

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ПИТАНИЯ КАМЕРЫ ЭК-ВЫПЕЧКИ ХЛЕБА

М.В. Дорожкин, Б.С. Первухин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова
г. Барнаул

Статья посвящена анализу характеристик питающего напряжения ЭК-печи через электропроводность, рассматривается влияние частоты питающего напряжения на энергопотребление ЭК-установки в целом.

Ключевые слова: выпечка хлеба, электро-контактный разогрев теста, энергосбережение.

Хлеб на территории нашей страны является продуктом первой необходимости. Для того чтобы покрыть существующий потребительский спрос, хлебопекарные предприятия вынуждены ежедневно выпекать большой объем продукции, а значит затрачивать на ее производство энергоресурсы. Применяемые в промышленности печи достаточно энергоемки, и, поэтому все больший интерес появляется к области альтернативных методов выпечки [1]. Одним из таких методов является электро-контактный (ЭК) разогрев теста, представляющий собой технологический процесс сквозного нагрева некоторой массы тестовой заготовки за счет тепловой энергии, выделяемой в результате прохождения через выпекаемое изделие электрического тока.

Основным параметром теста, выпекаемого данным методом, служит его электрическое сопротивление, которое необходимо учитывать при настройке ЭК-печи. Однако процесс выпечки зависит не только от сопротивления теста. Существенный вклад вносят как конструкция самой камеры, в которой происходит выпечка, так и характеристики питающего напряжения.

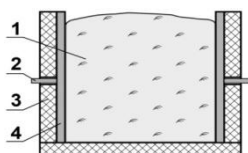


Рисунок 1 – Установка ЭК-прогрева: 1 – тестовая заготовка; 2 – токоподводящий контакт; 3 – диэлектрический корпус; 4 – электрод

Конструктивно ЭК-установка (рисунок 1) представляет собой ограниченный диэлектрическим корпусом 3 объем, в который помещается хлебопекарное тесто 1. Внутри

корпуса на противоположных стенках расположены два электрода, непосредственно контактирующие с тестовой заготовкой [1, 2]. К ним через токоподводящие контакты прикладывается напряжение промышленной частоты (50 Гц), за счет чего разность потенциалов вызывает появление токов, приводящих к нагреву всего объема тестовой заготовки.

Эмпирически установлено [1], что процесс выпечки сопровождается изменением физических характеристик теста, таких, к примеру, как объем и влагосодержание. Они в совокупности оказываются факторами, задающими в итоге электрические параметры. Значение сопротивления теста в любой момент времени выпечки можно определить экспериментально (рисунок 2), анализируя проходящий через тесто ток при постоянном напряжении.

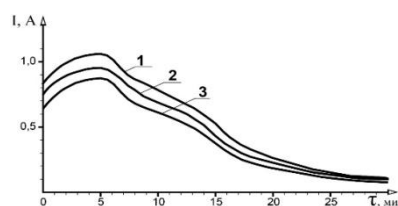


Рисунок 2 – Зависимости тока от времени при различных значениях напряжения: 1 – 140 В, 2 – 125 В, 3 – 110 В

Воспользовавшись законом Ома для участка цепи, при фиксированном напряжении, по графику можно видеть (кривые 1-3), что первые минуты прогрева теста приводят к росту значения тока, а, следовательно, к падению до определенного уровня электрического сопротивления. В дальнейшем (5 – 25 минуты) плавное уменьшение уровня тока, вызвано соответствующим ростом сопротивления, что наблюдается практически до са-

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ПИТАНИЯ КАМЕРЫ ЭК-ВЫПЕЧКИ ХЛЕБА

мого окончания выпекания [3, 4]. В начальный же момент времени, когда нагрев еще не успел вызвать изменения параметров теста, его сопротивление равно 165 – 170 Ом, что при размерах установки 0,1 x 0,08 x 0,25 метров эквивалентно удельной проводимости (УЭП) 0,184 – 0,189 См/м [1]. Такое сопротивление току оказывает не только одна лишь масса теста. При высокой электропроводности влияние начинают оказывать такие параметры как поляризационное сопротивление электродов, и емкость двойного электрического слоя на границе раздела сред тесто – электрод.

ЭК – установку при определенном приближении можно рассматривать как первичный измерительный преобразователь (ПИП), которому соответствует эквивалентная схема [3, 4], изображенная на рисунке 3.

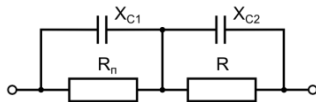


Рисунок 3 – Эквивалентная схема установки электро-контактного прогрева

Данная схема включает в себя: R_{Π} – суммарный поляризационный импеданс от двух электродов; X_{C1} – емкостное сопротивление двойного электрического слоя; R – сопротивление тестовой заготовки; X_{C2} – реактивное сопротивление теста.

Камера ЭК-печи представляет собой конденсатор, в котором пластинами являются электроды установки, а тесто выполняет роль диэлектрика. Из анализа выражения (1):

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d} \quad (1)$$

следует, что значение емкости такого конденсатора, а значит и реактивная составляющая сопротивления теста будет пренебрежимо мала в сравнении с его активным сопротивлением. В таком случае эквивалентную схему целесообразней привести к виду, показанному на рисунке 4.



Рисунок 4 – Эквивалентная схема ячейки ПИП

Применение данных эквивалентных схем зависит от того, в каком диапазоне УЭП находится ее значения, на какой частоте она

измеряется, а также от самого способа измерения.

Суммарный импеданс ПИП определяется выражением [3, 4, 5]:

$$Z_{\text{общ}} = Z_1 + Z_2, \quad (2)$$

где Z_1 – суммарное сопротивление, включающее поляризационное сопротивление и сопротивление ДЭС; Z_2 – суммарное сопротивление теста и емкостного сопротивления самого ПИП.

Для эквивалентной схемы (рисунок 4) формула (2) принимает вид:

$$Z_{\text{общ}} = Z_1 + R, \quad (3)$$

где R – сопротивление тестовой заготовки.

Полное сопротивление Z_1 , будет определяться как сопротивление параллельно включенных элементов: емкости с сопротивлением X_{C1} и активного сопротивления R_{Π} (формула 4).

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_{\Pi}} + \frac{1}{X_{C1}}. \quad (4)$$

и соответствует электрической проводимости ПИП, равной:

$$y_1 = \frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_{\Pi}} + j \cdot \omega \cdot C_1, \quad (5)$$

где ω – угловая частота, а C_1 – емкость ДЭС.

Дальнейшие преобразования выражения (5) приведут его к виду:

$$Z_1 = \frac{\frac{1}{R_{\Pi}}}{\frac{1}{R_{\Pi}^2} + \omega^2 \cdot C_1^2} - \frac{j \cdot \omega \cdot C_1}{\frac{1}{R_{\Pi}^2} + \omega^2 \cdot C_1^2}. \quad (6)$$

Полученное выражение (6) содержит, как действительную часть импеданса, так и мнимую.

Угловая частота $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ напрямую зависит от частоты тока. Сопротивление Z_1 (6), а, следовательно, проводимость также будет изменяться в зависимости от частоты.

Для определения емкости двойного слоя необходимо учесть несколько параметров (1). Площадь S обкладок ДЭС будет приблизительно равна площади сечения тестовой заготовки, и для ЭК-установки, (рисунок 1) соответствовать 0,008 м². Расстояние d будет равно толщине ДЭС, которая находится в пределах 10 – 100 нм [6].

Диэлектрическую проницаемость теста ε можно приближенно оценить, основываясь на его влагосодержании. Массовая доля влаги хлебопекарного теста равна 55 – 65 % в зависимости от сорта используемой муки и состава теста [1]. Диэлектрическая проницаемость воды при нормальных условиях равна 80, следовательно, при указанной влажности теста она должна лежать в интервале 44 – 52. Подставив данные значения в (1) получаем емкость ДЭС равную 31 – 368 мкФ. Эта

емкость соответствует одному ДЭС на границе электрод – тесто, однако для ЭК-печи таких слоев, обладающих емкостью, будет два, и включены они будут последовательно. Суммарная емкость двух ДЭС будет равняться 16 – 184 мкФ.

Поляризационное сопротивление в отличие от сопротивления ДЭС не зависит от частоты и является постоянным для определенного состава теста и конфигурации электродов ЭК-печи [7]. Его значение можно приближено принять около 20 – 35% (30 – 65 Ом) от омического сопротивления ячейки ПИП [3].

При построении зависимостей целесообразней исследовать не сопротивление сред, а обратную величину – проводимость. В связи с этим выражение для проводимости всей измерительной цепи, исходя из (3) и (6) следует привести к виду:

$$Y_{\text{общ}} = \frac{\frac{1}{R_{\text{П}}^2} + \omega^2 \cdot C_1^2}{\frac{1}{R_{\text{П}}} - j \cdot \omega \cdot C_1 + R \cdot \left(\frac{1}{R_{\text{П}}^2} + \omega^2 \cdot C_1^2 \right)} \quad (8)$$

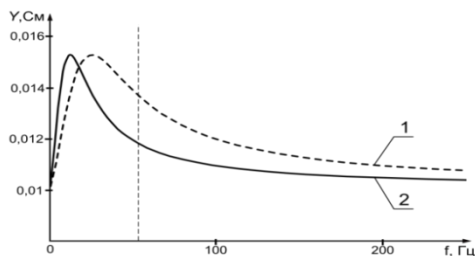


Рисунок 5 – Графики зависимости суммарной проводимости от частоты: 1 – при емкости ДЭС 90 мкФ, 2 – при емкости ДЭС 184 мкФ

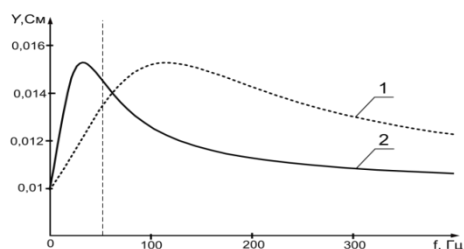


Рисунок 6 – Графики зависимости суммарной проводимости от частоты: 1 – при емкости ДЭС 20 мкФ, 2 – при емкости ДЭС 70 мкФ

На графиках (рисунки 5-6) полученных с использованием системы компьютерной алгебры Mathcad, представлено изменение проводимости ячейки ПИП на различных час-

тотах при фиксированном значении поляризационного сопротивления $R_{\text{П}}$.

Видно, что на определенных частотах наблюдается возникновение всплеска проводимости, причем при уменьшении емкости ДЭС точка экстремума будет смещаться в сторону более высоких частот, и его фронт будет более пологим. При пропуске через установку токов промышленной сети (вертикальная пунктирная линия), максимальная проводимость будет наблюдаться при значении суммарной емкости ДЭС около 35 – 45 мкФ, при этом потребляемая ЭК-установкой мощность будет максимальной.

Более низкое энергопотребление будет наблюдаться при питающем напряжении частотой выше 300 Гц (при емкости ДЭС выше 100 мкФ), и частотой выше 1 кГц (при емкости ниже 20 мкФ). На этих частотах реактивная составляющая мощности достаточно низка, а, следовательно, минимальны ее негативные влияния. Кроме того, снижение выработки реактивной мощности, отдаваемой в процессе работы обратно источнику, при ограниченном энергообеспечении производит наибольший положительный эффект, и применение данных частот для выпечки хлеба позволяет уменьшить потребляемую мощность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ауэрман Л.Я. Технология хлебопекарного производства. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 415 с.
2. Ялалетдинова Д.И., Сидоренко Г.А., Попов В.П. Применение электро-контактного энергопровода для выпечки зернового хлеба // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2009. – №2 – С. 23-26
3. Евдокимов, Ф.Е. Теоретические основы электротехники [Текст]: учеб. для средн. проф. обр. / Ф.Е. Евдокимов – М.: Academia, 2004. – 560 с.
4. Данилов, И.А. Общая электротехника с основами электроники [Текст] / И.А. Данилов – М.: Высш. шк., 2000. – 752 с.
5. Рекус Г. Г. Сборник задач и упражнений по электротехнике и основам электроники: Учеб. пособие / Г.Г. Рекус, А.И. Белоусов. – 2-е изд. Перераб. – М.: Директ -Медиа, 2014, 417 с.
6. Рабинович Ф.М. Кондуктометрический метод дисперсионного анализа. – Л.: Химия, 1970. – 234 с.
7. Евстигнеев В.В. и др. Параметрические первичные измерительные преобразователи: Моногр. В.В. Евстигнеев, М.М. Горбов, О.И. Хомутов – М.: Высш. шк., 1997.-181с.: ил.

Первухин Борис Семенович – д.т.н., профессор, email: bspervuhin@mail.ru;
Дорожкин Максим Владимирович – магистрант.