

# Технология торрефикации для получения качественного твердого топлива из биомассы

В. М. Зайченко и А. Л. Шевченко

Объединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., 13, стр.2, Москва 125412, Россия

E-mail: shev@jiht.ru

Статья поступила в редакцию 10 августа 2023 г.

**Аннотация.** В работе показано, что энергетическая утилизация биоотходов является одним из возможных путей решения проблемы глобального потепления за счет сокращения выбросов углекислого газа, очистки земной поверхности от накопившихся отходов и обеспечения тепловой и электрической энергией регионов страны. Одним из перспективных способов получения высококачественного твердого биотоплива является торрефикация — низкотемпературный пиролиз. В результате такой термической обработки биомассы улучшаются ее топливные свойства: повышается теплотворная способность, насыпная плотность и гидрофобность, улучшается размоление пеллет для использования в стандартных пылеугольных котлах. Кроме того, биомасса является  $\text{CO}_2$ -нейтральным топливом. При сжигании растительной биомассы выделяется ровно столько углекислого газа, сколько было поглощено растениями в период роста. Замена традиционного каменного угля торрефицированным биотопливом позволит решить важные экономические и экологические задачи: сократить выбросы парниковых газов, очистить землю от отходов, повысить экономическую эффективность производства энергии. В ОИВТ РАН разработана энергоэффективная технология торрефикации, использующая внутреннюю энергию контролируемой экзотермической реакции и отходящих из газопоршневого электроагрегата газов в качестве бескислородного теплоносителя. Распределенное энергоснабжение на местных топливно-энергетических ресурсах с использованием когенерационных схем с одновременной выработкой тепловой и электрической энергии является более выгодным по сравнению с централизованным, поскольку тепловую энергию нельзя передавать на большие расстояния. В статье показано, что экономические показатели биоэнергетических систем с применением предложенной технологии торрефикации подтверждают безусловную эффективность внедрения данной технологии в систему децентрализованного энергоснабжения. <https://doi.org/10.33849/2023407>

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Использование биомассы в качестве топлива в настоящее время приобретает все большую актуальность. Под биомассой понимаются местные топливно-энергетические ресурсы, к которым относятся торф, древесные и сельскохозяйственные отходы, отходы жизнедеятельности различных видов. Согласно существующим оценкам, энергетическое использование имеющихся в нашей стране отходов биомассы позволит обеспечить порядка 80% потребности нашего государства в топливе. При использовании биомассы в качестве топлива не нарушается природный баланс  $\text{CO}_2$ . Растения поглощают  $\text{CO}_2$  в период роста, то же самое количество двуокиси углерода выделяется при сжигании биомассы. Дисбаланс  $\text{CO}_2$  возникает, когда на поверхность земли извлекается ископаемое топливо, которое изначально находилось в толще земли и, при этом механизма нейтрализации двуокиси углерода, которая в этом топливе содержится, в природе не существует.

## 2. ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УТИЛИЗАЦИЯ ОТХОДОВ БИОМАССЫ

В качестве примера, показывающего перспективность использования энергетической утилизации биоотходов, можно привести следующие данные. В 2022 году в России собрано порядка 150 млн т зерновых [1]. Это значит, что образовалось примерно 250 млн т соломы. По существующим нормам не более 40% соломы может быть использовано в качестве корма для скота и сожжено для получения удобрений. Остальное необходимо утилизировать. Оптимальным решением данной

задачи является использование в энергетике топлива, получаемого из данного вида отходов. Причем, сбор урожая и образование соломы происходит в конце лета, а максимальный спрос на топливо возникает зимой. То есть необходимо обеспечить сохранность собранной соломы в качестве топлива несколько месяцев без снижения его потребительских свойств. Эту задачу успешно решает торрефикация за счет придания биотопливу гидрофобных свойств.

В России в 2022 году собрано более 16 млн т подсолнечника [2]. Утилизация шелухи подсолнечника (около 2 млн т) тоже большая проблема. Также, в России производится миллионы тонн осадков сточных вод. В качестве удобрений в сельскохозяйственном производстве используется не более 7%. Основной метод утилизации — сохранение осадков на иловых картах или захоронение. В принципе, навоз — это тоже большая проблема настоящего времени. Сейчас уже не нужны органические удобрения в том количестве, в котором производились ранее. На уровне 1914–1915 годов все отходы жизнедеятельности домашних животных и птиц (в России) вносились в пахотные земли в виде удобрения. Тогда не было излишков. Это было при урожайности на уровне 15–16 центнеров зерновых с гектара. И существовал паритет между площадью пахотных земель, урожайностью и количеством отходов, которые путем использования в качестве удобрения утилизировались. Но с тех пор многое изменилось. Урожайность возросла до 40–60 ц/га. Значительно возросло потребление мяса на человека, соответственно, увеличилось количество производителей навоза и, самое главное, создана химическая индустрия, которая занимается производ-

ством минеральных удобрений. Эти минеральные удобрения дешевле и более удобны в использовании. Баланса (паритета) между пахотными землями, урожайностью и количеством производимой органики нет. Навоз должен быть утилизирован какими-то другими методами. Идет активный поиск новых технических решений по утилизации отходов жизнедеятельности.

Таких примеров можно привести много. На сегодняшний день актуальной и перспективной задачей является разработка технологии получения квалифицированных топлив при переработке различных видов отходов биомассы. Одним из перспективных решений данной проблемы является торрефикация [3, 4].

### 3. ТОРРЕФИКАЦИЯ

Торрефикация — нагрев в безокислительной среде перерабатываемого сырья до температур 250–300 °С. При торрефикации повышается теплотворная способность биотоплива. Например, для гранулированного топлива из древесных отходов с исходной теплотворной способностью 14–17 МДж/кг при торрефикации теплотворная способность возрастает до 19–24 МДж/кг. В результате термической обработки биотопливо становится гидрофобным, повышается его устойчивость к атмосферным и биологическим воздействиям. Это позволяет избежать применения специальных мер с целью предотвращения взаимодействия полученного продукта — торрефиката — с окружающей средой, при котором содержание влаги в топливе увеличивается и снижается качество биотоплива. Для использования биомассы в качестве топлива необходима ее предварительная подготовка. На сегодняшний день широко применяется процесс пеллетизации для получения гранул биотоплива. Пеллеты обладают рядом преимуществ, таких как удобство транспортировки и использования в специальных пеллетных котлах с автоматической подачей топлива. Однако, при воздействии влажности из окружающей среды, обычные пеллеты намокают, рассыпаются, теряют свою энергетическую ценность и перестают быть эффективным топливом. В результате торрефикации пеллеты приобретают свойство гидрофобности — сохраняют форму и калорийность, даже погруженные на длительное время в воду. За счет выхода летучих в процессе торрефикации повышается теплотворная способность, насыпная плотность и прочность. По своим характеристикам торрефикат приближается к свойствам каменного угля, а по некоторым параметрам, например зольности, превосходит ископаемое топливо. Торрефикат можно сжигать вместе с углем или даже заменив последний [5, 6]. Сравнение свойств различных видов твердого топлива представлено в таблице 1 [7].

Существует две основные схемы процесса торрефикации — прямой и непрямой нагрев. В схеме с прямым нагревом тепло передается через стенку реактора [8]. Все газовые продукты торрефикации направляются в камеру сгорания, из которой продукты сгорания направляются в теплообменный аппарат и нагревают промежуточный теплоноситель. В качестве промежуточного теплоносителя могут использоваться как высокотемпературное масло, так и перегретый пар. Более энергетически (и экономически) эффективной является схема с прямым нагревом, когда обрабатываемая биомасса непосредственно контактирует с бескислородным

нейтральным теплоносителем [7]. Использование в качестве нейтрального теплоносителя непосредственно продуктов сгорания накладывает определенные ограничения на организацию процесса сжигания топлива — концентрация кислорода в таком теплоносителе не должна превышать 3–4%, иначе возможно возгорание биосырья в процессе торрефикации. Исследования показали, что небольшое содержание кислорода в греющем теплоносителе допустимо, и даже улучшает энергетические характеристики процесса [9, 10]. Исследования по созданию эффективных технологий торрефикации активно проводились в зарубежных странах в течение примерно 30 лет. В последнее время наблюдается спад интереса к созданию технологий торрефикации. Связано это с тем, что в разрабатываемых технологиях преимущества, получаемые топливом из биомассы при торрефикации, не окупаются теми затратами, которые необходимы для его получения.

В принципе, ситуация, когда новые технические решения в энергетике не окупаются, для нашей страны, является в определенной степени традиционной [11]. В последние годы энергетика нашей страны не является рентабельной. Утрачена экономическая окупаемость сооружения энергетических объектов в приемлемые сроки. Введены специальные формы государственной поддержки строительства новых энергетических установок с использованием, так называемых, “договоров о предоставлении мощности” (ДПМ). Для того, чтобы для инвесторов, вложивших средства в строительство генерирующих энергетических объектов, сроки возврата инвестиций не превышали 15 лет, в стране осуществляется доплата из государственного бюджета. Таким образом, энергетика, которая ранее была в России одним из основных источников пополнения государственного бюджета, попала в число дотируемых отраслей экономики наряду с образованием, культурой, задачами обороны.

В ОИВТ РАН на базе результатов фундаментальных исследований природы экзотермических эффектов, возникающих в биомассе при нагреве в определенном диапазоне температур, сформулированы новые принципы организации процесса торрефикации, обеспечивающие снижение энергозатрат в 3–5 раз, по сравнению с существующими в мире технологиями [12]. Такой эффект достигается за счет использования внутренней энергии управляемой экзотермической реакции, что позволяет существенно снизить уровень подводимой тепловой энергии извне. Еще одним “ноу-хау”, повышающим энергоэффективность торрефикации, является использование в качестве бескислородного греющего теплоносителя отходящих газов от газопоршневого электроагрегата [13–18]. В этой схеме получаемый теплоноситель обладает необходимыми для организации процесса торрефикации свойствами — низкий температурный потенциал (600 °С вместо 2000 °С после обычной камеры сгорания), практически нулевую концентрацию кислорода, уровень давления, обеспечивающий прокачку сквозь слой обрабатываемой гранулированной биомассы. В работе [19] было проведено сравнение технологии торрефикации в псевдооживленном слое с технологией ОИВТ РАН с управляемой экзотермической реакцией. Показано, что последняя имеет в несколько раз более высокую энергоэффективность.

Таблица 1. Сравнительные характеристики различных видов топлива.

Характеристика	Щепа	Пеллеты	Торрефицированные пеллеты	Древесный уголь	Каменный уголь
Влажность, %	30–45	8–10	2–5%	1–5	10–20
Теплота сгорания, МДж/кг	9–12	15–16	20–24	30–32	23–28
Выход летучих, %	70–75	70–75	55–65	10–12	15–30
Фиксированный углерод, %	20–25	20–25	28–35	85–87	50–55
Насыпная плотность, кг/л	0.20–0.25	0.55–0.75	0.75–0.85	0.20	0.8–0.85
Объемная плотность энергии, ГДж/м <sup>3</sup>	2–3	7.5–10.4	15.0–18.7	6–6.4	18.4–23.8
Зольность, %	0.7–1.2	0.9–1.4	< 3	< 5	10–40
Содержание пыли	среднее	допустимое	допустимое	высокое	допустимое
Гигроскопичность	высокая	пониженная	низкая	низкая	низкая
Склонность к биологической деградации	высокая	пониженная	нет	нет	нет
Требования к размолу	повышенные	повышенные	обычные	обычные	обычные
Требования к хранению	высокие	средние	низкие	низкие	низкие
Стоимость транспортировки	высокая	умеренная	низкая	низкая	низкая

На рисунке 1 представлено сравнение по энергетическому балансу получения одного килограмма торрефиката для трех различных схем торрефикации:

1. Классическая схема с прямым сжиганием природного газа. Высокий тепловой потенциал продуктов сгорания (2000 °С) снижается до рабочей температуры торрефикации 250 °С путем отвода тепловой энергии. Непосредственно для торрефикации используется узкий температурный диапазон 250–150 °С.
2. Когенерационная схема с использованием в качестве теплоносителя выхлопных газов, отходящих от газопоршневого электрогенератора в реакторе торрефикации, с температурой ниже температуры начала развития экзотермических реакций. В этом случае высокий тепловой потенциал при сгорании природного газа используется (до 30%) для получения электроэнергии.
3. Когенерационная схема аналогична схеме 2 с использованием тепла управляемой экзотермической реакции. За счет выделяемой энергии экзотермической реакции в несколько раз снижаются энергозатраты на производство торрефиката и повышается производительность установки.

Использование разработок ОИВТ РАН позволяет экономически оправданно получать высококачественное торрефицированное топливо из биомассы. Это было подтверждено в ходе многочисленных экспериментов на установках института. Использование биомассы в виде топлива наиболее экономически выгодно для распределенной энергетики. По своим экономическим показателям распределенное энергоснабжение на местных топливно-энергетических ресурсах является более выгодным с экономической точки зрения по отношению к централизованным энергосистемам. Экономическая целесообразность определяется возможностью использования когенерационных схем, т.е. одновременной выработки тепловой и электрической энергии. Тепловую энергию нельзя передавать на большие расстояния. В силу этих причин источник энергии при когенерационной выработке должен быть расположен в непосредственной близости от потребителя. Переход на распределенное энергоснабжение является общемировой практикой. Применительно к условиям нашего го-

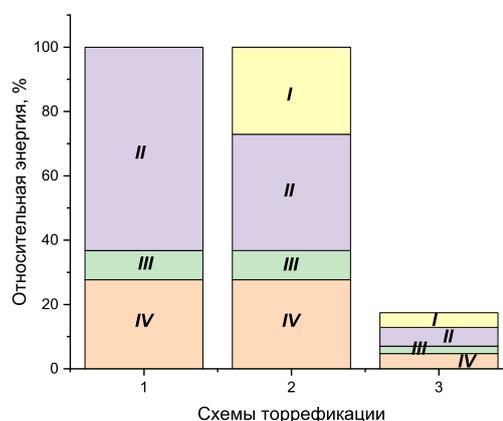


Рисунок 1. Распределение энергии при получении 1 кг торрефицированного продукта в трех различных схемах торрефикации.

1 — Классическая схема; 2 — Когенерационная схема; 3 — Схема с управляемой экзотермической реакцией.

I — электроэнергия; II — тепловая энергия; III — энергия на торрефикацию; IV — выбросы.

сударства, как уже указывалось выше, значительной ресурсной базой для местного энергоснабжения является биомасса. Местные топливно-энергетические ресурсы нерационально транспортировать на большие расстояния. Оценки показывают, что при перевозке местных топливно-энергетических ресурсов на расстояние более 100 км затраты на перевозку нивелируют выгоды от использования распределенных (местных) энергетических систем.

#### 4. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ

Первым шагом на пути практического внедрения разрабатываемых схем торрефикации биомассы предполагается создание крупномасштабной опытно-промышленной установки торрефикации, с производительностью по торрефицированному продукту порядка 1000 кг в час (7.5 тыс. т/год) и параллельной выработкой

тепловой и электрической энергии. Получение торрефиката по разрабатываемой технологии обеспечит высокие технико-экономические показатели энергокомплекса:

- установленная электрическая мощность, МВт — 1.2
- установленная тепловая мощность, Гкал/ч — 1.4
- требуемый полный объем инвестиций, млн руб. — 80.0
- чистый доход за расчетный период (NV), млн руб. — 450
- чистый дисконтированный доход (NPV), млн руб. — 140
- внутренняя норма доходности (IRR), % — 29.2
- срок окупаемости затрат (PP), лет — 4.6
- дисконтированный срок возврата инвестиций, лет — 5.7
- себестоимость отпускаемой электроэнергии, тыс.руб./МВтч — 2.77
- себестоимость отпускаемой тепловой энергии, тыс.руб./Гкал — 1.36

Согласно выполненным оценкам сто подобных энергоустановок могут обеспечить электрическую мощность 120 МВт и тепловую — 140 Гкал/ч, достаточные для энергоснабжения жилого района с населением 40–50 тыс. человек. При этом количество утилизируемых органических отходов биомассы составит 220–250 тыс. т в год при соответствующем сокращении потребления ископаемого угля. Проведение на первой стадии исследований опытно-промышленных испытаний разрабатываемой схемы позволит разработать техническую документацию, необходимую для организации серийного промышленного производства специального оборудования для реализации нового типа биоэнергоустановок.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена новая схема переработки биомассы с использованием процесса торрефикации. Данная схема имеет более высокие показатели технико-экономической эффективности по сравнению с технологиями, которые используются в настоящее время. В существующей практике данная схема аналогов не имеет. Эффективность создания биоТЭС при использовании технологии торрефикации, предложенной ОИВТ РАН, определяется тем, что чистый доход за расчетный период ее эксплуатации (20 лет) составляет 450 млн руб., т.е. в 5.6 раза больше стоимости вложенных инвестиций — 80 млн руб. Чистый дисконтированный доход за этот период, определяющий срок возврата инвестиций, составляет 140 млн руб., т.е. превышает сумму инвестиций в 1.8 раза. Без использования торрефикации, увеличивающей теплотворную способность биотоплива в 1.4 раза, все финансово-коммерческие показатели биоТЭС, будут, соответственно ниже. Кроме того, торрефикация, благодаря приобретению свойств гидрофобности, снимает проблему длительного хранения биотоплива, что весьма важно, т.к. многие виды биотоплива обладают свойством сезонности. Представленные экономические расчеты получены для некоторых обобщенных условий — наличие постоянных потребителей энергии и тор-

рефицированного продукта, регулярная поставка сырья (биоотходов), ценовая политика по средним ценам сегодняшнего дня. Для каждого района местные условия могут заметно отличаться и акцент на производимый биоэнергокомплексом продукт может быть смещен на тот или иной вид с выбором оптимальной структуры такой энергоустановки. Однако, представленные результаты показывают безусловную эффективность внедрения биоТЭС в системе распределенного энергоснабжения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <https://specagro.ru/news/202301/urozhay-zerna-v-rossii-v-2022-godu-sostavil-1538-mln-t>
2. <https://specagro.ru/news/202303/rosstat-podvel-okonchatelnye-itogi-sbora-selkhozkulturn-v-rf-v-2022-godu>
3. Валинеева А А, Масловский В А, Попов С К и Сви-стунув И Н 2021 *Вестник Московского энергетического института. Вестник МЭИ* 22–36
4. Зайченко В М, Ларина О М, Лицинер И И и Малова О В 2020 *Теплофизика высоких температур* 58 723–731
5. Bergman P C A, Voersma A R, Zwart R W R and Kiel J H A 2005 Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations *ECN Report*
6. Любов В К и Ивуть А Е 2016 *Вестник Череповецкого государственного университета* 74 16–20
7. Kleinschmidt C P 2011 *Overview of international developments in torrefaction* (Torrefaction Workshop)
8. Demenchenok T 2015 *Integration of biofuel production. How pyrolysis and torrefaction can be integrated: Master's thesis. Lappeenranta University of Technology, LUT School of Energy Systems* (Department of Bioenergy Technology)
9. Кох-Татаренко В С, Кузьмин С Н, Небыаев А В, Исьёмин Р Л, Михалёв А В и Милованов О Ю 2022 *Теплоэнергетика* 23–32
10. Shevchenko A L, Petrov A E, Sytchev G A and Zaichenko V M 2019 *Journal of Physics: Conference Series. The conference proceedings* 012091
11. Зайченко В М, Чернявский А А и Шевченко А Л 2021 *Энергетическая политика* 16–29
12. Shevchenko A L, Sytchev G A and Zaichenko V M 2020 *International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020* 9271198
13. Бессмертных А В, Зайченко В М, Косов В Ф и Синельщиков В А 2010 Способ пиролизной переработки биомассы с получением высококалорийных газообразного и жидкого топлив и углеродных материалов *Патент РФ* 2380395
14. Зайченко В М и Лавренов В А 2019 Установка пиролизной переработки твердых углеродсодержащих материалов *Патент РФ* 2698829
15. Бессмертных А В 2013 Комплекс энерготехнологический многофункциональный переработки биомассы *Патент РФ* 136799
16. Зайченко В М, Косов В Ф, Кузьмина Ю С, Марков А В и Морозов А В 2013 Энергетический комплекс с торрефикатором биомассы *Патент РФ* 136801
17. Зайченко В М, Косов В Ф, Кузьмина Ю С и Сычев В А 2016 Установка торрефикации гранулированной биомассы *Патент РФ* 161775
18. Зайченко В М, Ларина О М, Марков А В и Морозов А В 2017 Устройство для термической конверсии биомассы *Патент РФ* 175131
19. Директор Л Б, Зайченко В М, Исьёмин Р Л, Чернявский А А и Шевченко А Л 2020 *Теплоэнергетика* 60–69