

УДК 697.278

ЛИСАК О.В.

Інститут відновлюваної енергетики НАН України

## АНАЛІЗ КОНВЕКТИВНОЇ ТЕПЛОВІДДАЧІ ВІД ФРОНТАЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧОЇ ЕЛЕКТРОПЕЧІ

**Мета.** Стаття уточнює параметри конвективного теплообміну між фронтальною поверхнею теплоакumuлюючої електропечі (ТАЕП) та оточуючим повітрям.

**Методика.** В цій статті розглядається тільки вільна конвективна тепловіддача від фронтальної поверхні ТАЕП. За такої умови для обчислення значень коефіцієнту тепловіддачі прийнято два підходи: (1) М.О.Міхеєва та (2) S.W.Churchill and H.H.S.Chu. За допомогою цих підходів визначено коефіцієнти конвективної тепловіддачі від фронтальної поверхні ТАЕП в залежності від висоти поверхні і температури поверхні та оточуючого повітря.

**Результати.** Було вивчено характер вільної конвективної тепловіддачі від фронтальної поверхні ТАЕП за температури поверхні 60 °С та температури оточуючого повітря 20 °С. Теоретично визначено, яку частку від загальної тепловіддачі приладу може скласти тепловіддача від фронтальної поверхні.

**Наукова новизна.** Проаналізовано характер конвективної тепловіддачі від фронтальної поверхні ТАЕП для визначення її впливу на загальну тепловіддачу від приладу.

**Практична значимість.** Продемонстровано характер конвективної тепловіддачі від фронтальної поверхні ТАЕП.

**Ключові слова:** акумуляційні системи опалення, теплоакumuлюючі електропечі, теплонакопичувач, теплообмін.

**Вступ.** Актуальною задачею в Україні є створення енергоощадних та економічно ефективних систем опалення. Такими системами можуть бути електричні акумуляційні системи опалення. Їхня перевага полягає у використанні та акумулюванні наявних надлишків виробленої електричної енергії – що дозволяє зменшити витрати на систему опалення внаслідок меншої вартості електричної енергії в години надлишкового її виробництва.

До електричних акумуляційних систем опалення відносяться теплоакumuлюючі електропечі (ТАЕП). Ці прилади нагрівають твердий матеріал (наприклад, феоліт чи магнезит) за допомогою електричних нагрівачів в часи дії дешевого тарифу на електроенергію [1, с. 69]. Нагрітий матеріал віддає теплоту на протязі всієї доби.

**Мета.** В літературі, як правило, наводять переважно узагальнені дані по тепловіддачі від ТАЕП [1, с. 72]. Оскільки дані прилади є досить перспективними, має сенс розглянути характер їх тепловіддачі більш детально. Метою цієї роботи є визначення характеру конвективної тепловіддачі від фронтальної поверхні ТАЕП.

**Постановка задачі.** Для вивчення конвективної тепловіддачі від фронтальної поверхні ТАЕП необхідно вибрати та проаналізувати відповідну математичну модель цього процесу. В цій роботі моделювання ведеться відповідно до методик М.О.Міхеєва та Churchill and Chu, які часто використовують в технічній літературі з теплообміну.

**1. Створення спрощеної фізико-математичної моделі теплообміну на фронтальній поверхні ТАЕП.** Оскільки це перша стаття на дану тематику, використаємо спрощений підхід до аналізу теплообміну від фронтальної поверхні ТАЕП. В подальших роботах дана модель буде враховувати більше чинників. В цій роботі вважається, що від фронтальної поверхні ТАЕП теплообмін відбувається за умови вільної природної конвекції, а температура поверхні є однаковою по всій площині.

На рис. 1. показана «фронтальна поверхня ТАЕП» на прикладі статичного ТАЕП. Аналогічний теплообмін має місце у випадку динамічних ТАЕП в моменти простою, коли ці прилади виділяють теплоту через фронтальну поверхню аналогічно статичним ТАЕП. Класифікація ТАЕП наведена в [1].

Аналіз будемо проводити за температури фронтальної поверхні  $t_0 = 60\text{ }^\circ\text{C}$ , яка є допустимою температурою поверхні ТАЕП в момент закінчення акумулювання теплової енергії, та за температури повітря в приміщенні  $t_\infty = 20\text{ }^\circ\text{C}$ , що відповідає осередненому значенні температури в приміщенні, в якому знаходяться люди.

Для розрахунків значення температури необхідно перевести з градусів Цельсія в Кельвіни<sup>1</sup>:

$$T_0 = t_0 + 273 \quad (1)$$

$$T_\infty = t_\infty + 273 \quad (2)$$

Висоту приладу  $h$  будемо визначати в діапазоні 0,3...1,1 м, який відповідає стандартним висотам сучасних ТАЕП.

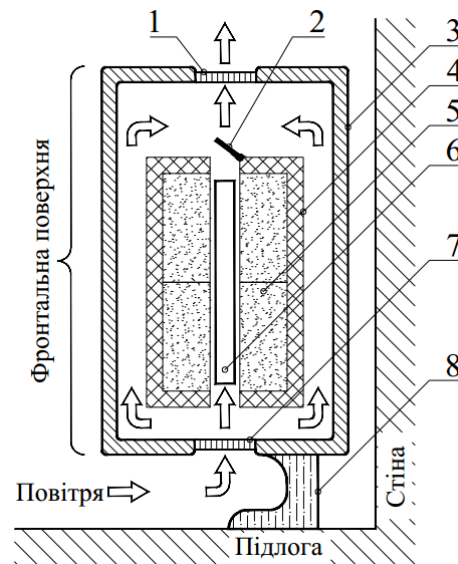


Рис. 1 Фронтальна поверхня ТАЕП на прикладі статичного ТАЕП:

1 – решітка для виходу повітря; 2 – регулюючий клапан; 3 – зовнішня оболонка (кожух); 4 – теплоізоляційний прошарок; 5 – теплоакумулюючий матеріал; 6 – електричний нагрівач; 7 – решітка для входу повітря; 8 – підставка.

*Примітка:* дана схема є принциповою.

<sup>1</sup> В інженерних розрахунках часто нехтують часткою 0,15 в 273,15.

**2. Визначення коефіцієнту конвективної тепловіддачі від вертикальної поверхні.** Середній<sup>2</sup> коефіцієнт конвективної тепловіддачі  $\bar{\alpha}$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К), від вертикальної поверхні визначимо по формулі:

$$\bar{\alpha} = \frac{\overline{Nu} \cdot \lambda}{h}, \quad (3)$$

де  $\overline{Nu}$  – число Нуссельта;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності повітря, його значення обирається в залежності від розрахункової температури повітря, яка в свою чергу залежить від обраної методики розрахунку, Вт/(м·К);

$h$  – характерний геометричний розмір, в даному випадку – висота фронтальної поверхні ТАЕП, м.

У формулі (1) вже є раніше прийняті для розрахунку значення  $h$  та два параметри, які потрібно обрати:  $Nu$  та  $\lambda$ . Оскільки обидва вони залежать від параметрів повітря, то необхідно визначитись з джерелом даних по властивостях повітря в залежності від температури. В цій роботі таким джерелом було обрано [2, табл. П-3]. Дана таблиця використовувалась для практичних розрахунків в першому з обраних методів.

Пошук значень  $Nu$  та  $\lambda$  буде виконано по двох методиках. Перша методика узятя з [2, с. 94-96] – по даних М.О.Міхєєва, інша методика була представлена в [3] – по даних Churchill and Chu.

Різниця між цими методиками полягає в тому, що параметри  $Nu$  та  $\lambda$  визначаються за різних характерних температур та з застосуванням різних емпіричних формул для визначення  $Nu$ .

Дані методики також неодноразово модернізувались – наприклад, змінювались підходи по визначенню розрахункової температури [4, с. 217].

Однакові символи фізичних величин за відмінних їх значень в обох методиках будуть позначатись різними індексами: в методиці М.О.Міхєєва – індексом « $\infty$ », в методиці Churchill and Chu – « $m$ ». Ці індекси були обрані на основі рекомендацій в [4, с. 218]: « $\infty$ » – індекс для температури оточуючого повітря, а « $m$ » – індекс для середнього значення температур оточуючого повітря та вертикальної поверхні.

**2.1. Визначення коефіцієнту конвективної тепловіддачі по даних М.О.Міхєєва згідно [2].** М.О.Міхєєв пропонував визначати тепловіддачу за вільної конвекції, використовуючи в якості визначальної температури температуру оточуючого середовища  $t_{\infty}$ .  $\overline{Nu}_{h,\infty}$  визначається в залежності від значень числа Грасгофа  $Gr_{h,\infty}$ , чисел Прандтля для повітря за температури оточуючого середовища  $Pr_{\infty}$  та чисел Прандтля для повітря за температури рівної температури стінки  $Pr_0$ .

Числа Прандтля  $Pr_{\infty}$  та  $Pr_0$  приймаються згідно довідкових даних по властивостях температури повітря.

<sup>2</sup> В цій роботі визначається лише значення «середнього коефіцієнту тепловіддачі», назву якого в тексті скорочують до «коефіцієнту тепловіддачі».

Число Грасгофа визначається у варіанті методики по даних Міхєєва  $Gr_{h,\infty}$  по значенням за  $T_\infty$  формулі:

$$Gr_{h,\infty} = \frac{\beta \cdot h^3 \cdot g \cdot (T_0 - T_\infty)}{\nu_\infty^2} \quad (4)$$

де  $\beta$  – температурний коефіцієнт об’ємного розширення [2, с. 38], 1/К:

$$\beta = \frac{1}{T_\infty} \quad (5)$$

$g$  – прискорення вільного падіння,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>;

$\nu_\infty$  – коефіцієнт кінематичної в’язкості повітря за температури  $T_\infty$ , м<sup>2</sup>/с;

Формула для визначення числа Нуссельта залежить від добутку  $Gr_{h,\infty} \cdot Pr_\infty$  наступним чином:

$$\overline{Nu}_{h,\infty} = 0,76 (Gr_h \cdot Pr_\infty)^{0,25} (Pr_\infty / Pr_0)^{0,25} \quad \text{при } 10^3 < Gr_{h,\infty} \cdot Pr_\infty < 10^9: \quad (6)$$

$$\overline{Nu}_{h,\infty} = 0,15 (Gr_L \cdot Pr_\infty)^{0,33} (Pr_\infty / Pr_0)^{0,25} \quad \text{при } Gr_{h,\infty} \cdot Pr_\infty > 10^9 \quad (7)$$

Отримані значення  $\overline{Nu}_{h,\infty}$  використовуємо для обчислення значення середнього коефіцієнту конвективної тепловіддачі  $\overline{\alpha}_\infty$  як у формулі (3):

$$\overline{\alpha}_\infty = \frac{\overline{Nu}_{h,\infty} \cdot \lambda_\infty}{h}, \quad (8)$$

де  $\lambda_\infty$  – коефіцієнт теплопровідності повітря за температури  $T_\infty$ , Вт/(м·К);

**2.2. Визначення коефіцієнту конвективної тепловіддачі згідно Churchill and Chu.** Churchill and Chu [3] пропонували визначати тепловіддачу за вільної конвекції, використовуючи в якості визначальної температури  $T_m$  :

$$T_m = \frac{T_0 + T_\infty}{2} \quad (9)$$

для всіх параметрів за винятком  $\beta$ , який визначається за температури  $T_\infty$  - тобто аналогічно формулі (5).

Необхідно визначити значення числа Релея  $Ra_{h,m}$  :

$$Ra_{h,m} = \frac{\beta \cdot h^3 \cdot g \cdot (T_0 - T_\infty)}{\nu_m \cdot \alpha_m} \quad (10)$$

де  $\nu_m$  – коефіцієнт кінематичної в’язкості повітря за температури  $T_m$ , м<sup>2</sup>/с;

$\alpha_m$  – коефіцієнт температуропровідності повітря за температури  $T_m$ , м<sup>2</sup>/с;

Визначимо коефіцієнт Нуссельта за даного випадку:

$$\overline{Nu}_{h,m} = \left( 0,825 + \frac{0,387 Ra_{h,m}^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr_m} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2 \quad \text{при } 10^{-1} \leq Ra_{h,m} \leq 10^{12} \quad (11)$$

де  $Pr_m$  – число Прандтля за температури  $T_m$ .

Значення коефіцієнту тепловіддачі за даної методики визначається як:

$$\bar{\alpha}_m = \frac{\overline{Nu}_{h,m} \cdot \lambda_m}{h}, \quad (12)$$

$$\bar{\alpha}_m = \frac{\overline{Nu}_{h,m} \cdot \lambda_m}{h}, \quad (13)$$

де  $\lambda_m$  – коефіцієнт теплопровідності повітря за температури  $T_m$ , Вт/(м·К);

**2.3. Розрахунок та зведення даних по обох методиках.** Розрахунки по методиках, представленим в розділах 2.1. (по даних М.О.Міхєєва) та 2.2. (по даних Churchill and Chu) зведені в табл. 1–3.

В табл. 1 приведені значення температури, за яких надалі будуть обчислюватись параметри повітря показані в табл. 2. В табл. 3 показано розрахунок значення коефіцієнтів конвективної тепловіддачі та інших параметрів для їх визначення в залежності від висоти фронтальної поверхні ТАЕП. Зміна значення коефіцієнту тепловіддачі в залежності від висоти фронтальної поверхні наведена на рис. 2.

**3. Аналіз отриманих даних.** Спочатку проаналізуємо, як зі зміною відносної висоти (співвідношення заданої в розрахунках висоти  $h_i$  до максимальної можливої в даних розрахунках висоти  $h_{\max}$ ) змінюється співвідношення тепловіддачі на одиницю висоти,  $\bar{\alpha}_i \cdot h_i$ , за даної висота до максимально можливої  $\bar{\alpha}_{\max} \cdot h_{\max}$  за даних розрахунків. Отримані дані занесемо в табл. 4.

Таблиця 1

**Розрахункові температури**

Температура	Значення, °С	Значення, К
Температура фронтальної стінки $t_0, T_0$	60	333
Температура оточуючого повітря $t_\infty, T_\infty$	20	293
Середня температура повітря $t_\infty, T_\infty$	40	313

Таблиця 2

**Розрахункові параметри повітря**

Дані узяті по методиці згідно	Числа Прандтля			$\nu \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$a \cdot 10^{-6}$ , м <sup>2</sup> /с	$\beta$ , 1/К
	$Pr_0$	$Pr_\infty$	$Pr_m$				
М.О.Міхєєва	0,696	0,703	-	15,06	0,0259	-	0,00341
Churchill and Chu	-	-	0,699	16,96	0,0276	24,3	0,00341

Таблиця 3

Розрахунок значень коефіцієнта конвективної тепловіддачі

h, м	Згідно методики:					
	М.О.Міхеєва			Churchill and Chu		
	$Gr_h \cdot Pr_\infty \cdot 10^6$	$\overline{Nu}_{h,\infty}$	$\overline{\alpha}_\infty,$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$Ra \cdot 10^6$	$\overline{Nu}_{h,m}$	$\overline{\alpha}_m,$ Вт/(м <sup>2</sup> ·К)
0,3	112,08	78,39	6,77	87,74	58,61	5,39
0,4	265,67	97,27	6,30	207,97	75,91	5,24
0,5	518,89	114,99	5,96	406,20	93,00	5,13
0,6	896,64	131,84	5,69	701,91	109,94	5,06
0,7	1423,84	157,70	5,83	1114,61	126,77	5,00
0,8	2125,38	179,98	5,83	1663,79	143,51	4,95
0,9	3026,18	202,24	5,82	2368,95	160,18	4,91
1	4151,13	224,48	5,81	3249,60	176,79	4,88
1,1	5525,16	246,69	5,81	4325,21	193,34	4,85

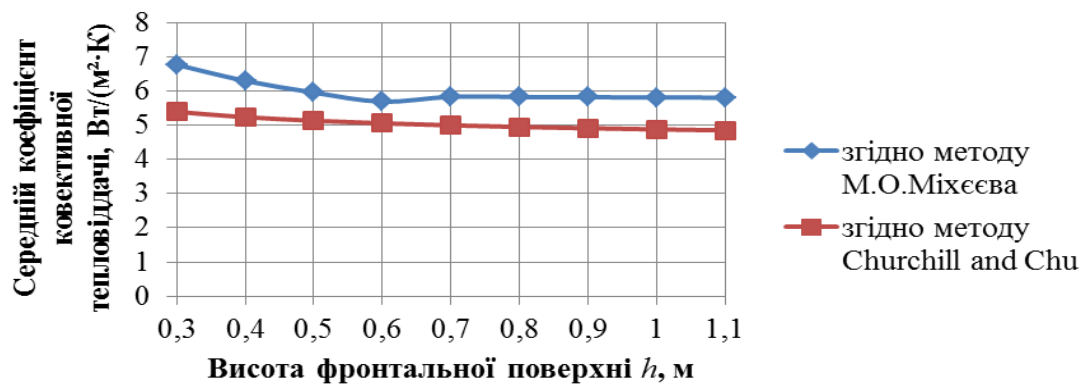


Рис. 2 Зміна середнього коефіцієнту конвективної тепловіддачі в залежності від висоти фронтальної поверхні ТАЕП

Таблиця 4

Розрахунок значень коефіцієнта конвективної тепловіддачі

h, м	$\frac{h_i}{h_{\max}} \cdot 100, \%$	$\frac{\overline{\alpha}_{\infty,i} \cdot h_i}{\overline{\alpha}_{\infty,\max} \cdot h_{\max}} \cdot 100, \%$	$\frac{\overline{\alpha}_{m,i} \cdot h_i}{\overline{\alpha}_{m,\max} \cdot h_{\max}} \cdot 100, \%$
0,3	27,27	31,78	30,31
0,4	36,36	39,43	39,26
0,5	45,45	46,61	48,10
0,6	54,55	53,44	56,86
0,7	63,64	63,92	65,57
0,8	72,73	72,96	74,22
0,9	81,82	81,98	82,85
1	90,91	91,00	91,44
1,1	100,00	100,00	100,00

Як випливає з табл. 4, зі збільшенням висоти фронтальної поверхні ТАЕП інтенсивність тепловіддачі зменшується. Оскільки тепловіддача від фронтальної поверхні ТАЕП є нерегульованою, то з позицій якості регулювання приладу бажано виконувати його якомога вищим: за незмінної площі фронтальної поверхні тепловіддача від фронтальної поверхні вищих ТАЕП буде меншою. Разом з тим, високий прилад незручно встановлювати в приміщенні. Проте при досягненні стандартної висоти в межах 0,5...0,7 м коефіцієнт тепловіддачі від фронтальної поверхні за більшої висоти спадає не так швидко – і вигащ з точки зору регулювання від висоти приладу не буде таким вже й значим. Проаналізуємо також, яку частку від загальної тепловіддачі приладу може складати конвективна тепловіддача від його поверхні за визначених умов. Визначимо тепловіддачу  $Q$  по формулі:

$$Q = b \cdot h \cdot \bar{\alpha} \cdot (T_0 - T_\infty). \quad (14)$$

де  $b$  - ширина фронтальної поверхні, м.

По цих даних визначимо співвідношення  $Q$  до максимальної тепловіддачі  $Q_{\max}$  від приладу.

Розрахунки виконаємо для умовної моделі з параметрами  $h = 0,7$  м,  $b = 0,8$  м та тепловіддачі  $Q_{\max} = 1000$  Вт, що відповідає осередній моделі динамічних та статичних ТАЕП за даних геометричних параметрів. Дані по розрахунках представлені в табл. 5.

Таблиця 5

**Розрахунок значень коефіцієнта конвективної тепловіддачі**

Методика	$h$ , м	$b$ , м	$Q$ , Вт	$Q/Q_{\max} \cdot 100$ , %
Згідно методики М.О.Міхеєва	0,7	0,8	130,70	13,07
Згідно методики Churchill and Chu	0,7	0,8	111,96	11,20

### Висновки:

1. Виконані розрахунки виявили, що конвективна тепловіддача від фронтальної поверхні ТАЕП становить за наведених умов та в залежності від обраного методу близько 12% (з певними відхиленнями від цього значення в залежності від методу розрахунку) в загальній частці тепловіддачі. Дана частка тепловіддачі не піддається регулюванню і тому її значення потрібно зменшувати, щоб підвищити якість роботи приладу та уникнути перегріву приміщення за відсутності потреби в теплоті.

2. При аналізі були використані два методи для розрахунку конвективної тепловіддачі від вертикальної поверхні. Результати розрахунку по цих методах в розглянутому діапазоні відрізняються: дані, отримані по методу М.О.Міхеєва, відрізняються від даних, отриманих по методу Churchill and Chu, на 20...25%. На даному етапі не йде мова про використання цих формул для інженерного розрахунку ТАЕП, але надалі має сенс визначити, яка з цих методик буде кращою для практичних розрахунків ТАЕП.

3. Потрібне подальше вивчення та уточнення моделі тепловіддачі від ТАЕП, зокрема вивчення зміни тепловіддачі в залежності від розподілу температури на поверхні ТАЕП та виявлення зв'язків між цим розподілом та розігрівом матеріалу всередині ТАЕП і властивостями теплоізоляції.

### Список використаних джерел

1. Малкін Е. С. Теплоакмулюючі електропечі. Термінологія і класифікація / Е. С. Малкін, О. В. Лисак // Промислова електроенергетика та електротехніка (Промелектро). – 2014. – № 3. – С. 69–74.
2. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд., стер. – Москва : Энергия, 1977. – 343 с.
3. S. W. Churchill S. W. and H. H. S. Chu. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1975. – Vol. 18. – P. 1323-1329.
4. Хрусталеv Б. М., Несенчук А. П., Тимошпольский В. И., Акельев В. Д., Седнин В. А., Копко В. М., Нерезько А. В. Тепло- и массообмен : учебное пособие / Под ред. Несенчук А. П. — Минск : БНТУ, 2007. — Т. 1 : 2 : 606 с. — ISBN 978-985-479-645-1.

### References

1. Malkin, E. S. and Lysak, O. V. Storage heaters. The terminology and the classification. (Теплоакмулюючі електропечі. Термінологія і класифікація) / Е. С. Малкін, О. В. Лисак // Industrial power and electrical engineering [Promyslova elektroenerhetyka ta elektrotekhnika] (Promelectro). – 2014. – № 3. – P. 69–74. [in Ukrainian]
2. Mikheev, M.A. and Mikheeva, I.M.. Fundamentals of Heat Transfer. (Osnovy teploperedachi). Energia, Moscow, 2nd edition, 1977. [in Russian]
3. S. W. Churchill S. W. and H. H. S. Chu. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1975. – Vol. 18. – P. 1323-1329.
4. Khrustalev, B. M.; Nesenчук A. P.; Timoshpol'skiy V. I.; Akel'ev V. D.; Sednin V. A.; Kopko V. M., Nerez'ko A. V. Heat and mass transfer : textbook (Тепло- i massoobmen : учебное пособие) / Ed. by Nesenчук, A. P.. – Minsk : BNTU, 2007. — V. 1 of 2 : 606 p. — ISBN 978-985-479-645-1. [in Russian]

## АНАЛИЗ КОНВЕКТИВНОЙ ТЕПЛООТДАЧИ ОТ ФРОНТАЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩЕЙ ЭЛЕКТРОПЕЧИ

ЛЫСАК О.В.

*Институт возобновляемой энергетики НАН Украины*

**Цель.** Статья уточняет параметры конвективного теплообмена между фронтальной поверхностью теплоаккумулирующей электропечи (ТАЭП) и окружающим воздухом.

**Методика.** В этой статье рассматривается только свободная конвективная теплоотдача от фронтальной поверхности ТАЭП. При таком условии для вычисления значений коэффициента теплоотдачи принято два подхода: (1) М.А.Михеева и (2) S.W.Churchill and H.H.S.Chu. С помощью этих подходов определены коэффициенты конвективной теплоотдачи от фронтальной поверхности ТАЭП в зависимости от высоты поверхности и температур поверхности и окружающего воздуха.



**Результаты.** Был изучен характер свободной конвективной теплоотдачи от фронтальной поверхности ТАЭП при температуре поверхности 60 °С и температуре окружающего воздуха 20 °С. Теоретически определено, какую долю от общей теплоотдачи прибора может составлять теплоотдача от фронтальной поверхности.

**Научная новизна.** Проанализирован характер конвективной теплоотдачи от фронтальной поверхности ТАЭП для определения её влияния на общую теплоотдачу от прибора.

**Практическая значимость.** Результаты этой работы демонстрируют характер конвективной теплоотдачи от фронтальной поверхности ТАЭП.

**Ключевые слова:** *аккумуляционные системы отопления, теплоаккумулирующие электропечи, теплонакопители, теплообмен.*

## ANALYSIS OF CONVECTIVE HEAT TRANSFER FROM STORAGE HEATER FRONT PANELS

LYSAK O.

*Institute of Renewable Energy at National Academy of Sciences of Ukraine*

**Purpose.** The article specifies the convective heat transfer between the storage heater front panels and the ambient air.

**Methodology.** This article reviews only the natural convection from storage heater front panels. For calculations two approaches were used. The first approach is based on the methodology proposed by M.A.Mikheev. The second approach is based on the methodology proposed by S.W.Churchill and H.H.S.Chu. Using these approaches the convective heat transfer coefficients are calculated based on the panel heights, the panel temperature and the ambient air temperature.

**Findings.** The natural convection from the storage heater front panels were studied when the front panel temperature is 60 °С and the ambient air temperature is 20 °С. The portion of the convective heat output of the storage heater front panels from the total heat output is theoretically evaluated.

**Originality.** The nature of the convective heat transfer from the front panels is analyzed to determine its impact on the overall heat output from the device.

**Practical value.** The nature of the convective heat transfer from the storage heater front panels is shown.

**Keywords:** *storage heating, electric storage heating, storage heaters, heat transfer.*