

УДК 662.739

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТОРРЕФИКАЦИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УПРАВЛЯЕМОЙ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ

© 2022 г. В. М. Зайченко, А. Л. Шевченко*

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

**E-mail: s1246626@yandex.ru*

Поступила в редакцию 30.03.2021 г.

После доработки 07.07.2021 г.

Принята к публикации 23.11.2021 г.

В работе анализируются особенности реализации процесса торрефикации по разработанной в Объединенном институте высоких температур РАН технологии с использованием внутренней энергии управляемой экзотермической реакции. Данная технология позволяет в несколько раз сократить потребление энергии на процесс торрефикации. В экспериментах на установке и при численном моделировании процесса выявлено колебательное изменение температуры обрабатываемой биомассы. Представлен механизм управления режимными параметрами процесса торрефикации с использованием эффекта экзотермического выделения тепла, обеспечивающий сглаживание температурных колебаний при высокой энергоэффективности процесса.

DOI: 10.31857/S0040364422020090

ВВЕДЕНИЕ

Использование биомассы в качестве топлива приобретает все большее значение в настоящее время. К биомассе относятся древесные и сельскохозяйственные отходы, отходы жизнедеятельности различных видов. Это местный топливно-энергетический ресурс, объемы которого на многих территориях достигают значительных величин. При использовании биомассы в качестве топлива не нарушается природный баланс CO_2 . Растения поглощают углекислый газ в период роста, то же самое количество двуокиси углерода выделяется в атмосферу при сжигании топлив из биомассы. Дисбаланс CO_2 наступает, когда на поверхность извлекается топливо, которое изначально находилось в толще земли, при этом механизма нейтрализации углерода, который в таком топливе содержится, в природе не существует. При сжигании ископаемого топлива в атмосферу выбрасывается избыточная для экобаланса двуокись углерода.

Биомасса – это также значительное количество отходов, энергетическая утилизация которых является оптимальным направлением сокращения вредного антропогенного влияния на природное равновесие.

Одной из технологий получения из биомассы твердых энергетических топлив является торрефикация – нагрев в безокислительной среде перерабатываемого сырья из биомассы до температур 250–300°C. При торрефикации повышается теплотворная способность биотоплива, снижается вес. Например, для гранулированного древес-

ного топлива (пеллет) с исходной теплотворной способностью 14–17 МДж/кг при торрефикации теплотворная способность возрастает до 19–24 МДж/кг. В результате термической обработки существенно повышается гидрофобность биотоплива и устойчивость к атмосферным и биологическим воздействиям [1]. Последнее позволяет избежать необходимости соблюдения специальных условий при хранении и транспортировке топлив из биомассы с целью предотвращения их контакта с воздушной средой, при котором содержание влаги в топливах увеличивается.

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ТОРРЕФИКАЦИИ

Торрефицированное биотопливо может служить заменой ископаемому углю в традиционных топках, обладая близкими к последнему теплотехническими свойствами, но при этом меньшей зольностью и содержанием серы, а также являясь CO_2 -нейтральным топливом. При сгорании биотоплива растительного происхождения выделяется столько же углекислого газа, сколько было поглощено из атмосферы в процессе роста растений [2].

Термическая переработка биомассы, а именно древесины, имеет многовековую историю. В XV–XIX веках для получения древесного угля, в частности для металлургического производства, использовался так называемый процесс углежжения. Углежжение – это процесс, когда древесина складывалась в кучи либо в яму и поджигалась, при распространении горения эти кучи засыпа-

лись землей, таким образом они изолировались от доступа воздуха. При нагреве до температур порядка 300°C в древесине происходили реакции экзотермического выделения тепла, за счет которого осуществлялся процесс карбонизации с получением древесного угля [3]. Управление данным процессом было достаточно сложным и опасным. В процессе углежжения древесины образовывались водород и окись углерода, которые накапливались под наружным покрытием перерабатываемой древесины. Неконтролируемое скопление данных газов могло приводить к взрывам. Количество получаемого древесного угля и его свойства определялись температурными режимами процесса при экзотермическом разогреве перерабатываемой биомассы. С целью получения угля требуемого качества необходимо осуществлять контроль за режимными параметрами процесса. Это представляло достаточно трудную задачу и требовало высокой квалификации углежогов. С конца XIX в. с развитием производства металлургического кокса из угля процесс углежжения уже не использовался.

В настоящее время торрефикация рассматривается как перспективный процесс переработки биомассы с получением качественных твердых топлив. Исследования по созданию технологий торрефикации проводятся во многих научных центрах мира [4–9]. Но до настоящего времени промышленных технологий торрефикации не создано. Насколько можно судить из анализа литературных данных, главной причиной этого является то, что существующие разработки в области торрефикации не окупаются при их промышленном использовании, т.е. выгоды, получаемые от использования торрефицированного топлива, не компенсируют затрат на его получение.

Главной задачей при создании конкурентно-способной промышленной технологии является снижение затрат энергии при производстве торрефицированного топлива.

В Объединенном институте высоких температур РАН разработана новая энергоэффективная технология торрефикации биомассы, в основе которой лежит использование энергии экзотермического эффекта, которая выделяется при пиролизе биомассы [10, 11].

На основе этой технологии создана экспериментальная установка [12], реактор с подвижным слоем которой представляет собой вертикальный теплоизолированный стальной цилиндр объемом 80 л, снабженный заслонками, отделяющими секции загрузки и охлаждения, производительностью порядка 150 кг/ч торрефицированной продукции.

Сверху в реактор засыпается предварительно высушенная при температурах 120–130°C биомасса (пеллеты). Сушка осуществляется за счет использования тепла отходящих газов процесса. В ниж-

нюю часть реактора подается горячий теплоноситель заданной температуры (250–280°C), а в секцию охлаждения – бескислородный охлаждающий агент (с температурой 30°C). По высоте реактора установлены термопары для контроля и управления процессом торрефикации. По мере прогрева нижнего слоя до заданной контрольной температуры открывается заслонка и порция торрефицированных пеллет выгружается в секцию охлаждения. На ее место сверху из загрузочного бункера поступает порция такого же объема исходной высушенной и подогретой до температуры 120°C биомассы. При взаимодействии биомассы, остающейся в реакторе после частичной выгрузки, с газами, которые используются для нагрева, и за счет экзотермического эффекта температура в слое повышается до 280–300°C. Снова следует частичная выгрузка биомассы и загрузка свежих порций из сушильного аппарата. Таким образом, в установке реализуется квазинепрерывный режим торрефикации. Как показали эксперименты, за счет экзотермических эффектов энергоэффективность процесса возрастает примерно в 4–6 раз по сравнению с традиционным процессом торрефикации, когда температура в рабочей зоне реактора ограничивалась до 250°C, производительность установки составила 40 кг/ч при расходе теплоносителя, на 40% большем по сравнению с режимом с управляемой экзореакцией. При подобном сокращении потребления энергии процесс торрефикации становится экономически оправданным.

Использование эффекта экзотермического разогрева сопряжено с определенными сложностями. Термодеструкция биомассы сопровождается эндо- и экзотермическими реакциями [13], тепловая энергия которых пропорциональна скорости этих реакций и имеет экспоненциальную зависимость от температуры [14]. При пиролизе, например, древесных отходов при 270–300°C преобладают экзотермические реакции (деструкция гемицеллюлозы). Подъем температуры за счет экзоэффекта носит лавинообразный характер. Использование выделяющейся при этом тепловой энергии требует четкого контроля и управления процессом с целью ограничения роста температуры и исключения перехода режима торрефикации в углежжение. В представляемой технологии это осуществляется за счет быстрой циклической выгрузки слоя торрефицированной биомассы с очагом развивающегося экзотермического разогрева в секцию охлаждения. В зависимости от выгружаемого объема торрефицированной продукции период циклической выгрузки может составлять от нескольких секунд до нескольких минут. Чем меньше выгружаемый объем, тем меньше период и меньше амплитуда температурных колебаний. Чем выше уровень экзотермического разогрева и чем на большую величину температура в

контрольной точке превышает температуру греющего теплоносителя, тем выше энергоэффективность и производительность установки.

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОЛЕБАНИЯ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

При многочасовом эксперименте на установке торрефикации ОИВТ РАН в переходном режиме наряду с температурными колебаниями, связанными с периодической выгрузкой, проявились низкочастотные колебания температуры. На рис. 1 изображено изменение температуры в различных сечениях реактора торрефикации в процессе этого эксперимента 20 марта 2018 г.

На первом этапе осуществлялся прогрев всей установки. Температура теплоносителя на входе в секцию торрефикации постепенно поднималась до 275°C , температура биомассы в нижних слоях реактора достигала 290°C , превысив температуру теплоносителя, а в верхних — 240°C . С этого момента началась периодическая выгрузка — при достижении контрольной температуры (290°C) открывалась на короткое время нижняя заслонка для выгрузки очередной порции 8 л торрефицированных пеллет, такой же объем “холодной” (120°C) исходной биомассы загружался сверху. Весь столб биомассы сдвигался вниз, снижая общий уровень температуры во всех сечениях по высоте реактора. Температура в нижних слоях достаточно быстро за счет экзотермической реакции (за несколько десятков секунд) достигала контрольного значения и опять срабатывала заслонка — выгружалась следующая порция готовой продукции. Таким образом организуется циклический квазинепрерывный режим, а на графике температуры формируются высокочастотные колебания с амплитудой около 10°C и периодом 2–3 мин.

В верхних слоях реактора ($0.9H$) начало периодической выгрузки отмечено резким падением температуры с 270 до 110°C . Дальнейший прогрев средних и верхних слоев биомассы, в отличие от нижних, происходит с существенным запаздыванием. Тепловая энергия в эти слои поступает за счет конвективного потока греющего теплоносителя и выделяющихся пиролизных газов. Характерное время распространения данной тепловой волны обратно пропорционально общей теплоемкости загруженной биомассы и составляет для данного эксперимента десятки минут. С определенного температурного уровня сначала в нижних слоях, затем — выше активизируется экзотермическая реакция, за счет чего темп нагрева возрастает лавинообразно, и в какой-то момент времени температура в средних слоях оказывается выше, чем в нижних. На температурной кривой наблюдается верхний пик. В этот момент вы-

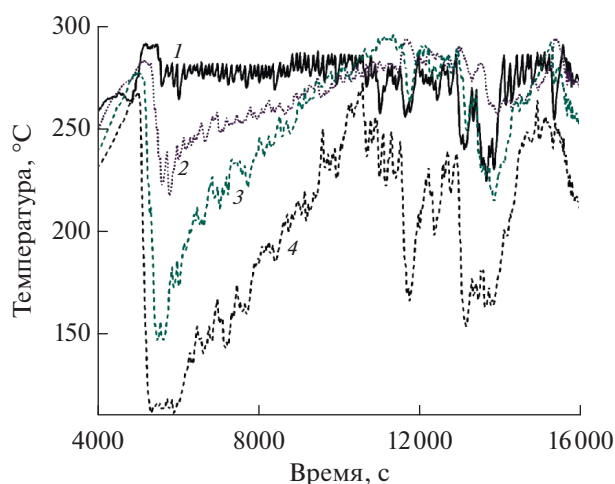


Рис. 1. Изменение температуры в различных сечениях реактора в эксперименте на установке торрефикации: 1 — $0.1H$, 2 — $0.33H$, 3 — $0.67H$, 4 — $0.9H$.

грузка очередной порции торрефицированной биомассы из нижних слоев в зону охлаждения не снижает температуру в контрольной точке, так как в эту область сдвигаются слои с более высокой температурой. Для обеспечения необходимого температурного уровня в контрольной точке частота и объем выгрузки автоматически возрастают и реактор быстрее заполняется свежими, “холодными”, порциями сырья, что приводит к общему снижению температуры в реакторе. На температурной кривой этот момент характеризуется спадом. Затем постепенно тепловая волна поднимается вверх — происходит общий рост температуры. Формируются низкочастотные колебания.

Для сечений, расположенных на уровне $1/3$ и $2/3$ высоты, наблюдаются двухчастотные колебания — высокочастотные с периодом выгрузки очередной порции торрефиката и амплитудой порядка 10°C и низкочастотные с периодом около часа и амплитудой более 100°C .

На рис. 1 видно, что примерно через 3 ч от начала эксперимента тепловая волна экзотермической реакции резко идет вверх — температура в сечении $1/3H$ оказалась выше, чем температура на входе, а в сечении $2/3H$ еще выше. В этот момент выгрузка одной порции ~8 л нижнего слоя пеллет в зону охлаждения не позволила остановить экзотермическую реакцию, так как очаг реакции оказался выше. Чтобы погасить развитие “экзотермики” и не допустить общего перегрева, блок управления автоматически сократил период выгрузки до нескольких секунд. После прохождения температурного пика частота выгрузки вернулась к значениям 2–3 мин. Примерно через час на температурном подъеме эта ситуация повторилась.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
ТОРРЕФИКАЦИИ

Численные эксперименты по моделированию переходных процессов в реакторе торрефикации гранулированной биомассы с подвижным слоем проводились в предположении двухступенчатой модели деструкции биомассы [14], в которой первичные реакции распада исходной биомассы эндотермические, а вторичные – экзотермические.

Предполагается, что скорости реакций описываются формулой Аррениуса [15]:

$$k_i = A_i \exp\left(-\frac{E_i}{RT}\right),$$

где k_i – константа скорости соответствующей реакции (1/с), A_i – предэкспоненциальный множитель (1/с); E_i – энергия активации (Дж/моль); $R = 8.314$ Дж/(моль К) – универсальная газовая постоянная.

Процессы термохимического преобразования биомассы в цилиндрическом реакторе торрефикации с прямым нагревом сырья греющим газом описываются системой дифференциальных уравнений сохранения массы и энергии для каждого из рассматриваемых компонент в твердой и газовой фазе в приближении нестационарной одномерной модели, при этом предполагается, что изменение исследуемых параметров по радиусу реактора незначительно по сравнению с изменениями по высоте.

Математическая модель представлена системой дифференциальных уравнений в частных производных:

уравнение сохранения массы для твердой фазы (исходной, активированной и торрефицированной биомассы)

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial \rho_a}{\partial \tau} = S_a = -(k_t + k_g + k_c) \rho_a,$$

$$(1 - \varepsilon) \frac{\partial \rho_c}{\partial \tau} = S_c = k_c \rho_a + k_{c2} \rho_t;$$

уравнение сохранения массы для газовой фазы

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_t}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(U \rho_t) = S_t = k_t \rho_a - (k_{c2} + k_{g2}) \rho_t,$$

$$\varepsilon \frac{\partial \rho_g}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(U \rho_g) = S_g = k_g \rho_a + k_{g2} \rho_t;$$

уравнение энергии для твердой фазы

$$(1 - \varepsilon_s)(\rho_a C_a + \rho_c C_c) \frac{\partial T_s}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_s^{\text{eff}} \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \alpha(T_s - T_v) + q;$$

уравнение энергии для газовой фазы

$$\varepsilon_s(\rho_g C_g + \rho_t C_t) \frac{\partial T_v}{\partial \tau} = (\rho_g C_g + \rho_t C_t) \left(U \frac{\partial T_v}{\partial x} \right) + \alpha(T_s - T_v);$$

общий баланс массы

$$G_{\text{out}} - G_{\text{in}} = \int_0^H (S_a + S_c + S_t + S_g) dx.$$

Здесь ρ , C , λ – плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности соответственно; T – температура; τ – время; x – координата по высоте реактора; ε – пористость; α – коэффициент теплоотдачи; U – скорость; G – массовый расход газа; q – внутренний источник тепла (тепловые эффекты эндотермических и экзотермических реакций); k – скорость химической реакции; S – источник массы; H – высота реактора; индексы: s – твердая фаза, v – газовая фаза (основной теплоноситель, пиролизные газы и пары смол), a – исходная биомасса, c – торрефикат, g – газ, t – пары смол, eff – эффективная величина, in – параметры на входе в реактор, out – параметры на выходе из реактора.

Внутренний источник тепла определяется суммой тепловых эффектов всех реакций:

$$q = -(k_t \Delta h_t + k_g \Delta h_g + k_c \Delta h_c) \rho_a - (k_{g2} \Delta h_{g2} + k_{c2} \Delta h_{c2}) \rho_t, \tag{1}$$

где Δh_i – удельная энтальпия соответствующей реакции (Дж/кг); нижние индексы $t, g, c, g2, c2$ – реакции образования паров смол, пиролизных газов, торрефиката, вторичные реакции преобразования смол в газ и торрефикат.

Гранулы биомассы представляются твердыми сферами одинаковых диаметров с регулярной упаковкой в предположении, что диаметр сфер и пористость слоя в процессе низкотемпературного пиролиза не меняются. В этом приближении коэффициент эффективной теплопроводности зернистого слоя с учетом теплопроводности газовой фазы и излучения можно рассчитать в приближении модели Кунни [16, 17].

Для расчета коэффициента теплоотдачи используется выражение для эффективного числа Нуссельта, предложенное в [18] для зернистого слоя при значениях эффективного числа Рейнольдса $\text{Re}_e > 30$:

$$\text{Nu}_e = 0.39 \text{Pr}^{1/3} \text{Re}_e^{0.64}.$$

Числа Нуссельта и Рейнольдса рассчитываются по эффективному гидравлическому диаметру, учитывающему удельную поверхность частиц.

Энергоэффективность процесса торрефикации характеризуется удельными энергозатратами на получение 1 кг торрефиката [19]:

$$\eta = \frac{G_g \Delta H_g}{G_s},$$

где G_s – производительность реактора, G_g – массовый расход греющего газа, ΔH_g – уменьшение энтальпии теплоносителя в реакторе.

Численные эксперименты выполнялись с использованием программы [20] для экспериментальных условий на установке ОИВТ РАН. Кинетические параметры и тепловые эффекты реакций (1) взяты из работы [14].

На рис. 2 изображены расчетные кривые изменения температуры биомассы во времени в процессе прогрева и выхода реактора на квазистационарный режим в различных сечениях по высоте.

На первой стадии прогрева наблюдается плавный рост температуры биомассы по всей высоте реактора. При достижении контрольной температуры (300°C) в нижних слоях торрефикации примерно через 800 с выполняется первая выгрузка – выгружается порция торрефицированных пеллет в зону интенсивного охлаждения. Весь столб оставшейся биомассы опускается вниз, более холодные слои смещаются в зону подачи горячего теплоносителя, сверху засыпается порция такого же объема исходного сырья с температурой 120°C, наблюдается снижение температуры во всех сечениях реактора.

В процессе прогрева на начальной стадии температура в верхних слоях реактора поднялась до 240°C. Затем с началом выгрузки торрефицированной биомассы и загрузки свежих порций исходного сырья с температурой 120°C начинается перестройка температурного профиля по высоте реактора. Наиболее резкое снижение температуры наблюдается в верхних слоях реактора. Температура в нижних слоях достаточно быстро за счет экзотермической реакции (за несколько десятков секунд) достигает контрольного значения и опять срабатывает заслонка – выгружается следующая порция готовой продукции. Формируются высокочастотные температурные колебания с амплитудой около 10°C.

За счет тепловой инерции переход от стадии первоначального прогрева к рабочему квазистационарному режиму сопровождается тепловой “раскачкой” – низкочастотными температурными колебаниями с периодом ~20 мин и амплитудой несколько десятков градусов. В связи с тем, что теплоноситель подается снизу, разогрев нижних слоев происходит в большей степени, чем средних и верхних слоев. На входе в реактор терморегулятор поддерживает постоянную температуру газового теплоносителя, и поэтому в этой области амплитуда температурных колебаний биомассы минимальна и составляет несколько градусов. В верхние слои реактора тепловая волна доходит с существенным запозданием и амплитуда темпе-

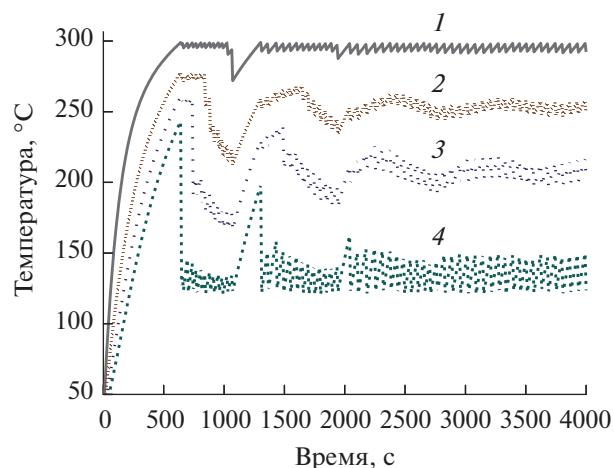


Рис. 2. Изменение температуры биомассы в процессе выхода на стационарный режим в различных сечениях по высоте реактора: 1 – 0.1H, 2 – 0.33H, 3 – 0.67H, 4 – 0.99H.

ратурных колебаний здесь существенно больше. В представленном варианте квазистационарный рабочий режим устанавливается через 2–3 периода низкочастотных колебаний, что составляет ~1 ч. При этом удельные энергозатраты на производство 1 кг торрефиката составили $\eta = 84$ кДж/кг.

Наличие низкочастотных колебаний (тепловой “раскачки”) в переходных режимах торрефикации обусловлено именно экзотермическими реакциями, которые вызывают лавинообразный локальный перегрев отдельных слоев биомассы. Такой переходный процесс характеризуется положительной обратной связью – небольшое увеличение температуры приводит к экспоненциальному росту темпа прогрева. Переходные режимы термодеструкции биомассы из одного в другое равновесное состояние, в которых экзоэффект не наблюдается, осуществляются без тепловой “раскачки”.

Численные эксперименты показали, что при определенном сочетании режимных параметров, когда экзотермический перегрев (разность температур в контрольной точке и теплоносителя на входе в реактор) превысил определенное значение, эти колебания могут стать незатухающими и установившийся режим не достигается (рис. 3).

Значение температуры на всех уровнях реактора от нижних слоев (0.1H) до верхних (0.99H) изменяется с амплитудой до 180°C и периодом ~20 мин. При этом удельные энергозатраты возрастают в полтора раза ($\eta = 117$ кДж/кг), а отдельные слои биомассы находятся недостаточное время при температуре торрефикации (выше 250°C), не обеспечивая равномерность термообработки сырья.

В установке ОИВТ РАН для управления процессом торрефикации с использованием экзотер-

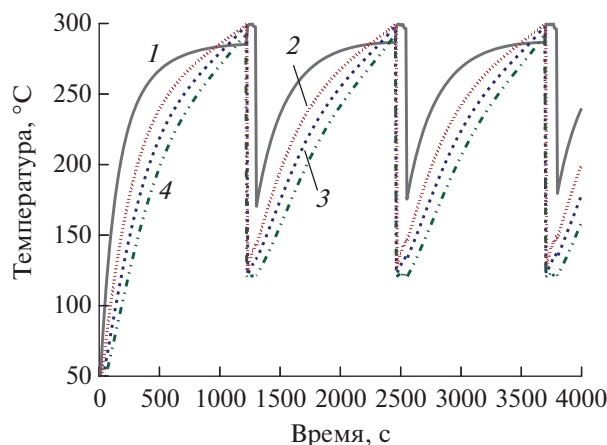


Рис. 3. Незатухающие температурные колебания при переходном режиме от прогрева к циклической выгрузке: 1–4 – см. рис. 2.

мической реакции предусмотрено два блока управления: задание необходимой температуры теплоносителя на входе в реактор и управление выгрузкой определенного объема торрефицированных пеллет с очагом развивающейся экзотермической реакции.

Для сглаживания тепловой “раскачки” переходный процесс необходимо проводить с переменными режимными параметрами. Циклическая выгрузка после стадии прогрева должна начинаться без экзотермического перегрева, т.е. когда температура в контрольной точке равна температуре греющего теплоносителя, и при минимальных объемах выгружаемой продукции. Затем по мере прогрева всего реактора экзотермический перегрев и объем выгружаемых порций

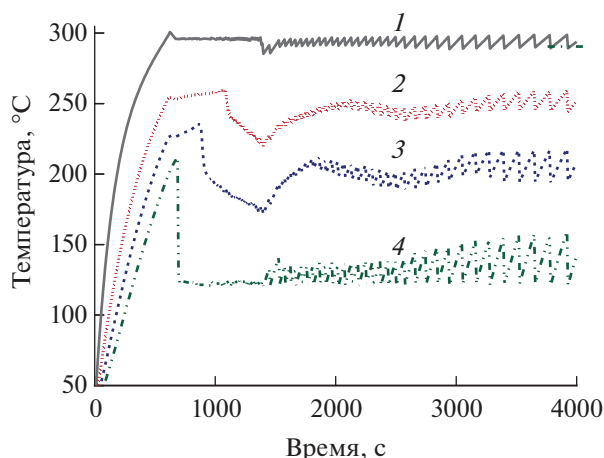


Рис. 4. Изменение температуры при переходном режиме от прогрева к циклической выгрузке: 1–4 – см. рис. 2.

возрастает, тем самым повышая энергоэффективность и производительность установки.

На рис. 4 показано изменение температуры в различных сечениях реактора при переходном режиме после 700 с прогрева с плавным ростом в течение 40 мин выгружаемых объемов от 0.5 до 3.5 л и экзотермического перегрева за счет снижения входной температуры теплоносителя от 300 до 275°C.

При таком режиме низкочастотные температурные колебания в верхних и нижних слоях реактора практически полностью подавлены, в средней части реактора амплитуда таких колебаний снижена до 50°, а переходный процесс ограничен одной волной. Кроме того, плавное изменение режимных параметров позволяет повысить энергоэффективность процесса. Удельные энергозатраты в таком режиме составили менее 80 кДж/кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Хотя авторам неизвестны работы, в которых описывается использование эффекта экзотермического разогрева перерабатываемого материала при торрефикации, анализ существующих в литературе схем экспериментальных установок показывает, что эффект экзотермического разогрева в существующих установках по торрефикации наблюдался. Об этом свидетельствует наличие в данных установках специальной системы отвода тепла из реакционной зоны, которая состоит из теплообменников, по которым пропускается теплоноситель, отводящий тепловую энергию экзотермических реакций [21].

Разработанная в ОИВТ РАН технология торрефикации с использованием управляемого экзотермического эффекта позволяет существенно снизить энергозатраты на получение готового продукта, что делает производство торрефицированной продукции экономически выгодным.

Результаты выполненных исследований свидетельствуют о том, что экзотермическая реакция, используемая в представленной технологии, обладает “своенравным” характером, вызывая трудно контролируемый лавинообразный рост температуры, а в переходных режимах еще и тепловую раскачку. Видимо, в силу этих причин в существующих торрефикационных установках стараются не допускать развития экзотермической реакции, ограничивая рабочую температуру процесса и отводя выделяющееся тепло.

Предложен механизм управления процессом торрефикации с экзотермическим эффектом, обеспечивающий повышение энергоэффективности процесса и плавные без тепловой раскачки переходные режимы работы реактора. Для использования внутренней энергии и контроля за экзотермической реакцией в представленной технологии применяются два блока управления: управление

температурой теплоносителя на входе в реактор и управление периодом выгрузки и объемом выгружаемой порции готовой продукции. Автоматика установки контролирует не только текущую температуру в нижних сечениях зоны торрефикации, но и температурную тенденцию с учетом тепловой инерции всей установки, плавно меняя параметры на входе, объем выгружаемой продукции и частоту выгрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Nunes L.J.R., Matias J.C.O., Catalão J.P.S.* Torrefaction of Biomass for Energy Applications From Fundamentals to Industrial Scale. Acad. Press, 2017. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04530-0>
2. *Basu P.* Biomass Gasification and Pyrolysis. Practical Design and Theory. Elsevier Inc., 2010.
3. *Козлов В.Н.* Теория углежжения. М., Л.: РАН, 1941.
4. *Wei-Hsin Chen, Po-Chih Kuo.* Study on Torrefaction of Various Biomass Materials and its Impact on Lignocellulosic Structure Simulated by a Thermogravimetry // *Energy*. 2010. V. 35. № 6. P. 2580.
5. *Prins M.J., Ptasinski K.J., Janssen F.J.J.G.* Torrefaction of Wood. Part 1. Weight Loss Kinetics // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2006. V. 77. № 1. P. 28.
6. *Basu P., Sadhukhan A.K., Gupta P., Rao S., Dhungana A., Acharya B.* An Experimental and Theoretical Investigation on Torrefaction of a Large Wet Wood Particle // *Bioresour. Technol.* 2014. V. 159. P. 215.
7. *Prins M.J., Ptasinski K.J., Janssen F.J.J.G.* Torrefaction of Wood. Part 2. Analysis of Products // *J. Anal. Appl. Pyrolysis*. 2006. V. 77. № 1. P. 35.
8. *Hakkou M., Pétrissans M., Gérardin P., Zoulalian A.* Investigations of the Reasons for Fungal Durability of Heat-treated Beech Wood // *Polym. Degrad. Stab.* 2006. V. 91. № 2. P. 393.
9. *Директор Л.Б., Зайченко В.М., Синельщиков В.А.* Численное моделирование энерготехнологического комплекса с реактором торрефикации // *ТВТ*. 2017. Т. 55. № 1. С. 133.
10. *Зайченко В.М., Крылова А.Ю., Сычев Г.А., Шевченко А.Л.* Термические эффекты при торрефикации биомассы // *Химия твердого топлива*. 2020. Т. 54. № 4. С. 44.
11. *Зайченко В.М., Сычев Г.А., Шевченко А.Л.* Экзотермические эффекты низкотемпературного пиролиза биомассы // *Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2017*. Сб. ст. по матер. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Севастополь, 11–15 сент. 2017 / Под ред. Омельчук Ю.А., Ляминой Н.В., Кучерик Г.В. Севастополь: ФГАОУ ВО “Севаст. гос. ун-т”, 2017. С. 494.
12. *Зайченко В.М., Марков А.В., Морозов А.В., Сычев Г.А., Шевченко А.Л.* Устройство по торрефикации гранулированной биомассы с воздушным подогревом. Патент РФ № 2690477. Б.И. № 16. 2019.
13. *Yang H., Yan R., Chen H. et al.* In-depth Investigation of Biomass Pyrolysis Based on Three Major Components: Hemicelluloses, Cellulose and Lignin // *Energy Fuels*. 2006. V. 20. № 1. P. 388.
14. *Park W.Ch., Atreya A., Baum H.R.* Experimental and Theoretical Investigation of Heat and Mass Transfer Processes During Wood Pyrolysis // *Combust. Flame*. 2010. V. 157. № 3. P. 481.
15. *Anca-Couce A.* Reaction Mechanisms and Multi-scale Modelling of Lignocellulosic Biomass Pyrolysis // *Prog. Energy Combust. Sci.* 2016. V. 53. P. 41.
16. *Kunii D., Smith J.M.* Heat Transfer Characteristics of Porous Rocks // *A.I.Ch.E. Journal*. 1960. V. 6. № 1. P. 71.
17. *Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А.* Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы. Л.: Химия, 1979. 176 с.
18. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
19. *Директор Л.Б., Зайченко В.М., Исьёмин Р.Л., Чернявский А.А., Шевченко А.Л.* Сравнение эффективности реакторов низкотемпературного пиролиза биомассы // *Теплоэнергетика*. 2020. Т. 67. № 5. С. 60.
20. *Шевченко А.Л., Директор Л.Б.* Программа расчета теплофизических параметров реактора термической конверсии биомассы. (PYRBM). Свид. о гос. рег. программ для ЭВМ № 2018664704 от 29.10.2018.
21. *Передерий С.Э.* Будут ли в России производить торрефицированные пеллеты? // *ЛесПромИнформ*. 2020. № 1(147). С. 122. https://lesprominform.ru/media/_protected/journals_pdf/19906/lpi_147.pdf