

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ОДЕССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ПИЩЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

На правах рукописи

КОЛЕСНИЧЕНКО НАТАЛЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА

УДК 536.2.02

**ОСОБЕННОСТИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛОТЫ В ДИСПЕРСНЫХ
И ПЛОТНЫХ СРЕДАХ ПРИ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ
ПРОЦЕССАХ НАГРЕВА**

Специальность **05.14.06** – Техническая теплофизика и промышленная
теплоэнергетика

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
Бошкова Ирина Леонидовна
доктор технических наук,
доцент

Примірник дисертації
ідентичний за змістом з
іншими примірниками

Вчений секретар спецради



Мілованов В.І.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	6
ВВЕДЕНИЕ	8
РАЗДЕЛ 1. ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ	14
1.1. Особенности математического моделирования высокоинтенсивных процессов распространения теплоты	14
1.1.1. Моделирование высокоинтенсивных процессов распространения теплоты	14
1.1.2. Методы решения краевых задач теплопроводности в теле при наличии внутренних источников теплоты	20
1.1.3. Влияние процессов релаксации на перенос интенсивных потоков теплоты	24
1.2. Распространение теплоты в дисперсных системах	27
1.3. Применение микроволнового нагрева для высокотемпературной обработки материалов	29
1.4. Применение микроволнового нагрева для получения керамических изделий	33
1.4.1. Основные понятия технической керамики	33
1.4.2. Методы получения технической керамики с использованием интенсивной высокотемпературной обработки	35
1.5. Влияние теплопроводности на равномерность обработки материалов в микроволновом поле	39
1.6. Специфика нагрева материалов в микроволновом электромагнитном поле	41
1.6.1. Диэлектрические характеристики материалов и виды диэлектрических потерь	41

	3
1.6.2. Тепловой пробой	44
1.6.3. Оценка однородности температурного поля при нагреве материала в микроволновом поле	45
1.7. Виды микроволновых камер	48
1.7.1. Мономодовые камеры	48
1.7.2. Мультимодовые камеры	48
Выводы к разделу 1	51
РАЗДЕЛ 2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ	53
2.1. Цель и задачи исследования	53
2.2. Математические методы анализа теплового состояния тела	53
2.2.1. Анализ нестационарной теплопроводности тела на основе гиперболического уравнения теплопроводности	53
2.2.2. Нестационарная теплопроводность при малых числах Фурье	57
2.3. Математическая модель нестационарной теплопроводности на основе параболического уравнения с внутренними источниками теплоты	61
2.4. Результаты аналитического исследования температурного поля полуограниченного массива	69
2.5. Обсуждение результатов аналитического исследования процессов теплопроводности при высокоинтенсивном нагреве	75
Выводы к разделу 2	78
РАЗДЕЛ 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ПОРОШКОВ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ	79

	4
3.1. Постановка задачи исследования	79
3.2. Подготовка образцов и описание экспериментальных ячеек	80
3.3. Экспериментальная микроволновая установка	81
3.4. Результаты проведения экспериментов и их анализ	84
3.4.1. Исследования нагрева плоского образца	81
3.4.2. Нагрев композиционного порошка на основе порошка оксида алюминия	88
3.4.3. Исследование эффективности нагрева порошков карбида кремния и оксида алюминия	91
3.4.4. Нагрев порошков различной дисперсности без связующего	94
3.5. Перспективы применения микроволнового поля для спекания функционально-градиентных материалов	100
3.6. Результаты анализа экспериментальных данных и их сопоставление с расчетными данными	107
3.7. Оценка энергетической эффективности микроволновой технологии спекания	110
Выводы к разделу 3	114
РАЗДЕЛ 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МВ ПОЛЯ НА ГЛИНУ	116
4.1. Особенности процесса обжига изделий из глины	116
4.2. Методика экспериментального исследования термообработки глины в микроволновом поле	117
4.3. Экспериментальное исследование сушки глинистого материала и анализ полученных результатов	118
4.4. Оценка энергетической эффективности микроволновой сушки глины	124

	5
4.5. Анализ теплового эффекта взаимодействия материала с микроволновым электромагнитным полем	126
4.6. Способы повышения экономической эффективности при использовании МВ нагрева	135
Выводы к разделу 4	137
ВЫВОДЫ	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	141
ПРИЛОЖЕНИЯ	158
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ	158
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЛОКАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МАТЕРИАЛА В «MARLE15» ПРИ МИКРОВОЛНОВОМ НАГРЕВЕ	161
ПРИЛОЖЕНИЕ В. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО СУШКЕ ГЛИНЫ В МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ	163
В-1. Микроволновая сушка глины в оптимальных режимах	163
В-2. Микроволновая сушка глиняных пластин при различных значениях мощности магнетрона	166
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЯЕМЫХ И ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН ПРИ СУШКЕ ГЛИНЫ	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ	175

ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;
- c – удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
- E – напряженность электрического поля, $\text{В}/\text{м}$;
- F – площадь поверхности, м^2 ;
- m – масса материала, кг ;
- N – скорость сушки, $\text{кг}/(\text{кг}\cdot\text{с})$;
- P – мощность магнетрона, Вт ;
- u – влагосодержание, $\text{кг}/\text{кг}$;
- Q – тепловой поток, Вт ;
- q – удельная мощность внутренних источников теплоты, $\text{Вт}/\text{м}^3$;
- P – мощность, Вт ;
- r – удельная теплота парообразования, $\text{Дж}/\text{кг}$;
- t – температура, $^{\circ}\text{C}$;
- T – температура, К ;
- V – объем, м^3 ;
- w – скорость, $\text{м}/\text{с}$;
- α – коэффициент теплоотдачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;
- β – объемная концентрация частиц;
- γ – коэффициент электромагнитной энергии в слое, м^{-1} ;
- f – частота колебаний электромагнитного поля, Гц ;
- δ – толщина слоя, м ;
- ε – порозность;
- Θ – безразмерная избыточная температура,
- λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;
- τ – время, с ;
- η – коэффициент полезного действия;
- ν – кинематический коэффициент вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$;
- ξ – безразмерная координата,
- ρ – плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$;

θ – безразмерная избыточная температура;

w – скорость, м/с.

x – координата, м.

Сокращения

Bi – число Био;

$MВ$ – микроволновое;

ЭМП – электромагнитное поле,

Fo – число Фурье;

Ro – критерий Померанцева;

Nu – число Еуссельта;

Ra – число Релея.

Индексы

v – воздух,

$исп$ – испарение;

k – камера;

$конв$ – конвективный;

$кр$ – край;

$луч$ – лучистый;

m – магнетрон;

n – нагрев;

n – потери;

$пов$ – поверхность;

$пол$ – полезный;

$расч$ – расчетное,

c – сеть;

$сл$ – слой,

t – твердый,

$уд$ – удельная;

$цен$ – центр;

$экс$ – экспериментальное,

0 – начальное значение.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. Высокоинтенсивный нагрев является эффективным способом обработки технических материалов, которые имеют многочисленные приложения в микроэлектронике, авиакосмической технике, машиностроительной, электронной, химической промышленности, биомеханике. К интенсивным технологиям нагрева также относят нагрев в микроволновом (МВ) поле (Zhang S.-L., Buchta R.); высокотемпературная микроволновая обработка материалов демонстрирует значительный потенциал применения в различных технологиях, таких, как создание композиционных и функционально-градиентным материалов (Sheppard L. M., В.В. Сапунов, Makino Y., Ohmae T.), производство технической керамики (Lukas R.), порошковая металлургия (Gupta M., Wong Wai Leong, E.), сверхбыстрый отжиг полупроводниковых структур (R.C. Merkle, Corradi A. V.), синтез наноструктурированных покрытий (Морозов А.Н., Wu X., Corradi A. V., Shangguan W. F.) Развитие новых технологий получения керамических, композиционных и полупроводниковых материалов зависит от знаний особенностей формирования температурного поля в теле, для получения данных о котором необходимы надежные математические модели. Однако в настоящее время существует проблема, связанная с неопределенностью подходов к моделированию высокоинтенсивных процессов, в первую очередь, вследствие обоснованности допущений, принимаемых при формулировке дифференциального уравнения теплопроводности. Само понятие высокоинтенсивного нагрева применяется довольно широко, при построении моделей теплопроводности допустимы уравнения как гиперболического, так и параболического типа в зависимости от особенностей распространения теплоты в исследуемом материале (Лыков А.В., Кудинов В.А., Исаев К.Б.). Результаты решений уравнений теплопроводности в ряде случаев не отражают реального распределения температур при высокоинтенсивном нагреве вследствие недостаточности

знаний особенностей распространения теплоты в исследуемых материалах (Шашков А. Г.), проблема усложняется при моделировании нагрева в микроволновом поле. Таким образом, актуальность темы исследования обуславливается необходимостью составления корректных математических моделей теплопроводности для условий нагрева материала с высокой интенсивностью.

Связь работы с научными программами, планами и темами. Диссертационная работа выполнялась в соответствии с Законом Украины "Об энергосбережении", утвержденного Постановлением Верховной Рады Украины №74 / 94 01.07.1994 г; "Основных положений энергетической стратегии Украины на период до 2030 гг.", принятых Кабинетом Министров Украины 15.03.2006 г; Закону Кабинета Министров Украины № 148 от 5.02.97 г., утвердившем "Комплексную Государственную Программу Энергосбережение".

Диссертационная работа выполнялась в рамках госбюджетной тематики кафедры теплоэнергетики и трубопроводного транспорта энергоносителей "Методы теплофизического эксперимента и проблемы тепло- и массообмена в нетрадиционной энергетике, низкотемпературных установках, новых термических технологиях".

Цель и задачи исследований. Целью работы является установление особенностей распространения теплоты в дисперсных и плотных средах при высокоинтенсивных процессах нагрева в технологиях производства технической керамики, композиционных и функционально-градиентных материалов.

Для достижения данной цели следовало решить ряд задач:

- изучить математические модели, описывающие нестационарную теплопроводность плотных тел в условиях высокоинтенсивного нагрева, включая нагрев в микроволновом поле;
- провести анализ существующих моделей, составленных на основе гиперболического уравнения теплопроводности, и оценить их применимость

для расчета высокоинтенсивных процессов производства, в частности, керамики;

- оценить вклад релаксационных явлений в процессы, интенсивность которых ограничена требованиями производства керамики;

- получить зависимость для расчета локальных температур при микроволновом нагреве полуограниченного массива для граничных условий III рода;

- провести вычислительный эксперимент по полученной зависимости с целью ее верификации;

- провести экспериментальные исследования процессов нагрева в микроволновом поле порошковых материалов, глинистых и пластических масс, применяемых при производстве технической керамики, и установить возможности аналитического расчета температурного поля в материале;

- определить условия обеспечения равномерности нагрева при спекании керамических изделий в микроволновом поле;

- оценить экономическую эффективность применения в промышленности микроволнового нагрева заготовок при производстве технической керамики.

Объект исследования – процессы переноса теплоты и массы при нагреве плотных материалов с высокой интенсивностью.

Предмет исследования – основные тепловые характеристики нагрева плотных тел с высокой интенсивностью, в частности, в условиях микроволнового нагрева, такие как температурное поле и количество передаваемой теплоты, а также физические свойства материалов, составляющие основу для производства технической керамики.

Методы исследований – математические методы исследования теплового состояния тел при нестационарной теплопроводности; экспериментальные методы исследования процессов переноса теплоты и массы при действии внутренних источников теплоты, базирующиеся на основных положениях теории тепломассопереноса и распространения

электромагнитных волн, методы статистического и корреляционного анализа экспериментальных данных, физико-математического моделирования процессов взаимодействия материалов с микроволновым электромагнитным полем, методы вычислительной математики и программирования с использованием пакета прикладных программ "MAPLEV", "Origin6".

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые установлено, что при построении математических моделей нагрева материала в технологиях производства технической керамики рационально применение уравнения теплопроводности параболического типа.

2. Впервые получены данные по скорости нагрева в микроволновом поле образцов для производства технической керамики на основе порошков карбида кремния и оксида алюминия со связующими поливиниловый спирт и лигносульфонат технический.

3. Впервые установлено, что продукты термораспада связующего лигносульфоната технического, образующиеся на поверхности образца при его нагреве в микроволновом поле, способствуют интенсификации его нагрева.

4. Впервые получена зависимость для расчета скорости сушки глины в микроволновом поле для первого периода.

5. Впервые для сопряженного процесса тепло- и влагосопереноса при микроволновом нагреве предложен метод расчета температуры материала по полученным аналитическим зависимостям для нестационарного теплообмена при действии внутреннего источника теплоты путем учета в значении положительного источника теплоты составляющей, определяемой энергией испарения влаги из материала.

Научная значимость работы. Определены условия применимости гиперболического и параболического уравнения теплопроводности для составления математических моделей нагрева высокой интенсивности. Аналитическая зависимость, полученная на основе уравнения

теплопроводности с внутренними источниками теплоты при учете теплообмена с окружающей средой, позволяет рассчитать температурное поле полуограниченного массива в микроволновом поле. Аналитическое исследование процессов теплопроводности при высокоинтенсивном нагреве плотных тел, подобных глинистым и пластическим материалам, позволяет оценить влияние основных физических параметров материала на тепловое состояние тела.

Практическая значимость работы. Покрытие поверхности заготовки материалом с высокой способностью поглощения электромагнитной энергии позволяет решить актуальную проблему обеспечения однородности температурного поля при микроволновом нагреве, что позволит улучшить качество изделия за счет объемного и равномерного характера нагрева и повысить энергетические показатели технологических процессов. Применение микроволнового нагрева открывает возможность разработки принципиально новых высокоинтенсивных технологий изготовления перспективных керамических, композиционных и функционально-градиентных материалов.

Личный вклад соискателя. Все положения, выносимые на защиту, получены лично соискателем. В работах, выполненных совместно с другими исследователями, соискателю принадлежит формулирование, развитие и проверка гипотез относительно математического моделирования высокоинтенсивных процессов теплопроводности при производстве технической керамики, разработка методик экспериментальных исследований, подбор материалов для исследования и анализ технологического процесса производства, а также анализ существующих связующих и обоснование их применения. Соискателем выполнен анализ и обобщение экспериментальных данных, проведено сопоставление эмпирических и аналитических данных и сделан ряд важных выводов относительно условий применения полученных в работе аналитических зависимостей для получения достоверных данных о тепловом состоянии тела

при его нагреве в микроволновом электромагнитном поле.

Апробация результатов диссертации. Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены на конференциях и семинарах: II міжнародна науково-практичної конференція: "Наука і сучасність: виклики глобалізації" (Київ, 2016 г), международная конференция "ENERGY OF MOLDOVA – 2016. REGIONAL ASPECTS OF DEVELOPMENT" (Кишинев, 2016), XV международная заочная научно-практическая конференция "Развитие науки в XXI веке" (Харьков, 2016 г), Научно-техническая конференция с международным участием "Энерго- и экологически эффективные рабочие вещества в технологиях генерации холода и теплоты". 3 февраля 2016 года. Санкт-Петербург. ИХиБТ Университета ИТМО; Всеукраїнської науково-технічної конференції "Актуальні проблеми енергетики та екології", 2016, XV международная заочная научно-практическая конференция: "Развитие науки в XXI веке", г. Харьков: 2016; VII Міжнародна науково-технічна конференція "Інновації в суднобудуванні та океанотехніці", Николаев, 2016; Всеукраїнської науково - технічної конференції молодих учених та студентів "Еколого-енергетичні проблеми сучасності", Одеса, 2015.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, списка литературы из 158 наименований и приложений. Работа изложена на 140 стр. основной части, включая 59 рисунков и 16 таблиц.

РАЗДЕЛ 1

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

1.1. Особенности математического моделирования высокоинтенсивных процессов теплоты

1.1.1. Моделирование высокоинтенсивных процессов распространения теплоты. Применение методов высокоэнергетического воздействия и их комбинирование с традиционными технологиями термической обработки технических материалов, к примеру, на основе керамики, ставит своей целью получение заданных рабочих свойств и характеристик: степень устойчивости к износу и растрескиванию, устойчивость к воздействию высоких температур, требуемая механическая и физическая внутренняя структура. Такие материалы находят свое применение в машиностроении, микроэлектронике, биомеханике, энергетике, в аэрокосмической и транспортной промышленности [1-3]. К интенсивным технологиям нагрева также относят нагрев в микроволновом (МВ) поле [4]. Применение микроволнового нагрева открывает возможности разработки принципиально новых технологий создания перспективных керамических, композиционных и полупроводниковых материалов [5]. Эффективность получения таких материалов зависит от особенностей формирования температурного поля в теле, для получения данных о котором необходимы надежные математические модели. Однако в настоящее время существует проблема, связанная с неопределенностью подходов к моделированию высокоинтенсивных процессов, в первую очередь, вследствие неопределенности допущений, принимаемых при формулировке дифференциального уравнения теплопроводности. Само понятие высокоинтенсивного нагрева применяется довольно широко, при построении моделей допустимы уравнения как гиперболического, так и параболического

типа в зависимости от специфики распространения теплоты в конкретном материале. Таким образом, актуальность темы исследования обуславливается необходимостью определения корректных математических моделей теплопроводности для условий высокоинтенсивного нагрева материала. Аналитические решения дают возможность проводить вычислительные эксперименты и в результате получать новые знания о влиянии широкого спектра параметров процесса на тепловое состояние тела.

Моделирование высокоинтенсивных процессов распространения теплоты, при которых возможно нарушение линейной связи между тепловым потоком и градиентом температур, представляет особую сложность [6-8]. Обычно при решении задач теплопроводности используется дифференциальное уравнение, в котором временное и пространственное изменение температуры описывается уравнением параболического вида, однако при описании высокоинтенсивных процессов его применение может приводить к получению неверных результатам.

Как отмечено в [9], конкретному виду изотермической поверхности соответствует определенный дифференциальный оператор теплопроводности, среди которых оператор параболического типа является частным случаем. Утверждается [9], что попытка из параболического оператора получить несвойственные ему температурные поля за счет "навязывания" различных начальных и граничных условий привела к проблеме парадоксов и некорректных задач.

Дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа, связывающее временное и пространственное изменение температуры, для среды с переменными физическими характеристиками и внутренними источниками теплоты при допущении о том, что скорость распространения теплоты бесконечно велика, имеет следующий вид:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) + q_v \quad (1.1)$$

Согласно уравнению (1.1), тепловой поток распространяется в пространстве с бесконечной скоростью, поскольку изменение температуры в некоторой области мгновенно сказывается на температуре в сколь угодно удаленной от нее точке [10]. В действительности теплота распространяется с конечной, хотя и довольно большой, скоростью, поэтому в большинстве практических задач ее можно не принимать во внимание.

В [11] была предложена гипотеза о конечных скоростях распространения теплоты и массы. В случаях, когда линейная связь между тепловым потоком и градиентом температур нарушается, плотность теплового потока определяется обобщенным законом Фурье (в предположении, что теплофизические характеристики не зависят от температуры и внутренние источники теплоты отсутствуют):

$$\vec{q} = -\lambda \nabla t - \tau_r \frac{\partial \vec{q}}{\partial \tau} \quad (1.2)$$

где τ_r – постоянная времени (время релаксации).

При резком изменении q перестройка температурного поля и градиента температуры происходит со смещением во времени (τ_r). Скорость распространения теплоты определяется выражением:

$$w_r = \sqrt{\frac{a}{\tau_r}} \quad (1.3)$$

Например, для азота $\tau_r=10^{-9}$ с, $w_r=150$ м/с; для алюминия $\tau_r=10^{-11}$ с, $w_r=1500$ м/с.

Дифференциальное уравнение теплопроводности с учетом релаксационных процессов было получено при использовании уравнения теплового баланса и обобщенного закона Фурье:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \tau_r \frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2} = a \nabla^2 t \quad (1.4)$$

Его называют гиперболическим уравнением теплопроводности. Переход к гиперболическому оператору устраняет некоторые некорректные решения классической теории теплопроводности [12].

В настоящее время построению математических моделей теплопроводности на основе гиперболического уравнения уделяется большое внимание. В [13] представлены результаты исследования решений краевых задач переноса для уравнений гиперболического типа, где рассматривалась корректность постановки задачи при ГУ I и III рода. В [14] получено точное аналитическое решение гиперболического уравнения теплопроводности для бесконечной пластины при граничных условиях первого рода. Показано, что прогрев (охлаждение) тела определяется движением фронта ударной тепловой волны, на котором происходит скачок температур. При этом получается две подобласти: в одной температура изменяется от температуры на стенке до температуры на фронте волны, в другой, невозмущенной, температура равна начальной температуре. В [15] рассматривается волновой теплоперенос в линейных и нелинейных средах на основе закона теплопроводности, учитывающего не только первые и вторые производные по времени от теплового потока, но и производные более высоких порядков. Это позволило перейти к задаче на основе параболического уравнения с запаздывающим аргументом по времени.

В [16] получено решение нелинейного уравнения теплопроводности, основанное на релаксационной модели переноса теплоты, для квазистационарного режима нагрева, что позволило получить зависимость для максимальной скорости нагрева, выше которой необходимо учитывать конечность скорости распространения тепла:

$$\left. \frac{dT}{d\tau} \right|_{\max} = \frac{V_r^2}{a_r - \tau_r V_r^2} (T_w - T_0) \quad (1.5)$$

где V_r – линейная скорость движения поверхности (изотермы), a_r – коэффициент температуропроводности, T_w , T_0 – температура поверхности (изотермы) и окружающей среды, соответственно.

Коэффициент температуропроводности можно определить из соотношения для времени релаксации, приведенном в [17]:

$$\tau_r = 3a_r / \upsilon_r^2 \quad (1.6)$$

где υ_r – скорость звука.

Для оценки граничной скорости нагрева материала при условии, что $\tau_r V_w^2 \leq 0,1 \cdot a_r$, предложена следующая зависимость [16]:

$$\left. \frac{dT}{d\tau} \right|_{\max} = \frac{T_w - T_0}{9\tau_r} \quad (1.7)$$

Время релаксации оценивалось разными авторами для различных типов материалов и было найдено, что его значение лежит в пределах от 10^{-9} с для газов до 10^{-14} с для металлов. Скорость нагрева выше 100 К/с называется высокой.

При существенной зависимости теплофизических и электрофизических свойств от температуры аналитические методы решения оказываются неэффективными. В этом случае решения получают с помощью численных методов. Недостатки численных методов состоят в том, что в их основе заложена погрешность, связанная с заменой исходных уравнений на аппроксимирующие, т. е. возникает погрешность вычислительного алгоритма, кроме того, их проведение трудоемко [18].

Отдельной проблемой математического моделирования процессов теплопроводности является нагрев в микроволновом поле, поскольку здесь требуется учитывать преобразование электромагнитной энергии во внутреннюю энергию в объеме тела. В то же время, технологии получения материалов, основанные на микроволновом нагреве, получают все большее распространение [19-21]. На основе применения теории обобщенных функций путем сведения задачи теплопроводности для многослойной конструкции к однослойной с переменными (разрывными) физическими свойствами среды в замкнутом виде получено точное аналитическое решение задачи нестационарной теплопроводности с переменными во времени внутренними источниками теплоты [22]. Однако предложенные зависимости имеют свои ограничения и могут быть применены исключительно для многослойных конструкций при заданных значениях внутренних источников теплоты.

Процессы гиперболической теплопроводности составляют проблему при исследовании взаимодействия высокоинтенсивного лазерного излучения с теплопроводностью материала. [23]. Получено, что при времени, значительно превышающем время релаксации, решение не отличается от классического. Математические модели на основе гиперболического уравнения позволяют расширить знания о явлениях теплопроводности и в других прикладных задачах. Так, решение гиперболического уравнения теплопроводности методом функций Грина для движущегося тела [24] позволяет более верно рассчитать прочностные нормы для деталей, работающих под действием нагрузок. Для определения теплофизических параметров твердотельных объектов широко используется метод температурных волн, при этом теоретическая интерпретация основывается на обобщенном законе Фурье [25]. Одним из результативных путей получения точных аналитических решений гиперболической теплопроводности является введение дополнительных граничных условий, результат применения этого метода представлен в работах [26,27].

Еще одна проблема, которую можно решить с использованием гиперболического уравнения теплопроводности – это проблема малых чисел Фурье [28]. Известно, что решения задач теплопроводности, полученные с помощью классических аналитических методов, представляются в форме бесконечных рядов, плохо сходящихся в окрестностях граничных точек и при малых значениях временной координаты. Исследования, выполненные автором [29], показывают, что сходимость точного аналитического решения нестационарной задачи теплопроводности для бесконечной пластины при граничных условиях первого рода в диапазоне чисел Фурье $10^{-12} \leq Fo \leq 10^{-7}$ наблюдается лишь при использовании от 1000 ($Fo = 10^{-7}$) до пятисот тысяч ($Fo = 10^{-12}$) членов ряда.

В результате анализа литературных данных выявлено, что нет определенности в выборе дифференциального оператора для моделирования высокоинтенсивных процессов нагрева тел и нет модели в явном виде, описывающей нестационарную теплопроводность нагрева полубесконечного массива при действии микроволнового поля.

1.1.2. Методы решения краевых задач теплопроводности в теле при наличии внутренних источников теплоты. Нахождение решений прямых задач нестационарной теплопроводности, основываясь на информации о тепловом состоянии, которое определяется температурным полем исследуемого объекта; определение характеристик теплообменного процесса в теле необходимы для определения оптимальных параметров настроек теплового режима и для корректной работы при нестационарных режимах теплообмена.

Разработаны точные аналитические, приближенные и численные методы решения задач теплопроводности. К точным аналитическим методам относят методы разделения переменных (Фурье), интегральных преобразований, источников и функций Грина, тепловых потенциалов. Метод Фурье заключается в представлении решения краевой задачи в виде

бесконечной суммы частных решений, удовлетворяющих дифференциальному уравнению и граничным условиям. Он применим, если возможно разделение переменных в исходном уравнении и задаче Штурма-Лиувилля. Метод Фурье удобнее применять в ограниченных областях, к однородным уравнениям и граничным условиям. При наличии неоднородности в уравнении (источник теплоты) ее предварительно разлагают в ряд Фурье по собственным функциям задачи. Неоднородные граничные условия путем подстановок сводятся к однородным [11]. Метод интегральных преобразований применим к линейным уравнениям, при этом изучают не саму функцию (оригинал), а ее видоизменение (изображение) [30]. Изображение получают, умножив оригинал на ядро преобразования и проинтегрировав полученное выражение в полубесконечных, конечных либо бесконечных пределах по той переменной, по которой проводится преобразование (времени либо координате). Применяв преобразование к математической модели процесса, получают формулировку задачи в изображениях, решают ее, а затем осуществляют обратное преобразование и снова переходят к оригиналу. Вид ядра преобразования зависит от типа интегрального преобразования. Применяются преобразования Лапласа, Фурье, Ханкеля и другие. Метод интегрального преобразования Лапласа (операционный метод) – один из наиболее эффективных для решения нестационарных задач теплопроводности. Он позволяет получать приближенные асимптотические решения для малых или больших значений τ . Техника решения упрощается благодаря наличию достаточно подробных таблиц изображений для различных функций [31]. Преобразование Лапласа эффективно при разных граничных условиях, однако его применение затруднено при сложных начальных условиях.

Наиболее общий и результативный подход к решению краевых задач теплопроводности с внутренними источниками теплоты был предложен А.В. Лыковым [11]. В этом труде академик Лыков привел решения задач теплопроводности при непрерывно действующих источниках теплоты,

постоянных и переменных, для основных тел: полуограниченный массив, неограниченная пластина, сплошной цилиндр, шар при граничных условиях I и III рода. Так, для расчета температурного поля в полуограниченном теле с действующими источниками теплоты приводится решение системы дифференциальных уравнений при граничных условиях I рода и III рода. В задаче рассматривался полуограниченный стержень с тепловой изоляцией боковой поверхности при начальной температуре T_0 . Внутри стержня действует источник тепла, удельная мощность которого q_v , Вт/м³. Теплообмен с окружающей средой протекает по закону Ньютона (граничное условие третьего рода). Лыков отмечает, что внутренний источник может быть как положительным, так и отрицательным, в зависимости от процесса, проходящего внутри тела (испарение влаги, к примеру – отрицательный, нагревание тела электрическим током – положительный). Математическая запись задачи для полуограниченного массива при ГУ III рода представляется следующим образом:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c \cdot \rho} \quad (1.8)$$

$$T(x, 0) = T_0 \quad , \quad \frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (1.9)$$

$$\alpha(T(0, \tau) - T_{\text{возд}}) = -\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} \quad (1.10)$$

Решение для ГУ III рода при $q_v = q_{v0} \cdot \tau^{1/2n}$, полученное операционным методом, имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
\theta = & \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} - e^{\alpha \cdot x - \alpha^2 \cdot a \cdot \tau} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} + \alpha \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \right) + \frac{w_0 \cdot \tau^{1+\frac{1}{2} \cdot n}}{c \cdot \gamma \cdot (T_c - T_0) \cdot \left(1 + \frac{1}{2} n\right)} + \\
& + \frac{w_0 \cdot \Gamma \left(1 + \frac{1}{2} \cdot n\right)}{c \cdot \gamma \cdot (T_c - T_0) \cdot a^{1/2n} \cdot (-\alpha)^{n+2}} \times \\
& \times \left[e^{\alpha \cdot x + \alpha^2 \cdot a \cdot \tau} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} + \alpha \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \right) - \sum_{m=0}^{n+2} (-2\alpha \cdot \sqrt{a \cdot \tau})^m \cdot i^n \cdot \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a \cdot \tau}} \right]
\end{aligned} \tag{1.11}$$

где $\theta = \frac{T(x, \tau) - T_0}{T_c - T_0}$, T_c – температура окружающей среды, T_0 – начальная температура материала, $T(x, \tau)$ – текущая начальная температура.

Подобные модели были сформулированы для тел других форм и получены соответствующие решения. Так, решение для шара при $q_v = const$, позволяющее найти локальные температуры, ГУ III рода:

$$\begin{aligned}
\theta = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = & 1 + \frac{1}{6} Po \left(1 + \frac{2}{Bi} - \frac{r^2}{R^2} \right) - \\
& - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po}{\mu_n^2} \right) A_n \frac{R \sin \mu_n \frac{r}{R}}{r \cdot \mu_n} \exp(-\mu_n^2 Fo)
\end{aligned} \tag{1.12}$$

где $Po = \frac{q_v R^3}{\lambda(T_c - T_0)}$ – критерий Померанцева.

Для локальных температур неограниченной пластины при $q_v = const$, ГУ III рода получено следующее решение:

$$\begin{aligned}
\theta = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = & 1 + \frac{1}{2} Po \left(1 + \frac{2}{Bi} - \frac{x^2}{R^2} \right) - \\
& - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po}{\mu_n^2} \right) A_n \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 Fo)
\end{aligned} \tag{1.13}$$

Для локальных температур неограниченного цилиндра при $q_v = const$, ГУ III рода получено следующее решение:

$$\theta = \frac{T(r, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = 1 + \frac{1}{4} Po \left(1 + \frac{2}{Bi} - \frac{r^2}{R^2} \right) - \sum_{n=1}^{\infty} \left(1 + \frac{Po}{\mu_n^2} \right) A_n J_0 \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \exp \left(-\mu_n^2 Fo \right) \quad (1.14)$$

Приведенные решения получены из дифференциальных уравнений параболического типа. Кроме того, все решения ограничиваются условиями $T_c - T_0$ [11], что при микроволновом нагреве практически никогда не реализуется. Как отмечено в [9], конкретному виду изотермической поверхности соответствует определенный дифференциальный оператор теплопроводности, среди которых оператор параболического типа является частным случаем.

При существенной зависимости теплофизических и электрофизических свойств от температуры аналитические методы решения оказываются неэффективными. В этом случае решения получают с помощью численных методов: [32], конечных элементов, конечных объемов, метод Монте Карло [33]. При использовании численных методов необходимо разработать дискретное представление математической модели, что само по себе вносит погрешность в получаемые результаты. Недостатки численных методов состоят в том, что в их основе заложена погрешность, связанная с заменой исходных уравнений на аппроксимирующие, т.е. возникает погрешность вычислительного алгоритма, а также то, что их проведение трудоемко [17].

1.1.3. Влияние процессов релаксации на перенос интенсивных потоков теплоты. Учет влияния процессов релаксации на перенос тепла в условиях воздействия интенсивных тепловых потоков является проблемой феноменологической теории высокотемпературной теплопроводности твердых тел [34]. В связи с переходом в нано- и пикосекундный диапазоны длительности импульсного воздействия при

электронной и лазерной обработке и при работе в радиочастотном диапазоне следования импульсов, к примеру, микроволнового диапазона, поиск решения этой проблемы стал более актуальным [35, 36, 37].

В металлических кристаллах, при пренебрежении величиной электронной релаксации [38], выделяются два экспериментально наблюдаемых релаксационных процесса. Первый связан с конечным временем $\tau_d \sim D/l_d^2$ (D – коэффициент диффузии, l_d – расстояние между источниками (стоками) термически активируемых дефектов) установления равновесной концентрации n_d^e термически активируемых дефектов (вакансий, активируемых комплексов), второй – со временем образования и рассасывания температурных флуктуаций. Так как эти процессы удовлетворяют предельным соотношениям $\tau_d \gg \tau_T$ и $\tau \ll \tau_T$ ($\tau_T \sim a/l^2$ – масштаб гидродинамической шкалы, на которой протекает тепловой процесс, l – геометрический размер системы, $a = \lambda/C_p\rho$ – коэффициент температуропроводности), то способ их описания оказывается различным. Влияние кинетики установления n_d^e на величину высокотемпературной теплоемкости C_p подробно изучено и представлено в литературе [39, 40]. Связь между двумя явлениями – теплопроводностью и быстрым релаксационным процессом с характерным временем – можно установить, рассматривая их как единый флуктуационно-диссипативный процесс [41]. Однако в твердых телах переход к количественному описанию такого процесса с использованием связан с известными трудностями [42]. Анализ влияния процесса релаксации на теплопроводность удобно проводить с использованием коэффициента затухания колебаний температуры. параметром, чувствительным к изменению времени релаксации, является не сам коэффициент затухания, а его производная по времени релаксации. Полученные релаксационные выражения [38] для теплового потока имеют ограничения, связанные с невозможностью одновременного использования для описания теплового процесса крупномасштабной и мелкомасштабной

временных шкал. Само уравнение непрерывности, как закон сохранения, выдерживает отнюдь не любую зависимость потока от времени.

Основной параметр гиперболического уравнения теплопроводности – время релаксации τ_r . Его влияние сказывается при определенных условиях нагрева. Это время оценивалось для различных типов материалов, и было найдено, что его значение лежит в пределах от 10^{-10} сек для газов, до 10^{-14} сек для металлов [43,44].

В [45] представлена зависимость, позволяющая рассчитать значение времени релаксации через термомеханические параметры среды:

$$\tau_0 = \frac{\lambda \cdot \rho \left[\rho \cdot c_v (k + 4 \cdot G/3) - \alpha_v^2 \cdot k^2 \cdot T_0 \right]}{\rho \cdot c_v (k + 4 \cdot G/3) + \alpha_v^2 \cdot k^2 \cdot T_0}, \quad (1.15)$$

где α_v – объемный коэффициент теплового расширения, k – изотермический модуль объемного сжатия, G – модуль сдвига.

Для глинистых материалов в [46] приведены графики зависимости времени релаксации от состава минералов.

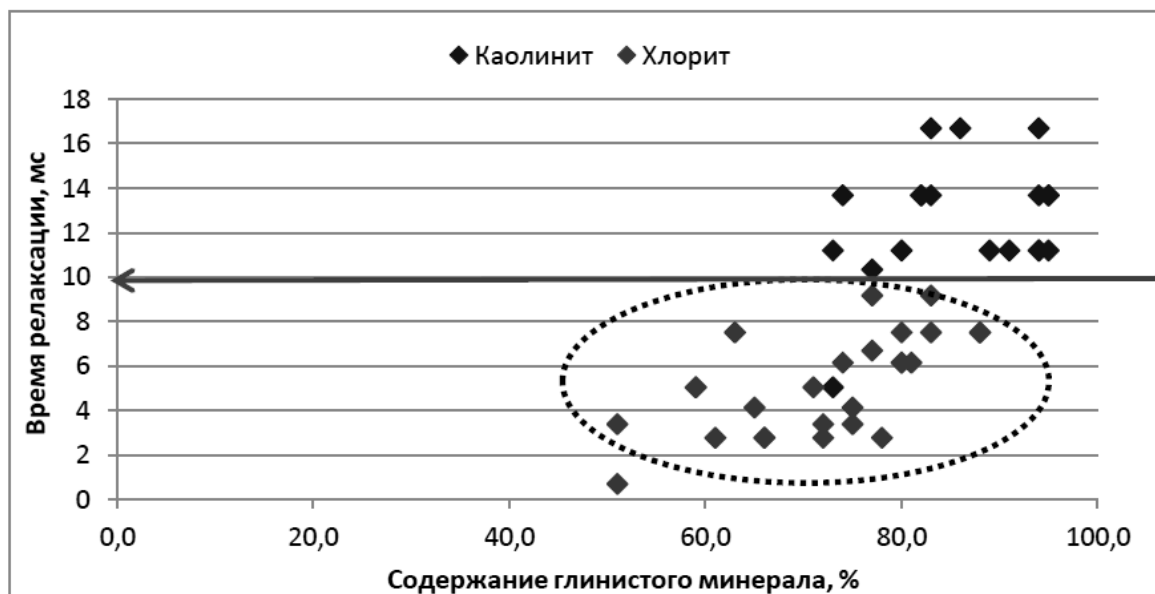


Рис. 1.1. Зависимость времени релаксации от содержания глинистых минералов [46]

Для исследованных образцов с преобладанием каолинита времена релаксации составляют 10-18 мс, с преобладанием хлорита – 2-10 мс. Время релаксации в окрестности 10 мс, характеризуется границей, разделяющим каолинитовую составляющую глинистой фракции от хлоритовой.

В работе [43, 47] предложено оценивать время релаксации по следующему соотношению:

$$\tau_r = 3a_r / x_p^2 \quad (1.16)$$

где x_p – скорость звука в твердом теле, a_r – коэффициент температуропроводности при высокоинтенсивном нагреве.

В табл. 1.1 приведены значения времени релаксации τ_r для различных материалов. Здесь ПММА – полиметилметакрилат.

Таблица 1.1

Значения времени релаксации τ_r для различных материалов

Материал	τ_r , с	Материал	τ_r , с	Материал	τ_r , с	Материал	τ_r , с
Медь	10^{-14} [48]	ПММА	10^{-11} [43]	Азот	10^{-9} [49]	Алюминий	10^{-11} [49]

1.2. Распространение теплоты в дисперсных системах

Дисперсными называют системы "газ-твердые частицы", "жидкость-твердые частицы". Их важнейшей характеристикой является объемная концентрация частиц $\beta = \frac{V_r}{V_r + V_T}$, представляющая собой отношение объемов частиц и всей системы. В зависимости от объемной концентрации дисперсные системы разделяют на следующие классы [49]:

- слабозапыленный поток : $0 < \beta \leq 4 \cdot 10^{-4}$;
- газовзвесь: $4 \cdot 10^{-4} \leq \beta \leq 2 \cdot 10^{-2}$;
- флюидный поток: $2 \cdot 10^{-2} \leq \beta \leq 3.5 \cdot 10^{-2}$;

– падающий слой, псевдожиженный (кипящий) слой:

$$3.5 \cdot 10^{-2} \leq \beta \leq 5 \cdot 10^{-1};$$

– плотный слой движущийся, неподвижный: $5 \cdot 10^{-1} \leq \beta \leq 7.4 \cdot 10^{-1}$.

В рамках данной работы при исследовании дисперсных систем рассматривается плотный неподвижный слой частиц материала, применяемого при изготовлении технической керамики. Термическая обработка подобных систем привела к необходимости изучения различного рода локально-неравновесных систем и процессов переноса (энергии, массы, импульса или их аналогов) в них [51]. Экспериментальные исследования эффектов локальной неравновесности в дисперсных системах [52-55] показали, что время релаксации системы к локальному равновесию сравнимо с характерным временем самого процесса.

Основные модели структурированных дисперсных систем представлены в [56, 57].

Для рассматриваемых дисперсных систем, размеры частиц которых намного меньше размеров самой системы, можно применять зависимости для плотных сред, введя при этом эффективные значения для коэффициентов теплопроводности $\lambda_{эф}$ и температуропроводности, $a_{эф}$, характеризующие слой как квазигомогенную среду. Полученные на основе обработки экспериментальных данных зависимости можно чисто условно разделить на три группы: зависимости, применимые при давлении, близком к атмосферному, при низких и умеренных температурах; зависимости, учитывающие изменение теплопроводности газа от давления и поэтому используемые для расчета эффективной теплопроводности материалов в разреженной среде; и зависимости, учитывающие лучистую теплопередачу и используемые при расчете эффективной теплопроводности при повышенных температурах [58].

При умеренных (до 400 °С) температурах эффективный коэффициент теплопроводности может быть определен из формулы [50]:

$$\lambda_{\text{эф}} = 3\pi\lambda_z \lg \frac{0.74 - 0.31\beta}{0.74 - \beta}, \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}, \quad (1.17)$$

Эффективный коэффициент температуропроводности:

$$a_{\text{эф}} = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\rho_m(1 - \varepsilon)c_m} \quad (1.18)$$

Несмотря на многочисленные попытки получить расчетные формулы для определения эффективной теплопроводности дисперсных и капиллярно-пористых систем в широком диапазоне изменения температур и давления газа-наполнителя, эта задача полностью еще не решена.

1.3. Применение микроволнового нагрева для высокотемпературной обработки материалов

Нагрев в микроволновом поле для высокотемпературной обработки материалов эффективен в различных областях техники [59-64]. Под высокими температурами понимаются такие, при которых активируются процессы диффузионной подвижности в твердых телах [65]. Методы микроволнового нагрева в настоящее время представляют значительный интерес для научных исследований, с перспективой технологического освоения в ближайшем будущем [66]. Потенциал высокотемпературной микроволновой обработки продемонстрирован в таких областях, как спекание и соединение керамических материалов [67], неорганический синтез [68], создание композиционных [69] и функционально-градиентных [70] материалов, порошковая металлургия [71], переработка промышленных и радиоактивных отходов [72], отжиг имплантированных полупроводниковых структур [73].

Важное преимущество микроволнового нагрева обусловлено объемным поглощением микроволновой энергии в большинстве неметаллических материалов. При поглощении микроволновой энергии во всем объеме изделия отсутствует необходимость в передаче тепла за счет теплопроводности, как это происходит при нагреве лучевыми или конвективными потоками тепла в традиционных печах. Кроме того, мощность микроволнового источника может практически полностью использоваться на нагрев только обрабатываемого изделия, без необходимости нагревать массивные конструкции традиционных печей. Поэтому скорость нагрева микроволновым излучением может быть существенно выше, и это является одним из наиболее важных факторов во многих технологических процессах [19].

Высокие скорости нагрева обуславливают не только существенную экономию энергии и сокращение времени процессов, но, что зачастую более важно при создании высококачественных материалов, позволяют получать изделия с более мелкодисперсной и бездефектной микроструктурой и, как следствие, улучшенными функциональными свойствами [64, 65].

В то же время значительная часть наблюдаемых отличий в характере протекания процессов при микроволновом и традиционном нагреве (так называемых "микроволновых эффектов") не может быть объяснена различиями в характере тепловыделения. К таким эффектам относятся изменение энергии активации самодиффузии атомов при микроволновом нагреве [74], ориентационная зависимость коэффициента диффузии при нагреве в поляризованном микроволновом поле [75], изменение температуры фазовых превращений в твердой фазе [76] и многие другие. Эти эффекты имеют более фундаментальную природу и связаны с преобразованием энергии микроволнового электромагнитного поля не только в энергию равновесного теплового движения, но и в иные формы, то есть с так называемым нетепловым воздействием поля на вещество [65].

Первые исследования по применению микроволнового излучения для высокотемпературной обработки материалов относятся к концу 60-х - началу 70-х гг. [77, 78]. Интерес к микроволновой обработке материалов значительно возрос во второй половине 80-х гг., что связано с новыми технологиями производства магнетронов и соответствующим значительным сокращением их стоимости [79]. К концу 80-х гг. была экспериментально продемонстрирована возможность микроволнового спекания оксидных керамических материалов [80]. Было установлено, что микроволновое спекание обладает специфическими свойствами, имеющими потенциально важное технологическое значение [81-85].

Функционально-градиентные материалы (ФГМ) как новый класс материалов, для которых характерно плавное изменение механических свойств или химического состава по глубине от поверхности, находят широкое применение в различных устройствах с большими термомеханическими нагрузками.

Возникновение ФГМ связано с развитием космической отрасли, когда определилась необходимость исследования новых материалов с непрерывно-неоднородными свойствами и обусловлено поиском альтернативы однородным покрытиям аэрокосмических аппаратов, подвергающихся воздействию высоких температур. Благодаря своим особенностям, эти материалы имеют более высокую степень устойчивости к износу и растрескиванию при воздействии скользящего контакта [86]. Такие материалы с градиентными и уникальными физико-механическими свойствами находят свое применение в машиностроении, микроэлектронике, биомеханике, энергетике, в аэрокосмической и транспортной промышленности.

Применение ФГМ дает возможность значительно улучшить срок службы и надежность теплозащитных покрытий газовых турбин [87]. Детали, выполненные с применением ФГМ, более долговечны, чем керамические. Разрушение структуры и материала деталей машин в основном наблюдается

вблизи поверхностей и обусловлено возникновением концентрации напряжений при воздействии внешних нагрузок. Применение специальных покрытий на основе ФГМ позволяет существенно уменьшить износ и усталость деталей машин. В настоящее время в качестве основы для изготовления ФГМ применяют среднеуглеродистые легированные высокопрочные стали, алюминиевые и титановые сплавы, керамику.

В настоящее время для производства ФГМ применяют ряд методов: спекание в печи, индукционный нагрев, нагрев в электромагнитном поле микроволнового и миллиметрового диапазона. Применение методов высокоэнергетического воздействия и их комбинирование с традиционными технологиями термической обработки позволяет сформировать градиентную структуру материалов, обеспечивающую повышенный уровень рабочих свойств деталей, которые в наибольшей степени отвечают условиям их эксплуатации. Однако дальнейшее улучшение их прочностных свойств и, соответственно, увеличение ресурса работы деталей на их основе тормозится рядом недостатков традиционных технологий термической обработки [88].

Микроволновое поглощение в композиционно градиентных материалах приводит к неоднородному выделению тепла. Композиционная избирательность микроволнового нагрева позволяет создавать распределения температуры, способствующие уменьшению термических напряжений. Эффективность получения таких материалов зависит от знания точных законов распределения неоднородности [89]. В настоящее время получение ФГМ при использовании микроволнового нагрева (МВН) находятся на ранней стадии. Однако целесообразность применения МВН продемонстрирована для многих практически важных металлокерамических композиций [19, 90, 91]. В работе [92] уделяется особое внимание термодиффузионному механизму ускорения массопереноса в керамике и порошковых компактах при воздействии мощных ВЧ и МВ-полей. Утверждается, что на границах раздела фаз с разным уровнем диэлектрических потерь возникают локальные градиенты температуры,

которые обуславливают появление термодиффузионных потоков, стимулирующих твердофазные реакции.

1.4. Применение микроволнового нагрева для получения керамических изделий

1.4.1. Основные понятия технической керамики. Под понятием технической керамики понимаются изделия из поликристаллических материалов, состоящих из соединений неметаллов III–VI групп периодической системы с металлами или друг с другом и получаемые путем формования и обжига соответствующего исходного сырья. Техническая керамика объединяет материалы, применяемые в различных областях современной техники, которые можно разделить на следующие группы: конструкционная керамика, инструментальная керамика, электрорадиотехническая керамика, керамика с особыми свойствами [93]. Исходным сырьем являются как природные материалы (силикаты, глины, кварц и др.), так и получаемые искусственно (чистые оксиды, карбиды, нитриды и др.) Техническая керамика – это сравнительно новый вид материалов, однако темпы роста ее выпуска (от 15 до 25% ежегодно) намного превышают соответствующие показатели для стали, алюминия и других металлов. В настоящее время основными производителями керамики являются США и Япония (38 и 48% соответственно). США доминируют в области конструкционной керамики, предназначенной в первую очередь для металлообрабатывающих целей. В Японии наряду с производством конструкционной керамики, динамично развивается сфера функциональной керамики (основного компонента электронных устройств) [94].

Стандартные керамические материалы разделены на три группы:

- 1) Силикатная Керамика
- 2) Оксидная керамика
- 3) Неоксидная керамика

Силикатная керамика – общее название группы материалов, более известная как "алюмо-алюмосиликатный фарфор". К этой группе принадлежит: технический фарфор, стеатит, кордиерит и керамический муллит. Природными исходными материалами для технического фарфора являются кварц, полевой шпат и каолин. Технические фарфоры включают кварцевый и глиноземный фарфор. Первый изготовлен на основе кварца, который имеет много недостатков, такие как низкий предел прочности при длительном времени воздействия. В глиноземном фарфоре заменен кварц на дешевый глинозем (Al_2O_3). Благодаря этому была достигнута более высокая теплостойкость. Кварцевый фарфор использует особенно в диапазоне низкого напряжения и глиноземный фарфор – для изоляторов воздушных линий произвольной нагрузки.

Неоксидная керамика – керамические материалы на основе азота или углерода. В отличие от оксидной керамики, не содержит кислород. Одним из наиболее важных материалов является карбид кремния.

Керамика характеризуется очень высокой твердостью, полупроводниковыми свойствами, очень высокой теплопроводностью, отличной механической устойчивостью к воздействию температур и очень высокой прочностью. Также неоксидная керамика характеризуется высокой коррозионной стойкостью.

В [95] установлено, что отбор зерен определенного крупного размера производственного карбида кремния (фракц. 400-200 мкм), технического карбида кремния (фракц. 200-100 мкм) и лейкоксенового концентрата (фракц. 250-80 мкм) позволяет повысить радиопоглощающую способность и максимальную рабочую температуру полученных керамических композитов на их основе в микроволновом поле на частоте 2450 МГц с 1200°C до 1400°C и уменьшить время ее достижение до ~ 20 минут. Из перечисленных выше материалов самым радиопоглощающим оказался технический карбид кремния, что объясняется его химическим составом и структурой зерна

1.4.2. Методы получения технической керамики с использованием интенсивной высокотемпературной обработки. Необходимость получения новых материалов со свойствами, которые еще лет 20 назад даже не прогнозировались, открывает качественно новые перспективы для развития производства технической керамики, область применения которой очень широка: от производства компьютерных чипов для атомных электростанций до покрытий космических челноков. Из-за низкой скорости нагрева и высокой опасности повреждения материала это производство получается очень дорогостоящим. Этот процесс можно ускорить с помощью комбинированного применения обычного конвективного нагрева и микроволнового.

Скорость обычного выжигания и спекания ограничивается в основном свойствами материалов. Материалы с низким коэффициентом теплопроводности, такие как керамика, очень сложно нагревать. В этом случае передача теплоты от поверхности к внутренним слоям затруднена, скорость нагрева зависит от коэффициента температуропроводности. Этим свойством определяются градиенты температур в теле, которые могут привести к разрушению образца.

Применение микроволнового нагрева при производстве керамики является одним из путей интенсификации процесса. Благодаря объемному характеру нагрева появляется возможность существенно ускорить процесс и при этом снизить его стоимость.

Там, где соединение частиц порошка без связующего невозможно, используются связующие вещества. Удаление этих веществ представляет собой процесс, в котором связующее вещество испаряется постепенно и / или разлагаются.

В качестве связующего вещества, как правило, используется смесь двух или более веществ [96]. Эта смесь испаряется или разлагается во время выжигания при различных температурах. На первом этапе до 98% связующего вещества испаряется при общей низкой температуре. Это

связующее вещество должно составлять не менее 30% от общей связующей смеси [97].

Общее количество связующего вещества зависит от материала и назначения изделия [97]. Иногда количество этого связующего достигает двух третей от общего количества.

Чтобы ускорить процесс, можно использовать пары какого-либо растворителя или подбирать параметры окружающей среды, такие как давление и температура.

Важно, чтобы связующее имело более низкую температуру испарения, чем основной материал. Только если это условие выполнено, можно успешно осуществлять процесс удаления связующего вещества [97].

В табл.1.2 приведены наиболее распространенные связующие вещества.

Таблица 1.2

Наиболее распространенные связующие, применяемые при производстве керамики

Органические связующие	Полимеры
Парафин	Полипропилен
Арахисовое масло	Полиэтилен
Полиэтиленгликоль	Полиацетат
Ацетанилид	Метилцеллюлоза
Аммоний лигносульфонат	Поливиниловый спирт
Карнаубский воск	Полистирол

В качестве связующего используется, главным образом, смеси воды, полимеров, восков или масел. Особенно пригодны в качестве связующего вещества полимеры, имеющие в своем составе атом кислорода. В этом случае цепь полимера разрывается при более высоких температурах очень легко. Поэтому важно, что бы кроме полимера или воска, которые испаряется при более высоких температурах, добавлять также другие химические

вещества с более низкой температурой кипения, как, например, бензол или толуол [98]. Тогда частицы материала после испарения растворителя равномерно соединяются со связующим покрытием [98].

1.4.3. Эффекты микроволновой обработки керамики. Одна из самых развитых областей применения микроволнового излучения – получение керамических материалов [99]. Отмечается, что высокая скорость нагрева в микроволновом поле позволяет получать керамические и композиционные материалы с тонкой и однородной микроструктурой, имеющих, как следствие, повышенную прочность, твердость, трещиностойкость [100]. В работе предложен термодиффузионный механизм ускорения массопереноса в керамике и порошковых компактах при воздействии мощных ВЧ и СВЧ-полей. Утверждается, что на границах раздела фаз с разным уровнем диэлектрических потерь возникают локальные градиенты температуры, которые обуславливают появление термодиффузионных потоков, стимулирующих твердофазные реакции. В настоящее время отмечается интерес к применению МВ нагрева, совместного с конвективным методом. Такая термообработка получила название гибридной [19]. Экспериментальные исследования микроволновой и гибридной термообработки [19] оксидных и неоксидных материалов показали, что структура готового керамического изделия отличается однородностью, поверхность остается цельной, в то время как при электрическом обжиге с тем же темпом нагрева поверхность была покрыта трещинами, а само изделие деформировалось. На рис. 1.2 представлена схема распределения температуры при конвективном, микроволновом и гибридном подводе теплоты [101].

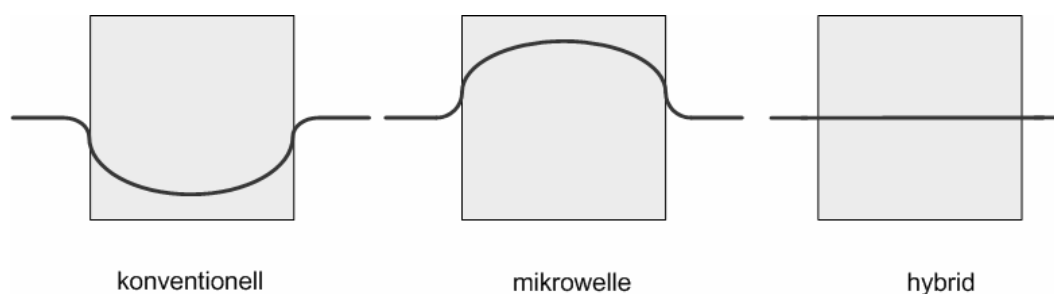


Рис. 1.2. Профили температур в материале при различных способах нагрева [102]

Сравнение гибридного нагрева с электрическим при различном составе материала для производства керамики показало, что энергозатраты снижаются на 30-50%. Также может быть в два раза снижена продолжительность обжига.

В [103] отмечается, что низкое значение числа Био для Al_2O_3 приводит к равномерности распределения температур по толщине, однако большие изменения в абсорбируемой мощности в образцах SiC приводят к отклонениям порядка $30\text{ }^\circ\text{C}$ по температуре на толщине 5 см и около $50\text{ }^\circ\text{C}$ на толщине 10 см. При толщине 12 см в образце расчетным путем были обнаружены резонансные явления, которые проявлялись в возникновении стоячей волны.

Сопоставление многочисленных экспериментальных данных позволяет высказать предположение о том, что влияние микроволновой обработки на процессы усадки и роста зерен при спекании сильнее проявляется в веществах, обладающих ионной проводимостью, чем в диэлектриках, что объясняется интенсификацией диффузионных процессов за счет возбуждения микроволновым полем ионных токов в обрабатываемых веществах с ионной проводимостью [103]. При применении МВ нагрева, как правило, существуют два температурных фронта. С неоднородными материалами проблемы могут возникнуть при слишком высокой мощности МВ. В этом случае может случиться так, что некоторые участки внутри материалов разогреваются быстрее, чем внешние слои. Если поры, через

которые выходят пары связывающего материала, не будут открыты, то увеличение давления внутри образца приводит к развитию механических нагрузок. В конечном счете, это может привести к образованию трещин и разрушению образца. Но то же самое может произойти, когда в открытых порах скоростной напор достигает больших значений.

В процессах спекания с использованием СВ энергии многие факторы играют важную роль. Особенно важно знать свойства материала, чтобы оценить часть микроволновой энергии, затрачиваемой на тепло. Удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности и диэлектрическая проницаемость должны быть известны до начала анализа процесса. Для микроволнового нагрева особенно важна диэлектрическая проницаемость, поскольку от нее зависит, насколько хорошо микроволновая энергия преобразуется в тепло. Кроме того, необходимы свойства связующего вещества, такие как: температура испарения, энтальпия удельная теплоемкость.

Такие материалы, как Al_2O_3 , которые прозрачны для микроволн до $1000\text{ }^\circ\text{C}$, хорошо подходят для комбинированных процессов [104]. При более низких (до $1000\text{ }^\circ\text{C}$) температурах образцы могут быть нагреты газом или с использованием электронагрева, пока они не достигнут температуры, при которой они не начнут воспринимать энергию микроволнового поля. После этого образцы можно нагревать в микроволновой печи.

Удаление связующего считается наиболее сложной частью процесса вследствие того, что очень часто возникают механические напряжения. В необожженной прессовке механические напряжения возникают вследствие больших градиентов температур, или при росте давления газа в материале.

Спекание представляет собой теплотехнический процесс, при котором материал достаточно уплотняется. В случае однофазного порошка, температура спекания составляет от $3/2$ до $5/4$ температуры его плавления [105]. Для многофазных смесей температура близка или чуть выше температуры плавления самой низкой фазы. Процесс спекания состоит из

трех этапов, в которых растут зерна, уменьшаются поры и уплотняется материал. При этом всегда наблюдается усадка связываемого материала.

Свойства материала, которые он приобретает в результате спекания, в сущности, зависят от скорости нагрева, времени выдержки, состава и давления.

Технологический процесс спекания в микроволновом поле существенно отличается от классического конвективного. При комбинированном МВ нагреве тепло проходит с поверхности вглубь образца и одновременно генерируется внутри материалов, благодаря чему длительность процесса может быть значительно снижена. Сокращение времени может составлять для некоторых материалов до 80% [106], или, как в ЦТС керамике (пьезокерамике), сокращена в 15-20 раз [107].

Другой важный аспект микроволнового спекания. Некоторые авторы сообщают, что зерна спеченных образцов меньше по сравнению с зернами образцов, получаемых при применении классических методов [108, 109]. Отмечается положительное влияние микроволнового спекания на механические свойства материалов, как в случае оксида циркония [108] и в ЦТС керамике [110].

1.5. Влияние явлений теплопроводности на равномерность обработки материалов в микроволновом поле

При нагреве в микроволновом поле материалов с низким значением теплопроводности возникают локальные перегревы и образуются "горячие точки" (hot spot), поскольку выделившаяся теплота не успевает равномерно распределиться по объему обрабатываемого вещества. Эти явления усиливаются вследствие того, что поглощающая способность большинства диэлектрических материалов возрастает с ростом температур. Отмечается, что горячие точки возникают в средах, в которых распространение тепловых волн, возникающих при объемном нагреве в микроволновом поле,

затруднено [111]. Для равномерного нагрева вещества микроволновым излучением необходимо, чтобы данное вещество обладало достаточно высокой теплопроводностью, или снижать интенсивность микроволнового нагрева. Распределение модуля напряженности электрического поля по толщине материала на частоте 2,45 ГГц носит осциллирующий характер [112]. Количественная оценка температурной неравномерности проведена в работах [113-115].

Толщина образцов при микроволновой обработке не должна превышать удвоенной глубины проникновения [116], за которую принимается толщина, на которой мощность внутренних источников теплоты уменьшается в e раз.

Изучение внешнего тепломассобмена с помощью теоретических методов сложен и заставляет использовать для этого экспериментальные данные.

1.6. Специфика нагрева материалов в микроволновом электромагнитном поле

1.6.1. Диэлектрические характеристики материалов и виды диэлектрических потерь. Способность диэлектрика поглощать энергию электромагнитного поля характеризует тангенс угла диэлектрических потерь $tg\delta$. В случае, если потерь в диэлектрике нет, ток в емкостной цепи опережает напряжение на угол 90° . Наличие потерь приводит к сдвигу фазы между током и напряжением, причем угол между ними становится меньше 90° на величину δ [117]. Вещества, которые можно нагревать при помощи микроволнового излучения, должны обладать либо высоким значением $tg\delta$ (то есть в их структуре должны содержаться подвижные диполи с достаточно большим дипольным моментом), либо высокой электронной, дырочной или ионной проводимостью. Существует

некий оптимальный диапазон значений $tg\delta$, определяющий поглощающую способность вещества, поскольку увеличение $tg\delta$ влечет за собой уменьшение глубины проникновения микроволнового поля в образец [118]. Из этого следует важный вывод: чем лучше вещество способно преобразовывать электромагнитную энергию, тем меньше равномерность нагрева образца по толщине слоя.

При взаимодействии микроволнового поля с диэлектриком следует учитывать два основных вида диэлектрических потерь: потери на электропроводность и релаксационные потери [117]. Потери на электропроводность характерны для диэлектриков с низким удельным объемным сопротивлением. Релаксационные потери обусловлены поворотом полярных молекул в направлении силовых линий электрического поля. Ориентация поля меняется на противоположную дважды за период, следовательно, чем выше частота, тем интенсивнее энергия электромагнитного поля превращается в тепло [119]. Рост потерь будет наблюдаться до определенной частоты. Когда частота превысит значения, при котором молекулы из-за своей инерции перестанут успевать полностью развернуться в течение одного полупериода, будет наблюдаться снижение потерь с ростом частоты до тех пор, пока не появятся другие механизмы возникновения потерь.

Эффект взаимодействия материала с микроволновым полем определяется диэлектрической проницаемостью. Одним из наиболее важных факторов МВ нагрева является комплексная диэлектрическая проницаемость [119]:

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j \cdot \varepsilon'' \quad (1.19)$$

где ε' и ε'' – действительная и мнимая части комплексной диэлектрической проницаемости.

Действительная часть описывает способность накопления энергии материала, а мнимая часть - потери энергии в материале [120]. Мнимую

часть комплексной диэлектрической проницаемости называют коэффициентом диэлектрических потерь. Материалы с большой мнимой частью поглощают большую часть электромагнитной энергии и быстро нагреваются. Материалы с $10^{-2} < \epsilon' < 3$ в основном используются для микроволнового нагрева.

Относительный коэффициент потерь, также – также изменение угла потерь зависят от температуры. Этот эффект можно наблюдать на окиси алюминия Al_2O_3 . В нижнем диапазоне температур этот материал является СВЧ-прозрачным, т.е. угол потерь является небольшим, а для температур выше $1000\text{ }^\circ\text{C}$ микроволновое излучение интенсивно поглощается ($\text{tg}\delta$ большой). Диэлектрическая проницаемость зависит от частоты электромагнитного поля. На рис. 1.3 схематично представлена эта зависимость.

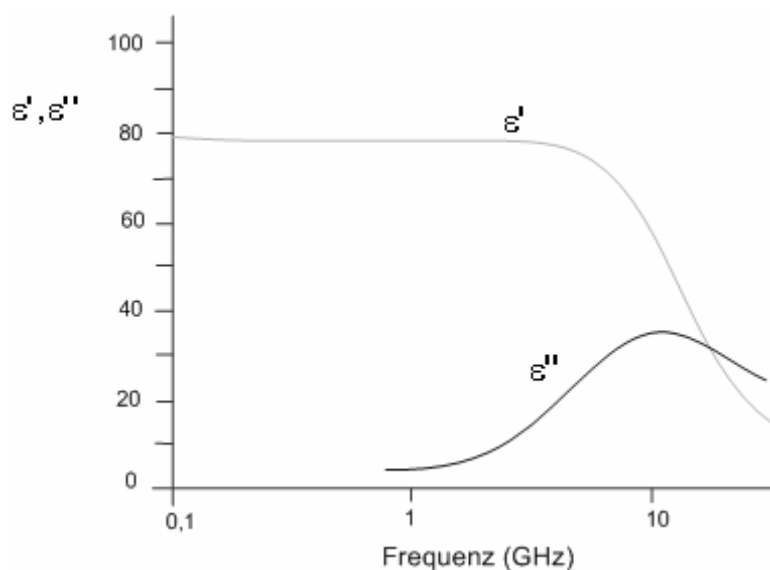


Рис. 1.3. Зависимость ϵ' и ϵ'' от частоты электромагнитного поля [18]

Проводящие материалы из-за своей внутренней структуры и свободных электронов, которые находятся в материале, очень мало восприимчивы к микроволновому излучению [121]. Поэтому такие материалы, как алюминий или нержавеющая сталь, часто используется в качестве корпуса для СВЧ аппликаторов, поскольку MW-волны почти полностью отражаются. Именно

диэлектрические материалы находят применение для микроволнового нагрева. Ниже приведены некоторые примеры материалов, составляющих основу керамики, в которых микроволновые термические процессы могут найти или находят промышленное применение (рис. 1.4).

Распределение модуля напряженности электрического поля по толщине материала на частоте 2,45 ГГц носит осциллирующий характер [112]. Напряженность электрического поля зависит от мощности электромагнитного поля, которая затухает вследствие поглощения по глубине слоя, и от длины волны, которая определяется диэлектрическими свойствами среды [112].

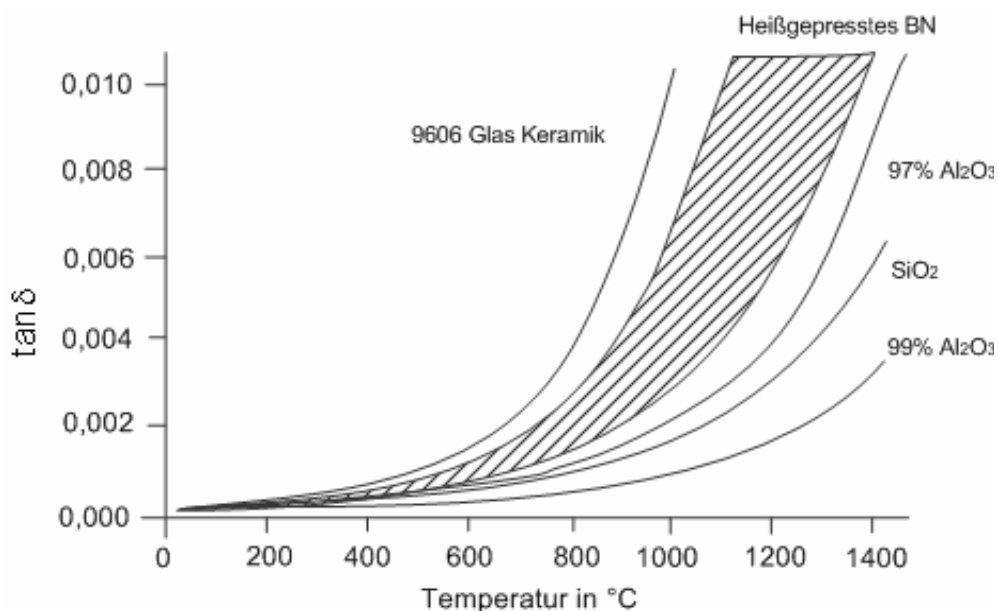


Рис. 1.4. Зависимость коэффициента потерь от температуры для ряда материалов [122]

1.6.2. Тепловой пробой. Часто при микроволновом нагревании возникает явление теплового пробоя, которое в английском языке называется "Thermal Runaway" или "Hot Spot". Это происходит чаще всего при большой мощности энергии микроволнового поля и также наблюдается при изготовлении керамических изделий. При тепловом пробое температура очень быстро и неконтролируемо повышается в локальных областях и

достигаются очень высокие уровни [123]. Теоретически, плотность источника тепла P пропорциональна $\omega \varepsilon'' \cdot E^2$, а теплоотдача пропорциональна $\lambda \cdot \Delta t$. При определенной температуре T_k , которая также называется температурой Кюри (рис. 1.5), коэффициент потерь начинает нелинейно расти с температурой. Для материала с такой характеристикой вполне возможно, что в зоне повышенной температуры разность между источником теплоты и отводимой теплотой больше, чем за пределами этой зоны. Эта область оказывается перегретой. Данное явление может привести к разрушению материала.

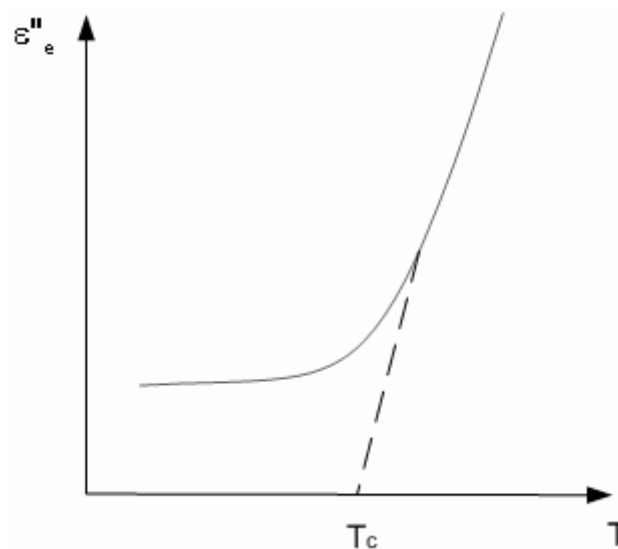


Рис. 1.5. Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры [122]

1.6.3. Оценка однородности температурного поля при нагреве материала в микроволновом поле. При микроволновой обработке материалов необходимо сведение к минимуму колебаний температуры и результирующих напряжений. На практике это реализовать трудно, особенно при производстве крупных деталей. Одна из основных проблем также вызвана различными диэлектрическими характеристиками материалов, так и различными глубинами проникновения.

Керамика на основе оксида алюминия благодаря уникальному сочетанию физико-механических свойств имеет широкий спектр применения. Преимуществами использования данного материала в технике

являются высокие показатели твердости, износостойкости, диэлектрических свойств, способность к эксплуатации в условиях воздействия высоких температур и коррозионно-активных сред [124].

В табл. 1.3 представлены значения глубины проникновения некоторых веществ. Видно, что, к примеру, оксид алюминия при низких температурах имеет глубину проникновения 660 см, т.е. он почти прозрачен для микроволнового поля, в то время как кремний поглощает падающее СВ поле на глубине нескольких миллиметров.

Таблица 1.3

Диэлектрические характеристики и глубина проникновения некоторых материалов [124-126]

Материал	t, °C	ϵ'	$\tan\delta$	Δ
Вода	25	76,7	0,157	1,4
Вода	85	56,6	0,0547	4,7
Лед	-12	3,2	0,0009	121
Al ₂ O ₃	25	8,8	0,0088	660
Тефлон	22	2,1	0,000315	9000
SiC	20	30	0,36	0,98

Примеры применения оксидалюминиевой (Al₂O₃) высококачественной керамики включают сверхпрочные инструменты для обработки металлов давлением, подложки и сердечники резисторов в электронной промышленности, плитки для защиты от износа и огнестрельного оружия, нитенаправители в текстильной промышленности, уплотнения и диски регуляторов в водопроводных кранах и клапанах, теплопоглотители в системах освещения, защитные чехлы в термических процессах или носители катализаторов в химической промышленности [124].

Анализ опубликованных результатов позволяет выделить следующие наблюдаемые в большинстве сравнительных исследований отличия твердофазного спекания керамики в условиях микроволнового нагрева:

заметное снижение температуры (на 50-100 °С) на промежуточной стадии спекания. По мере приближения к максимальной плотности спекаемого материала (при относительных плотностях порядка 0,9-0,95) значения температур ее достижения при микроволновом и традиционном нагреве, как правило, сравниваются.

Снижение характерных температур уплотнения по сравнению с температурой при традиционном спекании наиболее существенно в материалах с высоким коэффициентом поглощения [127].

Установлен факт уменьшения времени высокотемпературной стадии процесса спекания, что связывается с формированием при микроволновом нагреве благоприятного распределения пористости на промежуточной стадии уплотнения, инверсного по отношению к традиционному спеканию, и воздействия на той же стадии уплотнения материала механических термоупругих напряжений [128]. Установлено, что при микроволновом нагреве температурные градиенты максимальны на промежуточной стадии спекания [129].

Перспективность применения микроволнового нагрева доказана для металлургической отрасли: при выплавке металлов (восстановления металлов из оксидов) [130, 131], при изготовлении металлических изделий методом спекания (порошковая металлургия) [132, 133]. Ожидается, что внедрение в этих устоявшихся областях техники технологий, использующих нагрев микроволновым излучением, несмотря на очевидные трудности, позволит значительно сократить энерго- и трудозатраты, а также уменьшить экологические нагрузки [128].

Как уже отмечалось, микроволновой нагрев обладает существенным потенциалом потенциал при создании металлокерамических композиционных материалов [134], в частности, функционально-градиентных материалов (ФГМ) [135]. Сочетание свойств керамических и металлических материалов при их градиентном соединении может позволить добиться прорыва в эксплуатационных и функциональных качествах

изделий, однако для реализации такой возможности требуется решение ряда научных и технических проблем. Наиболее острой проблемой при создании функционально-градиентных материалов является необходимость снижения термических и остаточных напряжений, обусловленных различиями в коэффициентах теплового расширения металлов и керамик. Метод обработки, использующий микроволновый нагрев, предоставляет возможность контролировать локальное выделение энергии, распределение температуры и напряжений в объеме материала, следовательно, осуществлять управление его микроструктурой и конечными свойствами. Исследования в области применения интенсивного микроволнового излучения для высокотемпературной обработки материалов, развивающиеся в последние десятилетия, поставили новые задачи фундаментального характера [126], одной из которых является определение оптимальных параметров микроволнового спекания керамики.

1.7. Виды микроволновых камер

1.7.1. Мономодовые камеры. В камере стоячей волны возникают максимумы и минимумы поля, которые можно рассчитать или измерить [136]. В одномодовой прямоугольной камере из-за генерации моды колебаний TE_{10} возникает максимум в середине камеры [19]. Имеются некоторые технические решения, при которых камера имеет цилиндрическую форму. В этом случае, можно создать и добиться моды TM_{01} , для которой максимум энергии передается в середине цилиндра. Этот тип камеры находит применение везде, где требуются локально большие плотности энергии. Недостатком таких камер является неомогенность поля.

Размеры камеры непосредственно связаны с генерируемыми модами. То есть, любое изменение размеров камеры приводит к генерации других электромагнитных колебаний [122]. Для процессов, в которых прежде всего

однородность поля имеет важное значение, таких как, например, спекание керамики, нужно использовать многомодовые камеры.

1.7.2. Мультимодовые камеры. В отличие от мономодовых камер, размеры мультимодовых являются произвольными [122]. Однако следует отметить, что размеры камеры влияют на однородность электромагнитного поля. Как недостаток, по сравнению с мономодовыми камерами локальные плотности энергии ниже [122]. Однородное распределение поля достигается в современных мультимодовых камерах за счет использования множества маломощных магнетронов. Равномерному распределению поля помогает округление микроволновой камеры.

1.7.3. Гибридные камеры. Гибридные камеры характеризуются одновременной передачей энергии с помощью теплового излучения и конвекцией и генерации тепла в результате микроволнового нагрева. Их применение доказало целесообразность в большинстве случаев использование комбинированного нагрева [137].

В качестве внешнего источника теплоты используется электронагрев [138] или нагрев продуктами сгорания газа [139].



Рис. 1.6. Промышленная гибридная микроволновая камера для спекания керамики (Harrop Industries, USA). Внешний источник – продукты сгорания газа



Рис. 1.7. Промышленная гибридная микроволновая печь с внешним электрическим обогревом (Linn High Therm GmbH, Germany)

Имеющиеся промышленные микроволновые печи рассчитаны непосредственно на выпуск одного вида изделия и, как отмечается представителями Linn High Therm GmbH, их стоимость высока, что связано с недостаточно эффективным использованием микроволновой энергии и несовершенными условиями контроля тепловых режимов вследствие недостатка данных по исследованию высокоинтенсивных процессов нагрева в СВ поле.

Выводы к разделу 1

1. Для краевых задач теплопроводности в условиях действия внутренних источников теплоты (возникающих, в частности, при действии микроволнового поля) с целью получения аналитических зависимостей для расчета температур в теле наиболее результативными показали себя операционные методы решения дифференциальных уравнений теплопроводности с учетом положительного или отрицательного внутреннего источника.

2. Закон Фурье имеет ограниченное применение при высокоинтенсивных процессах нагрева вследствие нарушения линейной связи между тепловым потоком и градиентом температур, перестройка температурного поля и градиента температуры происходит со смещением во времени τ_r .

3. При высокоинтенсивных процессах нагрева, согласно гипотезе Лыкова, следует учитывать конечную скорость распространения теплоты, которая определяется температуропроводностью материала и временем релаксации.

4. В случае высокоинтенсивных процессов нагрева уравнение теплопроводности параболического типа не позволяет верно описать процесс теплопроводности и получить надежные данные по температурам материала. Если допущение о бесконечно большой скорости распространения температуры неприемлемо, следует рассматривать уравнение теплопроводности гиперболического типа.

5. Информация о температурном поле является базовой для определения эффектов взаимодействия микроволнового электромагнитного поля с обрабатываемым материалом, необходимой для поиска управляющих воздействий, нахождении условий оптимальных параметров для микроволновых технологий.

6. При взаимодействии неоднородных по структуре диэлектрических материалов возникают локальные градиенты температуры, что приводит к значительному увеличению коэффициентов межзерновой диффузии, которые обуславливают появление термодиффузионных потоков, что, в свою очередь, вызывает качественное изменение структуры материала.

7. Эффекты взаимодействия микроволнового электромагнитного поля с материалом существенно зависят от природы поляризации (дипольная, электронная или ионная). При спекании керамики влияние микроволновой обработки на процессы усадки и роста зерен сильнее проявляется в веществах, обладающих ионной проводимостью, чем в диэлектриках.

8. При моделировании теплопереноса в дисперсных системах в виде плотного неподвижного слоя частиц материала, применяемого для производства керамики, целесообразно рассматривать слой как гомогенную среду, а учет влияния неоднородности структуры на теплопроводность и температуропроводность осуществлять введением соответствующих эффективных коэффициентов.

9. Высокоинтенсивная термообработка в микроволновом поле при совместном конвективном нагреве позволяет получать равномерное распределение температур по толщине материала. На процесс нагрева в микроволновом поле оказывают существенное влияние теплофизические свойства обрабатываемого образца.

10. Применение энергии микроволнового поля для нагрева и спекания керамических изделий показывает возможность интенсификации этих процессов и получения дополнительных качеств в конечном продукте при правильно подобранных режимных параметрах микроволновой обработки, которые определяют скорость повышения температуры в теле и коэффициент использования микроволновой энергии.

РАЗДЕЛ 2

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

2.1. Цель и задачи исследования

Целью исследования является изучение существующих математических моделей процессов теплопроводности при высокоинтенсивном нагреве и при малых числах Фурье, а также составление математических моделей высокоинтенсивного нагрева плотных тел.

Для достижения данной цели следовало решить ряд задач:

- провести анализ существующих решений гиперболических уравнений теплопроводности и оценить их применимость для расчета высокоинтенсивных процессов производства, в частности керамики;
- оценить вклад релаксационных явлений в процессы, интенсивность которых ограничена требованиями для производства керамики;
- получить зависимости для расчета температуры при микроволновом нагреве полуограниченного массива для граничных условий III рода;
- провести вычислительный эксперимент по полученным зависимостям с целью их верификации.

2.2. Математические методы анализа теплового состояния тела

2.2.1. Анализ нестационарной теплопроводности тела на основе гиперболического уравнения теплопроводности. Исследование теплового состояния тела проведено с использованием зависимостей [14]. В этой работе на основе использования ортогонального метода Бубнова-Галеркина получено точное аналитическое решение гиперболического уравнения теплопроводности для бесконечной пластины

при симметричных граничных условиях первого рода. Математическая постановка задачи имеет вид:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} + \tau_r \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial \tau^2} = a \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0, 0 \leq x \leq \delta) \quad (2.1)$$

$$t(x, 0) = t_0; \quad \frac{\partial t(x, 0)}{\partial \tau} = 0; \quad \frac{\partial t(0, t)}{\partial x} = 0; \quad t(\delta, \tau) = t_{ct}. \quad (2.2)$$

где t_0 – начальная температура; t_{ct} – температура стенки; δ – толщина пластины.

Обозначения: $\Theta = \frac{(t - t_{cm})}{(t_0 - t_{cm})}$ – безразмерная избыточная температура,

где t_0 , t – начальная и текущая температура материала, t_{ct} – температура поверхности; Fo – число Фурье.

Решение уравнения (2.1) с учетом начальных и граничных условий (2.2) представляется в следующем виде:

$$\Theta(\xi, Fo) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ [C_{1k} \exp(z_{1k} Fo) + C_{2k} \exp(z_{2k} Fo)] \cos\left(r \frac{\pi}{2} \xi\right) \right\}, \quad (2.3)$$

где $r=2k-1$, $k \in \mathbb{N}$;

$$z_{sk} = (-1 \pm \sqrt{1 - 4Fo_r v_k}) / (2Fo_\tau), \quad i \in \{1, 2\}, \quad (2.4)$$

$$v_k = \frac{1}{4} r^2 \pi^2, \quad r=2k-1, \quad k \in \mathbb{N}, \quad (2.5)$$

$$C_{1k} = -C_{2k} \frac{z_{2k}}{z_{1k}}, \quad C_{2k} = \pm \frac{4}{r\pi} \left(1 - \frac{z_{2k}}{z_{1k}}\right)^{-1}. \quad (2.6)$$

В уравнении (2.6) знак «плюс» принимается при $r=4k-3$, знак «минус» – при $r=4k-1$, $k \in \mathbb{N}$.

Зависимость (2.3) была апробирована на расчетах температурного поля плотного тела, теплофизические и электрофизические свойства которого соответствовали свойствам композиционного материала, применяемого для производства технической керамики. На рис. 2.1 представлен график изменения избыточной температуры тела при различных значениях Fo .

Принимались следующие обозначения: релаксационное число Фурье

$$Fo_r = \frac{a \cdot \tau_r}{\delta^2} \text{ относительная координата } \xi = \frac{x}{\delta}.$$

Расчеты проводились при следующих условиях: $Fo_r = 2,78 \cdot 10^{-11}$, $\delta = 0,06$ м. При Fo порядка $10^{-3} - 10^{-4}$ наблюдается существенное изменение температуры на границе тела, далее температурная кривая начинает сглаживаться: в этих случаях вид кривых соответствует результатам, получаемым по известным зависимостям, в основе которых лежит дифференциальное уравнение теплопроводности параболического типа. Тепловой фронт при $Fo = 2,78 \cdot 10^{-4}$ ограничивается безразмерной координатой $\xi = 0,97$, при $Fo = 2,78 \cdot 10^{-3}$ координата сместилась до значения $\xi = 0,92$.

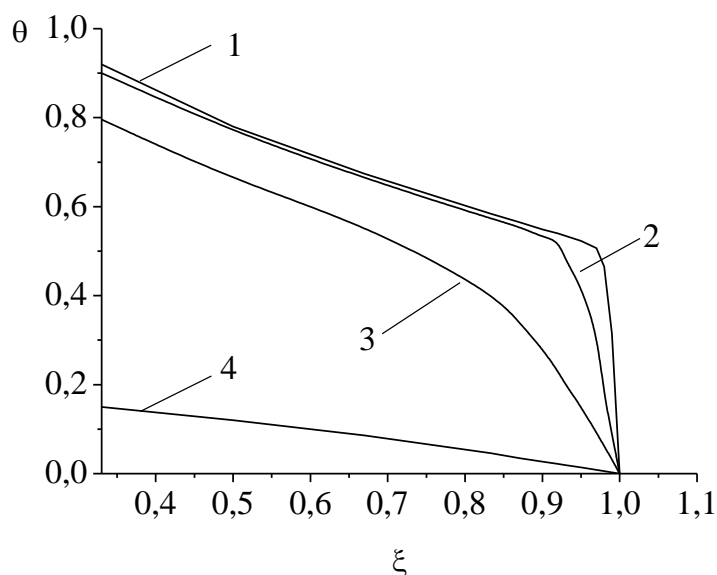


Рис. 2.1. Изменение избыточной температуры тела Θ по безразмерной координате ξ при различных значениях числа Фурье: 1 – $Fo = 2,78 \cdot 10^{-4}$, 2 – $Fo = 2,78 \cdot 10^{-3}$, 3 – $Fo = 2,78 \cdot 10^{-2}$, 4 – $Fo = 2,78 \cdot 10^{-1}$

Представляется, что для процессов любой интенсивности применение уравнения теплопроводности гиперболического типа позволяет решить проблему малых чисел Фурье. На малых числах Фурье прогрев (охлаждение) тела определяется движением фронта ударной тепловой волны, на котором

происходит скачок температур.

На рис. 2.2 приведен график изменения температурных кривых при значениях Fo , сопоставимых с Fo_r и значительно больших.

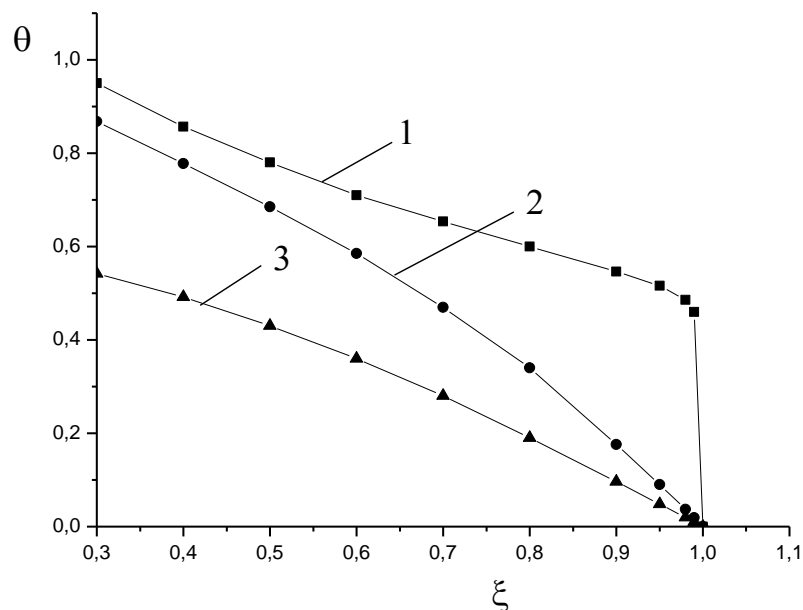


Рис. 2.2. Избыточные температуры тела при различной степени приближения к релаксационному числу Фурье Fo_r

$$1 - Fo = 10^{-7}, 2 - Fo = 0,1, 3 - Fo = 0,3$$

При $Fo = Fo_r$ тепловой фронт практически находится на поверхности тела. Расчеты проводились при $Fo_r = 2,78 \cdot 10^{-7}$, $\delta = 0,001$ м.

На рис. 2.3 представлен характер изменения избыточной температуры от числа Фурье, полученный при $Fo_r = 10^{-7}$, $\xi = 0,7$, $a = 10^{-6}$ м²/с, $\tau_r = 10^{-7}$ с, $\delta = 0,001$ м. Ход кривой верно отражает реальную картину изменения избыточной температуры тела.

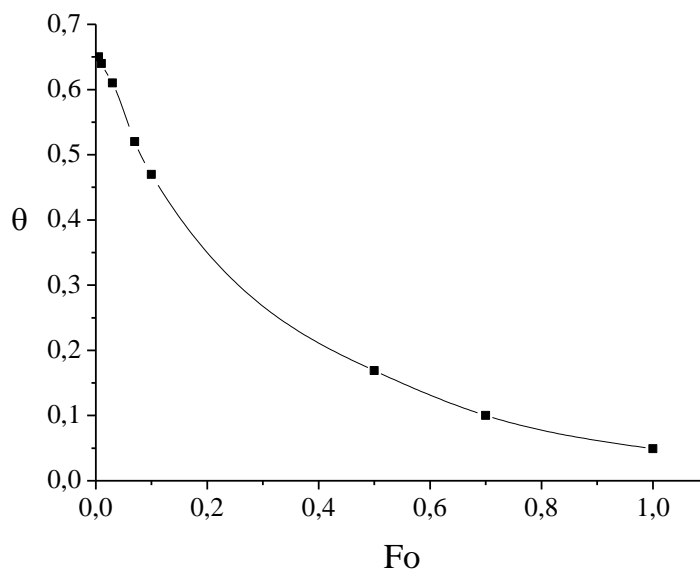


Рис. 2.3. Зависимость избыточной температуры от числа Фурье

Анализ необходимости применения гиперболического уравнения теплопроводности проводился на основании расчетных данных по температуре при задании экстремально больших значений температур поверхности нагрева: от 3000 °С до 4000 °С (к примеру, при спекании керамики температура не превышает 1420 °С). Получено, что скорость нагрева в этих условиях 2,6 К/с – 3,8 К/с. В то же время, в соответствии с зависимостью (2.7), для глинистых материалов, свойства которых определялись согласно [46], граничная скорость нагрева составляла 13185 К/с (в качестве T_w принята температура плавления каолина (1800 °С), начальная температура $T_0=20$ °С). Таким образом, при моделировании температурного поля в процессах спекания керамики существует принципиальная возможность применения уравнений теплопроводности параболического типа.

2.2.2. Нестационарная теплопроводность тела при малых числах Фурье. Как видно, применение зависимостей [14] позволяет проводить уточненные расчеты температурного поля с учетом

релаксационных процессов при любых (сколь угодно малых) числах Фурье и определять границу теплового фронта. Существуют методики, позволяющие рассчитывать нестационарную теплопроводность тел приближенными методами для случая, когда тепловой фронт не распространился на весь определяющий размер тела [140]. Весь процесс нагрева (охлаждения) тела разделяют на две стадии: в первой стадии теплота проникает от поверхности вглубь тела, температура изменяется только в прогретой (охлажденной) зоне, толщина которой увеличивается с течением времени; во второй стадии температура изменяется по всему объему (толщине) тела. Прогретая (охлажденная) зона в первой стадии называется термическим слоем. Распределение температур в теле не находят из решения дифференциального уравнения теплопроводности, а задаются им на основе анализа литературных данных. Первая стадия заканчивается в тот момент, когда толщина термического слоя становится равной половине толщины тела.

Рассматривается граничное условие, при котором температура поверхности постоянна и равна t_n .

Начальное условие сводится к заданию температурного поля тела в момент времени, принимаемый за начальный ($\tau=0$). Принято, что начальная температура полуограниченного тела одинакова по всему его объему и равна t_0 , примем для определенности $t_0 > t_0^*$. Требуется найти температурное поле полуограниченного тела. Задачу рассматриваем как одномерную, т.к. при одинаковых условиях теплообмена на всей поверхности полуограниченного тела его температурное поле изменяется только вдоль одной координаты x .

В соответствии методу исключения переменных, заранее следует принять закон распределения температуры в сечении полуограниченного тела. В результате из уравнений выпадает пространственная координата x , и решение задачи крайне упрощается. Температурные кривые для отдельных моментов времени соответствуют уравнению:

$$t = (t_n - t_0) \left(\frac{y}{X} \right)^n + t_0 \quad (2.7)$$

Или

$$\Theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \frac{t_n - t}{t_n - t_0} = 1 - \left(\frac{y}{X} \right)^n \quad (2.8)$$

где $\vartheta = t_n - t$; $\vartheta_0 = t_n - t_0$

Если вместо координаты y , отсчитываемой от оси симметрии параболы, ввести координату x , отсчитываемую от поверхности полуограниченного тела (рис.1), то уравнение параболы запишется следующим образом:

$$\Theta = 1 - \left(1 - \frac{y}{X} \right)^n \quad (2.9)$$

где $y = X - x$.

По этой формуле можно рассчитать температурное поле полуограниченного тела. Однако эта формула пока еще не является решением поставленной задачи, так как найденная по ней температура должна быть связана со временем τ . Чтобы связать температуру со временем, необходимо составить соответствующее дифференциальное уравнение теплового баланса. При этом, очевидно, новое дифференциальное уравнение будет значительно проще, чем дифференциальное уравнение теплопроводности Фурье, поскольку оно специально приспособлено к решению данной задачи и не содержит пространственной координаты как независимой переменной. В результате интегрирования уравнения температурной кривой для полуограниченного тела получается выражение [140]:

$$t_{cp} - t_0 = \frac{1}{n+1} (t_n - t_0). \quad (2.10)$$

Коэффициент C_1 определяет меру отклонения температурного поля полуограниченного тела или пластины в первой стадии нагрева. На рис.2.4 приведена зависимость относительной толщины Δ прогретого слоя от

критерия Фурье, найденная по формуле $Fo = \frac{1}{n(n+1)} C_1 \Delta^2$ для различных тел

при $n=2$. С помощью рис.3 можно по Fo определять критерий Δ с целью

вычисления температуры тела по формуле $\Theta = \frac{t_c - t}{t_c - t_0} = 1 - \frac{1}{n} Ki \Delta \left(1 - \frac{\delta}{\Delta} \right)^n$

или $Kt = \frac{1}{n} \Delta \left(1 - \frac{\delta}{\Delta} \right)^n$.

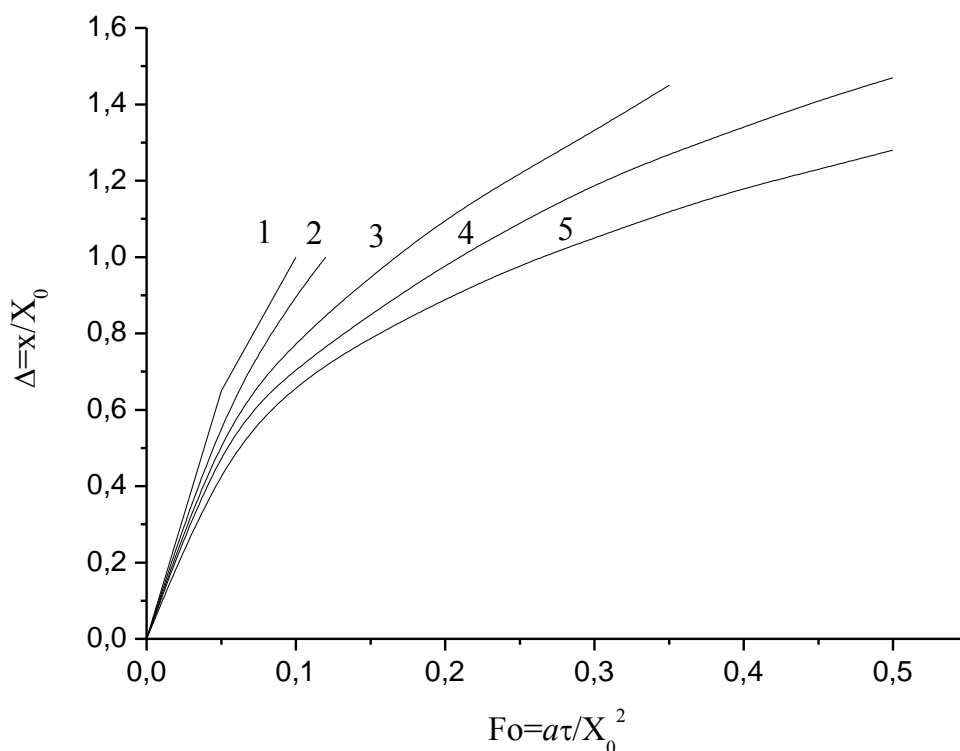


Рис. 2.4. Зависимость относительной толщины Δ прогретого слоя от критерия Фурье. $n=2$ [140]

1 – шар (первая стадия); 2 – цилиндр (первая стадия); 3 – полуограниченное тело и плита (первая стадия); 4 – неограниченное тело с цилиндрической полостью; 5 – неограниченное тело с шаровой полостью.

На рис. 2.5 приведены результаты расчетов температуры для первой стадии по упрощенным зависимостям [14] и [140], основанных на решении

гиперболического уравнения теплопроводности. Расчет проводился для пластины толщиной $\delta = 0,06$ м, $For = 2,78 \cdot 10^{-7}$.

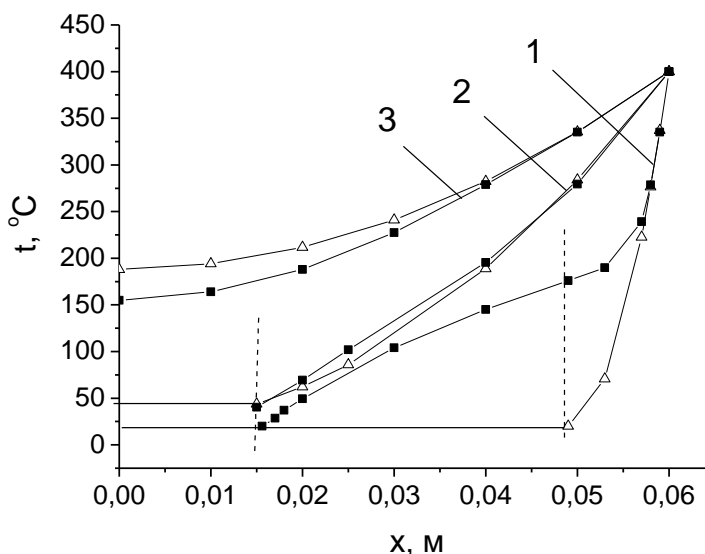


Рис. 2.5. Распределение температур в теле на первой и второй стадиях процесса нагрева

1 – $\tau = 10$ с, 2 – $\tau = 300$ с, 3 – $\tau = 1000$ с. Δ – расчет по зависимостям [140], \blacksquare – расчет по [14].

Линии 1 получены для первой стадии нагрева, 2 – для завершающей, когда тепловой слой достиг центра пластины, линии 3 характеризуют температуру во второй стадии. Вертикальные линии обозначают границы термического слоя. При 10 с по [14] температура 20°C достигаются на большем расстоянии, чем при расчете по [140]. Хорошая сопоставимость наблюдается в непосредственной близости к поверхности, характер изменения температуры совпадает в пределах теплового слоя.

2.3. Математическая модель нестационарной теплопроводности на основе параболического уравнения с внутренними источниками теплоты

При формулировке модели принимались следующие условия. Слой

материала рассматривается как полуограниченный массив с тепловой изоляцией боковой поверхности при начальной температуре t_0 . Внутри стержня действует положительный источник тепла, обусловленный действием микроволнового поля, и удельная мощность которого q_v , Вт/м³. Теплообмен с окружающей средой протекает по закону Ньютона-Рихмана (граничное условие третьего рода). Требуется найти распределение температуры по длине массива в произвольный момент времени. Математическая запись данной задачи представляется следующим образом:

$$\frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v}{c \cdot \rho} \quad (2.11)$$

$$t(x, 0) = t_0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial t(\infty, \tau)}{\partial x} = 0 \quad (2.13)$$

$$\alpha(t(0, \tau) - t_a) = -\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} \quad (2.14)$$

где t – температура, x – текущая координата, τ – время, a , λ , c , ρ – соответственно коэффициенты температуропроводности и теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность слоя материала; α – коэффициент теплоотдачи, q_v – положительный источник теплоты.

Принято, что источники тепла является экспоненциальной функцией координаты: положительный $q_v = q_{v0} \cdot e^{-\gamma x}$. Здесь q_{v0} – максимальная удельная мощность положительного источника, Вт/м³, γ – коэффициент ослабления электромагнитной энергии в слое, м⁻¹; Применим к уравнению (2.11) преобразование Лапласа:

$$f_L(s) = \int_0^{\infty} f(\tau) \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau = L[f(\tau)] \quad (2.15)$$

Получим:

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau = a \int_0^{\infty} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho} \int_0^{\infty} e^{-\gamma \cdot x - s \cdot \tau} d\tau \quad (2.16)$$

Исследуем отдельные слагаемые этого уравнения.

$$1) \int_0^{\infty} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} e^{-s \cdot \tau} d\tau = \left[\begin{array}{l} e^{-s \cdot \tau} = u; du = -s \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau \\ dv = \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} d\tau; v = T(x, \tau) \end{array} \right] = \quad (2.17)$$

$$= e^{-s \cdot \tau} T(x, \tau) \Big|_0^{\infty} + s \int_0^{\infty} T(x, \tau) \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau \\ = -T(x, 0) + s \cdot T_L(x, s) = -T_0 + s \cdot T_l(x, s);$$

$$2) \int_0^{\infty} \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau = \frac{d^2}{dx^2} \int_0^{\infty} T(x, \tau) \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau = \frac{d^2}{dx^2} T_L(x, s); \quad (2.18)$$

$$3) \int_0^{\infty} e^{-\gamma \cdot x - s \cdot \tau} d\tau = e^{-\gamma \cdot x} \int_0^{\infty} e^{-s \cdot \tau} d\tau = e^{-\gamma \cdot x} \left[-\frac{1}{s} e^{-s \cdot \tau} \Big|_0^{\infty} \right] = \frac{e^{-\gamma \cdot x}}{s}; \quad (2.19)$$

С учетом преобразований (2.17) – (2.19) уравнение (2.16) приобретает вид:

$$-T_0 + s \cdot T_L(x, s) = a \cdot \frac{d^2}{dx^2} \cdot T_L(x, s) + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho} \cdot \frac{e^{-\gamma \cdot x}}{s} \quad (2.20)$$

Перегруппировав (2.20):

$$\frac{d^2}{dx^2} T_l(x, s) - \frac{s}{a} \cdot T_l(x, s) + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot s \cdot a} \cdot e^{-\gamma \cdot x} + \frac{T_0}{a} = 0 \quad (2.21)$$

Применим преобразование Лапласа к граничным условиям (2.12)- (2.14):

$$\int_0^{\infty} \frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial x} \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau = \frac{d}{dx} T_L(\infty, s) = 0 \quad (2.22)$$

$$\alpha \left(\int_0^{\infty} T(0, \tau) \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau - T_{\text{в03д}} \int_0^{\infty} e^{-s \cdot \tau} d\tau \right) = -\lambda \int_0^{\infty} \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} \cdot e^{-s \cdot \tau} d\tau; \quad (2.23)$$

$$\alpha \cdot T_L(0, s) - \frac{T_{\text{в03д}}}{s} = -\lambda \frac{d}{dx} T_L(0, s); \quad (2.24)$$

$$\lambda \frac{d}{dx} T_L(0, s) + \alpha \cdot T_L(0, s) = \frac{T_{\text{возд}}}{s} \quad (2.25)$$

Перепишем уравнение (2.21) в виде:

$$\frac{1}{s} \cdot \frac{d^2}{dx^2} [s \cdot T_L(x, s) - T_0] - \frac{1}{a} [s \cdot T_L(x, s) - T_0] - \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot s \cdot a} \cdot e^{-\gamma \cdot x} = 0 \quad (2.26)$$

и сделаем замену переменных $U(x, s) = s \cdot T_L(x, s) - T_0$.

$$\text{Получим } \frac{1}{s} \cdot \frac{d^2}{dx^2} U(x, s) - \frac{1}{a} \cdot U(x, s) + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot s \cdot a} \cdot e^{-\gamma \cdot x} = 0 \quad (2.27)$$

$$\frac{d^2}{dx^2} U(x, s) - \frac{s}{a} \cdot U(x, s) + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot e^{-\gamma \cdot x} = 0 \quad (2.28)$$

Найдем общее решение однородного уравнения

$$\frac{d^2}{dx^2} U(x, s) - \frac{s}{a} U(x, s) = 0 \quad (2.29)$$

Для этого составим и решим характеристическое уравнение $r^2 - \frac{s}{a} = 0$.

Поскольку $\frac{s}{a} > 0$, $r_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{s}{a}}$. Следовательно, общее решение

однородного уравнения (2.29) имеет вид:

$$U(x, s) = C_1 \cdot e^{\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} + C_2 \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x}, \quad C_1, C_2 - \text{ постоянные.}$$

Частное решение неоднородного уравнения (2.28) будем искать в виде

$$U(x, s) = A_1 \cdot e^{-\gamma \cdot x}, \quad \text{где } A_1, \text{ постоянные, подлежащие определению.}$$

Так как $\frac{d^2}{dx^2} = \alpha^2 \cdot A_1 \cdot e^{-\gamma \cdot x}$, то, подставляя в (2.28), будем иметь:

$$\gamma^2 \cdot A_1 \cdot e^{-\gamma \cdot x} - \frac{s}{a} \cdot A_1 \cdot e^{-\gamma \cdot x} + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot e^{-\gamma \cdot x} = 0 \quad (2.30)$$

$$(\gamma^2 \cdot A_1 - \frac{s}{a} \cdot A_1 + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a}) \cdot e^{-\gamma \cdot x} = 0$$

Отсюда вытекает, что:

$$\left(\gamma^2 - \frac{s}{a}\right) \cdot A_1 + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a} = 0;$$

$$A_1 = -\frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a \cdot \left(\gamma^2 - \frac{s}{a}\right)};$$

Общее решение неоднородного уравнения является суммой общего решения соответствующего однородного уравнения (2.29) и частного решения (2.28).

Итак, общее решение уравнения (2.28) имеет вид:

$$U(x, s) = C_1 \cdot e^{\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} + C_2 \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} - \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a \cdot \left(\gamma^2 - \frac{s}{a}\right)} \cdot e^{-\gamma \cdot x} \quad (2.31)$$

Учитывая, что $T_L(x, s) = \frac{1}{s} [U(x, s) + T_0]$, находим решение уравнения (2.21):

$$T_L(x, s) = \frac{1}{s} \cdot \left[C_1 \cdot e^{\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} + C_2 \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} - \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a \cdot \left(\gamma^2 - \frac{s}{a}\right)} \cdot e^{-\gamma \cdot x} + T_0 \right] \quad (2.32)$$

Реализуем теперь условия (2.22) и (2.23).

Для этого находим:

$$\frac{d}{dx} T_L(x, s) = \frac{1}{s} \left[C_1 \cdot \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot e^{\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} - C_2 \cdot \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} + \frac{q_{v0} \cdot \alpha}{c \cdot \rho \cdot a \cdot \left(\gamma^2 - \frac{s}{a}\right)} \cdot e^{-\gamma \cdot x} \right] \quad (2.33)$$

Условие (2.22) дает:

$$\frac{1}{s} \left[C_1 \cdot \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot e^\infty - C_2 \cdot \sqrt{\frac{s}{a}} \cdot e^{-\infty} + \frac{q_{v0} \cdot \gamma}{c \cdot \rho \cdot a \cdot \left(\gamma^2 - \frac{s}{a}\right)} \cdot e^{-\infty} \right] = 0, \quad (2.34)$$

$$C_1 \equiv 0$$

Из условия (2.23):

$$C_2 = \frac{T_{\text{возд}} - T_0}{\alpha - \lambda \cdot \sqrt{\frac{s}{a}}} + \frac{q_{v0} \cdot (\alpha - \gamma \cdot \lambda)}{c \cdot \rho \cdot a \cdot (\gamma^2 - \frac{s}{a}) \cdot (\alpha - \lambda \cdot \sqrt{\frac{s}{a}})}$$

Преобразуем выражение:

$$\begin{aligned} \frac{1}{(\gamma^2 - \frac{s}{a}) \cdot (\alpha - \lambda \cdot \sqrt{\frac{s}{a}})} &= \frac{1}{\alpha - \lambda \cdot \sqrt{\frac{s}{a}}} \cdot \left[\frac{1}{\gamma - \sqrt{\frac{s}{a}}} + \frac{1}{\gamma + \sqrt{\frac{s}{a}}} \right] \cdot \frac{1}{2 \cdot \gamma} = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \gamma} \cdot \left[\frac{1}{(\alpha - \lambda \cdot \sqrt{\frac{s}{a}}) \cdot (\gamma - \sqrt{\frac{s}{a}})} + \frac{1}{(\alpha - \lambda \cdot \sqrt{\frac{s}{a}}) \cdot (\gamma + \sqrt{\frac{s}{a}})} \right] = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \gamma \cdot \lambda} \cdot \left[\frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \left(\frac{1}{\frac{\alpha}{\lambda} - \sqrt{\frac{s}{a}}} - \frac{1}{\gamma - \sqrt{\frac{s}{a}}} \right) + \frac{1}{\gamma + \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \left(\frac{1}{\frac{\alpha}{\lambda} - \sqrt{\frac{s}{a}}} + \frac{1}{\gamma + \sqrt{\frac{s}{a}}} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \gamma \cdot \lambda} \cdot \left[\left(\frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} + \frac{1}{\gamma + \frac{\alpha}{\lambda}} \right) \cdot \frac{1}{\frac{\alpha}{\lambda} - \sqrt{\frac{s}{a}}} - \frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \frac{1}{\alpha - \sqrt{\frac{s}{a}}} + \frac{1}{\gamma + \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \frac{1}{\gamma + \sqrt{\frac{s}{a}}} \right] = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \gamma \cdot \lambda} \cdot \left[-\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma^2 - (\frac{\alpha}{\lambda})^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{s}{a}} - \frac{\alpha}{\lambda}} + \frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{s}{a}} - \gamma} + \frac{1}{\gamma + \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{s}{a}} + \gamma} \right] = \\ &= \frac{1}{2 \cdot \gamma \cdot \lambda} \cdot \left[-\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma^2 - (\frac{\alpha}{\lambda})^2} \cdot \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{s} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a}} + \frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{s} + \gamma \cdot \sqrt{a}} \right] \end{aligned}$$

Формулу для C_2 запишем в виде:

$$C_2 = \frac{\sqrt{a}}{\lambda} \cdot \frac{T_0 - T_{\text{возд}}}{\sqrt{s} - \sqrt{a} \cdot \frac{\alpha}{\lambda}} + \frac{q_{v0} \cdot (\alpha - \alpha \cdot \gamma)}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot \frac{1}{2 \cdot \gamma \cdot \lambda} \cdot \left[-\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma^2 - \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2} \cdot \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{s} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a}} + \frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{s} - \alpha \cdot \sqrt{a}} + \frac{1}{\alpha + \frac{\gamma}{\lambda}} \cdot \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{s} + \gamma \cdot \sqrt{a}} \right]$$

Представляя теперь значение C_2 в формулу для $T_L(x, s)$, получим:

$$T_L(x, s) = \frac{1}{s} \cdot \left[\frac{\sqrt{a}}{\lambda} \cdot \frac{T_0 - T_{\text{возд}}}{\sqrt{s} - \sqrt{a} \cdot \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} + \frac{q_{v0} \cdot (\alpha - \gamma \cdot \lambda)}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot \frac{1}{2 \cdot \gamma \cdot \lambda} \cdot \left[-\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma^2 - \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2} \cdot \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{s} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} + \frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{s} - \gamma \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} + \frac{1}{\gamma + \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \frac{\sqrt{a}}{\sqrt{s} + \gamma \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} \right] + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot (s - a \cdot \gamma^2)} \cdot e^{-\gamma \cdot x} + T_0 \right]$$

Используя таблицы изображений, находим:

$$1) \frac{1}{s \cdot (\sqrt{s} - \sqrt{a} \cdot \frac{\alpha}{\lambda})} \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} \equiv \frac{\lambda}{\alpha \cdot \sqrt{a}} \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a} \cdot \tau}\right) + \frac{\lambda}{\alpha \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{-\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a} \cdot \left(-\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a} \cdot \tau + \frac{x}{\sqrt{a}}\right)} + \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a} \cdot \tau} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a} \cdot \tau\right)$$

$$2) \frac{1}{s \cdot (\sqrt{s} - \gamma \cdot \sqrt{a})} \cdot e^{-\sqrt{\frac{s}{a}} \cdot x} \equiv -\frac{1}{\gamma \cdot \sqrt{a}} \cdot \operatorname{Erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}\right) + \frac{1}{\gamma \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{-\gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \left(-\gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}}\right)} \cdot \operatorname{Erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\right)$$

$$3) \frac{1}{s \cdot (s - a \cdot \gamma^2)} \equiv \frac{1}{a \cdot \gamma^2} \cdot (e^{a \cdot \gamma^2 \cdot \tau} - 1)$$

Окончательно, переходя, к оригиналам получим:

$$T(x, \tau) = \frac{\sqrt{a}}{\lambda} \cdot (T_0 - T_{\text{безд}}) \cdot \left[-\frac{\lambda}{\alpha \cdot \sqrt{a}} \cdot \operatorname{Erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}\right) + \frac{\lambda}{\alpha \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot \sqrt{a} \cdot \left(-\frac{\alpha \cdot \sqrt{a \cdot \tau} + x}{\sqrt{a}}\right)}{\lambda}} \cdot \operatorname{Erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}\right) \right] +$$

$$\frac{q_{v_0} \cdot (\alpha - \gamma \cdot \lambda)}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot \frac{1}{2 \cdot \gamma \cdot \lambda} \cdot \left\{ \begin{aligned} & -\frac{2 \cdot \gamma \cdot \sqrt{a}}{\gamma^2 - \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2} \cdot \left(-\frac{\lambda}{\alpha \cdot \sqrt{a}} \cdot \operatorname{Erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}\right) + \frac{\lambda}{\alpha \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot \sqrt{a} \cdot \left(-\frac{\alpha \cdot \sqrt{a \cdot \tau} + x}{\sqrt{a}}\right)}{\lambda}} \cdot \operatorname{Erfc}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\right) \right) + \\ & \frac{\sqrt{a}}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \left(-\frac{1}{\gamma \cdot \sqrt{a}} \cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}\right) + \frac{1}{\gamma \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{-\gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \left(-\gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}}\right)} \cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\right) \right) + \\ & \frac{\sqrt{a}}{\gamma + \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \left(\frac{1}{\gamma \cdot \sqrt{a}} \cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}\right) - \frac{1}{\gamma \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{\gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \left(\gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}}\right)} \cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} + \gamma \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\right) \right) \end{aligned} \right\} +$$

$$+ \frac{q_{v_0} \cdot (\varepsilon - \beta \cdot \lambda)}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot \frac{1}{2 \cdot \beta \cdot x} \cdot \left\{ -\frac{2 \cdot \beta \cdot \sqrt{a}}{\beta^2 - \left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)^2} \cdot \left(-\frac{\lambda}{\alpha \cdot \sqrt{a}} \cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}\right) + \frac{\lambda}{\alpha \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot \sqrt{a} \cdot \left(-\frac{\alpha \cdot \sqrt{a \cdot \tau} + x}{\sqrt{a}}\right)}{\lambda}} \cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\right) \right) \right.$$

$$\cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\right) \left. + \frac{\sqrt{a}}{\beta - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \left(-\frac{1}{\beta \cdot \sqrt{a}} \cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}\right) + \frac{1}{\beta \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{-\beta \cdot \sqrt{a} \cdot \left(-\beta \cdot \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}}\right)} \cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \beta \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\right) \right) \right.$$

$$\cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \beta \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\right) \left. + \frac{\sqrt{a}}{\beta + \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \left(\frac{1}{\beta \cdot \sqrt{a}} \cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}\right) - \frac{1}{\beta \cdot \sqrt{a}} \cdot e^{\beta \cdot \sqrt{a} \cdot \left(\beta \cdot \sqrt{a \cdot \tau} + \frac{x}{\sqrt{a}}\right)} \cdot \operatorname{Erf}\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} + \beta \cdot \sqrt{a \cdot \tau}\right) \right) \right\} +$$

$$\frac{n_0}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{a \cdot \gamma^2} \cdot (e^{a \cdot \gamma^2 \cdot \tau} - 1) \cdot e^{-\gamma \cdot x} + \frac{q_{v_0}}{c \cdot \rho} \cdot \frac{1}{a \cdot \beta^2} \cdot (e^{a \cdot \beta^2 \cdot \tau} - 1) \cdot e^{-\beta \cdot x} + T_0$$

После приведения подобных:

$$\begin{aligned}
T(x, \tau) = & \left(\frac{T_{\text{всозд}} - T_0}{\lambda/\gamma} + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a} \right) \cdot \left(-\frac{\lambda}{\alpha} \cdot \operatorname{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + \frac{\lambda}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\gamma}{\lambda} \cdot \sqrt{a} \cdot \left(-\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a} \cdot \tau + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \right. \\
& \cdot \operatorname{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a} \cdot \tau \right) \left. + \frac{q_{v0} \cdot (\alpha - \lambda \cdot \gamma)}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot \frac{1}{2 \cdot \gamma^2 \cdot \lambda} \right. \\
& \cdot \left. \left\{ \frac{1}{\gamma - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \left(-\operatorname{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + e^{-\gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \left(-\gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \tau + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \right) \right. \right. \\
& \cdot \operatorname{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \tau \right) \left. + \frac{1}{\gamma \cdot \left(\gamma + \frac{\alpha}{\lambda} \right)} \cdot \left(\operatorname{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + e^{\gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \left(\gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \tau + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \right) \right. \\
& \cdot \operatorname{Erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} + \gamma \cdot \sqrt{a} \cdot \tau \right) \left. \right\} + \\
& + \frac{q_{v0}}{c \cdot \rho \cdot a \cdot \gamma^2} \cdot \left(e^{a \cdot \gamma^2 \cdot \tau} - 1 \right) \cdot e^{-\gamma \cdot x} + T_0
\end{aligned} \tag{2.35}$$

Полученная зависимость (2.35) позволяет рассчитать температуру полубесконечного массива при различных геометрических и физических условиях, среды и материала.

2.4. Результаты аналитического исследования температурного поля полуограниченного массива

Аналитическое исследование температурного поля полуограниченного массива проводилось при варьировании следующих определяющих характеристик: коэффициента теплоотдачи α , коэффициента поглощения электромагнитной энергии γ , толщины слоя x , начальной температуры материала t_0 и температуры окружающей среды t_a . Характер изменения температуры полуограниченного массива представлен на рис. 2.6. Зависимость отражает тот факт, что при увеличении длительности

нахождения материала в МВ поле температура возрастает по экспоненциальному закону.

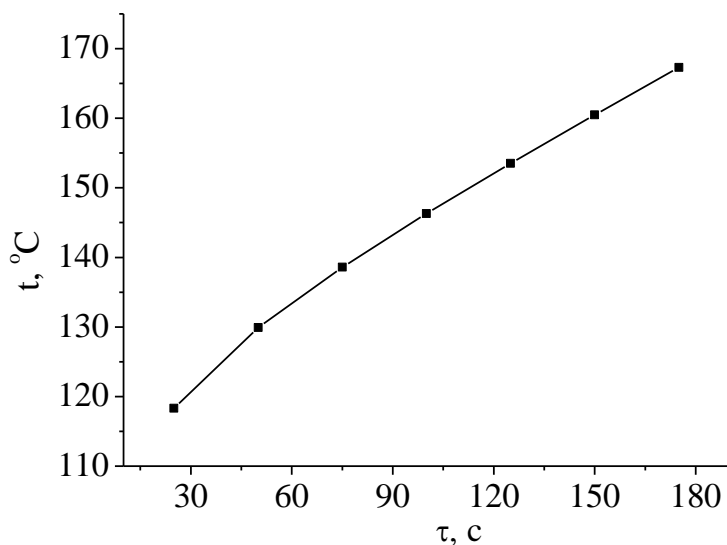


Рис. 2.6. Изменение температуры полуограниченного массива на расстоянии от поверхности $x = 0,001$ м.

Рис. 2.7 демонстрирует изменение температуры по глубине материала. Данные получены для следующих условий: $\alpha=20$ Вт/(м²К), $x=0,001$ м, $q_{v0}=3 \cdot 10^5$ Вт/м³, $\gamma=35$ м⁻¹, $t_0=20$ °С, $t_a=20$ °С. Видно, что на некотором расстоянии от поверхности интенсивность роста температуры значительно ниже, чем в слоях, близких к поверхности, что связано с затуханием электромагнитной энергии по глубине.

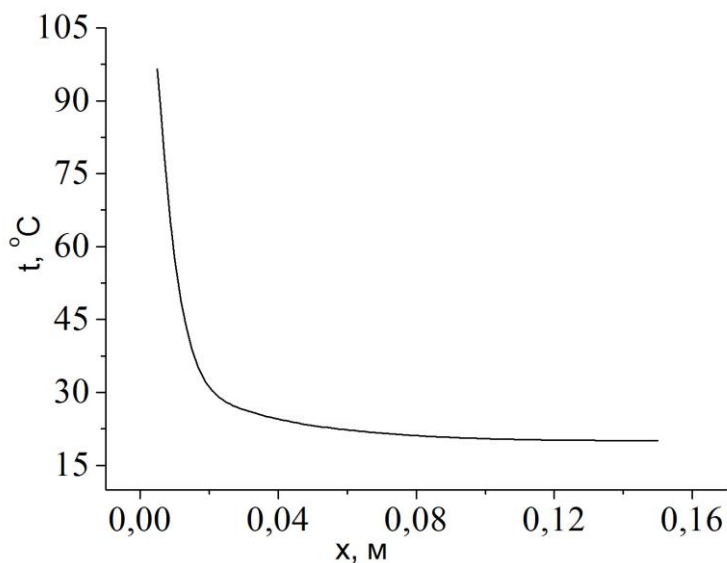


Рис. 2.7. Изменение температуры материала t по глубине x : $\tau=100$ с

Влияние коэффициента теплоотдачи на распределение температур в материале демонстрируется рис. 2.8. Видно, что коэффициент теплоотдачи оказывает существенное влияние в слоях, близких к поверхности. Низкие значения α приводят к тому, что в слоях, близких к поверхности, в которых затухание электромагнитной энергии незначительно, температура существенно возрастает.

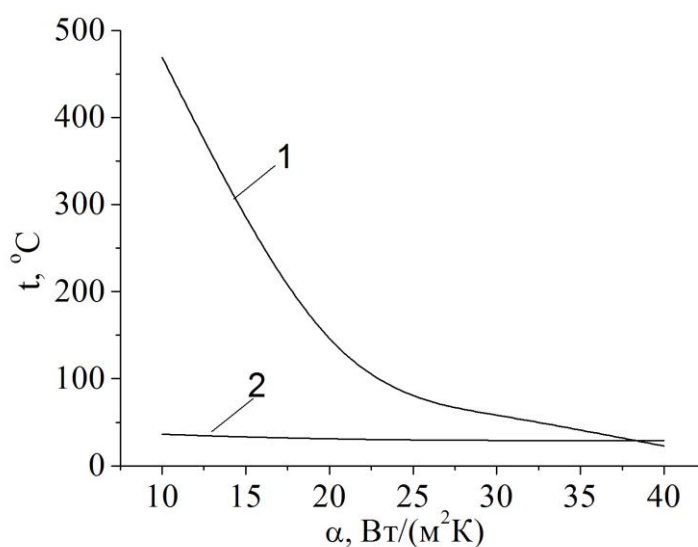


Рис. 2.8. Влияние коэффициента теплоотдачи α на температуру материала t : $\tau=100$ с, 1 – $x=0,01$ м, 2 – $x=0,021$ м

Коэффициент поглощения γ оказывает существенное влияние на температуру материала и на равномерность его нагрева (рис. 2.9). Расчет показывает, что в непосредственной близости от поверхности при значениях $\gamma \leq 50 \text{ м}^{-1}$ температура материала растет с увеличением γ , причем этот рост замедляется. При $\gamma > 50 \text{ м}^{-1}$ наблюдается падение температуры. На большей глубине массива увеличение γ приводит к монотонному снижению температуры. Это можно объяснить тем, что при малых γ влияние внутренних источников теплоты более существенно, чем теплоотдача от поверхности.

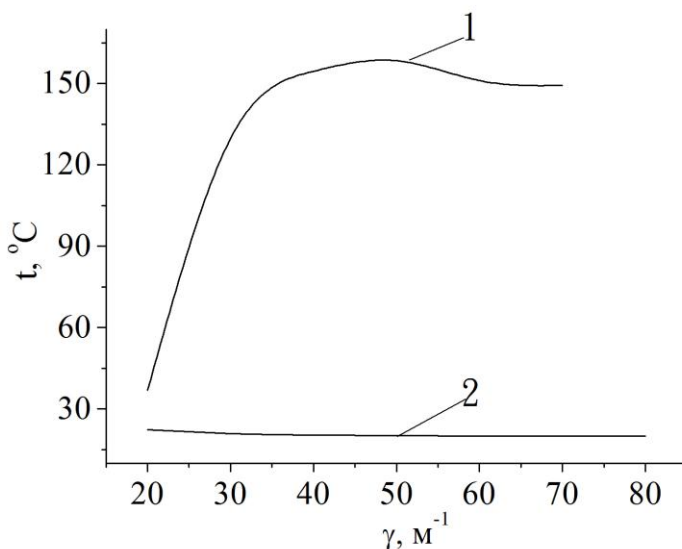


Рис. 2.9. Влияние коэффициента поглощения γ на температуру материала t при $\tau=100 \text{ с}$: 1 – $x=0,01 \text{ м}$, 2 – $x=0,021 \text{ м}$

Влияние начальной температуры материала и температуры воздуха на изменение температуры массива показано на рис. 2.10 и рис. 2.11. Характер изменения температуры тела верно отражает влияние варьируемых параметров.

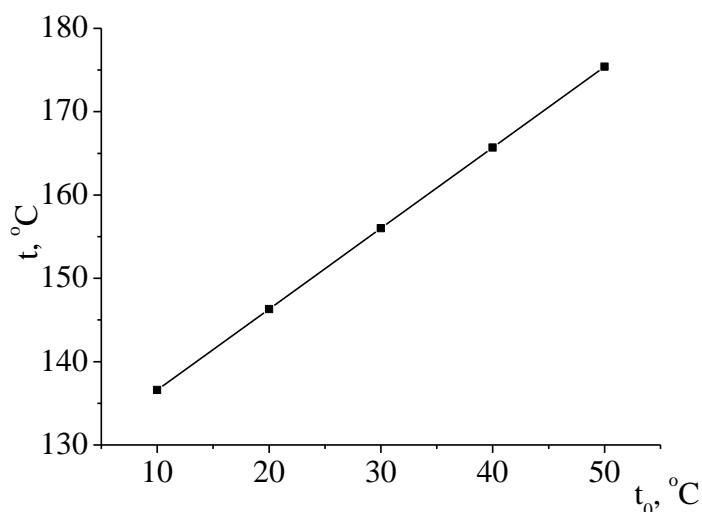


Рис. 2.10. Изменение температуры t массива в зависимости от начальной температуры массива t_0 .

$$x=0,001 \text{ м, } \tau=100 \text{ с.}$$

Здесь расчеты приводят к получению практически прямолинейной зависимости текущей температуры от начальной температуры материала. Влияние температуры воздуха на том же расстоянии от поверхности менее существенно при принятом коэффициенте теплоотдачи ($\alpha=20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$).

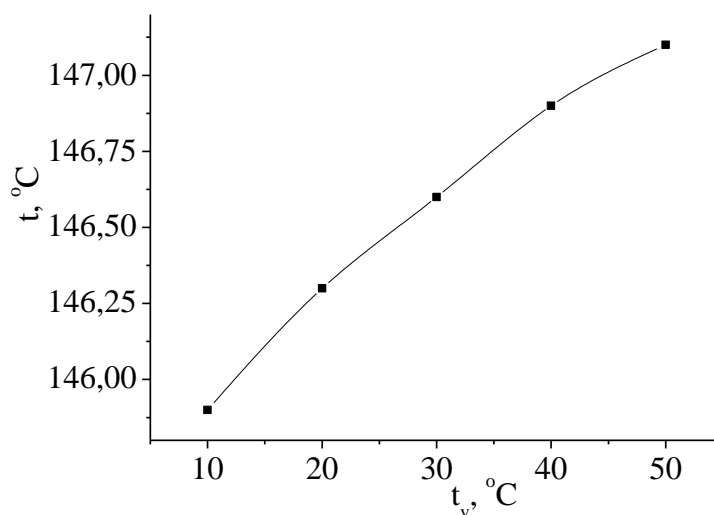


Рис. 2.11. Изменение температуры t массива в зависимости от температуры воздуха t_a .

$$x=0,001 \text{ м, } \tau=100 \text{ с}$$

На рис. 2.12 представлена зависимость температуры материала от удельной мощности внутренних источников теплоты. Видно, что увеличение q_v в три раза, от $2 \cdot 10^5$ до $6 \cdot 10^5$, привело к увеличению температуры (для контрольного интервала времени $\tau=100$ с) в 2,4 раза.

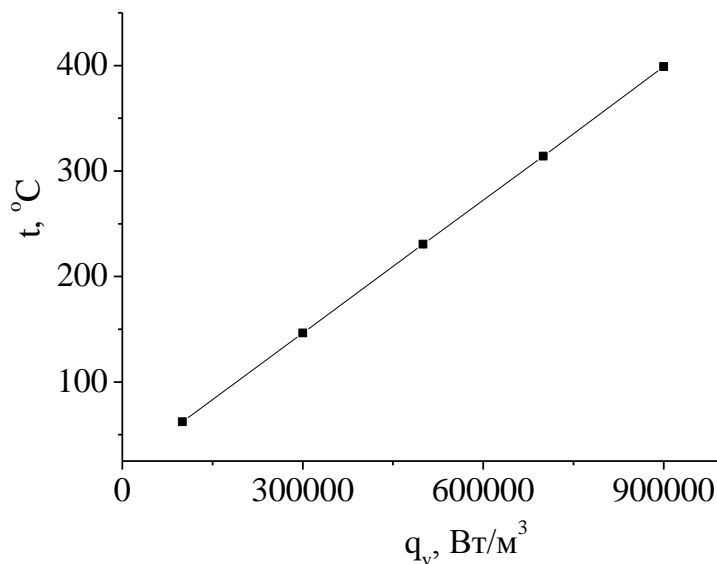


Рис. 2.12. Влияние удельной мощности внутренних источников теплоты на температуру массива. $\tau=100$ с, $x=0,001$ м

Влияние коэффициента поглощения γ на температуру материала при различных значениях коэффициента теплоотдачи представлено на рис. 2.12. Видно, что увеличение α приводит к снижению температуры. Однако при $\alpha=10$ на начальном участке температура не соответствует реальным значениям.

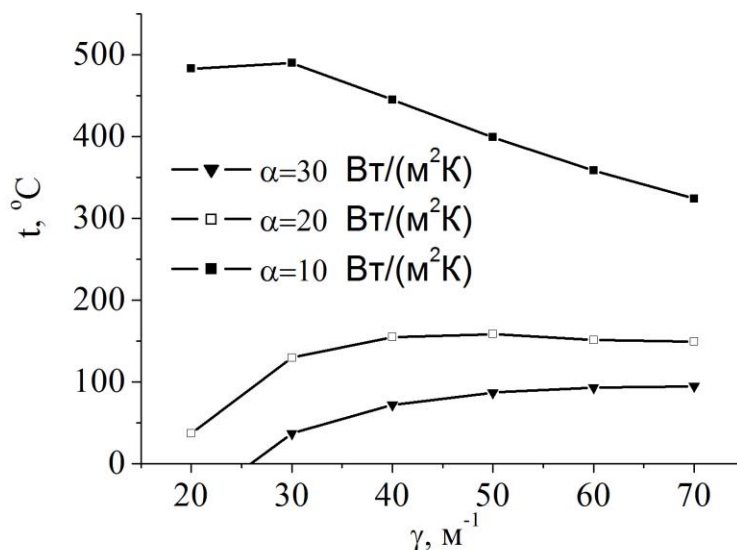


Рис. 2.13. Влияние коэффициента поглощения γ на температуру материала

Анализ результатов расчетов позволяет сделать вывод, что полученная аналитическая зависимость (2.35) может быть рекомендована для расчета температурного поля диэлектрического материала, в частности, для производства технической керамики, при действии положительных внутренних источников теплоты, к примеру, от микроволнового электромагнитного поля.

2.5. Обсуждение результатов аналитического исследования процессов теплопроводности при высокоинтенсивном нагреве

Расчетное исследование изменения температурного поля в материале, теплофизические свойства которого соответствовали глине, проведенное по зависимостям, полученным на основе гиперболического уравнения теплопроводности, показали влияние чисел Фурье. Получено, что при значениях Fo , соизмеримых с релаксационными Fo_r , формируются две области, соответствующие термическому слою и слою, в котором релаксационные процессы не завершились. Из рис. 2.1 видно, что эти области тем больше выражены, чем ближе значение Fo к Fo_r . При

значительном расхождении характер изменения температурной кривой становится монотонным (рис. 2.1, линия 4).

Таким образом, решение гиперболического уравнения теплопроводности, приведенное в [14], позволяет получать данные при малых числах Фурье и определять толщину термического слоя в различные моменты времени.

По предложенным зависимостям [14], полученным при ГУ I рода, рассчитаны скорости нагрева глинистого полумассива для различных температур на поверхности. Результаты показывают, что скорости нагрева значительно ниже граничной, при которой следует учитывать влияние релаксационных процессов. Так, при задании температуры поверхности $t_0=400$ °С, скорость нагрева не превышает 4 К/с, в то время как граничная для рассматриваемого материала составляет 13185 К/с. Следовательно, все существующие технологические процессы нагрева могут моделироваться на основе уравнений теплопроводности параболического типа.

Особый интерес представляют микроволновые технологии производства технической керамики и композиционных материалов. Благодаря специфике нагрева в микроволновом поле появляется возможность получения материалов с улучшенными эксплуатационными и функциональными свойствами. Однако существуют сложности получения аналитических решений уравнений теплопроводности, вследствие необходимости учитывать внутренние источники теплоты и особенности преобразования электромагнитной энергии во внутреннюю. Решения [11] ограничены условием, при котором температура окружающей среды должна быть выше температуры материала, что редко реализуется при микроволновом нагреве. Существует решение для неограниченной пластины при ГУ III рода [19], однако для тел другой формы подобных аналитических зависимостей найдено не было. Это привело к необходимости получения аналитического решения в явном виде для полуограниченного массива при ГУ III рода. При составлении модели принимались допущения, что

температура окружающей среды, теплофизические и электрофизические свойства (которые выражаются в значении коэффициента поглощения γ) оставались неизменными, начальная температура массива во всех точках одинакова. Полученное с помощью операционного метода решение демонстрирует свою работоспособность при проведении вычислительного эксперимента. Это позволило рекомендовать ее для расчета температурного поля диэлектрического материала при нагреве в условиях действия микроволнового поля.

Для уточнения результатов расчета следует установить зависимость коэффициента поглощения от температуры материала и его структурных характеристик, которые меняются в процессе нагрева. Кроме того, сами данные по коэффициентам поглощения электромагнитной энергии очень ограничены, что не позволяет проводить точные расчеты для широкого класса материалов. Получение этих данных требует проведения отдельных экспериментальных исследований. Тем не менее, основной результат проведенной работы состоит в том, что получена зависимость, которая позволяет получить информацию о тепловом состоянии тела при его нагреве в микроволновом поле и определить влияние на теплообменный процесс определяющих режимных параметров.

ВЫВОДЫ К РАЗДЕЛУ 2

1. Аналитическое исследование изменения температурного поля в материале показало, что при значениях чисел Фурье, соизмеримых с релаксационными числами Фурье, формируются две области, соответствующие термическому слою и слою, в котором релаксационные процессы не завершились.

2. Вкладом релаксационных явлений в процессы, интенсивность которых ограничена требованиями для производства керамики, можно пренебречь. Показано, что возможные скорости нагрева на примере производства технической керамики значительно ниже граничной, выше которой нельзя принимать гипотезу о бесконечной скорости распространения теплоты. При построении математических моделей целесообразно основываться на уравнении теплопроводности параболического типа.

3. Предложена математическая модель теплопроводности полуограниченного массива при действии внутренних источников теплоты для граничных условий III рода в дифференциальной форме. Как результат ее решения, получены аналитические зависимости для расчета температуры массива при его нагреве в условиях действия внутренних источников теплоты, в частности, в микроволновом поле.

4. Предлагаемая зависимость для расчета безразмерной избыточной температуры позволяет получить информацию о тепловом состоянии тела при его нагреве в микроволновом поле и определить влияние на теплообменный процесс определяющих характеристик: коэффициента теплоотдачи, коэффициента поглощения электромагнитной энергии, толщины слоя, начальной температуры материала и температуры окружающей среды.

РАЗДЕЛ 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОВОЛНОВОГО НАГРЕВА ПОРОШКОВ ДЛЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ

3.1. Постановка задачи исследования

Спекание керамики как один из важнейших физико-химических процессов требует создания условий для активации диффузии и растворения фаз, улучшения структурных и прочностных свойств, и в этом отношении перспективным является метод микроволнового нагрева, применение которого также способно привести к существенным снижениям временных и энергетических затраты по сравнению с традиционными методиками реализации этих процессов [103].

Целью экспериментальных исследований является изучение особенностей процессов, протекающих при микроволновом нагреве порошков, применяющихся для изготовления керамики.

В работе сформулированы следующие задачи:

- 1) провести анализ существующих связующих материалов и оценку целесообразности их применения при микроволновом методе нагрева;
- 2) изучить процесс нагрева образцов различной формы из порошков карбида кремния и оксида алюминия;
- 3) оценить влияние массы образца на интенсивность нагрева;
- 4) провести анализ применимости МВ нагрева для спекания порошка Al_2O_3 ;
- 5) исследовать характер нагрева порошков Al_2O_3 и SiC (фракции F100, F240, F600, F800, F1200);
- 5) оценить равномерность нагрева образцов в микроволновой камере;
- 6) провести оценку энергетической эффективности микроволнового нагрева для производства технической керамики.

3.2. Подготовка образцов и описание экспериментальных ячеек

Исследовались образцы в виде трех форм: спрессованные пластинки со связующим, таблетки из исследуемого порошка со связующим и порошок в дисперсном состоянии. Из порошков прессуют пластинки размером $0,11 \times 0,06$, толщиной $\delta = 1,0$ см, и таблетки диаметром $d=1,5$ см и толщиной от $\delta=0,4$ до $\delta=1,0$ см. В качестве связующего (пластификатора) применялся насыщенный водный раствор ПВС и лигносульфонат.

Поливиниловый спирт (ПВС, международное PVON, PVC или PVAL) — это искусственный, водорастворимый, термопластичный полимер.

Приготовление водного раствора поливинилового спирта заключается в следующем. В сухую пробирку помещается небольшое количество поливинилового спирта. Шприцом добавляем в пробирку воду, при этом смывая крупинки со стенок. Пробирка с раствором устанавливается над спиртовкой. В результате нагревания жидкость закипает. Периодически пробирку нужно взбалтывать. Получаемая консистенция состава должна быть густой. На рис. 3.1 приведены фото сухого ПВС и его водного раствора.



а



б

Рис. 3.1. Поливиниловый спирт в различных состояниях

а – ПВС в сухом виде, *б* - водный раствор ПВС.

Лигносульфонаты (технические) представляют собой природные водорастворимые сульфопроизводные лигнина. Это смесь различных солей

(в основном натриевых) лигносульфоновых кислот с обильной примесью редуцирующих и минеральных веществ.

На рис. 3.2 представлены фото ПВС и ЛСТ, которые применялись в качестве связующих при проведении экспериментов.



Рис. 3.2. Связующие для экспериментального исследования нагрева порошков как основы получения технической керамики
а – поливиниловый спирт, *б* – лигносульфонат технический.

Количество связующего составляло 1%, 5%, 10% (в расчете на сухой вес).

После прессования определяют геометрическую плотность образцов по следующей методике [103]:

– таблетки шлифуют и измеряют их линейные размеры с точностью 0.01 мм и массу с точностью 0.001 г. Плотность рассчитывают по формуле:

$$\rho = \frac{m \cdot 4}{\pi \cdot d^2 \cdot h}, \text{ кг/м}^3 \quad (3.1)$$

где m – вес таблетки, d – ее диаметр, h – толщина, ρ – плотность вещества.

Для достижения высокой конечной плотности спеченных образцов необходимо, чтобы относительная плотность "сырых" образцов составляла не менее 55% плотности идеального монокристалла [103].

3.3. Экспериментальная микроволновая установка.

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, принципиальная схема которой представлена на рис.3.4. Для равномерного нагрева материал помещают на вращающуюся подставку. В рабочую камеру прямоугольного сечения размерами 306х201х322 мм поступает энергия через волновод от магнетрона с частотой 2,45 ГГц и регулируемой мощностью 90 – 800 Вт. При одновременном МВ и конвективном подводе теплоты воздух по воздуховоду нагнетался в камеру 2 вентилятором 6, нагреватель 7 с измерительным комплектом 8 и регулятором напряжения 9 позволяли получать воздух с различной температурой, которая изменялась в пределах 20÷40 °С. В экспериментальную ячейку помещался исследуемый материал, который обрабатывался в микроволновой камере. Методика расчета погрешностей измерений приведена в Приложении А.

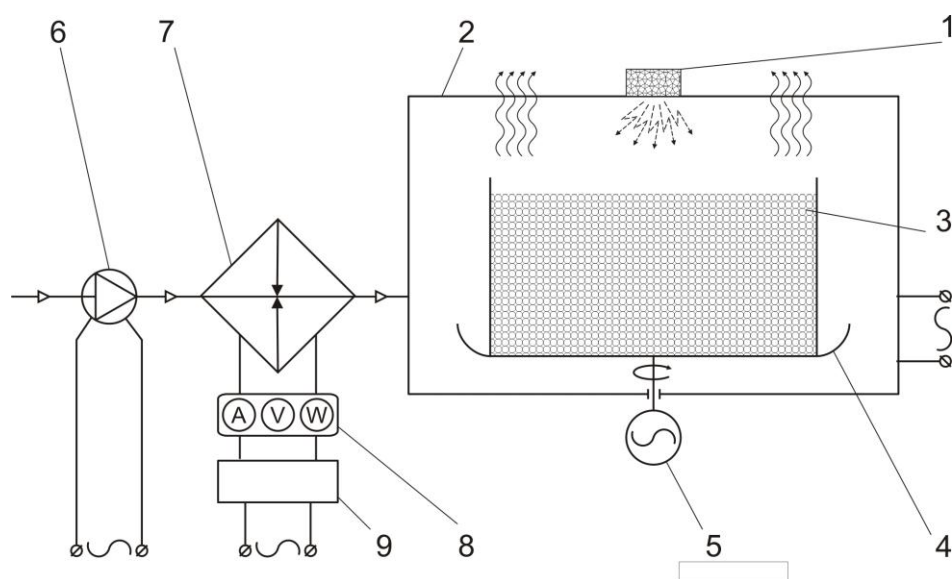


Рис. 3.4. Схема экспериментальной установки для исследования процесса спекания в микроволновом поле.

- 1 – волновод; 2 – рабочая камера; 3 – экспериментальная ячейка; 4 – подставка; 5 – механизм привода; 6 – вентилятор; 7- нагреватель, 8-ЛАТР К-50, 9 – источник питания

3.4. Результаты проведения экспериментов и их анализ

3.4.1. Исследования нагрева плоского образца. Первоначально исследовался темп нагрева пластины из прессованного порошкового карбида кремния толщиной $\delta = 1,0$ см, дисперсность (фракция) частиц 125 мкм. Связующим веществом служил поливиниловый спирт. Масса образца составляла 0,165 кг. Выходная мощность магнетрона $P = 800$ Вт. Температурная кривая нагрева пластинки из порошка карбида кремния в микроволновом поле (рис. 3.5) показывает, насколько интенсивно преобразуется МВ энергию в тепловую. Измерения проводились на поверхности образца (линия 1) и на его основании (линия 2). Видно, что дно образца, изолированное от окружающей среды при нагреве, нагревается интенсивнее. Также было замечено, что, начиная с какого-то температурного уровня (для данного образца – при температуре около 220 °С), темп нагрева усиливался, что можно объяснить увеличением значения диэлектрической проницаемости карбида кремния. На графике этот уровень отмечен пунктирной линией.

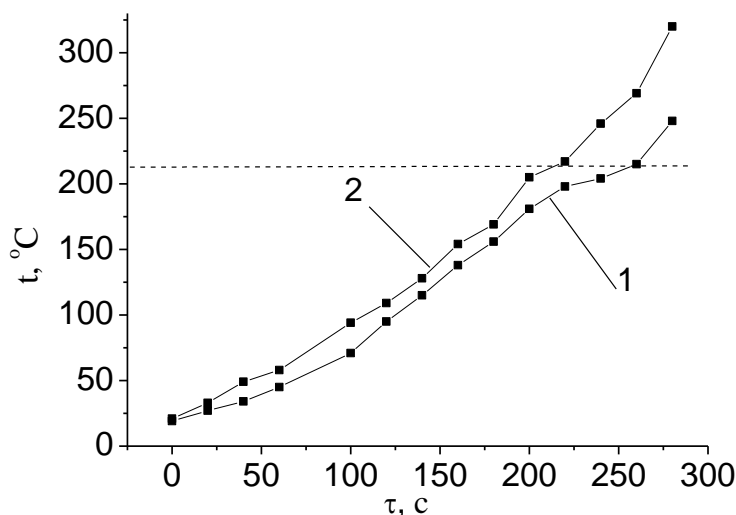


Рис. 3.5. Нагрев пластинки из порошка карбида кремния в МВ поле.

Выходная мощность магнетрона $P = 800$ кВт

1 – поверхность, 2 – дно.

Физические свойства соответствовали [19], табл. 3.1. Расчет темпа нагрева и КПД камеры представлен в табл.3.2. Для расчета КПД камеры использовались данные по температуре, полученные у основания пластины.

Таблица 3.1

Физические свойства порошка карбида кремния

Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(мК)	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость c_p , Дж/(кгК)	Длина МВ волны, λ_0 , м	Фактор потерь ϵ''	Глубина проникновения Δ , м
12	2500	600	0,122	0,9	0,0096

Значения КПД камеры показывают, что энергия микроволнового излучения лишь частично преобразуется во внутреннюю энергию материала, что связано с малой загрузкой камеры.

Таблица 3.2

Расчетные характеристики нагрева порошка карбида кремния

№	τ , с	$t_{\text{пов}}$, °С	$(\Delta t/\tau)_{\text{пов}}$, К/с	$t_{\text{дно}}$, °С	$(\Delta t/\tau)_{\text{дно}}$, К/с	КПД камеры, %
	1	2	3	4	5	6
1	0	20	-	20	-	-
2	20	27,3	0,4	33,2	0,7	11,1
3	40	34,2	0,35	49,1	0,8	7,8
4	60	45,6	0,55	58,3	0,45	4,6
5	80	58,5	0,65	72,2	0,7	6,9
5	100	71,2	0,65	94,4	1,1	11
6	120	95,1	1,2	109,1	0,75	7,3
7	140	115,3	1,0	128,5	0,95	9,4
8	160	138,2	1,25	154,7	1,3	13
9	180	156,6	0,9	169,4	0,75	7,3
10	200	181,4	1,25	205,3	1,95	17,7

Продолжение табл. 3.2

№	1	2	3	4	5	6
11	220	198,8	0,85	217,2	0,6	5,9
12	240	204,3	0,3	246,3	1,45	14,4
13	260	215,7	0,55	269,4	1,15	11,6
14	280	248,5	1,65	320,3	2,55	25,2

При проведении экспериментов температура измерялась не непосредственно в процессе нагрева, а в выбранные интервалы времени при извлечении образца из камеры. Поэтому следовало оценить погрешность измерения, которая обуславливалась охлаждением за счет естественной конвекции. Для оценки величины этой погрешности были проведены расчеты, в основу которых положены зависимости для нестационарного теплообмена [11].

Безразмерная избыточная температура

$$\Theta = \frac{t-t_0}{t_H-t_0} \quad (3.3)$$

является функцией безразмерного времени Fo и числа Био Bi : $\Theta = f(Bi, Fo)$

$$t = t_K + \Theta(t_H - t_K) \quad (3.4)$$

$$Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}, \quad (3.5)$$

где $a = \frac{\lambda}{c\rho}$ – коэффициент температуропроводности образца.

$$\text{Для карбида кремния: } a = \frac{12}{600 \cdot 2500} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}.$$

Таким образом, в первую очередь следует определить значение Bi .

Число Био включает следующие величины: $Bi = \frac{\alpha\delta}{\lambda}$, где α – коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции, Вт/(м²К); $\delta_0 = \delta/2$ – определяющий

размер ($\delta = 0,01$ м – толщина образца); λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(мК).

Расчет коэффициента теплоотдачи при естественной конвекции α проводился для следующих условий. Принимаем, что условия теплообмена образца аналогичны с условиями теплообмена для пластины. Определяющий размер – длина: $l = 0,11$ м.

Определяющая температура – температура воздуха вдали от поверхности $t_{o.c.} = 20$ °С. Свойства воздуха при 20 °С: $\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\beta = 3,66 \cdot 10^{-3}$ К⁻¹, $Pr_{жс} = 0,703$, $\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2}$ Вт/(мК).

Число Релея:

$$Ra = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \beta \cdot Pr_{жс} \cdot \Delta t, \quad (3.6)$$

где определяющий размер l – ширина изделия, м.

Разность температур Δt представляет собой разность температуры поверхности и окружающей среды: $\Delta t = t_n - t_{o.c.}$.

Размеры пластины: 0,11x0,06x0,01, определяющий размер $l = 0,11$ м.

Принимаем $t_n = 140$ °С (средняя температура образца за период нагрева).

Для диапазона $10^3 < Ra < 10^9$ подходит следующее критериальное уравнение:

$$Nu = 0,76 Ra^{0,25} \varepsilon_t, \quad (3.7)$$

где $\varepsilon_t = (Pr_{жс}/Pr_c)^{0,25}$ – поправка на направление теплового потока, для воздуха $\varepsilon_t \approx 1$.

Для расчета Θ можно использовать выбранную зависимость [11].

$$\bar{\theta} = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot Bi^2}{\mu_n^2 (Bi^2 + Bi + \mu_n^3)} \exp(-\mu_n^2 Fo) \quad (3.8)$$

Число Фурье $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ будет определяться длительностью проведения измерений. При $\tau=5$ с: $Fo=1,6$. Число Био: $Bi=0,0052$. Это случай предельного числа Био: $Bi \rightarrow 0$. Тогда температура по толщине пластины распределяется практически равномерно. Имеет место внешняя задача теплопроводности. Ряд (3.8) настолько быстро сходится, что можно ограничиться первым членом ряда, причем $\mu_1 \rightarrow 0$. Тогда распределение температур в пластине описывается следующей формулой:

$$\theta_{nl} = \exp(-Bi \cdot Fo) \quad (3.9)$$

Для расчета числа Фурье $Fo = \frac{a\tau}{\delta^2}$ выбираем временные интервалы, соответствующие экспериментальным значениям выдержки материала в МВ камере. Длительность измерений температуры соответствовала 5 с.

Таблица 3.3

Расчет погрешности измерения температуры образца SiC+ПВС

№	τ , с	t_{cp} , °C	Bi	θ	t	Погрешность, %
1	0	20	-	-	-	-
2	20	30,3	0,00286	0,991	30,2	0,3
3	40	41,7	0,0034	0,989	41,46	0,6
4	60	52,0	0,0038	0,988	51,6	0,8
5	80	65,4	0,00423	0,987	64,8	0,9
5	100	82,8	0,0452	0,985	81,9	0,9
6	120	102,1	0,0048	0,985	100,8	1,3
7	140	121,9	0,0051	0,984	120,2	1,4
8	160	146,5	0,0054	0,983	143,1	1,5
9	180	163,0	0,00556	0,982	160,5	1,5
10	200	193,4	0,0058	0,981	190,2	1,65

Продолжение табл. 3.3

№	1	2	3	4	5	6
11	220	208,0	0,0059	0,981	204,5	1,68
12	240	225,3	0,0061	0,981	221,4	1,73
13	260	242,6	0,0062	0,980	238,2	1,81
14	280	284,4	0,0065	0,979	279,0	1,9

Как видно, погрешность определения температуры не превышает 2%.

Во время экспериментов замеры производились с оптимальной скоростью, тем не менее, расчеты показывают, что за период измерений материал охлаждается на несколько градусов. Следовательно, в непрерывном процессе конечная температура будет несколько выше. Соответствующие эксперименты показали, что для образца с идентичной массой и размерами температура была выше на 7 °С и составляла $t_k=292$ °С.

3.4.2. Нагрев композиционного порошка на основе порошка оксида алюминия. Проблема получения износостойких керамик по традиционным технологиям связана с тем, что особенностью данных технологий является относительно медленный нагрев, приводящий к длительному циклу спекания. Исследовалось влияние добавки порошка карбида кремния на температуру нагрева порошка оксида алюминия в микроволновом поле. Известно, что до температуры 1100 °С Al_2O_3 прозрачен для микроволнового излучения, интенсивное поглощение микроволновой энергии происходит на уровне температуры спекания – около 1400 С. Как показано авторами [142], керамика на основе оксида алюминия с добавкой нитевидных волокон β -SiC, полученная методом электроимпульсного плазменного спекания, характеризуется повышенной износостойкостью, что выявлено при изучении физико- механических и трибологических свойств. Прочность керамики на основе SiC примерно в 1,5...2 раза выше прочности Al_2O_3 [143], однако оксид алюминия имеет определенные преимущества,

закрывающиеся сочетания высокой твердости, термостойкости, химической инертности и доступности, благодаря чему изучаются технологические подходы к получению керамики на основе Al_2O_3 .

Использование традиционных технологий, таких как свободное спекание, горячее прессование, вакуум-компрессионное спекание и др., во многих случаях приводят к образованию неоднородной крупнозернистой структуры, что снижает прочность и трещиностойкость материала. Создание композиционной структуры путем добавления в порошок Al_2O_3 порошков керамик с более высокими прочностными характеристиками (SiC , TiC , TiN , ZrO_2 и т.д.) и применение методов спекания, оптимизирующих компактирование, способствует решению задачи повышения прочности и однородности [144, 145], повышение объемной доли упрочняющих частиц или нитевидных волокон $\beta\text{-SiC}$ до 40–50 об.% позволило получить керамики, имеющие высокие показатели твердости (до 24 ГПа) и пригодные к использованию в качестве режущих кромок при металлообработке, однако отмечается негативное влияние частиц SiC на коэффициент трения оксида алюминия [146] и, как следствие, отрицательного влияния на ресурс трибологической пары в целом. Для использования композиционной керамики $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ в парах трения необходимо оптимизировать объемную долю дисперсных частиц SiC так, чтобы прочностные характеристики не снизились, а износостойкость керамической пары трения возросла.

При применении электроимпульсного спекания [142] темп нагрева доходил до 100 К/мин (1,67 К/с). Высокие скорости нагрева позволяют сократить длительность процесса спекания, ограничить роста частиц порошка в процессе консолидации. Использование данного метода позволяет получать керамики с плотностями, близкими к теоретическому значению и размером зерен близким к размеру частиц исходного порошка.

На рис. 3.6 представлены результаты нагрева в микроволновом поле композиционного порошка со следующим составом: $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5$ об.% SiC -частицы. Выбор данного состава соответствовал [142].

В качестве связующего использовался лигносульфонат (технический, жидкий) 10 об. %. Начальная температура составляла 50 °С, поскольку для качественного перемешивания связующего с порошком жидкость следовало подогреть для уменьшения вязкости.

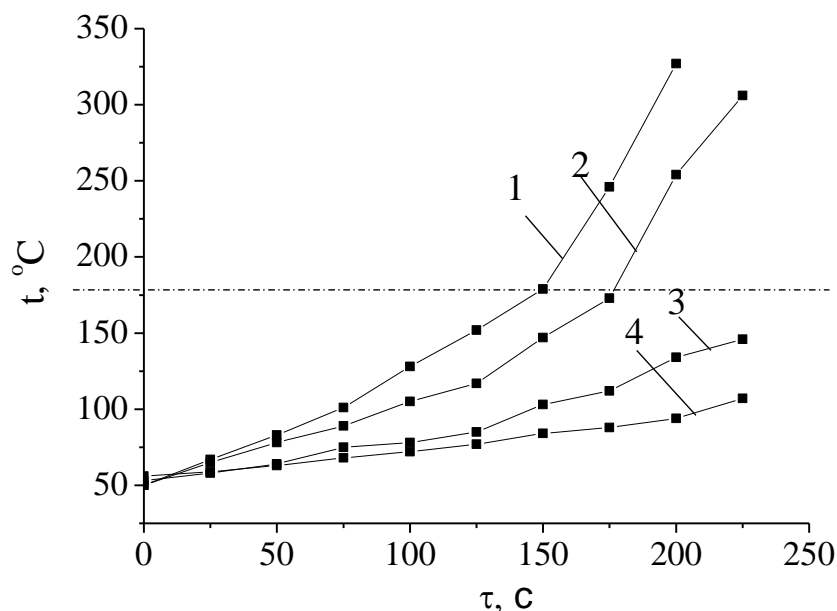


Рис. 3.6. Нагрев композиционного порошка на основе диоксида алюминия ($\text{Al}_2\text{O}_3 + 5 \text{ об.}\% \text{ SiC}$) с применением связующего 10 % ЛСТ в микроволновой камере

1 – масса образца 20 г.; 2 – масса образца 50 г; 3 – масса образца 70 г.; 4 – масса образца 20 г, без связующего. Выходная мощность магнетрона 600Вт.

Анализ кривых показывает, что темп нагрева материала с добавлением 10 % ЛСТ увеличивается после температуры выше 150 °С (кривые 1, 2). Это связано с разложением лигносульфоната, вследствие чего продукты термораспада, которые начинают образовываться при температуре выше 130°С. более интенсивно поглощают микроволновую энергию. Темп нагрева доходил до 2 К/с. Однако такой интенсивный характер нагрева наблюдался для массы 20 г и 50 г и при добавке связующего в смесь порошков. Без связующего (кривая 4) темп нагрева составлял 0,226 К/с. Таким образом, на интенсификацию нагрева влияет в первую очередь добавка связующего ЛСТ,

а затем – добавка карбида кремния. В чистом виде оксид алюминия Al_2O_3 не нагревается. Следует отметить, что для таких масс нагрев проходил в условиях значительной концентрации микроволновой энергии в образце.

3.4.3. Исследование эффективности нагрева порошков карбида кремния и оксида алюминия. Особенностью данного исследования являлось то, что объем (масса) образцов была значительно ниже, чем в предыдущих экспериментах, и поверхность в течение опыта не закрывалась, что позволяло оценить вклад процессов теплообмена с окружающей средой. Теплофизические свойства обрабатываемого образца оказывают существенное влияние, поскольку эффективность и равномерность нагрева зависит не только от диэлектрических свойств образца, но и от его способности распределять выделившуюся теплоту по своему объему [103]. Известно, что основной причиной неравномерного нагрева образцов является резкое увеличение значения фактора диэлектрических потерь с ростом температуры. Если скорость диссипации теплоты в объеме образца оказывается недостаточной, то образуются зоны с более высокой температурой, и в них поглощение микроволнового излучения будет проходить более интенсивно. Вследствие этого возникает существенная температурная неравномерность по объему образца. В экспериментах следует подбирать условия, при которых скорость нагрева не приведет к возникновению недопустимых градиентов температур.

Чем лучше поглощает вещество и чем сильнее его поглощающая способность зависит от температуры, тем большей теплопроводностью оно должно обладать для того, чтобы равномерно прогреваться в микроволновом поле.

В качестве связующего применялся водный раствор ПВС.

Лабораторная посуда для проведения экспериментов представлена на рис. 3.7.

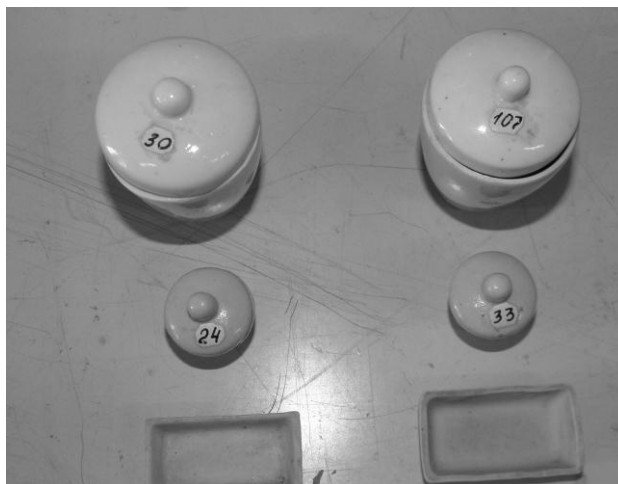


Рис. 3.7. Емкости для экспериментальных исследований

В окончательном варианте испытания проводились в ячейках прямоугольной формы. Выходная мощность магнетрона была максимальной ($P=800$ Вт), благодаря чему работа магнетрона не прерывалась. Для обеспечения требуемых условий работы магнетрона при малых загрузках исследуемых образцов в камеру помещалась емкость с водой (объем – 400 мл).

При исследованиях использовалась фракция Al_2O_3 F800 (размер частиц 10-7 мкм) и фракции SiC F100 (размер частиц 150-125 мкм), F240 (размер частиц 50-40 мкм), F600 (размер частиц 14-10 мкм), F1200 (размер частиц 3 мкм).

Исследование нагрева оксида алюминия с ПВС.

Подготовка ПВС: 2,16 г смешали с водой 9,08 г. Подготовка образца: 1,5 г Al_2O_3 смешали с 1,81 г жидкого ПВС. Масса образца после проведения эксперимента: 2,62 г.

Измерялась температура образца центра и края, интервал измерения – 5с. На рис. 3.8 представлены образцы до и после выдержки в микроволновой камере.

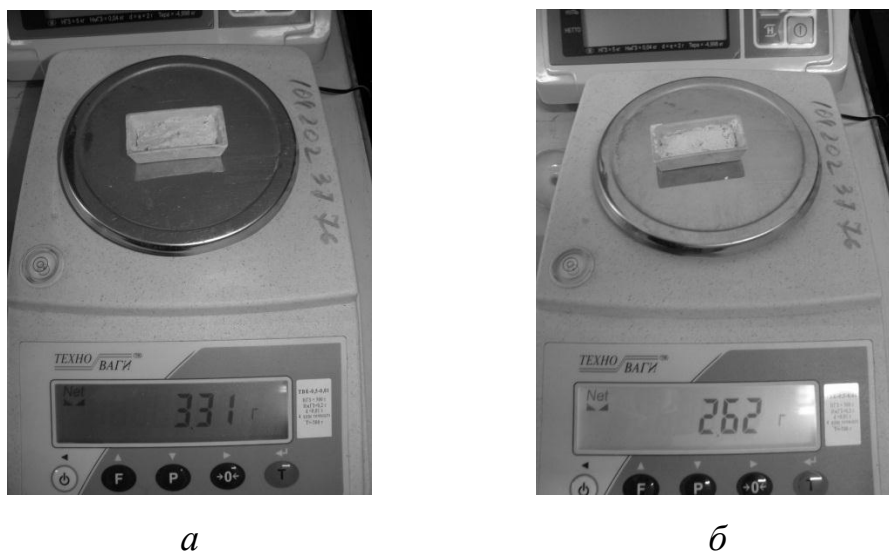


Рис. 3.8. Вид образца на основе Al_2O_3 с ПВС

a – образец перед началом эксперимента, *б* – образец после выдержки в МВ камере.

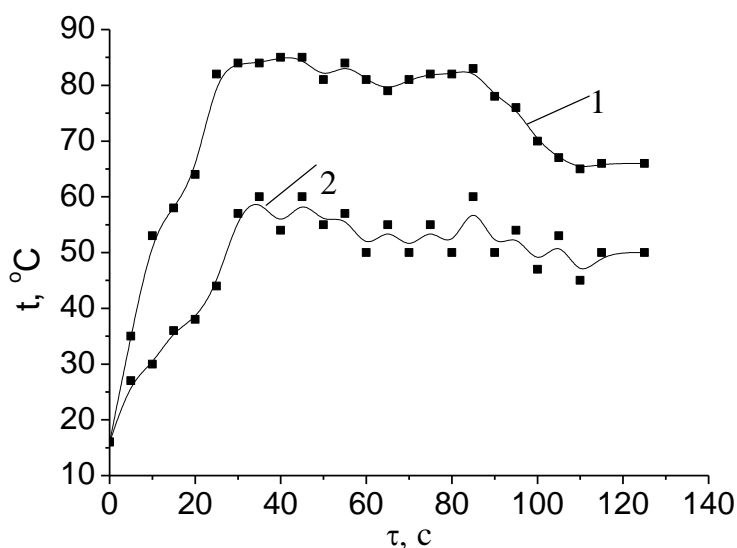


Рис. 3.9. Нагрев образца оксида алюминия в МВ поле. Связующее – ПВС

1 – температура центра, 2 – температура края образца.

Как видно из рис. 3.9, наблюдалась существенная неравномерность температуры в процессе нагрева. Колебательный характер процесса связан с интенсивным испарением воды, которая находилась в составе ПВС. Температура края образца была существенно ниже и амплитуда колебаний выше, чем в центре, что связано с явлениями теплопроводности и сушки.

Нагрев в микроволновом поле $\text{Al}_2\text{O}_3+5\% \text{SiC}$ позволяет достичь уровня темпа нагрева $1,7 \text{ К/с}$ (в интервале времени от 0 до 30 с), получаемого при электроимпульсном плазменном спекании [147].

Нагрев карбида кремния со связующим.

Состав образца: SiC (1,5 г) + ПВС (1,81 г). Размер фракции F1200.

Результаты эксперимента представлены на рис. 3.10.

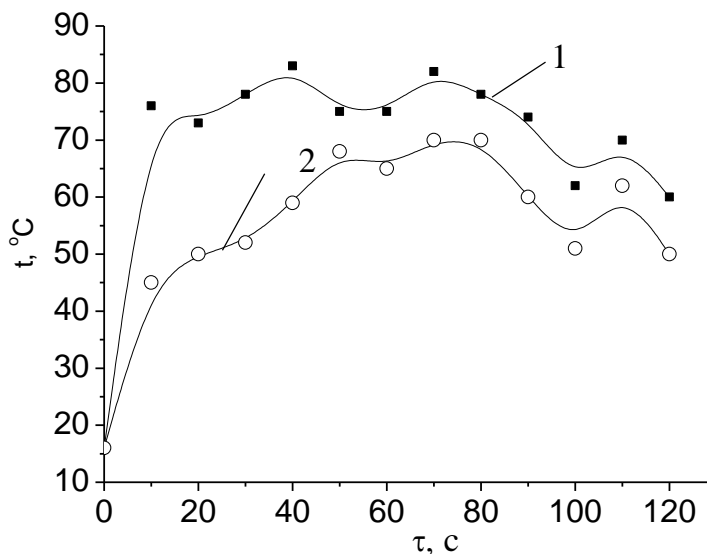


Рис. 3.10. Нагрев образца карбида кремния F 1200 в СВЧ поле. Связующее - ПВС

1 – температура центра, 2 – температура края образца

В сравнении с графиком нагрева $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{ПВС}$, равномерность нагрева выше и разница между центром и краем меньше, что связано с лучшими теплофизическими свойствами карбида кремния. Температурная неравномерность между краем и центром образца в сравнении с оксидом алюминия: от 19 % для SiC до 36 % для Al_2O_3 .

3.4.4. Нагрев порошков различной дисперсности без связующего. При исследованиях использовались порошки с различной дисперсностью. В задачи входила оценка влияния дисперсности на равномерность и эффективность нагрева образцов.

Порошок SiC фракция F100 (150-125 мкм), масса 4,87 г. На рис. 3.11 представлены фото образца, на рис.3.12 – результаты эксперимента.



Рис. 3.11. Порошок SiC фракция F100, подготовленный к эксперименту

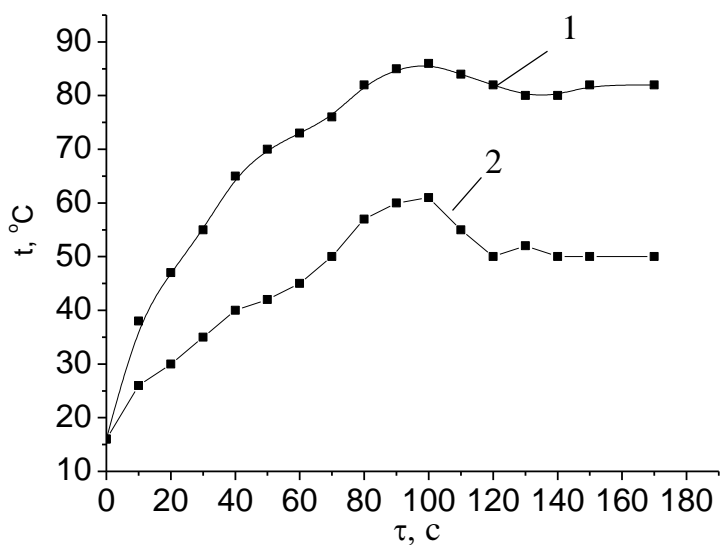


Рис. 3.12. Нагрев образца карбида кремния F100 в МВ поле
1 – температура центра, 2 – температура края образца.

Видно, что даже при таких малых размерах температурная неравномерность очень велика. После 120 с температура начинает стабилизироваться, потери в окружающую среду сравниваются с производством теплоты в объеме образца.

Порошок SiC F240 (50-40 мкм), масса 4,84 г. Фото образца приведено на рис. 3.13, результаты эксперимента – на рис.3.14.



Рис. 3.13. Порошок SiC фракция F240, подготовленный к эксперименту

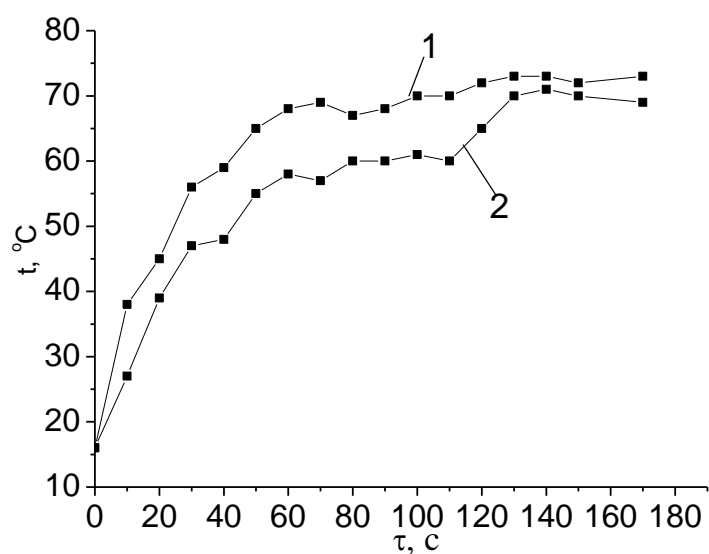


Рис. 3.14. Нагрев образца карбида кремния F240 в МВ поле
1 – температура центра, 2 – температура края образца.

Сравнивая с данными, приведенными на рис. 3.12, можно видеть, что увеличение дисперсности способствовало выравниванию температуры по объему образца.

Порошок SiC F600 (14-10 мкм), масса 4,85 г. На рис. 3.15 представлено фото образцов, на рис.3.16 – результаты экспериментов.



Рис. 3.15 .Порошок SiC фракция F600, подготовленный к эксперименту

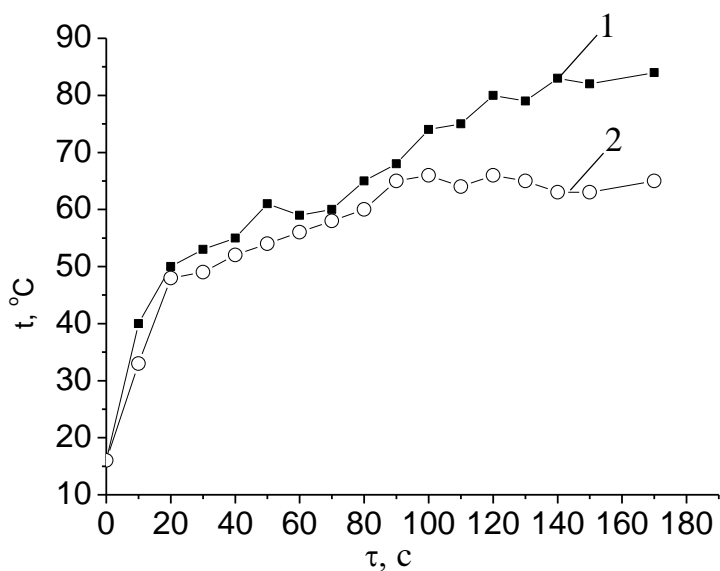


Рис. 3.16. Нагрев образца карбида кремния F600 в МВ поле.

1 – температура центра, 2 – температура края образца

Порошок SiC F1200 (3 мкм), масса 4,87 г. На рис. 3.17 представлено фото всех образцов для их сравнительной характеристики, на рис. 3.18 – результаты экспериментов.



Рис. 3.17. Исследуемые фракции карбида кремния

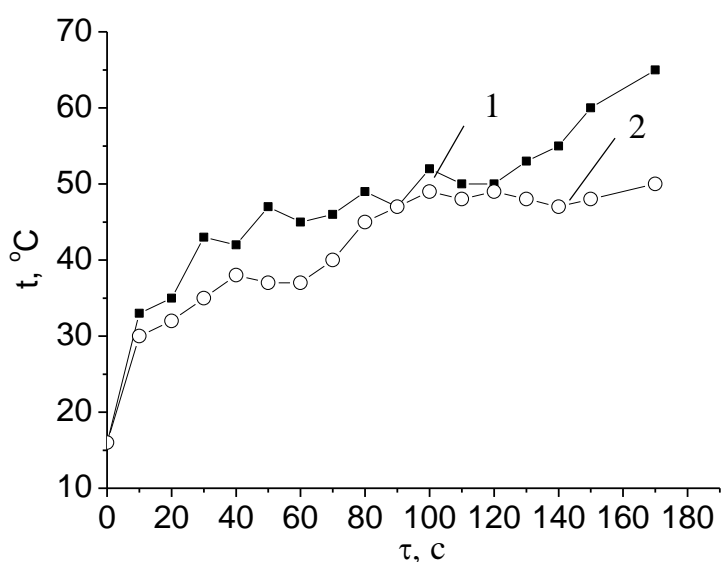


Рис. 3.18. Нагрев образца карбида кремния F1200 в МВ поле.

1 – температура центра, 2 – температура края образца

На рис.3.19 представлены графики изменения температуры центра образцов для всех исследуемых фракций. Если равномерность нагрева повышается с увеличением дисперсности, то эффективность преобразования микроволновой энергии снижается. Расчет средней за период теплоты преобразования (по средней между центром и краем температуре) представлен в табл.3.4.

Таблица 3.4

Тепловые характеристики нагрева различных фракций порошка карбида кремния

Фракция	F100	F240	F600	F1200
Конечная температура, °С	85	71	75	46
Масса, г	4,87	4,84	4,85	4,87
Количество теплоты, затраченное на нагрев, Дж	197,9	171,3	171,7	87,7
Длительность нагрева, с	110	110	110	110
Средняя мощность нагрева, Вт	1,79	1,55	1,56	0,79

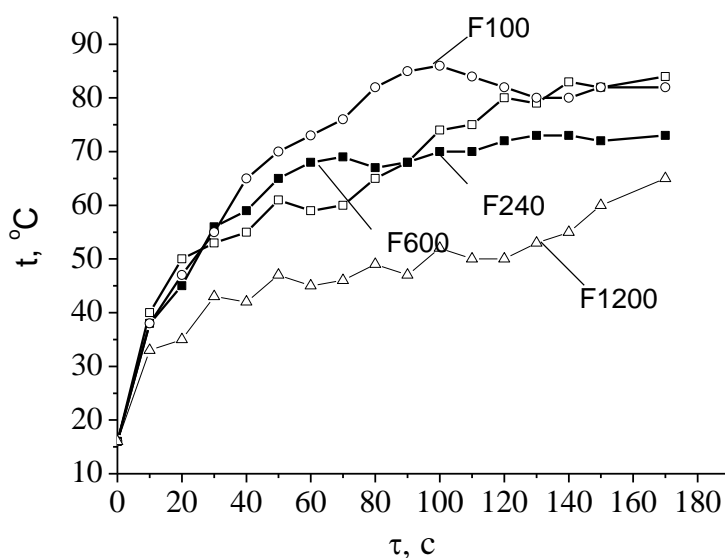


Рис. 3.19. Температуры образцов различных фракций порошка карбида кремния при их нагреве в микроволновом поле

Исследование нагрева смеси порошков.

Для исследования была подготовлена смесь порошков SiC (2,2 г)+ Al₂O₃ (2,2 г). График, представляющий ход температурной кривой, приведен на рис. 3.20.

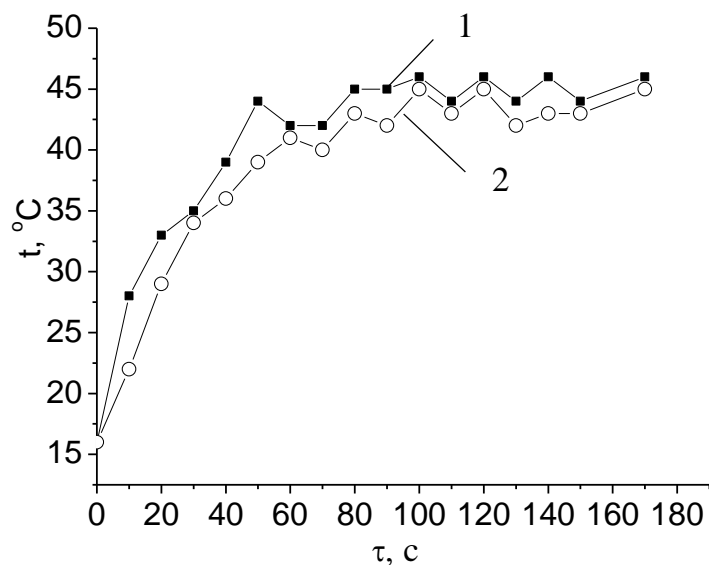


Рис. 3.20. Нагрев образца из смеси карбида кремния F600 и оксида алюминия в СВЧ поле. Мощность магнетрона 800 Вт
1 – температура центра, 2 – температура края образца.

Анализ результатов позволяет сделать вывод, что нагрев образца из смеси порошков карбида кремния F600 и оксида алюминия F800 в СВЧ поле характеризуется относительно невысоким темпом нагрева – 0,86 К/с до $\tau=50$ с, после чего темп нагрева снижается и становится практически равным нулю. Это происходит вследствие того, что теплота, полученная материалом вследствие преобразования микроволновой энергии, становится равной теплоте, отдаваемой им в окружающую среду путем теплоотдачи.

3.5. Перспективы применения микроволнового поля для спекания функционально-градиентных материалов

Цель микроволнового нагрева функционально-градиентных материалов (ФГМ) состоит в соединении разнородных материалов. Микроволновое поглощение в композиционно градиентных материалах приводит к неоднородному выделению тепла. Композиционная селективность микроволнового нагрева позволяет создавать распределения

температуры, способствующие уменьшению термических напряжений. Один из подходов к созданию ФГМ основан на спекании металло-диэлектрических порошковых смесей с плавно меняющейся композицией. На рис. 3.21 [148]. представлены образцы, полученные после нагрева в микроволновой камере. В результате разнородные керамические материалы соединились через наноструктурированные прослойки с высокой степенью прочности. Подготовка образцов заключалась в холодном изостатическом прессовании сухих смесей при давлении 600 МПа после 24-часового перемешивания.

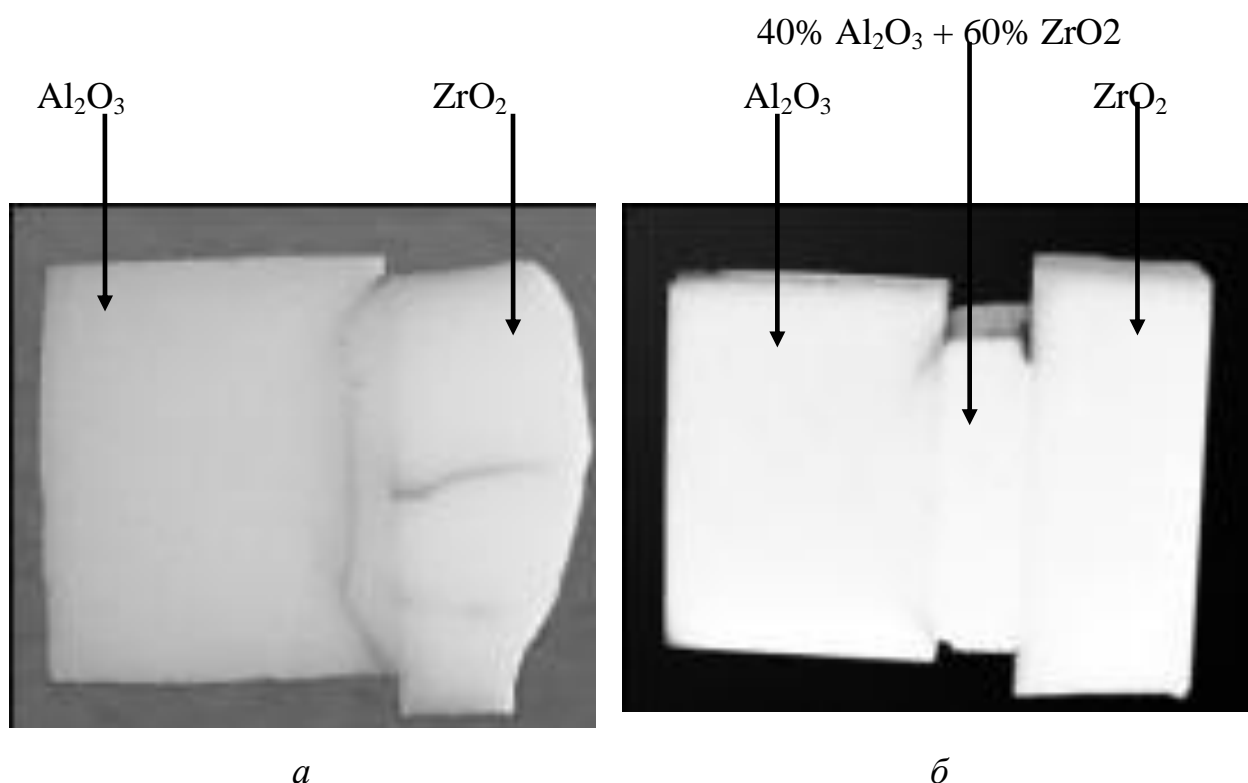


Рис. 3.21. Соединение разнородных керамических материалов
а – без прослойки, *б* – с прослойкой материала 40% Al_2O_3 + 60% ZrO_2 .

Материалы с пространственно-неоднородной микроструктурой и градиентными функциональными свойствами всегда используются в мире живой природы. На рис. 3.22 [149] представлены многослойные ФГМ-структуры растительного происхождения. Структура этих растений включает композиционные материалы, армированные волокнами; причем прочность

волокна в 10 раз больше, чем прочность матрицы. Кроме того, распределение волокон образует градиентную форму.

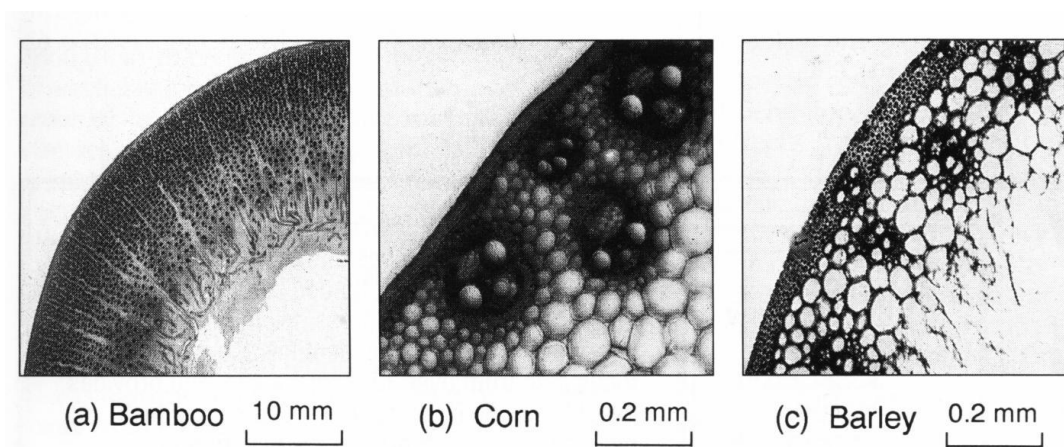


Рис. 3.22. Сечения приповерхностных слоев отдельных видов растений [149]

а – бамбук, б – кукуруза, с – ячмень

В [148] приведены условия уплотнения многослойных порошковых композиций и режимов СВ нагрева, которые обеспечивают получение интегральных многослойных структур. Однако работы проведены для композитных составов Al_2O_3-Ni , Al_2O_3-NiAl and ZrO_2-Mo . В рамках данной работы исследовалось получение металлокерамических композиций Al_2O_3 -сталь, SiC -сталь, пластик-сталь в условиях микроволнового нагрева.

Получено, что при микроволновом нагреве Al_2O_3 можно профилировать поле температур добавлением различного количества порошка железа. Результаты измерения температуры в центре образца массой 60 г приведены на рис. 3.23.

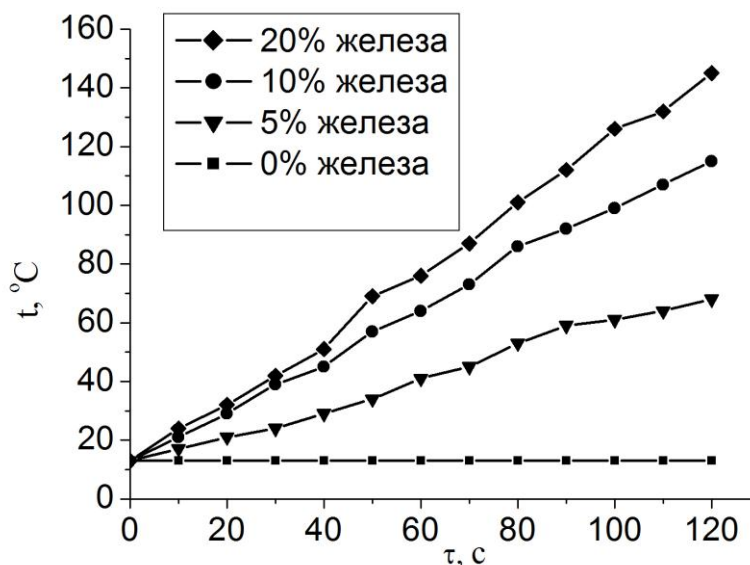


Рис. 3.23. Нагрев порошка Al_2O_3 с различным содержанием порошка железа. Выходная мощность магнетрона $P=800$ Вт. Водяной эквивалент 200 мл.

Заметного уплотнения порошков не наблюдалось, поскольку температура не превышала $300\text{ }^\circ\text{C}$. Однако можно прогнозировать, что при нагреве в микроволновой промышленной установке процесс спекания будет сопровождаться требуемым уплотнением, для чего необходимо поддерживать температуру не ниже $1400\text{ }^\circ\text{C}$ [142].

Применение порошка железа также позволило снизить температурную неравномерность между центром и краем образца (рис. 3.24), а обмуровка образца поглощающим материалом на основе сажи способствовала еще большему выравниванию температуры.

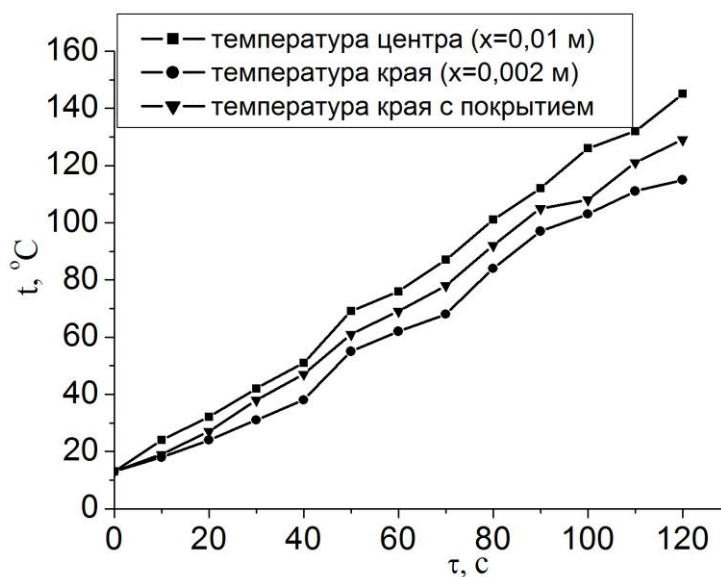


Рис. 3.24. Температура края и центра образца Al_2O_3 с 20% содержанием порошка железа при микроволновом нагреве. Выходная мощность магнетрона $P=800$ Вт. Водяной эквивалент 200 мл.

Для оценки температурного поля материала при производстве функционально-градиентных материалов из радиопрозрачных для МВ излучения материалов и материалов, способных нагреваться в МВ поле, проведены исследования на смеси порошков железа и оксида алюминия, в которой содержание железа монотонно возрастало. Вид образца до и после испытания представлен на рис. 3.25. На рис. 3.25б видно, что левый край в конце эксперимента существенно отличается по структуре от других сечений образца. Это связано с высоким содержанием железа. В конце опыта материал в этой области частично спекся, несмотря на кратковременность его проведения. Результаты измерения температур при микроволновом нагреве смеси порошков железа и оксида алюминия представлены на рис. 3.26. Для исследования возможности окончательного спекания образца и получения данных относительно рациональных режимов необходимо дополнительное оборудование и специально изготовленные ячейки.



Рис. 3.25. Нагрев порошок железа + оксид алюминия с градиентной структурой

а – порошки до смешения, б – образец с градиентным распределением железа, в – образец после микроволнового воздействия.

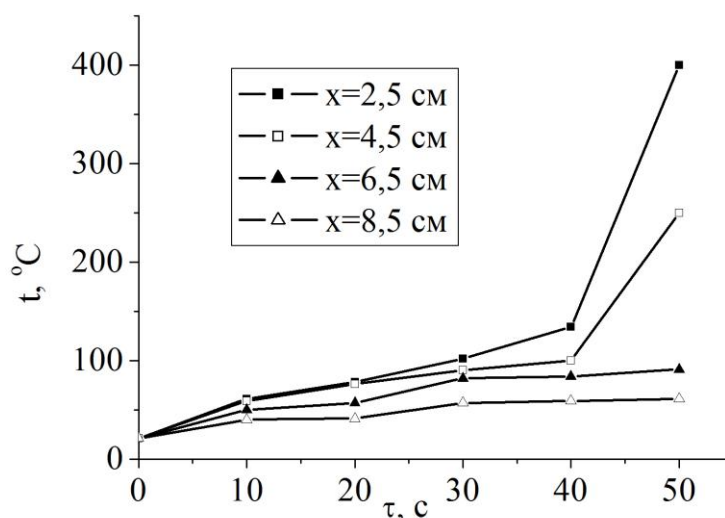


Рис. 3.26. Нагрев смеси порошков железа и оксида алюминия с градиентным распределением соотношения железа по длине образца. Выходная мощность магнетрона $P=800$ Вт. Масса Al_2O_3 – 30 г., масса порошка железа – 50 г.

В начале образца содержание порошка железа было максимально, в конце - 100 % Al_2O_3 . Видно, что на различном расстоянии от начала образца температурные кривые существенно отличаются. На расстоянии $x=2,5$ см через 50 с начался неконтролируемый разогрев материала, эксперимент пришлось прервать. В это же время на удалении от данной точки замера никаких экстремальных явлений не наблюдалось. На расстоянии $x=6,5$ см и $x=8,5$ см темп нагрева образцов после 30 с нахождения в МВ камере резко снижался, очевидно, что тепловые потоки, поступающие к этим сечениям

путем теплопроводности (поскольку Al_2O_3 в этом температурном диапазоне не воспринимает излучение микроволновой частоты) компенсируются теплоотдачей в окружающую среду.

На рис. 3.27 приведены результаты измерения температуры при нагреве композиционных образцов малой массы (7,6 г), состоящих из двух слоев пластика и слоя порошка железа, расположенного между ними (рис. 3.28,*а*). Через 80 с температура железа увеличилась до такой величины, что началась деструкция пластика (рис. 3.28,*б*). Однако при этом порошок железа и пластик оказались прочно сцепленными друг с другом.

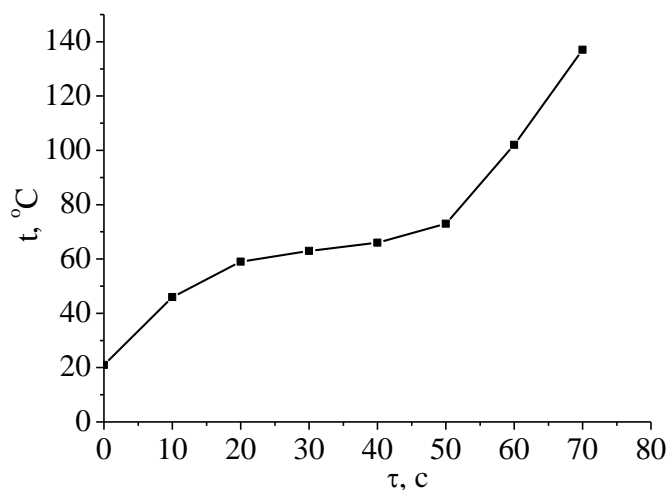
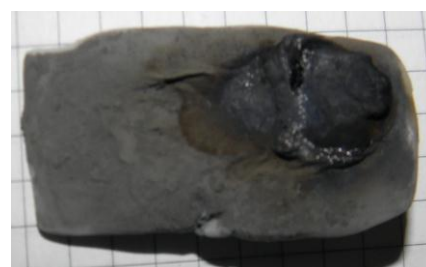


Рис. 3.27. Нагрев композиционного материала пластик – порошок железа в микроволновом поле.



а



б

Рис. 3.28 – Образцы для исследования нагрева пластика с порошком железа в микроволновом поле.

а – образец перед началом испытаний, *б* – образец через 80 с.

Очевидно, что получение композиционных материалов с применением микроволнового поля отличается эффективностью и способно привести к получению материалов с новыми свойствами. Результаты экспериментов показывают, что при производстве ФГМ следует наносить и обрабатывать слои последовательно. Чтобы избежать развития больших градиентов температур и давлений, как это происходило в эксперименте, приведенном на рис. 3.28. Соединение пластика с железом при нанесении железа на поверхность происходило интенсивно и эффективно, кроме того, можно добиться требуемой однородности структуры и прочности соединения. Образцы, состоящие из слоя пластика и верхнего слоя железа, масса которых не превышала 10 г., в течение 30 с оказывались прочно соединенными, однако наблюдалась температурная неравномерность нагрева, связанная с неомогенностью микроволнового поля внутри камеры.

3.6. Результаты анализа экспериментальных данных и их сопоставление с расчетными данными

Несмотря на то, что при проведении экспериментов не было технической возможности держать образцы в прессовом устройстве по примеру [103], данные позволили сделать несколько важных выводов. Во-первых, подтвердилось целесообразность применения поглощающего покрытия на поверхности материала (внутренней поверхности экспериментальной ячейки) для выравнивания температур по объему образца. Во-вторых, очевидно, что добавка порошков, поглощающих микроволновое излучение, например, порошкового железа, способна обеспечить требуемый температурный профиль.

На рис. 3.29 представлены температурные кривые, полученные расчетным и экспериментальным путем. Для расчета q_v принимались размеры образца: $0,15 \times 0,045 \times 0,01$ м, КПД камеры – $\eta = 0,27$. Тогда $q_v = 3,0 \cdot 10^3$ Вт/м³. Свойства смеси порошков: $\lambda = 0,17$ Вт/мК, $\rho = 2200$ кг/м³, $a = 7,75 \cdot 10^{-8}$

$\text{м}^2/\text{с}$. Принималось $\alpha=20 \text{ Вт}/\text{м}^2\text{К}$, $x=0,001 \text{ м}$, $t_a=21^\circ\text{C}$, $t_o=21^\circ\text{C}$. Пример расчета локальной температуры материала при микроволновом нагреве с помощью программы «MAPLE 15» приведен в Приложении Б.

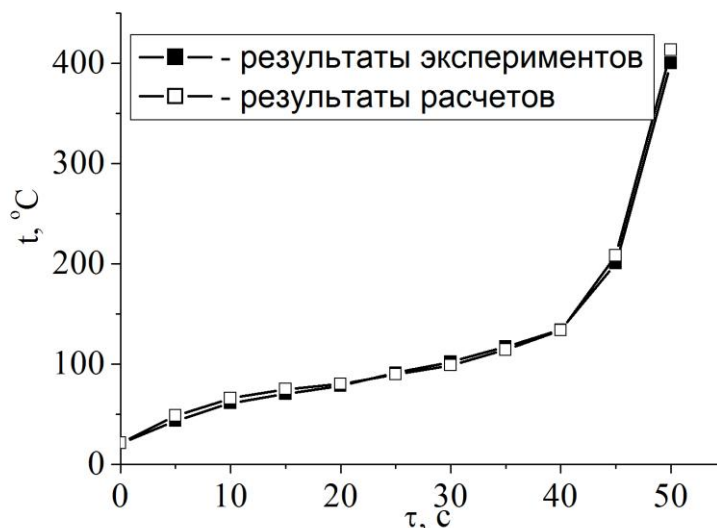


Рис. 3.29. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных для нагрева в СВ поле композиционной смеси Al_2O_3 +порошок железа 5об.%.

Коэффициент теплопроводности порошка рассчитывался как эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ по зависимости [150], применимой для умеренных (до 400°C) температур:

$$\lambda_{\text{эф}} = 3\pi\lambda_r \lg \frac{0.74 - 0.31\beta}{0.74 - \beta}, \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К}), \quad (3.10)$$

где λ_r – коэффициент теплопроводности газового компонента слоя при его средней температуре, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$; $\beta = 1 - \varepsilon$ – объемная концентрация твердого компонента (частиц) в слое.

Для расчета коэффициента температуропроводности плотного слоя применялась зависимость: $a_{\text{эф}} = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{\rho_T(1 - \varepsilon)c_T}$.

Получено, что практически полное совпадение результатов достигается при условии изменения γ_0 с течением времени, т.е. с изменением температуры материала. Можно сделать вывод, что при увеличении температуры

исследуемой смеси значение γ_0 уменьшается. В табл. 3.4 приведены данные для этого коэффициента, полученные на основании проведенного вычислительного эксперимента. При оценке значения γ_0 экспериментальное значение температуры $t_0^{\text{эксп}}$ ставилось в соответствии расчетному $t_0^{\text{теор}}$.

Таблица 3.4

Оценка значения коэффициента поглощения γ_0 по экспериментальным значениям температуры $t_0^{\text{эксп}}$ и расчетным $t_0^{\text{теор}}$

№	τ , с	$t_0^{\text{эксп}}$, °С	$t_0^{\text{теор}}$, °С	γ_0 , м ⁻¹
1	0	21	21	5,7
2	5	43	48,3	5,7
3	10	61	65,6	5,7
4	15	70	74,8	5,7
5	20	78	80,0	5,7
6	25	91	89,6	5,6
7	30	102	98,5	5,5
8	35	117	114,0	5,3
9	40	134	133,4	5,1
10	45	200	208,0	4,5
11	50	400	413,0	3,7

Для проведения расчетов требуется большая точность знания коэффициентов теплопроводности материала, теплоотдачи, диэлектрических свойств.

Проведение вычислительного эксперимента показало, что при задании величины q_{v0} следует особое внимание уделять вкладу диэлектрических характеристик. Поскольку диэлектрические характеристики композиционного порошка не были известны, они корректировались результатами вычислений. Расчеты проводились при $q_{v0}=3 \cdot 10^3$ Вт/м³. Особую сложность представляет применение полученной аналитической зависимости при расчете температурного поля материалов, подготовленных для получения ФГМ, т.е. с меняющимися по координате свойствами. Расчеты

получаются неточными в связи с тем, что значение коэффициента поглощения не определяется одной величиной, его изменение также носит градиентный характер. При проведении аналитических расчетов нагрева функционально-градиентных материалов следует применять в качестве значения коэффициента поглощения не постоянную величину, а зависимость, которая учитывает изменение диэлектрических свойств по глубине (длине) материала. Для получения вида этих зависимостей необходимо проведение дополнительных экспериментов в специализированных лабораториях.

3.7. Оценка энергетической эффективности микроволновой технологии спекания

Применение микроволнового нагрева при спекании ограничивается видами технической керамики, размеры которых относительно невелики и глубина проникновения достаточно велика, чтобы обеспечивалась равномерность распределения температур по объему. Определены виды изделий, для которых микроволновое спекание может быть целесообразным.

Примеры керамических изделий, получаемых на основе карбида кремния, представлены на рис. 3.30. Карбид кремния используется для изготовления изделий с высокими механическими характеристиками: керамических подшипников (рис.3.30а), шлифовальных насадок (рис. 3.30б), пластин для электронной и оптоэлектронной промышленности (рис. 3.30в).

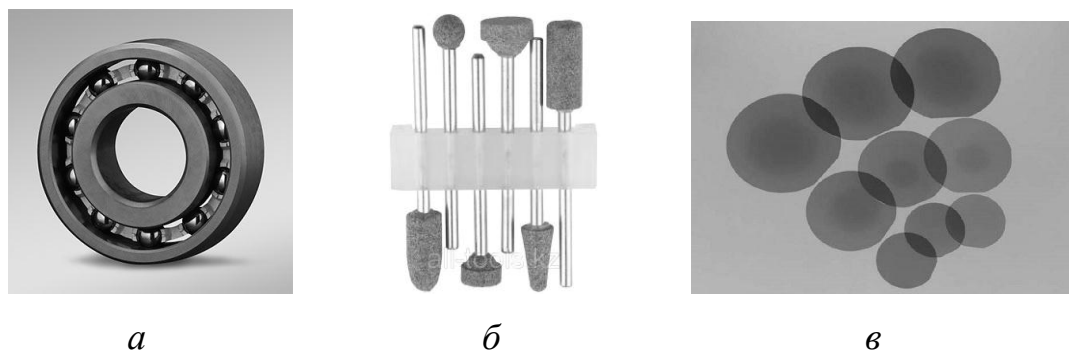


Рис. 3.30 – Техническая керамика на основе карбида алюминия
а – керамические подшипники, *б* – шлифовальный инструмент, *в* – пластины для электронной и оптоэлектронной промышленности

Изделия на основе оксида алюминия (техническая керамика имеет особые электрические свойства) метод микроволнового нагрева рационален только в комбинации с поглощающими порошками не представляется рациональным, поскольку без добавок до температуры 1100 °С микроволновое поле не поглощается.

Эффективность микроволнового нагрева при спекании рассмотрим на примере изготовления керамических подложек. В качестве исходного сырья используются порошковые материалы нитрида алюминия, оксида алюминия, нитрида кремния, оксида циркония, карбида кремния и другие. Керамические подложки используются в электронной и электротехнической области промышленности (для производства монолитных интегральных схем, микросборок, термоэлектрических элементов Пельтье и пр.). Максимальные размеры подложек: 165×165 мм, толщина подложек, от 0,25 до 3,0 мм. Такая толщина изделия позволяет предполагать, что электромагнитное поле вследствие глубины проникновения на уровне 1 см будет однородным. Форма подложек определяется потребителем. Для спекания керамических подложек IViTec предлагает конвейерную печь спекания LTCC серии FastFire II (США). Однако температурный уровень в этой печи не соответствует температуре спекания рассматриваемых порошков (для защиты от деформации рабочая температура ограничена 1150 °С): так, для спекания оксида алюминия $T_{сп}=1450$ °С [148]. Известна фирма MARUWA – Integrating Ceramic Technologies, использующая печи камерного типа, в которых температура может достигать 1600 °С.

Максимальная скорость остывания – менее часа с температуры 1100 °С до температуры ниже 100 °С. Подача холодного воздуха внутрь камеры во время выполнения термического цикла не производится.

Быстрый нагрев: макс. 60 °С/мин (1 °С/с), охлаждение от 1000 °С до менее 100 °С в течение 60 минут, при незагруженной печи.

Основные характеристики печи:

– максимальная длительность обжига – 240 мин.;

– номинальная мощность при загрузке 50 кг – 60 кВт.

В расчете принималось, что толщина изделий $\delta=3\cdot 10^{-3}$ м.

При микроволновом нагреве: темп нагрева $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{с}$, рабочий уровень температур может быть снижен на $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в соответствии с [19]), а длительность спекания в МВ поле составляет 60 мин [103]. Охлаждение начинается сразу после выключения магнетронов и определяется условиями взаимодействия с окружающей средой. В соответствии с зависимостями для неограниченной пластины [11], при естественной конвекции и для аналогичной загрузки камеры температура от $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ снизиться в течение 520 с, что сокращает длительность технологического процесса на этапе спекания.

Сравнительная характеристика кинетики спекания для традиционного нагрева и микроволнового схематично изображена на рис. 3.31.

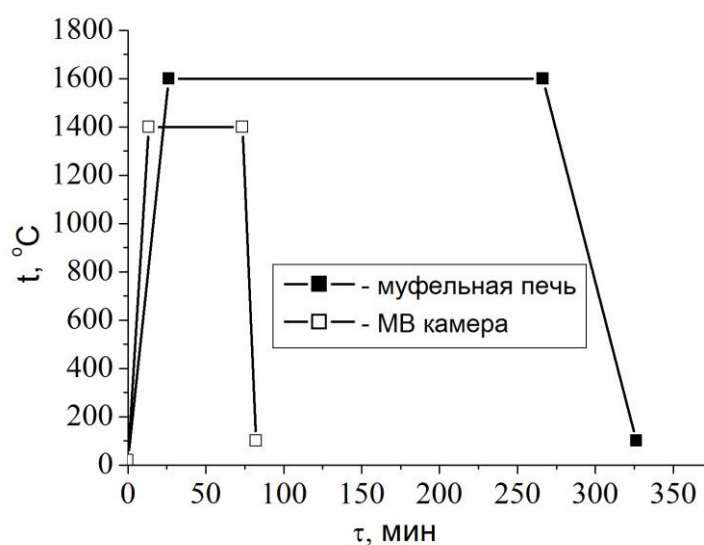


Рис. 3.31. Кинетика спекания керамических подложек при традиционном и микроволновом нагреве.

Длительность выдержки керамических подложек в муфельной печи составляла 326,3 мин., в микроволновой камере – 82,2 мин. Таким образом, интенсивность процесса увеличилась в 4 раза.

Затраты энергии для муфельной печи составляли $Q=0,959$ ГДж, для микроволновой камеры - $Q=0,60$ ГДж. При расчете принималось, что КПД микроволновой камеры составляет $\eta_k=67\%$, КПД магнетрона составляет

$\eta_m=66$ %, а муфельная печь является электрической. Тогда затраты энергии при переходе на МВ технологию на этапе обжига при производстве керамических подложек сократятся в 1,6 раза, или энергоэффективность выражается в экономии 37% электроэнергии при переходе на микроволновой нагрев. В расчете учитывалось время нагрева и выдержки изделий, т.е. 266,3 мин для муфельной печи и 73,5 мин для микроволновой камеры.

Выводы к разделу 3

1. Нагрев в микроволновом поле $\text{Al}_2\text{O}_3+10\% \text{SiC}$ позволяет достичь уровня темпа нагрева, получаемого при электроимпульсном плазменном спекании 1,7 К/с.

2. При микроволновом нагреве образцов неравномерность температуры очень велика. Отклонение температуры по толщине для открытой пластины карбида кремния толщиной 10 мм может достигать 27 %. Отклонение между и центром и краем (расстояние 1,75 см) образцов массой до 5 г достигает 50%.

3. Применение в качестве связующего лигносульфоната при микроволновой обработке порошков показывает, что вследствие его хороших диэлектрических свойств нагрев в микроволновом поле проходит интенсивно, причем начиная с температуры 320 °С темп нагрева усиливается, что связано с увеличением диэлектрических характеристик продуктов термораспада.

4. Нагрев в микроволновом поле композиционных керамик на основе оксида алюминия при добавке порошка карбида кремния и АСТ в качестве связующего может быть рекомендован для сокращения цикла спекания оксидных порошков при получении износостойких керамик.

5. Увеличение равномерности нагрева в микроволновой камере может быть достигнуто за счет покрытия внутренней поверхности формы или поверхности материала веществом, эффективно поглощающим микроволновое излучение, к примеру, сажей.

6. Нагрев в МВ поле оксида алюминия с водным раствором ПВС в качестве связующего продолжается до тех пор, пока вода не испарится из образца. В дальнейшем температура образца снижается, микроволновое излучение не преобразуется во внутреннюю энергию материала.

7. Нагрев порошка карбида кремния со связующим ПВС показывает меньшую температурную неравномерность между краем и центром образца в сравнении с оксидом алюминия: от 19 % для SiC до 36 % для Al_2O_3 .

8. Нагрев порошков карбида кремния различной дисперсности для фракций F100, F240, F600, F1200 в микроволновом поле показывает, что уменьшение размера частиц для неспрессованных образцов приводит к снижению величины поглощения микроволновой энергии. Так, через 170 с нагрева в микроволновой камере температура образца F100 составляла 82°C, F240 – 73°C, F1200 – 65 °C.

9. Увеличение дисперсности порошков способствует снижению температурной неравномерности по объему образцов.

10. Нагрев образца из смеси порошков карбида кремния F600 и оксида алюминия F800 в МВ поле характеризует относительно невысокий темп нагрева – 0,86 К/с до $\tau=50$ с, после чего темп нагрева снижается и становится практически равным нулю вследствие наступления стационарного режима.

11. Экспериментальные данные демонстрируют низкий процент преобразования микроволновой энергии во внутреннюю энергию материала. Для увеличения КПД камеры при промышленном производстве необходимо изменить ее конструкцию, обеспечив направленный поток непосредственно на образец. Увеличение КПД камеры резонансного типа происходит при увеличении загрузки камеры до оптимальной.

12. При проведении аналитических расчетов нагрева функционально-градиентных материалов следует применять в качестве значения коэффициента поглощения не постоянную величину, а изменяющуюся в зависимости от состава материала.

РАЗДЕЛ 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ МВ ПОЛЯ НА ГЛИНУ

4.1. Особенности процесса обжига изделий из глины

Обжиг глины (керамической массы) преследует цели: а) сушку (удаление гигроскопически связанной влаги), б) спекание материала. В технологии производства керамических изделий из глины перед обжигом их требуется просушить в течение 2 – 7 дней в зависимости от величины изделия. С целью сокращения технологического процесса рассматривалась возможность их сушки с использованием энергии микроволнового поля. Для исследований была использована предварительно подготовленная и увлажненная глина. Химический состав глины представляет собой синтез глинообразующих минералов природных окисей алюминия (глинозема), кремния (кремнезема) и водорода (воды). В чистом виде без примесей и добавок глина в природе практически не встречается. Добываемое для производства гончарных изделий сырье наряду с главными компонентами (т.е. «чистой» глиной) включает в себя также окиси марганца и железа, углекислой извести и некоторые другие химические соединения. Анализ химического состава глины позволяет предположить, что ее обработка в микроволновом поле может открыть новые положительные эффекты.

Правильный подбор режимов сушки во многом определяет качество конечного изделия. При сушке глины происходит не только снижение влажности, но и изменение ее физико-механических свойств. Пересушенная до потери химически связанной воды глина теряет связующую способность. Неравномерная влажность вызывает растрескивание при сушке и при обжиге. Скрытые дефекты формования (например, свиль) могут быть причиной трещин, а пересушенные изделия не выдерживают легких ударов из-за хрупкости.

Существенную роль в процессе микроволнового нагрева играют теплофизические свойства обрабатываемого образца, поскольку эффективность и равномерность нагрева зависит не только от диэлектрических свойств образца, но и от его способности распределять выделившуюся теплоту по своему объему.

4.2. Методика экспериментального исследования термообработки глины в микроволновом поле

Методика эксперимента состояла в следующем:

- 1) из предварительно замоченной глины формируются пластинки равной толщины;
- 3) вспомогательным трафаретом вырезаются одинаковые по площади образцы;
- 4) полученный образец взвешивается (рис. 4.1);
- 5) глиняный образец помещается в МВ установку, где он выдерживается под действием МВ поля промежутков времени Δt ;
- 6) через время Δt образец извлекается из рабочей камеры, после чего на протяжении короткого промежутка времени проводятся измерения температуры на поверхности образца (рис. 4.2), в него центре (рис. 4.3) и края (рис. 4.4), а также масса керамического изделия;
- 7) следующий подготовленный образец помещается в МВ установку и выдерживается промежутков времени, больший предыдущего на Δt ;
- 8) процедура обработки с дальнейшими измерениями температуры и массы повторяется до тех пор, пока его масса не стабилизировалась;
- 9) после выдержки $\Sigma \Delta t$, когда изменение массы не наблюдается, эксперимент прекращается.

Поскольку непосредственно во время опытов измерять температуру и массу было невозможно, предполагалось, что каждый последующий образец будет выдерживаться в камере на выбранный шаг времени Δt больше

предыдущего, а по результатам измерения температуры и массы, полученным во время выемки очередного образца, получались данные для МВ нагрева единичной пластины. Погрешность не увеличилась при использовании одного образца, если измерения проводить в течение короткого промежутка времени, при этом образец практически не остывал. Начальная толщина образца составляла (6,9 – 7) мм. Было замечено, что температура центра образца и поверхности существенно отличались, несмотря на то, что расстояние между ними составляло 3,5 мм.

4.3. Экспериментальное исследование сушки глинистого материала и анализ полученных результатов

На рис. 4.1-4.7 представлены фотографии, отражающие этапы экспериментального исследования.



Рис. 4.1. Взвешивание глиняного образца

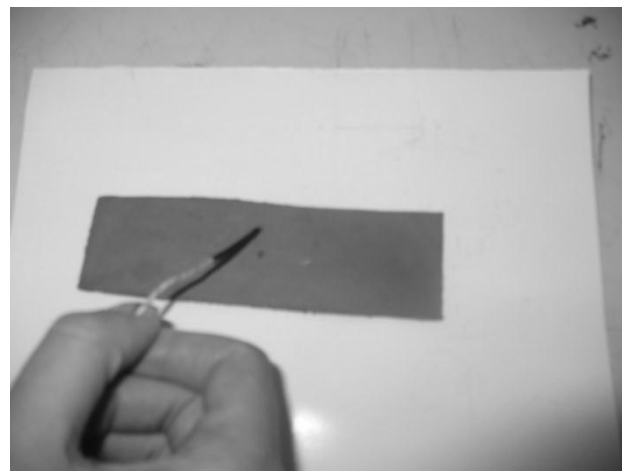


Рис. 4.2. Определение температуры поверхности

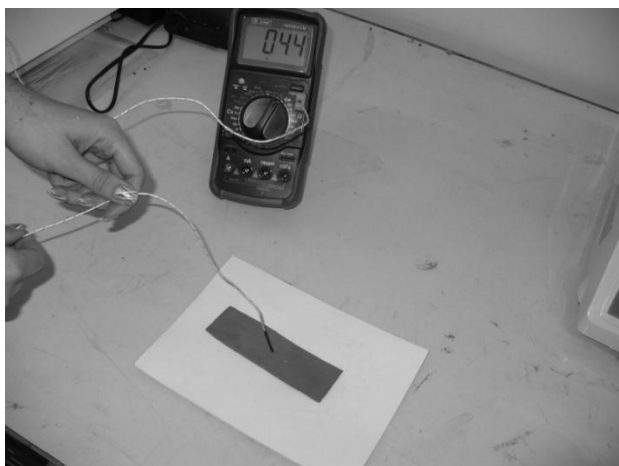


Рис. 4.3. Определение температуры в центре

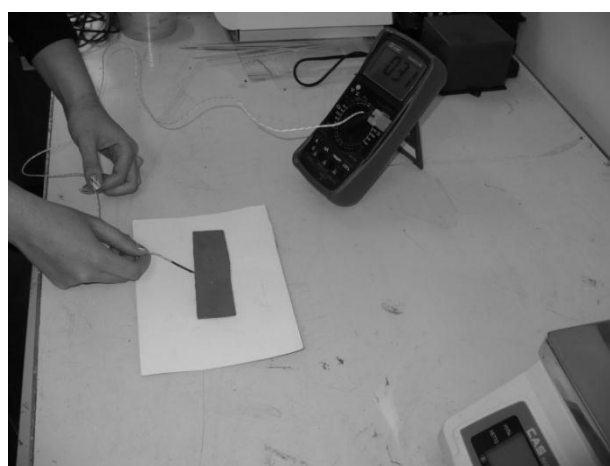


Рис. 4.4. Определение температуры на границе



Рис. 4.5. Жесткий режим МВ сушки.
P=300 Вт



Рис. 4.6. Оптимальный режим МВ сушки. P=90 Вт



Рис. 4.7. Конечный результат эксперимента при P=180 Вт

Получено, что в жестком режиме сушки (P=300 Вт) микроволновая

сушка приводила к изменению формы образца (рис. 4.5). При $P=180$ Вт поверхность образца не нарушалась, однако на изломе было видно, что его внутренняя структура неоднородна (рис. 4.7). В оптимальном режиме (рис. 4.6) образец заданной формы в конце сушки характеризовался однородностью структуры.

Результаты исследований, полученные на образцах одинаковой геометрии и проводимые в идентичных условиях, за исключением выходной мощности магнетрона, представлены в табл. 4.1-4.3.

Сравнивая № 4 и № 5 в табл. 4.1, можно отметить, что центр несколько охладился, однако температура поверхности и края снизились. Это связано с тем, что влага из центра уже полностью удалась, а оставшаяся сконцентрировалась в поверхностных слоях, в связи с чем диэлектрические характеристики будут выше и поглощение микроволновой энергии в некоторой мере продолжается. В дальнейшем и центр, и поверхность охлаждаются, микроволновая энергия перестает поглощаться материалом.

Таблица 4.1

Экспериментальное исследование нагрева глиняной пластины в МВ поле.

Выходная мощность магнетрона 80 Вт

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
τ , с	0	30	60	90	120	150	180	210	240
$t_{\text{пов}}$, °С	21	80	67	78	103	137	115	117	113
$t_{\text{цен}}$, °С	21	83	75	109	152	175	147	151	141
$t_{\text{кр}}$, °С	21	63	54	70	96	110	108	100	106
m , кг	0,064	0,056	0,050	0,046	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044

Таблица 4.2

Экспериментальное исследование нагрева глиняной пластины в МВ поле.

Выходная мощность магнетрона 180 Вт

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
τ , с	0	30	60	90	120	150	180	210	240
$t_{\text{пов}}$, °С	21	85	89	84	85	125	134	123	127
$t_{\text{цен}}$, °С	21	87	93	98	96	186	159	164	152
$t_{\text{кр}}$, °С	21	75	87	85	86	119	130	116	127
m , кг	0,064	0,051	0,049	0,045	0,045	0,044	0,044	0,044	0,044

При большей мощности магнетрона (табл. 4.3) влага быстрее удаляется из материала: так, при $\tau=90$ с образец принял массу, соответствующую сухому материалу.

Таблица 4.3

Экспериментальное исследование нагрева глиняной пластины в МВ поле.

Выходная мощность магнетрона 240 Вт

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
τ , с	0	30	60	90	120	150	180	210	240
$t_{\text{пов}}$, °С	21	97	151	163	154	147	139	127	119
$t_{\text{цен}}$, °С	21	103	165	165	156	148	136	129	121
$t_{\text{кр}}$, °С	21	92	146	159	153	144	137	128	118
m , кг	0,066	0,049	0,047	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045

По экспериментальным данным было определено начальное влагосодержание материала, с учетом того, что в конце опыта образец полностью высох. Тогда начальное влагосодержание составляло

$$u = \frac{m_{\text{вл}}}{m_c} = \frac{0,064 - 0,044}{0,044} = 0,455 \text{ кг/кг.}$$

Здесь $m_{\text{вл}}$ – начальная масса воды

(влаги) в материале, m_c – масса сухого материала.

Средний темп нагрева материала в описываемом эксперименте составлял 1,03 К/с (61,6 К/мин), что выше значений, полученных в [147] для микроволнового нагрева, и существенно превышает величину,

рекомендуемого для конвективного нагрева: на уровне 0,5 К/с. При этом не наблюдалось образования трещин и деформации формы образца. Это связано с непрерывным увлажнением поверхности влагой, которая под действием МВ поля выходила на поверхность, благодаря чему она не пересыхала и механические напряжения не возникали. Наивысшая скорость сушки наблюдалась в первые 30 с, после чего наблюдалось ее падение. Наивысшая скорость нагрева была в этом же периоде и составляла $\frac{\Delta t}{\tau} = 2,07$ К/с, затем температура падает вследствие испарения влаги, после чего снова начинает повышаться. В интервале 90 – 120 с скорость нагрева также была высокой, однако, вследствие значительной потери влаги, ее значение было ниже первоначального: $\frac{\Delta t}{\tau} = 1,43$ К/с. Далее темп нагрева снижается, а после 150 с температура образца начинает падать. На этом же участке, как отмечено выше, испарение влаги прекратилось. Результаты экспериментов представлены на рис. 4.8. Отсутствие нагрева можно объяснить снижением диэлектрических характеристик материала – тангенса угла потерь и диэлектрической проницаемости, вследствие чего количество микроволновой энергии, преобразованной материалом во внутреннюю энергию, резко снижается и образец начинает остывать, не воспринимая падающую на него энергию микроволнового поля. Следовательно, сам материал не является полярным диэлектриком, и дальнейшая его обработка в МВ камере нецелесообразна. Таким образом, микроволновой нагрев следует осуществлять только на этапе сушки глиняных изделий, а в дальнейшем обжиг проводить с использованием традиционных методов. При производстве технической керамики возможен обжиг в микроволновой печи, поскольку химический состав материала для ее изготовления позволяет интенсивно преобразовывать энергию микроволнового поля во внутреннюю.

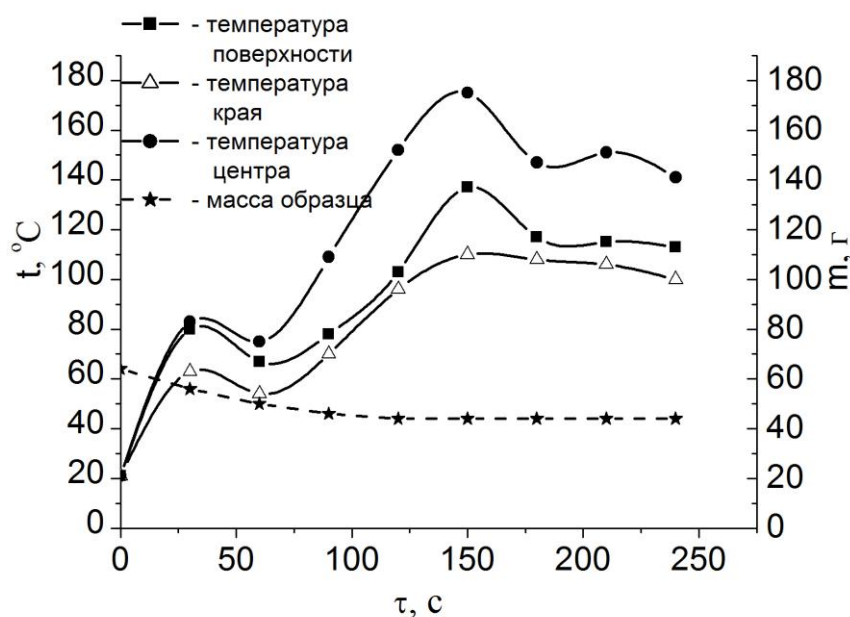


Рис. 4.8. Изменение температуры и массы образца (глина) при микроволновом нагреве. Выходная мощность магнетрона $P=80$ Вт

График (рис. 4.8) показывает, что нагрев проходит интенсивно, однако неравномерно во времени. Температурные кривые, приведенные на рис. 4.8. свидетельствуют о колебательном характере изменения температуры с существенной амплитудой колебаний. Это явление не является желательным при обработке материала. Для подбора оптимальных режимов были проведены эксперименты при других массах загрузки и при других значениях выходной мощности магнетрона (Приложение В). Пример такого режима, при котором будет обеспечиваться равномерность нагрева (для исследуемой формы), приведен в табл. 4.4. Эксперимент проводился при выходной мощности магнетрона 180 Вт с водяным эквивалентом. Темп нагрева в этом режиме в среднем составлял $0,125$ К/с. Скорость сушки также была невысокой: порядка $N=4,84 \cdot 10^{-4}$ с⁻¹. Можно сделать вывод, что сушка в микроволновом поле образцов из глины не должна быть высокоинтенсивной, тем не менее, ее скорость намного выше в сравнении с традиционной технологией.

Таблица 4.4

Экспериментальное исследование нагрева глиняной пластины с водяным эквивалентом (200 мл) в МВ поле. Выходная мощность магнетрона 180 Вт

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
τ , с	0	30	60	90	120	150	180	210	240
$t_{\text{пов}}$, °С	21	24	29	32	39	45	49	54	58
$t_{\text{цен}}$, °С	21	26	31	37	42	48	52	57	61
$t_{\text{кр}}$, °С	21	24	28	29	38	43	47	51	55
m , кг	0,065	0,064	0,064	0,064	0,063	0,062	0,060	0,059	0,059

Эксперименты на образцах большей толщины ($\delta \geq 30$ мм) показали, что при нагреве со скоростью выше 0,5 К/с в материале возникают трещины, поверхность становится неоднородной, а испарившаяся в объеме влага формирует внутренние микроканалы, вследствие чего наблюдается существенная неравномерность процесса спекания.

4.4. Оценка энергетической эффективности микроволновой сушки глины

Для оценки энергетической эффективности проводились тепловые расчеты, в которые входил расчет полезного теплового потока, определяемого теплотой испарения влаги и нагрева материала (4.1) и потери теплоты, определяемые лучистой $Q_{\text{луч}}$ и конвективной $Q_{\text{конв}}$ составляющей

$$Q_{\text{пол}} = \left[\Delta m \cdot r + \frac{m_0 + m_k}{2} c_{\text{вл.м}} (t_k - t_0) \right] / \tau, \text{ Вт}, \quad (4.1)$$

где $c_{\text{вл.м}}$ – теплоемкость влажного материала, Дж/(кг·К).

Показателями, характеризующими режимы работы МВ аппаратов, являются эффективность использования электроэнергии и мощность $Q_{\text{пол}}$, которая расходуется на повышение температуры образца и испарение влаги.

Эти показатели определяют коэффициенты полезного действия магнетрона η_m и камеры η_k . КПД магнетрона определяется следующим соотношением:

$$\eta_m = P_{вых} / P_c, \quad (4.2)$$

где η_m – КПД магнетрона, который определяется его техническими характеристиками, P_c - мощность, потребляемая от сети.

Для определения перечисленных параметров необходимо знать тепловую энергию $Q_{обр}$, ее долю на нагрев самого образца $Q_{обр}$, полезно используемую теплоту $Q_{пол}$, а также потери в окружающую среду Q_n за счет лучистого $Q_{луч}$ и конвективного $Q_{кон}$ теплообмена, потери на нагрев диэлектрической ячейки $Q_я$ и на испарение $Q_{исп}$:

$$Q_{пол} = Q_{обр} + Q_{кон} + Q_{луч} + Q_я + Q_{исп} \quad (4.3)$$

При диэлектрическом нагреве под действием электромагнитного поля контейнеры, воздух и стенки рабочей камеры практически не нагреваются. Но в связи с возникновением в результате нагрева перепада температур между обрабатываемым изделием и окружающей средой возникают теплотери. Следовательно, тепловую энергию, генерируемую в образце, можно определить как сумму ее составляющих:

$$Q_{обр} = Q_{пол} + Q_n \quad (4.4)$$

Коэффициент полезного действия камеры определяется следующим образом:

$$\eta_k = Q_{пол} / P_{вых} \quad (4.5)$$

С увеличением потерь теплоты снижается коэффициент использования тепловой энергии η_T , который определяется следующим соотношением:

$$\eta_T = Q_{пол} / Q_n \quad (4.6)$$

Потери в окружающую среду за счет конвективного теплообмена:

$$Q_{кон} = \alpha \cdot \Delta t \cdot F \quad (4.7)$$

где α – коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции; Δt –

разность температур поверхности тела и окружающей среды, F – площадь теплопередающей поверхности.

Потери в окружающую среду за счет лучистого $Q_{луч}$:

$$Q_{луч} = \varepsilon \cdot C_o \cdot \left[\left(\frac{T_M}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{o.c.}}{100} \right)^4 \right] \cdot \varphi_{1-2} \cdot F \quad (4.8)$$

где ε – степень черноты, $\varepsilon = 0,932$; C_o – постоянная излучения абсолютно черного тела, $C_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К}^4)$; φ_{1-2} – средний угловой коэффициент поверхности F_1 относительно поверхности F_2 , $\varphi_{1-2} = 1$.

Потери в окружающую среду за счет испарения:

$$Q_{исп} = \frac{m_{вод} \cdot r}{\tau}, \quad (4.9)$$

где $m_{вод}$ – масса испарившейся воды, кг; r – теплота парообразования; τ – время нагрева, с. Результаты расчета КПД камеры в зависимости от массы загрузки глины приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Результаты расчета КПД камеры в зависимости от массы загрузки глины.

$P=180 \text{ Вт}$. Водяной эквивалент $V=200 \text{ мл}$, $\tau=240 \text{ с}$

№	$m, \text{ кг}$	$t_k, ^\circ\text{C}$	$Q_{пол}, \text{ Вт}$	$Q_l, \text{ Вт}$	$Q_k, \text{ Вт}$	$Q_n, \text{ Вт}$	η_k
	1	2	3	4	5	6	7
1	0,06	58	25,40	1,30	6,9	33,60	0,19
2	0,08	47	36,02	2,08	10,5	48,60	0,27
3	0,12	41	36,44	3,10	11,7	51,24	0,28
4	0,20	39	46,30	5,00	18,1	69,40	0,39
5	0,24	38	54,30	7,90	22,0	84,20	0,47
6	0,50	34	67,40	10,60	27,4	102,40	0,57
7	0,75	32	63,50	11,20	27,0	101,70	0,57
8	1,0	27	58,30	12,60	28,3	99,20	0,55

4.5. Анализ теплового эффекта взаимодействия материала с микроволновым электромагнитным полем

Удельная мощность, выделяющаяся в виде тепла в единице объема материала под действием микроволнового поля, связана с его диэлектрическими характеристиками, частотой МВ поля и напряженностью [119] и выражается уравнением (4.10):

$$q = 5,56 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2, \text{ Вт/м}^3 \quad (4.10)$$

Для оценки напряженности E и определения ее зависимости от формы образца, его массы и диэлектрических характеристик, можно использовать эту формулу и данные экспериментов, в которых следовало измерить изменение температуры Δt материала массой m и теплоемкостью c , изменение массы за счет испарения Δm (если этот процесс имел место). Из уравнения теплового баланса (без учета потерь в окружающую среду) можно определить значение напряженности электрического поля [146]:

$$E = \sqrt{\frac{Q_{\text{пол}}}{5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \varepsilon' \cdot \operatorname{tg} \delta}}, \text{ В/м} \quad (4.11)$$

Точность расчета E зависит также от точности определения величин диэлектрических постоянных и от равномерности распределения электромагнитного поля в материале.

Для исследования особенностей поглощения микроволновой энергии представляет интерес изучение зависимости величины поглощенной микроволновой энергии от загрузки камеры. Ниже приводятся результаты экспериментов, проведенных на дистиллированной воде при начальной температуре 20 °С при изменении ее массы от 0,05 до 1,1 кг. Выходная мощность микроволнового источника составляла 800 Вт. Здесь КПД – коэффициент полезного действия, представляющий собой отношение поглощенной энергии к выходной мощности магнетрона.

Результаты экспериментов показывают, что с ростом массы загрузки общий КПД непрерывно возрастает, достигая своего максимального значения, что позволяет говорить о достижении оптимальной загрузки данной камеры [151].

Эффективность поглощения микроволновой энергии у воды заметно выше, чем у глины, диэлектрические свойства которого хуже. Это отражается также в значениях КПД. Таким образом, микроволновая энергия, поступающая от генератора, используется недостаточно полно. Однако ранее это явление связывалось с потерями в окружающую среду. В то же время анализ данных табл. 4.6 показывает, что для образцов с одинаковой массой в образце с меньшей толщиной потери теплоты меньше, количество энергии, преобразованной в тепловую, меньше, КПД меньше, при этом температура образца ниже.

Для оценки теплового эффекта взаимодействия микроволнового поля с материалом нужны знания диэлектрических характеристик, таких как относительная диэлектрическая проницаемость ε' , тангенс угла потерь $tg\delta$ и коэффициент потерь $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot tg\delta$. Теоретические представления о диэлектрических характеристиках не дают возможность их определения расчетным путем, поэтому необходимо проведение экспериментов, целью которых являлось измерение указанных диэлектрических характеристик.

Значения и $tg\delta$ зависят от температуры материала, влажности, насыпной плотности, состава, содержания добавок. Для определения значений этих величин проводились измерения резонансной частоты и добротности специального резонатора с материалом и без него, с последующими вычислениями ε'' и $tg\delta$. Диэлектрические характеристики для различных видов материалов с различной влажностью и плотностью были измерены на стенде [152], методика расчета соответствовала [153].

Результаты показывают, что с увеличением влажности диэлектрическая проницаемость ε' глины возрастает. Величина фактора потерь, определяемая произведением $\varepsilon'' = \varepsilon' \cdot tg\delta$, для глины с начальным влагосодержанием 40%

находится в пределах $\varepsilon'' = 3,65 \div 4,15$. Для сравнения, вода при температуре 25 °С имеет значения $\varepsilon' = 78$, $\operatorname{tg} \delta = 0,16$, или $\varepsilon'' = 12,5$ [119]. Таким образом, интенсивность преобразования микроволновой энергии в тепловую для воды в несколько раз выше, чем для глины с исследуемым начальным влагосодержанием.

Напряженность электрического поля зависит от мощности электромагнитного поля, которая затухает вследствие поглощения по глубине слоя, и от длины волны, которая определяется диэлектрическими свойствами среды [112]. Эти неравномерности и являются причиной перегрева одних участков материала и недостаточного нагрева других. Неравномерность распределения существенно зависит от распределения температуры и влажности в нагреваемом материале, причем эта зависимость усложняется тем, что температура и влажность, в свою очередь, существенно зависят от источников тепла, и, следовательно, от ε' и E . От температурного поля в материале зависит перемещение влаги и, следовательно, температурное поле оказывает влияние на поле влажности. Изменение температуры и влажности приводят к изменению механических напряжений и деформаций, иногда сопровождающихся растрескиванием и разрушением материала.

При толщине образца, превышающей удвоенное значение глубины проникновения, равномерность распределения температуры и влагосодержания будет существенно нарушена при любых условиях [119]. Для оценки глубины проникновения СВ поля в слой можно воспользоваться известными теоретическими зависимостями [119]. Коэффициент ослабления α с учетом полученных данных по диэлектрическим характеристикам можно рассчитать по следующей зависимости:

$$\alpha = \frac{2\pi}{\lambda_0} \left[\frac{1}{2} \cdot \varepsilon' \left[\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta} - 1 \right] \right]^{1/2}, \quad (4.12)$$

где λ_0 – длина электромагнитной волны в вакууме.

Для МВ поля с частотой 2450 МГц $\lambda_0=12,24$ см. Диэлектрические характеристики, для которых определялось значение коэффициента ослабления, соответствовали значениям для глины при температуре 20 °С и влагосодержании 0,455 кг/кг, $\varepsilon'=11,2$, $tg\delta=0,31$.

Видно, что для расчета теплоты, преобразованной в тепловую при действии микроволнового поля (4.1), не хватает данных по среднему значению напряженности электрического поля E . Расчеты величины E , проведенные по зависимостям, предложенным в [112], получены с большой погрешностью вследствие неопределенности значений электропроводности и некоторых других коэффициентов. Кроме того, существующие методики рассматривают стационарное тепловое состояние. Для получения знаний о характере изменения величины напряженности при изменении формы и объема загрузки пришлось вернуться к тепловому методу. Данные расчета напряженности электрического поля по зависимости (4.10) приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Среднее значение напряженности электрического поля в дисперсном материале при различной массе засыпки m , площади поверхности образца

$F_{\text{пов}}$ и толщины слоя l . t – конечная температура материала

№ опыта	m , кг	$F_{\text{пов}} \cdot 10^3$, м ²	t , °С	l , м	$Q_{\text{пол}}$, Вт	E , В/м
1	0,05	18,4	60	0,008	41,8	141,7
2	0,06	15	68	0,016	46,35	136,3
3	0,1	18,4	75	0,016	61,18	121,3
4	0,15	28,6	65	0,016	63,04	100,5
5	0,2	39,6	55	0,009	65,8	88,9
6	0,2	29,4	83	0,032	92,5	105,4
7	0,31	59,8	47	0,009	65,2	71,1
8	0,31	33,2	90	0,048	113,2	93,7

При одинаковой массе напряженность электрического поля выше в образцах с большей толщиной. Этот результат на первый взгляд казался противоречащим теории. Действительно, можно было предполагать, что образцы с меньшей толщиной слоя и, соответственно, большей поверхностью, будут иметь большую среднюю напряженность электрического поля, чем в образцах с меньшей открытой поверхностью и большей толщиной, поскольку чем больше поверхность, тем больше микроволновой энергии попадает на образец. При прохождении вглубь образца микроволновая энергия уменьшается вследствие поглощения. Остаточная МВ энергия, пройдя через слой образца и не поглощенная материалом, отразившись от стенок камеры, попадет обратно в магнетрон. Расчет среднего значения напряженности электрического поля может быть произведен по зависимости:

$$\bar{E} = \sqrt{\frac{P_{\text{вых}} \cdot \eta_{\text{к}}}{(5,56 \cdot 10^{-11} f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta) \cdot V}} \quad (4.13)$$

где $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность магнетрона, $\eta_{\text{к}}$ – КПД микроволновой камеры. Значение $\eta_{\text{к}}$ находится по соответствующим эмпирическим зависимостям.

Тогда для оценки теплоты, преобразованной в материале при взаимодействии микроволнового поля, можно применить следующую зависимость:

$$q = \frac{P_{\text{вых}} \cdot \eta_{\text{к}}}{V}, \text{ Вт/м}^3, \quad (4.14)$$

где V – объем, занимаемый материалом. Для проведения расчетов следует располагать знаниями по КПД камеры, в котором должны учитываться объем материала, его толщина (высота) и площадь открытой поверхности, на которую падает электромагнитное поле.

При изменении массы глиняного образца от 0,06 кг до 0,9 кг и изменении относительного объема $V_{\text{обр}}/V_{\text{к}}$ от 0,003 до 0,09 КПД камеры при

толщине слоя $7 < l < 30$ мм описывается с погрешностью $\pm 14\%$ соотношением:

$$\eta_{\kappa} = 0,72 \cdot \left(1 - e^{-203 \cdot (V_{\text{обр}} / V_{\kappa})} \right) \cdot \left(\frac{u}{0,46} \right)^{0,35} \quad (4.15)$$

Зависимость отражает тот факт, то уменьшение массы загрузки и снижение влагосодержания u образца приводит к снижению КПД камеры.

Аналитические расчеты локальных температур по полученной зависимости [154] для глины с начальным влагосодержанием $u=46\%$ приводят к большой погрешности, поскольку не учитывается влияние потока испарившейся влаги на теплообмен. Для получения информации о распределении температур в глине при сушке можно применять зависимость [155]. В эту зависимость входит скорость сушки, определяемая эмпирической формулой. Для глины на основании обобщения экспериментальных данных скорость сушки в первом периоде описывается следующей зависимостью:

$$N = 8,72 \cdot 10^{-5} (q_m)^{0,214} \cdot (\delta / \delta_0)^{1,16}, \quad (4.16)$$

где δ – начальная толщина слоя, δ_0 – реперное значение, принятое при выводе этой зависимости $\delta_0 = 7 \cdot 10^{-3}$ м.

Значение удельного теплового потока q_m (в расчете на кг массы материала) определялось с учетом КПД микроволновой камеры, которое при массе $m = 0,065$ кг и для начального влагосодержания $u = 0,455$ составляло $\eta = 0,26$. Эмпирическая зависимость описывает данные с относительной погрешностью 17% для диапазона изменения толщины слоя $0,005 \leq \delta \leq 0,03$ м и при $q_m = 11 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$ Вт/кг. Большие значения удельной мощности приводили к возникновению неустойчивого режима, который выражался в колебательном характере изменения массы и температуры материала.

Результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных представлены в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Сопоставление экспериментальных и расчетных значений температур на поверхности глиняной пластины. $m=0,064$ кг

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$\tau, \text{с}$	0	30	60	90	120	150	180	210	240
Выходная мощность магнетрона 80 Вт									
$t^э, ^\circ\text{C}$	21	60	67	78	103	137	115	117	113
$t^р, ^\circ\text{C}$	21	45	70	100	140	-	-	-	-
Выходная мощность магнетрона 180 Вт									
$t^э, ^\circ\text{C}$	21	85	89	84	85	125	134	123	127
$t^р, ^\circ\text{C}$	21	56	103	141	179	-	-	-	-

Расчет проводился до времени $\tau=150$ с, поскольку далее скорость сушки имела падающий характер и зависимость (4.16), используемая в формуле [153] для расчета отрицательного источника теплоты, не могла быть применена. Кроме того, как видно, после 30 с экспериментальное значение температуры выше расчетного, что связано с меньшим значением скорости сушки, получаемого по зависимости (4.16). Это связано с периодом прогрева материала, в течение которого испарение пренебрежимо мало. На этом участке для расчета температуры можно пользоваться полученной в данной работе зависимостью [152]. Зависимость (2.35) можно применять, учтя снижение мощности положительного источника теплоты за счет испарения влаги: $q'_v = q_{v0} - \rho \cdot N \cdot r$, где q'_v - мощность внутренних источников теплоты с учетом испарения влаги, N - скорость сушки, ρ - плотность материала, r - удельная теплота испарения воды.

В табл. 4.8 приведены результаты расчета температуры центра пластины с начальной массой $m=0,065$ кг, выходная мощность магнетрона – $P=240$ Вт, начальное влагосодержание $u_0=0,46$.

При проведении расчетов учитывалось, что в процессе сушки из-за

Расчеты на 120 с и далее не могли быть проведены вследствие отсутствия данных по ε'' для глины при влагосодержании, ниже 40%. Однако результаты расчетов позволяют сделать вывод, что существует принципиальная возможность устанавливать аналитическим путем значения температур при сушке глины в микроволновом поле.

4.6. Способы повышения экономической эффективности при использовании МВ нагрева

В первую очередь, проводился анализ влияния одновременного увеличения массы материала и выходной мощности магнетрона. Результаты анализа различных опытов, приведенные для равного интервала изменения влагосодержания, показывают, что удельные затраты электроэнергии на сушку падают при одновременном увеличении массы и выходной мощности магнетрона (табл.4.9).

Таблица 4.9

Влияние увеличения массы и выходной мощности магнетрона на удельные затраты электроэнергии

№	Мощность магнетрона $P_{вых}$, Вт	Масса материала m , кг	Скорость сушки $N \cdot 10^5$, с ⁻¹	Время τ , с	Энергозатраты на сушку $P \cdot 10^{-6}$, Дж/кг
1	80	0,06	0,61	240	1,275
2	180	0,08	0,56	240	2,34
3	180	0,1	0,69	240	1,52
4	240	0,16	0,77	240	1,14
5	240	0,24	0,83	240	0,703

Получено, что экономически целесообразно увеличивать загрузку камеры, а для обеспечения высокой производительности установки следует устанавливать максимально возможную мощность магнетрона. Последнее связано с особенностями работы магнетрона: уменьшение выходной мощности достигается прерываниями во времени его работы. Увеличение

мощности приводит к увеличению КПД камеры. При снижении мощности увеличиваются тепловые потери в окружающую среду и наблюдается нерациональный расход энергии на разогрев материала. При составлении табл. 4.8 использовались данные по кинетике сушки для мягких режимов, в которых явно проявлялся период постоянной скорости сушки. Анализ данных табл. 4.8 позволяет из технологически допустимых режимов выбрать наиболее экономичные.

Значения потребляемой энергии на МВ нагрев могут быть существенно снижены за счет снижения тепловых потерь, одним из методов снижения которых является использование поглощающих покрытий [156]. Результаты расчета погрешности измерений, проводимого в соответствии с методиками [156, 157], приведены в Приложении Д.

Выводы к разделу 4

1. Нагрев в микроволновом поле глиняной пластины с начальным влагосодержанием $u_0=0,455$ кг/кг характеризуется неравномерностью распределения температуры по его толщине. При нагреве образца толщиной 7 мм в микроволновом поле, создаваемом магнетроном с выходной мощностью $P_{\text{вых}}=80$ Вт, отклонение температур может достигать 9%.

2. При среднем темпе нагрева материала 1,03 К/с для пластины толщиной 7 мм отмечается колебательный характер роста температур, что связано с интенсивным выходом испаряющейся влаги. Для обеспечения равномерной сушки скорость нагрева должна быть снижена. Темп нагрева глиняного материала толщиной $\delta=7$ мм в оптимальном режиме в среднем составлял 0,125 К/с. Скорость сушки порядка $N=1,25 \cdot 10^{-5}$ кг/(кг·с).

3. Нагрев глины в микроволновом поле при производстве керамических изделий на ее основе позволяет с высокой интенсивностью проводить тепловую обработку при сохранении качества получаемых материалов. Из глиняных образцов под действием микроволнового поля интенсивно выходит влага, однако после полного извлечения влаги нагрев прекращается, что исключает возможность обжига.

4. Темп нагрева глиняных образцов в микроволновом поле в оптимальном режиме в среднем составлял 0,125 К/с, скорость сушки $N=4,84 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$.

5. При нагреве глиняных образцов толщиной $\delta \geq 30$ мм со скоростью выше 0,5 К/с и при большей выходной мощности магнетрона в материале возникают трещины, поверхность становится неоднородной, а испарившаяся в объеме влага формирует внутренние микроканалы.

6. Получена зависимость для расчета КПД микроволновой камеры при загрузке ее образцами из глины, которая учитывает начальное влагосодержание материала и степень заполненности МВ камеры материалом.

7. Получено, что экономически целесообразно увеличивать загрузку камеры, а для обеспечения высокой производительности установки следует устанавливать максимально возможную мощность магнетрона.

8. Существует принципиальная возможность получения расчетным путем по предложенной в работе аналитической зависимости значения локальных температур при сушке глины в микроволновом поле путем учета в значении мощности внутренних источников теплоты стока энергии за счет испарения влаги. Для периода постоянной скорости сушки глины в микроволновом поле рекомендована эмпирическая зависимость, справедливая для диапазона изменения толщины слоя $0,005 \leq \delta \leq 0,03$ м и при $q_m = 11 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$ Вт/кг с максимальной относительной погрешностью 17%.

ВЫВОДЫ

1. Математические модели, описывающие нестационарную теплопроводность плотных тел в условиях высокоинтенсивного нагрева, включая нагрев в микроволновом поле, основываются на уравнениях параболического и гиперболического типа. Зависимости для расчета температуры плотного слоя материала как результат решения уравнения теплопроводности гиперболического типа позволяют получать информацию о тепловом состоянии тела при сколь угодно малых числах Fo .
2. Вклад релаксационных явлений в процессы, интенсивность которых ограничена условиями производства керамики, пренебрежимо мал. Установлено, что скорость нагрева в высокоинтенсивных технологиях производства керамики не превышают 2 К/с , что значительно ниже граничной скорости, за которой допущение о бесконечной скорости распространения теплоты не может быть принято. Граничная скорость нагрева для глины с преобладанием каолинита составляет $\left(\frac{dT}{d\tau}\right)_{\max} \cong 13185 \text{ К/с}$.
3. Зависимость для расчета локальных температур, полученная для полуограниченного массива на основе решения уравнения теплопроводности параболического типа с учетом действия внутренних источников теплоты при ГУ III рода, качественно верно отражает влияние определяющих физических величин на температуру материала при действии положительных внутренних источников теплоты, в частности, от микроволнового электромагнитного поля.
4. Нагрев в микроволновом поле $\text{Al}_2\text{O}_3 + 5\% \text{ SiC}$ со связующим ЛСТ позволяет достичь скорости $3,2 \text{ К/с}$ при удельной мощности внутренних источников теплоты от $q_v = 2,88 \cdot 10^7$ до $q_v = 7,2 \cdot 10^7 \text{ Вт/м}^3$.
5. При микроволновом нагреве образцов независимо от размера возникает неравномерность распределения температуры по толщине и продольной координате. Отклонение температуры по толщине для пластины карбида

кремния $\delta=10$ мм может достигать 27 %. Отклонение между центром и краем (расстояние 1,75 см) образцов массой до 5 г достигает 32 %.

6. Равномерность нагрева в микроволновой камере достигается при покрытии поверхности материала сажей, эффективно поглощающей микроволновое излучение, а также за счет выхода к поверхности продуктов термического разложения связующего вещества лигносульфоната технического.

7. Аналитический расчет температуры материала (композиционный порошок $\text{Al}_2\text{O}_3 + 20\% \text{ Fe}$) при нагреве в микроволновом поле демонстрирует высокую сходимость с результатами экспериментальных исследований при учете зависимости коэффициента поглощения γ от температуры материала.

8. При аналитических расчетах температуры по полученной в работе зависимости для условий сушки, необходимо учитывать снижение мощности положительных внутренних источников теплоты на величину, соответствующую затратам теплоты на испарение влаги $\rho \cdot N \cdot r$. Для скорости сушки глины в первом периоде получена эмпирическая зависимость, которая описывает экспериментальные данные с относительной погрешностью 17 % в диапазоне изменения толщины слоя $0,005 \leq \delta \leq 0,03$ м и при $q_m \leq 11 \cdot 10^3$ Вт/кг.

9. Зависимость для расчета КПД микроволновой камеры при загрузке ее образцами из глины позволяет расчетным путем оценить эффективность использования микроволновой энергии. Наибольшее значение КПД при обработке глины составляет 72 % при влагосодержании $u=0,46$ кг/кг.

10. Экономическая эффективность применения в промышленности микроволнового нагрева заготовок для изготовления керамических подложек определяется сокращением длительности технологического цикла термообработки в 4 раза и удельных энергозатрат на термообработку на 37%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Wetherhold, R. C. The use of functionally graded materials to eliminated or control thermal deformation [Text] / R. C. Wetherhold, S. Seelman, J. Wang // Composites Science and Technology. – 1996. – № 56. – P. 1099-1104.
2. Lukaszewicz, S. A. Detection of material properties in a layered body by means of thermal effects [Text] / S. A. Lukaszewicz, R. Babaei, R. E. Qian // J. of Thermal Stresses. 2003. – Vol. 26, № 1. – P. 13-23.
3. Аналитические решения смешанных осесимметричных задач для функционально-градиентных сред [Текст] / [С. М. Айзикович, В. М. Александров, А. С. Васильев и др] – М: Физматлит, 2011. – 192 с.
4. Sheppard, L. M. Manufacturing ceramics with microwave: the potential for economical production [Text] / L. M. Sheppard // Am. Ceram. Soc. Bull. – 1988. – Vol. 67. – P. 3041-3086.
5. Fabrication of Metal-Ceramic Functionally Graded Materials by Microwave Sintering [Text] / Yu. V. Bykov, S. V. Egorov, A. G. Eremeev etc. // Inorganic Materials: Applied Research. 2012. – Vol. 3. – № 3.– P. 261-269.
6. Luo, Zh. A reduced-order extrapolation central difference scheme based on POD for two-dimensional fourth-order hyperbolic equations [Text] / Zh. Luo, Sh. Jin, J. Chen // Applied Mathematics and Computation. – 2016. –Vol. 289. – P.396-408.
7. Shen W. Two-dimensional hyperbolic heat conduction with temperature dependent properties [Text] / W. Shen and S. Han // Journal of Thermophysics and Heat Transfer. – 2004. – 18. – P. 285-287,
8. Ordonez-Miranda, J. Determination of thermal properties for hyperbolic heat transport using a frequency-modulated excitation source [Text] / J. Ordonez-Miranda, J. J.Alvarado-Gil // International Journal of Engineering Science – 2012.– Vol. 50, Iss. 1.– P. 101-112.
9. Шашков, А. Г. Волновые явления теплопроводности [Текст] / А.Г. Шашков, В. А. Бубнов, С. Ю. Яновский. – М.: Эдиториал УССР, 2004. –

296с.

10. Супельняк, М.И., Карышев А.К.. Исследование температурных волн в цилиндре с учетом инерции теплового потока // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. "Естественные науки". – 2013. – № 2. – С. 106-119.

11. Лыков, А. В. Теория теплопроводности [Текст] / А. В. Лыков. – М.: 1967. – 600 с.

12. Maurer, M. J. Non-Fourier Effects at High Heat Flux [Text] / M. J. Maurer, H. A. Thompson [Text] // ASME J. of Heat Transfer. – 1973. – Vol. 95. – P. 284-286.

13. Исаев, К. Б. К вопросу об учете конечной скорости распространения тепла в твердом теле [Текст] / К. Б. Исаев // Тр. V Минского межд. форума ММФ–2004. – Минск: ИТМО НАНБ, 2004. – С.1-6.

14. Кудинов, В. А. Об одном методе получения точного аналитического решения гиперболического уравнения теплопроводности на основе использования ортогональных методов [Текст] / В.А. Кудинов, И.В. Кудинов // Вестн. Сам. техн. ун-та. Сер. физ.-мат. наук. – 2010. – № 5 (21). – С. 159-169.

15. Антимонов, М. С. Численно-аналитические методы решения задач теплопроводности на основе ортогональных методов взвешенных невязок [Текст] : автореф. дисс. ... к. ф.-м. н. / М. С. Антимонов / Ульяновский гос. техн. ун-т. – 2008. – 24 с.

16. Henderson, J.B. A mathematical model to predict the thermal response of decomposing, expanding polymer composites [Text] / J.B. Henderson, T.E. Wiecek // J. Composite Materials. – 1987. – Vol. 21, No 4. – P. 373-393..

17. Chester, M. Second sound in solids [Text] / M. Chester // Phys. Rev. – 1963. Vol. 131. – P. 2013-2015.

18. Самарский, А. А. Методы решения сеточных уравнений [Текст] / А. А. Самарский, Е. С. Николаев. – М.: Наука, 1978. – 592 с.

19. Lukas, R. Mikrowelleunterstützte Wärmt- und Stoffübertragung beim Trocknen und Entbindern Technischer Keramik [Text]: diss... zur Erlangung des

- akademischen Grades Doktor-Ingenieur / Robak Lukas. – Freiburg, 2005. – 125 p.
20. Willert-Porada, M. A. Microwave sintering of metal-ceramic FGM [Text] / M. A. Willert-Porada, R. Borchert // *Functionally Graded Materials*. – 1996. – P. 349-354.
21. Chatterjee, A. Analysis of microwave sintering of ceramics [Text] / A. Chatterjee, T. Basak, K. J. Ayappa // *AIChE Journal*. – 1998. – Vol. 44, № 10. – P. 2301-2311.
22. Аверин, Б. В. Общая схема решения краевой задачи нестационарной теплопроводности с внутренними источниками теплоты для многослойных конструкций [Текст] / Б. В. Аверин // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. физ.-матем. Науки* – 2009. – № 2 (19). – С. 274-277.
23. M. V. Babenkov, E. A. Ivanova. Analysis of the wave propagation processes in heat transfer problems of the hyperbolic type // *Continuum Mech. Thermodyn*. – 2014. – Vol. 26, Iss. 4. – P. 483-502.
24. Сокотущенко, В. Н. Гиперболическое уравнение теплопроводности движущегося тела [Текст] / В.Н. Сокотущенко // *Теплофизика, теплоэнергетика*. – *Вестн. АГТУ*, 2006. – № 6. – С. 79-83.
25. Муратиков, К. Л. Об особенностях поведения температурных волн в твердых телах при описании теплопроводности уравнениями параболического типа [Текст] / К.Л. Муратиков // *Письма в ЖТФ*. – Т. 21, вып. 12. – 1995. – С. 88-94.
26. Аверин, Б. В. Получение аналитического решения уравнений гидродинамического пограничного слоя на основе введения дополнительных граничных условий [Текст] / Б.В. Аверин, Е.В. Стефанюк, И.В. Кудинов // *Изв. Самарского научн. центра Российской Академии наук. Специальный выпуск. "Актуальные вопросы тепло- и массообмена, энергоэффективность, исследование вихревых закрученных потоков"*. – 2008. – С. 39-46.
27. Стефаник, Е.В. Построение приближенных аналитических решений нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений на основе использования дополнительных граничных условий [Текст] / Е.В. Стефанюк,

- И.В. Кудинов, Е.В. Ларгина // Вестн. Самарского гос. техн. ун-та. Серия Физ.-матем. науки. – № 1 (18). – 2009. – С. 122-132.
28. Логинов, В.С. Расчет нестационарной теплопроводности при малых числах Фурье ($Fo < 0:001$) [Текст] / В.С. Логинов, А.Р. Дорохов, Н.Ю. Репкина // Письма в ЖТФ, 1997. – Т. 23, № 1. – С. 22-25.
29. Антимонов, М. С. Численно-аналитические методы решения задач теплопроводности на основе ортогональных методов взвешенных невязок [Текст] : автореф. дисс. ... канд. физ.-матем. наук : 05.13.18 / Ульяновский гос. техн. ун-т. – Ульяновск, 2008. – 24 с.
30. Lakshmikantham, V. Basic theory of fractional differential equations [Text] / V. Lakshmikantham, A.S. Vatsala [Text] // Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications. – Vol. 69. – Issue 8, 2008. – P. 2677-2689.
31. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
32. Никитенко, Н. И. Исследование нестационарных процессов тепло- и массообмена методом сеток [Текст] / Н.И. Никитенко. – К.: Наук. думка, 1971. – 266 с.
33. Glass D.E., Цзисик M.N. and McRae D.S. Hyperbolic heat conduction with temperature-dependent thermal conductivity [Text] // J. Appl. Phys. – 1986. – Vol. 59, № 6. – P. 1861-1865.
34. Решение краевых задач методом Монте-Карло [Текст] / [Б.С. Елепов, А.А. Кронберг, Г.А. Михайлов, К.К. Сабельфельд] // Новосибирск: Наука, 1980. – 173 с.
35. Якушкин, М. М. Влияние процессов релаксации на перенос тепла, возникающего под действием интенсивных потоков энергии [Текст] // Физика и химия обработки материалов. – 2010, № 3. – С. 27-33.
36. Месяц, Г. А. Импульсная энергетика и электроника [Текст] / Г.А. Месяц. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
37. Pamela, M. Femtosecond pumpprobe nondestructive examination of materials [Text] / M. Pamela, P.Andrew, J. Robert. // Rev.Sci. Instrum. – 2003. – Vol. 74,

№1. – P. 400-406.

38. Якункин, М. М. Исследование взаимодействия модулированных лазерных и электронных пучков со слоистыми средами. [Текст] / М.М. Якункин, Г.Г. Бондаренко // *Металлы*/ – 1999.– № 4.– С. 82- 87.

39. Allen, P. Theory of thermal relaxation of electrons in metals [Text] / P. Allen – *Phys.Rev.Lett.*, 1987. – Vol. 59. – P. 1460-1463.

40. Van den Syre, J. On temperature relaxation in metals [Text] / J. Van den Syre // *Phys.Stat.Sol.(a)*. – 1970. – Vol. 39, № 2. – P. 659-664.

41. Крафтмахер, Я. А. Релаксационный эффект в высокотемпературной теплоемкости вольфрама [Текст] / Я.А.Крафтмахер // *Физика твердого тела*. – 1985. – Т.27, №1. – С. 235-237.

42. Якункин, М. М. Влияние процессов релаксации на перенос тепла, возникающего под действием интенсивных потоков энергии [Текст] / М.М. Якункин // *Физика и химия обработки материалов*. – 2010. – № 3.– С. 27-33.

43. Балеску, Р. Равновесная и неравновесная статистическая механика [Текст] / Р. Балеску – М.: Мир, 1978. – Т. 2.– 399 с.

44. Chandrasekharaiah, D. S. Thermoelasticity with second sound: A Review [Text] / D.S. Chandrasekharaiah // *Appl. Mech. Rev.* – 1986. – Vol. 39, № 3. – P.355-376.

45. Бабенков, М. Б. Распространение термоупругих волн в среде с учетом релаксации теплового потока [Текст]: автореф. дисс. ... канд. физ.-матем. наук : 01.02.04 / Ин-т проблем машиноведения РАН. – Санкт-Петербург, 2013. – 22 с.

46. Шумскайте, М. Й. Анализ влияния объемного содержания и типа глинистых минералов на релаксационные характеристики песчано-алевритовых образцов керна [Текст] / М. Й. Шумскайте, В. Н. Глинских // *Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений*. Всесоюзн. НИИ организации, управления и экономики нефтегазовой промышленности. –

2015. – № 7. – С. 35-38.

47. Chester, M. Second sound in solids [Text] / M. Chester // Phys. Rev. – 1963. Vol. 131. – P. 2013-2015.

48. Maurer, M. J. Relaxation model for heat conduction in metals [Text] / M.J. Maurer // J. Appl. Phys. – 1969. – Vol. 40. – P. 5123-5129.

49. Венгеров, И. Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели. Т.1. Анализ парадигмы [Текст] / И.Р. Венгеров // Изд-во Норд-Пресс. – Донецк, 2008. – 630 с.

50. Горбис, З. Р. Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями [Текст] / З.Р. Горбис, В.А. Календерьян – М.: Энергия, 1975. – 296 с.

51. Соболев, С. Л. Процессы переноса и бегущие волны в локальнонеравновесных системах [Текст] / С.Л. Соболев // Успехи физических наук. – 1991. – Т. 161, № 3. – С. 5- 29.

52. Антонишин, Н. В. Гиперболическое уравнение теплопроводности дисперсных систем [Текст] / Н.В. Антонишин, М.А. Геллер, А.Л. Парнас // Инж-физ. журнал. – 1974. – Т. 26. – С. 503-509.

53. Антонишин, Н. В. и др. К вопросу аналитического описания процесса нестационарной теплопроводности дисперсных систем [Текст] / В кн.: Тепло- и массоперенос. – Киев, 1972. – Т. 5, ч. 2. – С. 3-7.

54. Таганов, И. Н. Моделирование процессов массо-и энергопереноса [Текст] / И.Н.Таганов – Л.: Химия. – 1979. – 208 с.

55. Динариев, О. Ю. О релаксационных процессах в низкопроницаемых пористых материалах [Текст] / О.Ю.Динариев, О.В.Николаев // Инж.-физ. журнал. – 1990.– №1, Т. 58.– С. 78-82.

56. Матвиенко, В. Н. Вязкость и структура дисперсных систем [Текст] / В.Н. Матвиенко, Е.А. Кирсанов // Вестн. Моск. ун-та., сер. 2. – Химия, 2001. – Т. 52. – № 4. – С. 243-276.

57. Ковальченко, М.С. Реологическая модель прессования порошков [Текст]

- / М.С. Ковальченко // Порошковая металлургия. – 1990. – № 9. – С.100-104.
58. ЛЫКОВ, А. В. Тепломассообмен. Справочник [Текст] / 1978.– – 480с.
59. Clark, D. E., Sutton W. H. Microwave processing of materials [Text] / D.E. Clark, W.H. Sutton // Annual Review of Materials Science. – 1996. – Vol. 26. – P. 299-331.
60. Thostenson, E. T. Microwave processing: fundamentals and applications [Text] / E.T. Thostenson, T.W. Chou // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 1999. – Vol. 30, № 9. – P. 1055-1071.
61. Microwave processing of materials and applications in manufacturing industries: A Review / [Satnam Singh, Dheeraj Gupta, Vivek Jain, Apurbba K. Sharma] // Materials and Manufacturing Processes. – 2015. – Vol.15, No. 1. – P.1-29.
62. Das, S. Prospects of microwave processing: An overview [Text] / S. Das, A.K. Mukhopadhyay, S. Datta, D. Basu// Bull. Mater. Sci. – 2009. – Vol. 32, № 1. – P. 1-13.
63. Advances in induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials [Text] / S. Edited by Grundas // Rijeka: InTech, 2011. – 752 p.
64. Chandrasekaran, S. Microwave Material Processing-A Review [Text] / S. Chandrasekaran , S. Ramanathan, T. Basak // AIChE Journal. – 2012. – Vol. 58. – P. 330-363.
65. Рыбаков, К. И. Эффекты воздействия электромагнитного поля в процессах высокотемпературной микроволновой обработки материалов [Текст]: автореф. дис. ... д-ра физ.-матем. наук. / Нижний Новгород, 2013. – 38 с.
66. Сапунов, В. В. Совершенствование технологии изготовления абразивного инструмента на бакелитовой связке с применением микроволнового излучения. [Текст] : дисс. ...канд. техн. наук : 05.02.07 // Ульяновский гос. техн. ун-т. / Ульяновск, 2015. – 221 с.
67. Microwave Solutions for Ceramic Engineers [Text] / Edited by D. E. Clark,

- D. C. Folz, C. E. Folgar, M. M. Mahmoud // New York: Wiley, 2005. – 494 p.
68. Synthesis of inorganic solids using microwaves [Text] / [K.J. Rao, B. Vaidhyanathan, M. Ganguli, P.A. Ramakrishnan] // Chemistry of Materials. – 1999. – Vol. 11, № 4. – P. 882-895.
69. Sintering of Al₂O₃ - ZrO₂ composites using millimeter-wave radiation [Text] / [Y. Makino, T. Ohmae, Y. Setsuhara, S. Miyake, S. Sano] // Key Engineering Materials. – 1999. – Vol. 161-163. – P. 41-44.
70. Wil'ert-Porada, M. Microwave sintering of metal-ceramic FGM [Text] / M. Wil'ert-Porada, R. Borchert // Functionally Graded Materials. Edited by I. Shiota and Y. Miyamoto. – Amsterdam: Elsevier, 1997. – P. 349-354.
71. Gupta, M. Microwaves and Metals [Text] / M. Gupta, E. Wong Wai Leong // Singapore: Wiley, 2007. – 228 p.
72. Oda, S. J. Microwave Remediation of Hazardous Waste: A Review [Text] / S.J. Oda // Microwave Processing of Materials III (Materials Research Society Symposium Proceedings, V. 269). Edited by R. L. Beatty, W. H. Sutton and M. F. Iskander. Pittsburgh: Materials Research Society, 1992. – P. 453-464.
73. Zhang, S.-L. Rapid thermal processing with microwave heating [Text] / S.L. Zhang, R. Buchta, D. Sigurd // Thin Solid Films. –1994. – Vol. 246, № 1/2. – P. 151-157.
74. Janney, M. A. Enhanced diffusion in sapphire during microwave heating [Text] / [M.A. Janney, H.D. Kimrey, W.R. Allen, J.O. Kiggans] // J. Mater. Sci. – 1997. – Vol. 32. – P. 1347-1355.
75. Whittaker, A. G. Diffusion in microwave-heated ceramics [Text] / A.G. Whittaker // Chem. Mater. – 2005. – Vol. 17. – P. 3426-3432.
76. Robb, G. R. Temperature-resolved, in-situ powder X-ray diffraction of silver iodide under microwave irradiation [Text] / G.R. Robb, A. Harrison, A.G. Whittaker // Phys. Chem. Comm. – 2002. – Vol. 5. – P. 135-137.
77. Osepchuk, J. M. A history of microwave heating applications [Text] / J.M. Osepchuk // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. – 1984. – Vol. 32, № 9. –

P. 1200-1224.

78. Berteaud, A. J. High Temperature Microwave Heating in Refractory Materials [Text] / A.J. Berteaud, J.C. Badot // J. Microwave Power. 1976. – Vol. 11, № 4. – P. 315-320.

79. Agrawal, D. K. Microwave processing of ceramics [Text] / D. K. Agrawal // Current Opinion in Solid State and Materials Science. – 1998 Vol. 3, Iss. 5. – P. 480-485.

80. Johnson, D. L. Microwave and Plasma Sintering of Ceramics [Text] / D.L. Johnson // Ceramics International. – 1991. – Vol. 17. – P. 295-300.

81. Katz, J. D. Microwave sintering of ceramics [Text] / J.D. Katz // Annu. Rev. Mater. Sci. – 1992. – Vol. 22. – P. 153-170.

82. Agrawal, D. K. Microwave processing of ceramics: A review [Text] / D.K. Agrawal // Current Opinion in Solid State & Mat. Sci. – 1998. – Vol. 3, № 5. – P. 480-486.

83. Binner, J. G. P. Microwave sintering of ceramics: what does it offer? [Text] / J.G.P. Binner, B. Vaidyanathan // Key Engineering Materials. – 2004. – Vol. 264-268. – P. 725-730.

84. Oghbaei, M. Microwave versus conventional sintering: A review of fundamentals, advantages and applications [Text] / M. Oghbaei, O. Mirzaee // Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 494, № 1-2. – P. 175-189.

85. Riedel, H. Simulation of microwave sintering with advanced sintering models [Text] / H. Riedel, J. Svoboda // Advances in Microwave and Radio Frequency Processing (Proc. 8th International Conference on Microwave and High-Frequency Heating). Edited by M. Willert-Porada. Berlin. – Springer, 2006. – P. 210- 216.

86. Аналитические решения смешанных осесимметричных задач для функционально-градиентных сред [Текст] / [С.М. Айзикович, В.М. Александров, А.С. Васильев и др]. – М: Физматлит, 2011. – 192 с.

87. Wetherhold, R. C. The use of functionally graded materials to eliminated or control thermal deformation [Text] / R. C. Wetherhold, S. Seelman, J. Wang //

Composites Science and Technology. – 1996. – № 56. – P. 1099-1104.

88. Гордиенко, А. И. Разработка и применение функционально-градиентных материалов [Текст] / А. И. Гордиенко, В. В. Ивашко, И. И. Вегера // Вестн. ГГТУ им. П.О. Сухого. – 2007. – №2 (29). – С. 51-57.

89. Lukaszewicz, S.A. Detection of material properties in a layered body by means of thermal effects [Text] / S.A. Lukaszewicz, R. Babaei, R. E. Qian // J. of Thermal Stresses. – 2003. – Vol. 26, № 1. – P. 13-23.

90. Willert-Porada, M. A. Microwave sintering of metal-ceramic FGM [Text] / M.A. Willert-Porada, R. Borchert // Functionally Graded Materials. – 1996.– P. 349-354.

91. Chatterjee, A. Analysis of microwave sintering of ceramics [Text] / A. Chatterjee, T. Basak, K.J. Ayappa // AIChE Journal, – 1998. – Vol. 44, № 10. – P.2301-2311.

92. Bykov, Yu.V. Fabrication of Metal-Ceramic Functionally Graded Materials by Microwave Sintering [Text] / Yu.V. Bykov, S.V. Egorov, A.G. Ereemeev etc. // Inorganic Materials: Applied Research, 2012. – Vol. 3, № 3. – P. 261-269.

93. Матренин, С. В., Слосман А.И. Техническая керамика [Текст]: учеб. пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 75 с.

94. Advanced Technical Ceramics / Editor Shigeyuki Somiya // Academic Press, Inc. - 1989. – 366 p.

95. Николаенко, И. В. Синтез и физико-химические свойства радиопоглощающей композитной керамики на основе продуктов переработки лейкоксенового концентрата [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / Уральское отд. ин-та тв. тела. – Екатеринбург, 2005. – 120 с.

96. Rahman, M. N. Ceramic Processing and Sintering [Text] / M.N. Rahman // Marcel Dekker, Inc., New York, 2003. – ISBN 0-8247-0988-8. – 875 p.

97. Ring, Terry A. Fundamentals of ceramic powder processing and synthesis [Text] / A. Terry Ring // Academic Press, San Diego, 1996. –ISBN 0-12-588930-5. – 961 p.

98. Schatt, W. Pulvermetallurgie [Text] / W. Schatt // Deutscher Verlag für

Grundstoffindustrie, Leipzig, 1988. – ISBN 3-342-00409-6. – 600 p.

99. Sheppard, L. M. Manufacturing ceramics with microwave: the potential for economical production [Text] / L.M. Sheppard // *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 1988.– Vol. 67. – P. 3041-3086.

100. Анненков, Ю. М. Физическая модель спекания и модифицирования керамики в высокочастотных и сверхвысокочастотных полях [Текст] / Ю.М. Анненков, А.С. Ивашутенко // *Изв. Томского политех. ун-та*, 2005. – Т. 308, №7. – С. 30-35.

101. Komarneni, S. Microwave-hydrothermal processing for synthesis of electroceramic powders [Text] / S. Komarneni, Q. Li, K.M. Steffansson, R. Roy // *J. Mater.*, 1993.– Res.– Vol. 8, № 12. – P. 3176-3183.

102. Chatterjee, A. Analysis of microwave sintering of ceramics [Text] / A. Chatterjee, T. Basak, K.J. Ayappa // *AIChE Journal*, 1998. – Vol. 44, № 10. – P. 2301-2311.

103. Ванецев, А. С. Спекание оксидных порошков с использованием микроволнового воздействия [Текст] / А. С. Ванецев. – М.: МГУ, 2011. – 32 с.

104. Meredith, R. *Engineers Handbook of Industrial Mikrowave Heating*. The Institution of Electrical Engineers. Exeter [Text] / R. Meredith. – Short Run Press Ltd., 1998. – 363 p.

105. Rhee, Sora. *Mikrowellenprozesstechnik für keramische Werkstoffe der Mikrosystemtechnik* [Text] / Sora Rhee. – *Wissenschaftliche Berichte: Forschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe*. – 2002. – 142 p.

106. Sintern von Keramik in einem gasbeheizten Ofen mit Mikrowellenunterstützung [Text] / [B. Wielage, H. Krause, S. Leparoux et al.] // *Gaswärme International*. – 2002. – № 51/8. – P. 342-347.

107. Microstructural design of sensor materials using the core-shell concept [Text] / [C.R. Bowen, J. Open, S. Mahon, J. Fitzmaurice] // *J EUR CERAM*. – 1999. – 19(2). P. 149-154 .

108. Goldstein, A. Sintering PZT-Powders in MW Furnace at 2.45 GHz [Text] / A. Goldstein, M. Kravchik // *Journal of the European Ceramic Society*, 1999. – Vol.

19. – P. 989-992.

109. Agawal, D. K. Microwave processing of ceramics [Text] / D.K. Agawal // A review Solid State & Mat. Sci. – 1998. – Vol. 3 (5). – P. 480-486.

110. Properties and Microstructures of PZT Ceramics Sintered by Microwave [Text] / [H.Fukushima, H. Mori, T. Hatanaka, M. Matsui] // Journal of the Ceramic Society of Japan. – 1995. – Vol. 103. – P. 998-1003.

111. Kriegsmann, G. A. Formation of hot spots in microwave heated ceramic rods. Microwaves: Theory and Applications in Materials Processing II, Ceramic Transactions [Text] / G. A.Kriegsmann, P. Varatharajah, D.E. Clark // The American Ceramic Society, 1993. – P. 382-400.

112. Козлов, П. В. Микроволновой нагрев и стационарные тепловые состояния керамической пластины [Текст] / П.В. Козлов, В.М. Лелевкин // – Вестн. КРСУ. Теплофизика и теоретическая теплотехника. – 2006. – Т.6, № 5. – С. 20-29.

113. Симовьян, С. В. СВЧ-нагрев изделий конечной толщины [Текст] / С.В. Симовьян, В.А. Потапов // Изв. вузов. Пищ. Технология/ – 1982. – № 6. – С. 62- 65.

114. Симовьян, С. В. Оценка температурной неравномерности при СВЧ-нагреве изделий конечной толщины [Текст] / С.В. Симовьян, В.А. Потапов // Изв. вузов. Пищ. Технология. – 1984. – № 2. – С 75-78.

115. Потапов, В. А. Исследование неравномерности температурного поля в функциональной емкости СВЧ-сушилки [Текст] / В.А. Потапов, М.М. Цуркан, И.А. Андрушин // Энергосберегающие технологии и оборудование/ – 2012.– №2/8(56). – С. 50-53.

116. Yaron, Alpert. Coupled Thermal-Electromagnetic Model for Microwave Heating of Temperature-Dependent Dielectric Media [Text] / Alpert Yaron, Jerby Eli // IEEE transactions on plasma science, 1999. – Vol. 27, № 2. – P. 555-562.

117. Сапунов, Г. С. Ремонт микроволновых печей [Текст] / Г.С. Сапунов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 272 с.

118. Tsay, C.Y. Microwave sintering of NiCuZn ferrites and multilayer chip

inductors [Text] / C.Y. Tsay, K.S. Liu, T.F. Lin, I.N. Lin // J. Magnetism and Magnetic Materials, 2000. – Vol. 209, Iss. 1-3. – P. 182-192.

119. Advances in Agricultural Science and Technology. Volume 1. Advances in Bioprocessing Engineering [Text] / Editors H. Yang, J. Tang. – London: World Scientific, 2002. – 172 p.

120. Metaxas, A. C. Industrial Microwave Heating [Text] / A.C. Metaxas, R.J Meredith // Peter Perigrinus, London, 1983. – 357 p.

121. Рыбаков, К. И. Микроволновый нагрев электропроводящих материалов [Текст] / К. И. Рыбаков, В. Е. Семенов // Изв. вузов. Радиофизика. – 2005. – Т. 48, № 10-11. – С. 997-1005.

122. Whittaker, A. G. The Application of Microwave Heating to Chemical Syntheses [Text] / A.G. Whittaker, D. Mingos // Journal of Microwave Power – 1994. – 29(4)– P. 195-219,

123. Xiaofeng, Wu M.S. Experimental and Theoretical Study of Microwave Heating of Thermal Runaway Materials [Text] : diss ... degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University / W. M.S. Xiaofeng. – Blacksburg, Virginia, USA, 2002. – 166 p.

124. Chow, Ting. Understanding Microwave Heating Cavities [Text] / Chow, Ting, Chan, Tse, V. Reader // Artech House Inc., Boston, London. – 2000. – 304 p.

125. Bräutigam, V. Mikrowellentrocknung von Wasserlacken. Prozessparameter und qualitativer Vergleich mit der Umlufttrocknung [Text] / V. Bräutigam, B. Hegemann, P. Schüller //МО (mo metalloberfläche). – 2001. – № 8. – P. 37-42.

126. Pfeifer, H. Industrielle Waermetechnik [Text] / H. Pfeifer // Taschenbuch. Vulkan-Verlag GmbH. – 2007. – Essen, Deutschland. – 593 p.

127. Johnson, D. L. Microwave and Plasma Sintering of Ceramics [Text] / D.L. Johnson // Ceramics International. – 1991. – Vol. 17. – P. 295-300.

128. Рыбаков, К. И. Эффекты воздействия электромагнитного поля в процессах высокотемпературной микроволновой обработки материалов [Текст]: автореф. дис. ... д-ра физ.-матем. наук. / К.И. Рыбаков. – Нижний

Новгород, 2013. – 38 с.

129. Katz, J. D. Microwave sintering of ceramics [Text] / J.D. Katz // Annu. Rev. Mater. Sci. – 1992. – Vol. 22. – P. 153-170.

130. Liao, S.-C. High pressure / low temperature sintering of nanocrystalline alumina [Text] / S.-C. Liao, Y.-J. Chen, B.H. Kear, W.E. Mayo // Nanostructured Materials. – 1998. – Vol. 10, № 6. – P. 1063-1079.

131. Sinter-HIP of α -alumina powders with sub-micron grain sizes [Text] / [J. Echeberria, J. Tarazona, J.Y. He et al] // J. Europ. Ceram. Soc. – 2002. – Vol. 22, № 11. – P. 1801-1809.

132. Srdic, V. V. Sintering behavior of nanocrystalline zirconia prepared by chemical vapor synthesis [Text] / V.V. Srdic, M. Winterer, H. Hahn // J. Am. Ceram. Soc. – 2000. – Vol. 83, № 4. – P. 729-736.

133. Basu, B. Development of Nanocrystalline wear resistant Y-TZP ceramics [Text] / B. Basu, J.H. Lee, D.Y. Kim // J. Am. Ceram. Soc. – 2004. – Vol. 87, № 9. – P. 1771-1774.

134. Li, J. Densification and grain growth of Al_2O_3 nanoceramics during pressureless sintering [Text] / J. Li, Y. Ye // J. Am. Ceram. Soc. – 2006. – Vol. 89, № 1. – P. 139-143.

135. Sintering of Nanostructural Titanium Oxide Using Millimeter-Wave Radiation [Text] / [Yu. Bykov, A. Ereemeev, S. Egorov et al] // Nanostructured Materials. 1999. – Vol. 12. – P. 115-118.

136. Bräutigam, V. Mikrowellentrocknung von Wasserlacken [Text] / V. Bräutigam, B. Hegemann, P. Schüller // MO Jahrg. – Vol. 55. – 2001/ – P. 37-42.

137. Microwave-assisted sintering of dental porcelains [Text] / [F. Medeirosa, R. Romualdo Menezesb, A. Gelmires] // Ceramics International. – 2015. – No. 41. – PP. 7501–7510.

138. Irretier, O. Trocknen, Entbindern und Sintern von Keramik [Text] / O. Irretier // CFI Ceramic Forum International – Vol. 76, № 7. – 1999. – PP. 14-17.

139. Sunit, Rane. Microwave assisted processing of silver thick films for microelectronic applications [Text] / Rane Sunit, Rushna Bhatkarb, Uttam Mulika, Dinesh Amalnerkar. // *Advances in Material Research*. – 2013. – Vol. 2, № 3. – P. 133-140.
140. Вейник, А. И. Приближенный расчет процессов теплопроводности [Текст] / А. И. Вейник – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 184 с.
141. Кауль, А. Р. Спекание оксидных порошков с использованием микроволнового воздействия [Текст] / А.Р. Кауль – МГУ им. Ломоносова. Москва, 2011. – 32 с.
142. Композиционные керамики на основе оксида алюминия, полученные методом электроимпульсного плазменного спекания для трибологических применений [Текст] / [С. Болдин, Н.В. Сахаров, С.В. Шотин и др] // *Вестн. Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. – 2012. – № 6. – С. 32-37.
143. Donga, Y.L. Fabrication and mechanical properties of nano-/micro-sized Al₂O₃/SiC composites / Y.L. Donga, F.M. Xua, X.L. Shi at al. // *Materials Science and Engineering*. – 2009. – P. 49–54.
144. Ko, Y.M. Development of Al₂O₃–SiC composite tool for machining application [Text] / Y.M. Ko, W.T. Kwon, Y.W. Kim // *Ceramics International*. – 2004. – Vol. 30. – P. 2081-2086.
145. Tiegs, T. SiC Whisker Reinforced Alumina [Text] / T. Tiegs // *Handbook of Ceramic Composites*. – 2005. – Part III. – P. 307-323.
146. Бошкова, И. Л. Оценка теплового эффекта взаимодействия материала с микроволновым электромагнитным полем [Текст] / И.Л. Бошкова, Н.А. Колесниченко // *Наук. пр. / ОНАХТ.– О.*, 2014. – Вып. 45, т.1. – С. 22-28.
147. Yu.V. High-temperature microwave processing of materials [Text] / V. Yu, K.I. Bykov, V.E. Rybakov, V.E. Semenov // *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2001. – Vol. 34. – P. 55-75.
148. Спекание металлокерамических функционально-градиентных

материалов при микроволновом нагреве [Текст] / [К. И. Рыбаков, Ю. В. Быков, С. В. Егоров и др] // Материалы семинара "Перспективные технологии консолидации материалов с применением электромагнитных полей", МИФИ. – 24-27 июня 2012. – 45 с.

149. Amada, S. Hierarchical functionally gradient structures of bamboo, barley, and com [Text] / S. Amada // MRS Bull. Vol.20, Iss. 1. 20, 1005. – p. 35-36.

150. Горбис, З.Р. Теплообменники с проточными дисперсными теплоносителями [Текст] / З.Р. Горбис, В.А. Календерьян – М.: Энергия, 1975. – 296 с.

151. Волгушева, Н. В. Кинетика сушки плотного слоя дисперсного материала (на примере гречихи) при различных способах подвода теплоты [Текст]: дисс... канд. техн. наук : 05.14.05 / Волгушева Н.В. – О., 2005. – 225 с.

152. Измерение диэлектрических характеристик растительных материалов [Текст] / [И.Л. Бошкова, Т.Ю. Дементьева, Е.В. Георгиев, С.Н. Колобков] // Холодильна техніка та технологія.– О.: ОНАХТ, 2013.– Вып. 2.– С. 28-31.

153. Брандт, А. А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах [Текст] / А.А. Брандт. – М.: ГИФМ, 1963. – 403 с.

154. Kolesnychenko, N. Analytical study of the processes of thermal conductivity at high intensity heating [Text] / N. Kolesnychenko, N. Volgusheva, I. Boshkova // East-European journal of enterprise technology. : Energy-saving technologies and equipment. – Vol. 5, № 8(83). – 2016. – P. 26-31.

155. Бошкова, И. Л. Аналитическое исследование температурного поля в теле с непрерывно действующими источниками теплоты [Текст] / И.Л. Бошкова, Т.Ю. Дементьева // Современ. проблемы холод. техники и технологии. – Одесса: ОГАХ, 2012. – С 42-45.

156. Дем'янчук, Б. А. Принципы и применения микроволнового нагрева [Текст] / Одесса: Черноморье, 2004. – 520 с.

157. Гортышов, Ю. Ф. Теория и техника теплофизического эксперимента [Текст] / Ю.Ф. Гортышов, Ф.Н. Дресвянников., Н.С. Идиатулин / Учеб. пособ. для вузов, под ред. В.К. Щукина. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 360 с.

158. Касандрова, О. Н. Обработка результатов наблюдений [Текст] / О.Н. Касандрова, В.В. Лебедев // М.: Наука, 1970. – 104 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ

Производя вычисления систематических погрешностей, необходимо учитывать неисключенные, обусловленные ограниченной точностью приборов, и случайные погрешности измерений, определяющие разброс экспериментальных данных и учитываемые статистической обработкой данных. При анализе точности измерений обычно исходят из того, что неисключенные остатки систематических погрешностей распределены внутри доверительного интервала по нормальному закону распределения с надежностью $\alpha = 0.95$. Для оценки границ доверительного интервала при недостаточно большом числе измерений (практически при $n < 20$) использовалось распределение Стьюдента, которое позволяет оценить величину погрешности результата по заданной надежности α .

Ниже приведен пример статистической обработки результатов прямых измерений для температуры t . Аналогично обрабатывались результаты измерений всех величин.

- Результаты каждого измерения записывались в таблицу;
- вычислялось среднее значение из n дублирующих измерений:

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{n} \quad (1)$$

- находились погрешности отдельных измерений:

$$\Delta t_i = \bar{t} - t_i \quad (2)$$

- определялась среднеквадратическая погрешность серии измерений:

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_i^2}{n(n-1)}} \quad (3)$$

- задавалось значение надежности: $\alpha = 0.95$;

– определялся коэффициент Стьюдента $t_{\alpha}(n)$ для заданной надежности и числа измерений;

– находилась границы доверительного интервала (погрешность результата измерений);

$$\Delta t_{abc} = \sigma_t \cdot t_{\alpha,n}. \quad (4)$$

– окончательный результат записывается в виде $t = t \pm \Delta t_n$;

– оценивалась относительная погрешность результата серии измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta t_{abc}}{\bar{t}} \cdot 100\%. \quad (5)$$

В связи с тем, что в условиях кинетического режима в каждый момент времени возможно только одно измерение, необходимая повторяемость достигалась 3-кратным дублированием опытов. При этом в статистической обработке учитывались результаты замеров в сходственных точках при $\tau = \text{idem}$.

Для $n=3$ и $\alpha = 0.95$: $t_{3;0.95}=4,303$.

Результаты экспериментов и соответствующей погрешности приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Расчет погрешности измерения температуры при нагреве пластинки из порошка карбида кремния в МВ поле. Выходная мощность магнетрона $P = 800$ кВт

$\tau, \text{с}$	t_1	t_2	t_3	t_{cp}	$\sigma_{t,\text{cp}}$	Δt_{abc}	ε
1	2	3	4	5	6	7	8
0	19	19	19	19	-	-	-
20	27,3	26,8	28,2	27,4	0,41	1,76	6,4
40	34,4	34,0	35,4	34,6	0,412	1,764	5,1
60	43,8	46,7	45,4	45,3	0,839	3,61	7,9
100	69,3	71,7	72,6	71,2	0,985	4,24	5,9
120	91,4	95,5	96,2	94,4	1,497	6,442	6,8
140	113,6	117,3	114,8	115,2	1,09	4,69	4,1
160	141,3	138,6	139,5	139,8	0,79	3,41	2,44
180	158,2	159,6	151,4	156,4	2,53	10,89	7,0

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8
200	183,6	179,7	180,4	181,2	1,2	5,16	2,9
220	192,3	199,5	197,7	196,5	2,16	9,3	4,73
240	201,7	207,4	202,3	203,8	1,8	7,78	3,8
260	211,5	219,8	216,2	215,8	2,4	10,34	4,8
280	251,2	249,6	248,3	249,7	0,83	3,6	1,4

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
ПРИМЕР РАСЧЕТА ЛОКАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МАТЕРИАЛА В
«MARLE15» ПРИ МИКРОВОЛНОВОМ НАГРЕВЕ

> restart;

> t0 := 21.; tv := 21.; qv0 := 3.·10³; c := 440.; ρ := 2200.; a := 7.75
 ·10⁻⁸; λ := .5; τ := 45.; α := 20.; x := .001; γ0 := 4.5;

$$> t := \left(\frac{(tv - t0)}{\lambda} + \frac{qv0}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot \frac{1}{\gamma0 + \frac{\alpha}{\lambda}} \right);$$

t := 898.6367681

$$> t1 := \left(-\frac{\lambda}{\gamma0} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} \right) + \frac{\lambda}{\alpha} \cdot e^{-\frac{\gamma0}{\lambda} \sqrt{a} \left(-\frac{\alpha}{\lambda} \cdot \tau \cdot \sqrt{a} + \frac{x}{\sqrt{a}} \right)} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{a \cdot \tau}} - \frac{\alpha}{\lambda} \cdot \sqrt{a \cdot \tau} \right) \right);$$

t1 := -0.0588580248

$$> t2 := \frac{qv0 \cdot (\alpha - \lambda \cdot \gamma0)}{c \cdot \rho \cdot a} \cdot \frac{1}{2 \cdot \gamma0 \cdot 2 \cdot \lambda};$$

t2 := 35052.38110

$$\begin{aligned}
> t3 := & \left(\frac{1}{\gamma\theta - \frac{\alpha}{\lambda}} \cdot \left(-\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) + e^{-\gamma\theta\sqrt{a}\left(-\gamma\theta\tau\sqrt{a} + \frac{x}{\sqrt{a}}\right)} \right. \right. \\
& \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} - \gamma\theta\sqrt{a\tau}\right) \left. \left. + \frac{1}{\gamma\theta\left(\gamma\theta + \frac{\alpha}{\lambda}\right)} \right. \right. \\
& \cdot \left(\operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}}\right) + e^{\gamma\theta\sqrt{a}\left(\gamma\theta\tau\sqrt{a} + \frac{x}{\sqrt{a}}\right)} \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{a\tau}} \right. \right. \\
& \left. \left. \left. + \gamma\theta\sqrt{a\tau}\right) \right) \right);
\end{aligned}$$

$$t3 := 0.006852364396$$

$$> t4 := \frac{qv0}{c \cdot \rho \cdot a \cdot \gamma\theta \cdot 2} \cdot (e^{a \cdot \gamma\theta \cdot 2 \cdot \tau} - 1) \cdot e^{-\gamma\theta \cdot x} + t0;$$

$$t4 := 21.13884081$$

$$> t5 := t \cdot t1 + t2 \cdot t3 + t4;$$

$$t4 := 208.4382943$$

ПРИЛОЖЕНИЕ В
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ ПО СУШКЕ ГЛИНЫ В
МИКРОВОЛНОВОМ ПОЛЕ

В1. Микроволновая сушка глины в оптимальных режимах

1. $u_0 = 0,455$ кг/кг; $\delta = 7$ мм; $P_{\text{вых}} = 80$ Вт; $m = 0,07$ кг; $t_0 = 21$ °С, $V_{\text{воды}} = 200$ мл

τ , с	$\Delta m \cdot 10^3$, кг	\bar{u} , кг/кг	\bar{t} , °С
1	2	3	4
10	0,1	0,453	23
20	0,2	0,449	24
30	0,2	0,445	26
40	0,4	0,437	32
50	0,6	0,424	37
60	0,5	0,414	39
70	0,7	0,399	44
80	0,6	0,387	46
90	0,8	0,370	48
100	1,0	0,349	53
110	0,7	0,351	52
120	0,7	0,320	53
130	0,6	0,328	54
140	0,9	0,289	51
150	1,1	0,266	56
160	1,0	0,227	57
170	0,9	0,227	55
180	0,8	0,210	55
190	0,6	0,197	57
200	0,9	0,160	64
210	1,1	0,156	67
220	1,4	0,127	65
230	1,2	0,102	64
240	1,5	0,071	63

2 - $u_0 = 0,455$ кг/кг; $\delta = 6,8$ мм; $P_{\text{вых}} = 180$ Вт; $m = 0,07$ кг; $t_0 = 21$ °C,

$V_{\text{воды}} = 200$ мл

$\tau, \text{с}$	$\Delta m \cdot 10^3, \text{кг}$	$\bar{u}, \text{кг/кг}$	$\bar{t}, \text{°C}$
1	2	3	4
10	0,1	0,453	26
20	0,3	0,447	27
30	0,3	0,441	29
40	0,5	0,430	35
50	0,6	0,418	39
60	0,8	0,401	43
70	1,1	0,378	45
80	0,9	0,360	48
90	1,0	0,339	50
100	1,2	0,314	56
110	1,1	0,291	57
120	1,2	0,267	56
130	0,9	0,245	65
140	1,0	0,227	67
150	0,8	0,210	69
160	1,2	0,185	71
170	1,4	0,156	74
180	1,1	0,133	72
190	1,5	0,102	78
200	1,7	0,0665	83
210	1,4	0,054	75
220	0,9	0,035	77
230	0,3	0,03	81
240	0,5	0,019	83

3 - $u_0 = 0,455$ кг/кг; $\delta = 7$ мм; $P_{\text{ВЫХ}} = 240$ Вт; $m = 0,07$ кг; $t_0 = 21$ °C, $V_{\text{ВОДЫ}} = 200$ мл

$\tau, \text{с}$	$\Delta m \cdot 10^3, \text{кг}$	$\bar{u}, \text{кг/кг}$	$\bar{t}, \text{°C}$
1	2	3	4
10	0,2	0,453	27
20	0,1	0,449	31
30	0,3	0,443	34
40	0,7	0,428	39
50	1,4	0,403	43
60	1,1	0,364	49
70	0,9	0,345	52
80	1,1	0,342	64
90	0,9	0,322	72
100	1,3	0,295	75
110	1,7	0,260	74
120	1,9	0,220	71
130	2,1	0,177	75
140	1,8	0,139	79
150	1,6	0,106	83
160	1,6	0,073	85
170	1,4	0,04	91
180	0,7	0,029	88
190	0,3	0,021	86
200	0,2	0,019	84
210	0,1	0,017	83
220	0	-	83
230	0	-	81
240	0	-	83

В2. Микроволновая сушка глиняных пластин при различных значениях мощности магнетрона

Исходные данные 1: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,008$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 80$ Вт; $m = 0,05$ кг;
 $t_0 = 20,5$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 18,4 \cdot 10^{-3}$ м².

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
2,5	0,07	0,1983	35
4	0,35	0,1915	39
5	0,67	0,184	41
6	1,06	0,1764	42
7,5	1,51	0,165	42,5
9	1,85	0,1568	43
10	2,01	0,153	43,5
11	2,2	0,1472	44
12,5	2,61	0,1373	44,5
14	3,55	0,1147	45
15	3,79	0,109	45,8
20	3,96	0,105	47,9

Исходные данные 2: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,016$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 80$ Вт; $m = 0,1$ кг; $t_0 = 20$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 18,4 \cdot 10^{-3}$ м².

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
1	0,1	0,1988	29
3	0,33	0,196	37
5	0,624	0,1925	41
6	1,5	0,182	49
15	2,92	0,165	50
20	4,33	0,148	51
25	6	0,128	52
30	7,5	0,11	53
35	9,08	0,091	57
40	10,17	0,078	65
45	10,99	0,068	68
50	11,5	0,062	71

Исходные данные 3: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,008$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 160$ Вт; $m = 0,05$ кг; $t_0 = 18$ °С, $F_{\text{ПОВ}} = 18,4 \cdot 10^{-3}$ м².

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
1	0,21	0,195	36
2	0,833	0,18	45
3	1,54	0,163	54
4	2,21	0,147	56
5	2,96	0,129	57
6	3,75	0,11	59
7	4,42	0,094	61
8	5,17	0,076	63
9	5,87	0,059	72
10	6,71	0,039	80

Исходные данные 4: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,008$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 160$ Вт; $m = 0,05$ кг; $t_0 = 18$ °С, $F_{\text{ПОВ}} = 18,4 \cdot 10^{-3}$ м².

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
1	0,44	0,239	39,2
2	1,32	0,217	47,5
3	2,04	0,199	53,7
4	2,75	0,1813	57,7
5	3,46	0,1635	62,8
6	4,25	0,1438	65,1
7	4,98	0,1255	68,5
8	5,78	0,1055	70,3
9	6,352	0,0912	71,1
10	7,02	0,0745	72,4
11	7,52	0,0621	79,3
12	8,11	0,0472	83,5

Исходные данные 5: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,016$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 160$ Вт; $m = 0,06$ кг; $t_0 = 19,3$ °С, $F_{\text{ПОВ}} = 15 \cdot 10^{-3}$ м².

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
1	0,15	0,197	37
2	0,3	0,194	55
3	0,97	0,1806	63
4	1,9	0,162	65
5	2,9	0,142	66
6	3,85	0,123	67
7	4,97	0,1006	73,6
8	5,77	0,0846	78

Исходные данные 6: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,016$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 160$ Вт; $m = 0,1$ кг; $t_0 = 21$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 18,4 \cdot 10^{-3}$ м².

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
2	0,5	0,194	47
3	1,11	0,187	57
4	2,1	0,175	63
5	3,17	0,162	71
6	4,1	0,151	72
7	5,17	0,138	73
8	6,2	0,126	73,5
9	7,3	0,112	74,2
10	8,25	0,101	75
11	9,6	0,085	77

Исходные данные 7: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,016$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 160$ Вт; $m = 0,15$ кг; $t_0 = 19,5$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 28,610^{-3}$ м².

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
2	0,5	0,196	35,5
3	0,9	0,193	44,1
4	1,4	0,189	52,25
5	2,25	0,182	53,5
6	3,1	0,174	53,5
7	4,5	0,164	63,8
8	5,6	0,155	69,1
9	6,9	0,145	68,9
10	8	0,136	69,5
11	8,75	0,13	74,5
12	9,6	0,123	35,5

Исходные данные 8: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,032$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 160$ Вт; $m = 0,2$ кг; $t_0 = 19$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 29,4 \cdot 10^{-3}$ м².

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
2	0,85	0,195	41,25
3	1	0,194	52,65
4	1,15	0,193	65
5	1,8	0,189	71,36
6	2,5	0,185	77
7	4	0,176	78,7
8	5,3	0,168	81
9	7	0,158	81,5
10	8,3	0,15	82
11	9,8	0,141	82,5
12	11,15	0,133	83

Исходные данные 9: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,009$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 160$ Вт; $m = 0,2$ кг; $t_0 = 19$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 39,6 \cdot 10^{-3}$, м²

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
2	0,3	0,198	30
3	1	0,194	36,8
4	1,5	0,191	43
5	2,15	0,187	46,5
6	3	0,182	50
7	4	0,176	52,1
8	5,3	0,168	54,6
9	6,5	0,161	55,2
10	7,5	0,155	56
11	8,65	0,148	56,8
12	9,3	0,144	57,2

Исходные данные 10: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,048$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 160$ Вт; $m = 0,31$ кг; $t_0 = 22$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 33,2 \cdot 10^{-3}$, м²

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
1,5	0,4	0,198	35
3	0,8	0,197	47,6
5	1,55	0,194	67,9
7	3,35	0,187	81,4
9	5,95	0,177	87,6
11	9,3	0,164	88,1
13	12,9	0,15	89,1
15	17,3	0,133	89,2
16	19,65	0,124	90,1

Исходные данные 11: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,048$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 160$ Вт; $m = 0,31$ кг; $t_0 = 19,3$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 9 \cdot 10^{-3}$, м²

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
2,5	0,5	0,198	36,4
5	0,9	0,197	52,3
7,5	2,1	0,192	67,2
10	2,85	0,189	79
12,5	3,9	0,185	92,9
15	4,65	0,182	95,2
17,5	5,7	0,178	96,5
20	6,45	0,175	97
22,5	7,5	0,171	98,7
25	8,25	0,168	100,4
27,5	9	0,165	101

Исходные данные 12: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,008$ м; $N_{\text{ВЫХ}} = 160$ Вт; $m = 0,31$ кг;
 $t_0 = 19$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 59,8 \cdot 10^{-3}$, м²

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
2	0,5	0,198	26,8
4	1,3	0,195	32,2
6	3,35	0,187	37,7
7	3,9	0,185	40,6
8	4,65	0,182	43
9	5,7	0,178	46,6
10	6,45	0,175	47,6
11	7,2	0,172	48,2
12	7,75	0,170	48,6
13	8,5	0,167	48,8
14	9	0,165	49

Исходные данные 13: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,016$ м; $N_{\text{ВЫХ}} = 240$ Вт; $m = 0,1$ кг; $t_0 = 19$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 18,4 \cdot 10^{-3}$, м²

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
1	0,35	0,196	39,8
1,5	0,67	0,192	50,7
2	1	0,188	60,2
2,5	1,6	0,181	65,4
3	2,35	0,172	70,6
3,5	3,1	0,163	74,5
4	3,8	0,154	76,9
4,5	4,9	0,141	77,8
5	5,9	0,129	78,7
5,5	6,9	0,117	79,2
6	8,1	0,103	79,7

Исходные данные 14: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,016$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 240$ Вт; $m = 0,15$ кг; $t_0 = 19$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 28,6 \cdot 10^{-3}$, м²

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
1	0,1	0,199	33
2	0,6	0,195	49,5
2,5	1,1	0,191	61,1
3	1,75	0,186	68
3,5	2,5	0,18	70,4
4	3,4	0,173	71,2
4,5	4,5	0,164	71,6
5	5,75	0,154	72,3
5,5	6,9	0,145	73,5
6	7,75	0,138	74,7

Продолжение - и.д. 14

6,5	8,9	0,129	75
7	10	0,12	75,4

Исходные данные 15: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,016$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 400$ Вт; $m = 0,1$ кг; $t_0 = 26$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 18,4 \cdot 10^{-3}$, м²

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
0,08	0,08	0,199	29
0,17	0,1	0,1988	32
0,25	0,2	0,1976	35,5
0,33	0,23	0,1972	39
0,5	0,25	0,197	43
0,7	0,34	0,196	50,1
0,83	0,55	0,1934	57,2
1	0,6	0,193	63,1
1,5	1,1	0,187	83
2	2,4	0,171	88,8
1,5	4,3	0,148	91
3	5,9	0,129	94,5
4	8,8	0,094	98
6	14,5	0,026	100

Исходные данные 16: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,016$ м; $p_{\text{ВЫХ}} = 400$ Вт; $m = 0,15$ кг; $t_0 = 21$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 28,6 \cdot 10^{-3}$, м²

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
1	0,75	0,194	42,4
1,5	1,5	0,188	57,4
2	3	0,176	75
2,5	4,6	0,163	75,2
3	6,25	0,15	75,7
3,5	8,5	0,132	77,6
4	9	0,128	83,2
4,5	10,4	0,117	85,5
5	11,6	0,107	87

Исходные данные 17: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,03$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 800$ Вт; $m = 1,2$ кг; $t_0 = 19$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 47 \cdot 10^{-3}$, м²

τ , МИН	$\Delta m \cdot 10^3$, КГ	\bar{u} , КГ/КГ	\bar{t} , °С
1	1	0,199	45
3	5	0,195	61
5	15,5	0,185	80
7	34	0,166	82
8	42,4	0,158	83

Продолжение - и.д. 17

9	54	0,146	83,3
10	65,5	0,135	83,5
11	67	0,133	84,7
12	72	0,128	84,5

Исходные данные 18: $u_0 = 0,46$ кг/кг; $\delta = 0,032$ м; $P_{\text{ВЫХ}} = 187$ Вт; $m = 0,2$ кг; $t_0 = 26,5$ °С; $F_{\text{ПОВ}} = 29,4 \cdot 10^{-3}$, м²

τ , мин	$\Delta m \cdot 10^3$, кг	\bar{u} , кг/кг	\bar{t} , °С
1	0,5	0,197	43
3	1,2	0,192	72
5	3,6	0,178	84
7	7,3	0,156	85,6
8	9	0,146	87
9	10,95	0,134	89
10	13,15	0,121	92,3
11	15,15	0,109	95
12	17,15	0,095	100,6

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЯЕМЫХ И ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ ВЕЛИЧИН ПРИ СУШКЕ ГЛИНЫ

При определении среднеинтегрального влагосодержания слоя имели место косвенные измерения, проводимые в невоспроизводимых условиях. Поэтому при их обработке значения функции

$$\bar{u} = \frac{M_i - M_{\text{сух.}}}{M_{\text{сух.}}} \quad (1)$$

вычислялись для каждого отдельного измерения, а границы доверительного интервала определялись в результате обработки вычисленных результатов косвенных измерений, т.е. самих функций, так же, как это делается для прямых измерений.

Ниже приведен пример статистической обработки результатов косвенных измерений для \bar{U} . Аналогично обрабатывались результаты измерений для определения скорости сушки.

– для каждой серии измерений величин, входящих в определение искомой величины, проводится обработка прямых измерений. При этом для всех измеряемых величин задают одно и то же значение надежности $\alpha = 0.95$.

– находится выражение для абсолютной и относительной погрешностей искомой величины \bar{U} в соответствии с конкретным видом функциональной зависимости. Систематическая погрешность рассчитывалась по формуле:

$$\Delta U = \sqrt{\frac{(\Delta M_{\text{в}} + \Delta M_{\text{сух.}})^2}{\bar{M}_{\text{сух.}}^2} + \frac{\Delta M_{\text{сух.}}^2 \cdot (\bar{M}_{\text{в}} - \bar{M}_{\text{сух.}})^2}{\bar{M}_{\text{сух.}}^4}}; \quad (2)$$

– находятся границы доверительного интервала

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 \cdot \Delta a^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 \cdot \Delta b^2 + \dots}, \quad (3)$$

где производные $\frac{\partial f}{\partial a}, \frac{\partial f}{\partial b}$, вычисляются при $a = \bar{a}, b = \bar{b}, \dots$.

– окончательный результат записывается в виде

$$f(a, b) = f(\bar{a}, \bar{b}, \dots) \pm \Delta f.$$

– определяется относительная погрешность результата серии косвенных измерений:

$$\varepsilon = \frac{\Delta f}{f} \cdot 100\% ,$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta U}{\bar{U}} = \sqrt{\frac{(\Delta M_{\varepsilon} + \Delta M_{\text{сyx.}})^2}{(\bar{M}_{\varepsilon} - \bar{M}_{\text{сyx.}})^2} + \frac{\Delta M_{\text{сyx.}}^2}{\bar{M}_{\text{сyx.}}^2}} . \quad (4)$$

Значение погрешности отнесения очень мало, поэтому не учитывалось.

Значения теплоты испарения r и теплоемкости C_p брались из справочной литературы, содержащей физические величины, приведенные в таблицах. Их погрешность не превышает половины последнего знака значащей цифры. В таблице 1 приведен результат расчета абсолютных среднеквадратических погрешностей для измеряемых и определяемых величин при сушке глиняного образца в микроволновом поле для сушки глиняной пластины толщиной $\delta=0,007$ мм при массе в контрольной точке $m=0,047$ кг ($\tau=90$ с), выходная мощность магнетрона $P_{\text{вых}}=240$ Вт.

Таблица 1

Абсолютные среднеквадратические и относительные погрешности

Величина	Обозначение, размерность	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность, %
Температура материала	$t, ^\circ\text{C}$	0,01	1,23
Среднеинтегральная температура слоя	$\bar{t}, ^\circ\text{C}$	0,044	2,4
Масса образца	$m, \text{кг}$	$0,01 \cdot 10^{-3}$	4,8
Линейный размер образца	$l, \text{м}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	8,1
Время	$\tau, \text{с}$	0,5	1,6
Среднеинтегральное влагосодержание	$\bar{u}, \text{кг/кг}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	10,2
Среднеинтегральная скорость сушки	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}, (\text{кг/кг})/\text{с}$	$(0,2-1,5) \cdot 10^{-6}$	15,1
Среднеинтегральная скорость нагрева	$\frac{d\bar{t}}{d\tau}, \text{град/с}$	$(0,2-1,6) \cdot 10^{-4}$	8,4

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

INTERNATIONAL INFORMATIZATION
AKADEMY
with UN



МЕЖДУНАРОДНАЯ АКАДЕМИЯ
ИНФОРМАТИЗАЦИИ
при ООН

ЮЖНЫЙ ФИЛИАЛ ОТДЕЛЕНИЯ ПРОМРАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

ОКПО 21655395, р/с 26004144435 АБ «Укргазбанк» МФО 320478

33-а, Admiral boulevard, Odessa, 65059, Ukraine к.310
Tel. +380-482 374812, 374813; 7004049
Fax +380-482 374813

Украина, 65059, Одесса, Адмиральский пр-т, 33-а, к.310
Тел. +380-482 374812, 374813; 7004049
Факс +380-482 374813

Сайт: <http://www.mai.od.ua> E-mail: npkvt@bk.ru

Затверджую
Віце-президент Відділення
промислової радіоелектроніки
Міжнародної академії інформатизації
дійсний член Академії
Тучний В.П.

2016 р.

АКТ

впровадження результатів розробки
Колесниченко Н.О.

За результатами дослідження ефектів впливу мікрохвильового поля для спікання функціонально-градиентних матеріалів та виготовлення технічної кераміки визначена доцільність розробки нової технології для підвищення енергоефективності та інтенсифікації виробництва означеної продукції.

Мікрохвильова обробка матеріалів є перспективною завдяки можливості істотної інтенсифікації процесу, що дозволяє досягти високої енергетичної ефективності. Одна з найперспективніших областей застосування мікрохвильового випромінювання – одержання керамічних матеріалів. Використання нагрівання мікрохвильовим випромінюванням відкриває можливості розробки принципово нових технологій створення перспективних керамічних, композиційних і напівпровідникових матеріалів, що володіють суттєво більш високими в порівнянні з існуючими експлуатаційними і функціональними властивостями. Висока швидкість нагрівання в мікрохвильовому полі дозволяє одержувати керамічні й композиційні матеріали з тонкою та однорідною мікроструктурою, що мають, як наслідок, підвищену міцність, твердість, тріщиностійкість. Схемні рішення та конструкторські розрахунки, отримані в роботі Колесниченко, передбачається використовувати для подальшої розробки конструкторської документації і виготовлення мікрохвильової установки камерного типу.

З урахуванням того, що для реалізації проекту необхідно виконання пакету технічної та конструкторської документації, яку необхідно передати до заводу-виробника, та налагодження виробництва пристроїв, їх монтажем на підприємствах, термін окупності складає 7 років.

ВИСНОВКИ

1. Вибірчий характер взаємодії мікрохвильового поля з різними речовинами визначає перспективність застосування методу мікрохвильового нагрівання для спікання ФГМ.
2. При спіканні кераміки в мікрохвильовому полі граничне значення швидкості нагрівання становить 1,2 К/с.
3. Рівномірність обробки в камері резонансного типу забезпечується використанням гібридних режимів і організацією переміщення зразка за обсягом.

Члени комісії



Орлова Г.Ю.



Бошков Л.З.

