

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКИХ КОНВЕКТИВНИХ КАНАЛІВ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ ЕЛЕКТРОПЕЧЕЙ НА ГАБАРИТИ ПРИЛАДІВ

¹⁾ Інститут відновлюваної енергетики Національної академії наук України, Україна; ²⁾ Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

В статті розглянуто вплив теплових характеристик коротких конвективних каналів теплоакumuлюючих електропечей на габарити приладів. Виконано порівняння тепловіддачі від круглого та прямокутних каналів по відомим теоретичним залежностям за турбулентного руху повітря в каналі та впливу початкової теплової ділянки на теплообмін в ньому.

Постановка проблеми. Нагальною потребою в Україні є застосування таких засобів опалення, які б ефективно використовували вже наявні джерела по виробництву енергії. Таким джерелом для систем опалення є утилізація надлишково виробленої електроенергії за умови її перетворення в теплову. Це не тільки сприяє задоволенню потреб в опаленні, але й підвищує економічність використання електричної енергії.

Одним з засобів, які використовують надлишково вироблену електричну енергію для систем опалення, є теплоакumuлюючі електропечі (ТАЕП), також відомі як теплонакопичувачі [1]. Важливою задачею досягнення ефективної роботи цих приладів є оптимізація розмірів конвективних каналів (далі – канали): а) чим менший об'єм займатимуть в ТАЕП канали, тим компактнішим буде прилад, і відповідно він займатиме менший об'єм в приміщенні та для нього знадобиться менше теплоізоляційних матеріалів та матеріалів зовнішнього покриття, тобто прилад буде як менше коштувати, так і мати меншу вагу; б) характер форми каналу впливає на тепловіддачу від приладу – чим кращою буде тепловіддача, тим меншою буде необхідна площа каналів, а відповідно й менший об'єм, який займатимуть в ТАЕП канали.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дана робота пов'язана з роботою [2], яка була представлена під час конференції¹ в м. Рівному. В [2] розглядався теплообмін в каналах, які вважалися достатньо довгими, аби нехтувати впливом початкової теплової ділянки на теплообмін. Такі канали можна назвати «довгими». В цій роботі розглянуті канали, в яких вплив початкової теплової ділянки на теплообмін є помітним. Такі канали

¹ По результатам доповіді очікується видання статті в науковому збірнику Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне, Україна).

можна назвати «короткими». Обидва терміни – «довгий» та «короткий» – є умовними. Це викликано тим, що існують різні методики визначення впливу початкової теплової ділянки на теплообмін. Для аналізу приймаємо підхід з [3, с. 90], де для діапазону значень чисел Рейнольдса $Re_{dp} = 1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^6$ вплив початкової теплової ділянки враховують при співвідношенні довжини каналу l та його гідравлічного діаметру d : $l/d < 50$.

В даній роботі розглянуто теплообмін в коротких каналах та його відмінність від теплообміну в довгих каналах. Довгі канали є характерним рішенням для центральних ТАЕП, в той час як короткі канали є типовими для місцевих ТАЕП.

Формулювання цілей і завдання статті. Метою даної роботи є визначення впливу на габарити ТАЕП конфігурації їх каналів в залежності від тепловіддачі, яку вони здатні забезпечити.

Для оцінки тепловіддачі від каналів використані ті самі умови та рівняння, що й в [2], за винятком того, що в даній роботі проаналізовані канали є короткими та потребують врахування поправочного коефіцієнту для визначення тепловіддачі від них.

Методика порівняння коротких каналів. Для оцінки тепловіддачі поверхні каналів будуть використані рівняння, представлені в [2] за умови, що параметри повітря в розрахунках прийнято постійними. Режим руху повітря прийнято турбулентним. Співставлення буде враховувати тепловіддачу за тієї чи іншої відносної площі каналу. Канали буде співставлено за умови однакової площі поперечного перерізу та швидкості повітря в них.

Для співставлення каналів використана формула [3, ф. 3.38, с. 89]:

$$\overline{Nu}_{dp} = 0,021 Re_{dp}^{0,80} Pr_p^{0,43} (Pr_p/Pr_c)^{0,25} \varepsilon_l \quad (1)$$

де: $\overline{Nu}_{dp}$ – значення критерію Нуссельта повітря, що проходить через канал; Pr_p – значення коефіцієнту Прандтля повітря в потоці, що проходить через канал; Pr_c – значення коефіцієнту Прандтля повітря на теплообмінній поверхні каналу; Re_{dp} – значення критерію Рейнольдса повітря, що проходить через канал; ε_l – коефіцієнт, що враховує зміну середнього коефіцієнта тепловіддачі по довжині каналу.

Критерій Рейнольдса Re_{dp} в даному випадку визначається як:

$$Re_{dp} = \frac{\omega \cdot d_{екв}}{\nu} \quad (2)$$

де ω – швидкість повітря в каналі, м/с; ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря, м²/с; $d_{екв}$ – еквівалентний діаметр каналу, м:

$$d_{екв} = \frac{4 \cdot F}{U} \quad (3)$$

де F – площа поперечного перерізу, м²; U – повний периметр каналу, м.

Коефіцієнт ε_l визначається в залежності від значень Re_{dp} та співвідношення довжини каналу l та його діаметру d : l/d . Значення коефіцієнту ε_l узяті з [3, табл. 3-1, с. 90]. Коефіцієнт ε_l представлено в діапазоні $l/d = 1 \dots 50$ та $Re_{dp} = 1 \cdot 10^4 \dots 1 \cdot 10^6$.

Оскільки в якості теплоносія застосовується повітря, то використаємо як і в [2] спрощення для формули (1) з врахуванням коефіцієнту ε_l :

$$\overline{Nu}_{dp} = 0,018 Re_{dp}^{0,80} \varepsilon_l \quad (4)$$

Геометричні параметри каналів узяті такими, як і в [2]. Так само з цієї роботи узята теплова характеристика каналів $q^i / q_{кр}$, яка характеризує відношення кількості теплоти, отриманої з заданого типу каналу до кількості теплоти, отриманої з круглого каналу за однакових площ поперечного перерізу, швидкості повітря та параметрів повітря. Значення характеристик представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Геометричні та теплові характеристики каналів [2]

Тип отвору	Розміри каналу, мм	$d_{екв}$, мм	U , мм	Re	$\frac{q^i}{q_{кр}}$	F , мм ²
Круглий	$d^{кр} = 100$	100	314,2	26533	1,00	≈ 7854
Квадратний	$a = 88,6$	88,6	354,4	23514	1,16	
Прям. 1:2	$a = 62,7; b = 125,3$	83,6	376,0	22169	1,24	
Прям. 1:4	$a = 44,3; b = 177,2$	70,9	443,0	18811	1,51	
Прям. 1:6	$a = 36,2; b = 217,1$	62,0	506,6	16457	1,77	
Прям. 1:8	$a = 31,3; b = 250,7$	55,7	564,0	14780	2,02	
Прям. 1:10	$a = 28; b = 280,2$	51,0	616,4	13520	2,25	
Прям. 1:12	$a = 25,6; b = 307$	47,2	665,2	12532	2,46	
Прям. 1:14	$a = 23,7; b = 331,6$	44,2	710,6	11731	2,66	
Прям. 1:16	$a = 22,2; b = 354,5$	41,7	753,4	11066	2,86	
Прям. 1:18	$a = 20,9; b = 376$	39,6	793,8	10501	3,04	

Примітки: $\omega = 4,5$ м/с; характеристики повітря прийняті при 40 °С: $\nu = 16,96 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 0,0276$ Вт/(м · К).

Розглянемо чотири випадки співвідношень:

$$l/d_{екв} = k_p \quad (5)$$

де $k_p = 5, 10, 20$ та 40. Оскільки гідравлічні діаметри у розглянутих каналів є різними, то за характерний канал, з яким будемо порівнювати інші канали, приймаємо круглий канал. Тобто формула (5) за умови, що характерним є круглий канал, приймає вигляд:

$$k_p = l/d^{kp} \quad (6)$$

де d^{kp} – діаметр круглого каналу.

У всіх інших типів каналів гідравлічний діаметр є меншим і тому їх співвідношення l/d за однакової довжини l буде більшим, ніж у круглого каналу.

Визначимо відношення довжини каналу (однакової для всіх каналів) до гідравлічного діаметру каналу $d_{екв}$ за прийнятого значення k_p . Значення довжини каналу l , яке залежить від заданого значення k_p та відомого діаметру круглого каналу d^{kp} , складатиме згідно (6):

$$l = k_p \cdot d^{kp} \quad (7)$$

Для характеристики відношення довжини каналу l до його гідравлічного діаметру $d_{екв}$ використаємо коефіцієнт k' :

$$k' = l/d_{екв} \quad (8)$$

Підставимо рівняння (7) в рівняння (8) та отримаємо:

$$k' = k_p \cdot d^{kp} / d_{екв} \quad (9)$$

Оскільки за характерний діаметр по довжині прийнято діаметр круглого каналу d^{kp} , то й за однакових по діаметру круглих каналів $k' = k_p$.

На основі отриманих значень k' та значення Re з табл. 1 методом лінійної інтерполяції отримаємо значення ε_l з [3, табл. 3-1, с. 90].

Є сенс розглянути зміну тепловіддачі від каналів ТАЕП за умов – коли характерні круглі канали прийнято короткими – по відношенню до тепловіддачі від довгих каналів. Для цього введемо коефіцієнт r^i , який характеризує відношення тепловіддачі i -ого каналу до тепловіддачі в круглому каналі за $l/d^{kp} > 50$ та тих самих характеристик повітря й однакової площі поперечного перерізу:

$$r^i = \varepsilon_l \cdot (q^i / q_{кр}) \quad (10)$$

Оскільки розглянуті в даній роботі круглі канали характеризуються співвідношенням $l/d^{kp} < 50$ і, відповідно, мають $\varepsilon_l > 1$, то й теплообмін від них буде кращим за теплообмін від круглих каналів за $l/d^{kp} > 50$. Для зручності порівняння даних по тепловіддачі приймаємо найменше значення тепловіддачі (в нашому випадку – від круглого каналу) за 100%, а всі інші значення продемонструють зміну тепловіддачі від каналів іншої конфігурації. Для цього введемо характеристику r'^i , яка характеризує відношення r^i i -ого каналу до r^{kp} круглого каналу та оцінює ефективність тепловіддачі заданого каналу у порівнянні з круглим каналом:

$$r'^i = r^i / r^{кр} \cdot 100\% \quad (11)$$

Разом з тим, варто порівняти з якою інтенсивністю зростає у розглянутих «коротких» каналів тепловіддача від i -ого каналу до круглого каналу у порівнянні з «довгими». Цю зміну запишемо як коефіцієнт s_ε , який можна визначити і як відношення r'^i до $q^i / q_{кр}$, і як відношення поправочних коефіцієнтів ε_l , оскільки зміна теплообміну відбувається з урахуванням цих коефіцієнтів:

$$s_\varepsilon = r'^i / (q^i / q_{кр}) \cdot 100\% = \varepsilon_l^i / \varepsilon_l^{кр} \cdot 100\% \quad (12)$$

де ε_l^i – коефіцієнт, що враховує зміну середнього коефіцієнта тепловіддачі по довжині труби для i -ого каналу за заданого значення k_p ; $\varepsilon_l^{кр}$ – коефіцієнт, що враховує зміну середнього коефіцієнта тепловіддачі по довжині труби для круглого каналу за заданого значення k_p .

Отримані дані наведені в табл. 2.

Згідно даних в табл. 2 найменше співвідношення тепловіддачі прямокутних каналів до круглих спостерігається за $l/d^{кр} = 10$. Це пов'язано з тим, що за прийнятих умов зі зростанням співвідношення сторін прямокутного каналу відбувається стрімке наближення коефіцієнту ε_l до 1, в той час як для круглого каналу цей коефіцієнт є порівняно великим. Водночас, коротші прямокутні канали (для випадку $l/d^{кр} = 5$) демонструють кращі характеристики теплообміну внаслідок меншого співвідношення $l/d_{екв}$. З наближенням значення $l/d^{кр}$ до граничного значення 50 вплив початкової ділянки стає меншим.

Таблиця 2

Співставлення теплової ефективності круглого та прямокутних каналів однакової довжини

Тип отвору	$l/d^{кр} = 5$					$l/d^{кр} = 10$				
	k'	ε_l	r^i	r'^i , %	s_ε , %	k'	ε_l	r^i	r'^i , %	s_ε , %
Круглий	5,00	1,25	1,25	100	100,0	10,00	1,17	1,17	100	100,0
Квадр.	5,64	1,25	1,44	115	99,8	11,28	1,16	1,34	115	99,4
Прям. 1:2	7,98	1,21	1,50	120	96,9	15,96	1,12	1,39	119	96,0
Прям. 1:4	11,28	1,17	1,77	142	93,8	22,57	1,09	1,65	141	93,3
Прям. 1:6	13,82	1,16	2,05	164	92,5	27,64	1,07	1,90	162	91,5
Прям. 1:8	15,96	1,14	2,31	185	91,5	31,92	1,05	2,13	182	90,1
Прям. 1:10	17,84	1,14	2,55	204	90,8	35,68	1,04	2,34	200	89,1
Прям. 1:12	19,54	1,13	2,77	221	90,0	39,09	1,03	2,54	217	88,2
Прям. 1:14	21,11	1,12	2,98	238	89,4	42,22	1,02	2,72	233	87,4
Прям. 1:16	22,57	1,11	3,18	254	88,9	45,14	1,01	2,90	248	86,7
Прям. 1:18	23,94	1,11	3,36	269	88,4	47,87	1,01	3,06	262	86,1

Продовження таблиці 2

Тип отвору	$l/d^{кр} = 20$					$l/d^{кр} = 40$				
	k'	ε_l	r^i	r'^i , %	s_ε , %	k'	ε_l	r^i	r'^i , %	s_ε , %
Круглий	20,00	1,10	1,10	100	100,0	40,00	1,02	1,02	100	100,0
Квадр.	22,57	1,09	1,25	114	99,0	45,14	1,01	1,17	114	99,0
Прям. 1:2	31,92	1,04	1,29	118	95,3	63,83	1,00	1,24	122	98,0
Прям. 1:4	45,14	1,01	1,53	139	92,2	90,27	1,00	1,51	148	98,0
Прям. 1:6	55,28	1,00	1,77	162	91,3	110,56	1,00	1,77	174	98,0
Прям. 1:8	63,83	1,00	2,02	184	91,3	127,66	1,00	2,02	198	98,0
Прям. 1:10	71,36	1,00	2,25	205	91,3	142,73	1,00	2,25	220	98,0
Прям. 1:12	78,18	1,00	2,46	225	91,3	156,35	1,00	2,46	241	98,0
Прям. 1:14	84,44	1,00	2,66	243	91,3	168,88	1,00	2,66	261	98,0
Прям. 1:16	90,27	1,00	2,86	261	91,3	180,54	1,00	2,86	280	98,0
Прям. 1:18	95,75	1,00	3,04	278	91,3	191,49	1,00	3,04	298	98,0

При порівнянні значень $q^i/q_{кр}$ (табл. 1) та r^i (табл. 2), або по значенню s_ε , спостерігається, що тепловіддача в коротких каналах прямокутної форми у порівнянні з круглою менша, ніж в довгих каналах. Співвідношення тепловіддачі прямокутних каналів з великим співвідношенням сторін до тепловіддачі коротких круглих каналів приблизно на 10% менше, ніж аналогічне співвідношення тепловіддачі довгих прямокутних каналів до тепловіддачі довгих круглих каналів. Тому довжина каналу при розрахунку теплообміну в місцевих ТАЕП є суттєвим фактором, яким не варто нехтувати.

Висновок. З огляду на результати розрахунків теплових характеристик коротких каналів прямокутна форма має більшу тепловіддачу, ніж кругла, і тому є більш доцільною для практичного використання при конструюванні ТАЕП. Хоча ці переваги не такі суттєві як у представленому в [2] випадку з довгими каналами, застосування коротких прямокутних каналів дозволяє заощадити на об'ємі, який в теплоакумуючому приладі займатимуть канали, а відповідно ефективно зменшити габарити приладів.

Література

1. Малкін Е. С. Теплоакумуючі електропечі. Термінологія і класифікація / Е. С. Малкін, О. В. Лисак // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2014. – № 3. – С. 69–74.
2. Лисак О. В. Аналіз впливу конфігурації конвективних каналів місцевих теплоакумуючих електропечей на характер тепловіддачі від

приладів / О. В. Лисак, Е. С. Малкін // Актуальні проблеми систем теплогазопостачання і вентиляції, водопостачання і водовідведення : зб. наук. праць / Уклад. : М. Д. Кізеєв, О. С. Новицька. – Рівне : НУВГП, 2015. – С. 170–172

3. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд., стер. – Москва : Энергия, 1977. – 343 с.

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОРОТКИХ КОНВЕКТИВНЫХ КАНАЛОВ
ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ ЭЛЕКТРОПЕЧЕЙ
НА ГАБАРИТЫ ПРИБОРОВ**
О. В. Лысак, Э. С. Малкин

В статье рассмотрено влияние тепловых характеристик коротких конвективных каналов теплоаккумулирующих электропечей на габариты приборов. Выполнено сравнение теплоотдачи от круглого и прямоугольных каналов по известным теоретическим зависимостям при турбулентном режиме движения воздуха в канале и влиянии начального теплового участка на теплообмен в нём.

**THE ANALYSIS OF THE IMPACT OF THERMAL
CHARACTERISTICS OF AIRWAYS IN STORAGE HEATERS
ON THE SIZE OF THE DEVICES**
O. Lysak, E. Malkin

The analysis of the impact of thermal characteristics of airways in storage heaters on the size of the devices is shown. The comparison of heat transfer in round and rectangular airways is made on the basis of known theoretical dependencies used for turbulent channel flow and the impact of thermal entry lengths on heat transfer in them.