

УДК 621.314

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

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ
РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОКИСЛИТЕЛЬНОГО ПИРОЛИЗА
МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ОТХОДОВ БИОМАССЫ**

Причиной повышения концентрации вредных веществ в окружающей среде являются парниковые газы, выбрасываемые в атмосферу вследствие сжигания ископаемых видов топлива. Реальные пути снижения этих выбросов, а также экономии основных энергоресурсов – энергосбережение, и замена ископаемого топлива на нетрадиционные и возобновляемые источники энергии, наиболее мощным из которых в настоящее время является биомасса.

Проведенный анализ вариантов термической переработки отходов биомассы показал, что технология окислительного пиролиза является конкурентоспособной, по сравнению с другими способами переработки отходов (прямое сжигание, газификация, быстрый пиролиз), и отличается низкими капитальными и эксплуатационными затратами, а также низкой себестоимостью получаемой энергетической продукции за счет производства сопутствующих продуктов.

Реализация окислительного пиролиза, по сравнению с другими способами термической переработки биомассы, требует более низких температур (300–350 °С). При этом подвод теплоты необходим только в начальной стадии процесса: далее процесс пиролиза сопровождается экзотермическими реакциями. Теплота сгорания пиролизного газа, получающегося в результате переработки биомассы, составляет до 13,3 МДж/м³. Образующийся после окончательного выделения пиролизного газа коксовый остаток подается либо потребителю (химическая промышленность, медицина [1]), либо на последующую газификацию, либо сжигается.

Разработанная технологическая схема совместной работы энергетического агрегата и пиролизера диктует следующие условия реализации процесса. Устройство для переработки биомассы необходимо располагать в непосредственной близости от энергетического агрегата. Это позволит осуществить процесс без очистки и охлаждения пиролизного газа, что предотвращает конденсацию смол при охлаждении газа, а также упрощает и удешевляет всю технологию в целом. Процесс осуществляется в потоке горячего воздуха, полученного в воздухоподогревателе (рекуператоре) энергетического агрегата, а полученная смесь пиролизного газа и нагретого воздуха идет непосредственно в тот же энергетический агрегат на горение, тем самым, экономя основное топливо (в основном, природный газ).

На базе кафедры промышленной теплоэнергетики Национальной металлургической академии Украины разработана и исследована технология переработки мелкодисперсных отходов биомассы в потоке горячего воздуха методом окислительного пиролиза [2,3]. Создана экспериментальная установка, позволяющая исследовать этот процесс, а также определены области возможной реализации пиролиза применительно к условиям организации процесса в пилотной установке. Исследования проводились применительно к таким видам отходов, как лузга подсолнечника, шелуха рисовая, шелуха гречневая.

Конструктивные особенности устройств для пиролиза биомассы во взвешенном и кипящем слое, а также параметры их тепловой обработки, определяются грануломет-

рическим составом обрабатываемого материала, формой и размерами частиц. Это определяет необходимую скорость витания материала, соответствующие расходы материала и теплоносителя, а также интенсивность уноса материала из зоны нагрева, что в совокупности влияет на время тепловой обработки в камере пиролиза.

Результаты исследования основных свойств органических отходов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Свойства отходов биомассы

Вид органических отходов	Длина, мм	Ширина, мм	Площадь поверхности, мм ²	Эквивалентный диаметр, мм	Плотность, кг/м ³	
					Насыпная	Действительная
Лузга подсолнечника	4,4 ÷ 12,8	0,8 ÷ 7,9	13,3 ÷ 214,0	1,6 ÷ 3,9	90,05 ± 2,3	393 ± 55
Шелуха рисовая	5,3 ÷ 10,4	1,3 ÷ 3,9	17,3 ÷ 61,7	1,2 ÷ 1,8	136,5 ± 3,7	493 ± 29
Шелуха гречневая	3,7 ÷ 8,1	3,2 ÷ 5,6	29,2 ÷ 78,1	1,4 ÷ 1,9	148,4 ± 9,3	617 ± 44

Получены зависимости интегрального распределения частиц по эквивалентному диаметру (1), (2) и (3). Коэффициент корреляции зависимостей R^2 составляет более 0,95 (для трех видов отходов), а среднеквадратическая ошибка равна для лузги подсолнечника – 3,25 %, для рисовой шелухи – 3,21 %, для гречневой шелухи – 3,56 %:

– для лузги подсолнечника:

$$R_X = -11 \cdot d_3^4 + 86,6 \cdot d_3^3 - 202 \cdot d_3^2 + 149 \cdot d_3 \quad (1)$$

– для шелухи рисовой:

$$R_X = -903,01 \cdot d_3^4 + 3803,9 \cdot d_3^3 - 5125 \cdot d_3^2 + 2174,7 \cdot d_3 + 70,56, \quad (2)$$

– для шелухи гречневой:

$$R_X = 1133,8 \cdot d_3^4 - 9455,4 \cdot d_3^3 + 28137 \cdot d_3^2 - 35662 \cdot d_3 + 16364, \quad (3)$$

где R_X – доля частиц с эквивалентным диаметром, меньшим d_3 , %.

С целью определения скорости витания частиц биомассы, для дальнейшего моделирования процессов пиролиза, были проведены экспериментальные и теоретические исследования.

Отходы биомассы представляют собой полидисперсный материал, поэтому каждая фракция характеризуется собственными показателями теплообмена, скоростью витания и движения в потоке газов. В этой связи, картина разогрева и пиролиза частичек каждой фракции будет различна, что требует обязательного учёта фракционного состава при математическом моделировании. Отходы биомассы каждого вида были разделены на пять фракций с помощью стандартных сит. Для каждой отдельно взятой фракции экспериментальным путем были определены скорости витания и средние эквивалент-

ные диаметры. При увеличении эквивалентного диаметра частиц всех трех видов отходов скорость витания снижается (таблица 2).

Таблица 2 – Экспериментальные значения скоростей витания $V_{\text{ВИТ}}$ и средних эквивалентных диаметров $d_{\text{Э}}$ отходов биомассы

Размер ячейки сит, мм	Лузга подсолнечника		Шелуха рисовая		Шелуха гречневая	
	$V_{\text{ВИТ}}$, м/с	$d_{\text{Э}}$, м	$V_{\text{ВИТ}}$, м/с	$d_{\text{Э}}$, м	$V_{\text{ВИТ}}$, м/с	$d_{\text{Э}}$, м
2 – 2,5	1,8	1,87	1,52	1,30	1,42	1,54
2,5 – 5	1,76	2,25	1,44	1,42	1,37	1,61
5 – 6	1,71	2,59	1,34	1,47	1,34	1,65
6 – 7	1,68	2,85	1,29	1,52	1,32	1,69
7 – 10	1,41	3,05	1,21	1,63	1,25	1,76
полидисперсный слой	1,54–1,76	1,57–3,87	1,47–1,77	1,15–1,78	1,30–1,63	1,38–1,93

Теоретические исследования скорости витания показали, что критериальные зависимости [4] занижают значение скорости витания на 4–13 % по сравнению с экспериментом и не требуют уточнения, что справедливо для всех трех видов отходов.

Для моделирования процесса пиролиза биомассы в потоке воздуха определены области существования плотного (ПС), неустойчивого кипящего (НКС), кипящего (КС) и взвешенного слоев (ВС) в зависимости от скорости воздуха. Реализация взвешенного слоя необходима для организации процесса пиролиза биомассы в восходящем потоке горячего воздуха. Экспериментальным и теоретическим путями определена величина уноса мелкодисперсных отходов биомассы в зависимости от скорости воздуха $V_{\text{ВОЗД}}$ из камеры пиролиза (таблица 3).

Таблица 3 – Экспериментальные данные по уносу отходов биомассы из камеры пиролиза

Тип слоя	Лузга подсолнечника		Шелуха рисовая		Шелуха гречневая	
	$V_{\text{ВОЗД}}$, м/с	Унос, %	$V_{\text{ВОЗД}}$, м/с	Унос, %	$V_{\text{ВОЗД}}$, м/с	Унос, %
ПС	0–0,5	0	0–0,3	0	0–0,4	0
НКС	0,5–1,7	0–7	0,3–1,4	0–13,8	0,4–1,5	0–10,6
КС	1,7–4,9	7–30	1,4–3,0	13,8–21,5	1,5–3,5	10,6–19,3
ВС	> 4,9	100	> 3,0	100	> 3,5	100

Сравнение между экспериментальными и теоретическими данными по уносу частиц не превышают 30 %, что справедливо для всех трех видов отходов.

Экспериментальные исследования процесса пиролиза мелкодисперсных отходов проводились на пилотной установке (рисунок 1).

Воздух, нагнетаемый турбовоздуходувкой 1, и нагретый в электрокалорифере 2, подавался снизу через слой керамических колец в камеру пиролиза 3. Слой колец обеспечивал выравнивание профиля скоростей воздуха по сечению трубы. Отходы биомассы подавались шнековым питателем 4, из бункера биомассы 5. В камере пиролиза 3 ор-

ганизовывалось спутное движение отходов биомассы и воздуха. В процессе движения газозвеси происходил нагрев биомассы и ее частичный пиролиз.

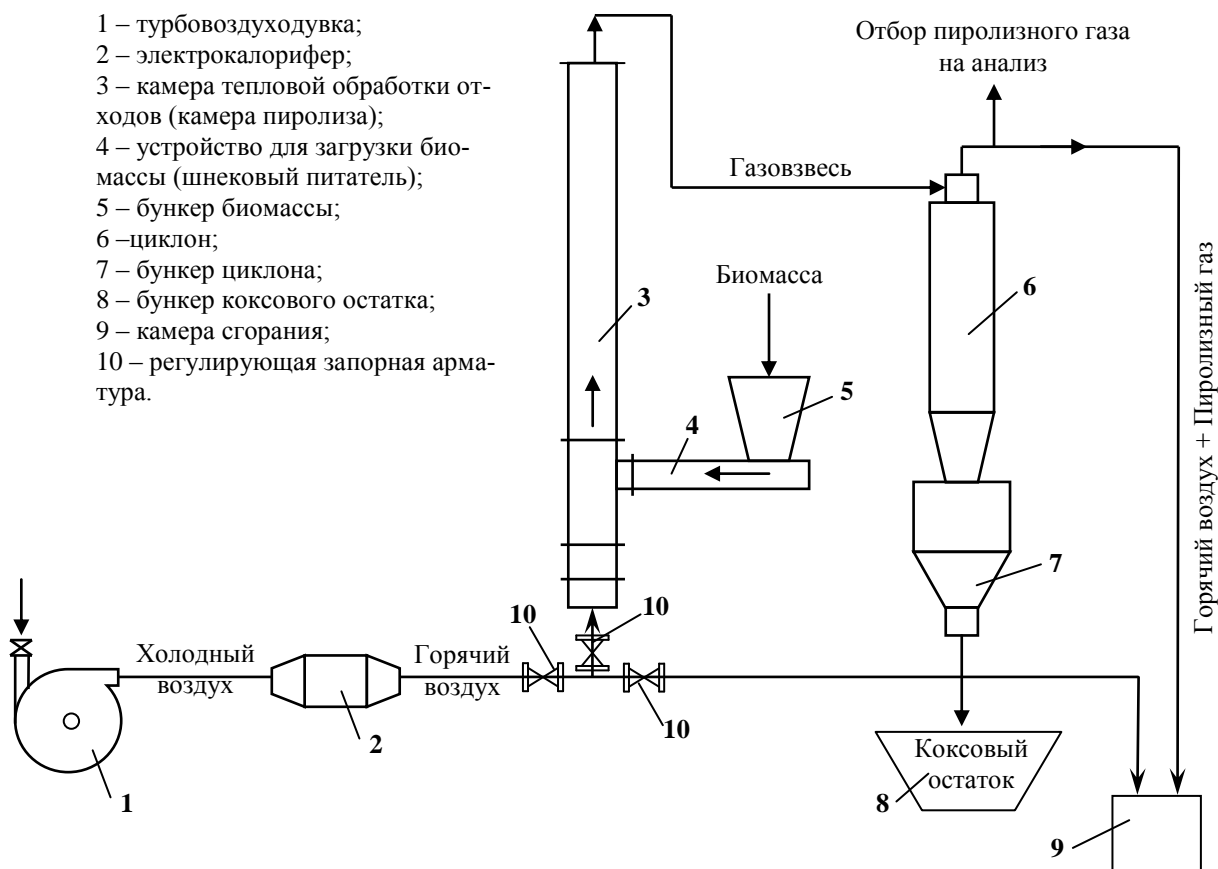


Рисунок 1 – Схема опытной установки по исследованию процесса пиролиза мелкодисперсных отходов биомассы в потоке горячего воздуха

Далее эти компоненты направлялись в циклон 6, где происходило разделение газообразной и твердой фаз. Твердые частицы, не успевшие полностью разложиться, поступали в специальный бункер циклона 7. Здесь, в плотном слое, происходило дальнейшее выделение летучих компонентов вплоть до полного разложения. Смесь воздуха с летучими продуктами пиролиза из циклона 6 направлялась в камеру сгорания 9, оборудованную запальником. После сжигания газозвусной смеси дымовые газы выбрасывались в дымовую трубу. Для предотвращения конденсации смол, входящих в состав летучих продуктов пиролиза, а также потерь тепла, все элементы экспериментальной установки были теплоизолированы матами из базальтового волокна.

Проведенные экспериментальные исследования процесса окислительного пиролиза применительно к лузге подсолнечника позволили получить следующие результаты. Установлено, что процесс пиролиза биомассы во взвешенном и кипящем слоях в потоке горячего воздуха имеет ограничения по времени обработки частиц, связанные с возгоранием отходов. С учетом этого эффекта, предложено 3 варианта реализации окислительного пиролиза, протекающего при стабильных условиях (без возгорания отходов).

Первый вариант может быть реализован при организации восходящего потока при обработке биомассы в стабильном взвешенном слое. Тогда скорость горячего воз-

духа должна превышать: для лузги подсолнечника – 4,9 м/с, для рисовой шелухи – 3 м/с, для гречневой шелухи – 3,5 м/с.

Второй вариант предполагает реализацию процесса окислительного пиролиза в области стабильного кипящего слоя. Скорость воздуха для лузги подсолнечника должна быть в пределах 2,05–3,87 м/с, при этом унос частиц не превышает 40 %.

Продолжительность обработки ограничивается значениями, определенными по экспериментальной зависимости. Время обработки до воспламенения отходов является функцией температуры подаваемого воздуха:

$$\tau_{\text{воспл}} = 48300 \cdot \exp(-0.023 \cdot T_{\text{возд}}), \quad (4)$$

где $\tau_{\text{воспл}}$ – максимальное время пребывания частиц биомассы в потоке горячего воздуха до начала воспламенения, сек; $T_{\text{возд}}$ – температура подаваемого воздуха, °С.

Третий вариант предполагает реализацию данного процесса в нисходящем потоке. В этом случае частицы биомассы с потоком нагретого воздуха движутся вниз по камере витания, что обеспечивает прямоточное движение газовой смеси независимо от скорости воздуха.

Литература

1. Гелетуха Г.Г., Железная Т.А. Обзор технологий сжигания древесины с целью выработки тепла и электроэнергии. Часть 1 // Экологические и ресурсосбережение. – 1999. – № 5. – С. 3–12.
2. Спосіб переробки відходів біомаси: деклараційний патент на винахід № 47212А від 17.06.2002; МПК 7 F23G7/00/ М.В. Губинський //Український інститут промислової власності.
3. Спосіб термічної переробки відходів біомаси: рішення про видачу деклараційного патенту на корисну модель № u 2005 10412 від 31.01.2006; МПК (2006) F23G7/00/ Національна металургійна академія України //Український інститут промислової власності; 03.02.2006; вих. № 3564/1.
4. Разумов И.М. Псевдоожигание и пневмотранспорт сыпучих материалов. – М.: Химия, 1972. – 240 с.

УДК 621.314

Усенко А.Ю., Грек О.С., Губинський М.В.

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ОКИСНОГО ПІРОЛІЗУ ДРІБНОДИСПЕРСНИХ ВІДХОДІВ БІОМАСИ

У статті розглянуті питання, зв'язані з уточненням технологічних параметрів процесу піролізу дрібнодисперсних відходів біомаси у потоці гарячого повітря. Експериментально досліджені властивості відходів, процеси піролізу біомаси у зваженому та киплячому шарі. Ці дані дозволять надалі визначити необхідні технологічні та конструктивні параметри устаткування по переробці органічних відходів.