

**Тухватуллин Мидхат Ильфатович,**  
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ  
Tukhvatullin Midhat Ifatovich,  
Bashkir State Agrarian University

**Урманов Урал Марсович,**  
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ  
Urmanov Ural Marsovich,  
Bashkir State Agrarian University

## СВЧ-ОБРАБОТКА ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ MICROWAVE PROCESSING OF POLYMERIC MATERIALS

**Аннотация.** В статье представлена блок-схема сверхвысокочастотной (СВЧ) электротехнологической установки с гибридной рабочей камерой. Проведен анализ влияния СВЧ-нагрева на эксплуатационные свойства полимерных композитов с графитовым наполнителем, включая полиэтилен (PE), полипропилен (PP), полиамид (PA), эпоксид и полидифениленфталид (PDDF). На основе экспериментальных данных построены графики, иллюстрирующие динамику изменения термостойкости указанных материалов в процессе СВЧ-обработки.

**Abstract.** This article presents a block diagram of a microwave electroprocessing unit with a hybrid working chamber. An analysis of the effect of microwave heating on the performance properties of graphite-filled polymer composites, including polyethylene (PE), polypropylene (PP), polyamide (PA), epoxy, and polydiphenylenephthalide (PDDF), is conducted. Based on the experimental data, graphs are constructed illustrating the dynamics of changes in the thermal stability of these materials during microwave processing.

**Ключевые слова:** СВЧ электротехнологическая установка, полимерный композит, термостойкость.

**Keywords:** Microwave electrotechnological installation, polymer composite, heat resistance.

**Введение.** Современный этап развития технологий открывает новые горизонты в области переработки и модификации материалов. Одним из наиболее перспективных направлений является внедрение микроволновой (СВЧ) обработки полимеров. Данный метод позволяет не только существенно повысить эффективность производственных процессов, но и улучшить физико-механические свойства конечного продукта при одновременном снижении экономических затрат.

Микроволновое излучение оказывает комплексное влияние на структуру и физико-химические характеристики полимерных систем. Ключевые эффекты воздействия включают [4]:

– внутренний объемный нагрев. Под воздействием СВЧ-поля дипольные молекулы полимера начинают интенсивно колебаться, что вызывает равномерный нагрев материала изнутри. Высокий коэффициент поглощения электромагнитной энергии обеспечивает однородное распределение тепла по всему объему изделия, исключая образование локальных зон перегрева или недогрева;

– химическая активация. СВЧ-излучение способно инициировать химические реакции непосредственно в объеме полимера. Это проявляется в ускорении процессов вулканизации резиновых смесей, синтезе новых сополимеров и значительном повышении адгезионных характеристик поверхности;



– оптимизация технологических параметров. Внедрение СВЧ-технологий позволяет оптимизировать производственные циклы за счет сокращения времени сушки, улучшения качества сварки и склеивания пластиковых деталей, а также возможности мгновенного плавления термопластов перед формованием, что ведет к общему снижению энергозатрат.

**Цель исследования.** Целью настоящей работы является комплексное исследование влияния микроволнового электромагнитного поля на термостойкость ряда полимерных композитов. В качестве объектов исследования выступают полиэтилен (PE), полипропилен (PP), полиамид (PA), эпоксидная смола и полидифениленфталид (PDDF), модифицированные графитовым наполнителем.

**Задачи исследования.**

1. Представить блок-схему СВЧ электротехнологической установки с рабочей камерой гибридного типа.

2. Анализ динамики изменения термостойкости полимерных композитов на основе полиэтилена (PE), полипропилена (PP), полиамида (PA), эпоксиды и полидифениленфталид (PDDF) с добавлением графитового наполнителя в условиях СВЧ-воздействия.

**Методы и результаты исследования.**

Изучение воздействия микроволнового излучения на полимерные материалы является одним из ключевых направлений современной науки и техники. Благодаря уникальным свойствам – сочетанию лёгкости, прочности и гибкости – полимеры нашли широчайшее применение в промышленности [5]. Однако их структура и эксплуатационные характеристики подвержены существенным изменениям под влиянием электромагнитных полей сверхвысокой частоты (СВЧ) [3].

Физическая суть процесса заключается во взаимодействии микроволнового излучения с полярными молекулами полимера. Это взаимодействие индуцирует интенсивные колебательные движения атомов и молекулярных цепей, что приводит к локальному повышению внутренней энергии материала и его нагреву. Помимо термического эффекта, СВЧ-излучение способно инициировать химические реакции, вызывая необратимые изменения в молекулярной структуре вещества [1].

Для всесторонней оценки этих трансформаций применяется комплексный подход, включающий:

– экспериментальные методы: физические измерения для контроля базовых параметров (масса, геометрические размеры, механическая прочность);

– спектроскопический анализ: для детального изучения химического состава и выявления изменений в молекулярной структуре;

– микроскопические исследования: визуализация структурных модификаций на микроуровне с помощью электронной и оптической микроскопии для анализа повреждений.

Эффективным инструментом для проведения подобных исследований служат гибридные СВЧ-электротехнологические установки, позволяющие проводить прецизионную обработку широкого спектра материалов и композитов (рисунок 1) [2].



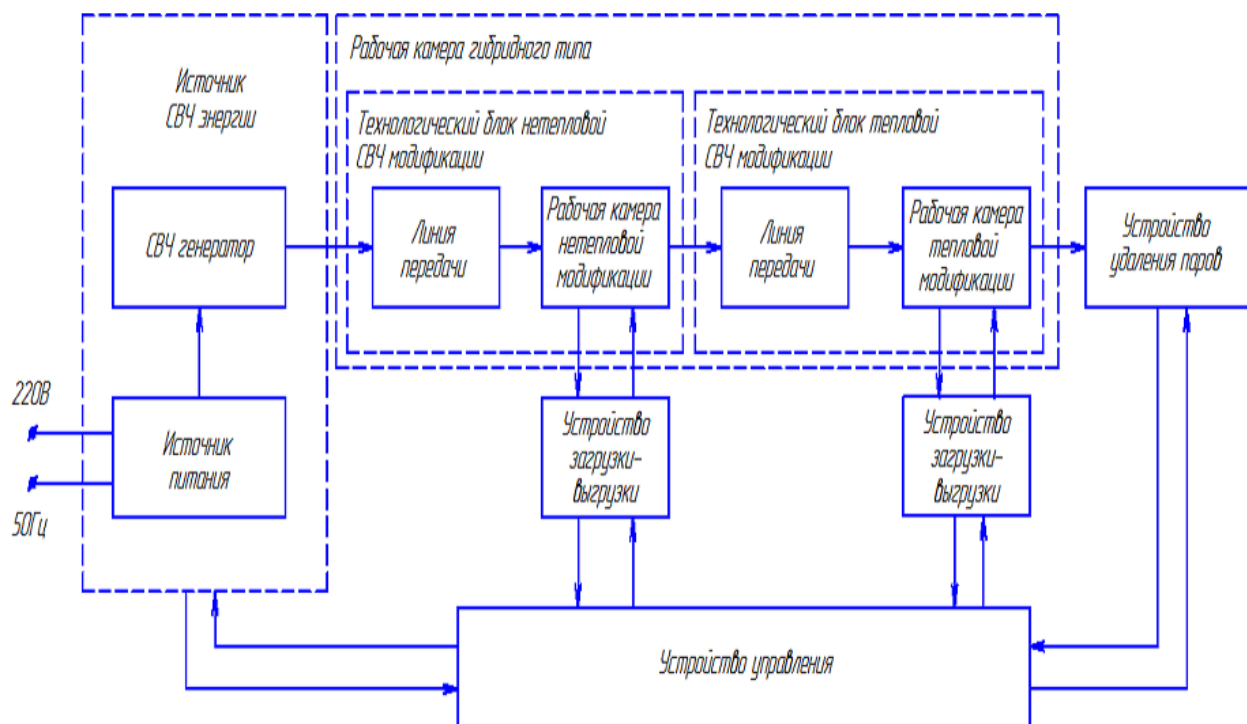


Рисунок 1 Блок-схема СВЧ электротехнологической установки с рабочей камерой гибридного типа

В основе установки лежит инновационная гибридная рабочая камера, конструктивно объединяющая два автономных технологических блока. Один из них реализует термическое воздействие на диэлектрики, а другой – нетепловую модификацию полимерных материалов.

Преимущества гибридного подхода:

– синергия процессов: совмещение тепловой и нетепловой обработки в одном цикле обеспечивает максимальную энергоэффективность и сокращает время технологического процесса;

– экономия пространства: единая интегрированная система позволяет вдвое сократить необходимую производственную площадь по сравнению с парой независимых установок.

Рассмотрим ключевые особенности полимерных матриц, используемых в процессах СВЧ-обработки, определяющие их поведение при воздействии излучения:

– полиэтилен (PE). Высокая химическая стойкость, низкая плотность, отличные диэлектрические свойства. Производство упаковки, трубопроводов, деталей техники;

– полипропилен (PP). Высокая термостойкость, механическая прочность, устойчивость к УФ-излучению и влаге. Автомобилестроение, строительство, медицина;

– полиамид (PA). Исключительная износостойкость, высокая прочность на разрыв, стойкость к маслам и кислотам. Изготовление шестерён, подшипников, электрических компонентов;

– эпоксидная смола. Высокие показатели прочности и термостойкости. Служит эффективным связующим. Древесно-полимерные композиты, абразивы, огнестойкие покрытия и клеи;

– полидифениленфталид (PDDF) с графитом. Экстремальная термическая стабильность, химическая инертность; графитовый наполнитель улучшает теплопроводность и электропроводность. Детали двигателей, электронные устройства.



На рисунке 1 представлен график изменения термостойкости полимерных композитов в процессе СВЧ-обработки. Проанализированы образцы полиэтилена (PE), полипропилена (PP), полиамида (PA), эпоксидной смолы и полидифениленфталата (PDDF) с добавлением графитового наполнителя.

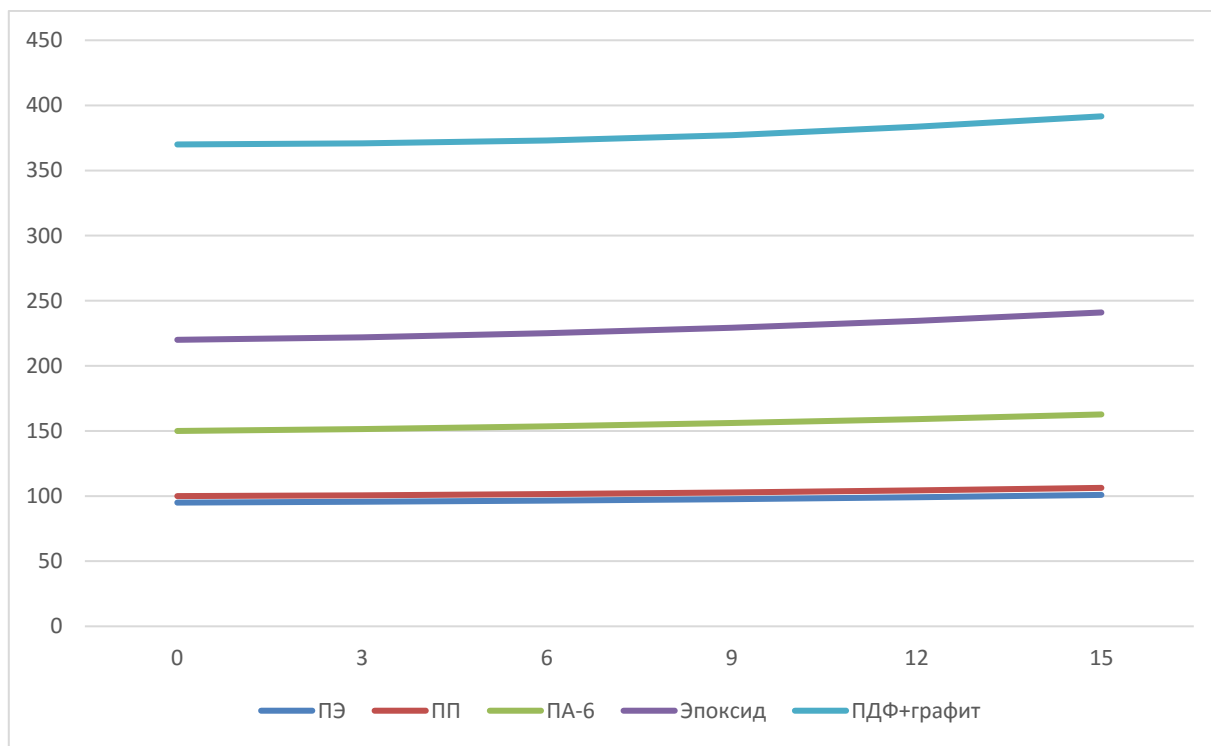


Рисунок 1 график изменения термостойкости полимерных композитов в процессе СВЧ-обработки: ПЭ– полиэтилена; ПП – полипропилен; ПА-6 – полиамид; ЭПОКСИД – эпоксид и полидифениленфталат с графитовым наполнителем

### Выводы.

Экспериментальные данные убедительно доказывают, что воздействие сверхвысокочастотного излучения является катализатором значительного улучшения механических свойств полимеров. Этот эффект обусловлен двумя ключевыми процессами: термическим выгоранием балластных примесей и последующей оптимизацией внутренней структуры материала. Удаление инородных включений освобождает внутренние зоны матрицы, позволяя ей более равномерно перераспределять приложенные нагрузки. В результате материал демонстрирует существенное повышение прочности, а также значительно возрастает его устойчивость к экстремальным температурам и механическим деформациям.

Использование столь разнообразного набора материалов позволяет гибко адаптировать технологический процесс под специфические требования каждой задачи. Такой подход обеспечивает не только высокое качество конечного продукта, но и максимальную экономическую эффективность производственного цикла.

### Список литературы:

1. Калганова С.Г. Научные основы модификации полимерных материалов в СВЧ электромагнитном поле/ С.Г. Калганова, Ю.С. Архангельский, В.А. Лаврентьев, С.В. Тригорлый // Вопросы электротехнологии, 2017. – № 1 (14). – С. 26-36.



2. Тухватуллин М.И. Способ сверхвысокочастотной тепловой и нетепловой обработки сырья / М.И. Тухватуллин // Патент на изобретение №2794529, 20.04.2023 г.

3. Тухватуллин М.И. Направления совершенствования СВЧ технологий для обработки растительного, древесного и полимерного сырья / М.И. Тухватуллин, Р.С. Аипов // Российский электронный научный журнал № 4 (58), 2025 С. 14 – 25.

4. Тухватуллин М.И. Теоретические аспекты воздействия электромагнитных волн на полимерные материалы / М.И. Тухватуллин, Д.А. Жуков // Российский электронный научный журнал №1 (55), 2025. С. 434-442.

5. Liuxiang Zhan, Wan Li, Gaojun Wang, Xianli Zhao, Yuling Li & Ni Wang. Effect of Low Temperature Microwave Drying on Properties of Dyed Cashmere Fibers. *Fibers and Polymers* volume 21, pp. 564–570. 2020.

