

Тухватуллин Мидхат Ильфатович,  
ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ  
Tuhvatullin Midhat Ilfatovich,  
Bashkir State Agrarian University

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

**ГИБРИДНАЯ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ  
УСТАНОВКА ДЛЯ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ  
HYBRID MICROWAVE ELECTRICAL PROCESSING  
SYSTEM FOR MATERIAL PROCESSING**

**Аннотация.** В статье представлен структурный анализ блок-схем гибридной СВЧ электротехнологической установки, предназначенной для обработки материалов. Особое внимание уделено преимуществам камер гибридного типа, а также детальному рассмотрению режимов работы установки, обеспечивающих как тепловую, так и нетепловую модификацию обрабатываемых материалов.

**Abstract.** This article presents a structural analysis of the block diagrams of a hybrid microwave electro-processing system designed for materials processing. Particular attention is paid to the advantages of hybrid chambers, as well as a detailed examination of the system's operating modes, which provide both thermal and non-thermal modification of the materials being processed.

**Ключевые слова:** Блок-схема, СВЧ установка, камера гибридного типа, тепловая и нетепловая модификация.

**Keywords:** Block diagram, microwave installation, hybrid chamber, thermal and non-thermal modification.

**Введение.** Современная СВЧ-электротехнология переживает этап активного развития, во многом благодаря внедрению инновационных установок. В зависимости от принципа воздействия на материал, их можно разделить на три ключевые группы.

1. Тепловая модификация (СВЧ ЭТУ ТМ). Наиболее распространённый класс установок, использующий тепловую энергию микроволн. Их главная особенность – способность обеспечивать быстрый, равномерный нагрев по всему объёму обрабатываемого объекта без повреждения его структуры. Эта технология нашла широкое применение в пищевой промышленности (разморозка, приготовление), медицине (стерилизация) и строительстве.

2. Нетепловая модификация (СВЧ ЭТУ НМ). Менее распространённый, но не менее важный тип оборудования. Здесь воздействие осуществляется электромагнитными волнами, которые вызывают изменения на молекулярном уровне без значительного повышения температуры. Такие установки незаменимы в научных исследованиях и специальных производственных процессах, требующих прецизионной точности.

3. Гибридные установки (СВЧ ЭТУ с КГТ). Отдельную категорию составляют установки с рабочими камерами гибридного типа. Они объединяют преимущества обеих модификаций, создавая синергетический эффект и открывая новые горизонты для промышленности.



Сферы применения и ключевые преимущества.

СВЧ-электротехнологические установки с КГТ находят применение в самых разных отраслях:

- деревообработка: глубокая сушка древесины и обеззараживание пиломатериалов;
- производство керамики: ускоренный обжиг изделий и спекание;
- химическая промышленность: полимеризация и вулканизация резиновых смесей;
- пищевая промышленность: пастеризация продуктов и стерилизация упаковки.

Использование гибридных технологий позволяет предприятиям не только увеличить производительность, но и кардинально улучшить качество продукции при одновременном снижении негативного воздействия на окружающую среду [1].

Ключевые преимущества СВЧ ЭТУ с КГТ:

- высокая скорость нагрева;
- равномерное распределение тепла;
- точный контроль температурных режимов;
- значительная экономия электроэнергии;
- улучшение качества конечного продукта;
- экологичность производства.

Таким образом, СВЧ-электротехнологические установки с рабочими камерами гибридного типа представляют собой наиболее перспективное направление развития. Они становятся мощным инструментом повышения конкурентоспособности промышленных предприятий и улучшения экологической обстановки.

**Цель исследования:** исследование режимов работы сверхвысокочастотной (СВЧ) электротехнологической установки, направленное на реализацию процессов тепловой и нетепловой модификации свойств материалов.

**Задачи исследования.**

1. Разработать структурные схемы гибридной СВЧ электротехнологической установки для реализации процессов тепловой и нетепловой модификации материалов.
2. Провести теоретический анализ режимов работы рабочей камеры гибридной СВЧ электротехнологической установки с целью оптимизации параметров модификации.

**Методы и результаты исследования.**

Сравнительный анализ СВЧ-установок с традиционным тепловым воздействием и установок гибридного типа наглядно демонстрирует преимущества комбинированного подхода к модификации материалов.

Ключевое отличие камер гибридного типа заключается в их способности одновременно воздействовать на структуру материала двумя способами – термическим и электромагнитным. Это синергетическое воздействие позволяет достигать качественно новых характеристик конечного изделия [2].

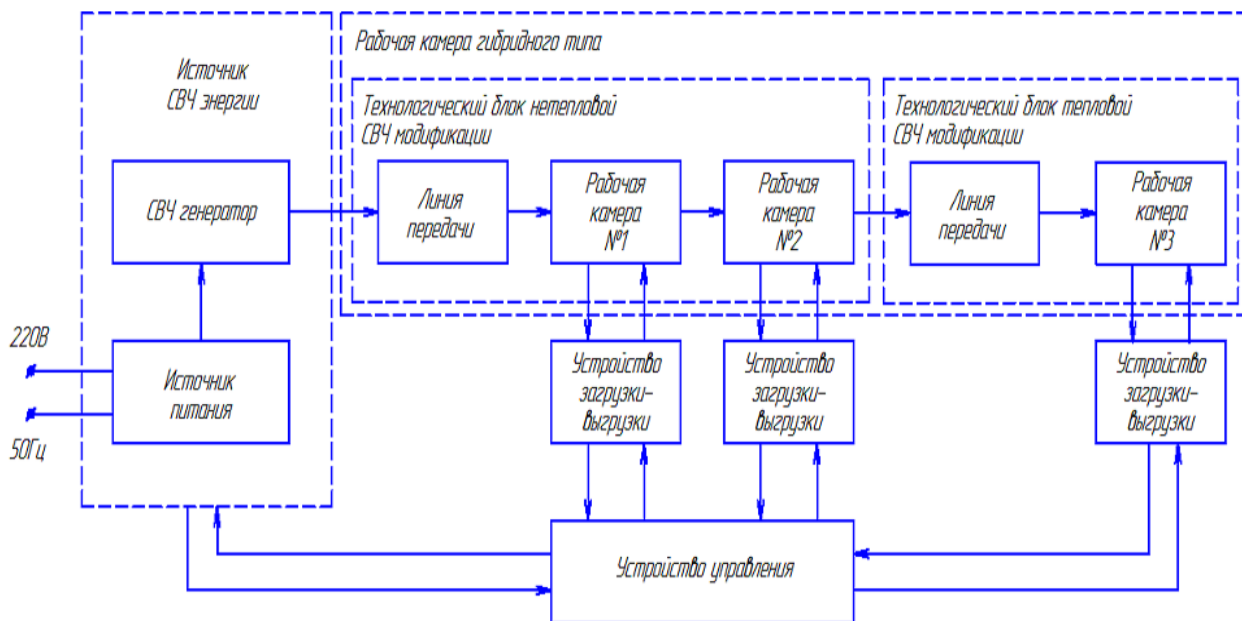
В рамках оценки эффективности оборудования целесообразно опираться на следующие критерии [3]:

- скорость процесса: время, необходимое для достижения целевых показателей модификации;
- качество продукта: степень улучшения физико-механических свойств материала;
- универсальность: широта спектра обрабатываемых материалов и задач.

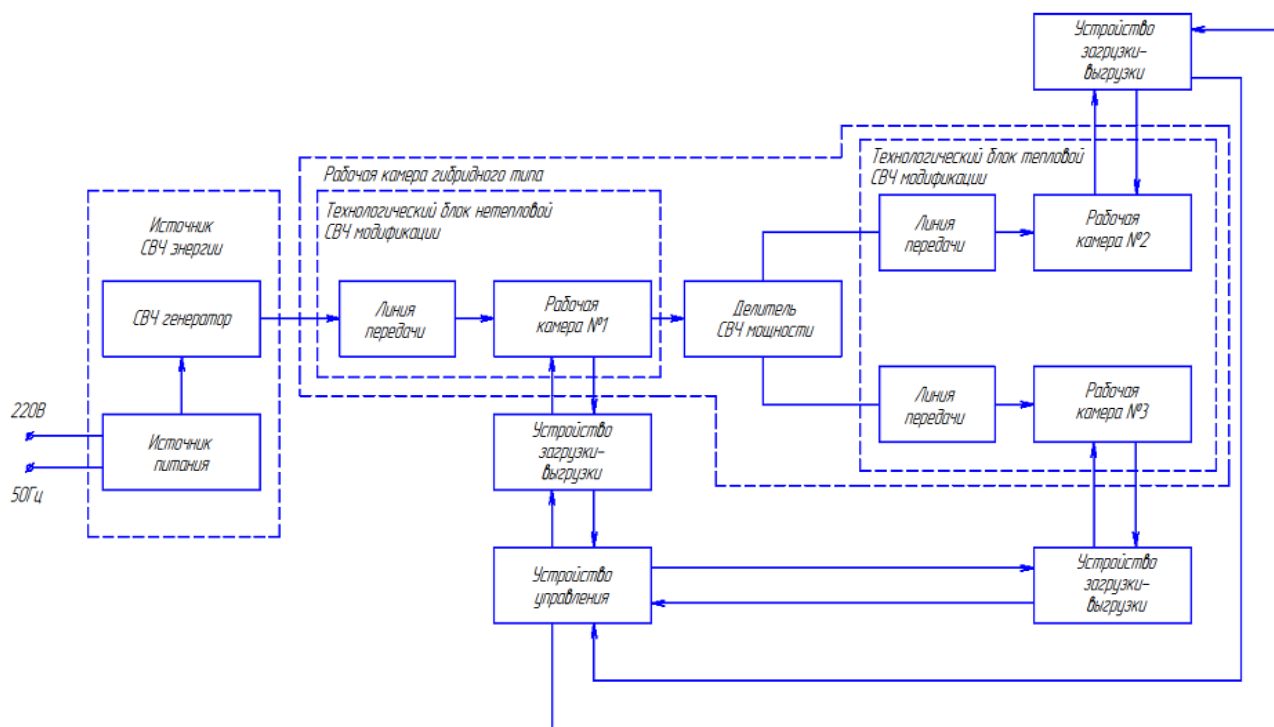
По всем перечисленным параметрам оборудование гибридного типа демонстрирует уверенное превосходство. Объединение двух видов воздействия в едином технологическом цикле обеспечивает значительное ускорение процесса при одновременном повышении качества обработки.



Блок-схема СВЧ электротехнологической установки, состоящая из трех рабочих камер приведена на рисунке 1 [5].



а



б

Рисунок 1 Блок-схема СВЧ электротехнологической установки, состоящая из трех рабочих камер: а – с двумя рабочими камерами для нетепловой модификации и одной рабочей камерой для тепловой модификации;

б – с одной рабочей камерой для нетепловой модификации и двумя рабочими камерами для тепловой модификации



Гибридная СВЧ-установка обеспечивает синергетический эффект за счёт одновременной модификации как минимум двух видов товарной продукции. Комбинирование процессов нетепловой (например, полимеризация) и тепловой (например, сушка или термообработка) обработки позволяет не только расширить ассортимент, но и существенно увеличить прибыльность эксплуатации оборудования [4].

Такой подход создаёт уникальную производственную цепочку: продукты нетеплового воздействия служат основой для дальнейшей тепловой обработки. Ярким примером служит производство высокотехнологичного текстиля, где СВЧ-полимеризация волокон в сочетании с термической модификацией шерсти позволяет получать материалы повышенной прочности с улучшенными потребительскими свойствами.

#### **Выводы.**

Гибридные рабочие камеры – это инновационное решение в области микроволновой электротехнологии, объединяющее две и более рабочие камеры различных модификаций. Ключевая особенность таких систем – возможность деления СВЧ-мощности, что позволяет одновременно производить два, четыре и более видов продукции.

В отличие от традиционных установок, ориентированных на выпуск одного продукта, гибридные системы обеспечивают непревзойдённую гибкость. Это позволяет оперативно адаптировать производственный процесс к текущим потребностям рынка, переключаясь между различными типами продукции.

Для эффективной работы таких комплексов необходимо учитывать специфические факторы:

- обеспечение равномерного распределения микроволнового поля;
- исключение взаимного влияния продуктов друг на друга;
- поддержание оптимальных условий для каждого технологического процесса.

Внедрение гибридных СВЧ-установок открывает новые горизонты для промышленности, обеспечивая высокую производительность, экономичность и возможность выпуска разнообразной продукции на единой технологической платформе.

#### *Список литературы:*

1. Добродум А.С. СВЧ электротехнологические установки с гибридными камерами / А.С. Добродум, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии. 2017. – № 3 (16). С. 16–22.
2. Добродум А.С. Согласование производительностей гибридной камеры СВЧ электротехнологической установки по нетепловой и тепловой модификации обрабатываемых материалов / А.С. Добродум, Ю.С. Архангельский // Вопросы электротехнологии, 2017 - №4(17). – С.15-18.
3. Тухватуллин М.И. Конструкция гибридной СВЧ электротехнологической установки для обработки растительных, полимерных и древесных материалов / М.И. Тухватуллин // Российский электронный научный журнал. 2024. №2(52). С. 38-50.
4. Тухватуллин М.И. Результаты экспериментальных исследований СВЧ-обработки полимерных материалов / М.И. Тухватуллин, В.С. Тернерсесьян // Вестник Башкирского государственного аграрного университета № 3(75), 2025. С. 108-114.
5. Тухватуллин М.И. Способ сверхвысокочастотной тепловой и нетепловой обработки сырья / М.И. Тухватуллин // Патент на изобретение №2794529, 20.04.2023 г.

