

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 ТЕПЛОБМІННИКАХ 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:

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

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, °С	$\lambda \cdot 10^2$, 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 урахувати, 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:

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

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

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.