

РОЗДІЛ «ТЕПЛОТЕХНІКА. ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА»

УДК 536.24

ГОРБУНОВ О.Д., д.т.н., професор
ГЛУЩЕНКО О.Л., к.т.н., доцент

Дніпродзержинський державний технічний університет

РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ
У ТЕПЛООБМІННИКАХ РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТИПУ

Вступ. Для розрахунків коефіцієнта тепловіддачі необхідно знати теплофізичні властивості різних газів залежно від температури. Однак, наявність теоретичних залежностей теплофізичних властивостей від температури обмежена [1]. У даній роботі отримано наближені залежності для розрахунків коефіцієнта тепловіддачі при розвиненій турбулентній течії широко розповсюджених теплоносіїв: води, водяної пари, повітря, продуктів згоряння середнього складу й інших газів. Перевірка рішень на адекватність дала позитивний результат.

Постановка задачі. При проведенні теплотехнічних розрахунків часто виникає потреба у розрахунку коефіцієнта тепловіддачі. Тому для спрощення та пришвидшення процесу треба розробити математичні залежності для різних теплоносіїв по визначенню даного коефіцієнта.

Аналітичний розрахунок з використанням ПЕОМ коефіцієнта змущеної тепловіддачі в насадках регенераторів при турбулентному режимі за критеріальним рівнянням [2]

$$Nu = D \cdot Re^n \quad (1)$$

досить складний через залежність теплофізичних властивостей речовин (λ , ν , Pr) від температури, наведених у довідниках, найчастіше у вигляді таблиць, що вимагають інтеполяції. Коефіцієнти D і n залежать від типу насадки й наведені в табл. 1.

Результати роботи. Виразимо із критеріального рівняння (1) коефіцієнт тепловіддачі у розмірному вигляді:

$$\alpha = A_w(t) \cdot W^n \cdot d^{n-1}, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}) \quad (2)$$

де W – швидкість потоку при нормальних умовах, м/с;

d – діаметр чарунки насадки або гідравлічний діаметр некруглого каналу, м;

$A_w(t) = D \cdot \lambda \cdot \nu^{-n} \cdot (T/273)^n = D \cdot S(t)$; $S(t) = \lambda \cdot \nu^{-n} \cdot (1 + t/273)^n$ – комплекс властивостей, що залежить від температури, Дж/(К·м²ⁿ⁻¹);

$(T/273)$ – коефіцієнт переведення швидкості на реальні умови;

D – коефіцієнт у рівнянні (1) (табл. 1).

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів D і n у рівнянні (1) [2]

Тип насадки	Розмір чарунки, мм	D	n	Значення критерію Рейнольдса
1	2	3	4	5
Сименса із суцільними каналами	165×165	0,200	0,61	600...13500
	120×120	0,193	0,62	650...15000
	50×50	0,045	0,78	900...18000

Продовження таблиці 1

1	2	3	4	5
Петерсена I (нормальний варіант, полиця 20 мм)	120×120	0,034	0,79	650...17000
Петерсена I (із більшою полицею 40 мм і зменшеною висотою)	120×120	0,025	0,8	2000...17000
Брускова	120×120	0,072	0,74	550...14000
Сіменса, шахова насадка	120×120	0,149	0,68	650...16500
	будь-якого розміру	0,024...0,018	0,8	Re > 4500
Каупера	при H/d >80*	0,0465	0,8	2500...4500
Із блочної цегли з горизонтальними прохідними і вертикальними виступами d = 0,031 м	45×45	0,0346	0,8	2240...18000**
Із блочної цегли зі щілинними каналами і горизонтальними проходами d = 0,043 м	125×25	0,0224	0,8	4000...14000**

* H – висота насадки;

** при малих числах Рейнольдса Re значення числа Нусельта Nu для блокової насадки може бути знайдене за номограмою [2].

Якщо більш вірогідно відома масова витрата G (кг/с), а не швидкість потоку, то, використовуючи формулу зв'язку «швидкість-витрата», з (2) одержимо:

$$\alpha = A_G(t) \cdot G^n \cdot d^{-(n+1)}, \quad (3)$$

де $A_G(t) = (4/\pi \cdot \rho)^n \cdot A_w(t)$.

У випадку, якщо теплоносії газоподібні, то замість масової витрати G використовується об'ємна витрата $V = G/\rho$, м³/с. Тоді формула (2) прийме наступний вигляд:

$$\alpha = A_V(t) \cdot V^n \cdot d^{-(n+1)}, \quad (4)$$

де $A_V(t) = (4/\pi)^n \cdot A_w(t)$.

Для аналітичного визначення коефіцієнта тепловіддачі, використовуючи табличні дані теплофізичних властивостей і методи множинної регресії, можна одержати апроксимаційну залежність комплексів A_w , λ , ν , а також $S(t)$ від температури. Аналогічний підхід був застосований у [3-5] для одержання формул аналітичного розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при вільноконвективному охолодженні тіл на повітрі й змушеному плинні в трубах. З метою спрощення розрахунків можна обмежитися апроксимацією величин параболою другого порядку:

$$y(x) = A + B \cdot x + C \cdot x^2. \quad (5)$$

Якщо відомі значення шуканої величини (функції) у трьох точках $y_1(x_1)$, $y_2(x_2)$, і $y_3(x_3)$, то коефіцієнти апроксимації слід визначати за формулами:

$$C = \frac{b_{32} - b_{21}}{x_3 - x_1}; \quad B = b_{32} - C(x_2 + x_3); \quad A = y_1 - B \cdot x_1 - C \cdot x_1^2, \quad (6)$$

$$\text{де } b_{32} = \frac{y_3 - y_2}{x_3 - y_2}; \quad b_{21} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}.$$

Найбільш уживаними теплоносіями в теплообмінних апаратах регенеративного типу є повітря й продукти згоряння (дим). Використовуючи дані [1] за коефіцієнтом теплопровідності й в'язкості (табл.2), а також параболічну залежність (5), були розраховані коефіцієнти A , B і C для аналітичного визначення комплексу $S(t)$ при різних значеннях показника ступеня n .

Таблиця 2 – Фізичні характеристики деяких газів і $S(t)$ при різних значеннях n

Температура, °C	$\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$S(t)$						
			n=0,61	n=0,62	n=0,68	n=0,74	n=0,78	n=0,79	n=0,8
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Повітря									
0	2,44	13,28	23,03	25,76	50,54	99,13	155,34	173,81	194,46
400	5,21	63,09	32,95	36,63	69,08	130,27	198,84	221,02	245,67
800	7,18	134,8	37,99	42,10	78,01	144,56	218,09	241,70	267,87
1200	8,93	222,7	42,20	46,68	85,54	156,76	234,76	259,70	287,28
1400	9,99	273,0	45,06	49,81	90,86	165,74	247,44	273,52	302,34
Продукти згоряння середнього складу									
0	2,28	12,20	22,66	25,37	50,03	98,63	155,09	173,66	194,47
400	5,70	60,38	37,03	41,18	77,86	147,23	225,12	250,34	278,38
800	9,15	131,8	49,08	54,40	100,95	187,31	282,84	313,54	347,57
1200	12,62	221,0	59,91	66,28	121,52	222,80	333,75	369,23	408,49
1400	14,42	272,0	65,19	72,06	131,48	239,89	358,20	359,96	437,70
Азот (N₂)									
0	2,42	13,3	22,82	25,53	50,07	98,21	153,89	172,18	192,63
400	5,06	60,9	32,70	36,36	68,72	129,87	198,52	220,73	245,44
800	6,73	133,0	35,90	39,79	73,79	136,85	206,57	228,97	253,80
1200	8,51	227,04	39,74	43,96	80,46	147,27	220,37	243,74	269,58
1400	9,28	280,07	41,21	45,54	82,95	151,08	225,32	249,00	275,17
Двоокис вуглецю (CO₂)									
0	1,46	7,09	20,20	22,75	46,34	94,38	151,65	170,74	192,24
400	4,71	36,7	41,46	46,33	90,26	175,85	274,30	306,55	342,59
800	7,49	85,3	52,39	58,32	111,08	211,57	325,09	361,94	402,97
1000	8,61	116,0	55,41	61,60	116,38	219,85	335,96	373,53	415,31
Окис вуглецю (CO)									
0	2,32	13,3	21,87	24,47	48,00	94,15	147,53	165,06	184,67
400	4,84	61,8	31,00	34,47	65,08	122,88	187,72	208,70	232,03
800	6,99	135,0	36,95	40,95	75,87	140,58	212,07	235,03	260,47
1200	9,22	226,73	43,09	47,66	87,25	159,72	239,02	264,36	292,39
1400	10,28	279,69	45,69	50,49	91,97	167,52	249,86	276,13	305,15
Кисень (O₂)									
0	2,46	13,6	22,88	25,59	50,13	98,20	153,74	171,96	192,36
400	5,49	62,8	34,82	38,71	73,02	137,74	210,29	233,75	259,83

Продовження таблиці 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
800	7,75	138,0	40,42	44,78	82,87	153,35	231,13	256,10	283,76
1200	9,84	235,82	44,90	49,64	90,66	165,58	247,39	273,51	302,39
1400	10,87	290,91	47,16	52,10	94,68	172,06	256,22	283,04	312,67
Водень (H₂)									
0	17,17	93,0	49,43	54,24	94,67	165,23	239,53	262,83	288,39
400	34,68	423,0	68,71	74,94	126,07	212,11	300,04	327,22	356,85
600	42,57	656,0	75,64	82,34	137,06	228,13	320,41	348,80	379,72
800	49,88	924,0	81,56	88,67	146,38	241,66	337,57	366,99	398,97
1000	56,96	1230,0	86,82	94,28	154,57	253,43	352,37	382,64	415,51
Пари води (H₂O)									
100	2,37	19,4	17,75	19,78	37,94	72,74	112,27	125,14	139,48
200	3,34	30,6	26,49	29,55	56,99	109,89	170,24	189,93	211,90
400	5,58	60,5	36,21	40,26	76,12	143,91	220,04	244,69	272,10
600	8,15	99,8	45,67	50,66	94,42	175,95	266,45	295,58	327,89
800	11,00	147,0	55,20	61,12	112,68	207,71	312,28	345,79	382,90
1000	14,04	204,0	64,03	70,79	129,27	236,08	352,71	389,95	431,12

Результати розрахунків представлено в табл.3. Аналогічну таблицю можна скласти при інших коефіцієнтах n рівняння (1).

Таблиця 3 – Коефіцієнти апроксимації A , B і C для розрахунків $S(t)$ при різних значеннях n

Коефіцієнти апроксимації	$n=0,61$	$n=0,62$	$n=0,68$	$n=0,74$	$n=0,78$	$n=0,79$	$n=0,8$
	Повітря (0...200 °C)						
A	23,03	25,76	50,54	99,13	155,34	173,81	194,46
$B \cdot 10^2$	3,3	3,64	6,24	10,53	14,72	15,96	17,31
$C \cdot 10^5$	-2,1	-2,4	-4,1	-6,9	-9,5	-10,0	-11,0
Повітря (200...1400 °C)							
A	25,25	28,23	55,0	107,08	166,90	186,49	208,36
$B \cdot 10^2$	1,83	1,99	3,30	5,35	7,26	7,82	8,41
$C \cdot 10^5$	-0,3	-0,32	-0,53	-0,83	-1,1	-1,1	-1,2
Продукти згоряння (0...200 °C)							
A	22,66	25,37	50,03	98,63	155,09	173,66	194,47
$B \cdot 10^2$	3,79	4,37	7,71	13,42	19,20	20,98	22,89
$C \cdot 10^5$	-0,3	-0,3	-0,45	-0,35	0,35	0,6	1,0
Продукти згоряння (200...1400 °C)							
A	23,73	26,58	52,22	102,57	160,8	171,91	201,29
$B \cdot 10^2$	3,45	3,78	6,67	11,64	16,80	23,40	20,15
$C \cdot 10^5$	-0,35	-0,38	-0,72	-1,3	-1,9	-7,1	-2,3

У табл.3 теплофізичні властивості наведено при атмосферному тиску. Слід ураховувати, що значення λ дуже мало залежить від тиску. Тому можна використовувати значення при $p = p_{н.у.}$ Кінематична в'язкість газів обернено пропорційна тиску, тому значення ν при тиску $p_{н.у.}$ ділимо на величину $p/p_{н.у.}$, де тиск газу вимірюється в ата [2].

Оцінимо похибку отриманих рішень на наступному прикладі. Якщо розрахунки робити традиційним методом (застосування критеріальних рівнянь), то процес розрахунків є досить громіздким і, до того ж, необхідно неодноразово застосовувати метод інтерполяції. Використовуючи вихідні дані, наведені в [2], розв'яжемо наступне завдання.

Необхідно розрахувати коефіцієнт тепловіддачі конвекцією для продуктів згоряння повітрянагрівача доменної печі, який має насадку регенератора типу Каупера, температура диму становить $t_{\partial} = 1270^{\circ}\text{C}$, еквівалентний діаметр $d_{\text{екв.}} = 0,031\text{ м}$. Для насадок доменних повітрянагрівачів швидкість продуктів згоряння при нормальних умовах приймається в межах $W_{\ddot{a}} = 1,5 \dots 2\text{ м/с}$ [1]. Ухвалюємо для нашого прикладу значення швидкості продуктів згоряння $V_{\partial} = 2\text{ м/с}$. Згідно з табл.1 $D = 0,0465$; $n = 0,8$.

Здійснимо розрахунок традиційним методом. Розраховуємо коефіцієнт тепловіддачі конвекцією. Теплофізичні властивості продуктів згоряння знаходимо з табл.3 при температурі 1270°C , застосовуючи, де потрібно інтерполяція.

Коефіцієнт теплопровідності

$$\lambda_{1270} = \lambda_{1200} + \frac{1270 - 1200}{1300 - 1200} \cdot (\lambda_{1300} - \lambda_{1200}) = 12,62 + \frac{1270 - 1200}{1300 - 1200} \times (13,5 - 12,62) = 13,24 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$$

Кінематична в'язкість

$$\nu = 221 + \frac{1270 - 1200}{1300 - 1200} \cdot (246,5 - 221) = 238,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Дійсна швидкість диму

$$W_{\ddot{a}} = W_{\ddot{a}_0} (1 + t_{\ddot{a}}/273) = 2(1 + 1270/273) = 11,3 \text{ м/с}$$

Число Рейнольдса при еквівалентному діаметрі $d = 0,031\text{ м}$

$$Re = \frac{W_{\ddot{a}} \cdot d}{\nu} = \frac{11,3 \cdot 0,031}{238,9 \cdot 10^{-6}} = 1466,304$$

Число Нусельта для насадок із блокової цегли розраховуємо за формулою (1):

$$Nu = D \cdot Re^{0,8} = 0,0465 \cdot (1466,304)^{0,8} = 15,865$$

Тоді коефіцієнт тепловіддачі конвекцією складе величину:

$$\alpha_{\kappa_{\partial}} = Nu \cdot \frac{\lambda}{d} = 15,865 \cdot \frac{13,24 \cdot 10^{-2}}{0,031} = 67,76, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$$

Здійснимо розрахунок за розробленою методикою. Оскільки температура диму становить 1270°C , то відповідно до табл.3 рівняння для визначення величини $S(t)$ для продуктів згоряння при високих температурах при показнику ступеня $n = 0,8$ буде мати такий вигляд:

$$S(t) = A + B \cdot t + C \cdot t^2,$$

$$S(1270) = 201,29 + 20,15 \cdot 10^{-2} \cdot 1270 - 2,3 \cdot 10^{-5} \cdot 1270^2 = 420,098$$

Згідно з рівнянням (2) $A_w(t) = D \cdot S(t)$:

$$A_w(1270) = 0,0465 \cdot 420,098 = 19,545.$$

Тоді коефіцієнт тепловіддачі буде дорівнювати:

$$\alpha = A_w(t) \cdot W^n \cdot d^{n-1},$$

$$\alpha = 19,545 \cdot 2^{0,8} \cdot 0,031^{(0,8-1)} = 68,17 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Похибка визначення α складе:

$$P_\alpha = \frac{68,18 - 67,76}{68,18} \cdot 100\% = 0,6\%.$$

Таким чином, похибка у визначенні α за простими наближеними формулами не перевищує 1% і цілком достатня для інженерних розрахунків.

Висновки. 1. Отримано прості наближені залежності коефіцієнта тепловіддачі при русі різних газів у насадках регенераторів.

2. Розроблені апроксимаційні залежності дозволяють здійснювати розрахунок без використання таблиць теплофізичних властивостей газів.

3. Складено таблиці для визначення теплофізичних характеристик деяких газів і комплексу пропорційності для розрахунку коефіцієнту тепловіддачі.

4. Перевірка даної методики на адекватність показала, що похибка розрахунку коефіцієнта тепловіддачі не перевищує 1%.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче / С.С.Кутателадзе, В.М.Боршанский. – М.: Государственное энергетическое издание, 1958. – 414с.
2. Китаев Б.И. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Китаев Б.И., Зобнин Б.Ф., Ратников В.Ф. – М.: Металлургия, 1970. – 528с.
3. Горбунов А.Д. К аналитическому расчёту суммарного коэффициента теплоотдачи при охлаждении тел на воздухе / А.Д.Горбунов, Е.Л.Глущенко, Л.И.Хиш // Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. В двух книгах. – Книга первая. – Днепропетровск: Пороги. – 2005. – С.118-131.
4. Горбунов А.Д. Определение коэффициента теплоотдачи при турбулентном течении в трубах и каналах аналитическим методом / А.Д.Горбунов // Металлургическая теплотехника: Сборник научных трудов Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: Пороги. – 2008. – С. 26-33.
5. Горбунов А.Д. Аналитический расчёт коэффициента теплоотдачи в регенераторах металлургических печей / А.Д.Горбунов, Е.Л.Глущенко // Теплотехника и энергетика в металлургии: XVI междунар. конф., 4-6 октября 2011г.: труды НметАУ. – Днепропетровск: «Новая идеология», 2011. – С.50-51.

Надійшла до редколегії 08.06.2012.

Дніпродзержинський державний технічний університет

ОСОБЛИВОСТІ ТА ПЕРЕВАГИ ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙТРАЛЬНО-КИСНЕВОГО РЕЖИМУ ПІДГОТОВКИ ВОДИ НА КОТЕЛЬНОМУ АГРЕГАТІ П-50 ПАТ «ДНІПРОЕНЕРГО» ПСП «КРИВОРІЗЬКА ТЕС»

Вступ. Звичайна вода є широко поширеним теплоносієм: дешева, добре вивчена як робоче тіло, має високі значення густини, теплоємності, теплопровідності, в'язкості, що сприяє отриманню високих коефіцієнтів теплообміну. Але вона є корозійно-активною рідиною і корозія устаткування, що виникає, знижує його надійність. Домішки водяного теплоносія, в тому числі й продукти корозії, відкладаються всередині труб, що обігріваються, у проточній частині турбіни та на іншому обладнанні блоку, знижують надійність та економічність роботи електростанції.

Постановка задачі. Для підвищення надійності роботи електростанції необхідно зменшити концентрацію домішок у водяному теплоносії. Реалізувати цей принцип можна шляхом організації водно-хімічного режиму енергоблоку. Так, на прикладі котла П-50 ПАТ «Дніпроенерго» ПСП «Криворізька ТЕС» було розроблено та впроваджено нейтрально-кисневий режим підготовки води (НКВР).

Прямоточний котел П-50 (Подільський котельний завод імені Орджонікідзе) призначений для роботи у блоці з конденсаційною турбіною К-300-240. Спроектований у двокорпусному симетричному виконанні котел підключається до турбіни за системою «дубль - блок». Кожен корпус виконано по П-подібному компонуванню: паливна камера є висхідною. Конвективна шахта та топка пов'язані між собою горизонтальним газоходом у верхній частині топки. Паливні камери кожного корпусу складаються з двох частин: камери згорання (передтопка) і камери спалювання (топки). Обидві частини розділені між собою перетиском, який утворюється виступами фронтального і заднього екранів.

Котел П-50 складається з наступних елементів: нижньої, середньої і верхньої радіаційних частин (НРЧ, СРЧ і ВРЧ), двохсхідцевого ширмового пароперегрівача, парового теплообмінника, конвективного пароперегрівача первинної пари, двохсхідцевого пароперегрівача проміжної пари і водяного економайзера.

У зв'язку з тим, що нейтрально-кисневий водний режим (НКВР) впроваджується для захисту внутрішньої частини труб поверхонь нагріву від відкладень, то розглядати будемо тільки тракт живильної води, починаючи з деаератора і включаючи котел.

Результати роботи. Одним з обов'язкових умов успішного застосування режиму НКВР є забезпечення мінімально можливої питомої електричної провідності. Дані електростанцій, а також проведені дослідження показують, що при електропровідності Н-катіонітної проби живильної води 0,2-0,3 мкСм/см при 25°C концентрація сполук заліза в живильній воді становить 4-7 мкг/кг [1]. При великих значеннях електропровідності пасивуючі властивості кисню не оберігають метал від розвитку корозії, і спостерігається стійка тенденція до зростання вмісту заліза в живильній воді; можливий також і розвиток корозійних процесів у проточній частині турбін в зоні фазового переходу.

В даний час в результаті оптимізації роботи конденсатоочищення (виключення байпасуючих потоків конденсату, зменшення паразитних потоків через неї, поліпшення співвідношення катіоніти - аніоніти в шихті ФСД) на більшості енергоблоків питома електрична провідність конденсату після конденсатоочищення при 25°C становить 0,1-0,12 мкСм/см, живильної води перед котлом – 0,15-0,2 мкСм/см.

Іншою обов'язковою умовою при переведенні блоку в режим НКВР є відсутність в тракці низького тиску теплообмінників з трубною системою, виконаних з латуні.

Третьою умовою є необхідність ретельної хімічної очистки конденсаторно-живильного тракту від сполук міді, що відклалися на поверхнях нагріву підігрівачів, деаераторів під час попереднього режиму НКВР експлуатації блоку.

При переведенні блоків на режим НКВР у початковий період кисень поглинається внутрішніми поверхнями живильних трубопроводів ПВД, колекторів і екранних труб котла, окислюючи залишки продуктів корозії, які потім виносяться з котла. Оксидна плівка (зазвичай чорного кольору), яка утворюється на очищених поверхнях труб, однорідна за складом і являє собою в основному магнетит (Fe_3O_4). Це і забезпечує міцність її зчеплення з основним металом і захисні властивості.

По мірі утворення захисної магнетитової плівки на трубах інтенсивність поглинання кисню знижується і в підсумку настає стадія умовно повного насичення, коли вміст кисню в середовищі на виході з котла зростає і стає майже рівним вмісту його в живильному тракці (у місці введення). Це означає, що в тракці повністю завершилося утворення захисної плівки, і кисень став поглинатися в меншій мірі у відповідності зі сповільненою швидкістю дооксидзації окремих молекул Fe_3O_4 у F_2O_3 та умовами підтримки магнетитової плівки у вигляді захисного покриття. При роботі блоків в режимі НКВР дозування кисню у живильну воду необхідно проводити таким чином, щоб в середовищі на вході до пароперегрівача котла підтримувалася мінімальна його концентрація.

Розрахунок швидкості утворення внутрішньотрубних відкладень. В основу розрахунку швидкості утворення внутрішньотрубних відкладень покладена методика, представлена для екранних поверхонь нагрівання парових котлів НКТ, охолоджуваних водним середовищем з ентальпією 1200-2600 кДж/кг і тиском 24-30 МПа, при роботі котлів на нейтрально-кисневому водному режимі [2]. Розрахунок ведеться для випадку утворення залізооксидних відкладень.

Максимальна кількість залізооксидних відкладень утворюється при ентальпії

$$h_{\text{макс}} = 900 \cdot \left(\frac{\beta \cdot \mu \cdot q_T}{\omega_p} \right) + 1500, \text{ кДж/кг.} \quad (1)$$

Відхилення значення ентальпії потоку $h_{\text{п}}$ в розрахунковій точці від $h_{\text{макс}}$ позначимо величиною

$$\Delta h = h_{\text{макс}} - h_{\text{п}}. \quad (2)$$

При $|\Delta h| > 100$ кДж/кг величина відкладень істотно менша від максимального значення, тому необхідно вводити поправочний коефіцієнт

$$K_h = 10^{-0,0025 \cdot (|\Delta h| - 100)} \quad (3)$$

при розрахунку маси відкладень за формулою (5).

У випадку $|\Delta h| < 100$ кДж/кг розрахунок можна вести по максимальній величині відкладень, поправочний коефіцієнт K_h на величину відкладень приймається рівним 1. Інтенсивність росту питомої кількості наносних утворень оксидів заліза на лобовій утворюючій труби, визначається за формулою:

$$m_{\text{від}} = 0,000225 \cdot C_{\text{Fe}} \cdot d_{\text{вн}} \cdot \rho \omega \cdot K_{\text{нер}} \cdot \left(1 - \exp \left(-1,57 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{(h_{\text{макс}} - 209)}{d_{\text{вн}}} \right) \right), \text{ г/(м}^2 \cdot \text{год.)}, \quad (4)$$

де C_{Fe} – концентрація заліза в живильній воді, мкг/кг;

$d_{вн}$ – внутрішній діаметр труби, м;
 $\rho\omega$ – масова швидкість потоку, $\text{кг/м}^2\cdot\text{с}$;

$K_{нер}$ – коефіцієнт нерівномірності утворення відкладень по периметру труби, що показує відношення кількості відкладень на лобовій утворюючій до середньої величини відкладень по периметру труби (табл.1).

Таблиця 1 – Коефіцієнт нерівномірності утворення відкладень по периметру труби

S_1/d_H	1,05	1,06	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11	1,12	1,13
$K_{нер}$	2,65	2,50	2,30	2,00	1,75	1,50	1,35	1,25	1,15
S_1/d_H	1,14	1,15	1,16	-	-	-	-	-	-
$K_{нер}$	1,10	1,05	1,0	-	-	-	-	-	-

Коефіцієнти $K_{від}$, $\lambda_{від}$, що характеризують шар внутрішньотрубних відкладень при різних водно-хімічних режимах представлені у табл.2.

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів $K_{від}$, $\lambda_{від}$

Водно-хімічний режим	$(C_{Fe})_{жв}$, мкг/кг	$K_{від}$	$\lambda_{від}$, Вт/м·К
Гідразинно-аміачний	8-10	1	0,5-0,6
Гідразинний	7-11	0,5	1-1,2
Високолужний	3-5	1,2	(1)
Нейтрально-кисневий	8-10	0,5	1
Нейтрально-окисний з H_2O_2	7-8	0,35	3
Комплексний	8-10	1,25	2-3

Для плавцевих труб $K_{нер}$ приймається рівним 2,2. Для гладких труб значення $K_{нер}$ в залежності від відносного кроку S_1/d_H представлені в табл.1.

Зростання внутрішньотрубних відкладень відбувається за рахунок утворення наносних відкладень й окислювання металу труби водним середовищем НКТ:

$$M_{від} = \left(m_{від} \cdot \tau_{від} + 6,567 \cdot 10^5 \cdot \tau_{від}^{0,26} \cdot \exp\left(\frac{-7830}{T_{вн}^e}\right) \right) \cdot K_h \cdot K_{від}, \text{ г/м}^2, \quad (5)$$

де $\tau_{від}$ – час формування відкладень, год., за який ведеться розрахунок;

$T_{вн}^e$ – еквівалентна температура металу внутрішньої поверхні труби, К;

$K_{від}$ – коефіцієнт, що враховує вплив водно-хімічного режиму парового котла на інтенсивність утворення відкладень.

Еквівалентна температура $t_{вн}^e$, °С визначається як напівсума температури металу на внутрішній поверхні труби на початку $t_{вн}^H$ й кінці $t_{вн}^K$ періоду, що розраховується. У першому наближенні приймають $t_{вн}^e = t_{вн}^H$, потім визначається $t_{вн}^K$, знаходять нове значення $t_{вн}^e$ й проводять наступну ітерацію. Результати розрахунку представлені у табл.3.

Таблиця 3 – Основні результати розрахунку температурного режиму труб НРЧ

Параметр	Позначення	Розмірність	Час, τ , год.			
			0	10000	20000	30000
1. Температура металу:						
– на внутрішній поверхні	$t_{ст}^{вн}$	°С	404	455	499	549
– середня по товщині стінки	$t_{ст}^{сер}$	°С	432	483	527	577
– на зовнішній поверхні	$t_{ст}^{зов}$	°С	460	511	555	606
2. Стоншення товщини стінки:						
– з внутрішньої сторони	$\Delta S_{вн}^D$	мм	0	0,007	0,014	0,023
– із зовнішньої сторони	$\Delta S_{зов}^D$	мм	0	0,028	0,064	0,133
– сумарне	C_{3p}	мм	0	0,035	0,064	0,133
3. Товщина стінки труби:						
– мінімальна	S_0	мм	2,96	3,11	3,81	5,74
– номінальна розрахункова	S	мм	3,26	3,79	4,58	6,83
– запас товщини	$\Delta S_{зап}$	мм	2,76	2,21	1,42	-0,83
4. Внутрішньотрубні відкладення оксидів заліза:						
– інтенсивність зростання	$m_{від}$	г/м ² ·год.	0	0,0152	0,0152	0,0152
– маса	$M_{від}$	г/м ²	0	256	480	735
– товщина шару	$\delta_{від}$	мкм	0	63	118	180

Середня товщина шару відкладень, визначається за формулою:

$$\delta_{від} = \frac{M_{від}}{4,08} \cdot 10^{-6}, \text{ м.} \quad (6)$$

У літературі відсутні досить повні дані про вплив водно-хімічних режимів на швидкість і місце утворення внутрішньотрубних відкладень, їхню теплопровідність. У табл.2 представлені оцінювальні значення коефіцієнтів $K_{від}$ й $\lambda_{від}$, а також зразкова концентрація оксидів заліза (розраховуючи на залізо) для основних водно-хімічних режимів.

Висновки. Отже, на підставі проведених розрахунків можна зробити наступні висновки:

1) швидкість корозії ст. 20 у конденсатно-живильному тракті перебуває в припустимих межах і знижується з ростом температури від 0,032 г/(м²·год.) на вході КН-1 до 0,006 г/(м²·год.) на вході СН. При температурі 30-35°С присутність кисню у знесоленому конденсаті 100-200 мкг/кг не робить впливу, що пасивує на ст. 20, але швидкість корозії її при цьому перевищує припустиму величину. Швидкість корозії сплаву МНЖ-1

збільшується з 0,001 до 0,004 г/(м²·год.) зі збільшенням вмісту кисню в конденсаторі з ≈ 30 до 100-200 мкг/кг при незмінній температурі 30-35°C;

2) зростання внутрішніх відкладень НРЧ при НКВР нижче, ніж при ГАВР і не перевищує 4-9 г/м² за 1000 годин експлуатації. Питоме забруднення труб за 14962 годин експлуатації на НКВР не перевищило 140 г/м². Зростання температури металу труб НРЧ у тривалій експлуатації на НКВР сповільнюється і її значення не перевищує 530-540°C. Зовнішня високотемпературна корозія труб НРЧ на блоках 800 МВт при цьому не припинилася, а на блоках 300 МВт ст. №1 й №4 такої не виявлено, що свідчить про значну залежність її від топкового режиму й виду палива;

3) при переведенні на НКВР блоків СКД першого покоління рекомендуються як обов'язкові заходи заміна латунних трубок у ПНД на сталеві й ретельне відмивання міді, що нагромадилася в тракці енергоблоків у попередній експлуатації на гідразинно-аміачному водному режимі;

4) на блоках 300 і 800 МВт, на яких з часу пуску і монтажу всі ПНТ були змонтовані з трубками з нержавіючої сталі, занос проточної частини ЦВТ не перевищує 3-5%, тобто знаходиться в межах допустимих величин, обмеження потужності турбін не спостерігається. Відкладення в ЦВТ складаються, в основному, з міді. Ерозійного занесення проточної частини турбін з вини НКВР не виявлено.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шицман М.Е. Нейтрально-кислородный водный режим на энергоблоках СКД / М.Е.Шицман. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 136с.
2. Липов Ю.М. Котельные установки и парогенераторы / Ю.М.Липов, Ю.М.Третьяков. – М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. – 592с.

Надійшла до редколегії 21.05.2012.

УДК 621.783.24:621.1

РЕВУН М.П., д.т.н., професор
ГРЕСС О.В.*, д.т.н., професор
КАЮКОВ Ю.М., асистент
ІВАНОВ В.І., ст. викладач
ЧЕПРАСОВ О.І., к.т.н., професор

Запорізька державна інженерна академія

*Дніпродзержинський державний технічний університет

ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ РАДІАЦІЙНОГО ТЕПЛООБМІНУ В НАГРІВАЛЬНИХ ПЕЧАХ КАМЕРНОГО ТИПУ

Вступ. Актуальним завданням під час проектування та реконструкції нагрівальних печей є досягнення припустимого значення перепаду температури між поверхнями та за перерізом заготовок, що нагрівають, перед видаванням із печі. Найбільші складнощі під час вирішення даної задачі виникають у камерних полум'яних печах [1], де спалювання палива сприяє формуванню нерівномірного розподілу температури у газовому об'ємі камери, а, отже, й на поверхні металу, який нагрівають.

На ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» для нагрівання заготовок прямокутного перерізу використовують печі камерного типу, що опалюють за допомогою восьми пальників, які встановлено на одній бічній стінці камери у два ряди за її висотою. Наявність такої схеми опалювання даних агрегатів суттєво ускладнює рівномірність нагрівання заготовок, які розміщують у печі за напрямом руху гріючого середовища, що потребує проведення робіт щодо її удосконалення.

Проте відсутність методики розрахункової оцінки впливу систем опалювання нагрівальних печей камерного типу, які використовують на ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь», на рівномірність нагрівання садок металу та засвоєння ним теплоти суттєво ускладнює вирішення зазначеної проблеми.

В роботах [2, 3] викладено основні положення та способи чисельної реалізації зонального методу розрахунку радіаційного та складного теплообміну для полум'яних металургійних печей у загальному вигляді.

Постановка задачі. Метою роботи є розробка інженерної методики розрахунку радіаційного теплообміну в робочому об'ємі нагрівальної печі камерного типу ПАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» для оцінки ступеню нагрівання заготовок за різними схемами опалювання.

Результати роботи. Методику засновано на спільному розв'язанні задач зовнішнього та внутрішнього теплообміну в робочій камері нагрівальної печі, що дозволяє забезпечити обчислення розподілу температури на поверхні та у перерізі заготовок за дискретним часом залежно від місця їх розташування в робочій камері.

При розв'язанні задачі зовнішнього теплообміну з використанням зонального методу у постановці роботи [3] приймали такі припущення:

- садка заготовок є пластиною з товщиною, що дорівнює товщині всіх заготовок, укладених в один ряд без зазорів, яку піддають двохсторонньому нагріванню;
- через наявність двох рядів пальників забезпечується симетричне нагрівання заготовок;
- тіла, що беруть участь у променистому теплообміні (метал, футерівка, продукти згоряння) є сірими, випромінювання й відбивання променистої енергії поверхнями металу та футерівки – дифузним.

У такому разі модель теплообміну в робочому об'ємі нагрівальної печі камерного типу подають замкнутою системою, створеною твердими непрозорими тілами, яка розділена поглинально-випромінювальним середовищем та має розміри робочого об'єму пічної камери. Для урахування змінювання складу продуктів згоряння й оптичних властивостей поглинально-випромінювального середовища за напрямом руху гріючого середовища зазначену систему поділяють на об'ємні зони факела та продуктів згоряння, а також плоскі поверхневі зони металу й футерівки.

Концентрацію палива, ступінь його вигорання, а також концентрації випромінюючих компонентів продуктів згоряння щодо довжини факела, розраховують за співвідношеннями роботи [4].

Разом з реальними поверхневими зонами металу та футерівки вводять умовні абсолютно чорні поверхні [2], що відокремлюють об'ємні зони від суміжних з ними та пропускають падаюче на них випромінювання, яке розглядають як власне дифузне.

Розрахунок радіаційного теплообміну в межах окремої зони здійснюють резольвентним зональним методом [5] з використанням розв'язувальних узагальнених кутових коефіцієнтів, які пов'язують результуючі та власні теплові потоки у даній зоні.

Визначення розв'язувальних узагальнених кутових коефіцієнтів виконують у три етапи:

- для прийнятих типів підсистем методом Монте-Карло [6] розраховують геометричні кутові коефіцієнти випромінювання $\varphi_{k,i}$, де $k, i = 1 \dots n$;
- узагальнені кутові коефіцієнти випромінювання обчислюють з використанням співвідношення:

$$\Phi_{k,i} = \varphi_{k,i} \cdot \exp[-k_i \cdot S_i^{\text{до}}], \quad k, i = 1 \dots n, \quad (1)$$

- розв'язувальні узагальнені кутові коефіцієнти випромінювання визначають під час вирішення системи рівнянь

$$\Psi_{k,i} = \Phi_{k,i} + \sum_{j=1}^{n-1} \Phi_{k,j} \cdot R_j \cdot \Psi_{j,i}, \quad k,i = 1 \dots n, \quad (2)$$

де k_I – коефіцієнт поглинання у межах I -ої об'ємної газової зони; S_I^{ed} – ефективна довжина шляху променя для I -ої об'ємної зони.

Далі розраховують коефіцієнти радіаційного теплообміну

$$a_{k,i} = \varepsilon_k \cdot \sigma_0 \cdot F_k \cdot (\Psi_{k,i} \cdot \varepsilon_i - \Delta_{k,i}), \quad k,i = 1 \dots n, \quad (3)$$

де σ_0 – постійна Стефана-Больцмана; F_k – уявна поверхня; $\varepsilon_k, \varepsilon_I$ – ступінь чорноти k -ої поверхневої та I -ої об'ємної зони відповідно; $\Delta_{k,i}$ – символ Кронекера ($\Delta_{k,i} = 1$ при $k = i$, $\Delta_{k,i} = 0$ при $k \neq i$).

Записують систему зональних рівнянь для поверхневих та об'ємної зон у вигляді:

$$Q_i = \sum_{k=1}^n a_{k,i} \cdot T_k^4, \quad i = 1 \dots n-1; \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^n a_{k,i} \cdot T_k^4 + g_I \cdot T_k + g_I^0 + Q_I^v = 0, \quad (5)$$

де Q_i – результуючий тепловий потік; $b_{k,i}$ – коефіцієнти радіаційного теплообміну; T_k – зональна температура; g_I – коефіцієнт конвективного теплообміну для об'ємної зони I ; g_I^0 – сума доданків, які не залежать від температури об'ємної зони; Q_I^v – виділення теплоти в об'ємній зоні під час горіння палива.

Розрахунок виділення теплоти Q_I^v , а також коефіцієнтів g_I і g_I^0 для об'ємної зони I -ої підсистеми здійснюють за формулами роботи [7].

За відомих значень температури поверхневих зон та виділення теплоти в об'ємних зонах, вирішуючи зазначену систему рівнянь, за кожним часовим кроком обчислюють результуючі теплові потоки для поверхневих зон і температуру об'ємних зон.

Поверхневі зони є межами, які відділяють об'ємні газові зони від об'ємних зон металу та футерівки печі.

Припущення про постійність величин, що характеризують теплообмін у межах кожної поверхневої зони, дозволяє описати розподіл температури $T(x,y)$ за товщиною шарів об'ємних зон металу та футерівки одномірним диференціальним рівнянням нестационарної теплопровідності

$$c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right], \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k \quad (6)$$

за початкової умови

$$T(y, 0) = T_n(y), \quad (7)$$

а також граничних умов, що дозволяють визначати:

– нагрівання металу та футерівки розділової стінки печі, виконаної з шамотного вогнетриву, як симетричне нагрівання одношарової пластини

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0; \quad (8)$$

– нагрівання поверхні, що граничить з об'ємною газовою зоною

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0,5\delta} = q_I; \quad (9)$$

– нагрівання футерівки підвісного склепіння пічної камери, що виконано з шамотного вогнетриву, на поверхні, яка граничить з навколишнім середовищем, як несиметричне нагрівання одношарової пластини

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_{i.\bar{n}} \cdot (T_{\bar{c}i\bar{a}} - T_{i.\bar{n}}); \quad (10)$$

– нагрівання заслінки, торцевої стіни пічної камери та бічної стіни з боку установки пальників як несиметричне нагрівання двошарової пластини з товщиною теплоізоляційного та вогнетривкого шарів δ_{i3} і $\delta_{\text{вог}}$ відповідно у площині стикування шарів футерівки печі ($y = \delta_{i3}$)

$$\lambda_{\bar{c}} \frac{\partial T_{\bar{c}}}{\partial y} = \lambda_{\bar{a}\bar{a}} \frac{\partial T_{\bar{a}\bar{a}}}{\partial y}, \quad (11)$$

де $T_n(y)$ – початковий розподіл температури за товщиною шару відповідної об'ємної зони металу або футерівки; y, τ – поточні координата на осі, що є перпендикулярною до відповідної поверхневої зони та спрямованою у бік збільшення температури, та час; T, τ, c, λ – температура, тривалість нагрівання; об'ємна питома теплоємність і коефіцієнт теплопровідності матеріалу шару об'ємної зони металу або футерівки; δ – геометрична товщина; q_I – щільність результуючого теплового потоку для відповідної поверхневої зони; $\alpha_{n.c}$ – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні футерівки до навколишнього середовища; $T_{\text{зов}}, T_{n.c}$ – температура зовнішньої поверхні футерівки та навколишнього середовища, відповідно; $T_{i3}, T_{\text{вог}}, \lambda_{i3}, \lambda_{\text{вог}}$ – відповідно температура та коефіцієнти теплопровідності матеріалу теплоізоляційного та вогнетривкого шарів футерівки печі.

Вирішення нелінійної задачі (6)-(11) для об'ємних зон металу та футерівки виконують методом кінцевих різниць з використанням неявної чотирьохточкової різницевої схеми. При розв'язанні розглянутих вище крайових задач на кожному часовому кроці визначають дискретні температурні поля об'ємних зон металу та футерівки, а також температури відповідних до них поверхневих зон.

Розроблену методику використовували під час оцінки якісних характеристик нагрівання заготовок за імпульсною та традиційною схемами опалювання нагрівальної печі по завершенні періоду витримки однакової тривалості. Розрахункові значення температури газу T_g , поверхні T_n та теплового центру металу T_u , у об'ємних зонах печі подано у табл. 1.

Таблиця 1 – Розподіл температури по завершенні періоду витримки у зонах печі за традиційною (I) та імпульсною (II) схемами опалювання*

Параметри	Схема I					Схема II				
	номер об'ємної зони					номер об'ємної зони				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
T_g, K	1425	1503	1456	1428	1420	1393	1480	1460	1442	1435
T_n, K	1418	1436	1428	1420	1410	1419	1435	1435	1430	1425
T_u, K	1408	1430	1422	1414	1404	1410	1429	1431	1424	1420

Примітка: * середні значення за цикл змінювання температури печі

Встановлено, що наявність пульсуючого факела призводить до зменшення нерівномірності розподілу температури газового середовища у зонах печі та збільшення

рівномірності її розподілу на поверхні та у центрі металу, що нагрівають. Застосування імпульсної схеми опалювання підвищує рівень температури в останніх за напрямом руху факела об'ємних газових зонах, тобто сприяє збільшенню теплової місткості металу.

Якісні показники нагрівання металу оцінювали за значенням перепадів температури для поверхні (різниця температури між показами пічного термодатчика та температурою поверхні заготовки ΔT_n за зонами печі) та за перерізом металу ΔT_u , що нагрівають, в об'ємних газових зонах на момент видавання з печі (табл. 2).

Таблиця 2 – Перепади температури на поверхні та у перерізі заготовок за традиційною (I) та імпульсною (II) схемами опалювання

Параметри	Схема I					Схема II				
	номер об'ємної зони					номер об'ємної зони				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
ΔT_n , град.	14,87	3,74	3,55	13,93	21,35	10,62	2,45	2,88	5,22	10,39
ΔT_u , град.	11,32	6,44	5,46	7,51	11,97	8,69	5,45	4,28	6,12	8,04

Одержані результати вказують на поліпшення якості нагрівання металу за імпульсною схемою: різниця температури різних ділянок поверхні металу на момент його видавання із печі не перевищує 11 град, тоді як за традиційною схемою становить 21 град, а величина максимального перепаду температури у перерізі заготовок по завершенні періоду витримки за традиційною та імпульсною схемами складає відповідно 12 і 8 градусів.

Висновки. Розроблено методику розрахунку радіаційного теплообміну в нагрівальних печах камерного типу, що дозволяє визначати розподіл температури на поверхні та у поперечному перерізі заготовок, що нагрівають. Використання цієї методики під час оцінювання ступеню рівномірності нагрівання металу в печах даного типу за традиційною та імпульсною схемами опалювання свідчить про переваги імпульсної схеми опалювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Губинский В.И. Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей / В.И.Губинский // *Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов НМетАУ.* – В 2-х томах. – Днепропетровск: Пороги. – 2005. – Т. 1. – С.149-155.
2. Бухмиров В. В. Упрощенный зональный метод расчета радиационного теплообмена в поглощающей и излучающей среде / В.В.Бухмиров, С.А.Крупенников // *Известия вузов. Черная металлургия.* – 1999. – № 1. – С.68-70.
3. Крупенников С.А. Зональный метод расчета радиационного и сложного теплообмена: основные положения и способы численной реализации / С.А.Крупенников // *Известия Вузов. Черная металлургия.* – 2006. – № 3. – С.59-62.
4. Лисиенко В.Г. Интенсификация теплообмена в пламенных печах [Текст] / В.Г.Лисиенко. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с. – Библиогр.: С.220-222.
5. Арутюнов В. И. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей [Текст] / В.И.Арутюнов, В.В.Бухмиров, С.А.Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с. – Библиогр.: С.238. – ISBN 5-229-00476-2.
6. Лисиенко В.Г. Математическое моделирование теплообмена в печах и агрегатах [Текст] / В.Г.Лисиенко, В.В.Волков, А.Л.Гончаров. – Киев: Наукова думка, 1984. – 230 с. – Библиогр.: С.227-229.
7. Теплотехнические расчеты металлургических печей [Текст]: учеб. пособие / Б.Ф.Зобнин, М.Д.Казяев, Б.И.Китаев и др. ; под ред. А.С.Телегина. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1982. – 358 с. – Библиогр.: С.356-357.

Надійшла до редколегії 20.06.2012.