

# Моделирование микроволновых компонентов комплекса для СВЧ-пиролиза органических материалов

Т.О. Крапивницкая, А.А. Вихарев, С.А. Ананичева, А.Б. Алыева, М.Ю. Глявин, Н.Ю. Песков

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

**Аннотация:** в данной работе предложены конструктивные элементы комплекса для микроволнового пиролиза, а именно: элемент поляризационной развязки излучения, эффективные волноводные уголки, оптимизированный переход с прямоугольного сечения волновода на круглый, просветленное вакуумное барьерное окно, эллиптический вращатель СВЧ – излучения. Проведено численное трехмерное моделирование и оптимизация предложенных волноводных элементов системы для обеспечения эффективной транспортировки излучения в объем реактора с низким уровнем отражений, что позволит обеспечить длительную и безаварийную работу СВЧ-комплекса.

**Ключевые слова:** СВЧ-излучение, пиролиз, термолиз, микроволновый комплекс, переработка торфа.

## 1. Введение

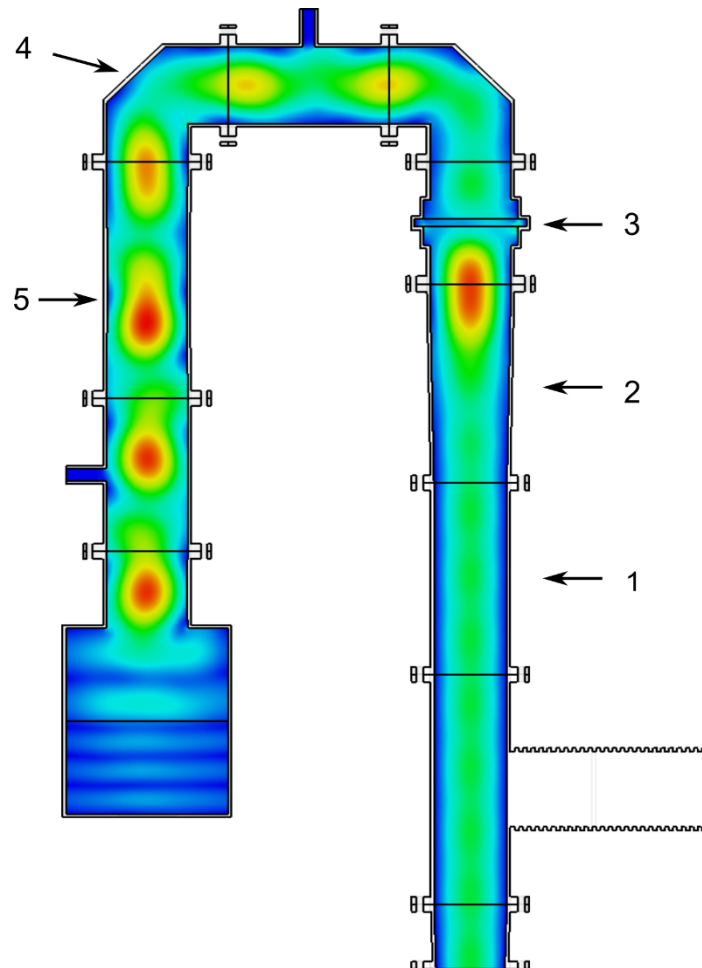
Пиролиз (термический распад без доступа кислорода) твёрдых органических соединений под воздействием излучения с широким спектром частот – это комплексная задача, требующая всестороннего подхода [1-2]. Наиболее перспективным направлением в данной области является применение микроволнового излучения в СВЧ диапазоне с частотой 2.45 ГГц, типичной для стандартного коммерческого магнетрона. Тем не менее, исследователи отмечают неоднородность распределения излучения [3], наличие локального перегрева и снижение равномерности нагрева из-за разных диэлектрических свойств материала в объеме образца [4–6]. Для решения этих проблем требуется создать универсальное устройство, обеспечивающее непрерывный процесс и подстраивающееся под флуктуирующие характеристики обрабатываемого объекта. Цель настоящей работы состоит в разработке компонентов для универсальной системы микроволнового пиролиза органических веществ. Основная функция такой системы - стабильная работа независимо от физических и химических характеристик объекта внутри реактора.

## 2. Компьютерное моделирование элементов микроволнового комплекса

Основным направлением расчётов была оптимизация системы ввода излучения в реактор с целью увеличения эффективности передачи СВЧ - мощности от источника (промышленного магнетрона) в рабочий резонатор, а также обеспечения однородности нагрева перерабатываемого материала с целью увеличения выхода полезных продуктов, повышения электропрочности установки и срока службы СВЧ - источника и компонентов реактора. Пространственное распределение электромагнитного поля в системе передачи СВЧ-излучения и рабочей камере рассчитывалось с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD) в пакете программ CST Studio Suite.

Микроволновый комплекс в основном состоит из цилиндрического стального реактора, линии передачи излучения, источника излучения, системы контроля параметров, системы фракционирования и очистки продукта. Была проведена

оптимизация передающего СВЧ-тракта, включающего вводы мощности (рупор) (2) и барьерное окно (3), волноводные повороты (4) и эллиптический вращатель (5) с точки зрения минимизации отражений и обеспечения длительной устойчивой работы источников с минимальными тепловыми нагрузками в отсутствии СВЧ-пробоев (рис.1).



**Рисунок 1.** Результаты CST-моделирования разработанного микроволнового комплекса: 1 - трехштырьковый согласователь, 2 - рупор (переход с прямоугольного сечения на круглое), 3 - барьерное окно, 4 – полноволновый поворот, 5 – эллиптический вращатель.

Одной из основных проблем при проектировании СВЧ-системы комплекса является значительное изменение электродинамических свойств органических материалов (прежде всего, мнимой части диэлектрической проницаемости, характеризующей поглощение СВЧ-энергии) в ходе реакции пиролиза. В начале этого процесса целлюлозосодержащий материал (в частности, торф) имеет относительно высокую влажность и, следовательно, высокий коэффициент поглощения. Затем, по мере испарения влаги, поглощение топлива резко падает, и, как следствие, отражение от загруженного реактора может существенно увеличиваться. Это означает, что в неоптимизированной системе значительная часть СВЧ-мощности может отражаться назад в источник (магнетрон). Это, в итоге, снижает эффективность его работы и срок службы.

Для обеспечения согласования источника излучения и реактора была предложена и разработана волноводная система с тремя подвижными поршнями (трехштырьковый согласователь - 1), которая способна компенсировать отражение независимо от фазы отраженного сигнала от реактора до уровня -30 дБ на рабочей частоте, которая

составляет 2.465 ГГц. Полученное в рамках CST-моделирования среднее распределение электрического поля в продольных вертикальном и горизонтальном сечениях трехштырькового согласователя. Использование данного узла позволяет обеспечить эффективную работу магнетрона в оптимальном режиме в широком диапазоне диэлектрических характеристик обрабатываемого сырья и доли загружаемого объема реактора. Рассчитанная частотная зависимость коэффициента отражения при загрузке реактора сырьем на 50%, диэлектрические характеристики которого равны измеренным значениям для высушенного торфа. Расположение поршней было выбрано таким образом, чтобы компенсировать отражение от реактора на рабочей частоте магнетрона. Согласно результатам моделирования, система согласования позволила уменьшить отражение ниже -20 дБ (с учетом полосы пропускания магнетрона).

На участке линии передачи излучения введен переход (рупор) (2) с круглого сечения на прямоугольное. Длина рупора оптимизировалась для обеспечения минимума отражения и составила с учетом ограничений габаритов разрабатываемой установки 26 см. При этом расчетный коэффициент отражения на рабочей частоте 2.45 ГГц не превышает -30 дБ.

Предусмотренное в разрабатываемой конструкции кварцевое окно (3) призвано обеспечить барьер между вакуумной и атмосферной частью волноводного тракта и обеспечить возможность работы реактора при пониженном давлении. Толщина кварцевого диска была выбрана нерезонансной и составила 10 мм. Для просветления данного окна на рабочей частоте необходимо было обеспечить согласование, которое было реализовано путем расширения волновода. Для обеспечения минимума отражения на рабочей частоте в рамках моделирования также была проведена оптимизация геометрии этого расширения: его длины и диаметра.

Волноводный уголок (4), обеспечивающий эффективный поворот направления распространения СВЧ-излучения на 90°. Уголок представляет собой сочленение двух волноводов круглого сечения с зеркалом, расположенным под 45 градусов к падающему излучению, таким образом уменьшить высоту волновода и снизить нагрузку на комплекс. Расстояние от внутреннего угла до зеркала оптимизировалось для получения минимального отражения на рабочей частоте 2.45 ГГц. Коэффициент отражения уголка, полученный в результате проведенной оптимизации, и на рабочей частоте не превосходит -30 дБ.

В качестве второго кардинального решения, позволяющего обеспечить максимально равномерное распределение поля в СВЧ-реакторе, было предложено использование «вращателя» (5) СВЧ-поля (как некий аналог вращения нагреваемого объекта в «бытовых» СВЧ-печах). Этот волноводный вращатель должен быть расположен перед входом в рабочую камеру и обеспечивать создание круговой поляризации входящего в эту камеру СВЧ-излучения (из волны линейной поляризации, транспортируемой от источника). Был сконструирован волноводный вращатель в виде участка эллиптического волновода, имеющего плавные переходы на волновод круглого сечения, и наклоненный на 45° относительно линии поляризации волны TE<sub>1,1</sub>, распространяющейся в передающей волноводной линии. Передаваемое по волноводной линии излучение со структурой моды TE<sub>1,1</sub> имеет линейную поляризацию, при попадании ее во вращатель возбуждается волна того же, TE<sub>1,1</sub>-типа с перпендикулярной поляризацией. В итоге, в эллиптической части распространяются две моды с перпендикулярными поляризациями, имеющими разные постоянные распространения и фазовые скорости, таким образом, на специально подобранной длине эллиптического участка набегают разность фаз между этими модами равная 90° на выходе из вращателя. То есть в волноводе круглого сечения получается комбинация двух перпендикулярных мод TE<sub>1,1</sub>-типа с разностью фаз 90°, и такая комбинация

представляет собой вращающуюся волну. Согласно проведенному моделированию, вращающееся СВЧ-излучение, попадая в рабочую камеру, облучает больше материала, чем линейно-поляризованное.

На основе проведенного моделирования составные частей волноводной линии была разработана конструкция микроволнового комплекса для пиролиза органических материалов, содержащая в себе набор разработанных СВЧ - элементов, описанных выше. Эти элементы были оптимизированы для максимально эффективной передачи излучения от источника в объем реактора (с минимальным уровнем отражений), что, таким образом, позволяет обеспечить длительную безаварийную работу СВЧ - комплекса.

### 3. Заключение

На основе проведенного моделирования была разработана конструкция микроволнового комплекса для пиролиза органических материалов, содержащего набор разработанных микроволновых элементов, описанных выше. Эти элементы оптимизированы для наиболее эффективной передачи излучения от источника в объем реактора с минимальным уровнем отражений, что обеспечивает длительную безаварийную работу микроволнового комплекса.

Разработан комплекс, ориентированный на переработку органического сырья. Использование вращателя микроволнового излучения позволяет достичь равномерного нагрева обрабатываемого материала и одинаковых условий для реакции пиролиза по всему его объему и, таким образом, глубокой переработки сырья. При этом длительная безаварийная работа комплекса в изменяющихся условиях во время реакции диэлектрических параметров должна контролироваться автоматизированной системой, основанной на трехштырьковом преобразователе.

Исследование выполнено за счет **гранта Российского научного фонда (проект № 23-19-00763)**.

#### Список литературы

1. Demirbas A. Pyrolysis of Biomass for Fuels and Chemicals // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.*– 2009.– Vol. 31, № 12.– P. 1028–1037.
2. Patel A., Agrawal B., Rawal B.R. Pyrolysis of biomass for efficient extraction of biofuel // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects.*– 2020.– Vol. 42, № 13.– P. 1649–1661.
3. Kappe C.O., Dallinger D., Murphree S.S. *Practical Microwave Synthesis for Organic Chemists.*– Wiley, 2008.
4. Zhang Y., Lei H., Yang Z., Qian K., Villota E. Renewable High-Purity Mono-Phenol Production from Catalytic Microwave-Induced Pyrolysis of Cellulose over Biomass-Derived Activated Carbon Catalyst // *ACS Sustain Chem Eng.*– 2018.– Vol. 6, № 4.– P. 5349–5357.
5. Luo J., Ma R., Lin J., Sun S., Gong G., Sun J., Chen Y., Ma N. Review of microwave pyrolysis of sludge to produce high quality biogas: Multi-perspectives process optimization and critical issues proposal // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.*– 2023.– Vol. 173.– P. 113107.
6. Su G., Ong H.C., Cheah M.Y., Chen W.-H., Lam S.S., Huang Y. Microwave-assisted pyrolysis technology for bioenergy recovery: Mechanism, performance, and prospect // *Fuel.*– 2022.– Vol. 326.– P. 124983.