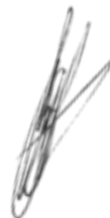


На правах рукописи

Тильзо Вадим Викторович



Совершенствование процесса производства
фрикционных накладок применением
СВЧ диэлектрического нагрева непосредственно в
пресс-форме

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических
технологий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бийск – 2012

Работа выполнена в Бийском технологическом институте (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель	Леонов Геннадий Валентинович доктор технических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Овчаренко Александр Григорьевич доктор технических наук, профессор Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, декан МФ Башара Владимир Алексеевич кандидат технических наук, ООО «Бийский завод стеклопластиков», начальник отдела
Ведущая организация	ОАО «ФНПЦ «Алтай» (г. Бийск)

Защита диссертации состоится «28» мая 2012 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д212.004.08 в Бийском технологическом институте (филиале) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 659305, Российская Федерация, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке БТИ (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан «27» апреля 2012 г.

и.о. ученого секретаря
диссертационного совета,



Верещагин А.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Этап термообработки является одним из основных во многих технологических процессах производства изделий различного назначения.

Термообработка традиционными способами происходит относительно медленно при низкой теплопроводности исходного материала изделия, часто встречающейся у минеральных и органических веществ, и композиций на их основе. При этом возможны локальный перегрев, подгорание поверхности нагрева, возникновение недопустимых механических напряжений, в сумме приводящих, либо к физическому разрушению изделия, либо к молекулярному температурному распаду, как следствие – возникновение брака.

Для термообработки материалов и веществ с малым коэффициентом теплопроводности, широко используют сверхвысокочастотное электромагнитное (СВЧ ЭМ) поле, например, сушка древесины, ускорение полимеризации пластмасс и смол. Данный способ нагрева накладывает определенные ограничения на характеристики нагреваемого материала или вещества, а так же на условия их обработки.

Основным препятствием на пути внедрения СВЧ диэлектрического нагрева является необходимость решения задач электродинамики и электроники, теплопереноса и термомеханики, материаловедения, измерения и контроля конкретной технологии, а также обоснование экономической эффективности применения.

Примером такого процесса в отрасли автомобилестроения является термическое формование брикетов тормозных накладок для легкового автотранспорта. Процесс характеризуется значительными энергопотерями и сложностью обеспечения требуемого качества готового изделия. Особенности данного технологического процесса затрудняют внедрение СВЧ диэлектрического нагрева на стадии формования, но его практическая реализация позволит значительно повысить технико-экономические показатели в целом. Использование СВЧ диэлектрического нагрева фрикционных композиций на стадии прессования является одним из перспективных направлений в массовом промышленном производстве.

Таким образом, разработка элементов установки для вулканизации фрикционной композиции в полости пресс-формы является актуальной и перспективной задачей, решение которой повысит качество готовых изделий и энергоэффективность процесса в целом.

Цель работы – совершенствование процесса производства фрикционных накладок для легковых автомобилей за счет оптимального применения СВЧ диэлектрического нагрева фрикционной композиции

непосредственно в полости пресс-формы на этапе прессования, определение функциональных зависимостей основных показателей процесса.

Задачи исследований:

- провести анализ технологического процесса изготовления тормозных накладок легковых автомобилей на возможность применения СВЧ диэлектрического нагрева;
- провести анализ существующих установок СВЧ диэлектрического нагрева для процессов термического формования;
- провести анализ существующих математических описаний процесса распространения СВЧ ЭМ поля в различных средах и волноводных структурах, и выбрать наиболее подходящее;
- сформулировать технические требования к конструкции элементов установки СВЧ диэлектрического нагрева обеспечивающей нагрев полимерной фрикционной композиции непосредственно в полости пресс-формы и допускающей одновременный процесс прессования;
- сформулировать математическое описание элементов установки СВЧ диэлектрического нагрева;
- выявить основные факторы, влияющие на эффективность процесса СВЧ диэлектрического нагрева в разработанной установке, и определить основные функциональные зависимости;
- провести возможную оптимизацию разработанных элементов установки СВЧ диэлектрического нагрева;
- сформулировать математическую модель, позволяющую прогнозировать параметры качества процесса СВЧ диэлектрического нагрева полимерной фрикционной композиции в зависимости от основного компонентного состава и габаритных размеров формируемого изделия.

Объекты, предметы и методы исследования. Объектами исследования являются процессы: распространения СВЧ ЭМ поля в различных средах и волноводных структурах; распределения плотности выделения тепла по объему нагреваемого материала; теплопереноса; изменения электрических свойств фрикционной композиции.

Предметами исследования являются: элементы установки СВЧ диэлектрического нагрева полимерной фрикционной композиции в полости пресс-формы для изготовления тормозных накладок легковых автомобилей и их конструктивные решения; тепловыделение в пресс-формах, заполненных полимерной фрикционной композицией; полимерная фрикционная композиция.

В диссертационной работе использовались расчетно-аналитические методы, методы математического и компьютерного моделирования, экспериментальные методы.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- впервые проведено комплексное исследование процесса СВЧ диэлектрического нагрева фрикционной композиции в полости пресс-формы в процессе термического формования и прессования фрикционных накладок на основе анализа разработанной модели процесса СВЧ нагрева, учитывающей состав фрикционной композиции и габаритные размеры формуемого изделия;
- предложена методика расчета энергетических характеристик элементов установки СВЧ диэлектрического нагрева и равномерности нагрева формуемого изделия;
- выявлены наиболее значимые зависимости энергетических характеристик элементов установки СВЧ диэлектрического нагрева и параметров качества формуемого изделия от его габаритных размеров и электрических характеристик фрикционной композиции.

Положения, выдвигаемые на защиту:

- методика инженерного расчета энергетических характеристик элементов установки СВЧ диэлектрического нагрева полимерной фрикционной композиции и их основных размеров;
- методика прогнозирования равномерности СВЧ диэлектрического нагрева полимерной фрикционной композиции в зависимости от основного компонентного состава;
- теоретические и экспериментальные результаты, полученные в процессе синтеза элементов установки СВЧ диэлектрического нагрева полимерной фрикционной композиции в полости пресс-формы.

Практическая значимость.

- разработаны практические рекомендации по проектированию установки СВЧ диэлектрического нагрева полимерной фрикционной композиции в полости пресс-формы в процессе термического формования фрикционных накладок, позволяющие определить основные показатели качества процесса;
- предложена новая конструкция установки с СВЧ диэлектрическим нагревом фрикционной композиции непосредственно в полости пресс-формы, позволяющей осуществить одновременное изготовление до 10 фрикционных накладок для легковых автомобилей, при затрачиваемой мощности на нагрев 1кВт и времени процесса до 11 минут;
- внедрение СВЧ диэлектрического нагрева полимерной фрикционной композиции в процессе изготовления тормозных накладок легковых автомобилей позволит интенсифицировать процесс производства, уменьшить общие затраты энергии на осуществление процесса, повысить качество конечного изделия.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные

технологии: производство, экономика, образование» (г. Бийск, 2009 г.), на международной конференции Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2010 (г. Новосибирск, 2010 г.), на Всероссийской конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» ИАМП'2010, 2011 (г. Бийск, 2010, 2011 гг.).

Публикации. Основные результаты диссертации изложены в 11 опубликованных печатных работах, в том числе 2 работы в журнале, рекомендованном ВАК для публикации основных результатов диссертационных исследований, и 1 патент.

Объем и структура работы. Диссертация изложена на 110 страницах машинописного текста и состоит из введения, 3 глав, выводов, списка литературы, включающего 96 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

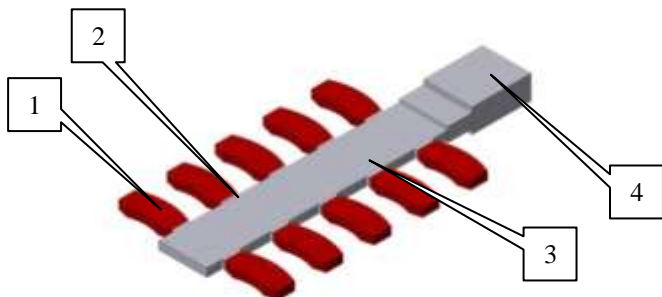
Во **введении** обоснована актуальность диссертации, сформулированы цели, задачи исследования.

Первая глава диссертационной работы содержит литературный обзор некоторых аспектов процесса производства тормозных накладок легковых автомобилей. Приводится краткое описание химизма основных реакций и основных этапов процесса термической вулканизации, особенностей аппаратурно-технологического оформления процесса, основных критериев качества изделия и процесса в целом. Выявлены основные недостатки традиционных методов нагрева.

Рассмотрены основные теоретические описания физических основ диэлектрического нагрева. Проведен анализ типовых элементов и узлов СВЧ трактов, конструкторско-технологических особенностей волноводных СВЧ устройств. На основе патентного поиска рассмотрены и проанализированы существующие установки осуществления нагрева сред и изделий посредством СВЧ ЭМ излучения.

Вторая глава диссертационной работы непосредственно посвящена процессам структурного синтеза, проектирования и оптимизации элементов установки СВЧ ($f = 2,45$ ГГц) диэлектрического нагрева, созданию и исследованию модели распространения плоскополяризованной ЭМ волны в слоистой среде с потерями.

Структурный синтез установки СВЧ диэлектрического нагрева был осуществлен с использованием программ компьютерного моделирования основных физических процессов и явлений. В результате структурного синтеза была разработана модель системы, состоящая из следующих основных элементов: волновой разветвитель, окно связи, пресс-форма. Модель системы показана на рисунке 1.



1 – полость пресс-формы, заполненная полимерной композицией; 2 – окно связи; 3 – основной волновод, образованный волновыми разветвлениями; 4 – трансформатор волновых сопротивлений.

Рисунок 1 – Внешний вид синтезированной модели установки

$$\Lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_K}\right)^2}}, \quad (1)$$

$$E_y = iZ \frac{f}{f_c} H_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-\gamma z}, \quad (2)$$

$$H_x = i \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_K}\right)^2} \frac{\lambda_K}{\lambda_0} H_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-\gamma z}, \quad (3)$$

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-\gamma z}, \quad (4)$$

$$\gamma = i \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_K}\right)^2}. \quad (5)$$

С учетом геометрии моделей разработанных элементов установки, и характера распространения СВЧ ЭМ волны в идеальном прямоугольном волноводе – отличие длины волны в волноводной структуре Λ от длины волны в открытом пространстве λ_0 при одинаковой частоте, по формулам (1–5) было вычислено значение Λ и построены графики значений действительных и мнимым частей E и H составляющих ЭМ волны типа H_{10} вдоль оси Z , совпадающей с продольной осью волновода, в выбранных сечениях.

Прямоугольный волновод, образованный последовательным соединением волновых разветвителей, имеет следующие геометрические размеры: ширина $a = 0,08636$ м, высота $b = 0,015$ м.

В результате проведения анализа графиков функциональных зависимостей $\text{Re}(E_y(z))$, $\text{Im}(E_y(z))$, $\text{Re}(H_x(z))$, $\text{Im}(H_x(z))$, $\text{Re}(H_z(z))$, $\text{Im}(H_z(z))$ (плоскость сечения проходит параллельно оси Y , через точку $O(0,5a, 0, 0)$, для $\text{Re}(H_z(z))$, $\text{Im}(H_z(z))$ плоскость сечения проходит параллельно оси Y , через точку $O(0, 0, 0)$.) и сопоставления их с результатами компьютерного моделирования, был сделан вывод о достижении максимальной передаваемой мощности в полость пресс-формы при расположении окон связи «напротив» максимума действительной части E составляющей СВЧ ЭМ стоячей волны типа H_{10} внутри волновода. В случае наличия последовательности окон связи, они должны располагаться на расстоянии $A/2$ друг от друга вдоль волновода, что должно обеспечиваться соответствующей длиной одного волнового разветвителя. Наличие стоячей волны в волноводе приводит к увеличению амплитудных значений E и H за счет резонанса, и, следовательно, увеличивается мощность тепловых потерь, что является положительным эффектом в данном случае.

При заданной f окно связи является волноводом малой длины, с поперечными геометрическими размерами меньше критических. Возбуждаемая в нем ЭМ волна имеет большое затухание, что не позволяет сколько-нибудь значительно увеличивать его длину, поскольку это приводит к уменьшению передаваемой мощности в плечи волнового разветвителя и далее в нагрузку. Следствием является снижение общего коэффициента полезного действия установки.

Существует несколько способов обеспечения условий распространения ЭМ волны в волноводной структуре, это: изменение геометрической формы и/или изменение геометрических размеров структуры; замена, заполняющего пространство распространения ЭМ волны, диэлектрического вещества; изменение типа ЭМ волны возбуждаемой в волноводной структуре. Из рассмотренных способов обеспечения условий распространения СВЧ ЭМ волн в волноводных структурах, был выбран основанный на использовании, в качестве заполняющего пространство вещества, материала с определенными электрическими характеристиками. При увеличении коэффициентов относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей материала, длина волны в нем уменьшается, следовательно, увеличивается значение критической частоты f_c для волноводной структуры с заданными геометрическими размерами.

$$f_c = \frac{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2}}{2\sqrt{\varepsilon_a \mu_a}}. \quad (6)$$

В соответствии с формулой (6), вычисленная критическая частота для прямоугольного волновода, образованного окном связи (с $\varepsilon = 1$ и $\mu = 1$) размерами 0,03 м на 0,015 м, равна 5 ГГц. Выполнив обратные

преобразования и вычисления (при $f_c = 2,45$ ГГц и заданных ранее размерах окна связи), можно получить необходимое значение относительной диэлектрической проницаемости материала окна связи. В рассматриваемом случае значение относительной диэлектрической проницаемости материала окна связи должно быть равным или больше 4,165 (при $\mu = 1$). Увеличивать требуемое значение относительной диэлектрической проницаемости материала окна связи возможно в том случае, если в результате оно приближается к среднему значению относительной диэлектрической проницаемости нагреваемой композиции, поскольку в таком случае минимизируются отражения ЭМ волн от возникающих границ раздела сред. Материал окна связи должен обладать малыми значениями тангенсов углов диэлектрических и магнитных потерь, для большей минимизации затухания, достаточной механической прочностью и термостойкостью. Длина волновода связи (толщина окна связи) должна быть минимально допустимой, определяемой из соображений предельной прочности используемого материала. Требуемыми характеристиками обладают различные стекла, ситаллы, СВЧ керамика.

Для оценки равномерности нагрева фрикционной композиции в полости пресс-формы, аналитически рассчитана картина распространения СВЧ ЭМ волны типа H_{10} в упрощенной волноводной структуре. Волноводная структура, упрощенная по геометрии, аппроксимирует моделируемый объем полости пресс-формы, имеющей более сложную геометрию. Утверждать что типом ЭМ волны, возбуждаемой в моделируемой волноводной структуре в конкретном случае, является H_{10} , можно на основании результатов компьютерного моделирования, и задаваемых граничных условиях возбуждения ЭМ волны в рассматриваемой структуре.

Принимая во внимание геометрическую форму (рисунок 1) и размеры внутренней полости пресс-формы, в качестве аппроксимирующего объема был выбран параллелепипед со следующими размерами: длина $l = 0,095$ м, ширина $h = 0,04$ м, высота $s = 0,015$ м; заполненный полимерной фрикционной композицией с известными электрическими характеристиками. Значения относительных магнитной и диэлектрической проницаемостей фрикционной композиции, используемые в расчетах, принимались равными 1 и 5,14 соответственно, тангенс угла диэлектрических потерь принимался равным 0,0057. Значения величин были получены в результате измерения соответствующих характеристик предоставленных образцов полимерной фрикционной композиции.

Формулы, приведенные в различных литературных источниках для расчета электрической и магнитной составляющих ЭМ волны типа H_{10} для волноводной структуры с прямоугольным поперечным сечением, выведены с учетом различных допущений. В частности, принимается равенство

относительных диэлектрической и магнитной проницаемостей единице и отсутствие диэлектрических потерь в заполняющей среде, что не позволяет использовать их непосредственно в расчетах. Данные формулы были преобразованы к виду, позволяющему их использовать для расчета при условиях $\mu_a \neq 1$, $\varepsilon_a \neq 1$ и $\sigma \neq 0$.

$$Z_d = \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}}, \quad (7)$$

$$\gamma = i2\pi f \sqrt{\varepsilon_a \mu_a}, \quad (8)$$

$$E_y = iZ_d \frac{f}{f_c} H_0 \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) e^{-\gamma z \frac{f}{f_c}}. \quad (9)$$

Поскольку тепловые потери в диэлектрике в основном (принимается, что композиция не обладает ферромагнитными свойствами) определяются действительной частью электрической составляющей ЭМ волны в волноводной структуре, то для оценки равномерности плотности выделения тепловой энергии достаточно рассчитать значения данной составляющей в интересующих сечениях или по всему нагреваемому объему.

Учитывая направление ввода СВЧ энергии в полость пресс-формы и условие короткозамкнутости аппроксимирующего волновода, в его объеме будет существовать суммарная волна, являющаяся суперпозицией падающей и отраженной волн. Принимая во внимание возбуждаемый в волноводной структуре тип волны, оценка равномерности плотности выделения тепловой энергии проводилась на основании результатов вычислений значений $\text{Re}(E_y)$ суммарной волны в диапазоне допустимых значений по осям X , Z (соответствующих h и l аппроксимирующего волновода).

При вычислении суммарной волны учитывались только падающая и первая отраженная ЭМ волна, так как принималось условие отсутствия отражений ЭМ волн от границы возбуждения.

Было выбрано сечение, лежащее в плоскости YOZ при $x=0.02$, поскольку ему соответствуют максимумы значений E_y и оно является плоскостью симметрии по оси X .

На основании формул (7–9), проведя алгебраическое сложение функций падающей и отраженной волн с учетом ограничений, рассмотренных выше, построен график функциональной зависимости $\text{Re}(E_y(z,x))$ суммарной волны при допустимых значениях параметров l и h (рисунок 2).

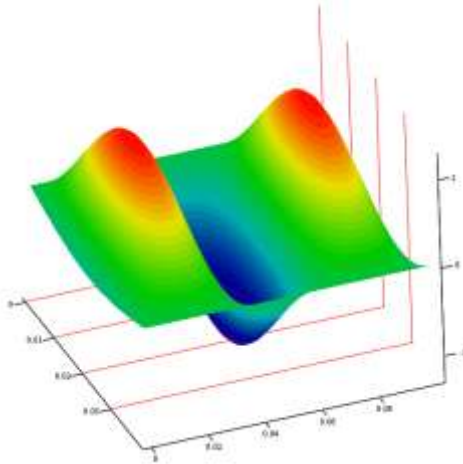


Рисунок 2 – Функциональная зависимость $\text{Re}(E_y(z,x))$ стоячей волны при допустимых значениях параметров l и h .

Поскольку мощность тепловых потерь пропорциональна квадрату напряженности ЭМ волны, следовательно, величиной $\frac{1}{2}\text{Re}(E_y)^2$ можно охарактеризовать объемную равномерность нагрева полимерной композиции. График функциональной зависимости $\frac{1}{2}\text{Re}(E_y(z,x))^2$ при допустимых значениях параметров l, h представлена на рисунке 3.

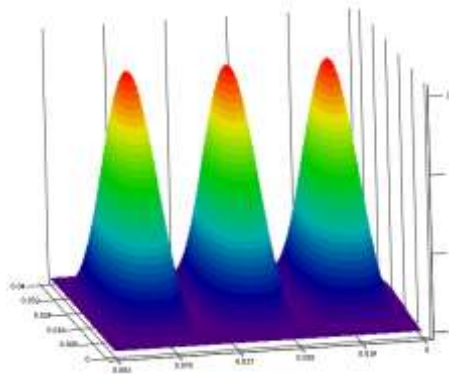


Рисунок 3 – Функциональная зависимость $\frac{1}{2}\text{Re}(E_y(z,x))^2$ при допустимых значениях параметров l и h

На рисунках 2 и 3 можно выделить три четких максимума $\text{Re}(E_y)$ суммарной волны, что согласуется с результатами компьютерного

моделирования. Суммарная волна не является бегущей, что снижает равномерность нагрева, так как максимумы плотности выделения тепла неподвижны, и существуют области, где выделение тепла практически не происходит.

В качестве критерия равномерности нагрева $T_{об}$ СВЧ ЭМ излучением полимерной фрикционной композиции в полости пресс-формы была принята величина обратная отношению плотности выделения тепла в последнем и первом максимумах, считая от плоскости ввода СВЧ энергии (рисунок 2). Зависимость данного отношения от значения величины $tg_{к}\alpha$ (при постоянных значениях μ и ϵ композиции) представлена на рисунке 4.

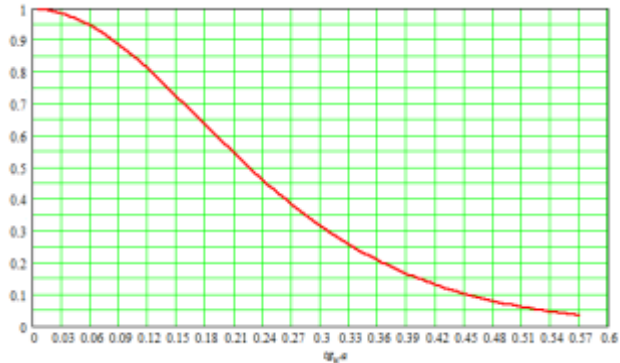


Рисунок 4 – Функциональная зависимость $1/T_{об}(tg_{к}\alpha)$

Из графика видно, что при изменении значения $tg_{к}\alpha$ в интервале $[0,0057; 0,057]$, величина $1/T_{об}$ находится в интервале $[0,95; 0,99]$, то есть можно говорить о достижении высокой равномерности нагрева. Стоит отметить, что критерий $T_{об}$ характеризует лишь плотность выделения тепла в объеме композиции, и в нём не учитывается теплопередача за счет теплопроводности самой композиции и элементов пресс-формы, поэтому итоговая равномерность нагрева изделия в процессе вулканизации всегда будет выше. При компьютерном моделировании нагрева изделия только за счет СВЧ диэлектрических потерь с учетом влияния теплопроводности композиции была получена абсолютная неравномерность нагрева не хуже 45°C .

График функциональной зависимости $T_{об}(\mu, \epsilon)$ композиции не приводится в работе, поскольку для большинства веществ, входящих или могущих войти в состав композиции, значения μ и ϵ принадлежат ограниченному диапазону значений, обычно $\epsilon \in [1; 15]$, а μ всегда порядка 1. И как уже отмечалось выше, с увеличением $\sqrt{\mu\epsilon}$ уменьшается длина волны в среде распространения, следовательно, повышается равномерность нагрева

изделия за счет большего количества максимумов плотности выделения тепла.

Коэффициент отражения по мощности ($\dot{\Gamma}_{наг}$) эквивалента нагрузки в выбранном сечении, необходимый для использования матричного представления элементов и узлов СВЧ тракта установки, был вычислен по следующей формуле, аналогично случаю оценки равномерности нагрева.

$$\dot{\Gamma}_{наг} = \frac{\frac{(\dot{E}_{опр})^2}{\dot{Z}}}{\frac{(\dot{E}_{над})^2}{\dot{Z}}} = \frac{(\dot{E}_{опр})^2}{(\dot{E}_{над})^2}. \quad (10)$$

Вычисленное значение модуля комплексного коэффициента отражения по мощности $|\dot{\Gamma}_{наг}|$ для рассматриваемого случая эквивалента нагрузки равно 0,89. Вычисленное значение согласуется с результатом, полученным на основе компьютерного моделирования. В эквиваленте нагрузки поглощается не более 11% энергии, непосредственно вводимой с выбранного направления. Такая ситуация часто встречается на практике, что препятствует повышению коэффициента полезного действия установок, в которых нагрузка или нагрузки имеют высокий коэффициент отражения по мощности. На рисунке 5 представлен график зависимости $|\dot{\Gamma}_{наг}(tg_k \alpha)|$ для конкретного случая эквивалента нагрузки.

Из графика видно, что при изменении значения $tg_k \alpha$ в интервале $[0,0057; 0,057]$, присутствует значительное отражение подводимой мощности (за пороговую величину условно было принято $|\dot{\Gamma}_{наг}|=0,3$), но в тоже время данный интервал соответствует высокой равномерности нагрева композиции.

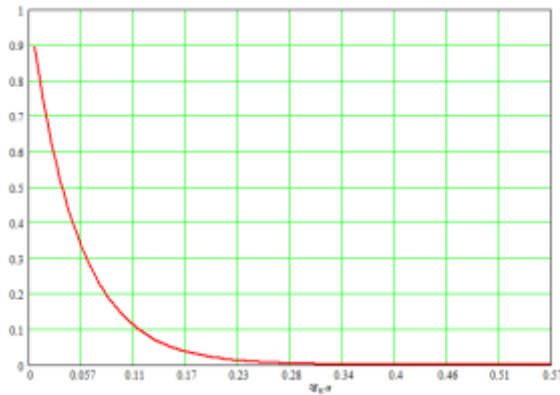


Рисунок 5 – Функциональная зависимость $|\dot{\Gamma}_{наг}(tg_k \alpha)|$.

Преимущество разработанной структуры установки состоит в том, что она позволяет достичь высокого или приемлемого коэффициента полезного действия в целом, при значительном варьировании значения $|\dot{\Gamma}_{нас}|$, что будет показано далее.

Матрица рассеяния волнового разветвителя, нормированная по мощности, рассчитывается через значение мощности передаваемой в одно из плеч, согласно её определению.

Значение мощности P передаваемой по идеальному волноводу определяется в соответствии с выражениями:

$$P = \frac{ba}{4} Z_{10} H_0^2, \quad (11)$$

$$Z_{10} = \frac{Z}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a\sqrt{\epsilon_a\mu_a}}\right)^2}}, \quad (12)$$

$$H_{0x} = \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2} \frac{2a}{\lambda} H_0. \quad (13)$$

Передаваемая мощность в плече разветвителя вычисляется через замену величины H_0 в выражении (11) величиной H_{0x} , рассчитанную для основного волновода. Такой порядок расчета обосновывается условиями возбуждения ЭМ волны в плече.

Требуемые коэффициенты матрицы рассеяния устройства рассчитывались на основании полученных значений передаваемых мощностей в соответствующих плечах, как корень отношения соответствующих мощностей:

$$S = \sqrt{\frac{P}{P_{nad}}}. \quad (14)$$

В случае рассматриваемого волнового разветвителя, рассчитанная нормированная матрица рассеяния S_p имеет следующий вид:

$$S_p = \begin{bmatrix} 0 & 0,902 & 0,251 & 0,251 \\ 0,902 & 0 & 0,251 & 0,251 \\ 0,173 & 0,173 & 0 & 0 \\ 0,173 & 0,173 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Непосредственно рассчитывались основополагающие коэффициенты: S_{13} , S_{14} , S_{23} , S_{24} ; коэффициенты: S_{31} , S_{32} , S_{41} , S_{42} определялись на основании результатов компьютерного моделирования; коэффициенты S_{12} и S_{21} вычислялись из условия равенства суммарной передаваемой доли мощности единице.

Полученные значения коэффициентов нормированной матрицы рассеяния согласуются с результатами компьютерного моделирования.

Волновой разветвитель с подключенными нагрузками (рисунок 6) представляет собой четырехполюсник, и для задания его нормированной матрицы рассеяния достаточно вычислить следующие коэффициенты: S_{11} , S_{12} .

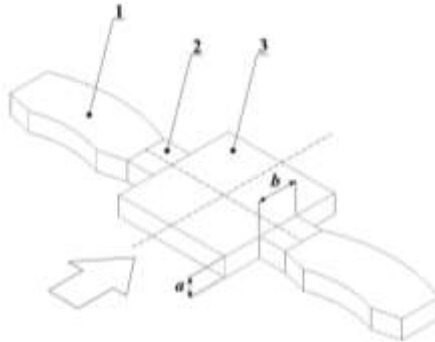
Пример вычисленной нормированной матрицы рассеяния вновь образованного устройства – элементарного звена (S_m), при $|G_{формы}|=0,89$ представлена ниже ($S_{11}=S_{22}$, $S_{12}=S_{21}$):

$$S_m = \begin{vmatrix} 0,0534 & 0,95562 \\ 0,95562 & 0,0534 \end{vmatrix}$$

Здесь, $G_{формы}$ – суммарный коэффициент отражения полости пресс-формы, заполненной фрикционной композицией, и окна связи.

Нормированная матрица рассеяния эквивалентного четырехполюсника, состоящего из произвольного количества последовательного соединения элементарных звеньев, рассчитывается согласно формуле:

$$S'_{ik} = \frac{(-1)^{i+k} ||S| - |B||_{i,k}^{p,q \dots r,s \dots u,v}}{||S| - |B||_{p,q \dots}}. \quad (15)$$



Стрелкой показано возможное направление ввода СВЧ энергии. 1 — объем пресс-формы, 2 — объем окна связи, 3 — объем волнового разветвителя, a — высота окна связи, b — ширина окна связи.

Рисунок 6 – Взаимное соединение объемов волнового разветвителя и нагрузок (образованных окнами связи и пресс-формами).

Зависимости КПД устройства η при различных значениях $G_{формы}$ от количества n последовательно соединенных элементарных звеньев представлена на рисунке 7.

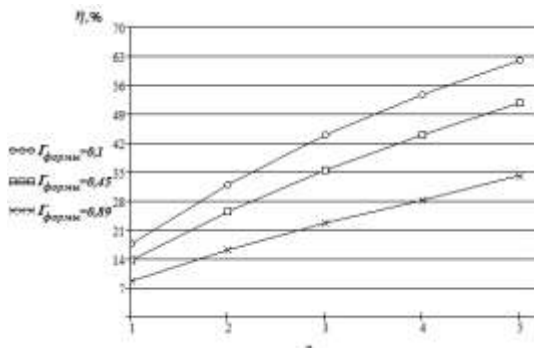
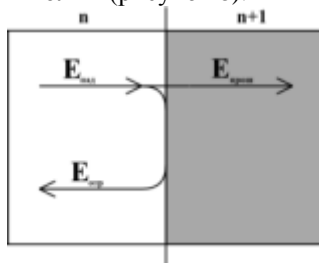


Рисунок 7 – Зависимость КПД устройства η от количества n последовательно соединенных элементарных звеньев

Как видно из графиков, при достаточном количестве элементарных звеньев, несмотря на некоторое снижение значения поглощаемой мощности на одной нагрузке, можно достичь приемлемого КПД установки при значительном варьировании значения $\Gamma_{\text{формы}}$.

Для вычисления эквивалентных значений основных электрических характеристик полимерной фрикционной композиции (ϵ_k, σ_k) применялась модель послойного представления веществ в композиции. Суть данной модели в том, что композиция представляется не как случайное смешение веществ в некотором объеме, а как последовательность слоёв, каждый из которых представляет собой чистое вещество с известными электрическими характеристиками. Последовательность слоёв в общем случае выбирается произвольно. Для полученной последовательности слоёв рассчитывается распространение плоской ЭМ волны (рисунок 8).



n – порядковый номер слоя среды; $E_{\text{пад}}$ – волна в среде n ; $E_{\text{отр}}$ – волна, отраженная от границы раздела сред; $E_{\text{прошн}}$ – волна, прошедшая в среду $n + 1$.

Рисунок 8 – Распространение плоской ЭМ волны на границе раздела двух сред.

Толщины слоёв веществ S_n в последовательности рассчитываются пропорционально их объемной или массовой долям в композиции

$$S_n = v_n k. \quad (16)$$

при условии

$$L = \sum_n v_n k, \quad (17)$$

где v_n – объемная доля вещества в композиции; k – коэффициент масштаба; L – толщина рассматриваемого слоя композиции.

Значение L должно удовлетворять неравенству

$$L \geq \lambda_0. \quad (18)$$

для возможности более точного вычисления эффективной длины волны λ_k и затухания, а, следовательно, ε_k и σ_k . Для промышленного СВЧ диэлектрического нагрева преимущественно используются ЭМ волны с частотой 2,45 ГГц, что соответствует $\lambda_0 = 0,1224$ м.

Следует отметить, что в зависимости от значения σ вещества, полное затухание ЭМ волны может наблюдаться на незначительной глубине слоя S_σ . Например, у металлов значение σ порядка $10^7 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$, соответствующая глубина полного затухания порядка 10^{-6} м. Может оказаться так, что

$$S_n \geq S_\sigma. \quad (19)$$

вследствие чего возникнет граница полного отражения ЭМ волны, что не соответствует действительности.

Как правило, вещества с высокой проводимостью представляют собой включения небольших металлических частиц средним диаметром d , равномерно распределенных в диэлектрическом объеме композиции. Тогда на толщине dl композиции будет находиться количество частиц, которому соответствует толщина слоя вещества частиц $S_{частиц}$, определяемая из выражения

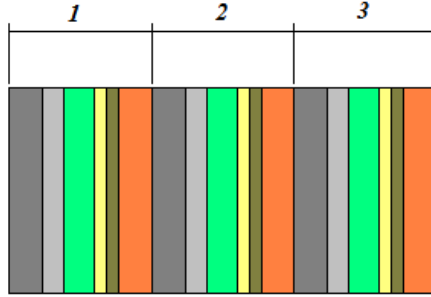
$$S_{частиц} = \frac{S_n dl}{L}. \quad (20)$$

Приравнивая $dl = d$, получим выражение для расчета допустимой толщины слоя вещества $S_{дон}$ с большим значением σ

$$S_{дон} = \frac{S_n d}{L}. \quad (21)$$

Данная методика определения $S_{дон}$ справедлива только при содержании веществ с высокой проводимостью менее 1% об. доли (менее 10% масс. доли в зависимости от состава композиции) и $d \leq 10^{-4}$ м, поскольку в противном случае выполняется неравенство (19).

В результате учета значения $S_{don.}$, суммарная толщина последовательности слоёв веществ в большинстве случаев оказывается значительно меньше L . Необходимая суммарная толщина достигается через периодическое повторение последовательности слоёв веществ (рисунок 9).



Цифрами обозначены периодические последовательности слоёв, цветом выделены слои различных веществ.

Рисунок 9 – Пример периодической последовательности.

При расчетах принималось, что плоская ЭМ волна падает нормально поверхностям слоёв веществ, а магнитные характеристики рассматриваемых веществ имеют значения: $\mu=1$ и $tg\mu=0$.

Распространение плоской ЭМ волны в проводящих средах при наличии границ отражения описывается формулами:

$$\dot{E} = \dot{E}_0 e^{-ikz} e^{i\omega t}, \quad (22)$$

$$\dot{H} = \frac{\dot{E}_0}{\dot{Z}_n} e^{-ikz} e^{i\omega t}, \quad (23)$$

$$k = \omega \sqrt{\varepsilon_c \mu_n}, \quad (24)$$

$$\dot{Z}_n = \sqrt{\frac{\mu_n}{\varepsilon_c}}, \quad (25)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_a \left(1 - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a} \right), \quad (26)$$

$$k_{omp_{n,n+1}} = \frac{\dot{Z}_{n+1} - \dot{Z}_n}{\dot{Z}_{n+1} + \dot{Z}_n}, \quad (27)$$

$$\dot{k}_{\text{прон}_{n,n+1}} = \frac{2\dot{Z}_{n+1}}{\dot{Z}_{n+1} + \dot{Z}_n}, \quad (28)$$

$$P_{\text{ср.}} = \frac{1}{2} \int \frac{|j|^2}{\sigma} dV. \quad (29)$$

Средняя мощность тепловых потерь $P_{\text{ср.}}$ вычисляется для прямоугольного параллелепипеда размерами 0,04x0,015x0,095 м аппроксимирующего нагреваемое изделие.

Задача вычисления распространения ЭМ волны в среде с $\sigma \neq 0$ в соответствии формулам (22–29) для небольшого количества слоёв является легко разрешимой. При значительном увеличении общего количества слоёв N , объем необходимых вычислений многократно возрастает. Для решения данной задачи разработана программа для ЭВМ, выполняющая расчет прохождения ЭМ волн через произвольное количество слоёв веществ с заданными основными электрическими характеристиками, позволяющая так же учитывать распространение множества возникающих отраженных волн. Учет отраженных волн позволяет вычислить суперпозицию волн и распределение тепловых потерь в среде или некоторых волноводных структурах. Поскольку в общем случае количество возникающих прошедших и отраженных ЭМ волн стремится к бесконечности, а все расчеты ведутся с конечной точностью, то критерием окончания вычислений является невыполнение неравенства (30), в котором критерий F ограничивает общее количество вычисляемых прошедших и отраженных волн в обоих направлениях через слои веществ.

$$\frac{E_n}{E_0} > F, \quad (30)$$

где E_n – начальное значение напряженности ЭМ волны, падающей на рассчитываемый слой; E_0 – начальное значение напряженности ЭМ волны, падающей на всю последовательность слоёв.

Вычисление λ_k осуществляется через определение суммарной длины четного количества полуволн действительной части электрической составляющей плоской ЭМ волны распространяющейся через слои веществ и выполнение простейших преобразований. На основании полученного значения λ_k вычислялось действительное относительное значение ϵ_k .

$$\epsilon_k = \frac{\lambda_0^2}{\lambda_k^2}. \quad (31)$$

Поскольку затухание ЭМ волны по (22, 23) происходит экспоненциально, то вычисление σ_k сводится к решению уравнения (32) относительно s и выполнению вычислений по формуле (33).

$$e^{-sl} = m, \quad (32)$$

$$\sigma_k = \omega \varepsilon_{\kappa a} \sqrt{1 - \left(\frac{2s^2}{\omega^2 \varepsilon_{\kappa a}} + 1 \right)^2}, \quad (33)$$

где s – мнимая часть коэффициента распространения k ; $\varepsilon_{\kappa a}$ – абсолютное значение ε_{κ} ; l – расстояние, на котором $|\dot{E}|$ уменьшается в m раз.

Поскольку толщины слоёв являются функциями от их объёмных долей в смеси, то на первый взгляд, совместное уменьшение $S_{доп.}$ с одновременным увеличением количества периодических последовательностей N должно повысить точность моделирования. Однако, проведенное исследование используемой модели показало, что это не так.

Предположим, что $S_{доп.} \rightarrow 0$, тогда, на основании формулы (22), величина затухания, определяемая экспоненциальной составляющей, $\rightarrow 0$, и величина напряженности электрической составляющей поля будет являться постоянной величиной, а, следовательно, затухание будет определяться преимущественно коэффициентами отражения и пропускания от границ разделов слоёв, то есть амплитуда электрической составляющей первой прошедшей волны будет равна:

$$A_I = A_0 \cdot \Pi k_i. \quad (34)$$

И в случае «сверхтонких» слоёв, полное затухание ЭМ волны может наблюдаться на глубине слоя, не соответствующего действительности.

На основании вышеизложенного для повышения достоверности результатов моделирования рекомендуется выбирать минимальную толщину слоя компонента смеси не только на основании расчетов, но и учитывать фракционный состав веществ.

Третья глава посвящена проведенному экспериментальному исследованию. Для экспериментального подтверждения основных положений работы: особенности формирования окна связи и значение передаваемой в нагрузку мощности, были изготовлены волновой разветвитель с окнами связи и две калориметрические нагрузки, в соответствии с рекомендациями, приведенными в работе. Измерение поглощаемой мощности осуществлялось калориметрическим способом. Прямые, равнозначные, многократные измерения температуры рабочего тела калориметрической нагрузки представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты измерения температуры рабочего тела калориметрической нагрузки

№ измерения	Начальная температура калориметрической нагрузки, °C $t_{нач}$	Конечная температура калориметрической нагрузки, °C $t_{кон}$	Разность температур, °C Δt
1	16	83	67
2	16	85	69
3	16	86	70
4	16	86	70
5	18	87	69
6	18	88	70
7	19	87	68
8	19	88	69
9	20	89	69
10	20	91	71
	$17,8 \pm 1,58$ ($p = 0,95$)	$87 \pm 1,58$ ($p = 0,95$)	$69,2 \pm 0,81$ ($p = 0,95$)

Вычисленное среднее значение мощности поглощаемой в одной калориметрической нагрузке:

$$P_{ср.} = 65,7 \text{ Вт}$$

Расхождение теоретически рассчитанного (согласно $|S_p| - 63 \text{ Вт}$) и полученного экспериментальным путем значений составляет $\sim 4,2\%$. Что может быть объяснено погрешностью измерений, неточностью изготовления элементов волнового разветвителя и окон связи, вариацией условий проведения эксперимента, а также различными допущениями принимаемым при выполнении теоретических расчетов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В итоге проведения исследовательской работы получены следующие результаты:

1. Показана возможность осуществления СВЧ диэлектрического нагрева полимерной фрикционной композиции непосредственно в пресс-форме на этапе прессования с достижением требуемых параметров качества.
2. Выявлены основные факторы, влияющие на эффективность процесса СВЧ диэлектрического нагрева фрикционной композиции в полости пресс-формы.
3. Предложена математическая модель процесса СВЧ нагрева, учитывающая состав фрикционной композиции и габаритные размеры формуемого изделия, позволяющая прогнозировать равномерность нагрева

фрикционной композиции в полости пресс-формы и энергетические характеристики установки.

4. Предложена методика расчета энергетических характеристик элементов установки СВЧ диэлектрического нагрева и равномерности нагрева формуемого изделия.

5. Разработана конструкция установки СВЧ диэлектрического нагрева фрикционной композиции непосредственно в полости пресс-формы, позволяющей осуществить одновременное изготовление до 10 фрикционных накладок для легковых автомобилей, при мощности, затрачиваемой на нагрев, равной 1 кВт и времени процесса до 11 минут.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

a, b – поперечные размеры прямоугольного волновода, м; A_0 – начальное значение амплитуды; $|B|$ – матрица, определяемая последовательностью подключения $2-n$ полюсников и нагрузок с коэффициентами отражения Γ_i ; E_0 – начальное значение напряженности ЭМ поля, В/м; $\dot{E}_{отр}$ – комплексное значение напряженности электрической составляющей отраженной ЭМ волны, В/м; $\dot{E}_{пад}$ – комплексное значение напряженности электрической составляющей падающей ЭМ волны, В/м; \dot{E} – комплексная электрическая составляющая ЭМ поля, В/м; f – частота возбуждения прямоугольного волновода, Гц; f_c – критическая частота прямоугольного волновода, Гц; H_0 – начальное значение напряженности магнитной составляющей, А/м; H_{0x} – напряженность магнитной составляющей на узкой стенке основного волновода, А/м; \dot{H} – комплексная магнитная составляющая ЭМ поля, А/м; \dot{j} – комплексная плотность электрического тока, А/м²; k – комплексное волновое число; $k_{отр_{n,n+1}}$ – коэффициент отражения ЭМ волны от границы раздела сред при распространении из слоя n , в слой $n+1$; $k_{проп_{n,n+1}}$ – коэффициент пропускания ЭМ волны от границы раздела сред при распространении из слоя n , в слой $n+1$; k_i – i -й коэффициент отражения; m, n – положительные целые числа; $P_{ср}$ – средняя мощность тепловых потерь, Вт; p, q – зажимы подключенные к пассивным рассогласованным нагрузкам Γ_p, Γ_q соответственно; r, s, u, v – зажимы попарно соединенные через отрезки линий; $|S|$ – нормированная матрица рассеяния $2-n$ полюсника; t – время, с; z – значение координаты по оси распространения, м; Z – волновое сопротивление вакуума, Ом; Z_d – волновое сопротивление среды, Ом; \dot{Z} – комплексное волновое сопротивление среды, Ом; \dot{Z}_n – комплексное волновое сопротивление n -ого слоя; Z_{10} – волновое сопротивление волновода при возбуждении в нём электромагнитной волны типа H_{10} , Ом; γ – коэффициент распространения волны; ε_a – абсолютная диэлектрическая проницаемость

заполняющей среды, Ф/м; ϵ_c – абсолютная комплексная диэлектрическая проницаемость слоя, Ф/м; ϵ_a – абсолютная комплексная диэлектрическая проницаемость заполняющей среды, Ф/м; λ – длина электромагнитной волны в вакууме, м; λ_c – критическая длина волны для заданного прямоугольного волновода, м; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость заполняющей среды, Гн/м; μ_n – абсолютная магнитная проницаемость n -го слоя, Гн/м; σ – проводимость среды, Ом⁻¹·м⁻¹; ω – радиальная частота ЭМ волны, рад/с.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 Сыпин, Е.В. Моделирование процесса нагрева волластонита при введении СВЧ излучения в объем матрицы [Текст] / Е.В. Сыпин, В.В. Тильзо, К.А. Тюнин, Г.В. Леонов // Ползуновский вестник – Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та – 2006. - №2. – с.163-169.

2 Тюнин, К.А. Моделирование процесса нагрева изделий из фрикционной композиции при введении СВЧ излучения в объем матрицы через боковые поверхности [Текст] / К.А. Тюнин, В.В. Тильзо, А.А. Викторов, Е.В. Сыпин, А.М. Белоусов, Г.В. Леонов // Ползуновский вестник – Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та – 2006. - №4/2. – с. 455-460.

3 Sypin, E.V. Modeling of UHF heating process of the frictional composition in press matrix volume [Текст] / E.V. Sypin, K.A. Tunin, V.V. Tilzo, G.V. Leonov // International workshops and tutorial on electron devices and materials EDM'2006: workshop proceedings – Novosibirsk: NSTU, 2006. – p. 86-90.

4 Tilzo, V.V. Calculation of key parameters of installation of microwave dielectric heating [Текст] / V.V. Tilzo, G.V. Leonov // International workshops and tutorial on electron devices and materials EDM'2008: workshop proceedings – Novosibirsk: NSTU, 2008. – p. 159-162.

5 Tilzo, V.V. Calculation of Characteristics of Main Elements of Microwave Dielectric Heating Installation [Текст] / V.V. Tilzo, G.V. Leonov // International workshops and tutorial on electron devices and materials EDM'2009: workshop proceedings – Novosibirsk: NSTU, 2009. – p. 346-350.

6 Тильзо, В.В. О применении СВЧ нагрева в процессе вулканизации [Текст] / В.В. Тильзо, Г.В. Леонов // «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности» Материалы 2-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 14-15 мая 2009 года, г. Бийск – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та – 2009. – с. 37-41.

7 Тильзо, В.В. Расчет характеристик основных элементов Конструкции установки СВЧ диэлектрического нагрева [Текст] / В.В. Тильзо, Г.В. Леонов. // Инновационные технологии: производство, экономика,

образование: материалы Всероссийской научно-практической конференции 24 сентября 2009 года – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2009. – С.

8 Tilzo, V.V. Scattering Matrix Calculation of Model Part of Microwave Heating Installation and Research its Influence on Characteristics of Installation [Текст] / V.V. Tilzo, G.V. Leonov // International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2010: Conference proceedings – Novosibirsk: NSTU Publishing polygraph center, 2010. p. 434-436.

9 Тильзо, В.В. Расчет матрицы рассеяния типового звена установки СВЧ-диэлектрического нагрева и исследование влияния коэффициента отражения эквивалента нагрузки и количества типовых звеньев на КПД установки [Текст] / В.В. Тильзо, Г.В. Леонов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП'2010): материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции 6-7 октября 2010 года / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – с. 94-96.

10 Пат. 2424114 РФ, МПК7 В29С 35/08 Устройство вулканизации тормозных накладок [Текст] / Тильзо В.В., Тюнин К.А., Леонов Г.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – заявл. 16.07.2009, опубл. 20.07.2011 – бюл. №20.

11 Тильзо, В.В. Определение эффективных значений основных электрических характеристик полимерной композиции [Текст] / В.В. Тильзо, Г.В. Леонов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП 2011): Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: межвузовский сборник – Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Вып. 1, 2011. 208 – с. 97-99.

Подписано в печать 20.04.2012 г. Печать – ризография. Заказ 2012 – 39

Объём 1,44 п.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИВЦ БТИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова

659305, г Бийск, ул. Трофимова, 27