

Анализ текущего состояния и технологий конверсии лигноцеллюлозных материалов

Г.Е. Ергазиева^{1,2*}, М.М. Мамбетова^{1,2}, К.С. Бекбаев², А. Төлеуғазықызы^{2,3}, А.Е. Даниярова²

¹ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

² Университет имени Шакарима города Семей, ул. Глинки, 20 А, Семей, Казахстан

³ Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина,
пр. Жеңіс, 62, Астана, Казахстан

АННОТАЦИЯ

Лигноцеллюлозные материалы представляют собой перспективное сырье для получения разнообразных ценных продуктов, таких как биотопливо, химические соединения и материалы. В данной обзорной статье представлены основные аспекты их преобразования, включая состав и источники лигноцеллюлозы, современные технологии предварительной обработки и конечные продукты. Обсуждаются преимущества и недостатки различных подходов к обработке, таких как физические, химические и биологические методы, а также их влияние на эффективность и экологическую устойчивость процессов. Статья подчеркивает ключевые вызовы и перспективы развития технологий конверсии лигноцеллюлозных материалов, что делает ее актуальной для исследователей и разработчиков в области зеленой химии и устойчивого развития.

Ключевые слова: лигноцеллюлоза, биомасса, биоконверсия, биотопливо

1. Введение

В последние десятилетия все больше внимания уделяется разработке и применению технологий биоконверсии для утилизации лигноцеллюлозных побочных продуктов и отходов производства и потребления [1-3]. Эти материалы содержат большое количество ценных компонентов, которые могут быть использованы для производства биотоплива, химических веществ и других продуктов [4, 5].

Биоконверсия – это процесс, при котором органические материалы, такие как древесина, биомасса или пищевые отходы, преобразуются в ценные продукты с использованием биологических микроорганизмов или ферментов. Этот процесс имеет множество преимуществ, включая более низкие затраты энергии, меньшее количество отходов и более экологичное производство. Лигноцеллюлозные материалы являются основным

источником обновляемого углерода на Земле и их эффективное использование может значительно уменьшить зависимость от нефти и других нефтепродуктов [6].

Технологии биоконверсии уже широко применяются в промышленности для производства биотоплива, биопластиков, биохимикатов и других продуктов. Однако все еще существует много проблем, связанных с экономической эффективностью, оптимизацией процессов и выбором наилучших микроорганизмов и ферментов.

Дальнейшее исследование и развитие технологий биоконверсии помогут улучшить эффективность процессов, уменьшить затраты и создать новые возможности для утилизации органических отходов. Также важно продолжать изучать потенциал биоконверсии для уменьшения негативного воздействия производства, потребления на окружающую среду и решения глобальных проблем, таких как изменение климата [7].

В данной статье рассмотрены основные аспекты биоконверсии лигноцеллюлозных материалов, а также существующие технологии и методы их переработки.

*Ответственный автор

E-mail: ergazieva_g@mail.ru

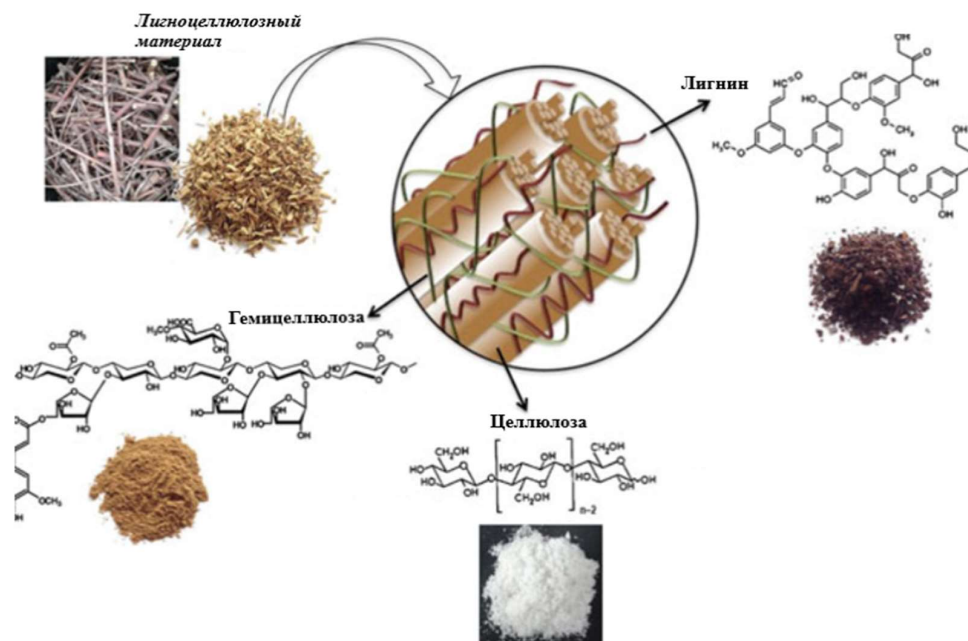


Рис.1. Структура клеточной стенки растений.

2.1 Лигноцеллюлозные материалы: состав и источники

Лигноцеллюлоза – это материал, который составляет основную часть клеточных стенок растений и состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина (рис. 1). Целлюлоза и гемицеллюлоза тесно связаны с лигнином посредством ковалентных и водородных связей, что делает структуру очень сложной и прочной.

Другие компоненты, такие как пектин, белки, липиды и зола, также содержатся в этих материалах, но в меньшем количестве. Целлюлоза, гемицеллюлоза и лигнин в основном присутствуют во вторичной клеточной стенке растений. В целом клеточная стенка растений состоит из отдельных слоев, каждый из которых содержит различные компоненты, которые значительно отличаются друг от друга. Первичная клеточная стенка обычно очень тонкая и ее основными компонентами являются полисахариды: микрофибриллы целлюлозы, большое количество замещенных полисахаридов (различные гемицеллюлозы) и пектины. Вторичная клеточная стенка составляет большую часть клеточной стенки и обычно толще других частей; кроме того, она содержит полисахариды, включая большую часть микрофибрилл целлюлозы и различные гемицеллюлозы [8, 9].

В таблице 1 представлены некоторые примеры лигноцеллюлозных материалов и их состав. Важно подчеркнуть, что химический состав этих материалов значительно зависит от их источников.

Из таблицы 1 видно, что лигноцеллюлозные

материалы в целом состоят из 30-50% целлюлозы, 15-35% гемицеллюлозы и 10-25% лигнина. Кроме того, химический состав конкретного типа лигноцеллюлозного материала может варьироваться из-за генетической изменчивости среди различных источников, возраста растений, а также климатических и почвенных условий.

В настоящее время значительное количество отходов образуется в результате сельскохозяйственной деятельности, в основном в различных агропромышленных отраслях [20]. Эти материалы обычно классифицируются как лесные отходы, сельскохозяйственные отходы, травянистые энергетические культуры, а также муниципальные и промышленные отходы. Лесные отходы включают в себя в основном древесную биомассу, а именно древесину твердых и мягких пород, а также древесные отходы от лесозаготовок и деревообработки (например, лесопиление и производство фанеры и ДСП). Сельскохозяйственные отходы, в свою очередь, образуются в результате переработки различных сельскохозяйственных культур, таких как рис, кукуруза, пшеница, маниок, арахис, соевые бобы, сахарный тростник, джут и стебли хлопка. Энергетические травы включают многолетние растения, такие как просо прутьевидное и мискантус гигантский. Муниципальные и промышленные отходы также являются потенциальными перерабатываемыми целлюлозными материалами. Эти отходы могут происходить как из жилых, так и из нежилых источников, включая пищевые отходы и шлам бумажных фабрик.

Таблица 1. Состав лигноцеллюлозных материалов

Лигноцеллюлозные материалы	Целлюлоза (%)	Гемицеллюлоза (%)	Лигнин (%)	Ссылки
Сельскохозяйственные отходы				
Жом сахарного тростника	37,5	30,6	25,3	[10]
Кукурузный початок	35,8	30,7	18,5	[11]
Пшеничная солома	34,0	23,2	20,2	
Рисовая шелуха	36,7	20,0	21,3	[12]
Травы				
Просо прутьевидное	37,0	34,7	22,7	[13]
Мискантус	45,0	25,4	26,5	[14]
Мягкая древесина				
Сосна	41,8	22,3	3,0.1	[15]
Ель	43,8	20,8	28,8	[16]
Твердая древесина				
Тополь	46,8	16,8	23,4	[17]
Клен	41,8	26,3	27,1	[18]
Дуб	45,2	24,5	24,3	[16]
Эвкалипт	44,7	20,1	27,7	[19]

Таким образом, лигноцеллюлозные материалы, являющиеся основным компонентом клеточной стенки растений, представляют собой сложную структуру, насыщенную целлюлозой, гемицеллюлозой и лигнином. Их состав варьируется в зависимости от источника, возраста растений и условий окружающей среды, что указывает на значительное биологическое и экономическое разнообразие этих ресурсов. В условиях современных агропромышленных процессов образуется большое количество отходов, содержащих лигноцеллюлозу, что открывает перспективы их переработки и повторного использования в различных областях, таких как производство биоматериалов, биоэнергетика и сельское хозяйство. Эффективное использование этих отходов не только способствует снижению экологической нагрузки, но и развитию устойчивой экономики на основе биомассы, что делает данное направление актуальным для дальнейших исследований и практического применения.

2.2 Технологии предварительной обработки лигноцеллюлозных материалов

Одной из основных проблем в переработке лигноцеллюлозных материалов является их сложная структура, что затрудняет эффективное извлечение ценных компонентов. Для извлечения компонентов биомассы (т.е. целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина) или изменения структуры требуется предварительная обработка. Предварительная обработка является ключевым шагом

в общем процессе преодоления неподатливости биомассы. В этом процессе используется широкий спектр методологий и технологий для обнажения и разрушения лигноцеллюлозной матрицы путем удаления лигнина и гемицеллюлозы, а также декристализации целлюлозы [21-23]. Методы предварительной обработки могут быть физическими, химическими, биологическими или их комбинацией (рис. 2).

Технологии физической предварительной обработки включают механическое измельчение, импульсное электрическое поле и пиролиз. Механическое измельчение включает измельчение, шлифовку и размалывание лигноцеллюлозных материалов для уменьшения размера частиц и кристалличности целлюлозы, что, как правило, является начальным этапом обработки этих материалов. После этого биомасса готова к следующему этапу предварительной обработки [24].

Другим методом физической предварительной обработки является импульсное электрическое поле, которое предполагает применение электрических разрядов в виде импульсов к образцу, размещенному между двумя электродами. При воздействии высокоинтенсивного электрического поля в клеточных стенках растений происходят структурные изменения, что приводит к увеличению проницаемости и механическому разрыву. Предварительная обработка может создавать постоянные поры в клеточных стенках, облегчая проникновение кислот или ферментов, используемых для расщепления целлюлозы [25].



Рис. 2. Технологии предварительной обработки лигноцеллюлозных материалов.

Для предварительной обработки лигноцеллюлозных материалов также применяется пиролиз. Пиролиз проводится при температурах выше 300 °С, при которых целлюлоза быстро разлагается на газообразные продукты и остаточный уголь. При более низких температурах разложение происходит значительно медленнее, а образующиеся продукты менее летучи [26].

Что касается физико-химических методов предварительной обработки, наиболее часто используется гидротермальная обработка с паровым взрывом. Данный метод включает обработку лигноцеллюлозных материалов под давлением пара при высокой температуре в течение короткого времени, способствуя гидролизу гемицеллюлозы. В сочетании с частичным гидролизом и солюбилизацией гемицеллюлозы лигнин перераспределяется и частично удаляется из лигноцеллюлозных материалов, что увеличивает доступность целлюлозы.

В качестве предварительной обработки также применяется метод катализированного парового взрыва. Этот метод включает добавление кислоты, что улучшает гидролиз и приводит к полному удалению гемицеллюлозной фракции. В результате уменьшается образование ингибирующих соединений, особенно при использовании более низких температур [27, 28].

Подобно паровому взрыву, обработка горячей водой или автогидролиз вызывают солюбилизацию гемицеллюлозы в жидкой фракции. Процесс катализируется уксусной кислотой, высвобождаемой из ацетильных групп и других кислотных

компонентов гемицеллюлозы, а также ионами гидроксония, образующимися *in situ* в результате автоионизации воды. При этой обработке не происходит быстрой декомпрессии и во время процесса лигнин перемещается на поверхность лигноцеллюлозных материалов, что делает целлюлозу более доступной [29]. Образование продуктов распада можно предотвратить, контролируя pH в диапазоне от 4 до 7 [30].

Следующие две предварительные обработки можно также считать физико-химическими, поскольку часто задействованы как тепловые, так и нетепловые эффекты. Микроволны являются альтернативным источником нагрева, который состоит из быстрой доставки энергии ко всему объему и последующего быстрого нагрева лигноцеллюлозной структуры, ускоряя, таким образом, солюбилизацию соединений [31, 32]. Они использовались в сочетании с другими химическими предварительными обработками (предварительная обработка с помощью микроволн), например, водным глицерином или щелочным глицерином [33], и щелочной предварительной обработкой [34]. С другой стороны, ультразвук создает перепады давления в растворе для усиления физических и химических процессов. Сочетание ультразвука с традиционными методами может использоваться для повышения производительности предварительной обработки [35-40].

Наиболее распространенным химическим процессом, используемым при предварительной обработке лигноцеллюлозных материалов, является химический гидролиз. В химическом гидролизе

преимущественно применяются кислоты. Серная кислота является наиболее изученной в химическом гидролизе, хотя используются и другие кислоты. Химический гидролиз с использованием кислоты можно разделить на две группы: гидролиз концентрированной кислотой и разбавленной кислотой. Сравнение методов приведено в таблице 2.

Как видно из таблицы, гидролиз разбавленной кислотой протекает в менее жестких условиях, чем гидролиз концентрированной кислотой. Гидролиз разбавленной кислотой происходит при коротком времени выдерживания. Обычно более короткое время пребывания в реакторе и более высокие температуры предварительной обработки приводят к более высокому выходу извлечения растворимой ксилоты и ферментативной усвояемости целлюлозы.

Щелочной гидролиз – это еще одна химическая предварительная обработка, которая использует щелочные растворы для обработки лигноцеллюлозных материалов с целью удаления лигнина и части гемицеллюлозы и повышения доступности целлюлозы. Это процесс делигнификации, в котором также растворяется значительное количество гемицеллюлозы. В результате данного процесса улучшается качество целлюлозы, что делает ее более пригодной для дальнейшей переработки в целлюлозно-бумажной промышленности и других отраслях [41-45]. При щелочном гидролизе используются различные щелочные реагенты, такие как натрий гидроксид или карбонат, которые помогают разрушать связи между лигнином, гемицеллюлозой и целлюлозой. Этот метод требует контроля температуры, времени воздействия и концентрации щелочи для обеспечения оптимальных условий для удаления нежелательных компонентов, сохраняя при этом целлюлозу в желаемом количестве и качестве. Преимущества щелочного гидролиза включают более низкую стоимость по сравнению с другими методами делигнификации,

а также возможность применения различных видов лигноцеллюлозных сырьевых материалов. Однако важно учитывать, что этот процесс может снижать выход конечного продукта, если будет нарушен баланс между удалением лигнина и сохранением целлюлозы [46-50].

Озонолиз включает использование озонowego газа, мощного окислителя, растворимого в воде и легкодоступного, для расщепления лигнина и гемицеллюлозы и повышения биоразлагаемости целлюлозы. Он очень реактивен по отношению к сопряженным двойным связям и функциональным группам с высокой электронной плотностью, таким как лигнин. Озон воздействует на лигнин, высвобождая растворимые соединения с низкой молекулярной массой, такие как органические кислоты, что может вызвать резкое снижение pH [51-56].

Другой возможностью обработки лигноцеллюлозных материалов является биологическая предварительная обработка. Она включает использование микроорганизмов, разрушающих древесину, таких как грибы бурой, белой и мягкой гнили, для расщепления лигнина и растворения гемицеллюлозы и очень небольших количеств целлюлозы. Разложение лигнина грибами белой гнили (например, *Phanerochaete chrysosporium*), наиболее эффективными базидиомицетами для биологической предварительной обработки лигноцеллюлозных материалов, происходит под действием ферментов, разрушающих лигнин, таких как пероксидазы и лакказы [57-60].

Таким образом, анализ литературы по технологиям предварительной обработки лигноцеллюлозных материалов показывает, что каждая из рассмотренных методик – физическая, химическая, физико-химическая и биологическая имеет свои преимущества и недостатки, которые определяют ее эффективность в зависимости от конкретных условий и целей переработки. Физи-

Таблица 2. Сравнение методов химического гидролиза кислотами

Метод химического гидролиза	Преимущества	Недостатки
Концентрированной кислотой	- происходит при низкой температуре	- высокое потребление кислоты - коррозия оборудования - высокое потребление энергии для регенерации кислоты - более длительное время реакции
Разбавленной кислотой	- короткое время выдерживания - низкая концентрация кислоты	- воздействие при высокой температуре - коррозия оборудования - образование нежелательных побочных продуктов

ческая обработка, как правило, включает механическое измельчение и термическое воздействие, что позволяет значительно увеличить доступность целлюлозы, однако имеет ограниченные возможности в отношении разрушения сложных лигноцеллюлозных соединений. Химические методы, например, использование кислот, щелочей и растворителей, продемонстрировали высокую эффективность в расщеплении лигнина и увеличении выхода целлюлозы, но могут приводить к ухудшению качества конечного продукта и выбросам вредных веществ.

Физико-химическая обработка объединяет преимущества как физических, так и химических методов, обеспечивая более глубокое разрушение структуры лигноцеллюлозных материалов, что повысит выход целлюлозы при минимизации негативных последствий. Биологическая обработка, основанная на действиях микроорганизмов, является экологически чистым способом, но ее эффективность может быть снижена из-за длительных сроков процессирования и специфических условий, необходимых для роста микроорганизмов.

Анализ показал, что комбинированные методы предварительной обработки демонстрируют наибольшую эффективность. Например, сочетание физико-химических и биологических подходов позволит снизить потребление химических реагентов и уменьшить количество токсичных отходов, сохраняя при этом высокие показатели выхода целлюлозы. Такой интегрированный подход может обеспечить более полное освобождение целлюлозы от лигнина, а также улучшить свойства конечного продукта. Комбинирование различных технологий предварительной обработки лигноцеллюлозных материалов представляется наиболее перспективным направлением, способствующим оптимизации процессов переработки и получения высококачественных целлюлозосодержащих продуктов, что является важным шагом в направлении устойчивого и экологически чистого производства.

3. Продукты, получаемые из лигноцеллюлозных материалов

Технологии переработки лигноцеллюлозных материалов находят применение в различных отраслях благодаря их доступности (древесина, солома, шелуха зерновых культур, отходы бумажной и деревообрабатывающей промышленности) и высокой экологической ценности. Такие технологии находят практическое применение в производстве биотоплива, химических соедине-

ний, биокomпозитов, биоудобрений, фильтрующих материалов, кормовых добавок, текстиля и других продуктов.

Технологии переработки лигноцеллюлозных материалов можно условно разделить на два основных метода, которые включают термохимическую и биохимическую конверсии (рис. 3). Термохимический метод основан на воздействии высоких температур, давления и химических реагентов, что приводит к разрушению сложных структур биомассы и преобразованию ее компонентов в ценные продукты, такие как биоуголь или жидкие биотоплива. В свою очередь, биохимическая переработка подразумевает использование ферментов или микроорганизмов для разложения биомассы на простые сахара, которые затем могут быть превращены в биоэтанол, биогаз или другие биопродукты. Каждый из методов имеет свои преимущества, ограничения и области применения, что позволяет выбрать оптимальный подход в зависимости от типа сырья и конечных целей переработки.

Методы переработки лигноцеллюлозных материалов направлены на эффективное использование ее основных компонентов – целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина – для получения различных ценных продуктов.

Лигнин обладает сложной химической структурой, содержащей различные реакционноспособные группы, включая фенольные, карбоксильные и метоксильные фрагменты. Благодаря этим характеристикам он представляет собой многофункциональный материал, который можно использовать в создании биоразлагаемых гидрогелей для различных приложений [61-70]. Существует множество методов фракционирования лигнина, но эффективные стратегии фракционирования лигнина имеют преимущества по сравнению с другими методами [71]. В последние годы гидрогели, полученные на основе лигнина, привлекают все большее внимание в области очистки сточных вод от органических красителей. Это связано с их способностью эффективно удалять как катионные, так и анионные загрязнители.

В работе [72] авторами был предложен инновационный подход к созданию амин-функционализированного лигнин-основного гидрогеля, предназначенного для селективного удаления ионных красителей из водных растворов. Для синтеза гидрогеля использовали лигнин и разветвленный полиэтиленмин с добавлением диглицидилового эфира полиэтиленгликоля в качестве сшивающего агента. Такая комбинация обеспечи-

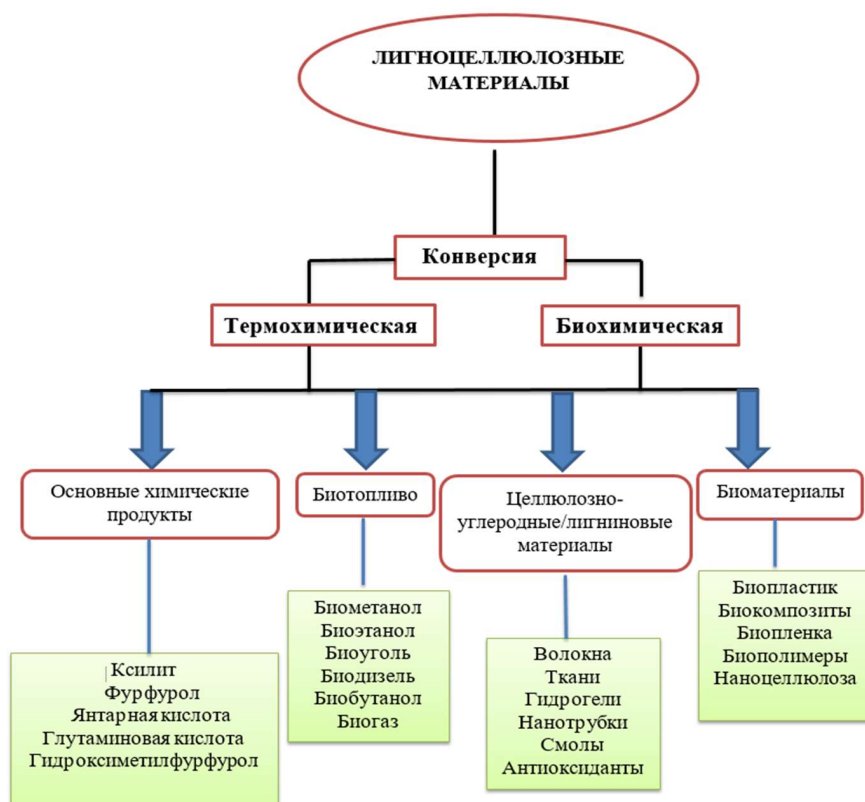


Рис. 3. Методы переработки лигноцеллюлозных материалов и продукты, получаемые в результате.

ла формирование трехмерной сетевой структуры, обладающей высокой химической стабильностью, улучшенными механическими свойствами и высокой адсорбционной способностью. Гидрогель продемонстрировал значительную эффективность в удалении катионного метиленового синего (МС) и анионного метилового оранжевого (МО). При этом максимальная адсорбционная способность к МО составила 930 мг/г, что свидетельствует о его пригодности для применения в масштабируемых системах очистки сточных вод. Результаты исследования показали, что процесс адсорбции МО соответствует псевдо-второму порядку кинетической модели и модели изотермы Лэнгмюра, подтверждая хемосорбционный механизм. Кроме того, лигнин-основной гидрогель продемонстрировал устойчивость к многократным циклам адсорбции и десорбции, сохраняя эффективность даже после 10 циклов.

В работе [73] изучены гидрогели на основе лигнина, извлеченного из миндальной и грецкой скорлупы, с акцентом на влияние метода извлечения и предварительной обработки на свойства материалов. Лигнин, полученный щелочным и органосолевым методами, использовали для синтеза гидрогелей с поливиниловым спиртом через циклы замораживания-оттаивания. Авторы про-

демонстрировали, что предварительная гидро-термическая обработка лигнина улучшает его чистоту и способствует повышению механической прочности гидрогелей. Авторами также исследовалась возможность применения гидрогелей для адсорбции метиленового синего из водных растворов. Было показано, что гидрогели эффективно удаляют до 93% метиленового синего, что подтверждает их пригодность для очистки воды. Кроме того, гидрогели проявили антигрибковые свойства против *Aspergillus niger*, что подчеркивает их потенциал для использования в упаковке пищевых продуктов.

Также существуют исследования, в которых разработаны биокомпозитные гидрогели. Preet и его коллеги [74] разработали биокомпозитные гидрогели, синтезированные из лигнина, хитозана и хондроитинсульфата, с использованием поливинилового спирта в качестве эмульгатора. Для усиления функциональных свойств гидрогели были модифицированы окситетрациклином, что обеспечило их антибактериальную активность и способность к контролируемому высвобождению активных веществ. Полученные гидрогели были охарактеризованы с помощью FTIR, DSC и SEM, что подтвердило равномерное включение антибиотика и однородность структуры. Экспе-

рименты показали, что высвобождение окситетрациклина зависело от pH среды: при pH 7,4 оно достигало 25%, а при pH 4 снижалось до 13%. Это делает гидрогели особенно перспективными для пролонгированного действия в средах с переменной кислотностью, таких как биологические ткани. Дополнительно установлено, что гидрогели обладают высокой биосовместимостью, не вызывают гемолитической активности и безопасны для клеток фибробластов. Способность стимулировать миграцию клеток подчеркивает их потенциал для регенеративной медицины, включая лечение ран. Антибактериальные тесты показали их высокую эффективность против патогенов, таких как *Staphylococcus aureus* и *Escherichia coli*.

В исследовании [75] авторы разработали гидрогель, состоящий из поливинилового спирта, хитозана и сульфонированного лигнина, с целью изучения его механических характеристик, антиоксидантной активности и способности к контролируемому высвобождению веществ. Синтезированный гидрогель показал высокую механическую прочность за счет нековалентных взаимодействий, таких как водородные связи и электростатические взаимодействия между компонентами. Прочность на разрыв достигала 36 кПа, а сжимаемость составляла до 900 кПа, что превосходит показатели аналогичных гидрогелей без добавления лигнина. Авторами было показано, что лигнин обеспечивает контролируемое высвобождение веществ при изменении pH среды, что делает гидрогель подходящим для применения в медицинских системах. Биосовместимость гидрогеля и его антиоксидантная активность подтверждены нейтрализацией активных форм кислорода и ингибированием роста бактерий, включая *Staphylococcus aureus*. Дополнительное введение эпигаллокатехин галлата усилило антиоксидантные свойства гидрогеля и продемонстрировало возможность создания материалов с синергетическим эффектом.

Hwang и др. [76] синтезировали гидрогели на основе окисленного лигнина. Для получения материалов, обладающих высокой гидрофильностью и абсорбционной способностью, лигнин подвергали окислению, приводившему к увеличению содержания карбоксильных групп и разрушению ароматических колец. Полученные гидрофильные лигниновые материалы использовали для синтеза гидрогелей путем полимеризации и химического сшивания. Результаты показали, что гидрогели продемонстрировали высокую способность к набуханию, достигая до 2400% увеличе-

ния объема, и могли повторно использоваться в нескольких циклах абсорбции и сушки воды без значительных потерь эффективности. Использование материалов с разными уровнями перекрестного сшивания позволило достичь регулируемых механических свойств, таких как модуль упругости и степень растяжения до разрушения. Гидрогели на основе окисленного лигнина показали значительный потенциал для применения в качестве суперсорбентов в сельском хозяйстве, потребительских товаров и других областях, где необходимы высокоабсорбирующие материалы.

Разработка гидрогелей для гибкой электроники и носимых устройств открывает широкие возможности для создания экологически чистых и высокоэффективных сенсорных систем, подчеркивая значимость лигносульфоната как устойчивого и биоразлагаемого материала. Например, в исследовании [77] был предложен подход к созданию гидрогелей, основанных на лигносульфонате и акриловой кислоте, с использованием радикальной полимеризации. Аммоний персульфат применялся как инициатор, а метилен-бис-акриламид выступал в роли сшивающего агента. Разработанные гидрогели продемонстрировали высокую растяжимость до 525,1% и сжимаемость – до 95%, что обусловлено прочными водородными связями и оптимизированной химической структурой. Уникальные адгезивные свойства материала позволили ему прочно сцепляться с различными поверхностями, такими как нержавеющая сталь, оргстекло и бумага, достигая адгезии до 307 кПа. Особое внимание уделено высокой ионной проводимости гидрогелей, что позволило использовать их в качестве гибких сенсоров. Экспериментально было показано, что сопротивление гидрогелей изменяется при растяжении или сжатии, что иллюстрируется изменением яркости светодиодного индикатора в ходе испытаний.

Таким образом, гидрогели на основе лигнина демонстрируют широкий потенциал применения, включая очистку сточных вод, медицинские системы, упаковку пищевых продуктов и гибкую электронику благодаря своей биоразлагаемости, высокой адсорбционной способности, регулируемым механическим свойствам и возможности функциональной модификации.

Наноцеллюлоза представляет собой уникальный материал на основе целлюлозы с нанометровыми размерами по ширине. Ее основные категории включают нанокристаллы целлюлозы и нанофибриллы целлюлозы. Нанокристаллическая целлюлоза формируется путем кислотного

гидролиза аморфных областей и характеризуется высокой кристалличностью, что обеспечивает ее выдающиеся механические свойства [78, 79]. Размеры нанокристаллической целлюлозы варьируются от 5 до 20 нм в ширину и менее 200 нм в длину. Нановолокна целлюлозы имеют ширину от 3 до 50 нм и длину до 1 мкм, сочетая кристаллические и аморфные области, что определяет их уникальные физико-химические свойства [80-82].

Ключевыми преимуществами наноцеллюлозы являются экологическая безопасность, нетоксичность, легкость, стабильность размеров, высокая термическая устойчивость, биоразлагаемость и возможность переработки [83]. Эти свойства определяют ее широкую востребованность в различных отраслях, таких как строительство, производство пластмасс, бумаги, пищевой промышленности, автомобилестроение и создание нанокompозитов, где наноцеллюлоза используется как добавка для улучшения прочности материалов. Также она активно исследуется как компонент пищевых добавок и специализированных материалов, предлагая инновационные решения для новых технологий. Помимо этого, наноцеллюлоза имеет перспективы в медицине, косметике, фармацевтической промышленности, органических светодиодах, фотонных пленках, перерабатываемой электронике и технологиях 3D-печати [84]. Ее превосходные фотонные и электрические свойства делают ее важным инструментом для развития данных направлений. На международном уровне усилия исследователей сосредоточены на получении наноцеллюлозы из лигноцеллюлозных биомасс, таких как древесина, сельскохозяйственные отходы (солома, тростник, кукурузные стебли) и растительные волокна. Однако процесс ее получения сопряжен с рядом технических и экономических сложностей, включая удаление лигнина, высокую стоимость предобработки и необходимость разработки экологически чистых методов. Несмотря на это, недавние достижения в области технологии позволяют оптимизировать процессы и расширить применение наноцеллюлозы. Согласно прогнозам, объем мирового рынка наноцеллюлозы достигнет 2 млрд долларов США к 2030 году при среднем годовом приросте 21,9% [85].

Наноцеллюлоза активно используется в создании экологически чистых сенсоров. В исследовании [86] была рассмотрена возможность применения целлюлозных нановолокон, полученных из рисовой шелухи, для разработки сенсоров, способных обнаруживать растворимые в воде газы. Экстракция целлюлозного нановолокна

проводилась с использованием ТЕМПО-окисления и ультразвуковой обработки, что обеспечило высокую степень дисперсии материала и наличие карбоксильных групп на поверхности. Для повышения функциональности материала был использован глицерин, который увеличил концентрацию гидроксильных групп и улучшил электропроводность сенсоров. Сенсоры на основе ТЕМПО-окисленных нановолокон с глицерином показали высокую чувствительность к таким газам, как аммиак, ацетон, метан и сероводород. Минимальный предел обнаружения составил 1-5 ppm, а время отклика и восстановления (1,45 и 3,39 минуты, соответственно) было значительно быстрее, чем у стандартных нановолокон целлюлозных сенсоров (8,28 и 3,63 минуты).

Производство биодизеля из лигноцеллюлозной биомассы рассматривается как устойчивая альтернатива ископаемому топливу, особенно в условиях ограниченности земель для выращивания масличных культур и конкуренции с продовольственными культурами. Биодизель имеет значительные преимущества перед традиционным дизельным топливом благодаря своей высокой биоразлагаемости, низкому уровню токсичности и способности снижать выбросы загрязняющих веществ при сгорании [87]. Замкнутый углеродный цикл биодизеля предотвращает дополнительный вклад в глобальное потепление. Более того, биодизель может использоваться в стандартных дизельных двигателях с минимальными или вовсе без модификаций, при этом влияние на производительность остается незначительным. Исследования показали, что повышенное содержание кислорода в биодизеле способствует значительному сокращению выбросов CO, CO₂, SO₂, углеводородов, частиц и дыма по сравнению с обычным дизельным топливом [88, 89].

В работе [90] авторы исследовали применение биопереработки кукурузной соломы с использованием насекомых (*Tenebrio molitor* и *Hermetia illucens*). В результате переработки было получено 1,95 г сырого масла, из которого удалось произвести значительное количество биоудобрений (111,59 г), белка (6,55 г) и биодизеля (1,7 г).

Веллайян и др. [91] исследовали возможность производства биодизеля из микроводорослей, культивируемых на сточных водах, с использованием эмульсии гидроксида аммония для повышения энергоэффективности и снижения выбросов. В рамках исследования водоросли выращивались в растворе мочевины, где оценивалась эффективность удаления питательных веществ. Из

биомассы водорослей методом экстракции растворителем выделяли биодизель, который затем смешивали с дизельным топливом. Для улучшения характеристик топлива добавляли эмульсию гидроксида аммония в концентрации 5% и 10%. Результаты показали, что использование сточных вод как источника питательных веществ для культивирования водорослей является перспективным подходом к устойчивому производству биодизеля [92].

В работе [93] изучили потенциал масла из семян мака как устойчивого сырья для производства биодизеля. Используя сочетание кислотной предварительной обработки и метода переэтерификации, исследователи оптимизировали ключевые параметры, такие как время реакции, температура, концентрация катализатора и соотношение метанола к маслу, применяя экспериментальный дизайн Бокса-Бенкена. Оптимальные условия, включая 90 минут реакции, температуру 60 °C и 0,25 мг гидроксида калия, позволили достичь максимального выхода биодизеля в 94,87%.

Одним из промышленно важных продуктов, получаемых из лигноцеллюлозной биомассы является биоэтанол. Биоэтанол занимает лидирующую позицию среди биотоплив, используемых в транспортной отрасли, и рассматривается как перспективная альтернатива ископаемым видам топлива, отличающееся высоким содержанием кислорода (около 35 мас.%), что способствует его более полному сгоранию и снижению выбросов вредных веществ [61, 94]. Прогнозируется, что к 2050 году биоэтанол станет основным компонентом бензиновых смесей, занимая значительную долю в транспортном топливе. Ожидается, что уже к 2031 году его содержание в бензиновых смесях вырастет до 15%, отражая растущую роль биотоплива в устойчивой энергетике [95].

В автомобильной промышленности этанол широко используется в качестве антидетонационной добавки в бензин благодаря его высокому октановому числу, что улучшает эффективность работы двигателей внутреннего сгорания [96]. Однако низкое цетановое число ограничивает его применение в дизельных двигателях в качестве основного топлива.

Одним из ключевых преимуществ этанола является его экономическая доступность по сравнению с биодизелем. Согласно исследованиям, себестоимость производства этанола составляет всего 0,09-0,12 долл. США за литр, что значительно ниже стоимости биодизеля, достигающей 0,42-0,75 долл. США за литр [97, 98]. Экономич-

ность этанола обусловлена дешевизной сырья, используемого для его производства, включая сахаристые и крахмалистые культуры, а также лигноцеллюлозную биомассу, которая преобразуется в этанол посредством процессов осахаривания и ферментации [99, 100]. Кроме того, новые подходы к получению этанола, такие как газификация угля с применением катализаторов на основе недорогих металлов, демонстрируют высокую эффективность и открывают перспективы для расширения его производства [101]. Он также выступает в качестве прекурсора для синтеза химических соединений и органических растворителей.

Производство биоэтанола делится на три поколения: 1G использует продовольственные культуры, обеспечивая до 95% мирового производства, но сталкивается с критикой из-за конкуренции с продовольственным сектором; 2G перерабатывает лигноцеллюлозные отходы, снижая экологическое воздействие, но требует высокой стоимости обработки; 3G сосредоточен на биомассе водорослей, находясь на стадии разработки.

Биоэтанол второго поколения (2G) производится из лигноцеллюлозных отходов, включая сельскохозяйственные и древесные остатки, что снижает экологический ущерб и минимизирует конкуренцию с продовольственным сектором [102]. Третье поколение (3G), основанное на биомассе водорослей, находится на стадии разработки [103]. Хотя 1G-биотопливо обладает высокой производительностью, оно конкурирует с продовольственным сектором, тогда как 2G решает эту проблему, используя не пищевые материалы. Лигноцеллюлозное сырье преобразуется в ферментируемые сахара, которые микроорганизмы, такие как *Saccharomyces cerevisiae* и *Pichia stipitis*, превращают в биоэтанол [104, 105].

Современные исследования сосредоточены на оптимизации процессов предварительной обработки и ферментации для снижения затрат. Интеграция производства 1G и 2G биоэтанола может стать ключевым решением, предоставляя более высокую эффективность. Последние достижения в области биоэтанола демонстрируют значительный прогресс. Например, использование предварительно обработанного лигноцеллюлозного сырья, такого как жом сахарного тростника и биомасса сосновой хвои, позволило достигнуть концентрации этанола до 10,67 г/л и 0,148 г/г биомассы, соответственно [106]. Эти результаты подчеркивают возможности внедрения инновационных методов переработки и ферментации.

Кроме того, производство биоэтанола третьего поколения, основанного на биомассе водорослей, продолжает развиваться. Этот подход отличается высокой эффективностью использования ресурсов и меньшим воздействием на окружающую среду, что делает его перспективным направлением для достижения устойчивого развития.

Мамун и др. [95] исследовали возможность использования биомассы *Arthrospira platensis* (известной как спирулина) для производства биоэтанола с применением комбинированного метода предварительной обработки – микроволновой активации и кислотного гидролиза. В работе были оптимизированы ключевые параметры, такие как концентрация кислоты (от 0,1 до 0,3 М H₂SO₄) и время гидролиза (30-180 мин). Результаты показали, что комбинированная предварительная обработка значительно увеличила выход ферментируемых сахаров, достигнув максимального уровня в 78,4%, что превосходит традиционный кислотный гидролиз. Ферментация с использованием *Saccharomyces cerevisiae* обеспечила выход этанола в размере 0,06 г на грамм биомассы. Результаты работы подтверждают потенциал спирулины как источника третьего поколения биоэ-

танола для устойчивой энергетики, несмотря на существующие ограничения, такие как стоимость и масштабируемость технологии.

Audibert и др. [107] исследовали оптимизацию процесса производства биоэтанола второго поколения (2G) из лигноцеллюлозной биомассы древесины путем использования парового взрыва в качестве предварительной обработки. В рамках исследования были изучены три различных типа древесины (дуб, тополь и ель) с целью выявления зависимости между выходом биоэтанола и затратами на предварительную обработку. Результаты показали, что эффективность производства биоэтанола варьировалась в зависимости от типа древесины. Для дуба и тополя были определены оптимальные значения температуры и времени, обеспечивающие до 70% и 48% теоретически возможного выхода биоэтанола соответственно, в то время как для ели эффективность была значительно ниже из-за высокой рекальцитрантности ее лигнина. Авторы также подчеркнули, что чрезмерно жесткие условия обработки не приводят к дополнительному улучшению выхода, что делает средний уровень условий обработки наиболее предпочтительным для промышленного применения.

Таблица 3. Получение биоэтанола из лигноцеллюлозных материалов

Материал	Предварительная обработка	Гидролиз	Ферментация	Выход биоэтанола	Ключевые результаты	Ссылки
Солома пшеницы	Паровой взрыв: 200 °C, 10 мин	Энзиматический: целлюлоза 20 FPU/г, 48 ч, 50 °C	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , 30 °C, 72 ч	0,38 г/г биомассы	Высокий выход благодаря удалению лигнина, снижение содержания гемицеллюлозы	[2]
Кукурузные стебли	Щелочная обработка: 2% NaOH, 80 °C, 1 час	Энзиматический: β-глюкозидаза 15 U/г, 48 ч	<i>Pichia stipitis</i> , 32 °C, 48 ч	0,42 г/г биомассы	Содержание этанола выше благодаря удалению ксиланов и высокой активности фермента	[35]
Сахарный тростник	Кислотный гидролиз: 1% H ₂ SO ₄ , 121 °C, 30 мин	Энзиматический: целлюлоза 25 FPU/г, 50 °C, 72 ч	<i>Zymomonas mobilis</i> , 30 °C, 48 ч	0,45 г/г биомассы	Увеличение выхода за счет оптимизации кислотного гидролиза и эффективного ферментирования	[16]
Опилки древесины	Озонолиз: озон 5%, 2 часа	Энзиматический: целлюлоза 30 FPU/г, 55 °C, 72 ч	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , 30 °C, 72 ч	0,33 г/г биомассы	Сложность обработки древесных материалов требует дополнительных шагов для увеличения выхода	[23]
Багасса тростника	Гидротермальная: 180 °C, 20 мин	Кислотный: H ₂ SO ₄ 2%, 121 °C, 30 мин	<i>Saccharomyces cerevisiae</i> , 30 °C, 72 ч	0,40 г/г биомассы	Высокая степень удаления лигнина обеспечивает улучшенную ферментативную доступность целлюлозы	[9]
Рисовая шелуха	Микроволновая обработка: 800 Вт, 10 мин	Энзиматический: целлюлоза 20 FPU/г, 50 °C, 48 ч	<i>Candida shehatae</i> , 32 °C, 48 ч	0,37 г/г биомассы	Быстрая обработка улучшает разрушение лигноцеллюлозной структуры	[29]

В таблице 3 представлены сравнительные данные по получению биоэтанола из различных лигноцеллюлозных материалов.

Как видно из таблицы, в качестве сырья для получения биоэтанола были исследованы солома пшеницы, кукурузные стебли, сахарный тростник, опилки древесины, багасса тростника и рисовая шелуха. Для каждого материала указаны этапы предварительной обработки, гидролиза, ферментации, а также выход биоэтанола в г/г биомассы. Наибольший выход биоэтанола 0,45 г/г биомассы наблюдается при использовании в качестве сырья сахарного тростника. Кроме указанных материалов, также возможно использование различных видов микроорганизмов, таких как дрожжи или бактерии, для производства биоэтанола. Дополнительно можно рассмотреть возможность улучшения процессов предварительной обработки и ферментации для увеличения выхода биоэтанола.

4. Заключение

Лигноцеллюлозные материалы представляют собой важный источник сырья для производства широкого спектра продуктов, востребованных в различных отраслях промышленности, включая энергетическую, химическую, фармацевтическую и сельскохозяйственную. Благодаря своей доступности, низкой стоимости и возобновляемости лигноцеллюлоза является привлекательной альтернативой ископаемым ресурсам, что делает ее ключевым элементом устойчивого развития. Технологии конверсии лигноцеллюлозных материалов активно совершенствуются, что открывает возможности для получения все более ценных и сложных продуктов, таких как биотопливо нового поколения, биоразлагаемые полимеры, платформенные химикаты и ферменты. Использование лигноцеллюлозного сырья способствует снижению выбросов углекислого газа, утилизации сельскохозяйственных и промышленных отходов, а также развитию биоэкономики и устойчивого сельского хозяйства. Тем не менее, несмотря на значительный прогресс остается ряд вызовов, связанных с эффективной переработкой лигноцеллюлозы. Среди них – сложность структуры материала, высокая энергия активации процессов, а также необходимость дальнейшего совершенствования технологий предварительной обработки, катализаторов и ферментативных систем. Для достижения максимальной эффективности и конкурентоспособности продуктов из лигноцеллюлозных материалов требуется комплексный

подход, включающий междисциплинарные исследования, разработку новых технологий и расширение масштабов производства. Продолжение исследований в данной области имеет решающее значение для повышения экономической и экологической устойчивости процессов, что, в свою очередь, способствует созданию циркулярной биоэкономики и глобальной энергетической безопасности.

Благодарность

Исследование финансируется Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, программа №BR24992914

Список литературы

- [1]. Akhtar J., Amin N.A.S. A review on process conditions for optimum bio-oil yield in hydrothermal liquefaction of biomass // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2011. – Vol. 15. – P. 1615-1624.
- [2]. Balat M., Balat H., Öz C. Progress in bioethanol processing // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2008. – Vol. 34. – P. 551-573.
- [3]. Awasthi Manish K., Sarsaiya Siddharth, Patel Ankit, Singh Rupesh, Zhang Zhiqiang, Kumar Abhay. Refining biomass residues for sustainable energy and bio-products: An assessment of technology, its importance, and strategic applications in circular bio-economy // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 127. – Article 109876.
- [4]. Basu Prabir. Biomass Characteristics // In: *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. – Elsevier, 2013. – P. 47-86.
- [5]. Behrendt Frank, Neubauer Yves, Oevermann Michael, Wilmes Bernhard, Zobel Nicole. Direct Liquefaction of Biomass // *Chemical Engineering & Technology*. – 2008. – Vol. 31. – P. 667-677.
- [6]. Bernstad Saraiva Adriana. System boundary setting in life cycle assessment of biorefineries: a review // *International Journal of Environmental Science and Technology*. – 2017. – Vol. 14. – P. 435-452.
- [7]. Bisen Prakash S., Sanodiya Bhagwati S., Thakur Gurmeet S., Baghel Rajni K., Prasad G. Biodiesel production with special emphasis on lipase-catalyzed transesterification // *Biotechnology Letters*. – 2010. – Vol. 32. – P. 1019-1030.
- [8]. Cheng Chien-Li, Che Po-Yu, Chen Bor-Yann, Chang Jo-Shu, Lee Dong-Hau. Biobutanol production from agricultural waste by an acclimated mixed bacterial microflora // *Applied Energy*. – 2012. – Vol. 100. – P. 3-9.

- [9]. Chandel Anuj Kumar, Albarelli Julia Quirino, Santos Daniela Teixeira, Gomes Elisa Nogueira, Polikarpov Igor. Comparative analysis of key technologies for cellulosic ethanol production from Brazilian sugarcane bagasse at a commercial scale // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. – 2019. – Vol. 13. – P. 994-1014.
- [10]. Cherubini Francesco. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals // *Energy Conversion and Management*. – 2010. – Vol. 51. – P. 1412-1421.
- [11]. Chum Helena L., Nigro Francisco E. B., McCormick Robert L., Foust Thomas D. Conversion Technologies for Biofuels and Their Use.
- [12]. Clark James H., Luque Rafael, Matharu Anant S. Green Chemistry, Biofuels, and Biorefinery // *Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering*. – 2012. – Vol. 3. – P. 183-207.
- [13]. Daioglou Vassilis, Wicke Birka, Faaij André P. C., Van Vuuren Detlef P. Competing uses of biomass for energy and chemicals: implications for long-term global CO₂ mitigation potential // *GCB Bioenergy*. – 2015. – Vol. 7. – P. 1321-1334.
- [14]. Davis Ryan, Kataria Rajesh, Cerrone Flavio, Solano Javier, Surendran Ashok. Conversion of grass biomass into fermentable sugars and its utilization for medium chain length polyhydroxyalkanoate (mcl-PHA) production by *Pseudomonas* strains // *Bioresource Technology*. – 2013. – Vol. 150. – P. 202-209.
- [15]. De Jong Ed, Jungmeier Gerfried. Biorefinery Concepts in Comparison to Petrochemical Refineries // In: *Industrial Biorefineries & White Biotechnology*. – Elsevier, 2015. – P. 3-33.
- [16]. Demirbaş Ayhan. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals // *Energy Conversion and Management*. – 2001. – Vol. 42. – P. 1357-1378.
- [17]. Fatma Saima, Hameed Amir, Noman Muhammad, Ashraf Muhammad, Nasir Fatima. Lignocellulosic Biomass: A Sustainable Bioenergy Source for the Future // *Protein and Peptide Letters*. – 2018. – Vol. 25. – P. 148-163.
- [18]. [18]. Garlapati Venkata K., Chandel Anuj K., Kumar S. P. Jeevan, Singh O. V. Circular economy aspects of lignin: Towards a lignocellulose biorefinery // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2020. – Vol. 130. – P. 109977.
- [19]. Gaurav Neha, Sivasankari Sangeetha, Kiran G., Manimaran Rajasekaran. Utilization of bioresources for sustainable biofuels: A Review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2017. – Vol. 73. – P. 205-214.
- [20]. Guldhe Ankit, Singh B., Renuka N., Rawat Inderjeet, Bux Faizal. Bioenergy: A Sustainable Approach for Cleaner Environment // In: Baudhh K., Singh B., Korstad J. (eds) *Phytoremediation Potential of Bioenergy Plants*. – Springer Singapore, Singapore, 2017. – P. 47-62.
- [21]. Inyang Vincent, Laseinde Olumide T., Kanakana Godfrey M. Techniques and applications of lignocellulose biomass sources as transport fuels and other bioproducts // *International Journal of Low-Carbon Technology*. – 2022. – Vol. 17. – P. 900-909.
- [22]. Areeya Suthinee, Panakkal Evan J., Sriariyanun Malinee, Sanjiv Kumar S., Shreechamchat Saipin. A Review on Chemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for the Production of Bioproducts: Mechanisms, Challenges and Applications // *Applied Science and Engineering Progress*. – 2023.
- [23]. Hassan Shoheb S., Williams Gavin A., Jaiswal Amit K. Emerging technologies for the pretreatment of lignocellulosic biomass // *Bioresource Technology*. – 2018. – Vol. 262. – P. 310-318.
- [24]. Hemsworth Gavin R., Henrissat Bernard, Davies Gideon J., Walton Paul H. Discovery and characterization of a new family of lytic polysaccharide monooxygenases // *Nature Chemical Biology*. – 2014. – Vol. 10. – P. 122-126.
- [25]. Saleem Muhammad. Possibility of utilizing agriculture biomass as a renewable and sustainable future energy source // *Heliyon*. – 2022. – Vol. 8. – P. e08905.
- [26]. Janssen Rainer, Turhollow Anthony F., Rutz Dominik, Mergner Richard. Production facilities for second-generation biofuels in the USA and the EU – current status and future perspectives // *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. – 2013. – Vol. 7. – P. 647-665.
- [27]. Jarboe Laura R., Wen Zhiyou, Choi Dong, Brown Robert C. Hybrid thermochemical processing: fermentation of pyrolysis-derived bio-oil // *Applied Microbiology and Biotechnology*. – 2011. – Vol. 91. – P. 1519-1523.
- [28]. Khoshnevisan Behzad, Duan Nan, Tsapekos Panagiotis, Alvarado-Morales Merlin, Angelidaki Irini. A critical review on livestock manure biorefinery technologies: Sustainability, challenges, and future perspectives // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2021. – Vol. 135. – P. 110033.
- [29]. Koçar Göksel, Civaş Nilüfer. An overview of biofuels from energy crops: Current status and future prospects // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 28. – P. 900-916.
- [30]. Konur Umut. Biodiesel fuels based on edible and nonedible feedstocks, wastes, and algae: science, technology, health, and environment. – CRC Press,

- Boca Raton, FL, 2021.
- [31]. Debellefontaine Henri, Foussard Jean-Noël. Wet air oxidation for the treatment of industrial wastes. Chemical aspects, reactor design and industrial applications in Europe // *Waste Management*. – 2000. – Vol. 20. – P. 15-25.
- [32]. Lozano Pérez Ana S., Lozada Castro Juan J., Guerrero Fajardo Carlos A. Application of Microwave Energy to Biomass: A Comprehensive Review of Microwave-Assisted Technologies, Optimization Parameters, and the Strengths and Weaknesses // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2024. – Vol. 8. – P.121.
- [33]. Krska David, Larsbrink Johan. Investigation of a thermostable multi-domain xylanase-glucuronoyl esterase enzyme from *Caldicellulosiruptor kristjanssonii* incorporating multiple carbohydrate-binding modules // *Biotechnology for Biofuels*. – 2020. – Vol. 13. – P. 68.
- [34]. Kucharska Katarzyna, Słupek Ewa, Cieśliński Henryk, Kamiński Marcin. Advantageous conditions of saccharification of lignocellulosic biomass for biofuels generation via fermentation processes // *Chemical Papers*. – 2020. – Vol. 74. – P. 1199-1209.
- [35]. Kumar Ashok K., Sharma Saurabh. Recent updates on different methods of pretreatment of lignocellulosic feedstocks: a review // *Bioresources and Bioprocessing*. – 2017. – Vol. 4. – P. 7.
- [36]. Lee Richard A., Lavoie Jean-Michel. From first- to third-generation biofuels: Challenges of producing a commodity from a biomass of increasing complexity // *Animal Frontiers*. – 2013. – Vol. 3. – P. 6-11.
- [37]. Liew Felix, Martin Michael E., Tappel Ryan C., Zheng Yang, Simpson Sean D. Gas Fermentation—A Flexible Platform for Commercial Scale Production of Low-Carbon-Fuels and Chemicals from Waste and Renewable Feedstocks // *Frontiers in Microbiology*. – 2016. – Vol. 7. – P. 694.
- [38]. Long Hong, Li Xiangzhi, Wang Haidong, Jia Jianhua. Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2013. – Vol. 26. – P. 344-352.
- [39]. Lynd Lee R., Beckham Gregg T., Guss Adam M., Himmel Michael E., Jayakody Lakshika N., Bomble Yannick J., Deutch Steve, Elander Richard T., McMillan James D., Myers Mia. Toward low-cost biological and hybrid biological/catalytic conversion of cellulosic biomass to fuels // *Energy & Environmental Science*. – 2022. – Vol. 15. – P. 938-990.
- [40]. Kumari Dimple, Singh Rajni. Pretreatment of lignocellulosic wastes for biofuel production: A critical review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2018. – Vol. 90. – P. 877-891.
- [41]. Shahzadi T., Mehmood S., Irshad M., Shabbir R. Advances in lignocellulosic biotechnology: A brief review on lignocellulosic biomass and cellulases // *Advances in Bioscience and Biotechnology*. – 2014. – Vol. 5. – P. 246-251.
- [42]. Somerville C., Youngs H., Taylor C., Davis R. Feedstocks for Lignocellulosic Biofuels // *Science*. – 2010. – Vol. 329. – P. 790-792.
- [43]. Vieira S.R., Silva J.B.A.D., Pessôa L.C., Cardoso R. Cellulose processing using ionic liquids: An analysis of patents and technological trends // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. – P. e39590.
- [44]. Grams J., Ruppert A.R. Development of Heterogeneous Catalysts for Thermo-Chemical Conversion of Lignocellulosic Biomass // *Energies*. – 2017. – Vol. 10. – P. 545.
- [45]. Haq I., Qaisar K., Nawaz A., Bashir R. Advances in Valorization of Lignocellulosic Biomass towards Energy Generation // *Catalysts*. – 2021. – Vol. 11. – P. 309.
- [46]. Rezaia S., Oryani B., Cho J., Rosendahl R. Different pretreatment technologies of lignocellulosic biomass for bioethanol production: An overview // *Energy*. – 2020. – Vol. 199. – P. 117457.
- [47]. Devi A., Bajar S., Kour H., Gupta R. Lignocellulosic Biomass Valorization for Bioethanol Production: A Circular Bioeconomy Approach // *BioEnergy Research*. – 2022. – Vol. 15. – P. 1820-1841.
- [48]. Mabee W.E., McFarlane P.N., Saddler R.N. Biomass availability for lignocellulosic ethanol production // *Biomass and Bioenergy*. – 2011. – Vol. 35. – P. 4519-4529.
- [49]. Blasi A.R., Verardi A.R., Lopresto C.G., Barbaro R. Lignocellulosic Agricultural Waste Valorization to Obtain Valuable Products: An Overview // *Recycling*. – 2023. – Vol. 8. – P. 61.
- [50]. Nanda S., Mohammad J., Reddy S.N., Kozinski R.J. Pathways of lignocellulosic biomass conversion to renewable fuels // *Biomass Conversion and Biorefinery*. – 2014. – Vol. 4. – P. 157-191.
- [51]. Ling Z.R., Chen S., Zhang X.R., Xu F.R. Exploring crystalline-structural variations of cellulose during alkaline pretreatment for enhanced enzymatic hydrolysis // *Bioresource Technology*. – 2017. – Vol. 224. – P. 611-617.
- [52]. Thakur V.K.R., Voicu S.I.R. Recent advances in cellulose and chitosan based membranes for water purification: A concise review // *Carbohydrate Polymers*. – 2016. – Vol. 146. – P. 148-165.
- [53]. Park N.M.R., Choi S.R., Oh J.E.R., Hwang R.D. Facile extraction of cellulose nanocrystals // *Carbohydrate Polymers*. – 2019. – Vol. 223. – P. 115114.

- [54]. Almasi H.R., Ghanbarzadeh B.R., Dehghannya J.R., Koocheki R.A. Novel nanocomposites based on fatty acid modified cellulose nanofibers/poly(lactic acid): Morphological and physical properties // *Food Packaging and Shelf Life*. – 2015. – Vol. 5. – P. 21-31.
- [55]. Sun X.R., Jiang F.R. Periodate oxidation-mediated nanocelluloses: Preparation, functionalization, structural design, and applications // *Carbohydrate Polymers*. – 2024. – Vol. 341. – P. 122305.
- [56]. Kazmi M.Z.H., Karmakar A., Michaelis V.K., Williams F.J. Separation of cellulose/hemicellulose from lignin in white pine sawdust using boron trihalide reagents // *Tetrahedron*. – 2019. – Vol. 75. – P. 1465-1470.
- [57]. Yang J., An X., Liu L., et al. Cellulose, hemicellulose, lignin, and their derivatives as multi-components of bio-based feedstocks for 3D printing // *Carbohydrate Polymers*. – 2020. – Vol. 250. – P. 116881.
- [58]. Ng H.-M., Sin L.T., Tee T.-T., et al. Extraction of cellulose nanocrystals from plant sources for application as reinforcing agent in polymers // *Composites Part B: Engineering*. – 2015. – Vol. 75. – P. 176-200.
- [59]. Zhang N., Li S., Xiong L., et al. Cellulose-hemicellulose interaction in wood secondary cell-wall // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. – 2015. – Vol. 23. – P. 085010.
- [60]. Durand K., Daassi R., Rodrigue D., Stevanovic T. Study of Purified Cellulosic Pulp and Lignin Produced by Wheat Straw Biorefinery // *Macromolecules*. – 2024. – Vol. 4. – P. 650-679.
- [61]. Toor M., Kumar S.S., Malyan S.K., et al. An overview on bioethanol production from lignocellulosic feedstocks // *Chemosphere*. – 2020. – Vol. 242. – P. 125080.
- [62]. Cazier E.A., Pham T.-N., Cossus L., et al. Exploring industrial lignocellulosic waste: Sources, types, and potential as high-value molecules // *Waste Management*. – 2024. – Vol. 188. – P. 11-38.
- [63]. Amadou Hassane H., Behr M., Guérin C., et al. A Higher Lignin Content in ugt72b37 Poplar Mutants Indicates a Role of Monolignol Glycosylation in Xylem Lignification // *Forests*. – 2022. – Vol. 13. – P. 2167.
- [64]. Lobato-Peralta D.R., Duque-Brito E., Villafán-Vidales H.I., et al. A review on trends in lignin extraction and valorization of lignocellulosic biomass for energy applications // *Journal of Cleaner Production*. – 2021. – Vol. 293. – P. 126123.
- [65]. Naeem M., Imran M., Latif S., et al. Multifunctional catalyst-assisted sustainable reformation of lignocellulosic biomass into environmentally friendly biofuel and value-added chemicals // *Chemosphere*. – 2023. – Vol. 330. – P. 138633.
- [66]. Sun R. Lignin Source and Structural Characterization // *ChemSusChem*. – 2020. – Vol. 13. – P. 4385-4393.
- [67]. Liao J.J., Latif N.H.A., Trache D., et al. Current advancement on the isolation, characterization and application of lignin // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2020. – Vol. 162. – P. 985-1024.
- [68]. Dai L., Ma M., Xu J., et al. All-Lignin-Based Hydrogel with Fast pH-Stimuli Responsiveness for Mechanical Switching and Actuation // *Chemistry of Materials*. – 2020. – Vol. 32. – P. 4324-4330.
- [69]. Dragone G., Kerssemakers A.A.J., Driessen J.L.S.P., et al. Innovation and strategic orientations for the development of advanced biorefineries // *Bioresource Technology*. – 2020. – Vol. 302. – P. 122847.
- [70]. Mondal A.K., Uddin M.T., Sujan S.M.A., et al. Preparation of lignin-based hydrogels, their properties and applications // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2023. – Vol. 245. – P. 125580.
- [71]. Rodrigues J.S., Lima V., Araújo L.C.P., Botaro V.R. Lignin Fractionation Methods: Can Lignin Fractions Be Separated in a True Industrial Process? // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2021. – Vol. 60. – P. 10863-10881.
- [72]. Heo J.W., Kim M.S., Oh D.H., Kim Y.S. Innovative construction of amine-functionalized lignin-based hydrogel for ultrafast and selective dye remediation // *Chemical Engineering Journal*. – 2024. – Vol. 498. – P. 155506.
- [73]. Morales A., Labidi J., Gullón P. Impact of the lignin type and source on the characteristics of physical lignin hydrogels // *Sustainable Materials and Technologies*. – 2022. – Vol. 31. – P. e00369.
- [74]. Preet J., Pathania K., Kaur J., et al. A lignin-based biocomposite hydrogel for antimicrobial and wound healing applications // *Materials Advances*. – 2024. – Vol. 5. – P. 9445-9457.
- [75]. Wang B., Qiu D., Gu Y., et al. A lignin-based controlled/sustained release hydrogel by integrating mechanical strengthening and bioactivities of lignin // *Journal of Bioresources and Bioproducts*. – 2024. – Vol. S2369969824000732. – P. 10.002.
- [76]. Hwang J., Martinez D.V., Martinez E.J., et al. Highly swellable hydrogels prepared from extensively oxidized lignin // *Giant*. – 2022. – Vol. 10. – P. 100106.
- [77]. Fu C., Liu X., Yi Y., et al. Lignin derived hydrogel with highly adhesive for flexible strain sensors // *Polymer Testing*. – 2022. – Vol. 107. – P. 107486.
- [78]. Tran A., Boott C.E., MacLachlan M.J. Understanding the Self-Assembly of Cellulose

- Nanocrystals—Toward Chiral Photonic Materials // *Advanced Materials*. – 2020. – Vol. 32. – P. 1905876.
- [79]. Isogai A. Emerging Nanocellulose Technologies: Recent Developments // *Advanced Materials*. – 2021. – Vol. 33. – P. 2000630.
- [80]. Isogai A., Zhou Y. Diverse nanocelluloses prepared from TEMPO-oxidized wood cellulose fibers: Nanonetworks, nanofibers, and nanocrystals // *Current Opinion in Solid State and Materials Science*. – 2019. – Vol. 23. – P. 101-106.
- [81]. Isogai A., Bergström L. Preparation of cellulose nanofibers using green and sustainable chemistry // *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. – 2018. – Vol. 12. – P. 15-21.
- [82]. Yang X., Berglund L.A. Structural and Ecofriendly Holocellulose Materials from Wood: Microscale Fibers and Nanoscale Fibrils // *Advanced Materials*. – 2021. – Vol. 33. – P. 2001118.
- [83]. Ciriminna R., Petri G.L., Angellotti G., et al. Nanocellulose and microcrystalline cellulose from citrus processing waste: A review // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2024. – Vol. 281. – P. 135865.
- [84]. Zhang Q., Lu Z., Su C., et al. High yielding, one-step mechano-enzymatic hydrolysis of cellulose to cellulose nanocrystals without bulk solvent // *Bioresource Technology*. – 2021. – Vol. 331. – P. 125015.
- [85]. Christu Paul R., Ramachandran B., Sushma G., et al. An empirical research on areca fiber polymer composite for automotive components in modern industry // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 33. – P. 4493-4497.
- [86]. Shahi N., Lee E., Min B., Kim D.-J. Rice Husk-Derived Cellulose Nanofibers: A Potential Sensor for Water-Soluble Gases // *Sensors*. – 2021. – Vol. 21. – P. 4415.
- [87]. Yusuf N.N.A.N., Kamarudin S.K., Yaakub Z. Overview on the current trends in biodiesel production // *Energy Conversion and Management*. – 2011. – Vol. 52. – P. 2741-2751.
- [88]. Severo I.A., Siqueira S.F., Deprá M.C., et al. Biodiesel facilities: What can we address to make biorefineries commercially competitive? // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2019. – Vol. 112. – P. 686-705.
- [89]. Suzihaque M.U.H., Alwi H., Kalthum Ibrahim U., et al. Biodiesel production from waste cooking oil: A brief review // *Materials Today: Proceedings*. – 2022. – Vol. 63. – P. S490-S495.
- [90]. Wang H., Rehman K.U., Liu X., et al. Insect biorefinery: a green approach for conversion of crop residues into biodiesel and protein // *Biotechnology for Biofuels*. – 2017. – Vol. 10. – P. 304.
- [91]. Vellaiyan S. Transforming wastewater-derived algae biodiesel with ammonium hydroxide emulsion for enhanced energy efficiency and emission reduction // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 24. – P. 103332.
- [92]. Devarajan Y., D. Chinnasamy Sundar. Utilization of Sterculia foetida oil as a sustainable feedstock for biodiesel production: Optimization, performance, and emission analysis // *Results in Engineering*. – 2024. – Vol. 24. – P. 103196.
- [93]. Razaq Z., Tousif M.I., Noreen S., Zaman M. Utilization of opium poppy seed oil for biodiesel production: A parametric characterization and statistical optimization // *Heliyon*. – 2024. – Vol. 10. – P. e36851.
- [94]. Micic V., Jotanovic M. Bioethanol as fuel for internal combustion engines // *Zastita Materijala*. – 2015. – Vol. 56. – P. 403-408.
- [95]. Ma'mun S., Prasetyo M.W., Anugrah A.R., Syamsul A. Bioethanol from *Arthrospira platensis* biomass using a combined pretreatment // *Chemical Engineering Journal Advances*. – 2024. – Vol. 19. – P. 100616.
- [96]. Abdellatief T.M.M., Ershov M.A., Kapustin V.M., Sadykov V.A. Recent trends for introducing promising fuel components to enhance the anti-knock quality of gasoline: A systematic review // *Fuel*. – 2021. – Vol. 291. – P. 120112.
- [97]. Khounani Z., Nazemi F., Shafiei M., Bazargan A. Techno-economic aspects of a safflower-based biorefinery plant co-producing bioethanol and biodiesel // *Energy Conversion and Management*. – 2019. – Vol. 201. – P. 112184.
- [98]. Mizik T., Gyarmati G. Economic and Sustainability of Biodiesel Production – A Systematic Literature Review // *Clean Technologies*. – 2021. – Vol. 3. – P. 19-36.
- [99]. Bušić A., Mardetko N., Kundas S., Morzak G., Belskaya H., Šantek B., Novak S., Šantek M.I. Bioethanol Production from Renewable Raw Materials and its Separation and Purification: A Review // *Food Technology and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 56.
- [100]. Van Rooyen J., Mbella Teke G., Coetzee G., Loubser M. Enhancing bioethanol yield from food waste: Integrating decontamination strategies and enzyme dosage optimization for sustainable biofuel production // *Fuel*. – 2024. – Vol. 378. – P. 133026.
- [101]. Kang Y.-H., Zhang X.-Q., Gao J., Wang J., Shen L. Deep hydroconversion of ethanol-soluble portion from the ethanolysis of Hecaogou subbituminous coal to ultra-clean liquid fuel over hierarchical porous zeolite Y supported Ni-Co nanoparticles // *Journal of the Energy Institute*. – 2021. – Vol. 99. – P. 88-96.

- [102]. Robak K., Balcerek M. Review of Second-Generation Bioethanol Production from Residual Biomass // *Food Technology and Biotechnology*. – 2018. – Vol. 56.
- [103]. Maliha A., Abu-Hijleh B. A review on the current status and post-pandemic prospects of third-generation biofuels // *Energy Systems*. – 2023. – Vol. 14. – P. 1185-1216.
- [104]. Devi A., Bajar S., Kour H., Gupta N. Lignocellulosic Biomass Valorization for Bioethanol Production: A Circular Bioeconomy Approach // *BioEnergy Research*. – 2022. – Vol. 15. – P. 1820-1841.
- [105]. Karagoz P., Bill R.M., Ozkan M. Lignocellulosic ethanol production: Evaluation of new approaches, cell immobilization and reactor configurations // *Renewable Energy*. – 2019. – Vol. 143. – P. 741-752.
- [106]. Jin Y., Shi Z., Xu G., Zhang L., Zheng X. A stepwise pretreatment of sugarcane bagasse by alkaline and hydroxymethyl reagent for bioethanol production // *Industrial Crops and Products*. – 2020. – Vol. 145. – P. 112136.
- [107]. Audibert E., Floret J., Quintero A., Cortot C., Francoz F., Bouvet A. Determination of trade-offs between 2G bioethanol production yields and pretreatment costs for industrially steam exploded woody biomass // *Applied Energy*. – 2025. – Vol. 380. – P. 125028.
- [9]. Chandel AK, Albarelli JQ, Santos DT (2019) *Biofuels Bioprod Biorefining* 13:994-1014. <https://doi.org/10.1002/bbb.1990>
- [10]. Cherubini F (2010) *Energy Convers Manag* 51:1412-1421. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>
- [11]. Chum HL, Nigro FEB, McCormick R Conversion Technologies for Biofuels and Their Use.
- [12]. Clark JH, Luque R, Matharu AS (2012) *Annu Rev Chem Biomol Eng* 3:183-207. <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-062011-081014>
- [13]. Daioglou V, Wicke B, Faaij APC, Van Vuuren DP (2015) *GCB Bioenergy* 7:1321-1334. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12228>
- [14]. Davis R, Kataria R, Cerrone F, et al (2013) *Bioresour Technol* 150:202-209. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.001>
- [15]. De Jong E, Jungmeier G (2015) In: *Industrial Biorefineries & White Biotechnology*. Elsevier: 3-33. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63453-5.00001-X>
- [16]. Demirbaş A (2001) *Energy Convers Manag* 42:1357-1378. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00137-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00137-0)
- [17]. Fatma S, Hameed A, Noman M (2018) *Protein Pept Lett* 25:148-163. <https://doi.org/10.2174/0929866525666180122144504>
- [18]. Garlapati VK, Chandel AK, Kumar SPJ (2020) *Renew Sustain Energy Rev* 130:109977. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109977>
- [19]. Gaurav N, Sivasankari S, Kiran G (2017) *Renew Sustain Energy Rev* 73:205-214. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.070>
- [20]. Guldhe A, Singh B, Renuka N (2017) Springer. Singapore: 47-62
- [21]. Inyang V, Laseinde OT, Kanakana GM (2022) *Int J Low-Carbon Technol* 17:900-909. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctac068>
- [22]. Areeya S, Panakkal EJ, Sriariyanun M (2023) *Appl Sci Eng Prog*. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2023.02.008>
- [23]. Hassan SS, Williams GA, Jaiswal AK (2018) *Bioresour Technol* 262:310-318. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.099>
- [24]. Hemsworth GR, Henrissat B, Davies GJ, Walton PH (2014) *Nat Chem Biol* 10:122-126. <https://doi.org/10.1038/nchembio.1417>
- [25]. Saleem M (2022) *Heliyon* 8:e08905. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08905>
- [26]. Janssen R, Turhollow AF, Rutz D, Mergner R (2013) *Biofuels Bioprod Biorefining* 7:647-665. <https://doi.org/10.1002/bbb.1451>
- [27]. Jarboe LR, Wen Z, Choi D, Brown RC (2011) *Appl Microbiol Biotechnol* 91:1519-1523. <https://doi.org/10.1007/s00253-011-3495-9>
- [28]. Khoshnevisan B, Duan N, Tsapekos PI (2021)

References

- [1]. Akhtar J, Amin NAS (2011) *Renew Sustain Energy Rev* 15:1615-1624. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.054>
- [2]. Balat M, Balat H, Öz C (2008) *Prog Energy Combust Sci* 34:551-573. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2007.11.001>
- [3]. Awasthi MK, Sarsaiya S, Patel A (2020) *Renew Sustain Energy Rev* 127:109876. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109876>
- [4]. Basu P (2013) *Pyrolysis and Torrefaction*, Elsevier. P. 47-86. ISBN: 978-0-12-396488-5
- [5]. Behrendt F, Neubauer Y, Oevermann M, et al (2008) *Chem Eng Technol* 31:667-677. <https://doi.org/10.1002/ceat.200800077>
- [6]. Bernstad Saraiva A (2017) *Int J Environ Sci Technol* 14:435-452. <https://doi.org/10.1007/s13762-016-1138-5>
- [7]. Bisen PS, Sanodiya BS, Thakur GS (2010) *Biotechnol Lett* 32:1019-1030. <https://doi.org/10.1007/s10529-010-0275-z>
- [8]. Cheng C-L, Che P-Y, Chen B-Y (2012) *Appl Energy* 100:3-9. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.05.042>

- Renew Sustain Energy Rev 135:110033. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110033>
- [29]. Koçar G, Civaş N (2013) Renew Sustain Energy Rev 28:900-916. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.022>
- [30]. Konur O (2021) CRC Press, Boca Raton, FL. ISBN 9780367705039
- [31]. Debellefontaine H, Foussard JN (2000) Waste Manag 20:15-25. [https://doi.org/10.1016/S0956-053X\(99\)00306-2](https://doi.org/10.1016/S0956-053X(99)00306-2)
- [32]. Lozano Pérez AS, Lozada Castro JJ, Guerrero Fajardo CA (2024) J Manuf Mater Process 8:121. <https://doi.org/10.3390/jmmp8030121>
- [33]. Krska D, Larsbrink J (2020) Biotechnol Biofuels 13:68. <https://doi.org/10.1186/s13068-020-01709-9>
- [34]. Kucharska K, Słupek E, Cieśliński H, Kamiński M (2020) Chem Pap 74: 1199-1209. <https://doi.org/10.1007/s11696-019-00960-1>
- [35]. Kumar AK, Sharma S (2017) Bioresour Bioprocess 4:7. <https://doi.org/10.1186/s40643-017-0137-9>
- [36]. Lee RA, Lavoie J-M (2013) Anim Front 3:6-11. <https://doi.org/10.2527/af.2013-0010>
- [37]. Liew F, Martin ME, Tappel RC (2016) Front Microbiol 7:694. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00694>
- [38]. Long H, Li X, Wang H, Jia J (2013) Renew Sustain Energy Rev 26:344-352. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.035>
- [39]. Lynd LR, Beckham GT, Guss AM, et al (2022) Energy Environ Sci 15:938-990. <https://doi.org/10.1039/D1EE02540F>
- [40]. Kumari D, Singh R (2018) Renew Sustain Energy Rev 90:877-891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.111>
- [41]. Shahzadi T, Mehmood S, Irshad M (2014) Adv Biosci Biotechnol 05:246-251. <https://doi.org/10.4236/abb.2014.53031>
- [42]. Somerville C, Youngs H, Taylor C (2010) Feedstocks for Lignocellulosic Biofuels. Science 329:790-792. <https://doi.org/10.1126/science.1189268>
- [43]. Vieira SR, Silva JBAD, Pessôa LC (2024) Heliyon 10:e39590. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39590>
- [44]. Grams J, Ruppert A (2017) Energies 10:545. <https://doi.org/10.3390/en10040545>
- [45]. Haq I, Qaisar K, Nawaz A, et al (2021) Catalysts 11:309. <https://doi.org/10.3390/catal11030309>
- [46]. Rezaian S, Oryani B, Cho J (2020) Energy 199:117457. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117457>
- [47]. Devi A, Bajar S, Kour H (2022) BioEnergy Res 15:1820-1841. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10401-9>
- [48]. Mabee WE, McFarlane PN, Saddler JN (2011) Biomass Bioenergy 35:4519-4529. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.026>
- [49]. Blasi A, Verardi A, Lopresto CG (2023) Recycling 8:61. <https://doi.org/10.3390/recycling8040061>
- [50]. Nanda S, Mohammad J, Reddy SN (2014) Biomass Convers Biorefinery 4:157-191. <https://doi.org/10.1007/s13399-013-0097-z>
- [51]. Ling Z, Chen S, Zhang X, Xu F (2017) Bioresour Technol 224:611-617. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.10.064>
- [52]. Thakur VK, Voicu SI (2016) Carbohydr Polym 146:148-165. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.03.030>
- [53]. Park N-M, Choi S, Oh JE, Hwang DY (2019) Carbohydr Polym 223:115114. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115114>
- [54]. Almasi H, Ghanbarzadeh B, Dehghannya J, et al (2015) Food Packag Shelf Life 5:21-31. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2015.04.003>
- [55]. Sun X, Jiang F (2024) Carbohydr Polym 341:122305. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122305>
- [56]. Kazmi MZH, Karmakar A, Michaelis VK, Williams FJ (2019) Tetrahedron 75:1465-1470. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2019.02.009>
- [57]. Yang J, An X, Liu L (2020) Carbohydr Polym 250:116881. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116881>
- [58]. Ng H-M, Sin LT, Tee T-T (2015) Compos Part B Eng 75:176-200. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.01.008>
- [59]. Zhang N, Li S, Xiong L (2015) Model Simul Mater Sci Eng 23:085010. <https://doi.org/10.1088/0965-0393/23/8/085010>
- [60]. Durand K, Daassi R, Rodrigue D, Stevanovic T (2024) Macromol 4:650-679. <https://doi.org/10.3390/macromol4030039>
- [61]. Toor M, Kumar SS, Malyan SK (2020) Chemosphere 242:125080. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125080>
- [62]. Cazier EA, Pham T-N, Cossus L (2024) Waste Manag 188:11-38. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.07.029>
- [63]. Amadou Hassane H, Behr M, Guérin C (2022) Forests 13:2167. <https://doi.org/10.3390/f13122167>
- [64]. Lobato-Peralta DR, Duque-Brito E, Villafán-Vidales HI (2021) J Clean Prod 293:126123. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126123>
- [65]. Naeem M, Imran M, Latif S (2023) Chemosphere 330:138633. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138633>
- [66]. Sun R (2020) ChemSusChem 13:4385-4393. <https://doi.org/10.1002/cssc.202001324>
- [67]. Liao JJ, Latif NHA, Trache DI (2020) Int J Biol Macromol 162: 985-1024. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.06.168>
- [68]. Dai L, Ma M, Xu J, et al (2020) Chem Mater 32:4324-4330. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.0c01198>

- [69]. Dragone G, Kerssemakers AAJ, Driessen JLSP (2020) *Bioresour Technol* 302:122847. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122847>
- [70]. Mondal AK, Uddin MT, Sujan SMA (2023) *Int J Biol Macromol* 245:125580. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125580>
- [71]. Rodrigues JS, Lima V, Araújo LCP, Botaro VR (2021) *Ind Eng Chem Res* 60:10863-10881. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01704>
- [72]. Heo JW, Kim MS, Oh DH, Kim YS (2024) *Chem Eng J* 498:155506. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155506>
- [73]. Morales A, Labidi J, Gullón P (2022) *Sustain Mater Technol* 31:e00369. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00369>
- [74]. Preet J, Pathania K, Kaur J (2024) *Mater Adv* 5:9445-9457. <https://doi.org/10.1039/D4MA00680A>
- [75]. Wang B, Qiu D, Gu Y (2024) *J Bioresour Bioprod* S2369969824000732:10.002. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2024.10.002>
- [76]. Hwang J, Martinez DV, Martinez EJ (2022) *Giant* 10:100106. <https://doi.org/10.1016/j.giant.2022.100106>
- [77]. Fu C, Liu X, Yi Y (2022) *Polym Test* 107:107486. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107486>
- [78]. Tran A, Boott CE, MacLachlan MJ (2020) *Adv Mater* 32:1905876. <https://doi.org/10.1002/adma.201905876>
- [79]. Isogai A (2021) *Adv Mater* 33:2000630. <https://doi.org/10.1002/adma.202000630>
- [80]. Isogai A, Zhou Y (2019) *Curr Opin Solid State Mater Sci* 23:101-106. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2019.01.001>
- [81]. Isogai A, Bergström L (2018) *Curr Opin Green Sustain Chem* 12:15-21. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2018.04.008>
- [82]. Yang X, Berglund LA (2021) *Adv Mater* 33:2001118. <https://doi.org/10.1002/adma.202001118>
- [83]. Ciriminna R, Petri GL, Angellotti G (2024) *Int J Biol Macromol* 281:135865. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135865>
- [84]. Zhang Q, Lu Z, Su C (2021) *Bioresour Technol* 331:125015. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125015>
- [85]. Christu Paul R, Ramachandran B, Sushma G (2020) *Mater Today Proc* 33:4493-4497. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.715>
- [86]. Shahi N, Lee E, Min B, Kim D-J (2021) *Sensors* 21:4415. <https://doi.org/10.3390/s21134415>
- [87]. Yusuf NNAN, Kamarudin SK, Yaakub Z (2011) *Energy Convers Manag* 52:2741-2751. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.004>
- [88]. Severo IA, Siqueira SF, Deprá MC (2019) *Renew Sustain Energy Rev* 112:686-705. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.020>
- [89]. Suzihaque MUH, Alwi H, Kalthum Ibrahim U, (2022) *Mater Today Proc* 63:S490-S495. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.527>
- [90]. Wang H, Rehman KU, Liu X (2017) *Biotechnol Biofuels* 10:304. <https://doi.org/10.1186/s13068-017-0986-7>
- [91]. Vellaiyan S (2024) *Results Eng* 24:103332. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103332>
- [92]. Devarajan Y, D CS (2024) *Results Eng* 24: 103196. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103196>
- [93]. Razaq Z, Tousif MI, Noureen S (2024) *Heliyon* 10:e36851. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36851>
- [94]. Micic V, Jotanovic M (2015) *Zastita Mater* 56:403-408. <https://doi.org/10.5937/ZasMat1504403M>
- [95]. Ma'mun S, Prasertio MW, Anugrah AR (2024) *Chem Eng J Adv* 19:100616. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.100616>
- [96]. Abdellatief TMM, Ershov MA, Kapustin VM (2021) *Fuel* 291:120112. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.120112>
- [97]. Khounani Z, Nazemi F, Shafiei M (2019) *Energy Convers Manag* 201:112184. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112184>
- [98]. Mizik T, Gyarmati G (2021) *Clean Technol* 3: 19-36. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3010002>
- [99]. Bušić A, Mardetko N (2018) *Food Technol Biotechnol* 56. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.03.18.5546>
- [100]. Van Rooyen J, Mbella Teke G, Coetzee G (2024) *Fuel* 378:133026. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.133026>
- [101]. Kang Y-H, Zhang X-Q, Gao J (2021) *J Energy Inst* 99:88-96. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2021.08.006>
- [102]. Robak K, Balcerek M (2018) *Food Technol Biotechnol* 56. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.02.18.5428>
- [103]. Maliha A, Abu-Hijleh B (2023) *Energy Syst* 14: 1185-1216. <https://doi.org/10.1007/s12667-022-00514-7>
- [104]. Devi A, Bajar S, Kour H (2022) *BioEnergy Res* 15:1820-1841. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10401-9>
- [105]. Karagoz P, Bill RM, Ozkan M (2019) *Renew Energy* 143:741-752. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.045>
- [106]. Jin Y, Shi Z, Xu G (2020) *Ind Crops Prod* 145:112136. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112136>
- [107]. Audibert E, Floret J, Quintero A (2025) *Appl Energy* 380:125028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.125028>

Лигноцеллюлоздық материалдарды конверсиялау технологиялары мен қазіргі жағдайының анализі

Г.Е. Ергазиева^{1,2*}, М.М. Мамбетова^{1,2}, К.С. Бекбаев²,
А. Төлеуғазықызы³, А.Е. Даниярова²

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті,
әл-Фараби даңғылы, 71, Алматы, Қазақстан

²Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті,
Глинки к-сі, 20 А, Семей, Қазақстан

³С.Сейфуллин атындағы Қазақ агротехникалық зерттеу
университеті, Жеңіс даңғылы, 62, Астана, Қазақстан

АНДАТПА

Лигноцеллюлозды материалдар биоотын, химиялық қосылыстар және материалдар сияқты әртүрлі бағалы өнімдерді өндіру үшін перспективалы шикізат болып табылады. Бұл шолу мақаласында олардың конверсиясының негізгі аспектілері, соның ішінде лигноцеллюлозаның құрамы мен көздері, алдын ала өңдеудің заманауи технологиялары және соңғы өнімдер көрсетілген. Физикалық, химиялық және биологиялық әдістер сияқты өңдеудің әртүрлі тәсілдерінің артықшылықтары мен кемшіліктері, сондай-ақ олардың процестердің тиімділігі мен экологиялық тұрақтылығына әсері талқыланады. Мақалада лигноцеллюлозды материалдарды конверсиялау технологияларын дамытудың негізгі қиындықтары мен перспективалары көрсетілген, бұл оны жасыл химия және тұрақты даму саласындағы зерттеушілер мен әзірлеушілер үшін өзекті етеді.

Түйін сөздер: лигноцеллюлоза, биомасса, био-конверсия, биоотын.

Analysis of the current state and technologies of conversion of lignocellulosic materials

G.Y.Yergaziyeva^{1,2*}, M.M.Mambetova^{1,2}, K.S. Bekbayev²,
A.Toleugazykyzy^{2,3}, A. Daniyarova²

¹Al-Farabi Kazakh National University, 71, Al-Farabi ave.,
Almaty, Kazakhstan

²Shakarim University of Semey, 20A, Glinki str., Semey,
Kazakhstan

³S.Seifullin Kazakh Agrotechnical Research University, 62,
Zhenis ave., Astana, Kazakhstan

ABSTRACT

Lignocellulosic materials are promising feedstocks for obtaining a variety of valuable products such as biofuels, chemical compounds and materials. This review article presents the main aspects of their conversion, including the composition and sources of lignocellulose, modern pre-treatment technologies and final products. The advantages and disadvantages of different processing approaches such as physical, chemical and biological methods are discussed, as well as their impact on the efficiency and environmental sustainability of the processes. The article highlights the key challenges and prospects for the development of lignocellulosic material conversion technologies, making it relevant for researchers and developers in the field of green chemistry and sustainable development.

Keywords: lignocellulose, biomass, bioconversion, biofuels