



«УТВЕРЖДАЮ»

Ректор ФГБОУ ВО КНИТУ

Ю.М. Казаков

«03» 09 2024 г.

## ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» на диссертационную работу **Крапивницкой Татьяны Олеговны** по теме: **"Энергоэффективный экологически безопасный процесс переработки торфа микроволновым излучением"**, представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13. Процессы и аппараты химических технологий.

На отзыв представлена сама диссертационная работа, выполненная на 143 страницах машинописного текста, и ее автореферат на 24 страницах.

Структура изложения материала в обеих работах традиционна для технических научных диссертаций. Для диссертации это введение, 5 глав основного текста, заключение, список литературы и приложения. Обе работы написаны технически и стилистически грамотно, текстовая часть сбалансирована с рисунками, графиками, таблицами и формулами.

### 1. Актуальность темы выполненной работы

Диссертационная работа Крапивницкой Татьяны Олеговны посвящена развитию физико-химических методов воздействия на ископаемые органические материалы (в частности, торф) с использованием СВЧ-излучения и ориентирована на создание новых энергоэффективных экологичных технологий, востребованных современной промышленностью.

В работе развиты теоретические модели и методы расчета микроволновых реакторов, осуществляющих процесс пиролиза торфа, разработана и реализована серия реакторов СВЧ-пиролиза с различным объемом загрузки (от 0.1 до 3 кг) для проведения лабораторных исследований, продемонстрирована возможность их масштабирования для достижения промышленных объемов переработки. В ходе проведенных



исследований выявлена специфика физических и химических процессов, происходящих при деструкции торфа под воздействием мощного СВЧ-излучения, определены физико-химические условия протекания данного процесса, обеспечивающие высокий выход полезных продуктов, выработаны рекомендации для создания энергосберегающей экологически безопасной технологии получения эффективного нефтепоглощающего сорбента.

## **2. Степень разработанности темы исследований**

Список литературных источников, использованных при написании диссертации, содержит 143 ссылки и включает работы как отечественных (более 100), так и зарубежных (более 25) научных групп, из них более 90 являются современными (т.е. опубликованными за последние 20 лет).

Анализ литературных источников показал, что термические установки (использующие сжигание топлива или подвод тепла ТЭНами), широко применяемые в настоящее время в промышленности, имеют ряд принципиальных технологических недостатков, таких как низкая энергоэффективность и невысокое качество переработки сырья (большая степень неоднородности переработки), их эксплуатация сопряжена с опасностью аварийности и проблемами для экологии. Высокую перспективу представляют СВЧ-комплексы, однако подобные установки в России в настоящее время отсутствуют. Для их создания необходимо решение целого ряда комплексных физико-химических и инженерно-технических задач, связанных с оптимизацией многопараметрического процесса фрагментации органического вещества сложной структуры при СВЧ-воздействии, разработке и эксплуатации сверхразмерного (в масштабе длины волны) реактора в условиях использования СВЧ-излучения высокой интенсивности и др.

В соответствии с этим автором четко поставлены задачи исследования, включающие в себя определение специфических особенностей процесса пиролиза, инициированного микроволновым воздействием и его сравнение с термическим пиролизом, реализуемым в традиционных термических установках, и разработку на этой основе принципов создания СВЧ-реакторов, которые позволяют осуществить масштабирование до объемов загрузки, необходимых для их промышленного применения.

## **3. Значимость для науки результатов диссертационных исследований автора**

В диссертационной работе автором апробирована оригинальная самосогласованная пространственно-временная модель, основанная на совместном использовании уравнений Максвелла, уравнения теплопроводности и уравнения Аррениуса. Данная модель позволяет описать динамику процесса переработки торфа и определить физико-химические параметры для оптимального протекания реакции СВЧ-пиролиза торфа, включая пространственно-временные распределения СВЧ-полей, температуры и другие физико-химические характеристики в объеме



реактора, а также расход вещества и выход полезных продуктов с учетом меняющихся во времени диэлектрических свойств и неоднородного состава материала. В рамках численного моделирования на основе разработанной модели исследована динамика процесса пиролиза каустобиолитов под воздействием СВЧ-излучения.

В рамках проведенных в работе теоретических и экспериментальных исследований изучены особенности протекания реакции пиролиза торфа, инициированного микроволновым излучением, определены оптимальные физико-химические условия для эффективной переработки торфа в процессе данной реакции. Продемонстрированы преимущества разрабатываемой микроволновой технологии перед традиционными термическими аналогами по качеству переработки материала и энергоэффективности процесса. Разработаны методические основы аппаратурного оформления СВЧ-комплексов для переработки органических материалов различных типов.

#### **4. Значимость для производства результатов диссертационных исследований автора**

В ходе проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны, созданы и протестированы оригинальные конструкции лабораторных СВЧ-реакторов для эффективной переработки торфа в процессе пиролиза. Предложена методика масштабирования разработанных микроволновых комплексов до промышленного объема переработки при пропорциональном увеличении мощности и/или числа источников СВЧ-излучения, необходимом для протекания реакций пиролиза, а также сохранении однородности распределения энергии электромагнитного поля в реакторе. Обоснована возможность создания прототипа промышленного комплекса для СВЧ-переработки торфа в эффективный экологически чистый нефтепоглощающий сорбент с объемом производства ~ 500 кг/сутки.

В серии экспериментов, выполненных с использованием разработанных СВЧ-реакторов различной конструкции, определены существенные различия в составе газообразной и жидкой фракций, полученных в процессе термического и микроволнового пиролиза. Проанализирована структура и морфология твердофазного продукта пиролиза торфа, показано, что микроволновое воздействие в процессе пиролиза торфа позволяет получить углеродистый остаток с более развитой поверхностью, сорбционной ёмкостью и высокой пористостью. Предложенный метод СВЧ-пиролиза торфа имеет высокую перспективу для создания новой высокоэффективной экологически чистой технологии получения нефтепоглощающих углеродных сорбентов.

#### **5. Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Результаты, полученные при выполнении диссертационной работы, могут быть использованы при выполнении лабораторных исследований по воздействию микроволнового излучения на природные ископаемые



каустобиолиты, проводимых Российскими и зарубежными научными группами. Результаты исследований имеют высокую перспективу внедрения в промышленные производства по переработке торфа и других ископаемых органических материалов. Предлагаемые в диссертационной работе методы СВЧ-воздействия могут быть развиты для переработки нефтяных сланцев, что открывает перспективу их применения в разработках, проводимых компаниями «Татнефть», «Лукойл» и др.

## **6. Публикации, отражающие основное содержание диссертации**

По результатам проведенных исследований опубликовано 33 работы по теме диссертации, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах по специальности, определенных Высшей аттестационной комиссией и индексируемых базами данных Web of Science / Scopus, все в соавторстве, 2 патента на изобретение, 4 статьи в прочих изданиях (индексируемых базой данных РИНЦ) и 18 работ опубликованы в материалах различных научных конференций.

При рассмотрении диссертации Крапивницкой Т.О. выявлен ряд замечаний:

1. Неудачным представляется использование термина «КПД передачи энергии», в который автор, судя по тексту, вкладывает смысл низкой скорости распространения тепла в торфе теплопроводностью. В действительности КПД характеризует потери тепла при его передаче, например, в окружающую среду, которые можно существенно сократить тепловой изоляцией.

2. Для лучшего понимания решаемой на основе моделирования задачи необходимо было представить геометрическую схему расчетной области с обозначением граничных условий. Что принималось за  $T_{\infty}$  в уравнении (6)? В уравнении 4 перед последним членом в правой части (изменение плотности торфа во времени) должен быть знак минус. Также если в уравнении (5) используется выражение Аррениуса то вместо  $F$  должна стоять экспонента.

3. Не приведены численные значения теплофизических свойств (теплопроводность, плотность и т.д.) материала (торфа) используемые при моделировании.

4. Рисунок 3в – по оси  $Y$  написано выход пиролиза, а в подписи к рисунку выход твердого продукта реакции. Это одно и то же? Если это выход твердого продукта, не понятно почему график начинается с 0 и заканчивается 0?

5. С чем связаны различия в схемах экспериментальных установок пиролиза торфа с электронагревательным элементом и СВЧ излучением в плане отсутствия системы первичного фракционирования в первой схеме. Насколько корректно в данном случае будет сравнение количественных результатов для этих схем?

6. Вызывают вопросы способы сравнения эффективности процессов термического и СВЧ пиролиза, используемые в работе. Например, в таблице



2 глава 3 выход твердого остатка в среднем на 20% выше для варианта нагрева торфа электронагревателем. При этом углерода в твердом остатке на 20% меньше, чем при СВЧ- пиролизе. Т.е. количество углерода, перешедшего из твердой фазы в жидкую и газообразную, оказывается близким для разных видов пиролиза. На сколько корректно при этом утверждать, что СВЧ-пиролиз увеличивает конверсию торфа? Т.е. вообще по массе в жидкие и газообразные продукты да, а в целевые (углеводородные) получается нет.

Так же в таблице 2 выход газовой фазы сопоставим для разных видов пиролиза. При этом компонентный состав (таблица 3) для пиролиза торфа с электронагревательным элементом показывает в 2.5 раза большее содержание непредельных углеводородов, образование которых связано с разрывом С-Н связи, энергия которой больше энергии С-С связи. Откуда напрашивается возможное частичное объяснение больших энергозатрат на 1 кг перерабатываемого торфа для варианта с электронагревательным элементом, которое почему-то не обсуждается в работе. В связи с этим, использование коэффициента рекуперации энергии на основе сравнения энергозатрат при сжигании газовой фракции для сравнения эффективности процессов пиролиза видится некорректным. Состав газовой фазы для варианта с электронагревательным элементом представляется более ценным, если его в дальнейшем использовать в химическом синтезе.

7. В пятой главе представлен вариант промышленного прототипа комплекса для проведения СВЧ-пиролиза. Здесь было бы хорошо увидеть инженерную методику оценки основных размеров аппарата и энергетических затрат в зависимости от производительности технологии.

Сделанные замечания не снижают научной ценности выполненной диссертационной работы.

## **7. Заключение**

Диссертация Крапивницкой Татьяны Олеговны является законченной научно-квалификационной работой, в которой получены новые научно обоснованные технические, технологические решения по использованию СВЧ излучения в процессах пиролиза торфа имеющие существенное значение для развития нефтехимического и энергетического комплекса страны.

Основные результаты исследований достаточно полно представлены в публикациях в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, Web of Science и Scopus, а также на международных и всероссийских научно-технических конференциях.

Автореферат по содержанию соответствует диссертации и отражает основные положения и выводы, выносимые на защиту.


По уровню актуальности и научной новизны, решенных задач, полученных результатов и достигнутых целей, теоретической и практической ценности, апробации и публикаций работа Крапивницкой Т.О. соответствует требованиям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней»,



утвержденное постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842 (в ред. Постановления Правительства РФ от 21.04.2016 года № 355), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Соискатель Крапивницкая Т.О. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.13. – «Процессы и аппараты химических технологий».

Доклад соискателя был обсужден на заседании кафедры «Процессы и аппараты химических технологий» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет» (ФГБОУ ВО КНИТУ) протокол № 1 от 2 сентября 2024 г.

Доцент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий» кандидат технических наук (05.17.08 – «Процессы и аппараты химических технологий»), доцент

 02.09.24 Анашкин И.П.  
подпись, дата

Адрес: 420015, Российская Федерация, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68  
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»,  
Телефон: +7(843)231-40-46  
E-mail.: anashkin.ivan@gmail.com

Подпись Анашкина Ивана Петровича заверяю



Подпись <u>Анашкина И.П.</u>
удостоверяю.
Специалист по кадрам 1 категории отдела кадрового делопроизводства ФГБОУ ВО «КНИТУ»
<u>И.А. Храмова</u> « <u>02</u> » <u>09</u> 20 <u>24</u> г.