

Численное моделирование СВЧ-воздействия на полимерные композиционные материалы в рабочей камере квазикоаксиального типа

Numerical modeling of microwave exposure on polymer composite materials in a quasi-coaxial working chamber

А.С. СИВАК, С.Г. КАЛГАНОВА, Ю.А. КАДЫКОВА,
С.В. ТРИГОРЛЫЙ, Т.П. СИВАК, Е.Ю. ВАСИНКИНА

A.S. SIVAK., S.G. KALGANOVA, Y.A. KADYKOVA, S.V. TRIGORLYI, T.P. SIVAK, E.Y. VASINKINA

АО «Научно-производственное предприятие «Контакт», Саратов, Россия

Scientific Production Enterprise “Kontakt” JSC, Saratov, Russia

nya@kontakt-saratov.ru

Разработана методика численного математического моделирования нагрева полимерных композиционных материалов (ПКМ) в СВЧ-камере квазикоаксиального типа в программной среде COMSOL Multiphysics, позволяющая в соответствии с размерами и с заданными физическими свойствами композита получить оптимальную конструкцию рабочей камеры с целью реализации заданных параметров СВЧ-воздействия на ПКМ.

Установлено, что при минимальном уровне мощности в 250 Вт СВЧ-камера квазиаксиального типа обеспечивает эффективный процесс диссипации СВЧ-энергии при обработке ПКМ с наполнителем в форме тонкого слоя или сферы.

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, эпоксидная смола, карбид кремния, СВЧ-нагрев, численное моделирование, СВЧ-камера квазикоаксиального типа

A method for numerical mathematical modeling of heating polymer composite materials (PCM) in a quasi-coaxial microwave chamber has been developed in the COMSOL Multiphysics software environment. This allows to obtain the optimal design of the working chamber in accordance with the dimensions and specified physical properties of the composite in order to realize the given parameters of microwave influence on PCM.

It has been established that at a minimum power level of 250 W, a quasi-axial microwave chamber provides an effective process of microwave energy dissipation during the processing of PCM with a filler in the form of a thin layer or sphere.

Keywords: polymer composite material, epoxy resin, silicon carbide, microwave heating, numerical modeling, microwave chamber of quasi-coaxial type

DOI: 10.35164/0554-2901-2024-06-36-39

Введение

В настоящее время для обработки полимерных композиционных материалов широко используются различные электрофизические методы, среди которых высокоэффективным способом является обработка в сверхвысокочастотном (СВЧ) электромагнитном поле (ЭМП), которая может приводить к изменениям физико-химических и механических характеристик материала в результате теплового или нетеплового воздействия [1, 2].

Для этих целей перспективно использование СВЧ-камер с бегущей волной, которые представляют собой отрезки той или иной линии передачи, частично заполненные обрабатываемым материалом [3]. Такие камеры позволяют достичь максимальной равномерности обработки, не прибегая к дополнительным способам выравнивания плотности энергии по объёму обрабатываемого диэлектрика. Для камер с бегущей волной свойственны относительно небольшие размеры и высокий КПД использования СВЧ-энергии [4].

Цель данной работы заключается в численном моделировании распределения температурных и электрических полей при нагреве ПКМ в СВЧ электромагнитном поле для обеспечения равномерной обработки в квазикоаксиальной рабочей камере.

Методы исследования

При моделировании СВЧ-установки для обработки полимерных материалов применяли программное обеспечение COMSOL Multiphysics® [5, 6], которое позволяет спрогнозировать и оптимизировать физические процессы и устройства с помощью численного моделирования. С использованием программы COMSOL Multiphysics® моделируют конструкции, устройства и процессы

во всех областях инженерных, производственных и научных исследований, а также можно анализировать как отдельные, так и взаимосвязанные физические процессы. Среда разработки моделей позволяет пройти все этапы от построения геометрической модели, задания свойств материалов и описания физики задачи до выполнения расчёта и анализа полученных результатов моделирования.

Реализация общего алгоритма математического моделирования в программе COMSOL Multiphysics включает, как правило, следующие этапы:

- создание геометрической модели;
- задание уравнений, описывающих рассматриваемый процесс СВЧ термообработки с учетом соответствующей взаимосвязи данных уравнений;
- задание граничных и начальных условий;
- задание свойств материалов модели;
- создание сетки конечных элементов;
- настройка алгоритма решения;
- запуск решения или серии решений при варьировании параметров;
- вывод и анализ результатов моделирования [7].

В качестве исходных данных для моделирования приняты следующие размеры образцов ПКМ: минимальный размер (диаметр, высота) – $\varnothing 40 \times 40$ мм, толщина поглотителей $h = 3$ мм, а также тангенс угла диэлектрических потерь для материала матрицы $\text{tg} \delta = 0,01$ (ЭД-20) и поглощающего наполнителя $\text{tg} \delta = 1,1$ (карбид кремния). СВЧ-мощность составляла 250 Вт при частоте 2450 МГц и времени обработки 60 с. Представляют интерес исследования

процесса нагрева наполнителя, который имеет высокие значения коэффициента диэлектрических потерь по сравнению с эпоксидной смолой.

Результаты исследования и их обсуждение

В данной работе рассмотрена конструкция камеры с бегущей волной на квазиаксиальном волноводе (рис. 1). Обрабатываемый объект является продолжением внутреннего проводника согласующего перехода коаксиального волновода и располагается вдоль оси волновода. Для согласования такой камеры с прямоугольным волноводом используется волноводно-коаксиальный переход. Неравномерность нагрева в таких камерах составляет $\pm 2-3\%$, что значительно меньше неравномерности, получаемой СВЧ-камерах со стоячей волной.

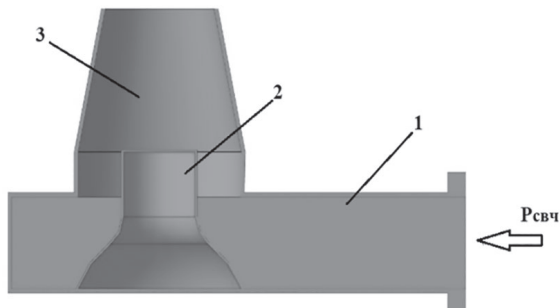


Рис. 1. Конструкция СВЧ-камеры с бегущей волной на квазиаксиальном волноводе: 1 – прямоугольный волновод; 2 – волноводно-коаксиальный переход (согласующий переход); 3 – рабочая СВЧ-камера (внешний экран).

Камеры с бегущей волной на квазиаксиальном волноводе подходят для нагрева образцов цилиндрической формы. В связи с чем рассматриваются образцы полимерных композиционных материалов (ПКМ) с расположением поглощающего наполнителя (карбида кремния) в поперечном и продольном сечениях образцов (рис. 2).

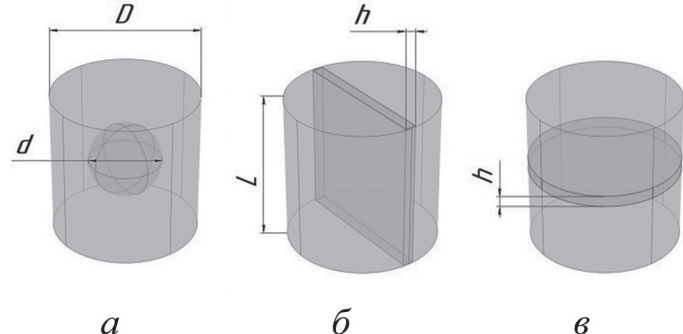
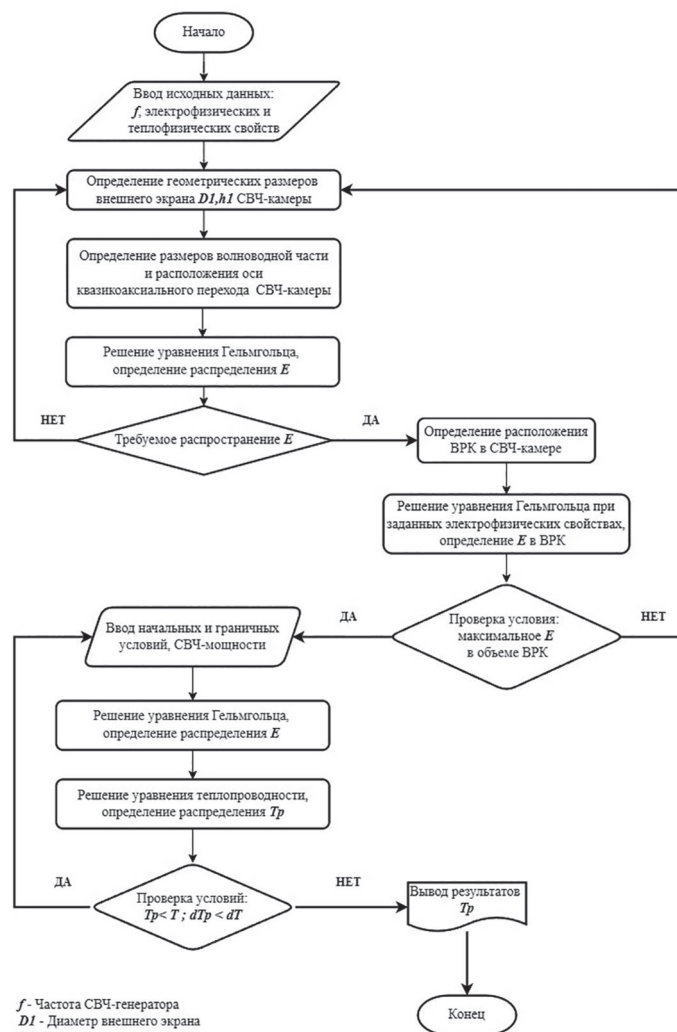


Рис. 2. Схема расположения поглощающего наполнителя в образцах ПКМ цилиндрической формы диаметром D и высотой L , где d – диаметр сферы-наполнителя; h – толщина поглотителя плоской формы.

Разработана методика численного математического моделирования нагрева ПКМ на основе наполненной эпоксидной смолы марки ЭД-20 в СВЧ-камере квазиаксиального типа в программной среде COMSOL Multiphysics, в соответствии с которой предложен алгоритм расчета (рис. 3).

Алгоритм расчета заключается в следующем:

1. В соответствии с размерами образца ПКМ (диаметр, высота) определяют диаметр и высоту внешнего экрана СВЧ-камеры и согласующего перехода.
2. Определяют размеры волноводной части СВЧ-камеры и расположение оси квазиаксиального перехода относительно короткозамкнутой части волновода, которое зависит от частоты и составляет 0,5 длины электромагнитной волны в волноводе (83 мм для частоты 2450 МГц).
3. Для предложенной геометрии СВЧ-камеры определяют напряженность электрического поля в СВЧ-камере без образца (рис. 4). Изменяя геометрию экрана, квазиаксиального перехода и его расположения относительно короткозамкнутой части волновода, добиваются оптимального распределения напряженности электрического поля в СВЧ-камере: наибольшей напряженности электрического поля E в рабочей камере и максимальной симметрии поля в ее коаксиальной части.



f - Частота СВЧ-генератора
 DI - Диаметр внешнего экрана
 $h1$ - Высота внешнего экрана
 E - Напряженность электрического поля
 T, T_p - Заданная и расчетная температура
 dT, dT_p - Заданная и расчетная динамика нагрева

Рис. 3. Блок-схема алгоритма численного моделирования нагрева ПКМ в СВЧ-камере квазиаксиального типа.

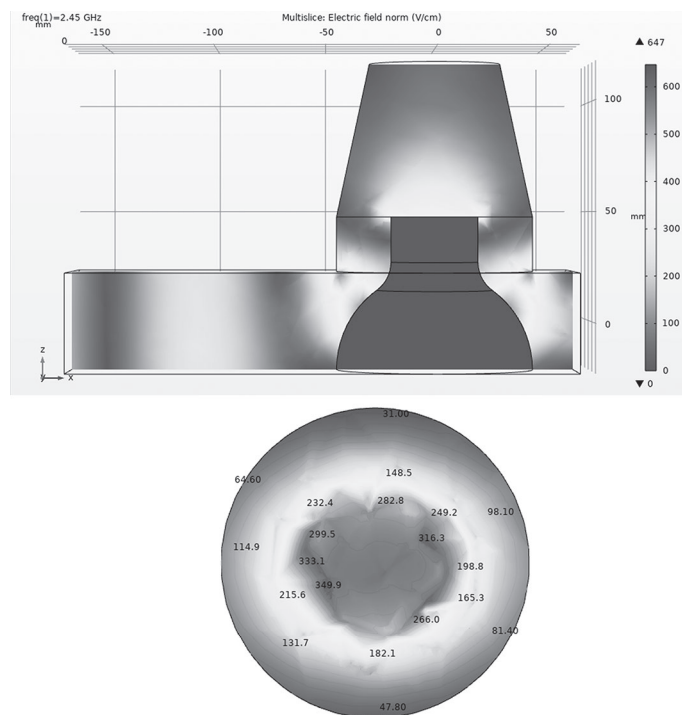


Рис. 4. Распределение напряженности E электрического поля в СВЧ-камере на квазиаксиальном волноводе.

4. Решают задачу расположения образца ПКМ в рабочей СВЧ-камере. При использовании в качестве наполнителя карбида кремния оптимальное расположение композиционного материала

в СВЧ-камере квазикоаксиального типа выбирают в соответствии с рисунком 5. Строится геометрия рабочей камеры с образцом ПКМ в программной среде COMSOL Multiphysics.

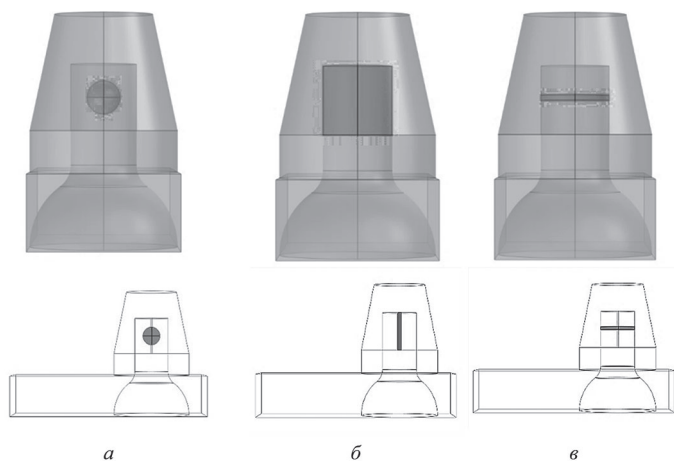


Рис. 5. Расположение образца ПКМ в СВЧ-камере на квазикоаксиальном волноводе: а – в форме сферического наполнителя; б – в форме тонкого слоя наполнителя в плоскости yz ; в – в форме тонкого слоя наполнителя в плоскости xz .

5. Рассчитывают напряженность электрического поля в СВЧ-камере с образцом ПКМ (рис. 6). В случае если напряженность электрического поля в материале не достигает требуемых значений, корректируют геометрию СВЧ-камеры, расположение поглощающего наполнителя в композите, и расчет повторяют.

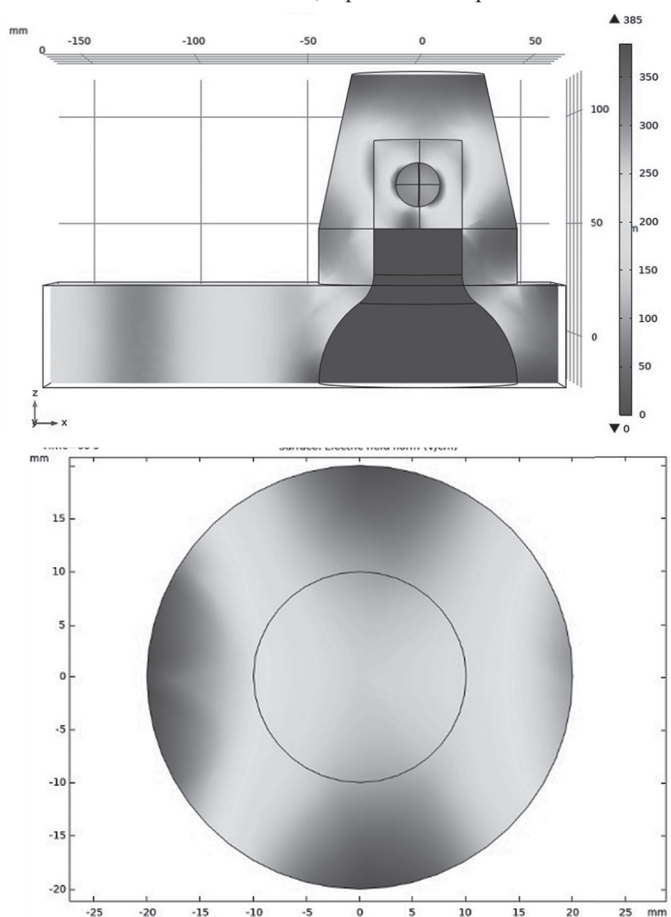


Рис. 6. Распределение напряженности электрического поля E (В/м) в СВЧ-камере на квазикоаксиальном волноводе с образцом ПКМ.

6. Для полученной геометрии СВЧ-камеры и расположения образца ПКМ с заданными физическими свойствами выполняют численное моделирование процессов электродинамики и теплопроводности, определяют напряженность электрического поля и распределение температуры в образце ПКМ при заданной мощности. Варьируя мощность и время нагрева, определяют требуемое распределение температуры в материале и скорости нагрева.

На данном этапе исследования численное моделирование нагрева ПКМ с наполнителем в виде тонкого слоя и одной сферы

в СВЧ-камере на квазикоаксиальном волноводе осуществляли для момента времени 60 с при уровне мощности 250 Вт (рис. 8, 9).

Сферический наполнитель (рис. 5, а). Результаты математического моделирования распределения температурного поля при нагреве в СВЧ-камере на квазикоаксиальном волноводе образцов ПКМ со сферическим наполнителем показаны на рис. 7.

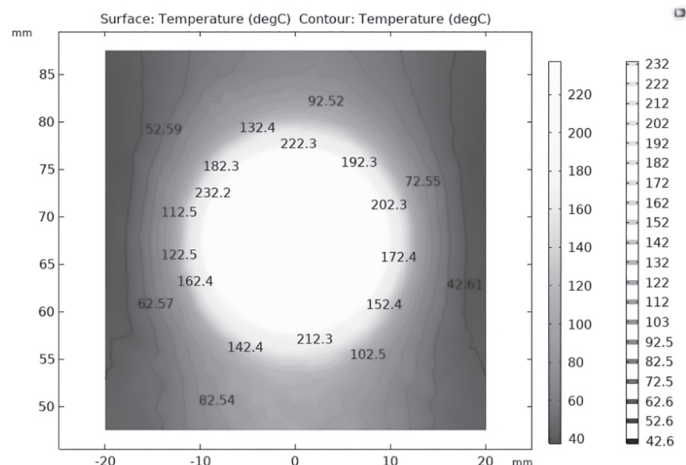


Рис. 7. Распределение температурного поля в образце ПКМ со сферическим наполнителем в средней плоскости композита.

Установлено, что образец ПКМ, в матрице которого расположен сферический наполнитель $d = 20$ мм, нагревается интенсивно до максимальной температуры в наполнителе 232°C (рис. 7). Максимальная разница температур (ΔT) между температурой в наполнителе и характеристической точкой (центральная область поглотителя) не превышает 10°C , что свидетельствует о равномерности температурного поля в объеме наполнителя.

Наполнитель в форме тонкого слоя (рис. 5 б и в). Исследование процесса диссипации СВЧ-энергии при нагреве рассматривали для эпоксидной смолы с наполнителем в форме тонкого слоя, расположенного в секущей плоскости образца.

Результаты математического моделирования распределения температуры при нагреве образца в СВЧ-камере на квазикоаксиальном волноводе композита показаны в средних сечениях тонкого слоя наполнителя (рис. 8).

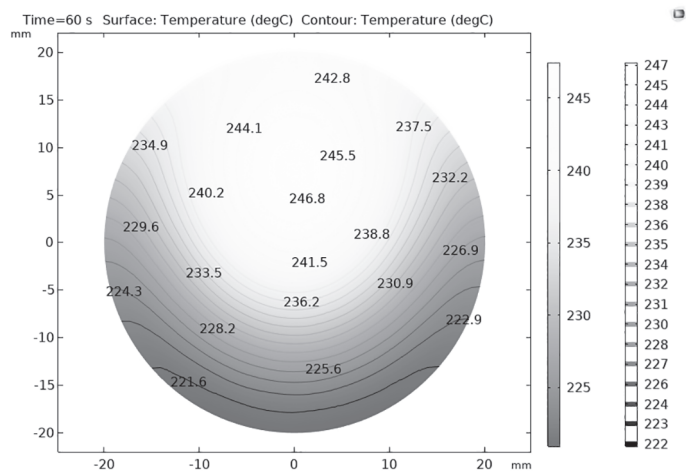


Рис. 8. Распределение температурного поля в композите с тонким поглощающим слоем в средней плоскости композита yz (рис. 5 б).

Образец ПКМ, в матрице которого расположен тонкий поглощающий слой $h = 3$ мм в плоскости yz (рис. 5 б), нагревается до максимальной температуры в наполнителе 246°C . Максимальная разница температур в объеме наполнителя составила $\Delta T = 22^\circ\text{C}$ (рис. 7). При этом значения максимальной температуры в наполнителе смещены относительно оси квазикоаксиального перехода в сторону ввода СВЧ-энергии (рис. 8).

Тонкий слой наполнителя $h = 3$ мм в плоскости xz (рис. 5 в) нагревается до максимальной температуры 104°C . Максимальная разница температур в объеме наполнителя составила $\Delta T = 9^\circ\text{C}$ (рис. 9). При этом значения максимальной температуры в наполнителе соответствуют ее значениям в характеристической точке.

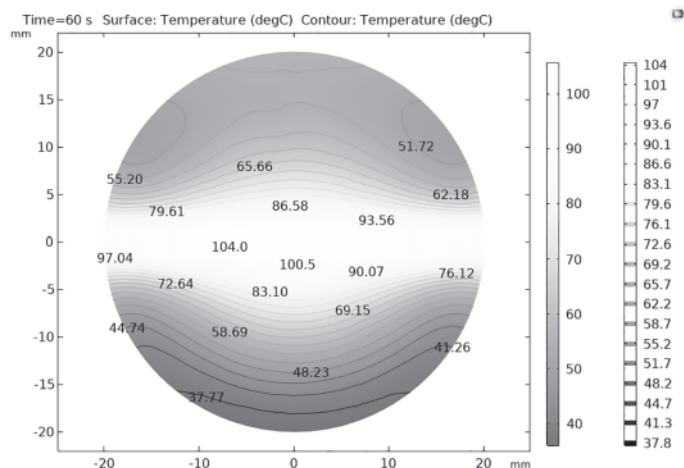


Рис. 9. Зависимость температурного поля в композите с тонким слоем наполнителя в средней плоскости композита yx (рис. 5 в).

Выводы

Таким образом, доказана перспективность применения СВЧ-камеры с бегущей волной на квазиаксиальном волноводе, в которой обрабатываемый объект является продолжением внутреннего проводника согласующего перехода коаксиального волновода и располагается вдоль оси волновода.

Разработана методика численного математического моделирования нагрева ПКМ на основе наполненной эпоксидной смолы марки ЭД-20 в СВЧ-камере квазиаксиального типа в программной среде COMSOL Multiphysics, в соответствии с которой предложен алгоритм расчета. Эта методика позволяет в соответствии с размерами и с заданными физическими свойствами композита получить оптимальную конструкцию рабочей камеры с целью реализации заданных параметров СВЧ-воздействия на ПКМ.

Результаты численного моделирования доказывают, что конструкция квазиаксиальной рабочей камеры обеспечивает эффективный процесс диссипации СВЧ-энергии при нагреве ПКМ на основе ЭД-20 с наполнителем из карбида кремния в форме сферы или тонкого слоя. Причем при минимальном уровне СВЧ-мощности в 250 Вт наполнитель нагревается до 232°C, 246°C и 104°C соответственно за 60 с. Исходя из функциональных требований к материалу температура обработки может меняться в широком диапазоне за счет регулирования СВЧ-мощности и времени воздействия на ПКМ.

Литература

1. Калганова С.Г., Архангельский Ю.С., Лаврентьев В.А., Тригорный С.В. Научные основы модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле // Вопросы электротехнологии. 2017. №1 (14). С. 26–35.
2. Калганова С.Г., Лаврентьев В.А., Архангельский Ю.С. и др. СВЧ-энергия в производстве композиционных материалов / Решетневские чтения. 2017. Т. 1. С. 369–371.
3. Архангельский Ю.С. СВЧ электротермия. Саратов: СГТУ, 1998. 408 с.
4. Архангельский Ю.С. Установки диэлектрического нагрева. СВЧ установки. Саратов: СГТУ, 2003. 343 с.
5. Васинкина Е.Ю., Калганова С.Г., Тригорный С.В. [и др.]. Моделирование нагрева дисперсно-наполненных эпоксидных композитов в СВЧ камере с бегущей волной // Российский химический журнал. 2022. Т. 66. №2. С. 16–21. DOI: 10.6060/rcj.2022662.3.
6. Захаров В.В., Тригорный С.В. Математическое моделирование СВЧ термообработки диэлектриков с учетом изменения их физических свойств // Вопросы электротехнологии. 2020. №3(28). С. 5–12.
7. Bekeshev. A., Vasinkina E., Kalganova S., Trigorly S., Kadykova Y., Mostovoy A., Shcherbakov A., Lopukhova M., Zhanturina N. Modeling of the Modification Process of an Epoxy Basalt-Filled Oligomer in Traveling Wave Microwave Chambers // Journal of Composites Science. 2023. N 7(9). P. 392. <https://doi.org/10.3390/polym15092024>.