



## ОСОБЕННОСТИ УПРАВЛЕНИЯ РАЗОГРЕВОМ ХЛЕБОПЕКАРНОЙ ПЕЧИ ПРИ ПОДГОТОВКЕ АССОРТИМЕНТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

**ЛАДАНОК А.П.<sup>1</sup>, ИВАЩУК В.В.<sup>1</sup>, ЕЧКАЛОВ Д.В.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Национальный университет пищевых технологий

Тип: статья в журнале - научная статья      Язык: русский

Номер: 5-6      Год: 2014      Страницы: 73-76

Цит. в РИНЦ®: 0

УДК: 664.655.12:681.5.017

### ЖУРНАЛ:

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ. ПИЩЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Издательство: Кубанский государственный технологический университет (Краснодар)

ISSN: 0579-3009

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

ПЕЧЬ, АККУМУЛИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ, АССОРТИМЕНТНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, ТЕМПЕРАТУРНЫЙ ГРАДИЕНТ, АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ

**Особенности управления разогревом хлебопекарной печи  
при подготовке ассортиментного производства.**

д.т.н., проф. А.П. Ладанюк, к.т.н., доц. В.В. Ивашук, аспирант Д.В. Ечкалов  
01601, Украина, г. Киев, ул. Володимирська, 68, Национальный университет  
пищевых технологий, кафедра Автоматизации процессов управления,  
тел./факс:(044)289-52-83, [Ladanyuk@ukr.net](mailto:Ladanyuk@ukr.net), [ivaschuk@nuft.edu.ua](mailto:ivaschuk@nuft.edu.ua)

Процесс широтно-импульсного регулирования газовыми печами в пищевой промышленности производят по экспериментальной выпечке и учету температуры пекарной камеры, измеряемой встроенными датчиками. В то время, когда процесс разогрева пекарной камеры требует повышения температуры греющего газа для создания температурного градиента, температура заготовки возрастает из-за нарушения температурного режима, в результате чего ее поверхность быстро теряет влагу и перегревается.

В работе представлен метод учета характеристик хлебопекарной печи при реализации управления её температурным режимом.

Отсутствие адекватной модели изменения температурного режима приводит к значительным ошибкам при различных нагрузках хлебопекарной печи.

В результате анализа работы промышленных печей установлено, что для выпечки в печах преимущественно используется тепло, аккумулированное футеровкой и арматурой печи. Процесс выпекания в печи начинается с изделий, имеющих самую высокую температуру выпекания с постепенным понижением ее в дальнейшем. Следующей задачей выпечки является стабилизация температуры по зонам.

Так, использование стандартных законов регулирования не может быть автономно реализовано, как результат значительной тепловой емкости и ограничений в температурном градиенте пространства камеры печи.

Определение характеристик аккумулятивной способности печи происходит с помощью дифференциальных операторов температурных характеристик. С использованием реперных моментов реализуется структурное изменение

модели. Методика применима к температурной обработке изделий в печи с конвективным обогревом сырья, характеристики которого существенно зависят от применяемого при теплопередаче температурного градиента. Частным случаем применения методики есть изменение температурного режима в зонах выпекания.

**Печь, аккумулятивная способность, ассортиментное производство, температурный градиент, автоматизированное управление.**

При использовании импульсного режима управления температурой в камерах хлебопекарной печи требуется точный расчет количества теплоты, необходимого для разогрева камеры и тестовых заготовок.

Требование диктуется продолжительностью фазы переходного процесса по изменению задания в пределах от 25 до 50 минут, в условиях подачи заготовок при заданной температуре посадки.

Одним из факторов, который вызывает ошибку управления, является возмущающие действия тепловой арматуры хлебопекарной печью. Именно эта ошибка сказывается на качестве хлебной продукции и ограничивает операторов в переналадке заслонок печного агрегата под требуемый ассортимент продукции.

По типовому алгоритму печь выходит на температурный режим, что продолжается от часа до трех, соответственно мощности печи. В течение периода вывода печи на рабочий режим тепловая энергия топочных газов аккумулируется в арматуре пекарной камеры, процесс носит сложный характер тепло и массообмена, когда в теплоизолирующем материале со стальным экраном накапливается тепловая энергия.

**Существующие работы**[1] описывают взаимодействие теплового потока вокруг стенки через коэффициент теплоотдачи, который носит экспериментальный характер и является уникальным для каждого объекта. Некоторые работы просто исключают влияние печной арматуры на процесс поддержания теплового режима печи[2]. Также известны работы[3], где учет обратной теплотворной способности стенок происходит по закону Стефана

через излучение, однако процесс поддержания количества тепла, определяющего воздействие арматуры на температуру в зоне выпечки, остается не раскрытым.

**Заданием проекта** является определение методики адекватного моделирования и рационального дозирования тепла импульсными горелками, без усложнения оценки состояния дополнительными измерениями параметров объекта.

### **Предварительный анализ состояния**

На практике численное значение объемной компенсации тепла трудно определить аналитическими расчетами благодаря уникальной геометрии и составу каждой конструкции, недостаточной наблюдаемости объекта исследования имеющимися датчиками. В результате факторного исследования установлено, что внешняя температура футеровки печи слабо коррелирована с изменениями внутренней температуры в печи, а ее распределение слишком неоднородно, для того чтобы делать выводы о количестве тепла аккумулированного в ней. Будем считать тепло, которое остается в теплоизоляции печи, составляющей тепловых потерь, которые не являются частью температуры в камере выпекания.

### **Представление основных положений работы**

Экспериментальная оценка погрешности аппроксимации указывает на возможность упрощения модели и понижения ее порядка в условиях достижения необходимой адекватности и целесообразной точности оценки, соответствующей классу точности измерительного оборудования. Наблюдательными величинами на типичной печи являются температура в пристеночной зоне камеры и температура за муфелем топки. Расход топочных газов на камеру можно считать постоянным, поскольку используется импульсное дозирование горючего. Анализ процесса разогрева печи приводит к необходимости в составлении теплового баланса печной системы в границах зоны:

$$Q_{нал\_г} + Q_{нов\_кам} \pm Q_{арм\_кам} - Q_{втрat} = 0, (1)$$

где  $Q_{нал\_г}$  - количество тепла, которое вносит в зону выпекания доля топочных газов,  $Q_{нов\_кам}$  - количество тепла, которое содержит воздух зоны,  $Q_{арм\_кам}$  - количество тепла, которое содержит в себе арматура камеры,  $Q_{втрat}$  - количество теплоты, которая расходуется из-за потерь вытяжным коробом в качестве неиспользованного тепла.

Потери на объекте можно разделить на потери связанные с неполным использованием теплового потока топочных газов, которые разогревают зону выпекания и потери в арматуре. Потери при образовании и неполном использовании топочных газов в данной статье не рассматриваем, поскольку она работает в импульсном режиме с установившейся нагрузкой, и существующим ограничением количества оксида углерода в газах, работающих на разогрев печи.

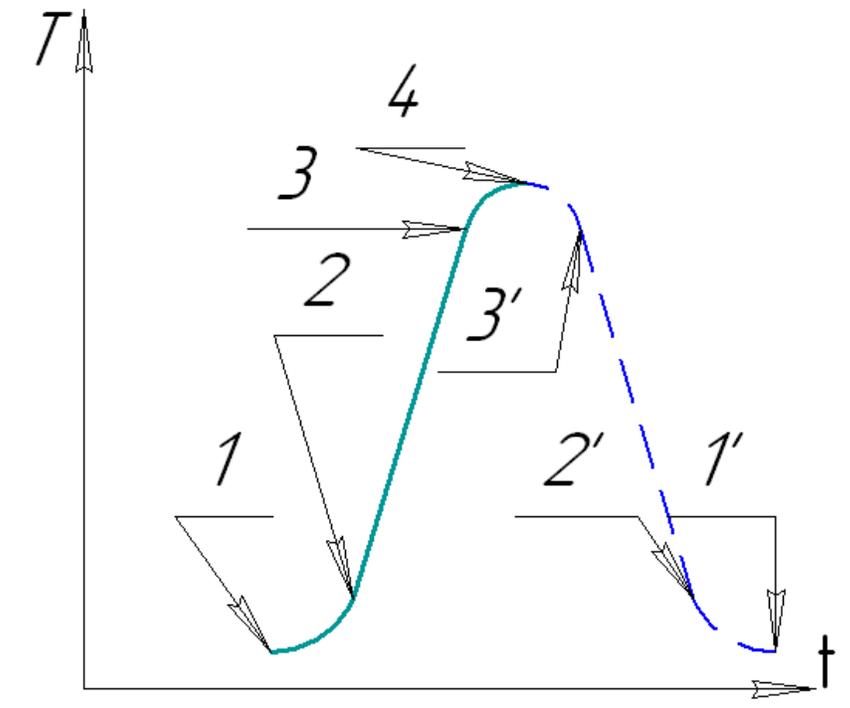


Рис. 1 Диаграмма термического цикла печи, где T-температура в пристеновой зоне камеры, t-время.

На первом этапе работы печи (1-2) объем воздуха камеры заменяется содержанием топочных газов. Температура топочных газов величина малоинерционная, а температура в зонах зависит в основном от объема зоны и количества воздуха поступающего из топки. Поэтому температура воздуха в камере:

$$\frac{dT_{ПОВ\_КАМ}}{dt} = \frac{a_i \cdot F_{ТГ} \cdot t}{V} \cdot T_{ЗА\_МУФ} + \frac{V_{зони} - a_i \cdot F_{ТГ} \cdot t}{V} \cdot T_{ПОВ\_КАМ\_ПОЧ} \quad (2)$$

где  $F_{ТГ}$  - расход топочных газов в коробе поступления топочных газов, зависит от положения заслонки этих расходов. В течение работы печи остается неизменной.

$a_i$  - коэффициент, указывающий на степень использования топочных газов  $i$ -той зоной выпечки. Практикой принято не изменять положение заслонки при выпечке продукта, поэтому коэффициент остается неизменным.

$T_{ЗА\_МУФ}$  - температура топочных газов, которая возникает в результате заполнения топки смесью горючих газов и избыточного воздуха, для создания содержимого необходимого, по требованиям эксплуатации, количества оксида углерода в топочных газах разогрева.

Температура в зоне изменяется продолжительностью присутствующих топочных газов в целевой зоне выпечки, во время чего тепло накапливается в арматуре печи. Необходимо определение теплоемкости арматуры печи через измерительные параметры процесса разогрева печи. Таким образом, процессы в арматуре печи могут быть описаны как

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dT_{нов.}}{dt} > 0, Q_{арм} = Q_{арм\_пoch} + Q_{топ\_газ} - Q_{втяг} \\ \frac{dT_{нов.}}{dt} < 0, Q_{арм} = Q_{арм\_зв\_пoch} - Q_{втяг} \end{array} \right. \quad (3)$$

Поскольку характеристикой тепловой изоляции является большое тепловое сопротивление, то тепловые процессы в ней следует относить к

тепловым потерям, поскольку через большое сопротивление соединения между изоляцией и средой вернуться в качестве полезной сможет только

$$Q_{арм\_зв} = Q_{арм} - c_{из} m_{из} \left( \frac{lT_{кам} + nT_{зov\_cm}}{2} - T_{зov\_cm} \right), \quad (5)$$

где  $l, n$  - коэффициенты, определяющие распределение температурного поля в изоляционном материале,  $l + n = 2$

$m_{из}$  - масса изоляционного материала, имеющего температуру

$$T_{из} \leq T_{кам}.$$

$Q_{внтяг}$  - потери, связанные с извлечением воздуха в целевой зоне.

Для определения количества тепла, которое получает арматура печи оказывается недостаточным существующего метрологического базиса, где причинами можно назвать неопределенность коэффициента теплопроводности и теплоемкости каждой отдельно взятой конструкции, из-за сложности исследования последней. Так из наиболее простых методов определения является получение информации о температуре выходящего воздуха камеры, осложняется количеством дополнительных датчиков температуры на паропроводящих каналах.

Поскольку температура топочных газов сильно отличается от целевой температуры зоны, то будем рассматривать зону выпекания объектом без самовыравнивания. Считая коэффициент теплопроводности изоляции величиной постоянной по геометрии тепловой зоны, а значит процесс набора температуры можно принимать как линейную зависимость от коэффициента теплопроводности стенки изоляционного материала (футеровки) печи. Другим случаем является использование процесса первичного нагрева и остановки печи, которая выполняется при первом запуске. Так в процессе оценки интервала нагрева и охлаждения можно определить интегральное количество тепла, которое получает арматура каждой зоны печи. Таким образом, процесс нагрева печи состоит из следующих частей:

1-2: наполнение зоны печи топочными газами между заслонкой устанавливает расход топочных газов на печь и коробам паротборной вентиляции согласно выражению(2);

2-3: нагрев зоны печи при постоянном обновлении топочных газов;

3-4: зона печи освобождается от испарения и остатка топочных газов.

Обратный участок - кривая охлаждения будет зависеть от времени освобождения камеры, топочных газов под действием сквозняка и от тепловой емкости объекта. Теплоаккумулирующую способность объекта можно определить используя разницу по времени между моментами 2-3 и

симметричными ему 3'-2', где  $\frac{d^2T}{dt^2} = 0$ , т.е. когда должны наблюдать процесс охлаждения арматуры за счет циркуляции сквозняков через испарительный короб без влияния топочных газов. Не следует ожидать абсолютной симметрии процесса охлаждения процессу нагрева, поскольку

$$\int_{T_2}^{T_3} T_{зони} dt = Q_{армат} + Q_{втрат}, \quad (7)$$

где  $T_i$  - временной отсчет момента в термическом цикле печи,  $Q_{втрат}$  - тепло, остающееся в арматуре печи и не влияющее на процесс выпечки. Часть выражения (7) соответствует, за передачу тепла стенке при изменении направления теплового потока, так

$$t_{2-3} = \frac{1}{(T_{зони\_завод} - T_{1-2} - T_{3-4})} * tg \left( \arccos \frac{t_{M3} - t_{M2}}{T_{M3} - T_{M2}} \right)$$

Поскольку объем камеры является величиной постоянной, а процесс освобождения воздуха из камеры неуправляем аппаратно, то процесс разогрева целесообразно аппроксимировать экспоненциальной функцией

$$\frac{dT_{1-2}}{dt} = a_{1-2} e^{bt}, \quad \text{где } a_{1-2} = \frac{dT_{кам\_1-2}}{T_{за\_муф\_макс} - T_{кам\_1}}$$

$$b_{1-2} = \frac{a_i \cdot F_{TГ}}{V_{зони}}$$

Для освобождения камеры

$$\frac{dT_{3-4}}{dt} = a_{3-4}(1 - e^{-b_{3-4}t}), a_{3-4} = \frac{dT_{кам-3-4}}{T_{зам\_муф\_макс} - T_{кам-4}}, b_{1-2} = \frac{j_i \cdot F_{ТГ}}{V_{зони}},$$

где  $j_i$  - коэффициент зависящий от разрежения создаваемого вытяжным коробом зоны.

Необходимые пределы интегрирования можно получить в результате постановки несложного экспериментального пуска конкретной печи по исследованию скорости изменения температуры в реперных точках 1 и 4,

когда  $\frac{dT_{кам}}{dt} = 0$ , а также 2 и 3 по условиям, которые определены выше.

Найденные временные отсчеты 1 и 3, будут использоваться для установления продолжительности работы горелки. Получение пределов интегрирования по 3 и 4 позволит получать необходимую температуру в камере. В целом все коэффициенты аппроксимации устанавливаются после экспериментального пуска, по таблично заданным координатам.

### **Выводы**

Результат усовершенствования позволит эффективно использовать импульсное управление, снизить ошибки в температурном режиме, которое до сих пор приводит к потере качества продукта. Однако полученный результат является лишь неотъемлемой частью математического описания объекта, где включается вариативная часть циркулирующего воздуха и изменения мощности горелки. В дальнейших исследованиях, существует потребность в определении влияния тестовых заготовок в качестве нагрузки печи и особых условий их приготовления, а также создании комплексной системы управления, где роль данной работы – реализация интеллектуального наблюдателя, формирования событий, структурных изменений модели.

### **Список литературы**

1. В. М. Таран Інтенсифікація теплообміну в конвективних хлібопекарських печах / В. М. Таран, О. В. Ковальов // Устаткування для харчової промисловості. – 2008. – № 10. – С. 38-40.
2. О.Ю. Кулешов Анализ характеристик сложного теплообмена в промышленных хлебопекарных печах в зависимости от конструктивных и режимных параметров / О.Ю. Кулешов, В.М. Седелкин // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – №4 (60). – С. 161-165.
3. В.Б. Данин, А.Ю. Кириков. Разработка математической модели пекарной камеры как объекта с сосредоточенными параметрами / Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий. — Режим доступа: <http://processes.open-mechanics.com/articles/157.pdf> — 29.11.2013 г.

#### References

1. V. M. Taran, O. V. Koval'ov, Intensifikacija teploobminu v konvektivnih hlibopekars'kih pechah, Ustatkuvannja dlja harchovoї promislovosti, 2008, № 10, P.38-40.
2. O.Ju. Kuleshov, V.M. Sedelkin Analiz harakteristik slozhnogo teploobmena v promyshlennyh hlibopekarnyh pechah v zavisimosti ot konstruktivnyh i rezhimnyh parametrov, Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta, 2011, №4 (60), P. 161-165.
3. V.B. Danin, A.Ju. Kirikov, Razrabotka matematicheskoj modeli pekarnoj kamery kak ob"ekta s sosredotochennymi parametrami, Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj universitet nizekotemperaturnyh i pishhevyh tehnologij, open access: <http://processes.open-mechanics.com/articles/157.pdf>

### **Features of controlling the heating of a bread oven for the preparation of assortment of production.**

**Anatolii Ladaniuk, Viacheslav Ivashchuk, Dmytrii Yechkalov**

01601, Ukraine, Kyiv, st. Volodimirskaya, 68, National University of Food Technologies, department Automation of Control Processes, tel./fax:(044)289-52-83, e-mail: [Ladanyuk@ukr.net](mailto:Ladanyuk@ukr.net), [ivaschuk@nuft.edu.ua](mailto:ivaschuk@nuft.edu.ua)

The process of pulse-width control for the oven with a gas heating release in the food industry, concerning baking, takes into account the temperature of the baking chamber during the experimental baking, obtaining data from measuring sensors which are mounted there.

Since the process of warming up the baking chamber requires raising the temperature of the heating gas to create a temperature gradient, the temperature of

the test piece of dough increases due to deviation of temperature, as a consequence of which the surface of dough quickly loses moisture and overheats.

This paper presents a method of accounting for the characteristics of the baking oven at implementation of its temperature control sequence.

Lack of adequate models of change in temperature order leads to significant errors at various loads of a bakery oven.

The result of the analysis of industrial ovens established that baking in ovens primarily uses heat which is accumulated by the fillers and armature of the oven.

The process of baking in the oven starts with products that have the highest baking temperature followed by those with a gradual decrease of temperature. The next challenge of baking is only to maintain the temperature zones.

This means that the use of standard control laws cannot be implemented autonomously as a result of significant thermal capacity and limitations of temperature gradient within oven chambers.

Specification of accumulative capacity of the oven is represented by differential operators of temperature characteristics. Structural change of the model is implemented by the use of reference points. The technique is applicable to thermal processing of products in a convective oven heating raw materials, whose characteristics are significantly dependent on application of gradient temperatures during a heat transfer. This particular case of application of the methodology is the changing of baking zones temperature.

**Oven, accumulative capacity, assortment of production, temperature gradient, automation control.**