

ХАРЧОВА

ПРОМИСЛОВІСТЬ

13

## ПРО ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ТЕРМОРАДІАЦІЙНИХ СУШИЛЬНИХ УСТАНОВОК ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Останнім часом для інтенсифікації технологічних процесів термообробки харчових продуктів дедалі ширше застосовується ІЧ випромінювання [2]. Проте подальше розширення застосування ІЧ випромінювання гальмується через недостатню розробку теоретичних основ комплексу процесів терморадіаційного сушіння харчових продуктів і методики теплового розрахунку терморадіаційних установок.

Нижче пропонується методика теплового розрахунку терморадіаційних сушильних установок, розроблена авторами на основі експериментального і аналітичного дослідження особливостей тепло- і масоперенесення під дією ІЧ випромінювань і теорії теплообміну випромінювань.

Оптичні властивості харчових продуктів, що піддаються термічній обробці, мають селективний характер. Тому тепловий розрахунок терморадіаційних установок має насамперед узгодити оптичні властивості оброблюваних продуктів з спектральними характеристиками ІЧ випромінювачів. Вибирати ІЧ випромінювачі треба так, щоб довжина хвилі  $\lambda_{\text{макс}}$ , на яку припадає максимальне значення спектральної інтенсивності величини випромінювання випромінювача, припадала б на область довжин хвиль, де оброблюваний матеріал має найменше значення спектрального коефіцієнта дифузійного відбиття  $\rho_{\lambda}$  і найбільші значення спектрального коефіцієнта пропускання  $\tau_{\lambda}$ .

Знаючи  $\rho_{\lambda} = f(\lambda)$  і, за спектральною характеристикою підбраного випромінювача, інтервал довжин хвиль ефективного випромінювання, визначаємо інтегральний коефіцієнт поглинання матеріалу:

$$A = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \rho_{\lambda}) d\lambda \quad (1)$$

Формула (1) справедлива, коли припустити, що ІЧ випромінювання не пропускається матеріалом.

Оскільки частина променевої енергії ІЧ випромінювачів безпосередньо падає на захисні засоби установок, то, щоб уникнути поглинання ними коефіцієнт відбиття їх має бути максимальним в інтервалі довжин хвиль ефективного випромінювання випромінювача. Таким вимогам цілком задовольняють поліровані дуралюміній або алюміній.

Узгодивши спектральні характеристики ІЧ випромінювачів з оптичними властивостями оброблюваних матеріалів, перейдемо до енергетичного розрахунку терморадіаційних сушарок. Енергетичний розрахунок передбачає визначення умов, які гарантують рівномірність полів опромінювання, величини опроміненості, часу обробки матеріалу, конструкції і товщини захисних засобів установок, витрати повітря тощо.

Як показали дослідження авторів [3], для створення рівномірності полів опроміненості ІЧ випромінювачі необхідно розміщувати так:

$H = 1,75 L$  — «світлі» ІЧ випромінювачі типу ЗС;

$H = 1,4 L$  — трубочасті «темні» ІЧ випромінювачі в рефлекторі від ИР-1.

Тут  $H$  — відстані відповідно від дна колб «світлих» і центра осі симетрії трубочастих випромінювачів до оброблюваного матеріалу, а  $L$  — відстань між осями симетрії ІЧ випромінювачів.

При умові рівномірного опромінювання від ІЧ випромінювачів (дзеркальні лампи, трубочасті і панельні електронагрівники, газові випромінювачі тощо) можна умовно вибрати таку паралельну поверхню матеріалу площину, задавши її температуру і ступінь чорноти, що теплообмін між умовно вибраною площиною і матеріалом, а також захисними засобами установок відповідатиме теплообміну між ІЧ випромінювачами і матеріалом та стінками захисних засобів терморадіаційної установки.

Для зручності конструктивного розрахунку установок умовну площину необхідно розміщувати на елементах конструкції самих випромінювачів. Наприклад, для дзеркальних ламп типу ЗС умовну площину найзручніше розміщувати на дні колб ламп, для трубочастих електронагрівників — по поздовжніх осях симетрії. Для панельних випромінювачів умовна площина збігається з площиною випромінювання.

Температуру умовної площини визначають виходячи з експериментальних даних для попереднього вивчення полів опромінювання, створених випромінювачами, і рівняння теплообміну випромінюванням, попередньо задавши ступінь чорноти умовної площини.

Вибравши таким чином умовну площину і вважаючи стінки захисних засобів та матеріал сірими тілами, теплообмін у робочій камері можна розглядати як променистий теплообмін між сірими тілами, закономірності якого докладно розглянуто в літературі [1].

Енергія, що її випромінюють ІЧ випромінювачі, поглинається оброблюваним матеріалом, стінками захисних засобів і транспортуючими пристроями. Тому рівняння теплового балансу терморадіаційної установки можна подати в такому вигляді:

$$dQ_{\text{випл}} = dQ_M = dQ_T + dQ_S \quad (2)$$

де  $dQ_{\text{випл}}$  — енергія, випромінювана ІЧ випромінювачами;  $dQ_M$  — енергія, поглинута матеріалом;  $dQ_T$  — енергія, поглинута транспортуючими пристроями;  $dQ_S$  — енергія, поглинута стінками захисних засобів.

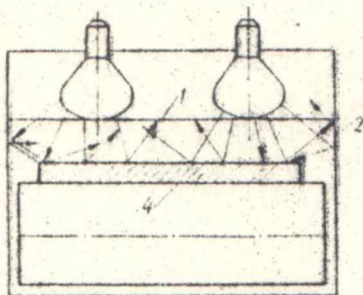
Невзначене поглинання середовища ІЧ випромінювання [2] у рівнянні теплового балансу не враховується. Енергія  $dQ_M$  витрачається на нагрівання матеріалу, фазові перетворення всередині його, руйнування зв'язку молекули з матеріалом, конвективний теплообмін з навколишнім середовищем,



теплообмін випромінюванням із захисними засобами установки і нагрівання транспортуючих засобів:

$$dQ_M = m_0 \left( c_0 + c_w \cdot \frac{W}{100} \right) dt + L dm S + \alpha_n (\bar{t}_n - \bar{t}_c) \times \\ \times S \cdot dt + C_{зв} \left[ \left( \frac{T_{п.м}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{з.з}}{100} \right)^4 \right] S \cdot dt + \frac{\lambda}{\delta} F_n \cdot \Delta t \cdot dt, \quad (3)$$

де  $m_0$  — маса абсолютно сухого матеріалу, кг;  $c_0$  та  $c_w$  — відповідно питомі теплоємності абсолютно сухого матеріалу та води, Дж/кг град;  $W$  — вологоміст матеріалу, %;  $dt$  — зміна середньої температури матеріалу, град;  $L$  — питома теп. лат випаровування з урахуванням енергії зв'язку вологи з матеріалом, Дж/кг;  $dm$  — кількість вологи, випареної з одиниці площі за час  $dt$ , кг/м<sup>2</sup>;  $\alpha_n$  — коефіцієнт конвективного теплообміну, ат/град м<sup>2</sup>;  $\bar{t}_n$  та  $\bar{t}_c$  — відповідно середні температури поверхні матеріалу та навколишнього середовища, °С;  $S$  — поверхня опромінюваного матеріалу, м<sup>2</sup>;  $dt$  — тривалість опромінювання, сек;  $C_{зв}$  — зведений коефіцієнт випромінювання поверхні матеріалу і стінок захисних засобів, ат/м<sup>2</sup>·град<sup>4</sup>;  $T_{п.м}$  та  $T_{з.з}$  — відповідно температури поверхні матеріалу та стінок захисних засобів, °К;  $\lambda$  — еквівалентний коефіцієнт теплопровідності пароповітряного контактного шару, ат/м град;  $\delta$  — товщина пароповітряного контактного шару, м;  $F_n$  — площа



Умовна схема терморадіаційної установки.

контакту, м<sup>2</sup>. При однобічному опромінюванні і суцільній підкладці  $F_n = \frac{S}{2}$ , м<sup>2</sup>;  $\Delta t$  — перепад температури по товщині пароповітряного шару, град.

У балансовому рівнянні (3) третій і п'ятий члени — величини від'ємні. Для терморадіаційних установок періодичної дії ( $T_{з.з} < T_{п.м}$ ) четвертий член рівняння (3) величина також від'ємна і характеризує тепловтрати випромінюванням. В установках безперервної дії ця величина додатна.

Матеріал в установці перебуває у променистому теплообміні з ІЧ випромінювачами і стінками захисних засобів, тому величину  $dQ_M$  можна визначити на основі закономірностей променистого теплообміну.

Розгляньмо променистий теплообмін у найпоширенішій терморадіаційній установці напівзакрытого типу. Променистий теплообмін в установках такого типу можна розглядати як теплообмін у замкненій системі, що складається з двох паралельних і взаємно перпендикулярних поверхонь.

Для зручності записів індекси 1, 4, 2 та 3 відповідно відносяться до умовної поверхні випромінювання 1, поверхні матеріалу 4 та захисних засобів установки 2, 3 (див. рисунок). Тоді

$$dQ_M = dQ_{14} + dQ_{24} + dQ_{34}. \quad (4)$$

Оскільки стінки захисних засобів виготовлені з одного матеріалу і мають однакову температуру, то  $dQ_{24} = dQ_{34}$  і рівняння (4) можна записати як

$$dQ_M = dQ_{14} + 2dQ_{24}. \quad (5)$$

де  $dQ_{14}$  — результуючий потік між поверхнями 1 та 4, а  $dQ_{24}$  — те саме між поверхнями 2 та 4.

Променистий теплообмін між площинами 1 та 4, 2 та 4 можна розглядати відповідно як променеобмін між двома паралельними і взаємно перпендикулярними прямокутниками. Тоді:

$$Q_{14} = C_{зв14} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right] S_1 \varphi_{14} \epsilon_k \cdot d\tau, \quad (6)$$

$$Q_{24} = C_{зв24} \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right] S_2 \varphi_{24} \epsilon_k \cdot d\tau, \quad (7)$$

де  $C_{зв14}$  та  $C_{зв24}$  — зведені коефіцієнти випромінювання;  $\varphi_{14}$  та  $\varphi_{24}$  — кутові коефіцієнти, що характеризують геометрію і оптичні властивості променеобмінних тіл (визначаються вони за формулами або за графіків, наведених у праці [1]);  $\epsilon_k$  — коефіцієнт заповнення стрічки транспортера.

Тоді рівняння (3) з урахуванням виразів (6) — (7) запишеться так:

$$C_{зв14} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right] S_1 \varphi_{14} \epsilon_k \cdot d\tau \pm 2C_{зв24} \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right] S_2 \varphi_{24} \epsilon_k \cdot d\tau = \\ = m_0 \left( c_0 + c_n \cdot \frac{W}{100} \right) d\bar{t} + LdmS_4 + \alpha_k (\bar{t}_n - \bar{t}_c) S_4 \cdot d\tau + \frac{\lambda}{\delta} F_4 \cdot \Delta\bar{t} \cdot d\tau. \quad (8)$$

Другий член у лівій частині рівності (8) описує променистий теплообмін матеріалу з стінками захисних засобів. При  $T_1 > T_2$  його беруть із знаком мінус (природно, у правій частині цієї ж рівності його немає, бо інакше він описував би теплообмін випромінюванням поверхні матеріалу з стінками захисних засобів установки вцілі).

Ліва частина рівності (8), поділена на  $F_4 \cdot d\tau$ , дає вираз для визначення опроміненості матеріалу:

$$E = C_{зв14} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right] \frac{S_1}{F_4} \varphi_{14} \epsilon_k \pm 2C_{зв24} \left[ \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_4}{100} \right)^4 \right] \frac{S_2}{F_4} \varphi_{24} \epsilon_k. \quad (9)$$

Рівняння (9) можна використати для визначення температури  $T_1$  умовно вибраної площини на основі емпіричних опроміненості, одержаних у лабораторних умовах.

Для правої частини рівняння (8), поділеного на  $F_4 \cdot d\tau$ , введемо позначення

$$\left. \begin{aligned} \frac{m_0}{F_4} \bar{c}_{зв} &= B(\tau); & 2L \cdot \frac{aW}{d\tau} &= D(\tau); \\ \alpha_k (\bar{t}_n - \bar{t}_c) &= M(\tau); & 2 \frac{\lambda}{\delta} \Delta\bar{t} &= N(\tau), \end{aligned} \right\} (10)$$

де  $S_4 = 2F_4$ ;  $\bar{c}_{зв} = (c_0 + c \frac{W}{100})$ ;  $\bar{t}_n$ ,  $\bar{t}_c$ ,  $\Delta\bar{t}$  — відповідно середні величини деної теплоємності, температури поверхні матеріалу, навколишнього середовища і середній перепад температури в пароповітряному контактному шарі.

Звичайно процес сушіння вологих дисперсних харчових продуктів відбувається у постійному і падаючому періодах сушіння. Тому доцільно розраховувати тривалості процесу сушіння розбити також на два періоди. Для кожного з них величини  $B(\tau)$ ,  $D(\tau)$ ,  $M(\tau)$ , та  $N(\tau)$  усереднюють або подають



у вигляді відповідних емпіричних функцій часу. Більш точно усереднити ці величини можна, розбивши ці періоди на окремі півперіоди, для яких усереднені величини можна вважати сталими.

Після усереднення величин (10) рівняння (8) з урахуванням виразу (9) запишеться у вигляді

$$E = \bar{B} \cdot \frac{dt}{d\tau} + \bar{D}(\tau) + \bar{M}(\tau) + \bar{N}(\tau). \quad (11)$$

Поділивши змінні, матимемо

$$\bar{B} \cdot dt = \bar{Z}(\tau) \cdot d\tau, \quad (12)$$

де

$$\bar{Z}(\tau) = E - \bar{D}(\tau) - \bar{M}(\tau) - \bar{N}(\tau).$$

Тоді для першого і другого періодів сушіння відповідно матимемо

$$\tau_I = \int_{t_{\text{поч}}}^{t_1} \frac{\bar{B}_I}{\bar{Z}_I(\tau)} dt_I; \quad (13)$$

$$\tau_{II} = \int_{t_1}^{t_{\text{конец}}} \frac{\bar{B}_{II}}{\bar{Z}_{II}(\tau)} dt_{II}. \quad (14)$$

Загальна тривалість процесу сушіння

$$\tau = \tau_I + \tau_{II}. \quad (15)$$

Розраховуючи сушарки закритого типу періодичної дії, треба враховувати теплообмін ще з двома стінками (передньою і задньою), для яких введемо індекси 5 та 6. Тоді рівняння теплового балансу (5) для оброблюваного матеріалу запишеться так:

$$dQ_M = dQ_{34} + dQ_{24} + dQ_{36} + dQ_{64} + dQ_{64}. \quad (16)$$

де  $dQ_{54}$  та  $dQ_{64}$  — відповідно результуючі променисті потоки між поверхнями передньою, задньою та 4. Величини  $dQ_{54}$  та  $dQ_{64}$  визначаються аналогічно величині  $dQ_{24}$ .

Для розрахунку відкритих сушарок бічні стінки можна вважати за абсолютно чорні тіла при  $T = 0$ , тобто все падаюче на них випромінювання повністю ними поглинається, а самі вони нічого не випромінюють. Рівняння теплового балансу матеріалу для цього випадку має вигляд

$$dQ_M = dQ_{14}. \quad (17)$$

Особливості розрахунку захисних засобів конструкцій терморадіаційних установок. Захисні засоби терморадіаційних установок перебувають у стані променистого теплообміну з ІЧ випромінювачами і з оброблюваним матеріалом. Від ІЧ випромінювачів на захисні засоби падає промениста енергія. Частина цієї енергії поглинається, але більша частина відбивається і потрапляє на оброблюваний матеріал. Останню складову автори врахували під час розгляду рівняння теплового балансу оброблюваного матеріалу. Для розра

хунку стінок захисних засобів необхідно знати тільки енергію  $dQ_{2-3}$ , поглинуту ними. Для визначення тепла, поглинутого однією стінкою, скористаємося з формули

$$Q_{12} = C_{зв,12} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] S_1 \Phi_{12} \tau, \quad (18)$$

де  $C_{зв,12}$  — та  $\Phi_{12}$  визначаються, як і в попередніх випадках.

У рівнянні (18) невідомою є величина температури  $T_2$  внутрішньої частини захисних засобів. Її розраховують виходячи з таких міркувань. Для терморадіаційних сушильних установок харчової промисловості температура зовнішніх стінок захисних засобів звичайно не перевищує 30—40°С (2).

Товщину ізоляції розраховують виходячи з інженерних міркувань. При цьому коефіцієнт теплопередачі розраховують за загальноприйнятими в теплотехніці формулами (4).

Розрахунок тепла, поглинутого транспортуючими пристроями. Транспортуючі пристрої нагріваються за рахунок променистого теплообміну з ІЧ випромінювачами і стінками захисних засобів установки (при суцільному укладанні оброблюваного матеріалу на стрічці транспортера ці складові відсутні) і за рахунок контакту з оброблюваним матеріалом. Отже, кількість тепла  $dQ_{тр}$ , поглинутого транспортуючими пристроями, можна розрахувати, як і для оброблюваного матеріалу. Проте цей розрахунок простіше можна виконати так.

Для інженерних розрахунків можна вважати, що кінцева температура поверхні стрічки дорівнюватиме температурі нижніх шарів матеріалу. Тоді  $Q_{тр}$  визначається за відомою формулою.

$$Q_{тр} = c_{тр} m_{тр} (t'_{кінц} - t'_{поч}), \quad (19)$$

де  $c_{тр}$  — питома теплоємність транспортуючої стрічки,  $дж/кг \cdot град$ ;  $m_{тр}$  — маса транспортера,  $кг$ ;  $t'_{кінц}$  — кінцева температура стрічки транспортера, °С;  $t'_{поч}$  — початкова температура стрічки транспортера, °С.

Розрахунок витрати повітря проводять за загальноприйнятими методами. Проте необхідно пам'ятати, що складова, яка іде на нагрівання повітря, являє собою втрати тепла в терморадіаційних установках. Тому втрата повітря має бути мінімальною, виходячи з доцільної для сушіння матеріалу вологості повітря.

## Література

1. Блох А. Г. Основы теплообмена излучением. М.—Л., Госэнергоиздат, 1962.
2. Гнззбург А. С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. М., «Пищевая промышленность», 1966.
3. Душенко В. П. и др. Исследование полей облученности некоторых «светлых» ИК источников — ИФЖ, т. 9, № 3, 1966.
4. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.—Л., Госэнергоиздат, 1956.

Надійшла 15 квітня 1970 р.