

Сравнительные эксперименты по микроволновой и термической деструкции торфа в лабораторных установках с малым объемом загрузки

Т.О. Крапивницкая^{1,3}, С.А. Ананичева^{1,2}, А.Б. Алыева¹, А.А. Вихарев¹, М.Ю. Глявин¹,
А.Н. Денисенко¹, Н.Ю. Песков^{1,2}, Н.С. Шулаев³

¹ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

³Уфимский государственный нефтяной технический университет

Аннотация: В статье описаны эксперименты по термической деструкции торфа при использовании в качестве источника тепла электронагревательного элемента и СВЧ-излучения. Разработаны установки, позволяющие провести корректное сопоставление и определить особенности протекания указанных процессов. На основе данных установок проведено сравнение временных и температурных характеристик этих реакций, выхода продуктов, а также их тепловой эффективности. Продемонстрированы преимущества СВЧ-воздействия для достижения более равномерной и глубокой фрагментации торфа. Обсуждаются перспективы создания промышленных СВЧ-установок по переработке органических материалов.

Ключевые слова: переработка органического сырья, торф, микроволновое (СВЧ) излучение, пиролиз, термолиз, экологически чистые технологии, энергоэффективность.

1. Введение

СВЧ-излучение находит в настоящее время широкое применение в сложных технологических процессах переработки различных материалов. Особенно актуальной задачей многих производственных структур является переход на высокоэффективные и, в то же время, экологически безопасные технологии. Эта тенденция хорошо прослеживается в сфере переработки различного сырья природного происхождения [1-5], пластикового мусора, бытовых отходов [6] и т.д.

Пиролиз является важнейшим этапом для производства многих видов продукции. Как показывают оценки экономистов, повышение эффективности данного процесса на 1% дает экономическую выгоду в десятки тысяч долларов. Традиционно для этого процесса в промышленных производствах используют технологии стандартного термического нагрева при помощи электронагревателя или источника огня. Эти методы имеют ряд недостатков, таких как большая инерционность процесса, зависимость от теплопроводности материала и теплопередачи от стенок реактора к материалу [7]. Представленные в данной статье исследования направлены на совершенствование метода термической фрагментации и переработки органического сырья при помощи СВЧ-излучения. Преимуществами этого метода являются объемный нагрев, который в меньшей степени зависит от теплопроводности материала, а в основном определяется его поглощающей способностью и диэлектрической проницаемостью.

2. Схемы экспериментальных установок

Серия экспериментов по исследованию особенностей пиролиза (термолиза) торфа при традиционном термическом и СВЧ-нагреве торфа проводились на базе ИПФ РАН в сотрудничестве с ННГУ (Н.Новгород) и УГНТУ (Уфа). Для корректного сравнения

этих процессов были разработаны идентичные установки, в качестве реактора в которых использовался реакционный сосуд - колба Вюрца - из кварцевого стекла объемом 1 л. Нагрев торфа осуществлялся либо колбонагревателем - трубчатым электронагревательным элементом (ТЭНом) марки МН Heating Mantle 1000 с мощностью 510 Вт, либо СВЧ-излучением промышленного магнетрона с частотой 2.45 ГГц и мощностью 700 Вт. В качестве обрабатываемого органического материала во всех экспериментах использовался верховой сфагновый торф низкой степени разложения Греко-Ушаковского месторождения. Перед проведением экспериментальных исследований проводилась пробоподготовка образцов торфа согласно гостированным методикам. Из пор пробы удалялась поверхностная и капиллярная влага, и, таким образом, оставалась только сорбционная и гидратная.

Эксперименты по термическому нагреву торфа проводились по следующей методике. Навеска с торфом массой 100 г помещалась в реакционный сосуд, закрывалась стеклянной пробкой на притертых шлифах на вакуумной смазке и погружалась в чашу электронагревательного элемента. Температура измерялась погруженной в торф термопарой через вакуумно-плотную резиновую пробку. «Мягкий» пиролиз торфа проводился при температуре 250 - 270 °С. В данной серии экспериментов нагрев образца до указанного уровня осуществлялся в течение 10 минут, а затем данная температура поддерживалась на протяжении 40 минут. Продукты пиролиза откачивались вакуумным насосом через азотную ловушку.

Эксперименты по СВЧ-пиролизу проводились по аналогичной методике, масса облучаемого образца также составляла 100 г. Используемый промышленный магнетрон имел управляемый высоковольтный источник питания для контроля мощности и дополнительное водяное охлаждение для длительной работы. Контроль параметров магнетрона и его выходного сигнала осуществлялся с помощью осциллографа, температура на стенке реакционного сосуда контролировалась тепловизором. В данной серии экспериментов процесс пиролитического разложения торфа также наблюдался в диапазоне температур, указанном выше. Длительность процесса переработки составляла 25 минут.

3. Результаты экспериментов

Результаты экспериментальных исследований пиролиза торфа при использовании источников нагрева различных типов приведены в Таблице 1. Проведенные эксперименты показывают, что СВЧ-пиролиз торфа характеризуется более высоким выходом газовой и жидкой фракции. Также необходимо отметить уменьшение времени реакции, которое связано не только с увеличением мощности СВЧ-источника (по сравнению с использованным ТЭНом), но и с более эффективным, объемным характером микроволнового нагрева.

Таблица 1. Технологические параметры сравнительных экспериментов по термической и СВЧ - переработке торфа

Параметры эксперимента	СВЧ	ТЭН
Мощность, Вт	700	510
Масса образца, г	100	100
Выход газа, % мас.	20	17
Выход жидкой фазы, % мас.	11	5
Выход твердого остатка, % мас.	69	78

Различие в механизмах нагрева в установках разного типа иллюстрируют результаты измерений с использованием тепловизора (см. рис. 1). Видно, что объемный характер нагрева, который имеет место в случае СВЧ-нагрева, приводит к

более однородному распределению температуры в полости реактора. В то же время, как уже обсуждалось выше, термический нагрев электронагревательными элементами (как и источниками огня) характеризуется большой неоднородностью распределения температуры в реакторе, резко выраженный максимум которой сосредоточен вблизи стенки контакта с источником тепла. Таким образом, неравномерность нагрева образца в «традиционных» термических системах пиролиза приводит к различной скорости протекания реакции в различных частях реактора. В частности, анализ продуктов реакции демонстрирует области высокотемпературного выгорания топлива вблизи стенки, в то время как удаленная от источника тепла часть топлива остается практически вне теплового воздействия. Однородное тепловое поле при СВЧ-воздействии обеспечивает идентичность протекания реакции пиролиза во всем объеме загрузки, в итоге, более глубокую и равномерную переработку (фрагментацию) материала.

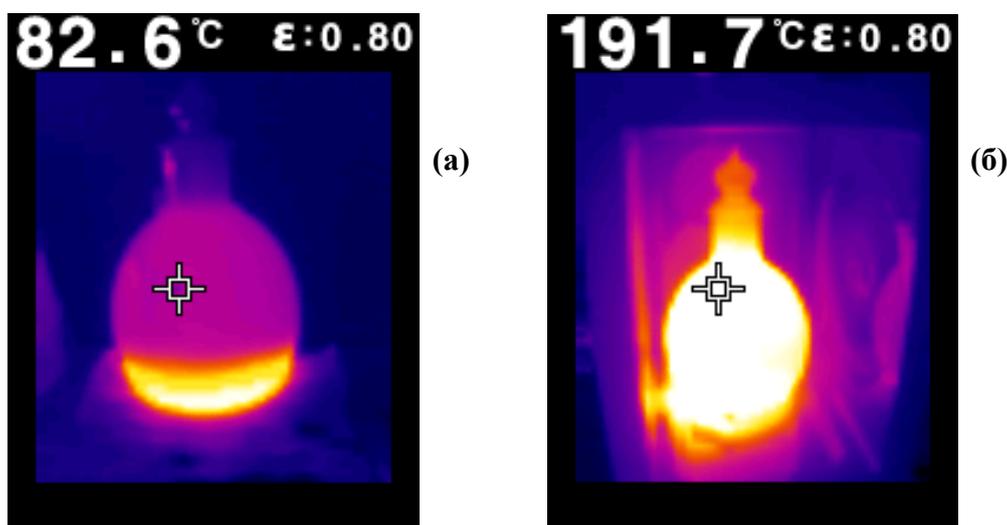


Рисунок 1. Тепловые карты, снятые с помощью тепловизора после окончания экспериментов по термодеструкции торфа в реакционной сосуде (а) при термическом и (б) микроволновом нагреве.

В рамках проведенных экспериментов была проведена оценка энергетической эффективности процесса пиролиза при использовании различных источников нагрева. Проведенный анализ показал, что затраченная электрическая энергии в пересчете на единицу массы материала при пиролизе, инициированном СВЧ - облучением, заметно меньше, чем при аналогичном термическом процессе, что свидетельствует о перспективности предлагаемого подхода. Вместе с тем, выход горючих газов при СВЧ-пиролизе выше, что позволяет дальнейшее увеличение эффективности данного способа переработке при сжигании этих газов.

4. Заключение

Таким образом, разработанные лабораторные установки позволили провести серию сравнительных экспериментов по исследованию особенностей реакции «мягкого» пиролиза (термолиза) торфа при использовании источников тепловой энергии различной природы. Данные эксперименты наглядно продемонстрировали, что одним из основных недостатков «традиционных» термических реакторов (на основе электронагревательных элементов или источников огня) является высокий градиент температуры с максимумом вблизи его стенки, что осложнит переработку органических материалов. Слабая теплопроводность этих материалов также обуславливает низкую скорость нагрева и инерционность процесса реакции, в

результате, технически сложным обеспечением в ее управлении. В противоположность этому, объемный и «мгновенный» (в масштабе тепловых процессов) характер нагрева при поглощении микроволнового излучения обеспечивает равномерное распределение температуры и идентичность протекания реакции пиролиза в СВЧ-реакторе, а также высокую управляемость этого процесса. Таким образом, использование микроволнового излучения для обработки/переработки органических материалов позволяет обеспечить надежный контроль параметров и безопасность протекания процесса высокотемпературной деструкции топлива, а также является более экологически чистым по сравнению с установками на основе источников огня (в большей части используемых в настоящее время в промышленных пиролизных установках). Согласно результатам проведенных экспериментов, высокая тепловая эффективность нагрева предлагаемых методов СВЧ-обработки/переработки органического сырья обеспечивает также энергоэффективности установок по сравнению с установками на основе электронагревательных элементов.

В качестве развития описанных работ представляется перспективной разработка сверхразмерных микроволновых реакторов с большим объемом загрузки топлива, оптимизированных с точки зрения тепловых потерь и равномерного распределения СВЧ-поля в объеме камеры (таким образом, температуры топлива), которые позволят в дальнейшем осуществить масштабирование установки для промышленных приложений.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда** (проект № 23-19-00763 «*Разработка новых физико-химических технологий и СВЧ-комплексов для глубокой переработки целлюлозосодержащих материалов*»).

Список литературы

1. Yin C. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production // *Bioresource Technology*. – 2012. – Т.120. – С.273-284.
2. Табакаев Р.Б. и др. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза твердых органических топлив // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т.333. – №12. – С.190-199.
3. Песков Н.Ю. и др. Комплекс для микроволнового пиролиза органических материалов // Патент № 2737007 С1 РФ. 2020.
4. Крапивницкая Т.О. и др. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза торфа // *Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология*.–2019. –Т.9. –№ 4. С. 750-758.
5. Крапивницкая Т.О. и др. Анализ продуктов низкотемпературного СВЧ-пиролиза торфа // *Изв. вузов. Прикладная химия и биотехнология*.–2020. –Т. 10. –№ 2. С. 339-348.
6. Khouaja A., et al. Dielectric properties and thermal stability of cellulose high-density polyethylene bio-based composites // *Industrial Crops and Products*. – 2021. – Т.171. – Art.no.113928.
7. Kappe C.O., Dallinger D., Murphree S. Sh., *Practical Microwave Synthesis for Organic Chemists*. – Wiley-VCH, 2009.