

CALCULATION OF COEFFICIENT OF THERMAL RADIATION OF COMBUSTION GASES IN THE FURNACE CHANNEL WITH CYCLOTHERMIC HEATING SYSTEM

S.D. Dudko

National University of Food Technologies

Key words:

Radiation emissivity coefficient
Smoke gasses
Baking oven
Effective thickness of layer of gas
Calculation
Relative error

Article history:

Received 21.06.2013
Received in revised
form 3.12.2013
Accepted 10.12.2013

Corresponding author:

tmjpt_xp@ukr.net

ABSTRACT

Methods of determination to the radiation emissivity coefficient of smoke gases are investigated. It is shown, that the calculation after the formulas resulted in the Normative method of thermal calculation of caldrons (In 1998) for the terms of baking oven with the cyclothermic heating system can bring to the considerable error. Offered correction coefficient as a function from the effective thickness of layer of gas which allows to promote exactness of calculation.

РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ У КАНАЛІ ПЕЧІ З ЦИКЛОТЕРМІЧНОЮ НАГРІВНОЮ СИСТЕМОЮ

С.Д. ДУДКО

Національний університет харчових технологій

*Розглянуті методи визначення коефіцієнту теплового випромінювання продуктів згоряння палива. Показано, що обчислення коефіцієнту теплового випромінювання за формулами, наведеними у Нормативному методі теплового розрахунку котлів (1998 р.), для умов печі з циклотермічною нагрівною системою можуть призвести до значної похибки. Запропоновано поправочний коефіцієнт у вигляді функції від ефективної товщини шару газу, який дозволяє підвищити точність розрахунку. **Ключові слова:** коефіцієнт теплового випромінювання, димові гази, хлібопекарська піч, ефективна товщина шару газу, розрахунок, відносна похибка.*

Вступ. Коефіцієнт теплового випромінювання (КТВ) або ступінь чорноти є однією з головних радіаційних характеристик димових газів, які під час руху нагрівним каналом випромінюють теплову енергію на його поверхні. Теплова енергія передається через робочу

© С.Д. Дудко, 2013

стінку каналу виробам, що випікаються у пекарній камері. За розрахунками [1, 2, 3] частка теплової енергії, переданої випромінюванням в печах з циклотермічною нагрівною системою, може коливатися в значних межах (в основному, від 30 до 60 %). Для нині існуючого розмаїття конструкцій печей значення частки випромінювання може бути як більшим, так і меншим від наведеного діапазону, проте у будь-якому разі внесок теплового випромінювання у загальній величині теплопередачі є значним. Серед усіх компонентів продуктів згоряння рідкого та газоподібного палива найбільше впливають на значення КТВ, головним чином, вміст трьохатомних газів — двоокису вуглецю та водяної пари.

На сьогоднішній день одним із найбільш точних методів визначення величини КТВ продуктів згоряння є графічний метод, в основі якого лежать номограми, побудовані за результатами обробки великого масиву експериментальних даних. Коефіцієнт випромінювання визначається окремо для CO_2 і H_2O в залежності від температури та добутку парціального тиску на ефективну товщину шару газу. За допоміжними графіками визначаються поправки, що враховують певні специфічні умови, характерні для перебігу процесу. Однак, використання графічного методу суттєво ускладнює комп'ютерне моделювання і розрахунок конструкцій та теплових режимів нагрівних систем печей.

У зв'язку з цим, неодноразово робилися спроби формалізувати вищезазначені залежності у вигляді математичних формул. Зокрема, у літературі [3] наводяться емпіричні залежності, що дозволяють проводити розрахунки без застосування графічного методу. Оціночне значення коефіцієнта теплового випромінювання димових газів можна отримати за формулою А. Шака:

$$\alpha_e = 0,154 \frac{\sqrt[3]{p_{\text{CO}_2} S}}{\sqrt{0,01T}} + 0,18 \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^{0,8} S^{0,6}}{0,01T} \quad (1)$$

де p_{CO_2} , $p_{\text{H}_2\text{O}}$ — відповідно парціальні тиски газів, кПа; S — ефективна товщина випромінюючого шару димових газів (довжина шляху променя), см; T — абсолютна температура, К.

Однак, як показують розрахунки, для значень температури і ефективної товщини шару газу, характерних для каналів хлібопекарських печей, формула дає занижений результат, а відносна похибка може сягати 30 %.

Інша група методик будується на спробі поєднати експериментальний матеріал з фізичними закономірностями процесу випромінювання. До таких можна віднести, зокрема, методику [4], у якій ступінь чорноти газу визначається як наслідок закону Бугера:

$$\alpha_e = 1 - \exp(-k\rho S), \quad (2)$$

де k — коефіцієнт ослаблення випромінювання газовою фазою продуктів згоряння, $1/\text{м}\cdot\text{МПа}$; ρ — тиск димових газів (абсолютний), МПа; S — вимірюється в метрах.

Коефіцієнт ослаблення випромінювання для суміші трьохатомних газів і водяної пари визначається за емпіричною формулою:

$$k_e = \left(\frac{8 + 16r_{\text{H}_2\text{O}}}{\sqrt{S}} \right) \left(1 - 0,38 \frac{T}{1000} \right) \sqrt{\rho(r_{\text{H}_2\text{O}} + r_{\text{CO}_2})}, \quad (3)$$

де $r_{\text{H}_2\text{O}}$, r_{CO_2} — об'ємні частки відповідних газів у суміші.

Область застосування цієї методики включає діапазон парціальних тисків CO_2 та H_2O , який є характерним для хлібопекарських печей; нижня межа температури, при якій застосовують формулу, становить 750 К. У нагрівних каналах сучасних печей, насамперед, з розвиненою турбулентністю газового потоку, значення температури газів у каналі можуть бути суттєво нижчими від зазначеної.

У більш сучасному варіанті Нормативного методу теплового розрахунку котлів [5] ця формула використовується у дещо іншому вигляді:

$$k_2 = \left(\frac{7,8 + 16r_{H_2O}}{\sqrt{10pr_{cm}S}} - 1 \right) \left(1 - 0,37 \frac{T}{1000} \right) r_{cm}, \quad (4)$$

де $r_{cm} = r_{RO_2} + r_{H_2O}$ — об'ємна частка суміші випромінюючих газів у продуктах згоряння. Об'ємна частка відповідних газів розраховується за відомими формулами:

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}^0}{V_2}, \quad r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_2},$$

де $V_{RO_2}^0$ — теоретичний об'єм трьохатомних газів (тут і далі всі об'єми приведені до нормальних умов при спалюванні 1 нмі палива і коефіцієнті витрати повітря $\beta = 1$). За умови повного згоряння горючих компонентів палива можна прийняти $V_{RO_2}^0 = V_{CO_2}^0$;

V_{H_2O} — об'єм водяної пари в димових газах. Об'єм залежить від коефіцієнта витрати повітря і розраховується за формулою:

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha - 1)V^0,$$

де $V_{H_2O}^0$ — теоретичний об'єм водяної пари; V^0 — теоретичний об'єм повітря, що іде на спалювання одиниці палива; V_2 — об'єм димових газів у нагрівному каналі, який залежить від коефіцієнта витрати повітря і розраховується за формулою:

$$V_2 = V_{RO_2}^0 + V_{N_2}^0 + V_{H_2O}^0 + (\alpha - 1)V^0$$

Діапазон температур, при яких можна застосовувати формулу (4), у виданні [5] не зазначений. Однак можна припустити, що оскільки методика стосується розрахунку котлів, нижня межа діапазону перевищує значення температури газів, яка може мати місце у каналах хлібопекарських печей.

Мета досліджень. Задачею даної роботи є дослідити похибку, яку дає розрахунок за Нормативним методом відносно графічного методу для діапазону значень часток трьохатомних газів, води, ефективної товщини шару газу та його температури, які мають місце в теплопередавальних пристроях (каналах) сучасних печей, у яких застосовується рециркуляція димових газів, а також запропонувати вираз для відповідної поправки.

Оцінювання точності Нормативного методу проводили для таких умов: об'ємна частка двоокису вуглецю $CO_2 = 0,0427$, води $H_2O = 0,1$, що відповідає середньому значенню коефіцієнта витрати повітря в каналі $\alpha = 2,35$ при спалюванні природного газу. У розрахунках змінювали висоту нагрівного каналу в межах 0,03...0,08 м з кроком 0,01 м та середню температуру газів у межах 573...823 К з кроком 50 К. Для плоского каналу довжину шляху променя розраховували за формулою:

$$S = 1,8h, \quad (5)$$

де h — висота каналу, м.

Результати досліджень. Результати обчислень показали, що більш суттєво, порівняно з температурою, на точність розрахункового методу впливає ефективна товщина шару газу. Допустима відносна похибка (до 5,5 %) має місце при значеннях висоти каналу 0,05 м і більше, причому по мірі збільшення висоти точність зростає при всіх значеннях температури. Ця ж тенденція зберігається і в області великих похибок: при висоті каналу 0,04 м відносна похибка коливається в межах 4,5 ... 9,4 % (в середньому 6,8 %), при 0,03 м — у межах 9,5...15,0 % (в середньому 12,2 %). Для кожного із значень висоти каналу збільшення температури призводить до зростання похибки. Для вказаного діапазону значень параметрів розрахунок дає завищений результат, за винятком області $h = 0,08$ м, де відносна похибка близька до нуля, а відхилення, залежно від температури, можуть бути як додатні, так і від'ємні.

Таким чином, розрахунковий метод за формулами (2), (4) дає завелику похибку, щоб його застосовувати у математичних моделях теплообміну в каналах печей.

Відповідна обробка результатів обчислень дозволила знайти вираз для поправки до значень КТВ, розрахованого згідно з Нормативним методом:

$$\alpha_2'' = \delta \alpha_2', \quad (6)$$

де $\delta = (0,832 + 1,2S)$ — поправочний коефіцієнт; α_2' — значення КТВ, розраховане за Нормативним методом;

Для зазначеного діапазону зміни температури, висоти каналу і вмісту трьохатомних газів і води максимальна похибка розрахунку за формулою (6) становить 4 % (для $T = 573$ К, $h = 0,04$ м), для більшості інших комбінацій T і h — суттєво нижча.

При моделюванні режимів роботи печей можлива ситуація, коли необхідно обчислювати значення КТВ у деякому діапазоні змін вмісту трьохатомних газів і води. Зміна складу газів у каналах пов'язана із підсмоктуванням повітря до нагрівної системи із зовні й залежить від герметичності нагрівної системи та, відповідно, величини коефіцієнта витрати повітря.

Похибку розрахунку за формулою (6) досліджували при тих самих комбінаціях значень температур і висоти каналу для двох фіксованих значень середньої величини коефіцієнта витрати повітря в каналах $\alpha = 2,0$ і $\alpha = 2,7$. Ці значення можна вважати крайніми для діапазону можливої зміни коефіцієнта α в каналах сучасних хлібопекарських печей з циклотермічною нагрівною системою.

Результати обчислень показали, що запропонована поправка у всьому дослідженому діапазоні зменшує відносну похибку розрахунку значень КТВ газів за методом (2), (4) порівняно з графічним методом.

При $\alpha = 2,0$ максимальна похибка Нормативного методу має місце при висоті каналу 0,03 м і досягає +18,4 % (при $T = 823$ К). Обчислення з поправкою при тих самих висоті й температурі дають максимальну похибку +6,1 %. При висоті каналу 0,08 м максимальна похибка Нормативного методу становить -9,2 %, з поправкою становить -8,7 % (при $T = 823$ К).

При $\alpha = 2,7$ Нормативний метод дає максимальну похибку +18,1 % при висоті каналу 0,03 м і $T = 823$ К. Поправка зменшує відносну похибку до +5,9 %. Для каналу висотою 0,08 м похибка Нормативного методу складає -6,1 %, з поправкою складає -5,6 %. Для інших комбінацій T і h розрахунок з поправкою дає похибку меншу ± 5 %.

Висновки. При моделюванні конструкцій та режимів роботи хлібопекарських печей з рециркуляцією димових газів коефіцієнт теплового випромінювання газів у нагрівних каналах можна обчислювати за Нормативним методом теплового розрахунку котлів із запропонованою поправкою на ефективну товщину випромінюючого шару. Похибка розрахунку у дослідженому діапазоні значень температури, коефіцієнта витрати повітря і довжини шляху променя не перевищує 6 %, що можна вважати задовільним результатом, за винятком області значень $\alpha = 2,0$, $h = 0,08$ см, у якій розрахунок з поправкою хоча і зменшує похибку Нормативного методу, проте занижує значення коефіцієнта теплового випромінювання на 7,9 ...8,7 % порівняно з графічним методом.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Расчет и проектирование печей хлебопекарного и кондитерского производств* [Текст]: учеб. / А.А. Михелев, Н.М. Ицкович, М.Н. Сигал, А.В. Володарский; Минвуз СССР. — 3-е изд. перераб. и доп.— М.: Пищевая пром-сть, 1979. — 326 с.
2. *Маклюков И.И.* Промышленные печи хлебопекарного и кондитерского производства [Текст]: учеб. / И.И. Маклюков, В.И. Маклюков; Минвуз СССР. — 4-е изд. перераб. и доп. — М.: Легкая и пищевая пром-сть, 1983. — 272 с.
3. *Михелев А.А.* Расчет и проектирование печей хлебопекарного и кондитерского производств [Текст]: учеб. / А.А. Михелев, Н.М. Ицкович; Минвуз РСФСР. — 2-е изд. перераб. и доп. — М.: Пищевая пром-сть, 1968. — 487 с.
4. *Блох А.Г.* Теплообмен излучением: справочник [Текст]/ А.Г. Блох, Ю.А. Журавлев, Л.Н. Рыжков. М.: Энергоатомиздат, 1991. — 432 с.

5. *Тепловой* расчет котлов (нормативный метод) [Текст]. — 3-е изд. перераб. и доп. — СПб.: ВТИ, НПО ЦКТИ, 1998. — 257 с.

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В КАНАЛЕ ПЕЧИ С ЦИКЛОТЕРМИЧЕСКОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

С.Д. Дудко

Национальный университет пищевых технологий

Рассмотрены методы определения коэффициента теплового излучения продуктов сгорания топлива. Показано, что вычисления коэффициента теплового излучения по формулам, приведенным в Нормативном методе теплового расчета котлов (1998 г.), для условий печей с циклотермической нагревательной системой могут привести к существенным погрешностям. Предложен поправочный коэффициент в виде функции от эффективной толщины слоя газа, который позволяет повысить точность расчета.

Ключевые слова: *коэффициент теплового излучения, дымовые газы, хлебопекарная печь, эффективная толщина слоя газа, расчет, относительная погрешность.*