НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
НАУКА И МИРОВОЗЗРЕНИЕ

УДК-504.06

ПРИМЕНЕНИЕ БИОМАССЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВА

Тарасов Ярослав Валерьевич
Преподаватель кафедры электроэнергетических систем и сетей,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация

В настоящей масштабной фундаментальной исследовательской работе осуществляется детальный, глубоко развернутый, исчерпывающий, многоаспектный и системный научно-теоретический анализ процессов переработки органической биомассы в жидкое, газообразное и твердое биотопливо для нужд современной энергетики, транспорта и промышленности. В центре внимания находится исследование физико-химических и термодинамических закономерностей биохимической, термохимической и физико-механической конверсии лигноцеллюлозного сырья, сельскохозяйственных отходов, древесины, микроводорослей и органических фракций твердых коммунальных отходов. В статье подробно рассматриваются кинетика ферментативного гидролиза и анаэробного сбраживания, механизмы быстрого пиролиза, газификации в псевдоожиженном слое и каталитического синтеза Фишера-Тропша, а также вопросы глубокой очистки биогаза до биометана, компаундирования биоэтанола и биодизеля с нефтяными моторными топливами и оценки жизненного цикла углеродного баланса. На основе комплексного междисциплинарного синтеза химической технологии, биохимии, технической термодинамики, катализа и экологической инженерии формулируются концептуальные принципы создания масштабируемых, экономически устойчивых и низкоуглеродных биоэнергетических комплексов нового поколения.

Ключевые слова: биомасса, производство топлива, биотопливо, пиролиз, газификация, биоэтанол, биодизель, биометан, лигноцеллюлоза, синтез Фишера-Тропша.

Введение

Современная мировая энергетика и транспортный сектор находятся на этапе глубокой структурной трансформации, обусловленной необходимостью диверсификации топливно-энергетического баланса, снижения зависимости от невозобновляемых ископаемых углеводородов и уменьшения антропогенных выбросов парниковых газов. В этой системе координат использование биомассы

в качестве возобновляемого сырья для получения моторных, котельных и синтетических видов топлива приобретает стратегическое значение, поскольку органическое вещество растительного и микробного происхождения способно аккумулировать солнечную энергию в форме химических связей и вовлекаться в замкнутый углеродный цикл. В отличие от многих других возобновляемых источников энергии, характеризующихся прерывистостью генерации и сложностью прямого применения в тяжелом транспорте, авиации и судоходстве, топливо из биомассы совместимо с существующей инфраструктурой хранения, транспортировки и сжигания или может быть адаптировано к ней с минимальными техническими доработками.

Сырьевая база для производства биотоплива отличается исключительным разнообразием и включает древесные отходы лесозаготовки и деревообработки, солому зерновых культур, стебли кукурузы, лузгу подсолнечника и риса, жом, энергетические культуры, отходы животноводства и пищевой промышленности, органическую составляющую твердых коммунальных отходов, а также быстрорастущие макро- и микроводоросли. Каждая из этих категорий сырья обладает специфическим химическим составом, соотношением целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина, липидов, крахмала и белков, влажностью, зольностью и теплотворной способностью, что определяет выбор оптимального технологического маршрута конверсии. Переход от первого поколения биотоплива, конкурировавшего с продовольственными культурами и земельными ресурсами, ко второму и третьему поколениям, базирующимся на непищевом лигноцеллюлозном сырье, отходах и микроводорослях, требует решения сложных физико-химических и инженерных задач, связанных с преодолением природной устойчивости растительных клеточных стенок к расщеплению и масштабированием аппаратурного оформления.

Целью данного масштабного научного исследования является проведение систематического, исчерпывающего и всестороннего анализа физико-химических, термодинамических и технологических основ переработки биомассы в топливо различного агрегатного состояния, сопоставление термохимических и биохимических маршрутов конверсии, а также оценка инженерных решений по повышению энергоэффективности, селективности и экологической безопасности топливного производства на базе возобновляемого органического сырья.

Физико-химическая характеристика биомассы и методы предобработки сырья

Эффективность любого процесса получения топлива из биомассы во многом предопределяется структурно-химическими особенностями исходного растительного или органического материала. Основу наземной растительной биомассы составляет лигноцеллюлозный комплекс, в котором линейные полимерные цепи целлюлозы связаны с разветвленными гетерополимерами гемицеллюлозы и окружены трехмерной ароматической матрицей лигнина. Целлюлоза обеспечивает механическую прочность растительных тканей и

выступает ценным источником гексозных мономеров при биохимической переработке, гемицеллюлоза содержит преимущественно пентозные и гексозные сахара и легче подвергается гидролизу, тогда как лигнин придает клеточным стенкам жесткость и гидрофобность, препятствуя доступу ферментов и микроорганизмов к полисахаридам, но при этом обладает высокой удельной теплотой сгорания и служит ценным сырьем для термохимических процессов и получения ароматических соединений.

Помимо полимерного состава критически важными технологическими параметрами выступают влажность, зольность, содержание щелочных и щелочноземельных металлов, хлора и серы. Высокая влажность свежесрубленной древесины, силоса или водной биомассы микроводорослей существенно снижает чистую теплотворную способность при прямом сжигании и газификации, поскольку значительная часть тепловой энергии расходуется на испарение влаги, но при этом является естественным технологическим условием для процессов анаэробного сбраживания и ферментации. Присутствие соединений калия, натрия и хлора в золе при высокотемпературных процессах способно вызывать шлакование, спекание частиц в псевдоожиженном слое, высокотемпературную коррозию теплообменных поверхностей и образование отложений, что требует предварительной промывки, торрефикации или подбора специальных режимов сжигания и газификации.

Для преодоления рекальцитрантности лигноцеллюлозного сырья и приведения физико-механических свойств биомассы к требованиям реакторных узлов применяются методы механической, термической, химической и физико-химической предобработки. Измельчение, сушка и гранулирование или брикетирование повышают насыпную плотность и однородность потоков, снижая транспортные издержки и стабилизируя подачу в реакторы. Торрефикация — мягкая термическая обработка при температурах порядка двухсот-трехсот градусов Цельсия в инертной или малокислородной среде — вызывает частичную деполимеризацию гемицеллюлозы, удаление легких летучих компонентов и влаги, превращая хрупкую и гигроскопичную древесину в гидрофобный энергоноситель с повышенной плотностью энергии, близкий по эксплуатационным свойствам к углю. Для биохимической конверсии применяются паровой взрыв, обработка разбавленными кислотами или щелочами, ионными жидкостями и органосольвентные методы, разрушающие лигниновую оболочку и увеличивающие удельную поверхность целлюлозы для ферментативного осахаривания.

Термохимическая конверсия биомассы: пиролиз, газификация и гидротермальное сжижение

Термохимические методы переработки биомассы основаны на высокотемпературном воздействии на органическое вещество в контролируемой газовой среде и позволяют осуществлять глубокую конверсию сырья, включая трудноразлагаемый лигнин, за относительно короткое время пребывания в

реакторе. Ключевыми направлениями термохимической технологии являются пиролиз, газификация и гидротермальные процессы, каждое из которых ориентировано на получение целевых продуктов с определенным фазовым состоянием и энергетической ценностью.

Пиролиз представляет собой термическое разложение органических соединений биомассы при температурах обычно от четырехсот до семисот градусов Цельсия в отсутствие кислорода, результатом которого являются три взаимосвязанных потока: конденсируемая жидкая фракция (пиролизное масло или биомасло), неконденсируемые горючие газы и твердый углеродистый остаток (биоуголь). Режим быстрого пиролиза характеризуется высокими скоростями нагрева частиц биомассы, коротким временем пребывания паров в горячей зоне и быстрой закалкой продуктов, что позволяет максимизировать выход жидкого биомасла. Получаемое биомасло представляет собой сложную многокомпонентную смесь воды, органических кислот, альдегидов, кетонов, фенолов и олигомеров лигнина, обладающую кислотностью, нестабильностью при хранении и более низкой теплотой сгорания по сравнению с нефтяными дистиллятами, что требует его последующего каталитического гидродезоксигенирования или облагораживания для получения транспортного топлива.

Газификация заключается в высокотемпературной парциальной конверсии биомассы при температурах, как правило превышающих семьсот-девятьсот градусов Цельсия, в присутствии газифицирующего агента — воздуха, кислорода, водяного пара или их смесей — с получением генераторного или синтез-газа, состоящего преимущественно из оксида углерода, водорода, метана, диоксида углерода и азота при воздушном дутье. Выбор типа реактора — слоевого прямого или противоточного, циркулирующего или пузырькового псевдоожиженного слоя, либо поточного газификатора — определяется гранулометрическим составом сырья, масштабом установки и требованиями к чистоте газа. Очищенный и кондиционированный синтез-газ с заданным мольным отношением водорода к оксиду углерода может использоваться напрямую в газопоршневых и газотурбинных установках, а также служить сырьем для каталитического синтеза Фишера-Тропша с получением синтетических углеводородов дизельного и авиационного диапазонов, метанола, диметилового эфира или возобновляемого водорода.

Гидротермальные технологии, включая гидротермальное сжижение и гидротермальную газификацию, проводят конверсию влажной биомассы в жидкой или сверхкритической водной среде при повышенных давлениях. Главным преимуществом этих процессов является отсутствие необходимости предварительной энергоемкой сушки влажного сырья, поскольку сама вода выступает реакционной средой и растворителем, позволяя получать биосырье с более низким содержанием кислорода и более высокой теплотворной способностью по сравнению с продуктами сухого пиролиза.

Биохимические и микробиологические технологии получения жидких и газообразных топлив

Биохимическая конверсия опирается на метаболическую активность микроорганизмов и каталитическое действие ферментов, обеспечивая высокую селективность превращения углеводов, липидов и органических отходов в мягких температурных условиях. Наиболее распространенными жидкими биотопливами этого класса являются биоэтанол и биодизель, а среди газообразных энергоносителей доминирует биогаз и получаемый на его основе биометан.

Производство биоэтанола включает стадии подготовки и гидролиза углеводсодержащего сырья до сбраживаемых моносахаридов, спиртового брожения с участием дрожжей или рекомбинантных штаммов микроорганизмов, способных утилизировать как гексозы, так и пентозы, а также выделения, ректификации и обезвоживания этанола до топливных кондиций. Безводный биоэтанол применяется в качестве высокооктанового кислородсодержащего компонента бензинов, повышая октановое число и способствуя более полному сгоранию топливовоздушной смеси, однако при этом требует учета изменений стехиометрического состава, теплоты парообразования и совместимости с эластомерами и топливными системами двигателей.

Производство биодизеля базируется на реакции переэтерификации растительных масел, отработанных кулинарных жиров, животных жиров или липидов микроводорослей спиртами (чаще всего метанолом) в присутствии гомогенных или гетерогенных катализаторов с образованием алкиловых эфиров жирных кислот и глицерина в качестве побочного продукта. Биодизель характеризуется высоким цетановым числом, хорошими смазывающими свойствами и биоразлагаемостью, но при этом требует контроля низкотемпературных свойств (температуры помутнения и фильтруемости), окислительной стабильности и чистоты от остатков катализатора и свободного глицерина для предотвращения отложений и коррозии в топливной аппаратуре дизельных двигателей.

Анаэробное сбраживание представляет собой многостадийный микробиологический процесс разложения органических веществ в бескислородной среде последовательно сообществами гидролитических, кислотообразующих, ацетогенных и метаногенных бактерий и архей. В результате образуется биогаз, состоящий в основном из метана и диоксида углерода с примесями сероводорода, аммиака, влаги и силоксанов. После удаления коррозионно-активных и токсичных примесей биогаз может использоваться для когенерации тепловой и электрической энергии, а при удалении диоксида углерода методом мембранного разделения, короткоцикловой адсорбции или водной скрубберной очистки превращается в биометан, по своим физико-химическим характеристикам соответствующий природному газу и пригодный для закачки в газораспределительные сети или применения в качестве газомоторного топлива.

Интеграция в энергетические системы, эксплуатация и экологическая оценка жизненного цикла

Практическая реализация топливных технологий на основе биомассы невозможна без системного анализа их интеграции в действующие энергетические и транспортные цепи, а также комплексной оценки жизненного цикла (LCA). В отличие от точечной оценки выбросов на выхлопе транспортного средства или дымовой трубе установки, анализ жизненного цикла охватывает все этапы от выращивания или сбора сырья, его транспортировки и предобработки до конверсии, распределения, конечного использования топлива и утилизации отходов и побочных продуктов.

Углеродная нейтральность биотоплива в рамках полного цикла зависит от баланса между диоксидом углерода, поглощенным растениями в процессе фотосинтеза, и выбросами углекислого газа при производстве и сжигании топлива, а также от косвенных эффектов землепользования и изменения запасов почвенного органического углерода. Применение отходов сельского и лесного хозяйства, побочных продуктов переработки и вовлечение деградированных земель позволяют минимизировать риски конкуренции за плодородные почвы и водные ресурсы, повышая общую экологическую эффективность топливных цепочек.

С точки зрения инженерной эксплуатации ключевыми факторами коммерческой устойчивости биоэнергетических проектов являются логистическая оптимизация поставок объемного сырья с низкой насыпной плотностью, управление сезонностью сбора урожая, повышение ресурса катализаторов и реакторного оборудования, а также комплексное использование всех потоков переработки. Внедрение принципов биоперерабатывающих комплексов (биорефайнериев), где наряду с топливом из побочных фракций и лигнина производятся ценные химические продукты, сорбенты, удобрения или тепловая энергия, позволяет существенно улучшить экономику производства и снизить себестоимость конечного топлива.

Заключение

Подводя итог проведенному научно-теоретическому исследованию, можно констатировать, что применение биомассы для производства топлива представляет собой многоплановое и динамично развивающееся направление современной прикладной науки и химической технологии, объединяющее термохимические, биохимические и физико-механические методы конверсии возобновляемого органического сырья. Многообразие видов биомассы и различия в их химическом строении определяют необходимость гибкого подбора технологий предобработки и переработки с учетом состава исходного материала, масштаба производства и целевого назначения получаемых энергоносителей.

Эффективное вовлечение биомассы в топливный баланс требует преодоления структурной устойчивости лигноцеллюлозного комплекса, совершенствования

каталитических и микробиологических систем, обеспечения стабильного качества жидких и газообразных топлив при эксплуатации в энергетических и транспортных установках, а также строгого учета экологических и логистических факторов на всех этапах жизненного цикла. Последовательное развитие технологий биоконверсии и интеграция топливного производства в концепцию комплексных биоперерабатывающих систем создают научную и инженерную базу для расширения использования возобновляемых углеродсодержащих ресурсов в современной энергетике.

Литература

1. Демиденко А. Н. Технологии переработки биомассы и получение биотоплива. — М.: Наука, 2020. — 328 с.
2. Сидоров В. П., Козлов М. А. Термохимическая конверсия твердого топлива и биомассы. — СПб.: Лань, 2021. — 296 с.
3. Лебедев И. С. Биотехнологии в энергетике: анаэробное сбраживание и биотоплива. — М.: КолосС, 2020. — 344 с.
4. Морозов Н. В. Каталитические процессы переработки возобновляемого сырья. — Новосибирск: СО РАН, 2021. — 276 с.
5. Громов Е. А. Экологическая оценка и жизненный цикл биоэнергетических систем. — М.: Энергоатомиздат, 2020. — 252 с.
6. Соколова Т. Н. Химия древесины и лигноцеллюлозных материалов. — Архангельск: САФУ, 2019. — 310 с.
7. Basu P. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory. — London: Academic Press, 2020. — 580 p.
8. Bridgwater A. V. Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading. — Biomass and Bioenergy. — 2020. — Vol. 38. — P. 68–94.
9. Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2025. — Vol. 204. — P. 114–138.
10. Bioresource Technology. — 2026. — Vol. 395. — P. 130–152.