

ПРИКЛАД ТЕПЛОВОГО РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРАЦІЙНИХ СТЕПІННИХ УСТАНОВОК ХАРЧОВОЇ ПРОМІСЛОВОСТІ

Розглянемо сушіння скибочок сухарних плит здобних сухарів сорту Вершоків. Скибочки сухарних плит піддавали двосторонньому опроміненню за допомогою інфрачервоних випромінювачів.

За один раз завантажували 0,6 кг сухарів. Скибочки розміщували на мідній сітці з розмірами вічок 3 x 3 мм. Товщина дроту сітки 0,4 мм. Початкова вологоність сухарних плит $W_m = 32,6\%$. Максимальна температура поверхні сухарів під час досліду досягала 430°K (див.рисунк). Для розрахунків візьмемо усереднену величину $T_{cp} = 370^\circ\text{K}$. Спеціальними дослідженнями встановлено, що коефіцієнт поглинання сухарів в інтервалі довжини хвилі $\lambda = 2,5$ мкм $\rho = 0,7$.

Якщо брати до уваги, що оптичні властивості матеріалу повинні узгоджуватись з спектральними характеристиками ІЧ-випромінювачів [4,7], то для сушіння сухарних плит доцільніше застосовувати "світлі" ІЧ-випромінювачі.

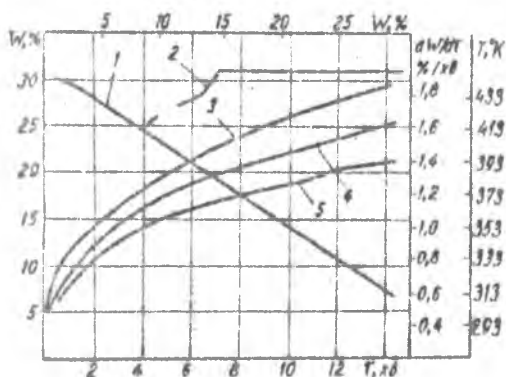
У дослідженнях авторів джерелами ІЧ-випромінювань були дзеркальні лампи типу ЗС-3, розташовані по вершинах квадрата. Для створення рівномірних полів опроміненості відстань ІЧ-випромінювачів від оброблюваного продукту H і між їх осями симетрії L вибирали таку [3]:

$$H = 1,73L. \quad (1)$$

Визначення температури умовної поверхні випромінювання. Якщо ІЧ-випромінювачі розташовані за залежністю (1), теплообмін між ними і оброблюваним матеріалом можна розглядати як теплообмін випромінювання між двома паралельними площинами. Для спростоти розрахунку розглянемо теплообмін між двома уявливими квад-

ратами з стороною $\alpha = 1$ м. Тоді рівняння для розрахунку опроміненості E матиме вигляд

$$E = C_{38,14} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \gamma_{11} + 4 C_{38,14} \left[\left(\frac{T_2}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_3}{100} \right)^4 \right] \gamma_{21} \quad (2)$$



Кінетика сушіння здобних сухарів вершкові "світлим" випромінювачами типу ЗС-3 при двосторонньому нагріванні ($E_1, E_2, E_3 = 8800$ Вт/м²):
1 - крива сушіння; 2 - крива швидкості сушіння; 3 і 4 - температурні криві поверхні і центра; 5 - температурна крива повітря всередині сушальної камери.

де T_1 , T_2 , T_3 - температура умовно вибраної поверхні випромінювання, поверхні стінок сушальної камери, приймальної поверхні балансоміра, відповідно; $C_{38,14}$, $C_{38,14}$ - відповідно зведені коефіцієнти випромінювання між умовно вибраною поверхнею випромінювання і поверхнею опромінюваного матеріалу; γ_{11} , γ_{21} - відповідно коефіцієнти опроміненості між умовно вибраною поверхнею випромінювання і поверхнею матеріалу та між стінками сушальної камери і поверхнею матеріалу.

Оскільки стінки сушальної камери розташовані на однаковій відстані від ІЧ-випромінювачів, то їх температури однакові. За час дослідів T_2 не перевищувала 370°K, $T_3 = 293^{\circ}\text{K}$.

Визначимо температуру умовно вибраної поверхні T_1 при $H = 0,5$ м. При цьому $E = 5250$ Вт/м² [8].

Коефіцієнти опроміненості визначаються за відомими формулами променевого теплообміну або з графіків [3] і відповідно для умов задачі так:

$$\text{при } \alpha_1 = \alpha_2 = 1 \text{ м; } A_1 = A_2 = A = 2; \gamma_{11} = \gamma_{21} = 0,4.$$

при $a = c = 1 \text{ м}$; $H = 0,5 \text{ м}$; $\beta = \frac{H}{a} = 0,5$; $C = \frac{c}{a} = 1$;

$$\epsilon_{\text{вн}} = 0,3; \quad \epsilon_{\text{вн}} = \frac{F_{\text{вн}} \epsilon_{\text{вн}}}{F} = 0,15.$$

Зведений коефіцієнт випромінювання $C_{\text{вн}}$ визначається в теорії теплообміну випромінюванням так:

$$C_{\text{вн}} = \epsilon_{\text{вн}} C_0. \quad (3)$$

де $\epsilon_{\text{вн}}$ - зведений ступінь чорноти системи; C_0 - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}^4$). Для практичних розрахунків приймають $\epsilon = \rho$ [7]. Як умовну поверхню випромінювання [1] вибираємо вольфрамову з ступенем чорноти $\epsilon = 0,3$ [2].

Ступінь чорноти приймальної поверхні балансометра $\epsilon_0 = 1$. Захисні засоби установки виготовлені з дюралюмінію, для якого

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3 = \epsilon_4 = 0,05 \text{ [2]}.$$

Тоді

$$C_{\text{вн},0} = 2,93 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}^4,$$

$$C_{\text{вн},1} = C_{\text{вн},2} = C_{\text{вн},3} = C_{\text{вн},4} = 0,85 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}^4.$$

Після підстановки одержаних значень $C_{\text{вн},1}$ та $C_{\text{вн},2}$ у вираз (2) одержимо $T_1 = 825^\circ\text{К}$. Якщо відстані $H = 0,3$ і $0,4 \text{ м}$, температура умовної поверхні відповідно дорівнює 875 і 835°К .

Звідси випливає, що максимальне відхилення визначуваної таким чином температури T_1 від середнього значення становить приблизно 3%, що цілком задовільно для практичних розрахунків. Отже, під час теплових розрахунків терморадіаційних установок з дзеркальними лампами типу ЗС теплообмін випромінюванням середньої установки можна розглядати як теплообмін випромінюванням між умовною сіркою площиною з $T_1 = 850^\circ\text{К}$ та $\epsilon = 0,3$, що проходить через денці колб ламп, і поверхню оброблюваного матеріалу.

Визначення енергетичної опроміненості матеріалу. Визначимо середню величину опроміненості об'єктів сушарів, якщо $H = 0,3 \text{ м}$ і $T_{\text{вн}} = 370^\circ\text{К}$; $a_1 = a_2 = 1 \text{ м}$; $\beta_1 = \beta_2 = \beta = 0,33$; тоді $C_{\text{вн}} = 2,14 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}^4$; $\epsilon_{\text{ср}} = 6450 \text{ Вт/м}^2$.

У зв'язку із зміною температури поверхні сухарів T_s у процесі сушіння відхилення величин опроміненості за час дослід від середньої становить близько 2%, що цілком допустимо.

Визначення коефіцієнтів теплообміну ускладненого масообміном, в умовах терморадіаційного сушіння зв'язано з великими експериментальними труднощами. Диференціальне рівняння теплового балансу у лабораторних умовах дає можливість приблизно визначити коефіцієнт конвективного теплообміну

$$\alpha_n = \frac{E_s - \frac{m_s}{F} \cdot \bar{c}_{екв} \cdot \frac{dT}{dt} - L \cdot \frac{dm}{dt} - \frac{\lambda}{\delta} \cdot \Delta t}{t_{n.m} - t_c}, \quad (4)$$

де E_s - опроміненість матеріалу при двосторонньому опроміненні, Вт/м²; m_s - маса сухого матеріалу, кг; F - поверхня матеріалу, м²; $\bar{c}_{екв}$ - еквівалентна питома теплоємність матеріалу, Дж/кг·град; приймаємо $\frac{m_s}{F} \cdot \bar{c}_{екв} = B$; $\frac{dT}{dt}$ - швидкість зростання середньої температури матеріалу, град/хв; L - енергія зв'язку однини маси вологи з матеріалом, Дж/кг; $\frac{dm}{dt}$ - швидкість сушіння, $\frac{кг}{м^2 \cdot сек}$; приймаємо $L \cdot \frac{dm}{dt} = D$; λ - еквівалентний коефіцієнт теплопровідності пароповітряного шару, Вт/м·град; δ - товщина цього шару, м; Δt - перепад температур в цьому шарі, град; $t_{n.m}$, t_c - температури поверхні матеріалу і пароповітряної суміші в сушильній камері відповідно, °C.

Скористаємось даними дослідів (див. рисунок). У цьому випадку $m_s = 0,452$ кг, $F = 0,18$ м². Оскільки сухарі в процесі сушіння опромінюються з двох боків, то $E_s = 2E = 2 \cdot 645 = 1290$ Вт/м².

Величину α_n визначимо для обох періодів окремо.

Період незмінної швидкості сушіння. Величини цього періоду позначимо індексом I. Визначимо α_{nI} для першого періоду сушіння тривалістю $\tau_1 = 10$ хв, для якого $\frac{dW_1}{dt} = 1,84$ проц/хв. Для цього періоду сушіння

$$\frac{dm}{dt} = const; \quad \frac{dm}{dt} = \frac{dW_1}{dt} \cdot D, \quad (5)$$

де D - перевідний коефіцієнт.

$$D = \frac{m_s}{100 F \cdot 60} = 0,417 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^2.$$

Спеціальними дослідженнями встановлено, що для першого і другого періодів сушіння величини L відповідно збільшуються в середньому на 5 і 10% у порівнянні з теплотою випарювання вільної води r :

$$L_I = 1,05r; \quad r = 570 \text{ ккал/кг} = 2390 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг};$$

$$A_I = 1,05 \cdot 2390 \cdot 10^3 \cdot 1,84 \cdot 0,417 \cdot 10^{-3} = 1930 \text{ Вт/м}^2.$$

Зведену теплоємність здобних сухарів $C_{\text{сх}}$ автори визначали за емпіричною формулою, запропонованою П.Я.Мазуром [8]. Процентний вміст жиру і цукру в сухарях Вершкові відповідно дорівнюють 10,5 і 14% [9]. Середня вологість протягом першого періоду $w = 22\%$. Звідки $C_{\text{сх}I} = 3,08 \text{ кДж/кг} \cdot \text{град}$; $\beta_I = 7,75 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{град}$.

Швидкість прогрівання матеріалу $\frac{dT_I}{dt}$ є середня величина по товщині оброблюваного матеріалу. Тоді

$$\frac{dT_I}{dt} = \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t \frac{dT_i}{dt}. \quad (6)$$

У даному досліді $\frac{dT_I}{dt} = 0,125 \text{ град/сек}$.

Член, який враховує нагрівання транспортуючих пристроїв (піддона), можна записати так:

$$\frac{\lambda}{\delta} \Delta T - N = \frac{C_{\text{під}} m_{\text{під}} (t' - t_{\text{нов}})}{F \tau}, \quad (7)$$

де $C_{\text{під}}$ - питома теплоємність піддона ($C_{\text{під}} = 896 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$); $m_{\text{під}}$ - маса піддона ($m_{\text{під}} = 0,1 \text{ кг}$); t' - температура піддона наприкінці першого періоду сушіння ($t' = t_{\text{під}} = 135^\circ\text{C}$), тоді $N_I = 175 \text{ Вт/м}^2$.

Різницю $t_n - t_c$ визначають як середнє арифметичне за перший період сушіння, розбиваючи на окремі інтервали, для яких t_n та t_c змінюються за лінійним законом; $t_n - t_c = 31,6 \text{ град}$. На підставі цих розрахунків маємо $\alpha_{nI} = 155 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$.

Другий період сушіння. Величини позначаємо індексом II. Швидкість прогрівання матеріалу $\frac{dT_{II}}{dt}$ розраховується, як і в першому періоді сушіння; $\frac{dT_{II}}{dt} = 0,089 \text{ град/сек}$.

Оскільки більша частина вологи видаляється в першому періоді сушіння, $C_{\text{сх}II}$ у другому періоді трохи зменшується. Розрахунок дає $C_{\text{сх}II} = 3,06 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$. Тоді $\beta_{II} = 7,68 \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{град}$. У другому періоді видаляється волога, зв'язана з матеріалом міц-

ніше, ніж та, що видаляється в першому періоді, тому $L_2 = 1,1 r = 3340 \cdot 10^3$ дж/кг.

Інтенсивність виділення вологи у другому періоді змінюється за лінійним законом. Тому $\alpha_{\text{н}}$ треба визначити для окремих проміжків часу, для яких $\alpha_{\text{н}}$ можна вважати сталими, а потім для розрахунків у заводських умовах ці значення усереднювати. Середня швидкість сушіння для другого періоду $\frac{dw}{dt} = 1,78$ проц/хв. Пізніше температур $\bar{t}_n - \bar{t}_c$ розраховували для кожної хвилини окремо:

$$(t_n - t_c)_{i,r} = \frac{(t_n - t_c)_{i-1} - (t_n - t_c)_1}{2}. \quad (8)$$

Для другого періоду $\alpha_{\text{н}} = 88,5$ вт/м²·град.

Розрахунок тривалості термообробки. Знаючи коефіцієнти теплообміну у першій та другій періоди сушіння, можна розрахувати час термообробки, користуючись формулою (4): $t_1 = 10,3$ хв; $t_2 = 3,6$ хв. Загальний час термообробки $t_1 + t_2 = 13,9$ хв.

Незначні відхилення між розрахунковим і дослідним часом термообробки, очевидно, зв'язані з усередненням величин α_n , $t_n - t_c$, $\frac{dw}{dt}$ та ін. для першого і другого періодів сушіння. Розрахунок величин α_n з використанням коротших проміжків часу дає точніші результати.

Таким чином, проведені лабораторні дослідження дають можливість за запропонованою методикою розраховувати сушильні терморадіаційні установки для виробничих потреб.

Література

1. Б л о х А.Г. Основы теплообмена излучением. М.-Л., Госэнергоиздат, 1962.
2. Б р а м с о н М.А. Справочные таблицы по инфракрасному излучению нагретых тел. М., "Наука", 1964.
3. Б у л я н д р а А.Ф. и др. О тепловом расчете терморадіаційних сушильних установок пищевой промышленности. - У зб.: "Пищевая промышленность". Вып. 13. Киев, "Техніка", 1971.
4. Г в я з б у р г А.С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. М., "Пищевая промышленность", 1966.
5. Д у щ е н к о В.П. и др. Исследования полей облученности некоторых "светлых" ИК-источников. - ИЖ. Т.9, 1966, №3.

6. Л у щ е н к о В.П. и др. Исследование условий создания равномерности полей облученности систем "светлых" инфракрасных излучателей. – У зб.: "Пищевая промышленность". Вып. 10, Киев, "Техніка", 1969.

7. Д у ш е н к о В.П. и др. Некоторые спектральные характеристики "светлых" инфракрасных излучателей. – У зб.: "Пищевая промышленность". Вып. 4, Київ, "Техніка", 1966.

8. М а з у р П.Я. Теплофизические свойства хлебных изделий с различным содержанием жира и сахара. – "Хлебопекарная и кондитерская промышленность", 1966, № 9.

9. Р о й т е р И.М. Хлебопекарное производство. Киев, Гостехиздат, УССР, 1963.

Надійшла 15 квітня 1970 р.