

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.8>

УДК: 537.86

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ КОМПЛЕКСА МИКРОВОЛНОВОГО ПИРОЛИЗА

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

ФИЦ Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46

Статья поступила в редакцию 23 мая 2025 г.

Аннотация. Работа посвящена разработке микроволнового комплекса с рабочей частотой 2.45 ГГц для термической переработки торфа методом пиролиза. Исследованы физические свойства верхового и низинного торфа, проведены измерения ключевых параметров, характеризующих диэлектрические характеристики. Тангенс угла диэлектрических потерь и диэлектрическая проницаемость для верхового торфа составили 3.4×10^{-2} и 1.58, а для низинного торфа 6.5×10^{-2} и 2.76 соответственно. Предложены конструктивные элементы электродинамической системы для создания СВЧ-комплекса, позволяющего перерабатывать большой объем органического материала в процессе пиролиза, включая эффективные волноводные повороты, оптимизированный переход от прямоугольного сечения волновода к круглому, безотражательное вакуумное барьерное окно, эллиптический преобразователь поляризации СВЧ-излучения. Для определения пространственного распределения электромагнитного поля в системе применен метод конечных разностей во временной области. Проведено трехмерное численное моделирование и оптимизация предложенных волноводных элементов системы с целью обеспечения эффективной передачи

СВЧ-энергии в реактор с минимальными потерями на отражение, что способствует надежной и долговечной работе комплекса.

Ключевые слова: микроволновый пиролиз, сверхразмерный СВЧ-реактор, волноводная система передачи излучения, диэлектрические свойства торфа.

Финансирование: Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 23-19-00763.

Автор для переписки: Крапивницкая Татьяна Олеговна, kto@ipfran.ru

Введение

Микроволновый пиролиз (термическое разложение органических материалов в бескислородной среде) представляет собой перспективный метод термохимической конверсии, характеризующийся эффективным объемным нагревом обрабатываемого материала [1, 2]. Эффективность данного процесса определяется его диэлектрическими свойствами и поглощательной способностью [3, 4].

Разработка комплексов СВЧ-пиролиза, предназначенных для переработки значительных масс органического сырья, сталкивается с рядом проблем, обусловленных неоднородностью распределения электромагнитного поля [5], возникновением локальных перегревов и снижением равномерности нагрева, вызванными пространственной неоднородностью диэлектрических свойств обрабатываемого материала [6-8]. Для решения указанных проблем необходима разработка универсальной СВЧ-установки, обеспечивающей стабильную и надежную работу излучателя (на основе промышленного магнетрона с рабочей частотой 2.45 ГГц), а также электродинамической системы способной адаптироваться к изменяющимся параметрам облучаемого объекта. Целью представленных в статье исследований является моделирование компонентов комплекса для микроволнового пиролиза больших объемов органических материалов, в частности, верхового торфа низкой степени разложения. Ключевой задачей разрабатываемой установки является обеспечение стабильной

работы, не зависящей от вариаций физико-химических характеристик перерабатываемого материала, находящегося внутри реактора.

1. Измерение диэлектрических параметров обрабатываемого материала

Для исследования диэлектрических характеристик материалов в настоящее время используются различные методы измерений: нерезонансный, резонансный и свободного пространства [9, 10]. Нерезонансный метод, а именно метод согласования полей на границах сред, является наиболее удобным и точным методом в дециметровом и сантиметровом диапазоне длин волн [11-13]. Данный метод основан на измерении коэффициентов отражения и прохождения волн, распространяющихся в волноводе, на основе которых определяются диэлектрическая проницаемость и тангенс угла потерь. Диэлектрические свойства образцов исследовались на частоте 2.45 ГГц (частоте работы разрабатываемого комплекса). Данные экспериментальных измерений сравнивались с решением аналитической задачи, описывающей процесс прохождения и отражения электромагнитной волны в волноводе от слоя исследуемого вещества.

В рамках развитой теоретической модели приравнивались значения и производные электрического поля с обеих сторон границы раздела. Электрическое поле с одной стороны границы (со стороны вакуума) состоит из падающей и отраженной (R) волн, а с другой стороны состоит из волн, распространяющихся внутри диэлектрического слоя (рис. 1). Таким образом, получается система алгебраических уравнений, в которой неизвестными являются амплитуды волн. Из решения данных уравнений может быть получена зависимость коэффициента отражения (мощности отраженной волны $|R|^2$) от комплексного значения диэлектрической проницаемости слоя ($\hat{\epsilon}$) и толщины диэлектрика (d):

$$|R|^2 = \left| e^{-2ik_1d} \frac{k_1(-1 + e^{2ik_2d}) + k_2(1 + e^{2ik_2d})}{k_1(-1 + e^{2ik_2d}) - k_2(1 + e^{2ik_2d})} \right|^2, \quad (1)$$

где $k_0 = \frac{2\pi f}{c}$ – постоянная распространения в свободном пространстве, $k_1 = \sqrt{k_0^2 - (\pi/a)^2}$ – постоянная распространения волны $TE_{1,0}$ в прямоугольном волноводе, $k_2 = \sqrt{k_0^2 \hat{\epsilon} - (\pi/a)^2}$ – постоянная распространения волны $TE_{1,0}$ в волноводе с диэлектрическим заполнением, d – толщина слоя, a – размер широкой стенки прямоугольного волновода, f – частота излучения, c – скорость света в вакууме,

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' + i\epsilon'' = \epsilon'(1 + i \tan \delta), \quad (2)$$

$\hat{\epsilon}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость слоя, ϵ' и ϵ'' – ее действительная и мнимая части соответственно, $\tan \delta$ – тангенс угла диэлектрических потерь. Сравнивая решение аналитической задачи с результатами измерений коэффициента отражения (прохождения) можно «восстановить» диэлектрические характеристики (2), обеспечивающие совпадение решения (1) с экспериментальными данными.

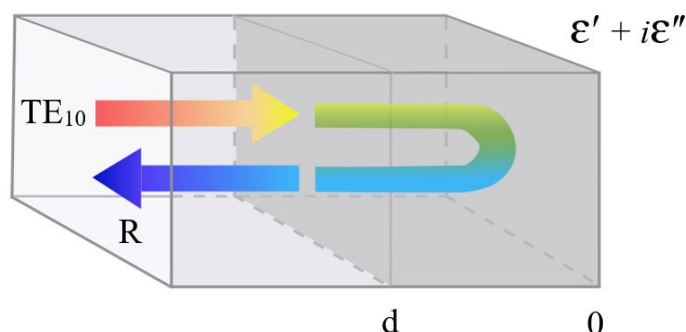


Рис. 1. Схема разработанной аналитической модели для определения диэлектрических свойств целлюлозосодержащих материалов.

Для исследования диэлектрических свойств материалов в рамках разработанного метода слои исследуемого образца различной толщины помещались внутрь отрезка стандартного прямоугольного волновода с поперечным сечением $90 \text{ мм} \times 45 \text{ мм}$ и замкнутым торцом. Отрезок волновода через коаксиально-волноводный переход соединялся с векторным анализатором цепей, измеряющим коэффициента отражения на заданной частоте 2.45 ГГц.

Для калибровки системы и контроля точности использованного метода были выполнены «эталонные» измерения с водой. На рис. 2 показаны зависимости коэффициента отражения от толщины водного слоя: экспериментально измеренная (точки) и построенная по формуле (1) (сплошная кривая) при подобранных значениях $\varepsilon' = 76$ и $\tan \delta = 0.12$. Полученные диэлектрические характеристики хорошо согласуются с результатами, представленными в [5]. Небольшая разница в результатах измерения диэлектрической постоянной (в [5] указано $\varepsilon' = 80$) возможна из-за разного состава воды: в проведенных измерениях использовалась «водопроводная» вода без дополнительной фильтрации. Совпадение аналитического решения с экспериментальными данными демонстрирует точность развитой модели и метода определения диэлектрических свойств для широко класса материалов.

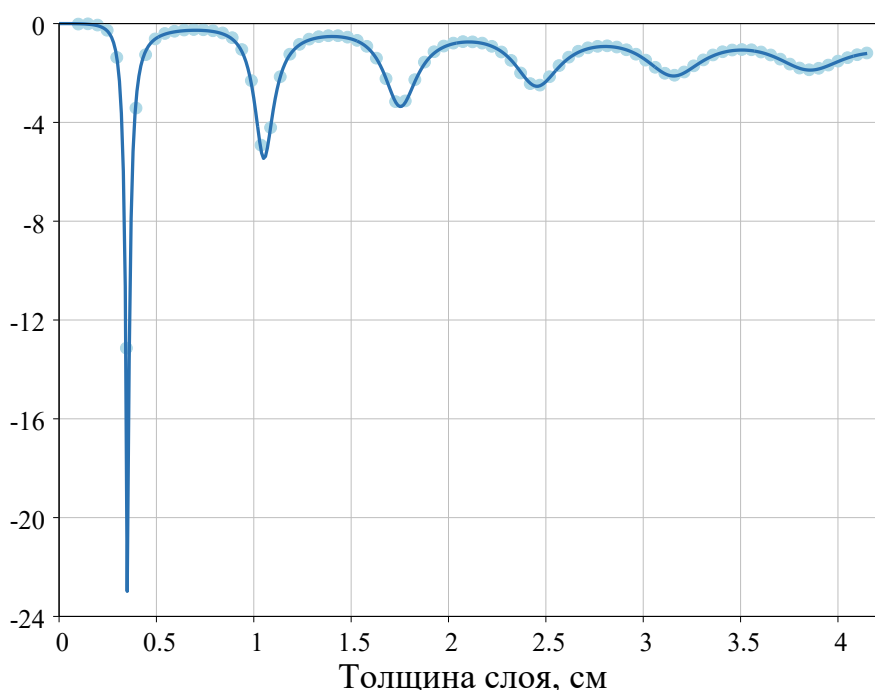


Рис. 2. Зависимость коэффициента отражения волны от толщины слоя для «водопроводной» воды: сплошная линия – аналитическое решение (1), точки – результаты измерений.

Следует отметить, что используемый метод имеет ряд допущений и является наиболее точным для исследования сплошных сред без неоднородностей, вызывающих рассеяние излучения рабочей моды $TE_{1,0}$ в моды волновода более высокого порядка. Для сыпучих материалов, таких как торф,

метод применим, так как это материал обладает низкой диэлектрической проницаемостью, и заполненный торфом участок волновода остается одномодовым (с одной возможной структурой электромагнитного поля в поперечном сечении волновода). При этом необходимо обеспечить приемлемую пространственную однородность слоя с торфяным порошком, чтобы моды с высоким индексом не возбуждались в волноводе. Таким образом, слой торфяного порошка должен быть насыпан максимально равномерно, чтобы неоднородности не приводили к погрешностям измерений.

Измерения диэлектрических параметров проводилось для целлюлозосодержащих материалов – образцов сфагнового верхового и низинного торфа. Для обеспечения однородности состава образцы торфа измельчались и просеивали через сито с размером ячеек около 1 мм. Наложение решения аналитической задачи отражения СВЧ-излучения в волноводе для слоя торфа в зависимости от его толщины на данные экспериментальных измерений показано на рис. 3.

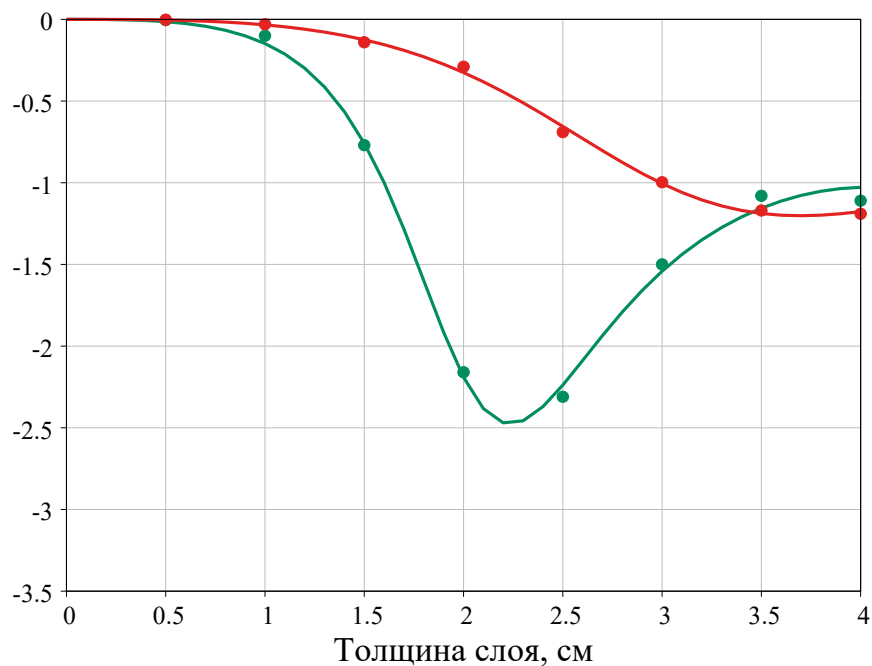


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения волны от толщины слоя для верхового (красный цвет) и низинного (зеленый цвет) торфов: сплошные линии – аналитические решения, точки – результаты измерений.

Сравнение результатов измерений и аналитического решения (1) позволяет определить значение коэффициента диэлектрической проницаемости и угла диэлектрических потерь, которые для верхового торфа составляют $\varepsilon' = 1.58$, $\tan \delta = 3.4 \times 10^{-2}$, а для низинного $\varepsilon' = 2.76$, $\tan \delta = 6.5 \times 10^{-2}$. Измерения показали, что различия в компонентном составе низинного и верхового торфа отражаются на его диэлектрических свойствах: низинный торф имеет около 1.5-1.8 раз большую диэлектрическую проницаемость и обладает почти вдвое большей поглощающей способностью по сравнению с верховым торфом.

2. Моделирование компонентов системы

Основным направлением расчетов была оптимизация системы ввода излучения в реактор с целью повышения эффективности передачи СВЧ-мощности от источника (промышленного магнетрона) до рабочего резонатора-реактора, а также обеспечения равномерного нагрева обрабатываемого материала с целью повышения выхода полезной продукции, электрической прочности установки и срока службы СВЧ-источника и элементов комплекса. Расчет пространственного распределения электромагнитного поля в системе передачи СВЧ-излучения в рабочей камере производился с использованием метода конечных разностей во временной области (FDTD) в программном пакете CST Studio Suite. Схема установки показана на рис. 4.

Разрабатываемый СВЧ-комплекс для пиролиза включает в себя цилиндрический стальной резонатор – реактор, источник СВЧ-излучения и систему его передачи в реактор, систему контроля технологических параметров, а также систему фракционирования и очистки продуктов пиролиза. На основе результатов численного моделирования выполнена оптимизация геометрии СВЧ-тракта, представленного на рис. 4, целью которой была минимизация коэффициента отражения и обеспечение стабильной работы генератора СВЧ-излучения (магнетрона) при минимальной тепловой нагрузке и отсутствии электрических пробоев.

Одной из основных проблем при проектировании СВЧ-системы комплекса является существенное изменение диэлектрических свойств органических материалов в процессе пиролиза. В первую очередь, в ходе реакции пиролиза изменяется мнимая часть диэлектрической проницаемости, характеризующая поглощение СВЧ-энергии. В результате проведенных измерений было показано, что исходный торф, имеющий влажность около 21 %, обладал более низкой поглощающей способностью относительно полученного твердого углеродистого остатка (с влажностью 5 %). Это означает, что в неоптимизированной системе в начале процесса относительно большая часть микроволновой мощности может отражаться обратно в источник (магнетрон). Это, в конечном итоге, снижает его производительность и срок службы.

Для обеспечения согласования источника излучения и реактора предложено использовать волноводный компенсатор отражений с тремя подвижными поршнями (трехштырьковый согласователь «1»), который способен компенсировать отражение независимо от уровня отраженного сигнала от реактора на рабочей частоте 2.45 ГГц. Использование данного узла позволяет обеспечить эффективную работу магнетрона в оптимальном режиме в широком диапазоне диэлектрических характеристик обрабатываемого сырья.

На участке линии передачи излучения введен переход (рупор) «2» с прямоугольного сечения на круглое. Длина рупора была оптимизирована для обеспечения минимума отражения и с учетом ограничений габаритов разрабатываемой установки составила 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 частями волноводного тракта и обеспечить возможность работы реактора при пониженном давлении. Толщина кварцевого диска была выбрана нерезонансной и составила 10 мм. Для снижения отражения на рабочей частоте необходимо было обеспечить согласование, что было реализовано путем расширения волновода. В ходе моделирования также была оптимизирована геометрия этого

удлинения: его длина и диаметр, чтобы минимизировать отражение ниже -30 дБ на рабочей частоте.

Угловая секция волновода «4» обеспечивает эффективный поворот направления распространения микроволнового излучения на 90° . Волноводный уголок представляет собой соединение двух круглых волноводов с зеркалом, расположенным под углом 45° к падающему излучению. Такое решение компактнее, чем изгиб волновода, и, таким образом, уменьшает размер системы. Расстояние от внутреннего угла до зеркала было оптимизировано для получения минимального отражения на рабочей частоте 2.45 ГГц. Коэффициент отражения углового волновода не превышает -30 дБ на рабочей частоте в результате оптимизации.

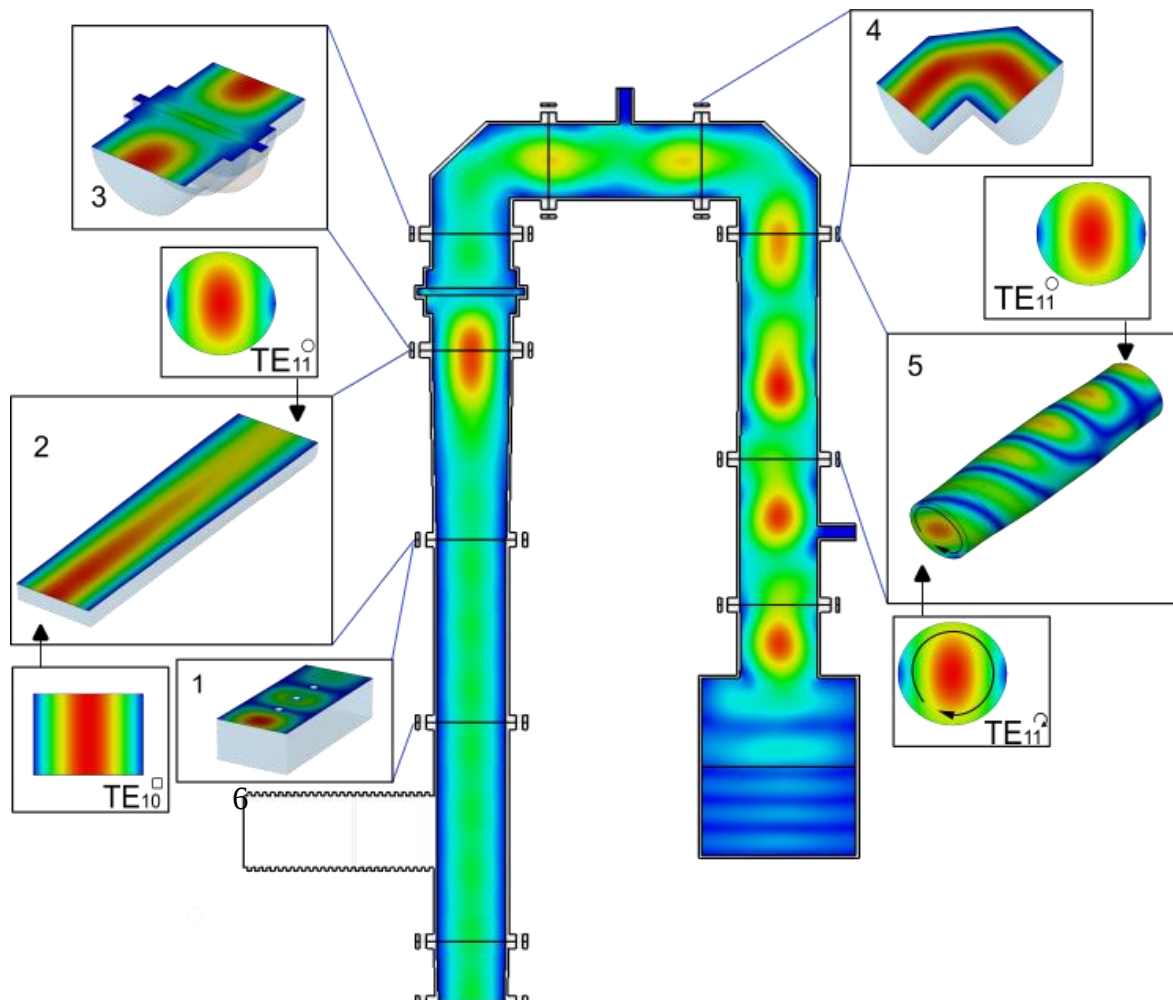


Рис. 4. Конструктивная схема разработанного СВЧ-комплекса и результаты его CST-моделирования: 1 – трехштырьковый согласователь, 2 – рупорный переход с прямоугольного сечения на круглое, 3 – барьерное окно, 4 – поворотный волновод, 5 – эллиптический преобразователь поляризации СВЧ-излучения, 6 – вентиль на ферритовом циркуляторе.

Для достижения максимально равномерного распределения поля в микроволновом реакторе было предложено использование преобразователя поляризации микроволнового поля «5» как своеобразного аналога вращения нагреваемого объекта в «бытовых» микроволновых печах. Данный волноводный поляризатор должен располагаться перед входом в рабочую камеру и обеспечивать создание круговой поляризации СВЧ-излучения, поступающего в эту камеру из линейно поляризованной волны, транспортируемой от источника. На основе моделирования был спроектирован волноводный поляризатор в виде отрезка эллиптического волновода с эллиптичностью в диапазоне 0.1-0.2 и с плавными переходами к волноводу круглого сечения. Этот эллиптический отрезок наклонен на 45° относительно линии поляризации волны $TE_{1,1}$ круглого волновода. Излучение на моде $TE_{1,1}$, прошедшее по волноводной линии, имеет линейную поляризацию. При попадании излучения на участок эллиптического сечения возбуждается волна того же $TE_{1,1}$ -типа с перпендикулярной поляризацией. В результате в эллиптической части распространяются две моды с перпендикулярными поляризациями, имеющие разные постоянные распространения и фазовые скорости. При специально подобранной длине эллиптического участка разность фаз между этими модами на выходе из поляризатора равна 90° . Таким образом, на выходе получается вращающаяся волна как совокупность двух перпендикулярных мод TE_{11} с разностью фаз 90° . Согласно моделированию, вращающееся СВЧ-излучение, попадая в рабочую камеру, облучает обрабатываемый материал более эффективно, чем линейно поляризованное излучение.

Заключение

На основе развитого оригинального подхода проведены измерения диэлектрических характеристик целлюлозосодержащих материалов – верхового и низинного торфов. На этой основе выполнено моделирование и конструирование СВЧ-реактора пиролиза с большим объемом загрузки данных материалов.

На основе проведенного моделирования разработана конструкция СВЧ-комплекса для пиролиза широкого класса органических материалов, включающая в себя ряд оптимизированных СВЧ-компонентов, которые обеспечивают эффективную передачу энергии от генератора в рабочий объем реактора с минимальным коэффициентом отражения. Предложенная конструкция ориентирована на переработку органического сырья и включает в себя преобразователь поляризации СВЧ-излучения, обеспечивающий равномерный нагрев и однородность условий пиролиза по всему объему обрабатываемого материала, что способствует глубокой конверсии сырья. Долговременная стабильность работы комплекса в условиях изменяющихся диэлектрических характеристик материала обеспечивается автоматизированной системой контроля и управления на основе трехштырькового согласователя.

Финансирование: Работа поддержана Российским научным фондом, грант № 23-19-00763.

Литература

1. Balasubramanian P. Emerging trends and research frontiers of biochar derived through microwave assisted pyrolysis: A scientometric review // Bioresour Technol Rep. – 2023. – Vol.24. – P. 01601. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101601>
2. Suriapparao D.V., Tejasvi R. A review on role of process parameters on pyrolysis of biomass and plastics: Present scope and future opportunities in conventional and microwave-assisted pyrolysis technologies // Process Safety and Environmental Protection. – 2022. – Vol.162. – P.435-462. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.04.024>
3. Li L. et al. Prediction of product yields from lignocellulosic biomass pyrolysis based on gaussian process regression // Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. – 2024. – Vol.177. – P.106295. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.106295>

4. Li J. et al. Microwave-assisted pyrolysis of solid waste for production of high-value liquid oil, syngas, and carbon solids: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2024. – Vol.189. – P.113979. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113979>
5. Kappe C.O., Dallinger D., Murphree S.S. Practical Microwave Synthesis for Organic Chemists. Wiley, 2008. <https://doi.org/10.1002/9783527623907>
6. Zhang Y. et al. 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. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b00129>
7. Luo J. et al. 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. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113107>
8. Su G. et al. Microwave-assisted pyrolysis technology for bioenergy recovery: Mechanism, performance, and prospect // Fuel. – 2022. – Vol.326. – P. 24983. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124983>
9. Meda V., Raghavan V. An Overview of Dielectric Properties Measuring Techniques // Canadian Biosystems Engineering / Le Genie des biosystems au Canada. – 2005. – Vol.47. – P.15-30.
10. Фомин Д.Г., Дударев Н.В., Даровских С.Н. Анализ методов измерения диэлектрических свойств материалов в СВЧ диапазоне длин волн. // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2021. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.6>
11. Severo S.L.S. et al. Non-resonant Permittivity Measurement Methods // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications. – 2017. – Vol.16 (1). – P.297-311. <https://doi.org/10.1590/2179-10742017v16i1890>
12. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques // IEEE Trans Instrum Meas. – 1970. – Vol.19 (4). – P.377-382. <https://doi.org/10.1109/TIM.1970.4313932>

13. Rothwell E.J. et al. Analysis of the Nicolson-Ross-Weir method for characterizing the electromagnetic properties of engineered materials // Progress In Electromagnetics Research. – 2016. – Vol.157. – P.31-47.
<https://doi.org/10.2528/PIER16071706>

Для цитирования:

Вихарев А.А., Крапивницкая Т.О., Ананичева С.А., Алыева А.Б., Громов А.В., Глявин М.Ю., Песков Н.Ю. Моделирование электродинамических компонентов комплекса микроволнового пиролиза // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №5. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.8>