

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ КАРАМЕЛЬНОЙ МАССЫ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ КОНДИТЕРСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Кузнецова О.Н.

Донецкий государственный технический университет, кафедра ПЭ

Abstract

Kusnetsova O.N. The mathematical model of spatial distribution of a non-stationary temperature field of caramel of weight for definition middlevolumy of temperature of candy is developed during its cooling. The dependence between middlevolumy in temperature of caramel of weight and indications of the gauge of temperature in the chosen point of measurement is established. The information-measuring system and hardware for definition of temperature of caramel of weight is developed during its cooling.

Температура карамельной массы — важный параметр в производстве карамели, так как она существенно влияет на качество изготавливаемой продукции. В кондитерской промышленности температура карамельной массы регулируется путем изменения ее толщины при охлаждении на столе длиной 1200мм, температура которого с помощью холодильной установки поддерживается в пределах 5-7°C. Следовательно, одним из важных параметров, подлежащих контролю в процессе производства, является среднеобъемная температура карамельной массы.

Определение среднеобъемной температуры массы путем измерения профиля температуры по сечению, перпендикулярному длине охлаждающего стола, и дальнейшее его осреднение представляет собой в производстве сложную техническую задачу. Для ее определения предложен способ измерения температуры массы в доступной для контактного метода точке (сверху или снизу карамели) с пересчетом ее в среднеобъемную.

Предпочтение отдано измерениям на нижней границе карамельной

массы при расположении первичного измерительного преобразователя (ПИП) температуры "заподлицо" с охлаждающим столом в его конце, где заканчиваются переходные процессы охлаждения массы.

Для расчета модели распределения температуры карамельной массы по пространственной координате использовано основное уравнение теплопроводности [1]:

$$\left[\omega_x \frac{\partial t}{\partial x} + \omega_y \frac{\partial t}{\partial y} + \omega_z \frac{\partial t}{\partial z} + \frac{\partial t}{\partial \tau} \right] = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

где $\omega_x \frac{\partial t}{\partial x}$, $\omega_y \frac{\partial t}{\partial y}$, $\omega_z \frac{\partial t}{\partial z}$ — скорость внутреннего тепловыделения по пространственным координатам;

$\frac{\partial t}{\partial \tau}$ — скорость изменения внутренней энергии материала на единицу объема;

$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$, $\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$, $\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$ — результирующие скорости переноса тепла в контрольный объем вследствие теплопроводности (на единицу объема);

a — коэффициент температуропроводности, зависящий от тепло-физических свойств материала.

Определение распределения температуры в твердом теле путем решения общего уравнения теплопроводности требует большого количества вычислительных расчетов и на практике не часто применяется, так как для этого необходимо найти решение дифференциального уравнения в частных производных. В большинстве практических задач можно сделать упрощающие предположения, исключаяющие тот или другой член из уравнения теплопроводности, что дает возможность упростить задачу и отыскать решения. Данная задача, относится к задачам нестационарной теплопроводности при отсутствии внутреннего тепловыделения. Задачу можно

свести к двумерной, т.к. температура зависит только от координат X и Z (распределение по длине и толщине карамельной массы). После введения упрощений уравнение теплопроводности примет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

От распределения температуры по пространственной координате X перейдем к более удобному для решения задачи распределению температуры по времени, считая, что карамельная масса не движется, а каждый ее участок охлаждается некоторое время τ . С учетом выше сказанного уравнение распределения нестационарного температурного поля примет вид:

$$\left[\frac{\partial t}{\partial \tau} \right] = a \left[\frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right] \quad \begin{array}{l} 0 \leq z \leq b \\ \tau > 0 \end{array} \quad (3)$$

Задача решается при граничных условиях третьего рода (условия равенства потоков), представленных в виде:

$$\begin{array}{l} z = 0: \quad -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} = \lambda_{\text{ст}} (t_{z0} - t_{\text{ст}}) \\ z = b: \quad -\lambda \frac{\partial t}{\partial z} = \alpha_{\text{воз}} (t_{zb} - t_{\text{воз}}) \end{array} \quad (4)$$

$$\tau = 0 \quad t_k = t_n(0) = 120^\circ\text{C}$$

где t_{z0} , t_{zb} — температура массы на границе со столом и воздухом;

$t_{\text{ст}}$, $t_{\text{воз}}$ — температура стола и воздуха;

λ , $\lambda_{\text{ст}}$ — коэффициенты теплопроводности карамели, стола;

$\alpha_{\text{воз}}$ — коэффициент теплоотдачи воздуха.

На основе упрощенного уравнения теплопроводности с граничными условиями третьего рода методом "прогонки" [2] выполнено моделирование распределения температуры по толщине массы и длине охлаждающего стола. Расчеты для определения среднеобъемной температуры проводились по сечению, перпендикулярному длине охлаждающего стола, в его конце. При моделировании варьировали температуру массы на выходе вакуум-аппарата в ее технологических пределах 100...120°C, толщину карамели от 3 до 7мм, температуру воздуха в цехе 17...25°C (зимние и летние условия), температуру охлаждающего стола 5...7°C.

В результате моделирования установлено:

а) при неизменной толщине карамельной массы среднеобъемная температура $T_{ср}$ и температура нижнего слоя T , измеряемая датчиком, связаны зависимостью:

$$T_{ср} = k \cdot T, \quad (5)$$

где $k = 1.55 \pm 0.01$ - с учетом наихудшего случая влияния внешних дестабилизирующих факторов. Среднеквадратическая погрешность измерения температуры в этом случае составляет $\pm 0.5^\circ\text{C}$;

б) с изменением толщины массы происходит изменение коэффициента k по экспоненциальному закону. При изменении толщины в соответствии с технологическими требованиями от 3 до 7 мм коэффициент изменяется в пределах 1.39...1.58. Применяя линейную аппроксимацию получена следующая зависимость коэффициента k от толщины $h(\text{м})$ (средне-квадратическая погрешность не превышает 0.01):

$$k = 1.25 + 49 \cdot h. \quad (6)$$

Дополнительная средняя квадратическая погрешность измерения температуры, обусловленная линейной аппроксимацией изменения коэффициента k

от толщины, не превышает 0.45°C . При этом среднеобъемная температура определяется выражением:

$$T_{\text{ср}} = [1.25 + 49 \cdot h] T. \quad (7)$$

Предложена линейная коррекция коэффициента k в зависимости от толщины карамельной массы, которая реализована аналоговым и цифровым методом; при этом погрешность измерения температуры составляет менее 1%, что допустимо по требованиям технологического процесса.

Для технологического процесса производства карамели на основе разработанного метода определения среднеобъемной температуры и коррекции измерений создана информационно-измерительная система, основу которой составляет канал измерения температуры, выполненный по схеме термометра сопротивления. В качестве чувствительного элемента использован датчик температуры типа ТСМ. Чувствительный элемент включен в одно из плеч резистивного моста, собранного на высокостабильных резисторах. Сигнал разбаланса моста, обусловленный изменением температуры измеряемой карамельной массы, усиливается усилителем постоянного тока (УПТ). Для снижения дрейфа нуля и уменьшения аддитивной составляющей погрешности канала в измерительном усилителе применена структура УПТ с преобразованием (модулятор-демодулятор). С целью повышения стабильности коэффициента усиления УПТ и уменьшения мультипликативной погрешности измерения температуры последний охвачен глубокой отрицательной обратной связью по напряжению. Инструментальная погрешность измерения температуры, вносимая каналом, не превышает 0.5°C .

Коррекция коэффициента k в зависимости от толщины карамельной массы аналоговым методом реализована на ОУПТ, в цепь отрицательной обратной связи которого включены прецизионные резисторы и потенциометрический датчик положения, определяющий расстояние между валками, задающими толщину массы. При этом его коэффициент передачи в

зависимости от толщины карамельной массы изменяется в соответствии с выражением (6).

Выходной сигнал измерительного канала после усилительного и корректирующего ОУПТ, сформированный в соответствии с выражением (7), поступает на АЦП для преобразования его в цифровой код, ввода в ПЭВМ и параллельно - на трехразрядный цифровой вольтметр для визуальной индикации температуры. Суммарная средняя квадратическая погрешность измерения среднеобъемной температуры карамельной массы системой не превышает 0.7°C , что удовлетворяет требованиям кондитерского производства. Рабочие диапазоны измерений величин и суммарные погрешности измерения, обеспечиваемые системой, по среднеобъемной температуре карамельной массы — $85\text{...}90^{\circ}\text{C}$ и $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$, что соответствует требованиям технологического процесса карамельного производства.

Выводы

На основе разработанных математических моделей и с учетом корректирующего коэффициента разработана система определения среднеобъемной температуры карамельной массы.

Использование предложенного способа определения среднеобъемной температуры, математической модели распределения поля температур карамельной массы и коррекции коэффициента k позволило по измерениям температуры в выбранной точке в реальном времени определять среднеобъемную температуру и повысить качество технологического процесса кондитерского производства.

Литература

1. Ф. Крейт, У. Блэк. Основы теплопередачи./ Пер. с англ. Под ред. Н.А.Анфимова. — М.: Мир, 1983. — 512с.
2. Волков Е.А. Численные методы. — М.: Наука, 1982. — 256с.