

*На правах рукописи*

**КАРПОВ Сергей Владимирович**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНЫХ  
ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ИНДУКЦИОННОГО  
НАГРЕВА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ  
РЕЗИНОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

Специальности: 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий  
05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Тамбов 2012

Работа выполнена на кафедре «Автоматизированное проектирование технологического оборудования» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «ТГТУ»).

- Научные руководители:** доктор технических наук, профессор  
*Карпушкин Сергей Викторович*  
доктор технических наук, доцент  
*Краснянский Михаил Николаевич*
- Официальные оппоненты:** *Туголуков Евгений Николаевич*,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Техника и технологии  
производства нанопродуктов»  
ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет»
- Остроух Андрей Владимирович*,  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Автоматизированные  
системы управления» ФГБОУ ВПО  
«Московский автомобильно-дорожный  
государственный технический университет  
(МАДИ)»
- Ведущая организация** федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
«Ивановский государственный  
химико-технологический университет»

Защита диссертации состоится 23 ноября 2012 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.260.02 в ФГБОУ ВПО «ТГТУ» по адресу: г. Тамбов, ул. Ленинградская, д. 1, ауд. 60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, ФГБОУ ВПО «ТГТУ», ученому секретарю диссертационного совета Д 212.260.02.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

Автореферат разослан «\_\_\_\_\_» октября 2012 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доцент

*Нечаев Василий Михайлович*

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Производство резинотехнических изделий (РТИ) имеет устойчивую тенденцию к увеличению. В связи с этим возникает необходимость модернизации устаревшего и создания нового оборудования, выпускающего качественную продукцию с наименьшими издержками производства.

Наиболее часто РТИ изготавливаются методом горячего прессования. Для их вулканизации в металлических пресс-формах применяют в основном гидравлические вулканизационные прессы с индукционными нагревательными элементами.

Качество РТИ во многом определяется равномерностью температурного поля в объеме изделия. На равномерность поля оказывают влияние многочисленные факторы. Прежде всего, это параметры пресс-формы, системы ее обогрева и внешнего теплообмена, а также расположение пресс-формы на поверхности плиты, теплофизические свойства материалов плиты и пресс-формы, параметры системы автоматического управления (САУ) температурой нагревательных плит.

Задачи моделирования нестационарного нагрева системы плита–пресс-форма–изделие представляют особую сложность в связи с тем, что их необходимо рассматривать как трехмерные, с учетом нелинейных зависимостей свойств материалов от температуры. По этой причине решение прикладных задач проектирования и расчета элементов прессового оборудования с использованием современных методов математического моделирования и вычислительного эксперимента является актуальным.

Работа выполнялась в рамках Государственного контракта № 02.740.11.0624 «Методы, алгоритмы и программное обеспечение разработки виртуальных моделей технических объектов для обучения специалистов и создания прикладных информационных систем» федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

**Объектом исследования** в работе являются нестационарные тепловые процессы в элементах вулканизационных прессов с индукционным способом нагрева.

**Предметом исследования** являются математическое моделирование процесса нестационарного нагрева плит, пресс-форм и вулканизуемых изделий в условиях внешнего теплообмена; методы расчета и оптимизации параметров нагревательных плит.

**Целью работы** является разработка методик тепловых расчетов, методов проектирования и оптимизации индукционных нагревательных плит прессов, осуществляющих процесс вулканизации РТИ в металлических пресс-формах в соответствии с требованиями технологического регламента, а также исследование эффективности пресс-форм. Для достижения цели необходимо:

- осуществить постановку задачи теплового расчета индукционной нагревательной плиты вулканизационного прессы;
- разработать математическую модель нагрева плиты в условиях внешнего теплообмена;
- разработать математическую модель нагрева плит, пресс-форм и изделий в условиях внешнего теплообмена;

- осуществить выбор метода решения уравнений математических моделей и разработать методику теплового расчета температурных полей индукционных нагревательных плит прессов для изготовления РТИ;
- разработать методику оценки эффективности пресс-форм для изготовления РТИ и системы их обогрева на вулканизационном прессе;
- осуществить формализованную постановку и разработать методику решения задачи оптимизации конструктивных и эксплуатационных характеристик плиты.

### **Научная новизна**

1. Разработана математическая модель нестационарного процесса индукционного нагрева одиночной плиты вулканизационного пресса с учетом автоматического регулирования рабочей температуры, которая учитывает зависимости мощностей индукторов и коэффициентов внешнего теплообмена от условий нагрева. Адекватность модели подтверждена сравнением результатов решения модели с результатами промышленного эксперимента.

2. Разработана математическая модель нестационарного процесса нагрева системы индукционная нагревательная плита–пресс-форма–РТИ, впервые позволяющая определять температурное поле в РТИ в процессе вулканизации и выявлять необходимость изменения параметров пресс-форм и нагревательных плит, а также САУ температурой вулканизации.

3. Разработана методика оценки эффективности пресс-форм для изготовления РТИ на вулканизационном прессе, основанная на математической модели стационарного нагрева одиночной пресс-формы в условиях внешнего теплообмена, позволяющая оценивать влияние конструкций пресс-форм на равномерность температурного поля в изделиях.

4. Поставлена и решена задача оптимизации параметров нагревательной плиты вулканизационного пресса, предусматривающая минимизацию перепада температур по рабочей поверхности плиты, метод решения которой основан на построении, проверке адекватности и поиске экстремума поверхности отклика критерия оптимальности.

**Методика исследования** основана на использовании методов математического моделирования и оптимизации, системного анализа и планирования эксперимента.

**Практические результаты работы.** Практическая значимость работы определяется возможностью использования разработанных методик для расчета существующих и проектирования новых плит прессов. Самостоятельную практическую значимость имеют следующие результаты работы:

1. Предложены подходы к проектированию новых и оценке эффективности существующих нагревательных плит:

- интегральный, предусматривающий формирование равномерного температурного поля на всей рабочей поверхности плиты;
- дифференциальный, предусматривающий формирование локальных температурных зон на рабочей поверхности плиты с учетом геометрии изготавливаемых на прессе изделий;
- комплексный, предусматривающий формирование требуемого температурного поля в объеме изделия в процессе вулканизации, в основе которого лежит моделирование нестационарных процессов нагрева системы индукционная нагревательная плита–пресс-форма–РТИ.

2. Создана библиотека твердотельных моделей пресс-форм РТИ для комплектации насосных установок ЗАО «Завод Тамбовполимермаш» и исследования их эффективности.

3. Предложенная методика оптимизации конструктивных и режимных характеристик нагревательной плиты применена для оптимизации конструкции нагревательных плит прессов, выпускаемых ЗАО «Завод Тамбовполимермаш» и используемых ОАО «АРТИ-Завод», г. Тамбов.

**Апробация работы.** Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных конференциях: «Аспекты ноосферной безопасности в приоритетных направлениях деятельности человека» (Тамбов, 2010), «Математические методы в технике и технологиях» (Саратов, 2010; Пенза, 2011; Волгоград, 2012), «Информационные системы и технологии» (Москва, 2012); на всероссийских конференциях: «Современные твердофазные технологии: теория, практика и инновационный менеджмент» (Тамбов, 2009), «Проведение научных исследований в области информационно-телекоммуникационных технологий» (Москва, 2010), «Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации» (Москва, 2011). Некоторые результаты диссертации экспонировались на Всероссийской выставке научно-технического творчества молодежи (Москва, 2009).

**Публикации.** По материалам исследований опубликовано 12 печатных работ, среди них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций, 7 тезисов докладов на всероссийских и международных научно-технических конференциях, 1 свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 147 страницах основного текста и состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы (127 наименований) и приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна и практическая ценность результатов, приведены структура диссертации и перечень вопросов, рассматриваемых в главах.

В **первой главе** дано описание конструкции вулканизационного пресса для изготовления РТИ, снабженного плитами с индукционными нагревательными элементами. Проведен сравнительный анализ способов нагрева плит прессов, анализ существующих методов расчета устройств индукционного нагрева.

Рассмотрены вопросы проектирования плит. Дана историческая справка развития основных представлений об индукционном нагреве и методах его расчета. Приводятся данные об основных современных системах тепловых расчетов. Отмечен их основной недостаток, заключающийся в недоступности для пользователя методик и алгоритмов решения задач.

Вопросы проектирования нагревательных плит рассмотрены с учетом протекания процесса вулканизации. Проанализировано влияние температуры вулканизации на активность ускорителей и свойства получаемых резин. Рассмотрены особенности проектирования оборудования для вулканизации РТИ при низких и высоких температурах. Проанализированы современные тенден-

ции в проектировании нагревательных плит с позиции энергосбережения. Сформулированы задачи исследования.

**Вторая глава** содержит математическую формулировку и алгоритмы решения задач расчета температурного поля на поверхности одиночной плиты, моделирования нагрева плиты пресса с учетом САУ температурой плиты.

Процесс нагрева одиночной индукционной плиты описывается трехмерным нестационарным дифференциальным уравнением теплопроводности в частных производных:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right) + \frac{q(x, y, z, T_{av})}{c_s \rho_s}, \quad (1)$$

где  $T(x, y, z, \tau)$  – температура плиты в точке ее объема с координатами  $(x, y, z)$  в момент времени  $\tau$ ;  $a = \lambda_s / c_s \rho_s$  – коэффициент температуропроводности материала плиты ( $\text{м}^2/\text{с}$ );  $\lambda_s$  – теплопроводность материала плиты ( $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ );  $c_s$  – теплоемкость материала плиты ( $\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}$ );  $\rho_s$  – плотность материала плиты ( $\text{кг}/\text{м}^3$ );

$T_{av} = T_{av}(\tau) = \frac{1}{hsl} \int_0^h \int_0^s \int_0^l T(x, y, z, \tau) dx dy dz$  – средняя температура плиты в момент времени  $\tau$  ( $^{\circ}\text{C}$ );  $q(x, y, z) = \begin{cases} q_{0j}, & \text{если } (x, y, z) \in v_j, j = 1, \dots, ni \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$  – зависи-

мость интенсивности внутренних тепловыделений от координат и средней температуры плиты ( $\text{Вт}/\text{м}^3$ );  $q_{0j}$  – удельная мощность  $j$ -го индуктора при средней температуре плиты,  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  $v_j$  – объем, в котором выделяется мощность  $j$ -го индуктора ( $\text{м}^3$ );  $ni$  – число индукторов плиты.

Начальное условие для решения уравнения (1):

$$T(x, y, z, 0) = T_0, \quad (2)$$

где  $T_0$  – температура окружающего воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ .

Для учета внешнего теплообмена используются граничные условия (ГУ) 3 рода:

$$\begin{aligned} \lambda \frac{\partial T(0, y, z, \tau)}{\partial x} - \alpha_1 (T(0, y, z, \tau) - T_0) &= 0, \quad \lambda \frac{\partial T(l, y, z, \tau)}{\partial x} + \alpha_2 (T(l, y, z, \tau) - T_0) = 0, \\ \lambda \frac{\partial T(x, 0, z, \tau)}{\partial y} - \alpha_3 (T(x, 0, z, \tau) - T_0) &= 0, \quad \lambda \frac{\partial T(x, s, z, \tau)}{\partial y} + \alpha_4 (T(x, s, z, \tau) - T_0) = 0, \\ \lambda \frac{\partial T(x, y, 0, \tau)}{\partial z} - \alpha_5 (T(x, y, 0, \tau) - T_0) &= 0, \quad \lambda \frac{\partial T(x, y, h, \tau)}{\partial z} + \alpha_6 (T(x, y, h, \tau) - T_0) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, математическая модель нагрева одиночной плиты в условиях внешнего теплообмена может быть представлена в виде системы уравнений (1) – (3). Решение этой системы осложняется нелинейным изменением во времени мощностей индукторов  $Q_{ij}$  и коэффициентов теплоотдачи  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6$ , от поверхностей плиты. Поэтому были введены следующие допущения.

1. Коэффициенты теплоотдачи от всех поверхностей плиты и значения мощностей индукторов не зависят от температуры в пределах некоторых интервалов времени, которые названы расчетными.

2. Для определения значений мощностей тепловыделений используется методика, основанная на экспериментальных исследованиях индукционного нагрева ферромагнитной стали.

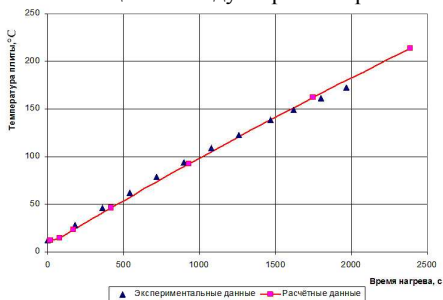
3. Тепловыделение осуществляется равномерно во всем объеме паза под каждый индуктор, характеристики которого соответствуют свойствам материала плиты.

С учетом допущений задача распространения тепла в плите при фиксированных значениях  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_6$  и  $Q_{ij}$  решается многократно, т.е. последовательно находятся решения для расчетных интервалов времени, в которых эти параметры можно считать константами. При этом начальным условием для всех решений, кроме первого, будет температурное поле плиты, соответствующее моменту окончания предыдущего интервала времени.

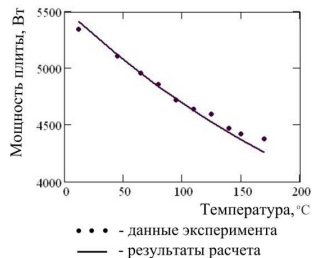
В качестве метода решения задачи (1) – (3) использован метод конечных интегральных преобразований (МКИП). Установлено, что для реализации теплового расчета индукционных нагревательных плит согласно МКИП разница между предыдущим и последующим значениями коэффициентов теплоотдачи и мощностей индукторов в 20% оптимальна.

Для проверки адекватности модели (1) – (3) использованы результаты эксперимента, проведенного в ОАО «АРТИ-Завод», г. Тамбов, который предполагал измерение температуры плиты в процессе нагрева с помощью нескольких термопар: по углам и в центре рабочей поверхности плиты. Результаты численного решения задачи (1) – (3) с помощью МКИП для плиты 500×410 мм средней мощностью 5,35 кВт и их сравнение с экспериментальными данными для температуры контрольной термопары показаны на рис. 1.

Сопоставление расчетных и экспериментальных данных (рис. 1) относится к интервалу 0 – 1968 с (именно за это время температура контрольной термопары в эксперименте достигает значения 170 °С). Максимальное отклонение расчетных данных от температуры контрольной термопары составило менее 5 °С. Результаты измерения мощности плиты в ходе эксперимента в сравнении с расчетными значениями представлены на рис. 2. Погрешность расчета мощности индукторов не превысила 3%.



**Рис. 1. Сравнение результатов решения задачи (1) – (3) с данными эксперимента для температуры контрольной термопары**



**Рис. 2. Сравнение результатов измерения и расчета зависимости мощности плиты от температуры**

Из данных рис. 1 и 2 можно сделать вывод, что результаты решения системы уравнений (1) – (3) с помощью методики, основанной на МКИП, удовлетворительно согласуются с данными эксперимента, проведенного в условиях реального производства.

В процессе нагрева регулирование температуры плит осуществляется по двухпозиционному закону на основе измерения температуры плит с помощью термопар. Управляющим воздействием является мощность индукторов:

$$Q_{i_j}(\tau) = \begin{cases} Q_{i_j}, T_{\text{sensor}} \leq T_{\text{down}}; \\ Q_{i_j}, T_{\text{down}} < T_{\text{sensor}} \leq T_{\text{up}} \wedge \frac{dT_{\text{sensor}}}{d\tau} > 0; \\ 0, T_{\text{down}} < T_{\text{sensor}} \leq T_{\text{up}} \wedge \frac{dT_{\text{sensor}}}{d\tau} \leq 0; \\ 0, T_{\text{sensor}} > T_{\text{up}}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $T_{\text{sensor}}$  – температура контрольной термопары, °C;  $T_{\text{up}}$ ,  $T_{\text{down}}$  – верхний и нижний пределы срабатывания регулятора соответственно, °C.

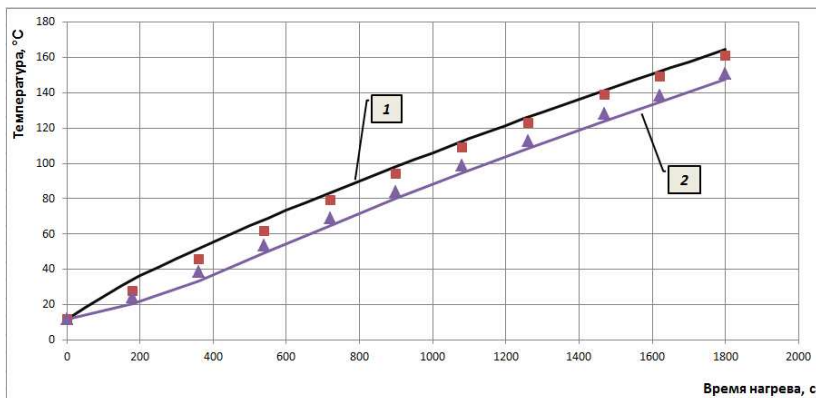
Соотношение (4) играет важную роль в процессе регулирования температуры плиты. Именно совместное решение уравнений (1) – (4) позволяет моделировать процесс нагрева плит не только в начальный период времени, но и в наиболее важный период регулярного (стационарного) нагрева.

В качестве метода решения задачи (1) – (4) использовался метод конечных элементов (МКЭ). Было установлено, что для проведения численных расчетов значение расчетного шага по времени  $\Delta t = 2$  с является оптимальным.

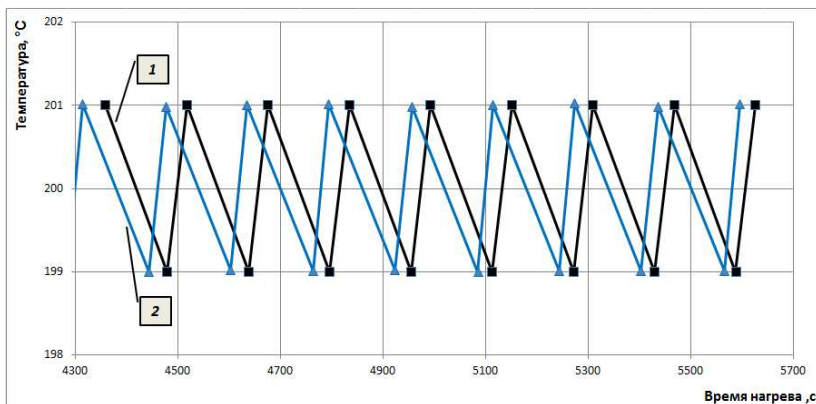
Результаты численного решения задачи (1) – (4) для плиты 500×410 мм средней мощностью 5,35 кВт и их сравнение с экспериментальными данными для температур контрольной (кривая 1) и центральной (кривая 2) термопар в начальный период нагрева показаны на рис. 3. Соответствующие им экспериментальные значения для контрольной термопары представлены в виде прямоугольных маркеров, для центральной – в виде треугольных маркеров.

Из данных рис. 3 следует, что средняя ошибка за весь рассматриваемый период для контрольной термопары составила 6,6%, для центральной – 6,9%. Отметим, что по мере прогрева плиты, начиная с момента времени 1470 с, отклонение температур не превышает 2% для контрольной термопары и 3% для центральной. Таким образом, можно сделать вывод, что для начального периода нагрева расчетные данные температур для обеих термопар удовлетворительно согласуются с экспериментальными.

На рис. 4 представлено сравнение расчетных значений (кривая 2) с экспериментальными (кривая 1) значениями температур контрольной термопары в течение регулярного режима нагрева. Из данных рис. 4 следует, что график расчетных значений температур (кривая 2) отличается от графика экспериментальных значений (кривая 1) только по фазе. При этом отставание по фазе расчетной кривой от экспериментальной в среднем составляет 34 с. Для рассматриваемых интервалов времени данная ошибка является незначительной. Можно сделать вывод, что результаты численного решения уравнений (1) – (4) удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.



**Рис. 3. Температура контрольной (1) и центральной (2) термпар в начальный период, °C**



**Рис. 4. Температура контрольной термпары в регулярном режиме, °C:**  
1 – эксперимент; 2 – расчет

В третьей главе рассматривается использование разработанных математических моделей для постановки и решения задач проектирования и расчета элементов прессового оборудования.

При разработке метода решения задачи оптимизации конструктивных и режимных характеристик нагревательной плиты в качестве критерия оптимальности предложено использовать среднеквадратичное отклонение температуры рабочей поверхности от требуемой температуры:

$$\Delta = \frac{1}{m+k} \sqrt{\sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^k (T_{q,p} - T_{q,p}^*)^2}. \quad (5)$$

Выбор критерия (5) объясняется тем, что равномерное температурное поле плит должно обеспечивать равномерный прогрев элементов пресс-форм и, как следствие, получение равномерного температурного поля в РТИ. Показано, что построение универсальной для всех типов плит и индукторов методики оптимизации необходимо осуществить на основе моделирования нагрева одиночной плиты.

*Постановку задачи* оптимизации можно представить следующим образом. Необходимо для индукционной нагревательной плиты при заданных геометрических размерах; материале плиты, крышки и провода индукторов; параметрах электрической сети, диаметре провода индукторов найти конструктивные ( $l_j, s_j, xc_j, yc_j, z_j, b_j, n_j$ ) и режимные ( $T_{q,p}(x, y, h + hk, \tau_h), Qi_j$ ) характеристики, такие, что критерий оптимальности достигает минимального значения при выполнении условий и ограничений математической модели.

Методика оптимизации включает три этапа. На *первом этапе* проводится серия вычислительных экспериментов на детерминированной математической модели нагрева плиты (1) – (3) в соответствии с теорией планирования эксперимента. Для этого осуществлен выбор переменной и факторов состояния, произведена оценка области определения факторов, выбор нулевых уровней и экспериментального плана.

*Второй этап* – построение поверхности отклика (зависимости, связывающей варьируемые переменные с критерием оптимальности) по экспериментальным данным и проверка достоверности аппроксимации.

Для аппроксимации расчетных данных обоснован выбор квадратичного полинома, осуществлен выбор метода LU-разложения. Для проверки адекватности аппроксимации использован метод регрессионного анализа результатов вычислительного эксперимента.

Нахождение варьируемых переменных, соответствующих экстремуму поверхности отклика и являющихся решением задачи оптимизации, осуществляется на *третьем этапе*. Установлено, что для решения этой задачи предпочтительно использование метода прямого поиска с возвратом, который обеспечивает нахождение экстремума при любой начальной точке поиска и отличается низкой чувствительностью к выбору шага.

Результаты численных расчетов системы уравнений (1) – (4) и их сравнение с экспериментальными данными позволяют перейти к этапу моделирования процесса нагрева многоэтажного пресса. Для этого введены допущения.

1. Тепловые эффекты вулканизации РТИ незначительны, и ими можно пренебречь.

2. Между всеми элементами пресс-форм и изделиями, а также между пуансонами, матрицами и нагревательными плитами имеет место идеальный тепловой контакт.

Систему (1) – (4) необходимо дополнить уравнениями распространения тепла в элементах пресс-форм и изделиях:

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial \tau} - \lambda_m \left( \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right) = 0, m = 1, 2, \dots, n_{\text{molds}}; \quad (6)$$

$$\rho_{rp} c_{rp} \frac{\partial T_{rp}}{\partial \tau} - \lambda_{rp} \left( \frac{\partial^2 T_{rp}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_{rp}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_{rp}}{\partial z^2} \right) = 0, \quad rp = 1, 2, \dots, n_{\text{products}}, \quad (7)$$

где  $T_m = T(x_m, y_m, z_m)$ ,  $(x_m, y_m, z_m) \in \Omega_m$  – температурное поле пресс-форм, °C;  $\Omega_m$  – объем элементов пресс-форм;  $n_{\text{molds}}$  – суммарное количество пресс-форм на всех этажах пресса;  $T_{rp} = T(x_{rp}, y_{rp}, z_{rp})$ ,  $(x_{rp}, y_{rp}, z_{rp}) \in \Omega_{rp}$  – температурное поле в изделиях, °C;  $\Omega_{rp}$  – объем РТИ;  $n_{\text{products}}$  – общее количество изделий во всех пресс-формах.

В качестве ГУ для (6) и (7) используются следующие соотношения:  
– равенство тепловых потоков на границе между пресс-формами и РТИ:

$$\lambda_m \frac{\partial T_{m,b}}{\partial x} = \lambda_{rp} \frac{\partial T_{rp,b}}{\partial x}; \quad \lambda_m \frac{\partial T_{m,b}}{\partial y} = \lambda_{rp} \frac{\partial T_{rp,b}}{\partial y}; \quad \lambda_m \frac{\partial T_{m,b}}{\partial z} = \lambda_{rp} \frac{\partial T_{rp,b}}{\partial z}, \quad (8)$$

где  $T_{m,b} = T(x_{m,b}, y_{m,b}, z_{m,b})$  – температурное поле элементов пресс-форм на границе с изделиями;  $T_{rp,b} = T(x_{rp,b}, y_{rp,b}, z_{rp,b})$  – температурное поле изделий на границе с элементами пресс-форм;  $(x_{m,b}, y_{m,b}, z_{m,b}) \in \Omega_m$ ,  $(x_{rp,b}, y_{rp,b}, z_{rp,b}) \in \Omega_{rp}$  – множество точек, принадлежащих элементам пресс-форм и изделиям соответственно, на их границе раздела;

– равенство тепловых потоков между элементами пресс-форм:

$$\frac{\partial T_{m,b3}}{\partial x} = \frac{\partial T_{m,b4}}{\partial x}; \quad \frac{\partial T_{m,b3}}{\partial y} = \frac{\partial T_{m,b4}}{\partial y}; \quad \frac{\partial T_{m,b3}}{\partial z} = \frac{\partial T_{m,b4}}{\partial z}, \quad (9)$$

где  $(x_{m,b3}, y_{m,b3}, z_{m,b3}) \in \Omega_m$ ,  $(x_{m,b4}, y_{m,b4}, z_{m,b4}) \in \Omega_m$  – множество точек, принадлежащих матрицам и пуансонам соответственно, на их границе контакта;

– равенство тепловых потоков между рабочей поверхностью плиты и матрицей пресс-форм:

$$\lambda_m \frac{\partial T_{m,b1}}{\partial x} = \lambda_s \frac{\partial T_{pl,b2}}{\partial x}; \quad \lambda_m \frac{\partial T_{m,b1}}{\partial y} = \lambda_s \frac{\partial T_{pl,b2}}{\partial y}; \quad \lambda_m \frac{\partial T_{m,b1}}{\partial z} = \lambda_s \frac{\partial T_{pl,b2}}{\partial z}, \quad (10)$$

$$pl = 1, \dots, n_{\text{platen}},$$

где  $(x_{m,b1}, y_{m,b1}, z_{m,b1}) \in \Omega_m$ ,  $(x_{pl,b2}, y_{pl,b2}, z_{pl,b2}) \in \Omega$  – множество точек, принадлежащих матрицам пресс-форм и рабочим поверхностям плит соответственно, на их границе контакта;  $n_{\text{platen}}$  – число плит пресса;

– равенство тепловых потоков между крышкой нагревательной плиты и пуансоном пресс-форм:

$$\lambda_m \frac{\partial T_{m,b2}}{\partial x} = \lambda_s \frac{\partial T_{pl,b1}}{\partial x}; \quad \lambda_m \frac{\partial T_{m,b2}}{\partial y} = \lambda_s \frac{\partial T_{pl,b1}}{\partial y}; \quad \lambda_m \frac{\partial T_{m,b2}}{\partial z} = \lambda_s \frac{\partial T_{pl,b1}}{\partial z}, \quad (11)$$

где  $(x_{m,b2}, y_{m,b2}, z_{m,b2}) \in \Omega_m$ ,  $(x_{pl,b1}, y_{pl,b1}, z_{pl,b1}) \in \Omega$  – множество точек, принадлежащих пуансонам пресс-форм и крышкам плит соответственно, на их границе контакта. Отметим, что ГУ (8) – (11) записаны для одногнездных пресс-форм;

– конвективный тепловой поток  $q_{m,c}$  от внешних поверхностей пресс-форм в окружающий воздух:

$$q_{m,c} = \alpha_{m,c} (T_0 - T_{m,s}), \quad (12)$$

где  $T_{m,s} = T(x_{m,s}, y_{m,s}, z_{m,s})$  – средняя температура внешних поверхностей матрицы и пуансона пресс-формы, °K;  $\alpha_{m,c}$  – коэффициент стесненной теплоотдачи от поверхностей пресс-форм в окружающий воздух, Вт/м<sup>2</sup>·K;

– лучистый тепловой поток  $q_{m,r}$  от боковых поверхностей пресс-форм в окружающий воздух:

$$q_{m,r} = \varepsilon_m \sigma (T_0^4 - T_{m,s}^4), \quad (13)$$

где  $\varepsilon_m$  – степень черноты поверхности деталей пресс-формы;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$  – постоянная Стефана–Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·K<sup>4</sup>.

Таким образом, математическую модель нагрева многоэтажного пресса можно представить в виде системы уравнений (1) – (4), (6) – (13). В качестве метода решения этой задачи использован МКЭ.

Дополнительно была предложена методика оценки эффективности пресс-форм. Она предполагает решение уравнений (6), (7) при ГУ (8), (9), (12), (13) при допущении постоянства и равномерности температуры греющих плит на протяжении всего цикла нагрева, которое может быть выражено в виде:

$$T_{m,b1} = T_{m,b2} = T_h, \quad (14)$$

где  $T_h$  – заданная температура поверхности нагревательной плиты, °C.

Данное ГУ воспроизводит идеализированные условия нагрева пресс-форм, поэтому решение задачи (6) – (9), (12) – (14) позволит оценить влияние геометрии пресс-форм на равномерность температурного поля в объеме РТИ. В качестве метода решения данной задачи использован МКЭ.

В четвертой главе представлены результаты практической реализации разработанных методик расчета.

С применением разработанной методики осуществлена модернизация плиты челюстного пресса размерами 1120×700 мм средней мощностью 14,5 кВт, используемой на ЗАО «Завод Тамбовполимермаш». Были получены следующие результаты. Абсолютное отклонение температуры по рабочей поверхности плиты уменьшилось на 58%, среднеквадратичное отклонение температуры – на 70%, среднее отклонение температуры – на 75%.

Приведено описание автоматизированного лабораторного практикума изучения расчета индукционных нагревательных плит. Данный практикум используется в учебных целях на кафедре АПТО ТГТУ.

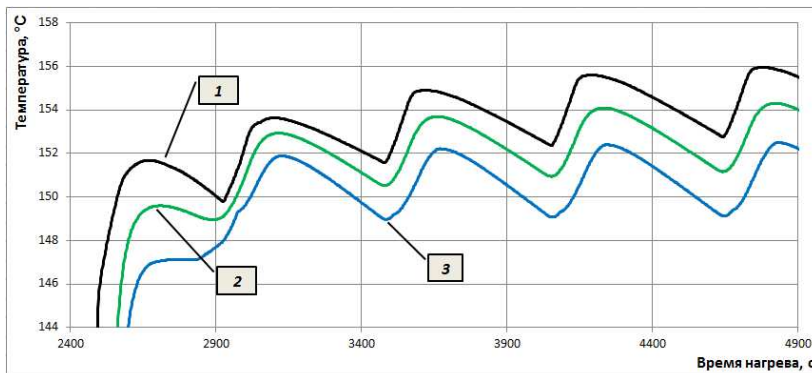
Представлены результаты моделирования процесса нагрева плит и пресс-форм. На основе анализа существующих требований к нагревательным плитам прессов предложены к рассмотрению три подхода к проектированию плит:

1) *интегральный подход*, при котором необходимо получение равномерного температурного поля на всей рабочей поверхности плиты;

2) *дифференциальный подход*, который заключается в формировании локальных температурных зон на рабочей поверхности плиты с учетом геометрии и свойств изготавливаемых на прессе изделий;

3) *комплексный метод*, заключающийся в проектировании плит на основе моделирования процесса совместного нагрева плит, пресс-форм и вулканизуемых изделий, при котором целью является получение заданного температурного поля в объеме изделий.

Основные положения и особенности предлагаемых способов рассмотрены на примере проектирования нагревательной плиты для производства резиновых прокладок. В качестве базовой конструкции использована промышленная плита, спроектированная и применяемая на ЗАО «Завод Тамбовполимермаш». Размеры плиты 600×600 мм, средняя мощность 6,5 кВт. Графики изменения минимальной, средней и максимальной температур изделия в течение периода вулканизации показаны на рис. 5.



**Рис 5. Результаты решения задачи (1) – (14):**  
максимальная (1), средняя (2) и минимальная (3) температура РТИ в течение периода вулканизации, °C

Установлено, что интегральный подход целесообразно использовать при изготовлении продукции, имеющей соизмеримые с плитами пресса размеры; при использовании пресс-форм с простой конфигурацией и для изготовления немассивных РТИ.

Применение дифференциального подхода оптимально при производстве постоянного ассортимента продукции. В этом случае его применение позволяет уменьшить суммарную мощность плит.

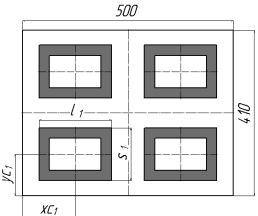
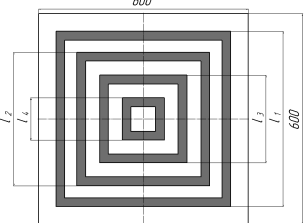
Использование комплексного подхода необходимо при изготовлении РТИ со сложной геометрией в массивных пресс-формах, а также в особых случаях, когда необходима информация о температуре изделия в процессе вулканизации.

Приведены результаты расчетов по исследованию эффективности пресс-форм для изготовления РТИ, используемых для комплектации насосных установок. Показано, что использование нагревательных плит с равномерным температурным полем по рабочей поверхности не является оптимальным с точки зрения получения равномерных полей в объеме вулканизуемого изделия. Для уменьшения температурного градиента по сечению изделий предпочтительнее использовать плиты с неравномерным температурным полем по рабочей поверхности, которые обеспечивают зонный обогрев. Это особенно актуально для пресс-форм РТИ со сложной геометрией и небольшой поверхностью контакта между деталями пресс-формы.

Показано, что при проектировании новых конструкций пресс-форм целесообразно решать уравнения (6) – (9), (12) – (14) с целью оптимизации температурного поля в вулканизуемом изделии.

Для нагревательной плиты 500×410 мм с прямоугольными индукторами (№ 1) и плиты 600×600 мм с concentricкими индукторами (№ 2) на основе разработанной методики решена задача определения оптимальных конструктивных и режимных характеристик. Результаты сведены в табл. 1.

**1. Результаты решения задачи оптимизации**

| Конструкция плиты   | Переменная    | Начальное значение | Оптимальное значение |
|---|---------------|--------------------|----------------------|
|  | $Q_{i1}$ , Вт | 1250               | 1100                 |
|   | $l_1$ , мм    | 172                | 215                  |
|   | $s_1$ , мм    | 127                | 165                  |
|   | $xc_1$ , мм   | 123                | 100                  |
|   | $yc_1$ , мм   | 101                | 128                  |
|  | $Q_{i1}$ , Вт | 3280               | 3276                 |
|   | $Q_{i2}$ , Вт | 1505               | 1483                 |
|   | $Q_{i3}$ , Вт | 1140               | 1131                 |
|   | $Q_{i4}$ , Вт | 614                | 564, 5               |
|   | $l_1$ , мм    | 521                | 550                  |
|   | $l_2$ , мм    | 378                | 400                  |
|   | $l_3$ , мм    | 250                | 280                  |
|   | $l_4$ , мм    | 116                | 139, 7               |

Перепад температур по рабочей поверхности плиты № 1 составил 9,4 °С, плиты № 2 – 7,7 °С. После оптимизации этот параметр для плиты № 1 составил 4,1°С, для плиты № 2 – 3,6 °С.

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана математическая модель нестационарного процесса индукционного нагрева одиночной плиты вулканизационного пресса с учетом автоматического регулирования рабочей температуры, которая учитывает зависимости мощностей индукторов и коэффициентов внешнего теплообмена от условий нагрева.
2. Разработана математическая модель нестационарного процесса нагрева системы индукционная плита–пресс-форма–РТИ, позволяющая определять температурное поле в РТИ в процессе вулканизации.
3. Разработана методика оценки эффективности пресс-форм для изготовления РТИ на вулканизационном прессе, основанная на математической модели стационарного нагрева одиночной пресс-формы в условиях внешнего

теплообмена, позволяющая оценивать влияние конструкций пресс-форм на равномерность температурного поля в изделиях.

4. Поставлена и решена задача оптимизации параметров нагревательной плиты вулканизационного пресса, предусматривающая минимизацию перепада температур по рабочей поверхности плиты, метод решения которой основан на построении, проверке адекватности и поиске экстремума поверхности отклика критерия оптимальности.

5. Предложены подходы к проектированию новых и оценке эффективности существующих нагревательных плит:

- интегральный, предусматривающий формирование равномерного температурного поля на всей рабочей поверхности плиты;

- дифференциальный, предусматривающий формирование локальных температурных зон на рабочей поверхности плиты с учетом геометрии изготавливаемых на прессе изделий;

- комплексный, предусматривающий формирование требуемого температурного поля в объеме изделия в процессе вулканизации, в основе которого лежит моделирование нестационарных процессов нагрева системы индукционная нагревательная плита–пресс-форма–РТИ.

6. Предложенная методика применена для оптимизации конструктивных и режимных характеристик нагревательных плит, выпускаемых ЗАО «Завод Тамбовполимермаш» и используемых ОАО «АРТИ-Завод», г. Тамбов. Экономический эффект от применения методики оценивается в 350 тыс. р.

## ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ РАБОТЫ

*Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:*

1. Карпушкин, С.В. Моделирование устройств индукционного нагрева на примере индукционных нагревательных плит вулканизационных прессов (на английском языке) / С.В. Карпушкин, С.В. Карпов, А.О. Глебов // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2011. – Т. 17, № 1. – С. 110 – 120.

2. Карпушкин, С.В. Моделирование процесса нагрева пресс-формы для производства резинотехнических изделий на индукционном вулканизационном прессе / С.В. Карпушкин, С.В. Карпов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2/2 (286). – С. 35 – 41.

3. Карпов, С.В. Оценка эффективности пресс-форм для изготовления резинотехнических изделий и системы их обогрева на вулканизационном прессе / С.В. Карпов, С.В. Карпушкин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2012. – № 3. – С. 10 – 16.

4. Глебов, А.О. Моделирование температурных полей индукционных нагревательных плит методами конечных элементов и конечных интегральных преобразований / А.О. Глебов, С.В. Карпов, С.В. Карпушкин // Индукционный нагрев. – 2012. – № 20. – С. 19 – 24.

*Прочие публикации:*

5. Карпов, С.В. Определение интервалов времени для реализации методики теплового расчета индукционных нагревательных плит / С.В. Карпов, С.В. Кар-

пушкин, М.Н. Краснянский // Современные твердофазные технологии, теория, практика и инновационный менеджмент : материалы Всерос. науч.-инновационной конф. – Тамбов : Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2009. – С. 299 – 301.

6. Свидетельство об отраслевой регистрации электронного ресурса № 00049 от 29.06.09. Виртуальная лабораторная установка расчета индукционных нагревательных плит прессов для изготовления резинотехнических изделий / С.В. Карпушкин, М.Н. Краснянский, С.В. Карпов.

7. Карпов, С.В. Методика теплового расчета нагревательных плит / С.В. Карпов // Аспекты ноосферной безопасности в приоритетных направлениях деятельности человека : материалы I Междунар. науч.-практ. конф. – Тамбов, 2010. – С. 92 – 94.

8. Карпов, С.В. Реализация методики теплового расчета индукционных нагревательных плит / С.В. Карпов, С.В. Карпушкин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-23 : сб. тр. XXIII Междунар. науч. конф. – Саратов : СГТУ, 2010. – Т. 8, секция 9. – С. 133 – 135.

9. Карпов, С.В. Виртуальное моделирование температурных полей индукционных нагревательных плит / С.В. Карпов, С.В. Карпушкин, А.О. Глебов // Сборник тез. Всерос. конф. по результатам проектов, реализованных в рамках Федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2012 годы» в области информационно-телекоммуникационных технологий. – М., 2010. – С. 56–57.

10. Карпов, С.В. Методика оценки эффективности пресс-форм для изготовления резинотехнических изделий на вулканизационном прессе / С.В. Карпов, С.В. Карпушкин // Проведение научных исследований в области обработки, хранения, передачи и защиты информации : сб. тез. Всерос. конф. – М., – 2011. – С. 42–43.

11. Карпов, С.В. Моделирование нагрева пресс-форм при изготовлении резинотехнических изделий на вулканизационном прессе / С.В. Карпов, С.В. Карпушкин // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-24 : сб. тр. XXIV Междунар. науч. конф. / под общ. ред. В.С. Балакирева. – Пенза : Пенз. гос. технол. академия, 2011. – Т. 8, секция 12. – С. 6 – 8.

12. Карпов, С.В. Оптимизация конструктивных и режимных характеристик нагревательной плиты вулканизационного пресса / С.В. Карпов, С.В. Карпушкин // Сборник тез. Междунар. молодежной конф. по результатам проектов, реализованных в рамках Федеральных целевых программ «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы» в области информационно-телекоммуникационных технологий. – М., 2012. – С. 111–112.

---

---

Подписано в печать 19.10.2012  
Формат 60×84/16. 0,93 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 537

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14