

РАДИОФОТОННАЯ СИСТЕМА БЕСКОНТАКТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ОБРАБАТЫВАЕМОМ МАТЕРИАЛЕ В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТОЙ РАБОЧЕЙ КАМЕРЫ ЛАБОРАТОРНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ СВЧ-ДИАПАЗОНА

*Н.Е. Кувшинов¹, Рин.Ш. Мисбахов^{1,3}, Рус.Ш. Мисбахов^{2,3},
О.Г. Морозов³, Г.А. Морозов³, А.Р. Насыбуллин³, Джердави Дахам³,
М.Ю. Застела³, Ю.И. Чони³, А.З. Петрова⁴*

¹Университет Иннополис,
Российская Федерация, 420500, г. Иннополис, ул. Университетская, 1

²ООО «ТатАИСнефть»,
Российская Федерация, 423450, г. Альметьевск, ул. Р. Фахретдина, 62

³Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ

Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

⁴МЦК-КТИТС
Российская Федерация, 420061, г. Казань, ул. Галеева, 3а

Аннотация: В статье предложен новый этап модернизации калориметрического метода бесконтактного измерения распределения температур в обрабатываемой среде, расположенной в рабочей камере лабораторной СВЧ технологической установки, на базе матрицы дискретных термопреобразователей из поглощающего материала. На данном этапе термопреобразователи расположены не только на нижней, но и на верхней стенке рабочей камеры. После измерения поля температур термопреобразователей оно может быть пересчитано в распределение поля температур в обрабатываемой среде, поскольку верхняя матрица датчиков будет учитывать отраженную составляющую мощности ЭМП, а нижняя – прошедшую, учитывая пропорциональность приращения их температур мощностям, которые воздействуют на каждый из термопреобразователей определенный период времени. Для решения вопроса удешевления системы опроса термопреобразователей, ее конструктивного упрощения и улучшения ее метрологических характеристик предложено использовать адресные волоконные брэгговские структуры нового комбинированного типа, встраиваемые в каждый термопреобразователь, и радиофотонные системы опроса полученной последовательности термопреобразователей-датчиков, соединенных оптическим волокном, которые кроме высокой чувствительности и высокой скорости отклика на изменение температуры, обеспечивают оператора информацией о номере опрашиваемого элемента матрицы (адресе). Показана универсальность применения таких датчиков как на пропускание, так и на отражение, что упрощает систему в целом и позволяет резервировать измерительные каналы, охватывающие в целом более 100 датчиков сверху и снизу.

Ключевые слова: рабочая СВЧ-камера; распределение температур в обрабатываемой среде; бесконтактный калориметрический метод; матрица термопреобразователей; встроенные комбинированные адресные волоконные брэгговские структуры; радиофотонная система измерений.

Введение

Точная и надежная система лабораторного измерения температуры в обрабатываемых СВЧ-излучением материалах важна не только для разработки систем мониторинга и адаптивного управления протекающими процессами, но и сравнения эффективности различных реакторных СВЧ-систем и лабораторных СВЧ-установок [1].

Использование волоконно-оптических датчиков температуры (ВОДТ) на сегодня представляется лучшим вариантом [2]. Датчик может быть встроен непосредственно в обрабатываемый материал (ОМ), защищен либо термогильзой из стекла/кварца, либо из керамики, которые прозрачны для микроволнового излучения, как и сам волоконный световод (ВС). Тем не менее, к ВОДТ предъявляются требования обеспечения распределенного или квази-распределенного измерения температуры (аналог тепловизора), которые необходимы в случае неоднородного ОМ или применения для микроволнового нагрева неоднородного ЭМП [3]. ВОДТ указанных типов представляют собой достаточно простые устройства, которые используют в себе преимущества, как преобразователя физических полей, так и линии для передачи полученной информации, но характеризуются сверхдорогими системами опроса датчиков – оптико-электронными корреляторами или интеррогаторами [4]. Кроме того, они являются контактными, что усложняет их применение в процессе промышленной эксплуатации.

В качестве основы их применения как бесконтактных как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации может быть предложена модернизация калориметрического метода [5, 6] измерения распределения температур и интенсивности ЭМП в рабочей камере лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона на базе матрицы дискретных термопреобразователей (ТП) из поглощающего материала. Для решения вопроса удешевления системы опроса и улучшения ее метрологических характеристик предложено использовать волоконные брэгговские структуры [7, 8] адресного типа с радиофотонными интеррогаторами, которые кроме высокой чувствительности и высокой скорости отклика на изменение температуры [9-11], обеспечивают оператора информацией о номере опрашиваемого элемента матрицы (адресе) и несравненно дешевле оптико-электронных.

В дальнейшем статья будет построена следующим образом. В первом разделе будет представлено решение задачи контроля распределения мощности, прошедшей через обрабатываемый материал. Во втором разделе будет представлено решение задачи контроля распределения мощности, отраженной от обрабатываемого материала. В третьем разделе описывается сенсорная часть лабораторной технологической СВЧ-установки для контроля указанных мощностей и возможность улучшения ее характеристик по сравнению с существующими. В заключение кратко подводятся итоги работы и обсуждается концепция уточненного радиофотонного измерения распределения температур в термопреобразователях в ходе реализации СВЧ-нагрева обрабатываемой среды и возможные пути решения на основе полученных данных обратной задачи – бесконтактного контроля распределения температур в ОМ.

1. Задача контроля распределения прошедшей мощности через обрабатываемый материал

По сравнению с традиционными методами нагрева, СВЧ-нагрев экономит энергию и время, и им легче управлять. Но существуют две основные проблемы, сдерживающие его широкое применение.

Во-первых, в процессе нагрева из-за неоднородного распределения ЭМП неравномерность распределения температуры приводит к неудовлетворительным результатам нагрева. Во-вторых, на некоторых участках ОМ может произойти резкое повышение температуры. Тогда это может привести к тепловому выбегу, что очень опасно в практических приложениях. Это может вызвать возгорание ОМ или даже их взрыв.

Уравнение Максвелла и экспоненциальный закон Ламберта составляют основу для моделирования процесса СВЧ-нагрева.

Согласно закону Ламберта, мощность ЭМП экспоненциально падает в зависимости от глубины проникновения в материал. Доказана корректность расчета с помощью закона

Ламберта распределения мощности для материала большой толщины [12]. Уравнение Максвелла основано на пространственно-временных параметрах, расчет с его помощью точно характеризует характер распределения ЭМП. Однако, процесс расчета сложен и требует знания точного распределения температуры.

Уравнение Максвелла обычно используется для теоретического объяснения того или иного явления или проверки предлагаемых моделей, например, имитационного анализа процесса нагрева в СВЧ-печах [13, 14], связи между возникновением резонанса и толщиной материала [15, 16], распределения температурного поля в процессе разморозки [17] и проверки импульсного СВЧ-поля на равномерность распределения температур процесса нагрева [18]. Но в практических приложениях трудно получить точное распределение ЭМП. На распределение ЭМП влияет диэлектрическая проницаемость материала, которая напрямую связана с температурой, которая меняется в ходе процесса.

Рассмотренные в обзорах [1-3] наиболее эффективные способы измерения температуры сводятся к оптоволоконному термометру, инфракрасному термометру или инфракрасной камере. Эти методы подходят для определения поверхностной или точечной температуры. Из-за неполного знания температурного поля точное распределение ЭМП в процессе нагрева практически неизвестно. Таким образом, уравнение Максвелла нельзя использовать для решения задачи распределения мощности в практических приложениях в реальном времени.

Закон Ламберта является распространенным способом расчета распределения мощности в реальных приложениях СВЧ-нагрева, таких как разогрев, разморозка, сушка ОМ [19-24]. Но сам закон не учитывает влияния температуры, которое напрямую связано с диэлектрической проницаемостью и делает распределение мощности совершенно отличным от реального.

В этом разделе для анализа распределения мощности используется закон Ламберта в сочетании с учетом температуры ОМ, которое мы должны получить косвенно из распределения поля поглощающих ТП (калориметрический метод), установленных за объектом СВЧ-нагрева. Это позволит компенсировать нам недостаток знания о диэлектрической проницаемости ОМ, поскольку предполагается установка единого поля ТП с встроенными в них волоконно-оптическими термометрами. Наилучшим вариантом является полное знание электрофизических характеристик ОМ.

Модель распределения мощности ЭМП, примененная нами, показана на рис. 1.

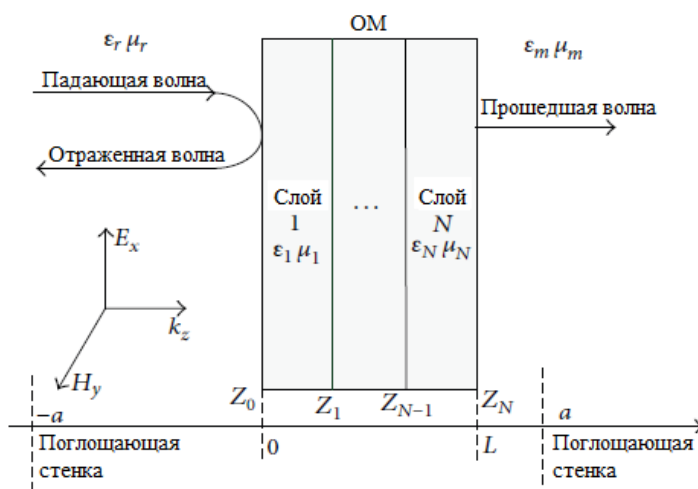


Рис. 1. Модель распространения электромагнитных волн

Нагреваемый материал с диэлектрической проницаемостью ϵ_N и магнитной проницаемостью μ_N , которые меняются в зависимости от температуры, размещается в свободном пространстве, ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость свободного пространства, μ_0 – магнитная проницаемость свободного пространства.

Предполагая, что плоская, гармоническая во времени электромагнитная волна частоты ω падает нормально на изотропный материал, который заполняет область $0 < z < L$, поперечная электрическая (ТЕ) волна распространяется вдоль направления z , с перпендикулярной электрической составляющей (E_x) вдоль x -направления и магнитной (H_y) вдоль y -направления. Волна удовлетворяет условиям Мура первого порядка для поглощающей стенки. Электромагнитное поле удовлетворяет следующим формулам:

$$\begin{aligned}\frac{\partial E_x}{\partial z} &= \mu_r \mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}; \\ \frac{\partial H_y}{\partial z} &= \epsilon_r \epsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t}.\end{aligned}\quad (1)$$

Для определения решения электрического поля внутри образца требуются решения связанных уравнений Максвелла. Нагреваемый образец в общем случае может быть изготовлен из материала с различной диэлектрической проницаемостью. Для упрощения решения установим, что он имеет N одинаковых слоев, поэтому все слои могут быть представлены как один

$$\begin{aligned}\frac{d^2 E_{x,n}}{dz^2} + k_n^2 E_{x,n} &= 0 & z < 0 \text{ (окружающая среда)} \\ \frac{d^2 E_{x,n}}{dz^2} + k_n^2 E_{x,n} &= 0 & 0 < z < L \text{ (ОМ)} \\ \frac{d^2 E_{x,N+1}}{dz^2} + k_{N+1}^2 E_{x,N+1} &= 0 & z > L \text{ (окружающая среда)}\end{aligned}\quad (2)$$

где $z_{n-1} \leq z \leq z_n$ и $n = 1 \dots N$, z_0 и z_N обозначают положение границ.

Постоянная распространения

$$k_n = \omega \sqrt{\mu_n \mu_0 (\epsilon'_n(T) + i \epsilon''_n(T)) \epsilon_0} \quad (3)$$

зависит от диэлектрической проницаемости $\epsilon'_n(T)$ и диэлектрических потерь $\epsilon''_n(T)$, проницаемости материала μ_n , равной единице для немагнитного ОМ.

Предположим, что каждый слой имеет постоянные диэлектрические свойства, тогда решения (2) могут быть представлены по закону Ламберта волной распространения и отражения в виде:

$$\begin{aligned}E_{x,0} &= A_0 e^{ik_0 z} + B_0 e^{-ik_0 z} & z < 0 \\ E_{x,n} &= A_n e^{ik_n z} + B_n e^{-ik_n z} & 0 < z < L, \quad n = 1 \dots N \\ E_{x,N+1} &= A_{N+1} e^{ik_{N+1} z} + B_{N+1} e^{-ik_{N+1} z} & z > L\end{aligned}\quad (4)$$

Электрическое и магнитное поля непрерывны на границе между различными слоями. Это выглядит следующим образом:

$$E_{x,n} = E_{x,n+1}, \quad n = 0 \dots N, \quad d \frac{E_{x,n}}{dz} = d \frac{E_{x,n+1}}{dz}, \quad z = z_0 \dots z_N. \quad (5)$$

Используя граничные условия, общие коэффициенты решения могут быть получены путем решения системы алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} A_n e^{i k_n z_n} + B_n e^{-i k_n z_n} - A_{n+1} e^{i k_{n+1} z_n} - B_{n+1} e^{-i k_{n+1} z_n} &= 0 \\ k_n A_n e^{i k_n z_n} + k_n B_n e^{-i k_n z_n} - k_{n+1} A_{n+1} e^{i k_{n+1} z_n} + k_{n+1} B_{n+1} e^{-i k_{n+1} z_n} &= 0 \\ n &= 0 \dots N. \end{aligned} \quad (6)$$

Обозначим через P_0 падающую мощность, которая является управляемой переменной в реальных приложениях. Тогда электрическая амплитуда при $z < 0$ может быть рассчитана по формуле

$$A_0 = E_0 = \sqrt{2P_0 / c \epsilon_0}, \quad (7)$$

где c – скорость света.

На основании (6) и (7) поглощаемая мощность в n -м слое, рассчитанная по векторной теореме Пойнтинга, равна

$$P(z) = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon_n'' E_{x,n}(z) E_{x,n}^*(z), \quad (8)$$

где верхний индекс «*» обозначает комплексное сопряжение.

Интегральная поглощенная мощность может быть разбита на элементы с помощью установленной за слоем ОМ матрицы ТП. При этом интегральная мощность, падающая на ТП, будет равна разности падающей начальной мощности и мощности, поглощенной в нагреваемом слое.

Таким образом, приведенное выше решение задачи будет справедливо и для второго нагреваемого слоя – слоя ТП.

2. Задача контроля распределения отраженной мощности от обрабатываемого материала

Описание взаимодействия электромагнитной волны с индикаторным материалом очень важно для реализации калориметрического метода. В этом контексте нам необходимо учитывать два явления: рассеивание диэлектрической мощности и полный коэффициент отражения. Рассеивание диэлектрической мощности имеет важное значение для процесса нагрева ОМ и рассмотрено нами в разделе 1 статьи. Однако общий коэффициент отражения также представляет большой интерес, поскольку в случае отсутствия его учета могут возникнуть искажения, которые могут привести к искажению восстанавливаемого поля температур в ОМ по показаниям поля ТП, расположенного за ним. В простейшем случае плоская волна взаимодействует с диэлектрическим материалом, ориентированным перпендику-

лярно вектору Пойнтинга падающей волны. На границе свободного пространства и материала возникают коэффициенты отражения, зависящие от волновых импедансов свободного пространства (Z_0) и внутри материала ($Z_{1...N}$):

$$\Gamma = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}. \quad (9)$$

На этом этапе нам нужно различать входное и выходное отражение волны от материала, поскольку их коэффициенты различаются. Кроме того, очевидно, что часть мощности падающей волны P_0 остается внутри материала и постепенно ослабляется материалом, как показано на рис. 2.

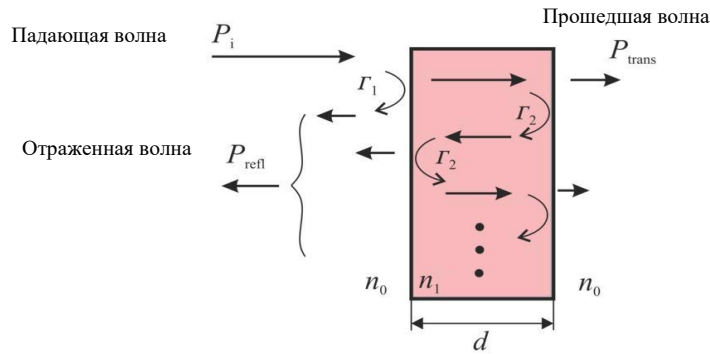


Рис. 2. Упрощенная модель распространения электромагнитных волн для рассмотрения процессов отражения

Мощность P_{OM} , которая остается внутри диэлектрического материала, можно рассчитать следующим образом:

$$P_{OM} = P_0 (1 - \Gamma_1^2) \alpha(f)^2 \frac{1}{1 - (\Gamma_2 \alpha(f))^2}. \quad (10)$$

В (10) Γ_1 и Γ_2 обозначают коэффициенты отражения на границах раздела свободное пространство-материал и наоборот.

Затухание α зависит от толщины материала d и его диэлектрических свойств, которые зависят от частоты:

$$\alpha(f) = \exp \left[-\frac{2\pi f}{c} \text{Im} \{ \sqrt{\epsilon_n(f)} \} d \right]. \quad (11)$$

Коэффициент полного отражения, важный для интерференции с падающим полем, представляет собой квадратный корень из отношения отраженной мощности P_{OTR} и падающей мощности P_0 и может быть описан как суперпозиция отражений на границах раздела свободное пространство-материал и материал-свободное пространство. Из-за толщины материала d вклад второго отражения вносит дополнительный фазовый сдвиг, который необходимо учитывать для суперпозиции. Учитывая показатели преломления $n_0=1$ и $n_{OM}=\sqrt{\epsilon_n \mu_n}$ для свободного пространства и материала соответственно, полное отражение Γ рассчитывается по:

$$\Gamma = \sqrt{\frac{P_{OTR}}{P_0}} = \frac{j(n_0^2 - n_1^2) \sin(kd)}{2n_0 n_1 \cos(kd) - j(n_0^2 + n_1^2) \sin(kd)}. \quad (12)$$

В (12) j – мнимая единица, а k – соответствующее волновое число. Поскольку мы рассматриваем диэлектрические потери материала, то процесс нагрева материала напрямую связан с величиной напряженности электрического поля $|E|$ падающей волны (7) и поглощенной мощности (8).

Реальный нагрев, который можно рассматривать как переход мощности от электромагнитной к тепловой, является переходным процессом и зависит от массы материала m и его удельной теплоемкости c_w .

Его можно описать как:

$$\Delta T = P(z) c_w m t. \quad (13)$$

Уравнения (7)-(8), (12)-(13) показывают, что нагрев ОМ прямо пропорционален мощности СВЧ-излучения. Однако для расчета распределения электрического микроволнового поля необходимо учитывать квадратный корень из зарегистрированной разности температур для каждого ТП, установленного внизу камеры для прошедшей мощности и вверху для отраженной мощности. Данный подход более точен, чем подход, описанный в разд. 1.

3. Структурная схема сенсорной части лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона

Структура построения предложенной сенсорной части во многом схожа с ранее применяемыми в работах Казанской школы радиофотоники, описанными в [7, 8] и имеет в своем составе две подсистемы А и Б (рис. 3).

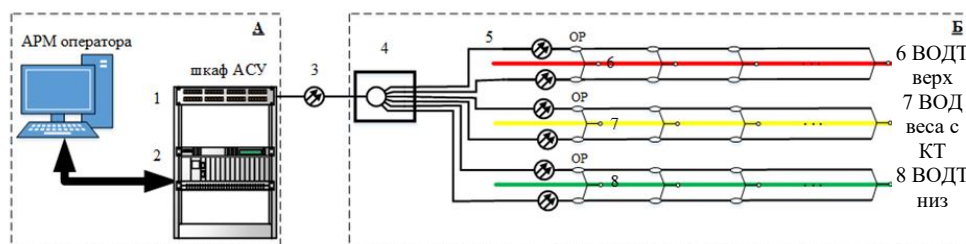


Рис. 3. Структурная схема сенсорной части лабораторной СВЧ-установки

Подсистема А включает в себя АРМ оператора и шкаф АСУ с оптическим кроссом 1 и радиофотонным интеррогатором 2.

Подсистемы А и Б соединяются магистральным волоконно-оптическим кабелем 3.

Подсистема Б включает оптический кросс 4 с набором сплиттеров $1:((11+1+11) \times N)$ (где 11 – число линий ВОДТ на верху и внизу камеры; 1 – линия для волоконно-оптических датчиков (ВОД) по весу ОМ; N – требуемое число датчиков на одну линию: 9 для ВОДТ; 8 для четырех ВОД по весу ОМ и четырех ВОДТ для компенсации температуры (КТ)); волоконно-оптический кабель 5 для прокладки коммуникаций в СВЧ-установке; набор ВОДТ и ВОД, размещенных на соответствующих ветвях измерений 6, 7, 8. Соединение датчиков осуществляется с помощью оптических разветвителей ОР типа каплер, имеющих малые габариты и низкую стоимость.

Для реализации сенсорной сети адресные датчики на двухкомпонентных АВБС (ДАВБС) записываются в одномодовом волокне в местах, соответствующих установке ТП, так что в каждый ТП встроена одна ДАВБС. Радиофотонная система опроса 2 (рис. 4) – интеррогатор (РФИ) использует в своей работе мультиплексирование последовательности ДАВБС по адресным частотам, уникальным для каждой из них, например, по 11 каналам, в котором расположены по 9 ТП.

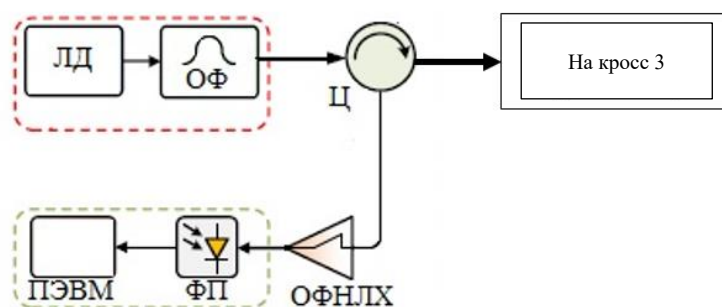


Рис. 4. Структурная схема измерения распределения температуры и веса ОМ

Когда температура конкретной ДАВБС меняется, центральная длина волны отражения ее спектра изменяется пропорционально, что вызвано изменением периода Λ структуры вследствие температурного расширения $\delta\Lambda/\delta T$ и изменением показателя преломления волоконного световода (ВС) в ее зоне n_{eff} под действием изменения температуры $\delta n_{eff}/\delta T$. Изменение центральной длины волны $\Delta\lambda_B$ запишется в виде:

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\delta n_{eff}}{\delta T} + n_{eff} \frac{\delta\Lambda}{\delta T} \right) \Delta T. \quad (14)$$

Для измерения температуры ТП все ДАВБС через циркулятор Ц засвечиваются излучением широкополосного лазерного диода ЛД. ВС SMF-28, используемый в системе имеет рабочий диапазон температур до 300 °С. При чувствительности ДАВБС по температуре ~ 10 пм/°С диапазон изменения центральных длин волн ДАВБС составит 3 нм. Таким образом необходимо выбрать ЛД с шириной полосы излучения около 4 нм и сформировать границы измерений РФИ в 3 нм с помощью оптического фильтра ОФ.

Прошедшее через сеть ДАВБС излучение через второе плечо циркулятора Ц попадает на оптический фильтр с наклонной линейной характеристикой ОФНЛХ и далее на фотоприемник ФП с полосой пропускания, равной максимальной адресной частоте, присущей структурам массива ДАВБС. Обработанный АЦП сигнал с выхода ФП поступает на ПЭВМ. ПЭВМ, используя калибровочные характеристики ТП, ДАВБС и ОФНЛХ и специальное программное обеспечение, вычисляет распределение температур в рабочей камере и веса ОМ, а через решение обратной задачи можно будет судить о распределении температур в ОМ.

Относительная погрешность измерения температуры при использовании ДАВБС и их мультиплексировании по адресным частотам достигает $\pm 0,01^\circ\text{C}$ [7].

Заключение

Представлена новая система измерения распределения температур в обрабатываемом в рабочей камере лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона материале на основе калориметрического метода и технологий радиофотоники. Она имеет очень простую структуру, образованную широкополосным лазерным диодом и матрицей термопреобразователей, в каждую из которых встроен датчик температуры на основе МАВБС с уникальной адресной частотой для ДАВБС. Отраженное от матрицы многокомпонентное излучение, пройдя циркулятор и оптический фильтр поступает на фотоприемник.

Были проведены экспериментальные исследования для верификации принципов ра-

боты радиофотонной системы с матрицей ТПД на основе ДАВБ. Экспериментальные результаты показывают, что точность измерения температур повышается как минимум на порядок. Кроме того, устраняются сложность реализации процедур и методические погрешности измерения температур (аддитивная погрешность в 1-2 °С), присущие базовому модернизируемому калориметрическому методу [5].

Новая модификация модернизированного метода [25] представляет собой простое, недорогое и надежное решение, которое позволяет учитывать в параметрах математической модели зависимость как от поглощающих характеристик обрабатываемой среды (диэлектрической проницаемости, тангенса угла диэлектрических потерь), изменяющихся в ходе технологического процесса и естественным образом зависящих от температуры, так и от отражательных.

Это позволит использовать разработанную систему в задачах создания новых материалов, повышения эффективности протекания химических реакций, внедрения их в промышленных масштабах, наравне с задачами разработки электродинамических реакторов с широким спектром возможностей по созданию заданных распределений интенсивностей ЭМП в рабочих камерах как равномерных, так и сфокусированных в область или точку.

Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ в рамках выполнения программы ПСАЛ-2030.

Список литературы

1. Низкоинтенсивные СВЧ-технологии (Проблемы и реализации) / Под ред. Г. А. Морозова и Ю. Е. Седельникова. - Москва: Радиотехника, 2003. - 132 с.
2. Kappe C.O. How to measure reaction temperature in microwave-heated transformations /C.O. Kappe // Chem. Soc. Rev. - 2013. - Vol. 42(12). - P. 4977-4990.
3. Herrero M.A., Kremsner J.M., Kappe C.O. Non-thermal microwave effects revisited: on the importance of internal temperature monitoring and agitation in microwave chemistry /M.A. Herrero, J.M. Kremsner, C.O.Kappe // The Journal of Organic Chemistry. - 2008.- Vol. 73(1). - P. 36-47.
4. Касимова Д.И. Оценка возможностей применения волоконных решеток Брэгга с гауссовым профилем отражения в качестве датчика температуры / Д.И. Касимова, А.А. Кузнецов, П.П. Крыницкий и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2013.- № 2 (18). - С. 73-81.
5. Морозов Г.А. Способ измерения распределения теплового поля нагрева СВЧ-излучением и устройство для его осуществления / Г.А. Морозов, Ю.И. Чони, Б.А. Акишин и др. // Патент РФ 2099727. Опубл. 20.12.1997.
6. Morozov G.A. On-line NDE monitoring for microwave reticulation of thermosetting resins / G.A. Morozov, O.G. Morozov // Proc. of SPIE. -1998. -Vol. 3396. - P. 264-270.
7. Морозов О.Г. Адресные волоконные брэгговские структуры в квази-распределённых радиофотонных сенсорных системах / О.Г. Морозов, А.Ж. Сахобутдинов // Компьютерная оптика. - 2019. - Т. 43. - № 4. - С.535-543.
8. Аглиуллин Т.А. Многоадресные волоконные брэгговские структуры в радиофотонных сенсорных системах / Т.А. Аглиуллин, В.И. Анфиногентов, Р.Ш. Мисбахов и др.// Труды учебных заведений связи. - 2020. -Т. 6. - № 1.- С. 6-13.
9. Кувшинов, Н. Е. Радиофотонная система измерений распределения температур и интенсивности электромагнитного поля в рабочей камере лабораторной технологической установки СВЧ-диапазона / Н. Е. Кувшинов, Рин. Ш. Мисбахов,

- Рус. Ш. Мисбахов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2021. - № 3 (51). - С. 77-92.
10. Кувшинов, Н. Е. Математическая модель микроволнового нагрева обрабатываемой среды и термопреобразователей для контроля распределения температуры модернизированным калориметрическим методом/ Кувшинов Н. Е. / Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. - 2021. - № 3 (51). - С. 103-112.
 11. Кувшинов, Н. Е. Квазираспределенная волоконно-оптическая сенсорная сеть для контроля распределения интенсивности ЭМП и температуры в закрытой рабочей СВЧ-камере модернизированным калориметрическим методом / Рин. Ш. Мисбахов, Рус. Ш. Мисбахов, Г. А. Морозов, О. Г. Морозов // Электроника, фотоника и киберфизические системы. - 2022. - № 2. - С. 23-38.
 12. Jianshuo Li. The Application of MPC in Microwave Heating Process Based on Model Constructed by Lambert's Law Combined with Temperature / Jianshuo Li, Qingyu Xiong, Kai Wang, Xin Shi, Shan Liang, and Min Gao // Mathematical Problems in Engineering. - 2015 - Vol. 2015. - DOI: 10.1155/2015/610490
 13. Pitchai K. A microwave heat transfer model for a rotating multi-component meal in a domestic oven: development and validation / K. Pitchai, J. Chen, S. Birla, R. Gonzalez, D. Jones, J. Subbiah // Journal of Food Engineering. - 2014. - Vol. 128. - P. 60-71. - DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2013.12.015
 14. Geedipalli, S. S. R. Modeling the heating uniformity contributed by a rotating turntable in microwave ovens / S. S. R. Geedipalli, V. Rakesh, A. K. Datta // Journal of Food Engineering.- 2007. - Vol. 82, no. 3. - P. 359-368. - DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2007.02.050
 15. Ayappa, K. G. Resonant microwave power absorption in slabs / K. G. Ayappa // Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy. - 1999. - Vol. 34, no. 1. - P. 33-41. - DOI: 10.1080/08327823.1999.11688386
 16. Bhattacharya M. A novel closed-form analysis on asymptotes and resonances of microwave power / M. Bhattacharya, T. Basak // Chemical Engineering Science. -2006. - Vol. 61, no. 19. - P. 6273-6301. - DOI: 10.1016/j.ces.2006.06.004
 17. Basak, T. Analysis of resonances during microwave thawing of slabs / T. Basak // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003. - Vol. 46, no. 22. - P. 4279-4301. - DOI: 10.1016/S0017-9310(03)00212-6
 18. Basak T. Theoretical analysis on pulsed microwave heating of pork meat supported on ceramic plate / T. Basak, B. S. Rao // Meat Science. 2010. - Vol. 86, no. 3. - P. 780-793. - DOI: 10.1016/j.meatsci.2010.06.021
 19. Huang, K. The precise condition of thermal runaway in microwave heating on chemical reaction / K. Huang, B. Lu // Science in China, Series E: Technological Sciences. 2009. - Vol. 52, no. 2. - P. 491-496. - DOI: 10.1007/S11431-008-0286-3
 20. Fan D. M. A study of the power absorption and temperature distribution during microwave reheating of instant rice / D. M. Fan, C. X. Li, W. R. Ma, J. X. Zhao, H. Zhang, W. Chen // International Journal of Food Science and Technology. - 2011. - Vol. 47, no. 3. - P. 640-647. - DOI: 10.1111/j.1365-2621.2011.02888.x
 21. Rattanadecho, P. Theoretical and experimental investigation of microwave thawing of frozen layer using a microwave oven (effects of layered configurations and layer thickness) / P. Rattanadecho // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2004. - Vol. 47, no. 5. - P. 937-945. - DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.08.019
 22. Campanone L. A. Mathematical modeling and simulation of microwave thawing of large solid foods under different operating conditions / L. A. Campanone, N. E. Zaritzky // Food

- and Bioprocess Technology. 2010. - Vol. 3, no. 6. - P. 813-825. - DOI: 10.1007/s11947-009-0249-0
23. Hemis, M. Microwave-assisted thin layer drying of wheat / M. Hemis, C. B. Singh, D. S. Jayas // Drying Technology. - 2011. - Vol. 29, no. 10. - P. 1240-1247. - DOI: 10.1080/07373937.2011.584999
24. Arballo, J. R. Modeling of microwave drying of fruits / J. R. Arballo, L. A. Campanone, R. H. Mascheroni // Drying Technology. 2010. - Vol. 28, no. 10. - P. 1178-1184. - DOI:10.1080/07373937.2010.493253
25. Пат. 2777526 С1 Российская Федерация, МПК G01K 7/01 (2006.01), G01K 11/32 (2006.01). Способ измерения распределения теплового поля нагрева СВЧ-излучением и устройство для его осуществления / Кувшинов Н. Е., Мисбахов Рин. Ш., Мисбахов Рус. Ш., Морозов О. Г., Морозов Г. А., и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет». -№ 021126076/28 (055130); заявл. 03.09.2021; опубл.:05.08.2022, Бюл. № 31. - 2с.

RADIO-PHOTON SYSTEM FOR CONTACTLESS MEASUREMENT OF THE TEMPERATURE DISTRIBUTION IN THE PROCESSED MATERIAL UNDER THE CONDITIONS OF A CLOSED WORKING CHAMBER OF A LABORATORY TECHNOLOGICAL INSTALLATION MICROWAVE

*N.E Kuvshinov¹, Rin.Sh. Misbakhov^{1,3}, Rus.Sh. Misbakhov^{2,3},
O.G. Morozov³, G.A. Morozov³, A.R. Nasybullin³, Jerdavi Daham³,
M.Yu. Zastela³, Yu.I. Choni³, A.Z. Petrova⁴*

¹Innopolis University

1, Universitetskaya st., Innopolis, 420500, Russian Federation

²LLC TatAISneft

62, R. Fakhretdin st., Almetyevsk, 423450, Russian Federation

³Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI

10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation

⁴MCC-KTITS

3a, Galeeva st., Kazan, 420061, Russian Federation

Abstract: The article proposes a new stage in the modernization of the calorimetric method for non-contact measurement of temperature distribution in the processed medium, located in the working chamber of a laboratory microwave technological installation, based on a matrix of discrete thermal converters made of absorbing material. At this stage, thermal converters are located not only on the bottom, but also on the top wall of the working chamber. After measuring the temperature field of thermal converters, it can be recalculated into the distribution of the temperature field in the medium being processed, since the upper matrix of sensors will take into account the reflected component of the EMF power, and the lower one will take into account the transmitted component, taking into account the proportionality of the increase in their temperatures to the powers that act on each of the thermal converters for a certain period of time. To solve the issue of reducing the cost of the system for interrogating thermal converters, its constructive simplification and improving its metrological characteristics, it is proposed to use addressable fiber Bragg structures of a new combined type, built into each thermal converter, and radio-photon systems for interrogating the obtained sequence of thermal converters-sensors connected by an optical fiber, which, in addition to high sensitivity and high speed response to temperature changes, provide the operator with information about the number of the matrix element being polled (address). The versatility of the use of such sensors for both transmission and reflection is shown, which simplifies the system as a whole and allows redundant measuring channels covering more than 100 sensors from above and below.

Key words: working microwave chamber; temperature distribution in the processed medium; contactless calorimetric method; matrix of thermal converters; built-in combined addressable fiber Bragg structures; radiophoton measurement system.

Статья представлена в редакцию 20.03.2023