

ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ

ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ ТОРРЕФИКАЦИЯ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ
НЕКОТОРЫХ ВИДОВ БИОМАССЫ¹

© 2022 г. В. С. Кох-Татаренко^а, *, С. Н. Кузьмин^а, А. В. Небышев^а, Р. Л. Исьмин^б,
А. В. Михалёв^б, О. Ю. Милованов^б

^а Тамбовский государственный технический университет, ул. Советская, д. 106, Тамбов, 392000 Россия

^б ООО «Чистая энергия», Мичуринская ул., д. 112, к. И, оф. 1, Тамбов, 392032 Россия

*e-mail: penergy@list.ru

Поступила в редакцию 17.03.2021 г.

После доработки 22.04.2021 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

В настоящее время все большее внимание уделяется декарбонизации энергетики и снижению в связи с этим потребления ископаемых топлив. Поскольку одной из насущных проблем современности является утилизация отходов, немалую часть которых составляет биомасса, актуальным становится повышение эффективности ее использования в качестве топлива. Торрефикация – одна из наиболее приемлемых технологий получения качественного топлива из биомассы, позволяющая при относительно небольших энергозатратах увеличить теплоту сгорания биотоплива, снизить его гидрофильность и повысить размолоспособность. Усовершенствовать процесс торрефикации можно при ее проведении в газовой среде с небольшим содержанием кислорода. Это позволит сократить как энергозатраты на процесс, так и его продолжительность. В работе представлены результаты исследования окислительной торрефикации трех видов мелкодисперсной биомассы: измельченной лузги подсолнечника, куриного помета и древесных опилок. Процесс проводится в кипящем слое с переходом биомассы в псевдооживленное состояние при воздействии дымовых газов температурой 250°C и с содержанием кислорода 2–3% (по объему). Исследования показали, что полидисперсный состав и сложная форма частиц биомассы позволяют обеспечить устойчивое псевдооживление в довольно узком диапазоне скоростей газа. Сам процесс окислительной торрефикации занимает от 5 до 15 мин в зависимости от вида биомассы. Столь широкий интервал времени обусловлен наличием или практическим отсутствием развития экзотермических реакций в зависимости от вида используемого сырья. Максимальный экзотермический эффект проявляется при окислительной торрефикации лузги подсолнечника, минимальный – куриного помета.

Ключевые слова: биомасса, окислительная торрефикация, кипящий слой, экзотермический эффект, продолжительность процесса торрефикации, повышение эффективности, энергозатраты, псевдооживленное состояние

DOI: 10.1134/S0040363622020023

При сжигании растительной биомассы выделяется такое же количество углекислого газа (CO₂), какое было поглощено растением за весь период его вегетации. Этот углекислый газ представляет собой углеродно-нейтральное легкодоступное топливо [1, 2], поскольку период выращивания растительной биомассы до ее сжигания не превышает нескольких десятилетий, в отличие от ископаемого топлива, формировавшегося миллионы лет. Однако биомасса в исходном состоянии имеет значительно более низкую теплоту сгорания, значительно более высокую влажность и небольшую насыпную плотность в сравнении с

ископаемым топливом [3, 4], что ограничивает ее энергетическое использование. Пеллетизированная биомасса лишена некоторых из перечисленных недостатков, но и она остается гидрофильной, что осложняет ее перевозку и хранение. К тому же пеллеты, несмотря на их широкое использование в бытовом теплоснабжении, не могут в больших масштабах применяться на крупных энергетических установках из-за высокой стоимости.

Влажность биомассы и содержание в ней летучих веществ можно понизить, а теплоту сгорания, гидрофобность и размолоспособность повысить путем термической обработки биомассы в бескислородной среде при температуре 200–300°C. Данный процесс называется торрефикацией. В

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (научный проект № 20-38-90013).

процессе торрефикации из исходной биомассы удаляется влага, в результате чего содержание кислорода в ней значительно уменьшается, поэтому при газификации торрефицированной биомассы образуются газообразные продукты с большей теплотой сгорания, чем при газификации исходной биомассы. Торрефицированная биомасса имеет более низкую скорость горения, чем исходная биомасса, что позволяет завершить процесс сжигания в топке котла и исключить возможность горения в притопочных дымоходах, минимизировав при этом опасность расплавления золы и образования плотных золовых отложений на конвективных поверхностях нагрева котла. Благодаря повышенной гидрофобности торрефицированной биомассы ее можно складировать не в закрытых помещениях, а на открытом воздухе под навесом, что существенно сокращает затраты на хранение такого биотоплива и упрощает работу с ним.

Имеются данные, что энергоресурсы, направленные на измельчение биомассы, в 3.5–4.0 раза превышают таковые при обработке угля [5]. Повысив размолоспособность торрефицированной биомассы, эти расходы можно сократить. Таким образом, на основании вышеперечисленных факторов можно заключить, что торрефицированная биомасса является более подходящим продуктом для совместного сжигания с углем, нежели исходная [6–10].

Торрефикация – это довольно энергозатратный процесс. Снизить расходы на эксплуатацию установок для нее можно путем использования воздуха и газообразных продуктов торрефикации вместо азота. Такой процесс носит название окислительной торрефикации. Проведенные исследования влияния концентрации кислорода в газе, подаваемом в реактор, и температуры торре-

фикации на свойства биомассы [11] показали, что изменение содержания O_2 в диапазоне от 2 до 21% (по объему) не оказывает значительного влияния на состав твердого продукта при низких температурах (менее 280°C). Это предотвращает окисление летучих веществ, выделяющихся в процессе торрефикации.

Авторы [12–14] определили, что характеристики окислительной торрефикации (массовый выход и свойства твердого продукта) существенно зависят от природы исходного сырья. В частности, они установили, что окислительная торрефикация является более подходящей для обработки древесной биомассы, нежели волокнистой (недревесной). Кроме формы частиц на процесс окислительной торрефикации влияет их размер, в том числе площадь поверхности обрабатываемых частиц, контактирующей с газовой средой [12].

Цель настоящей работы – исследование процесса окислительной торрефикации различных видов биомассы: древесных отходов, лузги подсолнечника и куриного помета. Причем для максимального увеличения площади поверхности контакта биомассы с кислородсодержащим газом ее предложено измельчать, а процесс торрефикации осуществлять в кипящем слое [15, 16].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования процесса окислительной торрефикации измельченной биомассы была создана экспериментальная установка (рис. 1). Она состоит из реактора с кипящим слоем, покрытого “рубашкой”, в которую подается жидкий теплоноситель (термомасло ТЛВ-330), нагреваемый в электрокотле. Реактор представляет собой стальную трубу диаметром 108 мм (толщина

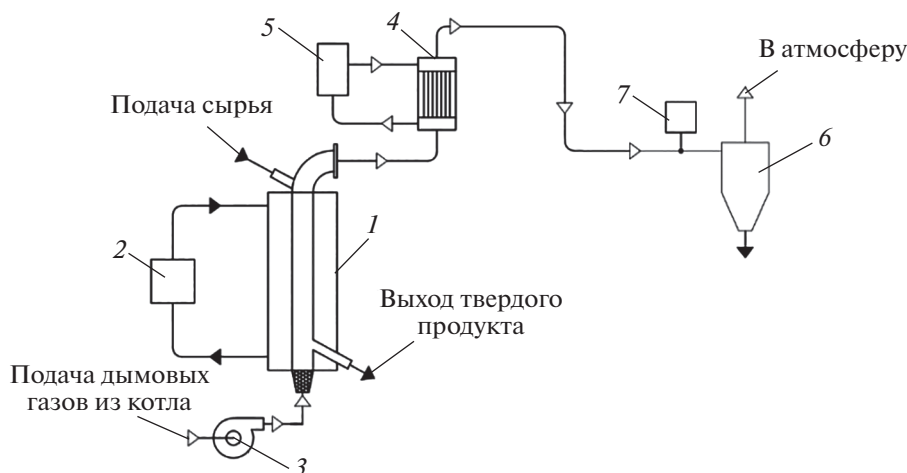


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процесса окислительной торрефикации биомассы. 1 – реактор; 2 – электрокотел; 3 – дымосос; 4 – теплообменник; 5 – бак – аккумулятор воды; 6 – циклон; 7 – электрохимический сенсор

Таблица 1. Характеристика исследованных видов биомассы

Характеристика биомассы	Лузга подсолнечника	Древесные опилки	Куриный помет
Доля частиц размером, %:			
менее 0.09 мм	0	1.83	3.76
0.09–0.20 мм	2.40	20.88	7.50
0.2–0.4 мм	9.72	47.60	16.19
0.4–1.0 мм	50.54	26.02	37.62
1.0–2.0 мм	30.84	3.04	33.13
2.0–5.0 мм	30.84	0.35	1.80
более 5.0 мм	0.02	0.29	0
Влажность, %	10.60	19.00	6.00

стенки 4 мм) и высотой 1000 мм. Сверху в реактор порциями через патрубок вводится исходная биомасса, снизу выводится торрефицированная биомасса.

Согласно результатам исследований [15, 16], в кипящем слое инертного материала обеспечить однородность частиц биомассы при торрефикации невозможно. Трудно также отделить частицы биомассы от инертного материала. Поэтому было принято решение отказаться от применения последнего.

В данной работе использовался реактор периодического действия, в котором кипящий слой образовывали измельченные частицы самой биомассы. Слой биомассы в реакторе переводился в псевдооживленное состояние дымовыми газами от котла, в котором сжигалось биотопливо (гранулы из лузги подсолнечника). Дымовые газы поступали в нижнюю часть реактора с помощью дымохода (на рис. 1 не показан). Для генерации дымовых газов использовался жаротрубно-дымогарный водогрейный котел мощностью 500 кВт, оборудованный топкой для сжигания гранул из лузги подсолнечника в кипящем слое.

Выходящие из реактора газы содержали конденсирующиеся и неконденсирующиеся газообразные продукты торрефикации биомассы. Эти газы охлаждались в теплообменнике водой, циркулирующей с помощью насоса (на рис. 1 не показан) между теплообменником и баком – аккумулятором воды. Образующийся конденсат удалялся из системы. Затем неконденсирующиеся газообразные продукты торрефикации механически очищались в циклоне и выбрасывались в атмосферу.

Перед началом экспериментов установка продувалась дымовыми газами, которые охлаждались в теплообменнике и после удаления из них влаги подвергались химическому анализу с помощью газоанализатора проточного типа Vario Plus Industrial (погрешность показаний составляет 5–

10% измеренного значения в зависимости от задействованного электрохимического сенсора).

Характеристики исследованных видов биомассы представлены в табл. 1.

Масса измельченных частиц лузги подсолнечника, помета и древесных опилок до и после торрефикации измерялась с помощью лабораторных весов Acom JW-1-200 RS 232 C (максимальная масса – 200 г, минимальная – 0.2 г, дискретность – 0.01 г). Влажность лузги определялась анализатором влажности Ohaus MB45 (погрешность $\pm 0.05\%$).

Для определения доли летучих веществ проводили термогравиметрический анализ (ТГА) с использованием термоанализатора NETSCH STA 409 PC/PG (чувствительность 0.002 мг). Зольность измеряли путем выжигания образца в муфельной печи при температуре 600°C до выхода на постоянную массу. Перед определением зольности, содержания летучих веществ и элементного состава образцы высушивали до относительной влажности 0.1%.

Анализ элементного состава (C, H, N, S) исследуемой биомассы до и после термической обработки осуществлялся на анализаторе Elementar Vario Macro Cube (погрешность 0.1%). Содержание кислорода C_O , % по массе в пересчете на сухое вещество определяли, исходя из следующего материального баланса:

$$C_O = 100 - (C_C + C_H + C_N + C_S + A),$$

где C_C , C_H , C_N , C_S – содержание в образце углерода, водорода, азота, серы; A – зольность сырья, % (по массе) в пересчете на сухое вещество. Эти данные использовались для определения теплоты сгорания исходной и торрефицированной биомассы.

После первых экспериментов по окислительной торрефикации биомассы выяснилось, что колпачок газораспределительной решетки, расположенной в нижней части реактора, забивается плотными отложениями, которые представляют

Таблица 2. Результаты наблюдений за переходом в псевдооживленное состояние слоя частиц измельченной лузги подсолнечника

Состояние слоя частиц биомассы по результатам визуальных наблюдений	Масса материала, загруженного в реактор, г	Высота слоя биомассы в реакторе, мм		Перепад давления в слое, Па	Скорость воздуха, отнесенная к поперечному сечению пустого реактора, м/с
		неподвижного	в состоянии псевдооживления		
Начало псевдооживления	218	100	220	226	0.75
Развитое псевдооживление	218	100	350	220	0.92
	327	160	370	360	0.80
	436	220	610	490	0.81
	763	370	900	940	1.40
Поршнеобразование	545	270	420	630	0.80
	654	320	630	750	0.75
	872	420	690	1030	1.14

собой сконденсировавшиеся серосодержащие вещества, выделившиеся из газообразных продуктов сжигания гранул лузги подсолнечника. Проблему удалось решить путем изменения конструкции колпачка.

Исследуемая биомасса представляла собой полидисперсную смесь частиц сложной геометрической формы. Для более детального изучения процесса их псевдооживления была создана установка, основным элементом которой был реактор диаметром 108 мм (внутренним диаметром 100 мм) и высотой 2000 мм. Стенки реактора были выполнены из акрилового стекла. Процесс псевдооживления в реакторе осуществлялся воздухом при комнатной температуре.

Установка дала возможность определить диапазон скоростей воздуха, при которых слой частиц биомассы находится в состоянии устойчивого псевдооживления. При исследовании процесса замена дымовых газов с $t = 200^\circ\text{C}$ на воздух с $t = 20^\circ\text{C}$ вполне оправдана, так как, согласно [17], соотношение между числами псевдооживления при 20 и 200°C можно оценить по значению корня квадратного из отношения плотностей газов при соответствующих температурах. Это соотношение для плотностей воздуха и дымовых газов при указанной температуре равно 1.23. Таким образом, можно заключить, что псевдооживление воздухом и дымовыми газами в данном случае происходит при примерно одинаковых числах псевдооживления. Результаты наблюдений приведены в табл. 2–4.

Анализ этих данных показал, что мелкодисперсные частицы биомассы, имеющие малую массу и сложную форму, стабильно псевдооживляются

в довольно узких диапазонах значений отношения начальной высоты слоя к диаметру реактора и скоростей газа. По этой причине в экспериментах по торрефикации высота неподвижного слоя частиц биомассы в реакторе составляла 100–170 мм, а скорость газа, отнесенная к сечению пустого реактора для торрефикации, — от 0.67 до 0.85 м/с при комнатной температуре.

Согласно данным, представленным в табл. 2–4, при поддержании скорости газа в диапазоне 0.67–0.85 м/с кипящий слой для всех трех видов биомассы (лузги подсолнечника, измельченного помета, древесных опилок) находится в состоянии стабильного псевдооживления. Поэтому в экспериментах по торрефикации скорость газа поддерживалась именно в этом диапазоне. При более высоких скоростях газа псевдооживление частиц того или иного вида биомассы становилось нестабильным. Поскольку скорость газа в слое может оказывать влияние на скорость торрефикации, для исключения влияния этого параметра было решено при псевдооживлении частиц всех трех видов биомассы поддерживать скорость газа в слое одинаковой.

Температура теплоносителя, подаваемого в “рубашку” реактора, составляла 250°C , а температура дымовых газов, направляемых в реактор, — 200°C . Дымовые газы в кипящем слое содержали примерно 8.5% паров воды и имели следующий химический состав, % (по объему):

Кислород	2–3
Диоксид углерода	16.0–17.3
Азот	70
Оксид углерода	0.75–1.25

Таблица 3. Результаты наблюдений за переходом в псевдооживленное состояние слоя частиц измельченного помета

Состояние слоя частиц биомассы по результатам визуальных наблюдений	Масса материала, загруженного в реактор, г	Высота слоя биомассы в реакторе, мм		Перепад давления в слое, Па	Скорость воздуха, отнесенная к поперечному сечению пустого реактора, м/с
		неподвижного	в состоянии псевдооживления		
Развитое псевдооживление	270	100	160	290	0.57
	405	160	200	420	0.42
	540	215	300	580	0.62
	675	255	400	780	0.62
Поршнеобразование	810	300	600	950	1.40
	945	350	500	1080	0.65
Нестабильное псевдооживление	1080	450	600	1270	0.60

Таблица 4. Результаты наблюдений за переходом в псевдооживленное состояние слоя древесных опилок

Состояние слоя частиц биомассы по результатам визуальных наблюдений	Масса материала, загруженного в реактор, г	Высота слоя биомассы в реакторе, мм		Перепад давления в слое, Па	Скорость воздуха, отнесенная к поперечному сечению пустого реактора, м/с
		неподвижного	в состоянии псевдооживления		
Стабильное псевдооживление	200	160	330	210	0.65
	200	170	350	216	0.80
	310	180	400	287	0.87
Начало поршнеобразования	413	250	530	330	0.95
Поршнеобразование	512	320	690	480	1.05
	630	420	976	570	1.15
	715	520	1350	660	1.27

Высокое содержание оксида углерода объясняется тем, что подачу дутьевого воздуха в котел ограничивали, чтобы снизить концентрацию кислорода в дымовых газах и исключить воспламенение биотоплива при торрефикации. Однако по выбросам оксида углерода работа котла соответствовала требованиям ГОСТ 30735-2001 [18], который устанавливает максимальное значение выбросов CO 24000 мг/м³ (в данной работе с учетом коэффициента разбавления 1.17, рассчитываемого как отношение массы растворенного вещества к массе растворителя, максимальная концентрация CO не превышала 14625 мг/м³).

В рассматриваемом диапазоне температур диоксид углерода не взаимодействует с углеродом и

поэтому наличие в дымовых газах CO₂ не должно было оказывать влияния на интенсивность процесса торрефикации.

Биомасса в реакторе выдерживалась в течение заданного времени, после чего термообработанные образцы выгружались в герметично закрываемую емкость для последующего анализа. Время нахождения биомассы в реакторе менялось и составляло 3, 5, 10 и 15 мин.

В ходе экспериментов непрерывно определялись температура кипящего слоя и перепад давления в нем с учетом сопротивления газораспределительной решетки (измерение проводилось с использованием дифференциального микроманометра Testo 521 с погрешностью ±0.4%).

Что касается газообразных продуктов, то газоанализатор Vario Plus Industrial опционально имеет возможность определять состав измеряемой среды температурой до 1700°C. Однако при торрефикации в газообразных продуктах может содержаться большое количество влаги, поэтому дымовые газы перед газоанализатором охлаждались в кожухотрубном теплообменнике в течение примерно 2 с до температуры ниже 100°C, что позволяло удалять из них влагу и обеспечивало стабильную работу газоанализатора. Из объема данных, выдаваемых газоанализатором, в дальнейшем анализе процесса торрефикации использовались только те, что свидетельствовали об изменении концентрации оксида углерода.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показано изменение во времени t температуры кипящего слоя помета, лузги и опилок в процессе торрефикации. Термопара, измеряющая температуру кипящего слоя, была установлена на несколько миллиметров выше слоя неподвижных частиц биомассы. При переходе в псевдооживленное состояние слой относительно сухих частиц куриного помета быстро прогревается и термопара фиксирует монотонный рост температуры до $t = 235^\circ\text{C}$ — некоего среднего значения между температурами псевдооживающего газа и горячего жидкого теплоносителя (см. рис. 2, а).

Для более влажных частиц лузги переход слоя в псевдооживленное состояние и его прогрев сопровождаются подсушиванием частиц и температура слоя остается постоянной в течение $\tau = 3.5$ мин, а затем начинается ее быстрый рост до $t = 350^\circ\text{C}$ (см. рис. 2, б).

Для еще более влажных частиц опилок псевдооживленное состояние влечет за собой обильное выделение паров воды. Температура слоя при этом падает и только через $\tau = 1.5$ мин после начала процесса начинает расти и достигает 220°C (см. рис. 2, в).

Как известно из [19–24], при нагреве биомассы возникают экзотермические реакции, в результате которых происходит разрушение входящих в состав биомассы гемицеллюлозы, целлю-

лозы и лигнина. Применительно к древесине эти реакции протекают в температурном диапазоне 200–500°C, но максимальное количество теплоты выделяется при 370°C [19], при температуре 230°C оно составляет от 425 до 1113 кДж/кг, при 250°C — от 22 до 1375 кДж/кг, а при 280°C — от 1160 до 1516 кДж/кг [25].

Поскольку в данной работе процесс торрефикации осуществлялся при температуре до 250°C, то заметный экзотермический эффект не наблюдался, что и подтверждает график изменения температуры кипящего слоя древесных частиц (см. рис. 2, в).

В представленных экспериментах использовались сосновые опилки, которые содержат 42–43% целлюлозы, 29–30% лигнина и 18–25% гемицеллюлозы [26].

Лузга подсолнечника содержит 23% целлюлозы, 18% гемицеллюлозы и 29% лигнина [24], т.е. по содержанию указанных веществ лузга подсолнечника близка к сосновым опилкам. Однако, как это видно из рис. 2, б, при торрефикации лузги подсолнечника наблюдается заметный экзотермический эффект, который позволяет слою частиц нагреваться до температуры, превышающей температуру оживающего агента на 150°C, а жидкого теплоносителя — на 100°C. Можно предположить, что этот эффект обеспечивают эфирные масла, которые выделяются из частиц лузги при нагреве.

В куриный помет лигнин, целлюлоза и гемицеллюлоза могут попасть с кормом или при смешивании его с подстилкой (древесными опилками либо измельченной соломой). Поэтому содержание этих веществ в нем намного меньше, чем в древесных опилках или в лузге подсолнечника. Так, куриный помет содержит всего 3.4% лигнина [27], поэтому экзотермический эффект при его торрефикации не наблюдается, что подтверждается данными, приведенными на рис. 2, а.

Анализ графиков изменения во времени t концентрации CO в газообразных продуктах торрефикации (рис. 3) и изменения перепада давления (рис. 4) в слое торрефицируемых частиц биомассы показывает, что данный процесс происходит в

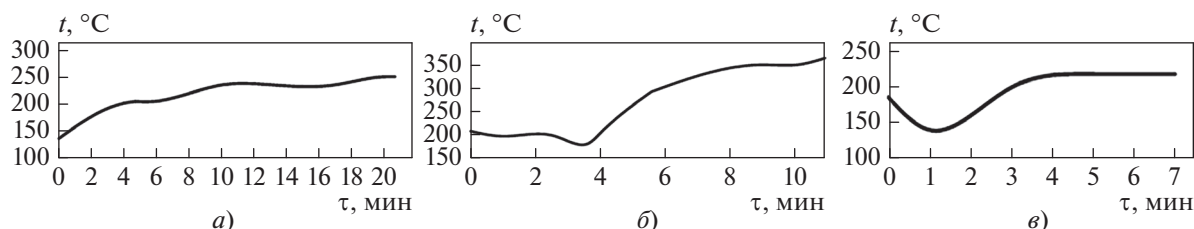


Рис. 2. Изменение во времени температуры кипящего слоя частиц биомассы. Биомасса: а — помет; б — лузга подсолнечника; в — опилки в процессе торрефикации

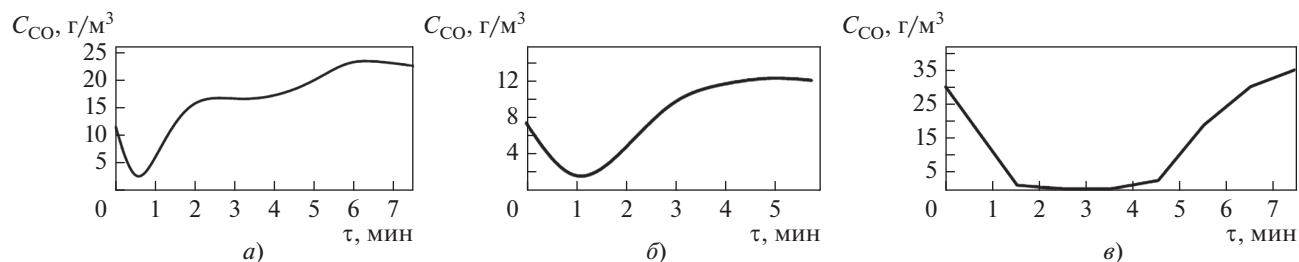


Рис. 3. Изменение во времени концентрации оксида углерода в неконденсирующихся газообразных продуктах в процессе окислительной торрефикации.

Биомасса: *а* – опилки; *б* – лузга подсолнечника; *в* – помет в кипящем слое

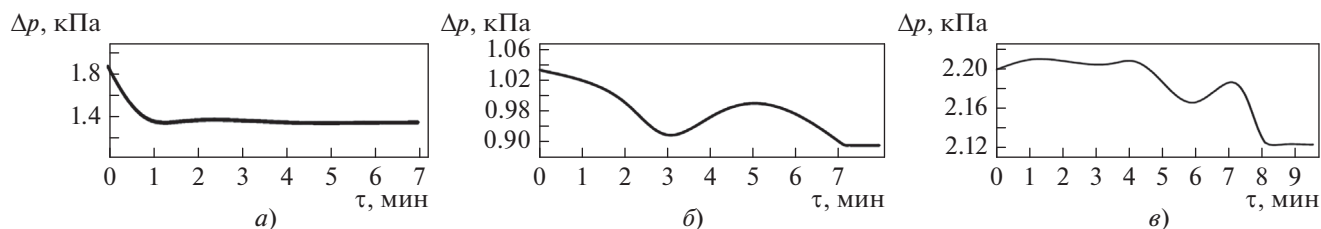


Рис. 4. Изменение во времени перепада давления в слое частиц при окислительной торрефикации.

Биомасса: *а* – лузга подсолнечника; *б* – опилки; *в* – помет

две стадии. После начала процесса торрефикации в течение 2 мин для слоя древесных опилок (см. рис. 3, *а*), частиц лузги подсолнечника (см. рис. 3, *б*) и помета (см. рис. 3, *в*) наблюдается резкое падение концентрации оксида углерода в газообразных продуктах. Это может быть связано с доокислением СО до СО₂ при температурах менее 200°С. Затем концентрация СО начинает расти и превышает концентрацию оксида углерода в дымовых газах, подаваемых на псевдооживление. Повышение содержания СО связано с процессами деструкции биомассы, приводящими к разрыву химических связей в макромолекулах и выходу летучих веществ при прогреве материала в процессе окислительной торрефикации.

Торрефикация биомассы сопровождается выделением влаги и части летучих веществ, что вызывает потерю массы обрабатываемой частицы.

Эту потерю можно оценить по изменению перепада давления в кипящем слое частиц биомассы, подвергаемых торрефикации. Завершение процесса происходит при неизменном значении перепада давления.

Исходя из этих соображений, можно предположить, что торрефикация завершается, когда перепад давления в слое перестает меняться. Для опилок данный процесс прекращается примерно через 1.5–2 мин (см. рис. 4, *а*), для частиц лузги – в основном через 7 мин (см. рис. 4, *б*), а для помета – через 9 мин (см. рис. 4, *в*) после начала опыта.

По изменению перепада давления в кипящем слое можно оценить степень завершенности процесса торрефикации биомассы. Этот факт подтверждается анализом данных, представленных в табл. 5, в которой отражены результаты измерения влажности, зольности и теплоты сгорания

Таблица 5. Результаты анализа влажности, зольности и теплоты сгорания образцов исходной биомассы (лузга подсолнечника/помет/древесные опилки) и продуктов их торрефикации

Показатель	Биомасса			
	исходная	торрефицированная		
Время, прошедшее с начала процесса, мин	–	3	5	10
Влажность, %	10.6/12.0/8.0	9.3/11.3/7.4	3.2/11.1/7.0	3.0/7.2/6.8
Зольность (при 550°С), %	3.7/16.6/0.5	4.9/17.8/0.54	6.1/18.1/0.6	6.6/28.9/0.6
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	16.0/16.7/22.3	18.4/17.7/24.1	20.7/18.2/24.7	20.9/18.7/24.9

Таблица 6. Высшая теплота сгорания биомассы (древесные опилки), МДж/кг, при различных временах выдержки в реакторе с кипящим слоем и температурах процесса

Температура процесса, °С	Время выдержки	
	30 мин	60 мин
200	17.66	21.30
300	18.39	24.07

образцов исходной биомассы трех видов и извлеченного из них биоугля.

Характеристики исследованных образцов твердых продуктов торрефикации близки к характеристикам подобных образцов, полученных в плотном, плотном движущемся и плотном перемешиваемом слоях. Так, в работе [28] описывается твердый продукт торрефикации гранул из лузги подсолнечника, который имел следующие характеристики:

Влажность, %	6.7
Зольность, %	6.1
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	20.7

Данный продукт был получен в плотном, движущемся сверху вниз слое гранул при торрефикации в течение 45 мин, но его характеристики близки к характеристикам полученного авторами данной статьи твердого продукта торрефикации из лузги подсолнечника.

В работе [29] при торрефикации древесных опилок (зольность исходного вещества – 1.3%, влажность – 7.72%) в среде азота были определены значения высшей теплоты сгорания при различных временах выдержки в реакторе с кипящим слоем и температурах процесса (табл. 6).

При торрефикации помета в бескислородной среде высшая теплота сгорания повышается с 17.03 до 19.07 МДж/кг (при протекании процесса в течение 60 мин при 220°С [30]).

ВЫВОДЫ

1. Окислительная торрефикация различных видов биомассы в кипящем слое, сформированном частицами самой измельченной биомассы и продуваемом дымовыми газами с низким содержанием кислорода, представляется возможной. Однако с учетом сложной формы частиц и низкой насыпной плотности биомассы стабильное псевдооживление может осуществляться в довольно узком диапазоне значений скоростей газа.

2. При окислительной торрефикации лузги подсолнечника наблюдается экзотермический эффект, связанный с выделением эфирных масел

и их неполным сгоранием. При торрефикации древесных опилок и куриного помета данная особенность либо отсутствует, либо проявляется очень слабо.

3. Окислительная торрефикация в кипящем слое в среде дымовых газов позволяет осуществить процесс за 2–10 мин и получить при этом твердый продукт, по характеристикам сопоставимый с продуктом торрефикации, получаемым в плотном движущемся слое.

4. Продолжительность окислительной торрефикации в кипящем слое можно контролировать изменением перепада давления в слое: прекращение его снижения свидетельствует о завершении процесса. Это утверждение относится, однако, к реакторам периодического действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **An assessment** of the torrefaction of North American pine and life cycle greenhouse gas emissions / P. McNamee, P.W.R. Adams, M.C. McManus, B. Dooley, L.I. Darvell, A. Williams, J.M. Jones // *Energy Convers. Manage.* 2016. V. 113. P. 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.006>
2. **A comparative** study of biomass pellet and biomass-sludge mixed pellet: energy input and pellet properties / L. Jiang, X. Yuan, Z. Xiao, J. Liang, H. Li, L. Cao, H. Wang, X. Chen, G. Zeng // *Energy Convers. Manage.* 2016. V. 126. P. 509–515. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.035>
3. **Lignocellulosic** biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review / S. Wang, G. Dai, H. Yang, Z. Luo // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2017. V. 62. P. 33–86. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2017.05.004>
4. **Pelletization** of torrefied sawdust and properties of torrefied pellets / H. Li, X. Liu, R. Legros, X.T. Bi, C.J. Lim, S. Sokhansanj // *Appl. Energy.* 2012. V. 93. P. 680–385. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.01.002>
5. **Biomass** torrefaction process review and moving bed torrefaction system model development / J.S. Tumuluuru, S. Sokhansanj, T.W. Christopher, D.B. Richard. Idaho National Laboratory, 2010. <https://doi.org/10.2172/1042391>
6. **Chen W.-H., Peng J., Bi X.T.** A state-of-the-art review of biomass torrefaction, densification and applications // *Renewable Sustainable Energy Rev.* 2015. V. 44. P. 847–866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.12.039>
7. **A review** of torrefaction of oil palm solid wastes for biofuel production / M.A. Sukiran, F. Abnisa, W.M.A. Wan Daud, N. Abu Bakar, S.K. Loh // *Energy Convers. Manage.* 2017 V. 149. P. 101–120. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.011>
8. **Investigation** of biomass torrefaction based on three major components: hemicellulose, cellulose, and lignin / D. Chen, A. Gao, K. Cen, J. Zhang, X. Cao, Z. Ma // *Energy Convers. Manage.* 2018. V. 169.

- P. 228–237.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.063>
9. **Effect** of torrefaction pretreatment and catalytic pyrolysis on the pyrolysis poly-generation of pine wood / D. Chen, Y. Li, M. Deng, J. Wang, M. Chen, B. Yan, Q. Yuan // *Bioresour. Technol.* 2016. V. 214. P. 615–622.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.04.058>
 10. **Combined** pretreatment with torrefaction and washing using torrefaction liquid products to yield upgraded biomass and pyrolysis products / D. Chen, J. Mei, H. Li, Y. Li, M. Lu, T. Ma, Z. Ma // *Bioresour. Technol.* 2017. V. 228. P. 62–68.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.12.088>
 11. **Biomass** torrefaction under different oxygen concentrations and its effect on the composition of the solid by-product / P. Rousset, L. Macedo, J.-M. Commandré, A. Moreira // *J. Anal. Appl. Pyrolysis.* 2012. V. 96. P. 86–91.
<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.03.009>
 12. **Non-oxidative** and oxidative torrefaction characterization and SEM observations of fibrous and ligneous biomass / W.H. Chen, K.M. Lu, W.J. Lee, S.H. Liu, T.C. Lin // *Appl. Energy.* 2014. V. 114. P. 104–113.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.045>
 13. **Torrefaction** and low-temperature carbonization of woody biomass: evaluation of fuel characteristics of the products / S.W. Park, C.H. Jang, K.R. Baek, J.K. Yang // *Energy.* 2012. V. 45. P. 676–685.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.024>
 14. **Torrefaction** and low temperature carbonization of oil palm fiber and eucalyptus in nitrogen and air atmospheres / K.M. Lu, W.J. Lee, W.H. Chen, S.H. Liu, T.C. Lin // *Bioresour. Technol.* 2012. V. 123. P. 98–105.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.096>
 15. **Oxidative** torrefaction of spruce-pine-fir sawdust in a slot-rectangular spouted bed reactor / Z. Wang, H. Li, C.J. Lim, J.R. Grace // *Energy Convers. Manage.* 2018. V. 174. P. 276–287.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.08.035>
 16. **Wang Z.** Biomass torrefaction in slot-rectangular spouted beds: Dis. for the degree of doctor of philosophy (chemical and biological engineering). Vancouver: University of British Columbia, 2017.
<https://doi.org/10.14288/1.0362042>
 17. **Забродский С.С.** Высокотемпературные установки с псевдооживленным слоем. М.: Энергия, 1971.
 18. **ГОСТ 30735-2001.** Котлы отопительные водогрейные теплопроизводительностью от 0.1 до 4.0 МВт. Общие технические условия. Бишкек: Межгосударственный Совет по стандартизации, метрологии и сертификации, 2001.
 19. **Крылова А.Ю., Горлов Е.Г., Шумовский А.В.** Получение биоугля пиролизом биомассы // *Химия твердого топлива.* 2019. № 6. С. 55–64.
<https://doi.org/10.1134/S0023117719060100>
 20. **Соколовская Ю.Г., Фалюшин П.Л.** Пиролиз отходов мебельного производства // *Природопользование.* 2011. № 20. С. 143–146.
 21. **Characteristics** of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis / H. Yang, R. Yan, H. Chen, D. Lee, C. Zheng // *Fuel.* 2007. V. 86. P. 1781–1788.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>
 22. **Influence** of secondary reactions on the heat of pyrolysis of biomass / C. Gomez, E. Velo, F. Barontini, V. Cozzani // *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009. V. 48. Is. 23. P. 10222–10233.
<https://doi.org/10.1021/ie9007985>
 23. **Milosavljevic I., Oja V., Suuberg E.M.** Thermal effects in cellulose pyrolysis: relationship to char formation processes // *Ind. Eng. Chem. Res.* 1996. V. 35. Is. 3. P. 653–662.
<https://doi.org/10.1021/ie950438l>
 24. **Ohliger A., Förster M., Kneer R.** Torrefaction of beechwood: A parametric study including heat of reaction and grindability // *Fuel.* 2013. V. 104. P. 607–613.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.112>
 25. **Shevchenko A.L., Sytchev G.A., Zaichenko V.M.** Possibility of the use of exothermic-reactions heat from thermal destruction of biomass to increase the energy efficiency of the torrefaction process // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1147. P. 012093.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1147/1/012093>
 26. **Синицин А.П., Синицина О.А.** Биоконверсия возобновляемой растительной биомассы на примере биотоплива второго поколения: предобработка, ферменты, процессы, экономика, поколения // *Успехи биол. химии.* 2021. Т. 61. С. 347–414.
 27. **Корзникова М.В., Блохин А.Ю., Козлов Ю.П.** Оценка степени конверсии органического вещества отходов животноводства и птицеводства в биогаз (на примере РФ) // *Вестник ВГУ. Сер.: Химия. Биология. Фармация.* 2008. № 2. С. 108–111.
 28. **Applicability** of torrefied sunflower husk hellets in small and medium scale furnaces / N. Kienz, N. Margaritis, R. Isemin, V. Zaychenko, C. Strasser, D.-S. Kourkoumpas, P. Grammelis, D. Klimov, O. Larina, S. Sytchev, A. Mikhalev // *Waste Biomass Valorization.* 2021. V. 12. P. 2579–2596.
<https://doi.org/10.1007/s12649-020-01170-7>
 29. **Product** characteristics of torrefied wood sawdust in normal and vacuum environments / Y.-K. Chih, W.-H. Chen, H.C. Ong, P.L. Show // *Energies.* 2019. V. 12. Is.20/3844.
<https://doi.org/10.3390/en12203844>
 30. **Pudova Ya.D., Larina O.M., Zaichenko V.M.** Effect of temperature process at chicken litter torrefaction on properties of products obtained: Report on the XXXIV Intern. Conf. on Interaction of Intense Energy Fluxes with Matter. Elbrus, Kabardino-Balkaria, Russian Federation, 1–6 March 2019 // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2019. V. 1556.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1556/1/012020>

Oxidative Torrefaction of Some Biomass Kinds in a Fluidized Bed

V. S. Kokh-Tatarenko^{a, *}, S. N. Kuz'min^a, A. V. Nebyvaev^a, R. L. Is'emin^b,
A. V. Mikhalev^b, and O. Yu. Milovanov^b

^a Tambov State Technical University, Tambov, 392000 Russia

^b ООО Chistaya Energiya, Tambov, 392032 Russia

*e-mail: penergy@list.ru

Abstract—Recent years have seen increasingly growing attention to decarbonizing the energy sector and decreasing, owing to this policy, the consumption of fossil fuels. Since recycling of waste is among the urgent problems at present, then, seeing that biomass accounts for a significant fraction of waste, efforts taken to more efficiently use it as fuel are becoming of issue. Torrefaction is one of the most acceptable technologies for obtaining high-quality fuel from biomass, the application of which makes it possible to increase the heating value of biofuel, decrease its hydrophilicity, and improve its grindability, all with relatively moderate energy expenditures. The torrefaction process can be further improved by performing it in a gaseous medium with some content of oxygen. This will make it possible to decrease both the energy expenditures for conducting the process and the time taken to perform it. The article presents the results from studying the oxidative torrefaction of three kinds of finely dispersed biomass: ground sunflower husk, chicken litter, and wood sawdust. The process is performed in a fluidized bed with biomass fluidization by subjecting it to smoke gases at a temperature of 250°C and with the oxygen content equal to 2–3 vol %. The study results have shown that, given the polydispersed composition and complex shape of biomass particles, their stable fluidization is possible in a rather narrow range of gas velocities. The oxidative torrefaction process itself takes from 5 to 15 min for its completion, depending on the biomass kind. Such a wide interval of time is due to the presence or almost complete absence of exothermal reactions developing in the process depending on the kind of raw material used. The maximal and minimal exothermal effects take place in performing oxidative torrefaction of sunflower husk and chicken litter, respectively.

Keywords: biomass, oxidative torrefaction, fluidized bed, exothermal effect, torrefaction process duration, efficiency improvement, energy expenditures, fluidized state