворяются в жидкой фазе. Целлюлоза полностью сохраняется в твердой части. Лигнин подвергается одновременно реакциям деполимеризации и реполимеризации [27]. Установлено, что большая часть нерастворимого лигнина остается в твердой фракции [28].

Критическими факторами при ГТО являются температура и время выдержки [18, 29–31]. К примеру, в ходе получения метана при различных температурах (от 150 до 225 °C) и времени выдержки (от 5 до 60 мин) максимальный выход был достигнут при 175 °C в течение 30 мин, что составило на 62,9% по сравнению с необработанной соломой [29]. В аналогичном исследовании наибольшее выделение метана и максимальный гидролиз биомассы после ГТО был достигнут при 180 °C и выдержке 30 мин [18]. ГТО ивовых опилок и древесной биомассы при различных температурах (от 130 до 230 °C) показала, что при температурах 215 и 230 °C происходит увеличение термической деградации целлюлозы и образование фурфурола, 5-гидроксиметилфурфурола и органических кислот по сравнению с более низкими температурами обработки [31].

ГТО лигноцеллюлозной биомассы при контролируемом pH между 4 и 7 эффективно удаляет гемицеллюлозы и часть лигнина, сводя к минимуму образование

Продукты, полученные после предварительной гидротермической обработки и парового взрыва

Products obtained after preliminary hydrothermal treatment and steam explosion

Полученный продукт	Исходное сырье	Условия предварительной обработки	Источник
Белок	Биоэтанольная барда	ГТО: температура – 110–210 °С, выдержка – 10–90 мин	[12]
Биоводород	Солома подсолнечника, газонная травы, опилки тополя	ГТО: соотношение твердого вещества к воде – 1:20 (масс/об.), температура – 210 °С, выдержка – 15 мин	[13]
Биогаз	Сено	ГТО: температура – от 160 до 220 °С, выдержка – 5–15 мин	[14]
	Тростник	ПВ: давление – до 3,4 МПа, температура – от 160 до 220 °С, выдержка – 5–20 мин	[15]
Левулиновая кислота	Осина	ГТО: соотношение твердого вещества к жидкости – 1:7 (масс/об.), температура – 200 °С, выдержка – 10–50 мин), скорость перемешивания – 20 об/мин	[16]
Метан	Гигантский тростник	ГТО: соотношение твердого вещества к жидкости – 1:10 (масс/об.), температура – 170–230 °С, выдержка – 5–15 мин, скорость перемешивания – 400 об/мин	[17]
	Силос <i>Sida hermaphrodita</i> (L.) Rusby	ГТО: температура – 100–180 °С, выдержка – 5–30 мин	[18]
	Пшеничная солома	ПВ: температура – от 140 до 178 °С, выдержка – от 30 мин до 2 ч	[19]
Молочная кислота	Бамбук	ПВ: давление – 35 атм., выдержка – 3 мин	[20]
Этанол	Просо <i>Panicum virgatum</i> L.	ГТО	[21]
	Хлопок	ГТО: соотношение твердого вещества к воде – 1:9 (масс/об.), скорость перемешивания – 600 об/мин, температура – 230 °С, жесткость предварительной обработки – 2,5–4,7	[22]
	Конопля	ГТО: соотношение твердого вещества к воде – 1:10 (масс/об.), температура – 170 °С, выдержка – 30 мин	[23]
	Слоновья трава	ГТО: температура – 170–220 °С, выдержка – 1–12 мин	[24]
Янтарная кислота	Дуб монгольский <i>Quercus mongolica</i>	ГТО: соотношение твердого вещества к жидкости – 1:8 (масс/об.), температура – 150–200 °С, выдержка – 10–70 мин	[25]

моносахаридов и дальнейшее разложение сахаров до токсичных веществ [32, 33]. Непрерывный мониторинг pH и добавление гидроксида калия способствует поддержанию pH во время предварительной обработки в определенном диапазоне 4–7 [34]. В то же время отмечалось, что pH продуктов после ГТО обычно находится в диапазоне 4–5 без добавления основания или буфера [32, 33, 35].

Другим важным фактором, который может повлиять на ферментативный гидролиз сырья, является процент загрузки сухих веществ для гидролиза. При содержании сухих веществ 15% только 66% глюкозы превращалось в глюкозу, что на 20% ниже, чем выход при содержании твердых веществ 2%. Дело в том, что при увеличении содержания твердых веществ добавляется большее количество фермента. Высокие концентрации глюкозы могут оказывать ингибирующее действие на ферменты. Кроме этого, в гидролизате из-за высокой концентрации сухих веществ ухудшается массоперенос и диффузия [36].

Фактор жесткости при процессе ГТО также оказывает влияние на химический состав лигноцеллюлозного материала и его способности к ферментативному гидролизу [27]. Низкая температура и длительное время пребывания предпочтительны для удаления гемицеллюлоз во время предварительной обработки, поскольку эти условия благоприятствуют образованию олигосахаридов и моно-

мерных сахаров, а не разложению сахара [37]. Напротив, высокая гидролизуемость целлюлозы достигается при высокой температуре (>200 °С) и высокой жесткости предварительной обработки, когда за предварительной обработкой следует ферментативный гидролиз [38].

Двухступенчатая предварительная обработка позволяла удалить лигнин и повысить успешность процесса ферментативного гидролиза [39]. Тем не менее полная делигнификация невозможна из-за повторной конденсации растворимых компонентов лигнина, что может оказывать негативное влияние на ферментативный гидролиз по причине адсорбции фермента [27]. Также установлено, что горячая или холодная промывка твердой фракции после ГТО повышает выход редуцирующих сахаров на 10–35%. Причины этого явления не установлены, хотя возможно, что растворенные фенольные соединения, уксусная кислота и сахара, полученные в результате гидролиза гемицеллюлозы, могут оказывать ингибирующее действие на целлюлазы, входящие в ферментативные комплексы [35]. Несмотря на присутствие ингибиторов, ГТО не уступает другим способам предварительной обработки по выходу редуцирующих веществ [40]. При этом полученные гидролизаты считаются биологически доброкачественными и пригодными для дальнейшего получения продуктов с высокой добавленной стоимостью [41].

ГТО не требует добавления химикатов и катализаторов, в связи с этим ввиду низкого потенциала коррозии может быть использована недорогая конструкция реактора. Отсутствует стадия нейтрализации отработанных растворов и потребность во ведении стадии измельчения целлюлозосодержащего сырья, которое является высокотратной операцией. Также большое преимущество заключается в том, что достигается высокое извлечение пентоз, при этом образуется меньшее количество ингибиторов. Основными недостатками процесса являются высокие потребности в энергии из-за высокого давления и большого расхода воды. Также к недостаткам относится незначительное удаление лигнина из твердой фракции. Тем не менее в целом ГТО имеет высокий экономический потенциал, данный метод прост и понятен и включает в себя сравнительно небольшое количество этапов процесса, что является преимуществом для его интеграции и разработки.

ПАРОВОЙ ВЗРЫВ

ПВ является наиболее широко используемым физико-химическим методом предварительной обработки любого лигноцеллюлозного сырья [42, 43]. В процессе обработки сырье предварительно обрабатывают паром при умеренной температуре и давлении в течение определенного времени. Затем давление быстро сбрасывается, при этом происходит расширение волокон сырья [44, 45]. Многоуровневая структура лигноцеллюлозного сырья изменяется со значительным увеличением пористости, одновременным гидролизом гемицеллюлоз и растворением их продуктов, делигнификацией и небольшим термическим разложением целлюлозы [46, 47]. ПВ способствует снижению кристалличности целлюлозы, делая лигноцеллюлозное сырье более доступным для действия ферментных препаратов [48, 49]. В то же время исследователи отмечали конденсацию лигнина в процессе ПВ с образованием более стойкого соединения [50]. ПВ является экологически чистым методом, поскольку не требует использования химических реактивов [51], и считается одним из наиболее эффективных процессов предварительной обработки для многих видов сырья, включая твердую древесину [52], сельскохозяйственные [53], бытовые [54] и лесные отходы [55].

В процессе ПВ при высоких температурах возможно образование ингибиторов, таких как фурфурол и 5-гидроксиметилфурфурол, алифатические кислоты, уксусная, муравьиная, левулиновая кислоты и фенольные соединения [56, 57]. Имеются данные, указывающие на то, что эти продукты являются сильными ингибиторами микробного роста [58] и что для повышения способности лигноцеллюлозных гидролизатов к ферментации в различных биотехнологических продуктах необходимо разрабатывать стратегии детоксификации [3, 59, 60].

Результативность предварительной обработки паровым взрывом зависит от таких факторов, как температура, продолжительность, размер частиц сырья и содержание влаги [50]. В работе [61] ПВ при 200 °С в течение 10 минут привел к высокому выходу редуцирующих веществ при ферментативном гидролизе (91,7%) и общему выходу глюкозы (35,4 г глюкозы / 100 г пшеничной соломы), а также к более высокому образованию токсичных соединений. Температура

менее 200 °С способствовала минимальной деградации сахаров и образованию токсических веществ. Аналогичные результаты были получены в исследовании [62]: максимальные выходы глюкозы при ферментативном гидролизе были получены после предварительной обработки при 210 °С в течение 10 мин. Выход же ксилозы увеличивался при температурах до 190 °С и длительной продолжительности, при температуре более 190 °С происходило образование фурфурола. Установлено, что в среднем при температуре 200 °С и продолжительности 5 мин около 3,71 масс.% целлюлозы и 46,62 масс.% гемицеллюлозы превращается в глюкозу и ксилозу соответственно, около 26,73 масс.% лигнина превращается в другие химические вещества [63]. Стоит отметить, что процессы ПВ, протекающие в диапазоне температур от 200 до 280 °С и времени выдержки от 2 до 10 мин, способствуют увеличению доли удаления гемицеллюлоз и лигнина, но при этом усиливается термическое разложение целлюлозы до сахаров [64]. При всем этом оптимизация соотношения температуры и времени (270 °С, 1 мин или 190 °С, 10 мин) может оказывать влияние на результативность ПВ [65]. Помимо температуры и времени пребывания, размер частиц лигноцеллюлозного сырья и содержание влаги также оказывают влияние на результативность ПВ [66, 67]. Обработка паром щепы осины (*Populus tremuloides*) стандартного размера при 180 °С в течение от 4 до 18 мин показала, что возможно провести равномерную обработку древесной щепы крупного размера [68]. При обработке ПВ кукурузной соломы выявлено, что более крупные частицы сырья лучше перемешиваются и обрабатываются паром высокого давления [69]. Исследования свидетельствуют, что ПВ образцов жомы сахарного тростника с высоким содержанием влаги обеспечил значительное увеличение степени извлечения целлюлозы, гемицеллюлоз и лигнина по сравнению с образцами с низким содержанием влаги. С другой стороны, увеличение содержания влаги оказало негативное влияние на выход редуцирующих веществ при ферментативном гидролизе [70]. Кроме вышеперечисленных факторов на эффективность ПВ оказывает влияние плотность мощности взрыва [71]. Данный параметр является предметом отдельных исследований.

Предварительная обработка ПВ считается экологически безопасным методом, поскольку не предполагает использование химических веществ. Также ПВ является экономически эффективным, поскольку не требует затрат на измельчение сырья и обеспечивает более высокий выход редуцирующих веществ. В то же время было обнаружено, что этот метод применим к целлюлозосодержащему сырью с низким содержанием лигнина. Целлюлозосодержащее сырье, включающее большое количество лигнина, хуже поддается такому виду обработки. К прочим недостаткам можно отнести неполное расщепление лигнин-гемицеллюлозных связей, приводящее к высвобождению полупереваренных комплексов, которые могут конденсироваться и осаждаться на твердую фракцию, снижая общее извлечение сахара, а также частичную деградацию гемицеллюлоз и образование некоторых токсичных соединений, которые могут влиять на ферментативный гидролиз и микробиологическую стадию.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для разрушения природной матрицы целлюлозосодержащего сырья и высвобождения сбраживаемых сахаров, которые в дальнейшем могут быть преобразованы микроорганизмами в продукты с высокой добавленной стоимостью, необходимо использовать предварительную обработку. Предварительная обработка позволяет удалить большую часть гемицеллюлоз и частично растворить лигнин, а также обеспечить доступность целлюлозы для ферментов. В проведенном обзоре представлен анализ информации по ГТО и ПВ

целлюлозосодержащего сырья (солома подсолнечника, газонная трава, опилки тополя, сено, тростник, осина, гигантский тростник, силос и т.д.) с целью конверсии в субстраты для синтеза биотехнологических продуктов (белок, биоводород, биогаз, леволиновая кислота, метан, молочная кислота, этанол, янтарная кислота). Эффективность процессов ГТО и ПВ целлюлозосодержащего сырья зависит от типа сырья, химического состава, концентрации твердого вещества, свойств твердого вещества и условий проведения предварительной обработки ГТО и ПВ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Chen W.-H., Nižetić S., Sirohi R., Huang Z., Luque R., Papadopoulos A.M., et al. Liquid hot water as sustainable biomass pretreatment technique for bioenergy production: a review // *Bioresource Technology*. 2022. Vol. 344. P. 126207. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126207.
2. Макарова Е.И., Будаева В.В. Биоконверсия непищевого целлюлозосодержащего сырья. Часть 1 // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2016. Т. 6. N 2. С. 43–50. DOI: 10.21285/2227-2925-2016-6-2-43-50. EDN: WAJUUX.
3. Kim D. Physico-chemical conversion of lignocellulose: inhibitor effects and detoxification strategies: a mini review // *Molecules*. 2018. Vol. 23, no. 2. P. 309. DOI: 10.3390/molecules23020309.
4. Antczak A., Szadkowski J., Szadkowska D., Zawadzki J. Assessment of the effectiveness of liquid hot water and steam explosion pretreatments of fast-growing poplar (*Populus trichocarpa*) wood // *Wood Science and Technology*. 2022. Vol. 56. P. 87–109. DOI: 10.1007/s00226-021-01350-1.
5. Chen H., Liu J., Chang X., Chen D., Xue Y., Liu P., et al. A review on the pretreatment of lignocellulose for high-value chemicals // *Fuel Processing Technology*. 2017. Vol. 160. P. 196–206. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.12.007.
6. Zhou Z., Liu D., Zhao X. Conversion of lignocellulose to biofuels and chemicals via sugar platform: an updated review on chemistry and mechanisms of acid hydrolysis of lignocellulose // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 146. P. 111169. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111169.
7. Chen W.-H., Wang C.-W., Ong H.C., Show P.L., Hsieh T.-H. Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin // *Fuel*. 2019. Vol. 258. P. 116168. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116168.
8. Hydrothermal processing in biorefineries. Production of bioethanol and high added-value compounds of second and third generation biomass / H.A. Ruiz, M.H. Thomsen, H.L. Trajano. Cham: Springer, 2017. 511 p. DOI: 10.1007/978-3-319-56457-9.
9. Павлов И.Н. Влияние автогидролитической обработки *Miscanthus sacchariflorus* Andersson на выход редуцирующих веществ при последующем ферментоллизе // *Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология*. 2020. Т. 10. N 2. С. 303–313. DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-2-303-313. EDN: WMKYJY.
10. Yoo C.G., Meng X., Pu Y., Ragauskas A.J. The critical role of lignin in lignocellulosic biomass conversion and recent pretreatment strategies: a comprehensive review // *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 301. P. 122784. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122784.
11. Hu F., Ragauskas A. Pretreatment and lignocellulosic chemistry // *Bioenergy Research*. 2012. Vol. 5. P. 1043–1066. DOI: 10.1007/s12155-012-9208-0.
12. Lamp A., Kaltschmitt M., Lüdtke O. Protein recovery from bioethanol stillage by liquid hot water treatment // *The Journal of Supercritical Fluids*. 2020. Vol. 155. P. 104624. DOI: 10.1016/j.supflu.2019.104624.
13. Dimitrellos G., Lyberatos G., Antonopoulou G. Does acid addition improve liquid hot water pretreatment of lignocellulosic biomass towards biohydrogen and biogas production? // *Sustainability*. 2020. Vol. 12, no. 21. P. 8935. DOI: 10.3390/su12218935.
14. Bauer A., Lizasoain J., Theuretzbacher F., Agger J.W., Rincón M., Menardo S., et al. Steam explosion pretreatment for enhancing biogas production of late harvested hay // *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 166. P. 403–410. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.05.025.
15. Lizasoain J., Rincón M., Theuretzbacher F., Enguánados R., Nielsen P.J., Potthast A., et al. Biogas production from reed biomass: effect of pretreatment using different steam explosion conditions // *Biomass and Bioenergy*. 2016. Vol. 95. P. 84–91. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.09.021.
16. Madadi M., Bakr M.M.A., Song G., Sun C., Sun F., Hao Z., et al. Co-production of levulinic acid and lignin adsorbent from aspen wood with combination of liquid hot water and green-liquor pretreatments // *Journal of Cleaner Production*. 2022. Vol. 366. P. 132817. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132817.
17. Jiang D., Ge X., Zhang Q., Li Y. Comparison of liquid hot water and alkaline pretreatments of giant reed for improved enzymatic digestibility and biogas energy production // *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 216. P. 60–68. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.05.052.
18. Zieliński M., Kisielińska M., Dudek M., Rusznarska P., Nowicka A., Krzemieniewski M., et al. Comparison of microwave thermohydrolysis and liquid hot water pretreatment of energy crop *Sida hermaphrodita* for enhanced methane production // *Biomass and Bioenergy*. 2019. Vol. 128. P. 105324. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105324.
19. Theuretzbacher F., Lizasoain J., Lefever C., Saylor M.K., Enguánados R., Weran N., et al. Steam explosion pretreatment of wheat straw to improve methane yields: Investigation of the degradation kinetics of structural compounds during anaerobic digestion // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 179. P. 299–305. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.12.008.
20. Chen H.-Z., Liu Z.-H. Steam explosion and its combinatorial pretreatment refining technology of plant biomass to bio-based products // *Biotechnology Journal*. 2015. Vol. 10, no. 6. P. 866–885. DOI: 10.1002/biot.201400705.

21. Larnaudie V., Ferrari M.D., Lareo C. Life cycle assessment of ethanol produced in a biorefinery from liquid hot water pretreated switchgrass // *Renewable Energy*. 2021. Vol. 176. P. 606–616. DOI: 10.1016/j.renene.2021.05.094.
22. Jiang W., Chang S., Li H., Oleskowicz-Popiel P., Xu J. Liquid hot water pretreatment on different parts of cotton stalk to facilitate ethanol production // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 176. P. 175–180. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.11.023.
23. Zhao J., Xu Y., Wang W., Griffin J., Wang D. Conversion of liquid hot water, acid and alkali pretreated industrial hemp biomasses to bioethanol // *Bioresource Technology*. 2020. Vol. 309. P. 123383. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123383.
24. Toscan A., Fontana R.C., Camassola M., Dillon A.J.P. Comparison of liquid hot water and saturated steam pretreatments to evaluate the enzymatic hydrolysis yield of elephant grass // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024. Vol. 14. P. 8057–8070. DOI: 10.1007/s13399-022-02939-7.
25. Kim J.-H., Choi J.-H., Kim J.-C., Jang S.-K., Kwak H.W., Koo B., et al. Production of succinic acid from liquid hot water hydrolysate derived from *Quercus mongolica* // *Biomass and Bioenergy*. 2021. Vol. 150. P. 106103. DOI: 10.1016/j.biombioe.2021.106103.
26. Sahay S. Impact of pretreatment technologies for biomass to biofuel production // *Substrate analysis for effective biofuels production* / eds N. Srivastava, M. Srivastava, P.K. Mishra, V.K. Gupta. Singapore: Springer, 2020. P. 173–216. DOI: 10.1007/978-981-32-9607-7_7.
27. Ko J.K., Kim Y., Ximenes E., Ladisch M.R. Effect of liquid hot water pretreatment severity on properties of hardwood lignin and enzymatic hydrolysis of cellulose // *Biotechnology and Bioengineering*. 2015. Vol. 112, no. 2. P. 252–262. DOI: 10.1002/bit.25349.
28. Wang W., Zhu Y., Du J., Yang Y., Jin Y. Influence of lignin addition on the enzymatic digestibility of pretreated lignocellulosic biomasses // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 181. P. 7–12. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.01.026.
29. Shang G., Zhang C., Wang F., Qiu L., Guo X., Xu F. Liquid hot water pretreatment to enhance the anaerobic digestion of wheat straw – effects of temperature and retention time // *Environmental Science and Pollution Research*. 2019. Vol. 26. P. 29424–29434. DOI: 10.1007/s11356-019-06111-z.
30. Varongchayakul S., Songkasiri W., Chaiprasert P. Optimization of cassava pulp pretreatment by liquid hot water for biomethane production // *Bioenergy Research*. 2021. Vol. 14. P. 1312–1327. DOI: 10.1007/s12155-020-10238-0.
31. Antonopoulou G., Papadopoulou K., Alexandropoulou M., Lyberatos G. Liquid hot water treatment of woody biomass at different temperatures: the effect on composition and energy production in the form of gaseous biofuels // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2024. Vol. 38. P. 101485. DOI: 10.1016/j.scp.2024.101485.
32. Mosier N., Hendrickson R., Ho N., Sedlak M., Ladisch M.R. Optimization of pH controlled liquid hot water pretreatment of corn stover // *Bioresource Technology*. 2005. Vol. 96, no. 18. P. 1986–1993. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.01.013.
33. Kim Y., Hendrickson R., Mosier N.S., Ladisch M.R. Liquid hot water pretreatment of cellulosic biomass // *Biofuels. Methods and Protocols* / ed. J.R. Mielenz. Totowa: Humana, 2009. P. 93–102. DOI: 10.1007/978-1-60761-214-8_7.
34. Li H.-Q., Jiang W., Jia J.-X., Xu J. pH pre-corrected liquid hot water pretreatment on corn stover with high hemicellulose recovery and low inhibitors formation // *Bioresource Technology*. 2014. Vol. 153. P. 292–299. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.11.089.
35. Kim Y., Mosier N.S., Ladisch M.R. Enzymatic digestion of liquid hot water pretreated hybrid poplar // *Biotechnology Progress*. 2009. Vol. 25, no. 2. P. 340–348. DOI: 10.1002/btpr.137.
36. Vallejos M.E., Zambon M.D., Area M.C., da Silva Curvelo A.A. Low liquid-solid ratio (LSR) hot water pretreatment of sugarcane bagasse // *Green Chemistry*. 2012. Vol. 14, no. 7. P. 1982–1989. DOI: 10.1039/C2GC35397K.
37. Serna-Loaiza S., Dias M., Daza-Serna L., de Carvalho C.C.C.R., Friedl A. Integral analysis of liquid-hot-water pretreatment of wheat straw: evaluation of the production of sugars, degradation products, and lignin // *Sustainability*. 2021. Vol. 14, no. 1. P. 362. DOI: 10.3390/su14010362.
38. Kim Y., Kreke T., Mosier N.S., Ladisch M.R. Severity factor coefficients for subcritical liquid hot water pretreatment of hardwood chips // *Biotechnology and Bioengineering*. 2014. Vol. 111, no. 2. P. 254–263. DOI: 10.1002/bit.25009.
39. Yu Q., Zhuang X., Yuan Z., Wang Q., Qi W., Wang W., et al. Two-step liquid hot water pretreatment of *Eucalyptus grandis* to enhance sugar recovery and enzymatic digestibility of cellulose // *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101, no. 13. P. 4895–4899. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.11.051.
40. Ladeira Ázar R.I.S., Bordignon-Junior S.E., Laufer C., Specht J., Ferrier D., Kim D. Effect of lignin content on cellulosic saccharification of liquid hot water pretreated sugarcane bagasse // *Molecules*. 2020. Vol. 25, no. 3. P. 623. DOI: 10.3390/molecules25030623.
41. Van Walsum G.P., Allen S.G., Spencer M.J., Laser M.S., Antal Jr. M.J., Lynd L.R. Conversion of lignocellulosics pretreated with liquid hot water to ethanol // *Conversion of Lignocellulosics Pretreated with Liquid Hot Water to Ethanol: Seventeenth Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals*. Totowa: Humana Press, 1996. P. 157–170. DOI: 10.1007/978-1-4612-0223-3_14.
42. Machineni L. Lignocellulosic biofuel production: review of alternatives // *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2020. Vol. 10. P. 779–791. DOI: 10.1007/s13399-019-00445-x.
43. Ali N., Zhang Q., Liu Z.-Y., Li F.-L., Lu M., Fang X.-C. Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic materials for bio-based products // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020. Vol. 104. P. 455–473. DOI: 10.1007/s00253-019-10158-w.
44. Alvira P., Tomas-Pejo E., Ballesteros M., Negro M.J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review // *Bioresource Technology*. 2010. Vol. 101, no. 13. P. 4851–4861. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.11.093.
45. Chen H. Lignocellulose biorefinery engineering: principles and applications. Sawston: Woodhead Publishing, 2015. 274 p.
46. Haldar D., Purkait M.K. Lignocellulosic conversion into value-added products: a review // *Process Biochemistry*. 2020. Vol. 89. P. 110–133. DOI: 10.1016/j.procbio.2019.10.001.

- 47.** Volynets B., Ein-Mozaffari F., Dahman Y. Biomass processing into ethanol: pretreatment, enzymatic hydrolysis, fermentation, rheology, and mixing // *Green Processing and Synthesis*. 2017. Vol. 6, no. 1. P. 1–22. DOI: 10.1515/gps-2016-0017.
- 48.** Smichi N., Messaoudi Y., Allaf K., Gargouri M. Steam explosion (SE) and instant controlled pressure drop (DIC) as thermo-hydro-mechanical pretreatment methods for bioethanol production // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2020. Vol. 43. P. 945–957. DOI: 10.1007/s00449-020-02297-6.
- 49.** Liu Z.-H., Chen H.-Z. Xylose production from corn stover biomass by steam explosion combined with enzymatic digestibility // *Bioresource Technology*. 2015. Vol. 193. P. 345–356. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.06.114.
- 50.** Sun X.F., Xu F., Sun R.C., Geng Z.C., Fowler P., Baird M.S. Characteristics of degraded hemicellulosic polymers obtained from steam exploded wheat straw // *Carbohydrate Polymers*. 2005. Vol. 60, no. 1. P. 15–26. DOI: 10.1016/j.carbpol.2004.11.012.
- 51.** Chen H., Sui W. Steam explosion as a hydrothermal pretreatment in the biorefinery concept // *Hydrothermal processing in biorefineries* / eds H.A. Ruiz, M.H. Thomsen, H.L. Trajano. Cham: Springer, 2017. P. 317–332. DOI: 10.1007/978-3-319-56457-9_12.
- 52.** Wojtasz-Mucha J., Hasani M., Theliander H. Hydrothermal pretreatment of wood by mild steam explosion and hot water extraction // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 241. P. 120–126. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.061.
- 53.** Adapa P., Tabil L., Schoenau G. Grinding performance and physical properties of non-treated and steam exploded barley, canola, oat and wheat straw // *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35, no. 1. P. 549–561. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.10.004.
- 54.** Capolupo L., Faraco V. Green methods of lignocellulose pretreatment for biorefinery development // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016. Vol. 100. P. 9451–9467. DOI: 10.1007/s00253-016-7884-y.
- 55.** Negro M.J., Álvarez C., Doménech P., Iglesias R., Ballesteros I. Sugars production from municipal forestry and greening wastes pretreated by an integrated steam explosion-based process // *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 17. P. 4432. DOI: 10.3390/en13174432.
- 56.** Marques F.P., Silva L.M.A., Lomonaco D., de Freitas Rosa M., Leitão R.C. Steam explosion pretreatment to obtain eco-friendly building blocks from oil palm mesocarp fiber // *Industrial Crops and Products*. 2020. Vol. 143. P. 111907. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111907.
- 57.** Cantarella M., Cantarella L., Gallifuoco A., Spera A., Alfani F. Effect of inhibitors released during steam-explosion treatment of poplar wood on subsequent enzymatic hydrolysis and SSF // *Biotechnology Progress*. 2004. Vol. 20, no. 1. P. 200–206. DOI: 10.1021/bp0257978.
- 58.** Morales P., Gentina J.C., Aroca G., Mussatto S.I. Development of an acetic acid tolerant *Spathaspora passalidarum* strain through evolutionary engineering with resistance to inhibitors compounds of autohydrolysate of *Eucalyptus globulus* // *Industrial crops and Products*. 2017. Vol. 106. P. 5–11. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.12.023.
- 59.** Sarker T.R., Pattnaik F., Nanda S., Dalai A.K., Meda V., Naik S. Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: a review of steam explosion and subcritical water hydrolysis // *Chemosphere*. 2021. Vol. 284. P. 131372. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131372.
- 60.** Jacquet N., Maniet G., Vanderghem C., Delvigne F., Richel A. Application of steam explosion as pretreatment on lignocellulosic material: a review // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2015. Vol. 54, no. 10. P. 2593–2598. DOI: 10.1021/ie503151g.
- 61.** Alvira P., Negro M.J., Ballesteros I., González A., Ballesteros M. Steam explosion for wheat straw pretreatment for sugars production // *Bioethanol*. 2016. Vol. 2, no. 1. P. 66–75. DOI: 10.1515/bioeth-2016-0003.
- 62.** Horn S.J., Nguyen Q.D., Westereng B., Nilsen P.J., Eijsink V.G.H. Screening of steam explosion conditions for glucose production from non-impregnated wheat straw // *Biomass and Bioenergy*. 2011. Vol. 35, no. 12. P. 4879–4886. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.10.013.
- 63.** Baral N.R., Shah A. Comparative techno-economic analysis of steam explosion, dilute sulfuric acid, ammonia fiber explosion and biological pretreatments of corn stover // *Bioresource Technology*. 2017. Vol. 232. P. 331–343. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.02.068.
- 64.** Singh J., Suhag M., Dhaka A. Augmented digestion of lignocellulose by steam explosion, acid and alkaline pretreatment methods: a review // *Carbohydrate Polymers*. 2015. Vol. 117. P. 624–631. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.10.012.
- 65.** Kumar A., Anushree, Kumar J., Bhaskar T. Utilization of lignin: a sustainable and eco-friendly approach // *Journal of the Energy Institute*. 2020. Vol. 93, no. 1. P. 235–271. DOI: 10.1016/j.joei.2019.03.005.
- 66.** Vidal Jr. B.C. Dien B.S., Ting K.C., Singh V. Influence of feedstock particle size on lignocellulose conversion – a review // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2011. Vol. 164. P. 1405–1421. DOI: 10.1007/s12010-011-9221-3.
- 67.** Hoang A.T., Nguyen, X.P., Duong X.Q., Ağbulut Ü., Len C., Nguyen P.Q.P., et al. Steam explosion as sustainable biomass pretreatment technique for biofuel production: characteristics and challenges // *Bioresource Technology*. 2023. Vol. 385. P. 129398. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.129398.
- 68.** DeMartini J.D., Foston M., Meng X., Jung S., Kumar R., Ragauskas A.J., et al. How chip size impacts steam pretreatment effectiveness for biological conversion of poplar wood into fermentable sugars // *Biotechnology for Biofuels*. 2015. Vol. 8. P. 209. DOI: 10.1186/s13068-015-0373-1.
- 69.** Liu Z.-H., Qin L., Pang F., Jin M.-J., Li B.-Z., Kang Y., et al. Effects of biomass particle size on steam explosion pretreatment performance for improving the enzyme digestibility of corn stover // *Industrial Crops and Products*. 2013. Vol. 44. P. 176–184. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.11.009.
- 70.** Pitarello A.P., da Silva T.A., Peralta-Zamora P.G., Ramos L.P. Effect of moisture content in the steam treatment and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse // *Química Nova*. 2012. Vol. 35, no. 8. P. 1502–1509. DOI: 10.1590/S0100-40422012000800003.
- 71.** Yu Z., Zhang B., Yu F., Xu G., Song A. A real explosion: the requirement of steam explosion pretreatment // *Bioresource Technology*. 2012. Vol. 121. P. 335–341. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.06.055.

REFERENCES

1. Chen W.-H., Nižetić S., Sirohi R., Huang Z., Luque R., Papadopoulos A.M., et al. Liquid hot water as sustainable biomass pretreatment technique for bioenergy production: a review. *Bioresource Technology*. 2022;344:126207. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126207.
2. Makarova E.I., Budaeva V.V. Bioconversion of non-food cellulosic biomass. Part 1. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2016;6(2):43-50. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2016-6-2-43-50. EDN: WAJUUX.
3. Kim D. Physico-chemical conversion of lignocellulose: inhibitor effects and detoxification strategies: a mini review. *Molecules*. 2018;23(2):309. DOI: 10.3390/molecules23020309.
4. Antczak A., Szadkowska J., Szadkowska D., Zawadzki J. Assessment of the effectiveness of liquid hot water and steam explosion pretreatments of fast-growing poplar (*Populus trichocarpa*) wood. *Wood Science and Technology*. 2022;56:87-109. DOI: 10.1007/s00226-021-01350-1.
5. Chen H., Liu J., Chang X., Chen D., Xue Y., Liu P., et al. A review on the pretreatment of lignocellulose for high-value chemicals. *Fuel Processing Technology*. 2017;160:196-206. DOI: 10.1016/j.fuproc.2016.12.007.
6. Zhou Z., Liu D., Zhao X. Conversion of lignocellulose to biofuels and chemicals via sugar platform: an updated review on chemistry and mechanisms of acid hydrolysis of lignocellulose. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;146:111169. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111169.
7. Chen W.-H., Wang C.-W., Ong H.C., Show P.L., Hsieh T.-H. Torrefaction, pyrolysis and two-stage thermodegradation of hemicellulose, cellulose and lignin. *Fuel*. 2019;258:116168. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116168.
8. Ruiz H.A., Thomsen M.H., Trajano H.L. *Hydrothermal processing in biorefineries. Production of bioethanol and high added-value compounds of second and third generation biomass*. Cham: Springer; 2017, 511 p. DOI: 10.1007/978-3-319-56457-9.
9. Pavlov I.N. Effect of the autohydrolytic treatment of *Miscanthus sacchariflorus* Andersson on the yield of the reducing substances during the subsequent fermentolysis. *Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology*. 2020;10(2):303-313. (In Russian). DOI: 10.21285/2227-2925-2020-10-2-303-313. EDN: WMKYJY.
10. Yoo C.G., Meng X., Pu Y., Ragauskas A.J. The critical role of lignin in lignocellulosic biomass conversion and recent pretreatment strategies: a comprehensive review. *Bioresource Technology*. 2020;301:122784. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122784.
11. Hu F., Ragauskas A. Pretreatment and lignocellulosic chemistry. *Bioenergy Research*. 2012;5:1043-1066. DOI: 10.1007/s12155-012-9208-0.
12. Lamp A., Kaltschmitt M., Lüttke O. Protein recovery from bioethanol stillage by liquid hot water treatment. *The Journal of Supercritical Fluids*. 2020;155:104624. DOI: 10.1016/j.supflu.2019.104624.
13. Dimitrellos G., Lyberatos G., Antonopoulou G. Does acid addition improve liquid hot water pretreatment of lignocellulosic biomass towards biohydrogen and biogas production? *Sustainability*. 2020;12(21):8935. DOI: 10.3390/su12218935.
14. Bauer A., Lizasoain J., Theuretzbacher F., Agger J.W., Rincón M., Menardo S., et al. Steam explosion pretreatment for enhancing biogas production of late harvested hay. *Bioresource Technology*. 2014;166:403-410. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.05.025.
15. Lizasoain J., Rincón M., Theuretzbacher F., Enguñados R., Nielsen P.J., Potthast A., et al. Biogas production from reed biomass: effect of pretreatment using different steam explosion conditions. *Biomass and Bioenergy*. 2016;95:84-91. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.09.021.
16. Madadi M., Bakr M.M.A., Song G., Sun C., Sun F., Hao Z., et al. Co-production of levulinic acid and lignin adsorbent from aspen wood with combination of liquid hot water and green-liquor pretreatments. *Journal of Cleaner Production*. 2022;366:132817. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132817.
17. Jiang D., Ge X., Zhang Q., Li Y. Comparison of liquid hot water and alkaline pretreatments of giant reed for improved enzymatic digestibility and biogas energy production. *Bioresource Technology*. 2016;216:60-68. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.05.052.
18. Zieliński M., Kisielska M., Dudek M., Rusanowska P., Nowicka A., Krzemieniewski M., et al. Comparison of microwave thermohydrolysis and liquid hot water pretreatment of energy crop *Sida hermaphrodita* for enhanced methane production. *Biomass and Bioenergy*. 2019;128:105324. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.105324.
19. Theuretzbacher F., Lizasoain J., Lefever C., Saylor M.K., Enguñados R., Weran N., et al. Steam explosion pretreatment of wheat straw to improve methane yields: Investigation of the degradation kinetics of structural compounds during anaerobic digestion. *Bioresource Technology*. 2015;179:299-305. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.12.008.
20. Chen H.-Z., Liu Z.-H. Steam explosion and its combinatorial pretreatment refining technology of plant biomass to bio-based products. *Biotechnology Journal*. 2015;10(6):866-885. DOI: 10.1002/biot.201400705.
21. Larnaudie V., Ferrari M.D., Lareo C. Life cycle assessment of ethanol produced in a biorefinery from liquid hot water pretreated switchgrass. *Renewable Energy*. 2021;176:606-616. DOI: 10.1016/j.renene.2021.05.094.
22. Jiang W., Chang S., Li H., Oleskowicz-Popiel P., Xu J. Liquid hot water pretreatment on different parts of cotton stalk to facilitate ethanol production. *Bioresource Technology*. 2015;176:175-180. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.11.023.
23. Zhao J., Xu Y., Wang W., Griffin J., Wang D. Conversion of liquid hot water, acid and alkali pretreated industrial hemp biomasses to bioethanol. *Bioresource Technology*. 2020;309:123383. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.123383.
24. Toscan A., Fontana R.C., Camassola M., Dillon A.J.P. Comparison of liquid hot water and saturated steam pretreatments to evaluate the enzymatic hydrolysis yield of elephant grass. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2024;14:8057-8070. DOI: 10.1007/s13399-022-02939-7.
25. Kim J.-H., Choi J.-H., Kim J.-C., Jang S.-K., Kwak H.W., Koo B., et al. Production of succinic acid from liquid hot water hydrolysate derived from *Quercus mongolica*. *Biomass and Bioenergy*. 2021;150:106103. DOI: 10.1016/j.biombioe.2021.106103.
26. Sahay S. Impact of pretreatment technologies for biomass to biofuel production. In: Srivastava N., Srivastava M., Mishra P.K., Gupta V.K. (eds). *Substrate*

analysis for effective biofuels production. Singapore: Springer; 2020, p. 173-216. DOI: 10.1007/978-981-32-9607-7_7.

27. Ko J.K., Kim Y., Ximenes E., Ladisch M.R. Effect of liquid hot water pretreatment severity on properties of hardwood lignin and enzymatic hydrolysis of cellulose. *Biotechnology and Bioengineering*. 2015;112(2):252-262. DOI: 10.1002/bit.25349.

28. Wang W., Zhu Y., Du J., Yang Y., Jin Y. Influence of lignin addition on the enzymatic digestibility of pretreated lignocellulosic biomasses. *Bioresource Technology*. 2015;181:7-12. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.01.026.

29. Shang G., Zhang C., Wang F., Qiu L., Guo X., Xu F. Liquid hot water pretreatment to enhance the anaerobic digestion of wheat straw – effects of temperature and retention time. *Environmental Science and Pollution Research*. 2019;26:29424-29434. DOI: 10.1007/s11356-019-06111-z.

30. Varongchayakul S., Songkasiri W., Chaiprasert P. Optimization of cassava pulp pretreatment by liquid hot water for biomethane production. *Bioenergy Research*. 2021;14:1312-1327. DOI: 10.1007/s12155-020-10238-0.

31. Antonopoulou G., Papadopoulou K., Alexandropoulou M., Lyberatos G. Liquid hot water treatment of woody biomass at different temperatures: the effect on composition and energy production in the form of gaseous biofuels. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 2024;38:101485. DOI: 10.1016/j.scp.2024.101485.

32. Mosier N., Hendrickson R., Ho N., Sedlak M., Ladisch M.R. Optimization of pH controlled liquid hot water pretreatment of corn stover. *Bioresource Technology*. 2005;96(18):1986-1993. DOI: 10.1016/j.biortech.2005.01.013.

33. Kim Y., Hendrickson R., Mosier N.S., Ladisch M.R. Liquid hot water pretreatment of cellulosic biomass. In: Mielenz J.R. (ed.). *Biofuels. Methods and Protocols*. Totowa: Humana; 2009, p. 93-102. DOI: 10.1007/978-1-60761-214-8_7.

34. Li H.-Q., Jiang W., Jia J.-X., Xu J. pH pre-corrected liquid hot water pretreatment on corn stover with high hemicellulose recovery and low inhibitors formation. *Bioresource Technology*. 2014;153:292-299. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.11.089.

35. Kim Y., Mosier N.S., Ladisch M.R. Enzymatic digestion of liquid hot water pretreated hybrid poplar. *Biotechnology Progress*. 2009;25(2):340-348. DOI: 10.1002/btpr.137.

36. Vallejos M.E., Zambon M.D., Area M.C., da Silva Curvelo A.A. Low liquid-solid ratio (LSR) hot water pretreatment of sugarcane bagasse. *Green Chemistry*. 2012;14(7):1982-1989. DOI: 10.1039/C2GC35397K.

37. Serna-Loaiza S., Dias M., Daza-Serna L., de Carvalho C.C.C.R., Friedl A. Integral analysis of liquid-hot-water pretreatment of wheat straw: evaluation of the production of sugars, degradation products, and lignin. *Sustainability*. 2021;14(1):362. DOI: 10.3390/su14010362.

38. Kim Y., Kreke T., Mosier N.S., Ladisch M.R. Severity factor coefficients for subcritical liquid hot water pretreatment of hardwood chips. *Biotechnology and Bioengineering*. 2014;111(2):254-263. DOI: 10.1002/bit.25009.

39. Yu Q., Zhuang X., Yuan Z., Wang Q., Qi W., Wang W., et al. Two-step liquid hot water pretreatment of *Eucalyptus grandis* to enhance sugar recovery and enzymatic digestibility of cellulose. *Bioresource Technology*. 2010;101(13):4895-4899. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.11.051.

40. Ladeira Ázar R.I.S., Bordignon-Junior S.E., Laufer C., Specht J., Ferrier D., Kim D. Effect of lignin content on cellulosic saccharification of liquid hot water pretreated sugarcane bagasse. *Molecules*. 2020;25(3):623. DOI: 10.3390/molecules25030623.

41. Van Walsum G.P., Allen S.G., Spencer M.J., Laser M.S., Antal Jr. M.J., Lynd L.R. Conversion of lignocellulosics pretreated with liquid hot water to ethanol. In: *Conversion of Lignocellulosics Pretreated with Liquid Hot Water to Ethanol: Seventeenth Symposium on Biotechnology for Fuels and Chemicals*. Totowa: Humana Press; 1996, p. 157-170. DOI: 10.1007/978-1-4612-0223-3_14.

42. Machineni L. Lignocellulosic biofuel production: review of alternatives. *Biomass Conversion and Biorefinery*. 2020;10:779-791. DOI: 10.1007/s13399-019-00445-x.

43. Ali N., Zhang Q., Liu Z.-Y., Li F.-L., Lu M., Fang X.-C. Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic materials for bio-based products. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2020;104:455-473. DOI: 10.1007/s00253-019-10158-w.

44. Alvira P., Tomas-Pejo E., Ballesteros M., Negro M.J. Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: a review. *Bioresource Technology*. 2010;101(13):4851-4861. DOI: 10.1016/j.biortech.2009.11.093.

45. Chen H. *Lignocellulose biorefinery engineering: principles and applications*. Sawston: Woodhead Publishing; 2015, 274 p.

46. Haldar D., Purkait M.K. Lignocellulosic conversion into value-added products: a review. *Process Biochemistry*. 2020;89:110-133. DOI: 10.1016/j.procbio.2019.10.001.

47. Volynets B., Ein-Mozaffari F., Dahman Y. Biomass processing into ethanol: pretreatment, enzymatic hydrolysis, fermentation, rheology, and mixing. *Green Processing and Synthesis*. 2017;6(1):1-22. DOI: 10.1515/gps-2016-0017.

48. Smichi N., Messaoudi Y., Allaf K., Gargouri M. Steam explosion (SE) and instant controlled pressure drop (DIC) as thermo-hydro-mechanical pretreatment methods for bioethanol production. *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2020;43:945-957. DOI: 10.1007/s00449-020-02297-6.

49. Liu Z.-H., Chen H.-Z. Xylose production from corn stover biomass by steam explosion combined with enzymatic digestibility. *Bioresource Technology*. 2015;193:345-356. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.06.114.

50. Sun X.F., Xu F., Sun R.C., Geng Z.C., Fowler P., Baird M.S. Characteristics of degraded hemicellulosic polymers obtained from steam exploded wheat straw. *Carbohydrate Polymers*. 2005;60(1):15-26. DOI: 10.1016/j.carbpol.2004.11.012.

51. Chen H., Sui W. Steam explosion as a hydrothermal pretreatment in the biorefinery concept. In: Ruiz H.A., Thomsen M.H., Trajano H.L. (eds). *Hydrothermal processing in biorefineries*. Cham: Springer; 2017, p. 317-332. DOI: 10.1007/978-3-319-56457-9_12.

52. Wojtasz-Mucha J., Hasani M., Theliander H. Hydrothermal pretreatment of wood by mild steam explosion and hot water extraction. *Bioresource Technology*. 2017;241:120-126. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.05.061.

53. Adapa P., Tabil L., Schoenau G. Grinding performance and physical properties of non-treated and steam exploded barley, canola, oat and wheat straw. *Biomass and Bioenergy*. 2011;35(1):549-561. DOI: 10.1016/j.biombioe.2010.10.004.

54. Capolupo L., Faraco V. Green methods of lignocellulose pretreatment for biorefinery development. *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2016;100:9451-9467. DOI: 10.1007/s00253-016-7884-y.
55. Negro M.J., Álvarez C., Doménech P., Iglesias R., Ballesteros I. Sugars production from municipal forestry and greening wastes pretreated by an integrated steam explosion-based process. *Energies*. 2020;13(17):4432. DOI: 10.3390/en13174432.
56. Marques F.P., Silva L.M.A., Lomonaco D., de Freitas Rosa M., Leitão R.C. Steam explosion pretreatment to obtain eco-friendly building blocks from oil palm mesocarp fiber. *Industrial Crops and Products*. 2020;143:111907. DOI: 10.1016/j.indcrop.2019.111907.
57. Cantarella M., Cantarella L., Gallifuoco A., Spera A., Alfani F. Effect of inhibitors released during steam-explosion treatment of poplar wood on subsequent enzymatic hydrolysis and SSF. *Biotechnology Progress*. 2004;20(1):200-206. DOI: 10.1021/bp0257978.
58. Morales P., Gentina J.C., Aroca G., Mussatto S.I. Development of an acetic acid tolerant *Spathaspora passalidarum* strain through evolutionary engineering with resistance to inhibitors compounds of autohydrolysate of *Eucalyptus globulus*. *Industrial crops and Products*. 2017;106:5-11. DOI: 10.1016/j.indcrop.2016.12.023.
59. Sarker T.R., Pattnaik F., Nanda S., Dalai A.K., Meda V., Naik S. Hydrothermal pretreatment technologies for lignocellulosic biomass: a review of steam explosion and subcritical water hydrolysis. *Chemosphere*. 2021;284:131372. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131372.
60. Jacquet N., Maniet G., Vanderghem C., Delvigne F., Richel A. Application of steam explosion as pretreatment on lignocellulosic material: a review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2015;54(10):2593-2598. DOI: 10.1021/ie503151g.
61. Alvira P., Negro M.J., Ballesteros I., González A., Ballesteros M. Steam explosion for wheat straw pretreatment for sugars production. *Bioethanol*. 2016;2(1):66-75. DOI: 10.1515/bioeth-2016-0003.
62. Horn S.J., Nguyen Q.D., Westereng B., Nilsen P.J., Eijssink V.G.H. Screening of steam explosion conditions for glucose production from non-impregnated wheat straw. *Biomass and Bioenergy*. 2011;35(12):4879-4886. DOI: 10.1016/j.biombioe.2011.10.013.
63. Baral N.R., Shah A. Comparative techno-economic analysis of steam explosion, dilute sulfuric acid, ammonia fiber explosion and biological pretreatments of corn stover. *Bioresource Technology*. 2017;232:331-343. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.02.068.
64. Singh J., Suhag M., Dhaka A. Augmented digestion of lignocellulose by steam explosion, acid and alkaline pretreatment methods: a review. *Carbohydrate Polymers*. 2015;117:624-631. DOI: 10.1016/j.carbpol.2014.10.012.
65. Kumar A., Anushree, Kumar J., Bhaskar T. Utilization of lignin: a sustainable and eco-friendly approach. *Journal of the Energy Institute*. 2020;93(1):235-271. DOI: 10.1016/j.joei.2019.03.005.
66. Vidal Jr. B.C. Dien B.S., Ting K.C., Singh V. Influence of feedstock particle size on lignocellulose conversion – a review. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2011;164:1405-1421. DOI: 10.1007/s12010-011-9221-3.
67. Hoang A.T., Nguyen, X.P., Duong X.Q., Ağbulut Ü., Len C., Nguyen P.Q.P., et al. Steam explosion as sustainable biomass pretreatment technique for biofuel production: characteristics and challenges. *Bioresource Technology*. 2023;385:129398. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.129398.
68. DeMartini J.D., Foston M., Meng X., Jung S., Kumar R., Ragauskas A.J., et al. How chip size impacts steam pretreatment effectiveness for biological conversion of poplar wood into fermentable sugars. *Biotechnology for Biofuels*. 2015;8:209. DOI: 10.1186/s13068-015-0373-1.
69. Liu Z.-H., Qin L., Pang F., Jin M.-J., Li B.-Z., Kang Y., et al. Effects of biomass particle size on steam explosion pretreatment performance for improving the enzyme digestibility of corn stover. *Industrial Crops and Products*. 2013;44:176-184. DOI: 10.1016/j.indcrop.2012.11.009.
70. Pitarello A.P., da Silva T.A., Peralta-Zamora P.G., Ramos L.P. Effect of moisture content in the steam treatment and enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse. *Química Nova*. 2012;35(8):1502-1509. DOI: 10.1590/S0100-40422012000800003.
71. Yu Z., Zhang B., Yu F., Xu G., Song A. A real explosion: the requirement of steam explosion pretreatment. *Bioresource Technology*. 2012;121:335-341. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.06.055.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Гладышева Евгения Константиновна,
к.т.н., научный сотрудник,
Институт проблем химико-энергетических
технологий СО РАН,
659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1,
Российская Федерация,
evg-gladysheva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6567-9662>

Вклад автора

Автор выполнил исследовательскую работу,
на основании полученных результатов
провел обобщение, подготовил рукопись
к печати.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Evgenia K. Gladysheva,
Cand. Sci. (Engineering), Researcher,
Institute for Problems of Chemical
and Energetic Technologies SB RAS,
1, Sotsialisticheskaya St., Biysk, 659322,
Russian Federation,
evg-gladysheva@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-6567-9662>

Contribution of the author

The author performed the research, made
a generalization on the basis of the results
obtained and prepared the manuscript
for publication.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Автор прочел и одобрил окончательный вариант рукописи.

Conflict interests

Author declares no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by the author.

Информация о статье

Поступила в редакцию 08.05.2024.
Одобрена после рецензирования 05.06.2024.
Принята к публикации 15.06.2024.

Information about the article

The article was submitted 08.05.2024.
Approved after reviewing 05.06.2024.
Accepted for publication 15.06.2024.