

УДК 621.314

Усенко А.Ю., Губинский М.В., Федоров С.С.

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПИРОЛИЗА БИОМАССЫ
В ПОТОКЕ ГОРЯЧЕГО ВОЗДУХА**

Одним из наиболее перспективных возобновляемых источников энергии является биомасса. Биомасса применяется в качестве сырья для производства энергии и топлива. Переработка биомассы в энергетических целях имеет большое значение также и для экологии Земли, так как способствует очистке окружающей среды от загрязнения городскими и сельскохозяйственными отходами.

Существует несколько вариантов переработки биомассы. Данная статья посвящена способу переработки биомассы методом окислительного пиролиза. Последний имеет ряд преимуществ перед такими способами переработки отходов, как прямое сжигание и газификация. Во-первых, реализация пиролиза требует более низких температур (280-300 °С). Причем подвод теплоты необходим только в начальной стадии процесса. Далее процесс сопровождается экзотермическими реакциями. Во-вторых, теплота сгорания получающегося в результате переработки пиролизного газа составляет до 13,3 МДж/кг, что вдвое превышает аналогичный показатель для генераторного газа. В-третьих, возможно получение дополнительного экономического эффекта от реализации коксового остатка.

На кафедре промышленной теплоэнергетики Национальной Металлургической Академии Украины была создана опытная установка, позволяющая исследовать процесс пиролиза биомассы в потоке горячего воздуха [3]. Также процесс пиролиза был описан при помощи математической модели. В качестве отходов биомассы исследовалась лузга подсолнечника.

Опытная установка (рис.1) представляет собой камеру пиролиза 5, имеющая подобную конфигурацию, диаметром 0,1 м, общей длиной 5,7 м. В камеру 5 нагретый воздух подается снизу, проходя через слой керамических колец, необходимый для выравнивания профиля скоростей воздуха по сечению трубы. Отходы биомассы подаются шнековым питателем 7 из бункера с биомассой 6. Специальная конструкция питателя обеспечивает герметичность загрузки. В камере пиролиза 5 организуется спутное движение отходов биомассы и воздуха. Скорость воздушного потока превышала скорость витания частиц биомассы в 1,5-2,0 раза. В процессе движения газовой смеси происходит нагрев биомассы и ее частичный пиролиз. Далее эти компоненты направляются в циклон 2, где происходит разделение газообразной и твердой фаз. Твердые частицы поступают в специальный бункер циклона 3, в котором в плотном слое происходит дальнейшее выделение летучих компонентов, вплоть до полного разложения (далее образовавшийся в результате полного разложения биомассы коксовый остаток поступает в специальный бункер коксового остатка 4). Смесь воздуха с летучими продуктами пиролиза из циклона 2 направляется в камеру сгорания 1, оборудованную запальником. После сжигания газовой смеси, дымовые газы выбрасываются в дымовую трубу. Во избежание конденсации смол, входящих в состав летучих продуктов пиролиза, камера пиролиза, циклон, бункер, а также все трубопроводы, по которым проходят летучие продукты пиролиза, выполнены теплоизолированными.

При реализации процесса температура воздуха должна находиться в пределах 200°-450 °С, соответственно температуре изменяются и относительные массовые рас-

ходы воздуха и биомассы. Такие параметры обусловлены температурной границей автотермичности процесса пиролиза с одной стороны и воспламенением отходов с другой.

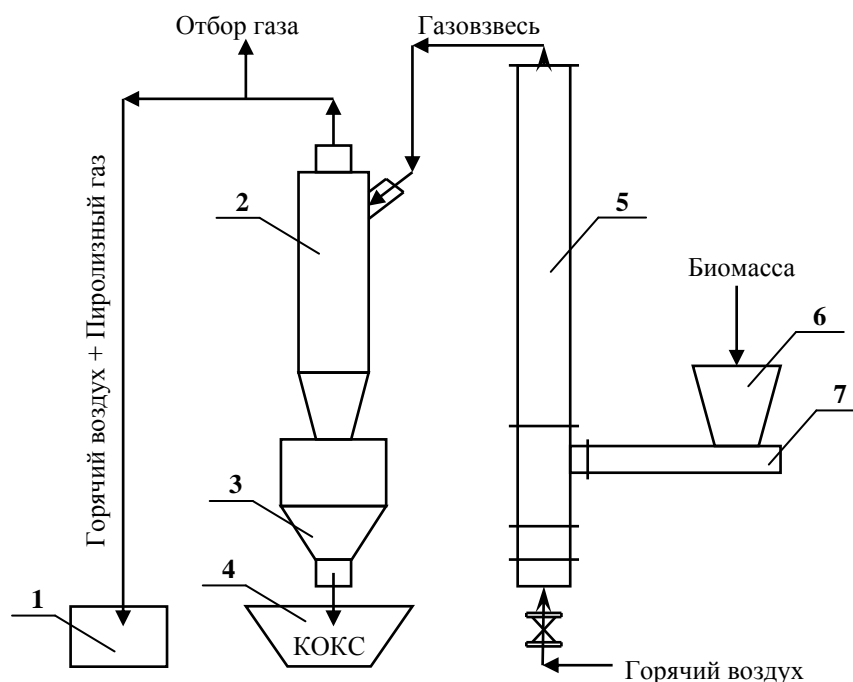


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки

В результате проведения серии опытов были получены технологические режимы, при которых протекает характерный процесс пиролиза с интенсивным выделением летучих компонентов. Интервал рабочих температур при пиролизе лузги подсолнечника составляет 230-300 °С. При этом расход воздуха менялся в интервале 42-52 м³/ч, расход биомассы – 4-12 кг/ч. Выбранные условия соответствуют диапазону изменения удельного расхода биомассы 0,08-0,18 кг/кг. Максимальное количество выхода летучих продуктов близка к 50 % от исходной биомассы. Таким образом, степень завершенности процесса пиролиза не превышает 70 %. Полученные результаты связаны с тем, что при определении веса коксового остатка, учитывалась масса твердого остатка, поступившего в циклон за весь период процесса, в том числе до установления стационарного режима. Анализ химического состава продуктов пиролиза показал, что доля сгоревшей биомассы не превышает 7 %.

Проведенные экспериментальные исследования позволили уточнить диапазон технологических параметров, обеспечивающих стабильное ведение процесса и определить основные факторы, влияющие на их выбор. Во-первых – это влажность исходной биомассы. Увеличение влажности приводит к росту продолжительности сушки отходов и снижению температуры биомассы на выходе из камеры пиролиза. При определённых условиях это может привести к тому, что биомасса не достигнет температуры, обеспечивающей автотермичность процесса разложения. Во-вторых, во взвешенном слое в результате пиролиза происходит лишь частичное разложение отходов, основной процесс пиролиза биомассы происходит в бункере коксового остатка в плотном слое.

Для уточнения параметров, влияющих на процесс пиролиза отходов биомассы в потоке горячего воздуха, была создана математическая модель, описывающая процесс.

Модель пиролиза включает в себя реализацию трех последовательных стадий: нагрев и сушка биомассы; нагрев биомассы с одновременным термическим разложением биомассы на летучие продукты (неконденсируемые газы, смолу) и коксовый остаток; процесс пиролиза в плотном слое. В свою очередь, процесс сушки включает в себя 3 этапа. Это удаление влаги и нагрев до температуры поверхности, равной температуре мокрого термометра; удаление влаги из биомассы при постоянной температуре поверхности, равной температуре мокрого термометра; дальнейший нагрев биомассы и удаление оставшейся влаги. Модель предполагает описание первых двух стадий процесса во взвешенном слое, обеспечивающих конечный результат в целом.

При разработке математической модели были приняты следующие допущения: пренебрегаем разгоном частиц биомассы при попадании в газовый поток; теплообмен между газом и биомассой осуществляется конвекцией, частицы биомассы рассматриваются как термически тонкие тела: $Bi < 0,25$; кинетика пиролиза биомассы описывается по однокомпонентной схеме [1]; потери теплоты через изоляцию камеры пиролиза постоянны и составляют 1% от исходной энтальпии воздушного потока.

Для разработки модели пиролизёра газовый тракт по всей длине L условно был разделен на элементарные расчетные участки равной длины Δx (рис. 2), количество которых изменялось от $j = 1$ до $j = k$. Длина и количество расчётных участков выбирались путем численных экспериментов из условия повышения точности модели при дроблении шага. Оптимальное значение Δx составило 5 мм. Количество фракций биомассы изменялось от $i = 1$ до $i = 5$.

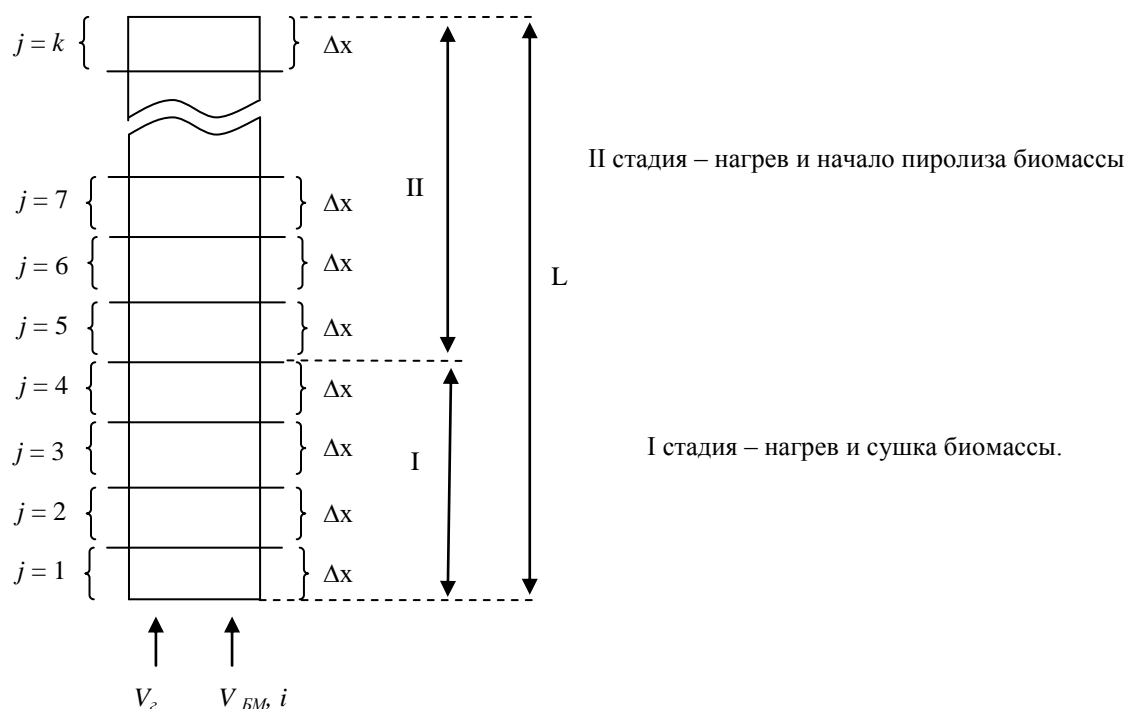


Рисунок 2 – Расчетная схема математической модели

Общая постановка задачи математического моделирования процесса пиролиза биомассы в потоке горячего воздуха включает в себя ряд дифференциальных уравнений для каждого расчетного участка. Это уравнение теплового баланса для газа, уравнения теплового баланса для каждой фракции биомассы, кинетические зависимости

процесса сушки биомассы, уравнение материального баланса массы газа и уравнение материального баланса биомассы.

Уравнение теплового баланса для газа на j -ом расчетном участке

$$-V_2^j \cdot c_{\bar{a}} \cdot \left(\frac{dt_{\bar{a}}}{dx} \right)_i = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i^j \cdot (t_{\bar{a}}^{j-1} - t_{\bar{a},i}^{j-1}) \cdot \beta_i^j \cdot f_{\bar{a},i} \cdot F_{\partial\partial}, \quad (1)$$

где V_2 – расход сухой части воздуха, м³/с; $c_{\bar{a}}$ – теплоёмкость воздуха, кДж/(м³·К); α – коэффициент теплоотдачи от газа к поверхности биомассы Вт/м²·К; $t_{\bar{a}}$, $t_{\bar{a},i}$ – температуры влажного воздуха и биомассы соответственно, °С; β – концентрация i -ой фракции биомассы в единице объема на j -ом расчетном участке, кг/м³; $f_{\bar{a},i}$ – удельная площадь i -ой фракции поверхности биомассы, м²/кг; F_{mp} – площадь сечения пиролизной трубы, м²; i – номер фракции биомассы; j – номер элементарного расчетного участка.

Уравнение теплового баланса для биомассы i -ой фракции на j -ом расчетном участке

$$B_{\bar{a},i}^{n\bar{a},j} \cdot c_{\bar{a}} \cdot \left(\frac{dt_{\bar{a}}}{dx} \right)_i + B_{\bar{a},i}^{n\bar{a},j} \cdot W_i^j \cdot c_{\bar{a}\bar{e}} \cdot \left(\frac{dt_{\bar{a}}}{dx} \right)_i + [r + c_{\bar{a}} \cdot (t_{\bar{a}}^{j-1} - t_{\bar{a},i}^{j-1})] \cdot \left(\frac{dW}{d\tau} \right)_i \times \\ \times \beta_i^j \cdot F_{\partial\partial} + dQ_{i\partial\partial} = \sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i^j \cdot (t_{\bar{a}}^{j-1} - t_{\bar{a},i}^{j-1}) \cdot \beta_i^j \cdot f_{\bar{a},i} \cdot F_{\partial\partial}, \quad (2)$$

где $c_{\bar{a},b}$, $c_{\bar{a},v}$, $c_{\bar{a},n}$ – теплоемкости биомассы, воды и водяных паров соответственно, кДж/кг·К; W – влагосодержание биомассы, кг/кг; r – теплота парообразования, Дж/кг; $B_{\bar{a},i}^{сух}$ – расход сухой части биомассы, кг/с; Q_{mp} – тепловой эффект при пиролизе, Дж/м·с.

Кинетические зависимости сушки для первого периода при $t_{\bar{a},i} \leq t_{mm}$:

$$\left(\frac{dW}{d\tau} \right)_I = \left(\frac{dW}{d\tau} \right)_{II} \cdot \frac{t_{\bar{a},i} - t_0}{t_{i\partial} - t_0}, \quad (3)$$

где $\left(\frac{dW}{d\tau} \right)_I$ – скорость испарения влаги из материала на первой стадии сушки, кг/с;

$\left(\frac{dW}{d\tau} \right)_{II}$ – скорость испарения влаги из материала в момент начала второй стадии сушки, кг/с; $t_{\bar{a},i}$, t_0 – текущая и начальная температуры биомассы соответственно °С; t_{mm} – температура мокрого термометра, °С.

Кинетические зависимости сушки для второго периода при $t_{\bar{a},i} \geq t_{mm}$ и $W \leq W_{кр}$:

$$\left(\frac{dW}{d\tau} \right)_{III} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \alpha_i^j \cdot (t_{\bar{a}}^{j-1} - t_{\bar{a},i}^{j-1}) \cdot \beta_i^j \cdot f_{\bar{a},i}}{r + c_{\bar{a}} \cdot (t_{\bar{a}}^{j-1} - t_{\bar{a},i}^{j-1})}. \quad (4)$$

Кинетические зависимости сушки для третьего периода сушки имеют следующий вид:

$$\left(\frac{dW}{d\tau} \right)_{III} = \left(\frac{dW}{d\tau} \right)_{II} \frac{W - W^*}{W_{\partial\partial} - W^*}, \quad (5)$$

где W^* – равновесное влагосодержание материала, зависящее от температуры горячего воздуха, кг/кг; $W_{кр}$ – значение критической влажности, кг/кг.

Материальный баланс массы газа

$$dV_{\hat{a}\hat{e}}^j = \frac{B_{\hat{a}\hat{i}}^{\hat{n}\hat{o}\hat{o},j} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} \frac{dW}{d\tau_i} d\tau}{\rho_{\hat{a}\hat{e}}} \quad (6)$$

Решение системы уравнений осуществляли численно при помощи метода элементарных числовых балансов с использованием явной схемы расчета.

Адаптация математической модели пиролиза биомассы в потоке горячего воздуха проводилась путём сравнения результатов численных расчетов с данными экспериментальных исследований работы пилотной установки, описанной выше. В результате расчетов были получены зависимости изменения температуры воздуха и биомассы по ходу газового тракта, изменение влажности отходов при разогреве, выход летучих компонентов при разложении биомассы. Характер изменения температуры газовзвеси по длине камеры пиролиза соответствует расчетной зависимости снижения температуры воздушного потока. Значение температуры воздуха превышает экспериментальные значения температуры газовзвеси на 18-24 %. Это свидетельствует о том, что модель верно описывает процесс, так как экспериментальная температура характеризует среднюю температуру взвешенного слоя, имеющего значения ниже температуры горячего воздушного потока. Модель будет использована для обработки экспериментальных исследований для определения необходимых параметров нагрева различных фракций биомассы.

Литература

1. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с.
2. Губинский М. В., Шишко Ю. В., Усенко А. Ю. Частичная замена природного газа в нагревательных печах газом термической переработки биомассы // Труды научно-технич. конф. "Запорожсталь – 2000". – Запорожье: «Запорожсталь». – 2000.
3. Спосіб переробки відходів біомаси: деклараційний патент на винахід № 47212А від 17.06.2002; МПК 7 F23G7/00/ М.В. Губинський //Український інститут промислової власності.
4. Фёдоров И.М. Теория и расчёт процесса сушки. – М.: Госэнергоиздат, 1955.– 176 с.
5. Романков П.Г., Рашковская Н.Б. Сушка во взвешенном состоянии. – Л.: Химия, 1979.– 272 с.

УДК 621. 314

Усенко А.Ю., Губинський М.В., Федоров С.С.

МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПІРОЛІЗА БІОМАСИ У ПОТОЦІ ГАРЯЧОГО ПОВІТРЯ

У роботі розглянуті питання використання відходів біомаси як енергетичне паливо. Представлено методику експериментальних досліджень і математична модель процесу піролізу відходів біомаси в потоці гарячого повітря. Модель призначена для обробки експериментальних даних.