

**ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ  
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ  
С ЗАДАННЫМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ ПРОФИЛЕМ**

**Глебов А.О.** (ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»)

Рассмотрена задача формирования требуемого температурного поля на поверхностях нагревательных устройств на примере плиты вулканизационного пресса. В качестве первого приближения предложено использовать поле тепловыделений, рассчитанное по стационарному уравнению теплопроводности. На втором этапе проводится оптимизация температурного поля с помощью решения прямой задачи с учетом ограничений на мощность и конфигурацию нагревателей.

**Введение.** Процессы, связанные с температурной обработкой полимерных заготовок (вулканизация, полимеризация), требуют высокой точности поддержания заданной температуры. Как правило, в техническом задании на разработку оборудования, реализующего подобную обработку, задается допуск на температуру в каждой точке рабочих поверхностей. Например, при вулканизации такой поверхностью служит горизонтальная грань нагревательной плиты. Таким образом, постановка задачи формулируется следующим образом: необходимо найти количество нагревателей, их тип, форму и расположение, при которых максимум отклонения температуры в каждой точке рабочей поверхности от заданного значения достигает минимума.

Обеспечение требуемой температуры на рабочей поверхности осложняется рядом факторов: наличием теплопотерь от торцевых поверхностей, ограничениями на мощность и конфигурацию нагревателей, наличием пресс-форм, а также значительными затратами времени на проведение расчета температурного поля.

Задача разработки подобного оборудования решается с помощью эвристических подходов. Также известны работы по оптимизации температурных полей с помощью теории планирования эксперимента, позволяющей значительно сократить количество итераций. Однако такая параметрическая оптимизация применима при наличии структуры объекта. Например, известны количество и форма нагревателей, требуется определить их расположение и мощности. В настоящее время широко распространены методы топологической оптимизации, позволяющей находить структуру объекта. Однако применение этих методов для формирования требуемых температурных полей не описано в научных публикациях.

**Основная часть.** Задачу обеспечения требуемого температурного поля предлагается разделить на две подзадачи. На первом этапе решается обратная задача: в качестве граничных условий задается требуемое температурное поле и условия теплоотдачи, после чего аналитически рассчитывается поле тепловыделений по стационарному уравнению теплопроводности. Поскольку стационарному состоянию предшествует стадия разогрева от начальной температуры до рабочей, то необходимо поле тепловыделений увеличить на константу (при допущении о равномерности требуемого поля), исходя из массы, теплоемкости и темпа нагрева оборудования. При этом данная константа должна быть управляемой: по достижении заданной температуры эта величина должна снижаться до нуля.

Полученное таким образом решение, как правило, нереализуемо с физической точки зрения. Во-первых, необходимо равномерно распределить тепловыделение во всем объеме. Во-вторых, требуется дополнительно организовать подогрев теплоотдающих поверхностей. В связи с этим выделяется вторая подзадача: инженерная интерпретация решения, которая учитывает существующие ограничения на форму и размеры нагревателей, их удельную мощность. Таким образом, решение первой подзадачи используется для формирования первого приближения для последующей параметрической оптимизации. В качестве методов

оптимизации применимы стандартные алгоритмы, однако для сокращения вычислений может быть рекомендована теория планирования эксперимента. Кроме того, первое приближение дает, как правило, удовлетворительные результаты, поэтому доработка решения может быть эффективно проведена с помощью эвристического анализа.

Задачу обеспечения требуемой температуры необходимо решать с учетом алгоритмов автоматического регулирования. В связи с этим предлагается разделить нагреватели на две группы с независимым управлением. Первая основная группа предназначена для разогрева оборудования, вторая – для компенсации теплотерь. Таким образом, нагреватели первой группы должны работать на полную мощность только до достижения рабочей температуры, после чего их мощность должна постепенно снижаться.

Для управления мощностью нагревателей часто применяется широтно-импульсное регулирование по пропорционально-интегрально-дифференциальному (ПИД) закону. Компьютерное моделирование работы ПИД-регулятора с решением нестационарного уравнения теплопроводности после каждого периода обновления управляющего воздействия приводит к чрезмерному объему вычислений. Поэтому предложено использовать переменный шаг по времени, величина которого рассчитывается на основе анализа второй производной температуры контрольной термопары. При малых значениях второй производной (приближение к линейному закону) шаг может быть значительно увеличен. Такой подход позволяет в десятки раз сократить объем вычислений и симитировать работу ПИД-регулятора по среднему управляющему воздействию, которое формирует поле тепловыделений.

**Выводы.** С использованием предложенного подхода решена задача формирования равномерного температурного поля плиты прессы для высокого отпуска металлических деталей. Температура рабочей поверхности плиты согласно техническому заданию должна составлять  $550 \pm 27,5$  °С. Расчетная температура на стадии выдержки в режиме автоматического регулирования по ПИД закону составила  $550 \pm 15$  °С. Нагрев осуществляется тремя спиральными нагревателями одинаковой мощности. Два центральных нагревателя обеспечивают требуемый темп разогрева, третий «защитный» нагреватель расположен по периметру плиты и управляется независимым ПИД-регулятором. Для параметрической оптимизации эвристическим методом потребовалась 21 итерация. Данная плита прошла апробацию и используется в составе установки для термообработки металлических деталей. Разработан проект плиты комбинированного нагрева с температурой рабочей поверхности  $200 \pm 0,5$  °С. Для локализации тепловыделения вблизи торцевых поверхностей плиты использован ленточный омический нагреватель. В отличие от спиральных нагревателей, ленточные нагреватели не имеют ограничений на минимальный радиус изгиба. С целью снижения тепловых потерь предложено использование композитного теплоизолятора. Разогрев плиты осуществляется тремя концентрическими индукционными нагревателями. Для более равномерного распределения тепловыделений от вихревых токов индукторы выполнены с большим отношением ширины к толщине. На этапе параметрической оптимизации потребовалось 4 итерации.

Таким образом, предложенная методика проектирования нагревательных устройств с заданным температурным профилем показала высокую эффективность при решении реальных производственных задач, связанных с обеспечением равномерных температурных полей.