

Н.А. ШКУНОВ, студент гр. 5Б45 (ТПУ)
Научный руководитель Р.Б. ТАБАКАЕВ, к.т.н., (ТПУ)
г. Томск

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АНТРАЦИТА В КАЧЕСТВЕ МИКРОВОЛНОВОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ ПРИ СВЧ-ПЕРЕРАБОТКЕ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

Введение

Ежегодно в мире производится около 350 миллионов тонн пластиковых отходов, значительная часть (около 80%) которых не перерабатывается и накапливается в природных экосистемах, попадая в землю, водоемы и даже пищевые цепи [1, 2]. Это приводит к неблагоприятному воздействию на растительные и животные сообщества, а также здоровье человека [3, 4]. В связи с этим переработка полимерных отходов является актуальной задачей, поставленной перед мировым сообществом.

Одним из перспективных направлений переработки полимерных отходов, позволяющих получить химически ценную продукцию и экологичное энергетическое топливо, является термическая переработка. Причем в настоящее время особо выделяют СВЧ-пиролиз полимерных отходов, как энергоэффективный и высокопроизводительный вид переработки.

Однако большая часть полимеров является радиопрозрачным веществом для СВЧ-излучения, что требует использования микроволновых поглотителей. В качестве микроволновых поглотителей используют различные металлы, масла или углеродсодержащие материалы [5]. При этом стоимость и доступность поглотителей должна существенным образом определять технико-экономическую составляющую технологии СВЧ-переработки.

Целью настоящей работы является исследование возможности использования антрацита, являющегося доступным сырьем для энергетики, в качестве микроволнового поглотителя для СВЧ-пиролиза полимерных отходов.

Методика исследования

В качестве полимерного отхода рассмотрен полиэтилен высокого давления (ПВД), а в качестве микроволнового поглотителя – антрацит со следующими характеристиками: влажность – 4,6 %, зольность – 4,3 %, содержание летучих веществ – 2,9 %, доля углерода – 92,23 %.

ПВД измельчали при помощи экономичной режущей мельницы (Вилитэк, Россия), антрацит – измельчали и просеивали при помощи

планетарной монмельницы PULVERISETTE 6 (FRITSCH, Германия) и ситового грохота ANALYSETTE 3 (FRITSCH, Германия) на фракции: менее 200 мкм, 200-500 мкм, 500-1000 мкм. Далее, ПВД смешивали с антрацитом различной фракции (доля антрацита в смеси составляла 5, 10 и 15 % масс.).

Подготавливали навеску из полученной смеси массой $2,0 \pm 0,1$ г, которую прессовали в пресс-форме диаметром 12 мм (рисунок 1). Параметры прессования включали: температура – 140 °С, давление 0,01 МПа.

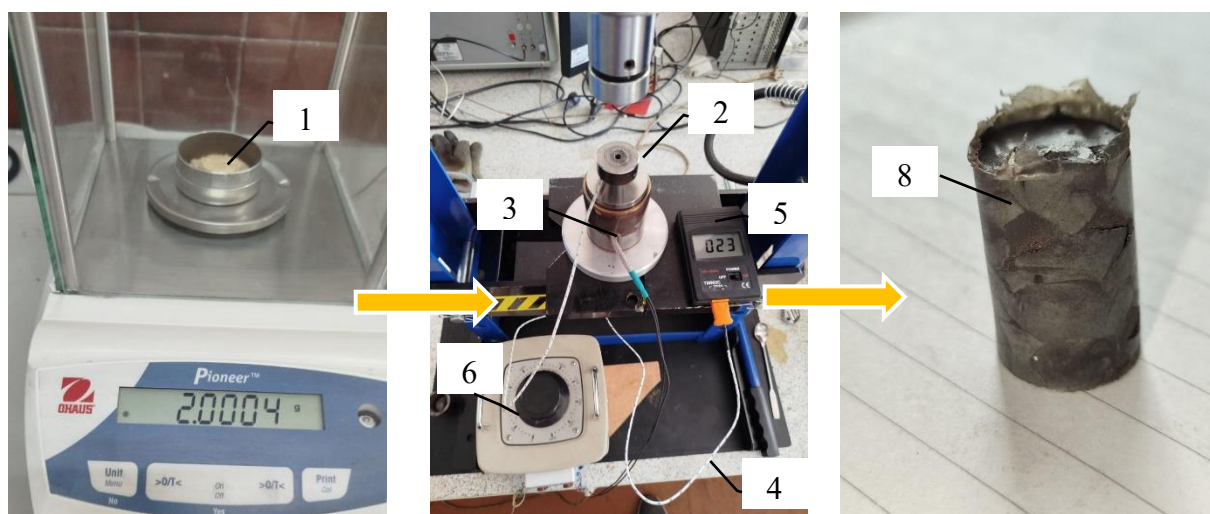


Рис. 1. Визуализация получения образцов из полимера и микроволновых поглотителей для экспериментальных исследований на лабораторной установке: 1 – навеска смеси измельченного полимера и поглотителя, 2 – пресс-форма, 3 – нагревательный элемент, 4 – термопара (ХА), 5 – термометр ТМ902С, 6 – лабораторный автотрансформатор (ЛАТР), 7 – гидравлический пресс, 8 – гранула (диаметр 12 мм)

Полученную гранулу из полимера и антрацита размещали в кварцевой трубке 2 реактора 3 (рисунок 2). Установку герметично собирали. При помощи магнетронного источника СВЧ-излучения 5 осуществляли нагрев образца. В процессе нагрева происходила термическая деструкция образца с образованием твердого углеродистого остатка и летучих продуктов пиролиза (пары и газ). Летучие продукты пиролиза за счет продувки азотом транспортировались из реакционной камеры в систему фильтрации, где за счет конденсации и сорбции жидкая часть осаждалась. Газ направляли в окружающую среду, отбирая при помощи насоса пробу в пробоотборный пакет (объем 3 литра) для хроматографического анализа и параллельно этому направляя часть газа в газоанализатор «Тест-1» (расход 0,2 л/мин) для установления характерных времен протекания процесса.

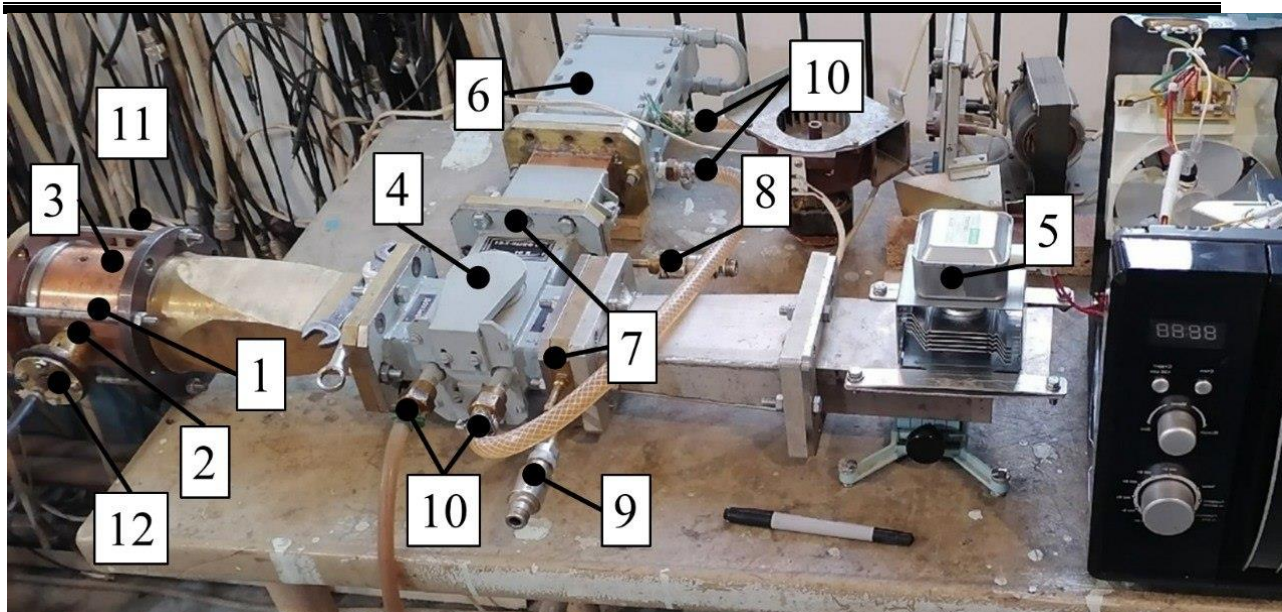


Рис. 2. Лабораторная установка для изучения СВЧ-переработки
одиночного образца: 1 – исследуемый образец; 2 – кварцевая трубка;
3 – экспериментальный реактор; 4 – водоохлаждаемый волноводный
циркулятор; 5 – источник СВЧ-излучения; 6 – водоохлаждаемая
волноводная нагрузка; 7 – фланцы с отверстиями для размещения
измерительных петель; 8 – измерительная петля отраженного сигнала;
9 – измерительная петля падающего сигнала; 10 – система водяного
охлаждения элементов; 11 – штуцер подачи азота; 12 – штуцер отвода
азота и газообразных продуктов пиролиза

Результаты и их обсуждение

В таблице 1 представлены результаты определения времен инициации процесса СВЧ-пиролиза и длительности его протекания в зависимости размера фракции антрацита и доли его содержания в составе гранулы. Как видно, доля добавки антрацита при переработке ПВД должна составлять не менее 15 % масс. При этом время инициации процесс снижается с уменьшением размера антрацита. Это можно объяснить тем, что нагрев полимера осуществляется за счет передачи тепла от поверхности частиц антрацита, поглощающих СВЧ-излучение. При этом при одной и той же величине массы антрацита наиболее мелкая фракции будет обладать наибольшей поверхностью.

Состав полученного при СВЧ-пиролизе газа из ПВД и антрацита различной фракции (15 % масс.) представлен в таблице 2. Видно, что при разложении полимерных отходов основными компонентами газовой смеси являются водород и метан (более 90 %). При этом использование мелкой фракции антрацита (менее 200 мкм) позволяет получить больше углеводородов ($\text{CH}_4 + \text{C}_m\text{H}_n$).

Таблица 1

Характерные времена процесса СВЧ-пиролиза ПВД с добавкой антрацита

Фракция поглотителя, мкм	Характерные времена процесса в зависимости от доли добавки поглотителя, с					
	5 % масс.		10 % масс.		15 % масс.	
	Ti	Td	Ti	Td	Ti	Td
менее 200	—	—	—	—	41	149
200-500	—	—	—	—	50	265
500-1000	—	—	—	—	55	227
<i>Примечание: – время инициирования процесса превысило 600 с</i>						

Таблица 2

Состав газа, полученного при СВЧ-пиролизе ПВД и антрацита

Фракция поглотителя, мкм	Состав пиролизного газа, %					
	H ₂	CO	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C _m H _n
менее 200	62,4	1,6	29,5	0,2	4,1	2,2
200-500	72,3	1,3	22,0	0,2	3,6	0,8
500-1000	70,0	6,3	21,3	0,3	1,5	0,7

Заключение

Исследован антрацит в качестве поглотителя для СВЧ-переработки полимерных отходов (ПВД). Установлено, что доля антрацита для реализации пиролиза должна составлять 15 %, при этом необходимо стремиться к наиболее мелкой фракции, что позволит получить большее количество ценного углеводородного сырья.

Работа выполнена при поддержке РНФ 22-19-00410-П.

Список литературы:

1. Omondi, I.A., Getanga, M.A., Onyango, D.M. Microplastic pollution in the surface water and sediments in Lake Naivasha: The first documented evidence in the Kenyan Rift Valley // Science of The Total Environment, 2024. – Vol. 906. – P. 169436. – DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.169436.
2. Wang, Z., Burra, K.G., Li, X., Zhang, Z., Li, M., Lei, T., Gupta, A.K. Syngas production from co-pyrolysis and co-gasification of polystyrene and paper with CO₂ // Energy Conversion and Management, 2024. – Vol. 301. – P. 118571. – DOI: 10.1016/j.enconman.2024.118571.
3. Wu, F., Wang, Y., Leung, J.Y.S., Huang, W., Zeng, J., Tang, Y., Chen, J., Shi, A., Yu, X., Xu, X., Zhang, Y., Cao, L. Accumulation of microplastics in

typical commercial aquatic species: A case study on a fishery farm located in the Yangtze River Delta // *Journal of Environmental Management*, 2021. – Vol. 299. – P. 114240. – DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.114240.

4. Bhatt, P., Pathak, V.M., Bagheri, A.R., Bilal, M. Microplastic contaminants in the aqueous environment, fate, toxicity consequences, and remediation strategies // *Environmental Chemistry Letters*, 2022. – Vol. 20. – P. 3637–3664. – DOI: 10.1007/s10311-022-01552-4.

5. Ковалева, Н.Ю. Перспективы применения микроволнового излучения для пиролиза различных видов пластиковых отходов // *Химическая безопасность*, 2025. – №9, (1). – С. 105-137. – DOI: 10.25514/CHS.2025.1.28006

Информация об авторах:

Шкунов Никита Андреевич, студент гр. 5Б45, ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, nas95@tpu.ru

Табакаев Роман Борисович, к.т.н, ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, TabakaevRB@tpu.ru