

УДК 697.92

В.Г. Рижков <sup>(1)</sup>, доцент, канд. техн. наук  
 Ю.В. Куріс <sup>(1)</sup>, професор, доктор техн. наук  
 Є.А. Манідіна <sup>(1)</sup>, асистент  
 Н.В. Беренда <sup>(1)</sup>, доцент, канд. техн. наук  
 В.С. Манідін <sup>(2)</sup>, провідний інженер

## ДО РОЗРАХУНКІВ ВЕНТИЛЯЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ МЕТАЛУРГІЙНИХ ЦЕХІВ З УРАХУВАННЯМ ВТРАТ ТЕПЛОТИ

<sup>(1)</sup> Запорізька державна інженерна академія

<sup>(2)</sup> ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь», м. Запоріжжя

Предложены уравнения, описывающие при работе общей вентиляции изменение температуры воздуха рабочей зоны производственных помещений металлургических цехов с источниками выделения теплоты и учете ее потерь через ограждающие поверхности.

Ключевые слова: выделение теплоты, вентиляция, ограждения, уравнение, экспонента, степенной ряд

Запропоновано рівняння, що описують під час роботи загальної вентиляції змінювання температури повітря робочої зони виробничих приміщень металургійних цехів з джерелами видалення теплоти та урахуванням її втрат через огорожуючі поверхні.

Ключові слова: виділення теплоти, вентиляція, огороження, рівняння, експонента, ступеневий ряд

The equations describing at work of the overall ventilation the change of air temperature in the working area in industrial placings for metallurgical workshops with sources of expulsion heat taking into account its loss through the building envelope's surfaces.

Keywords: expulsion of теплоти, ventilation, envelope, equation, exponent, power (-law) series

**Вступ** Одним з головних шкідливих чинників у робочих зонах виробничих приміщень, особливо в головних цехах металургійних підприємств, є наявність надлишків теплоти. Виділення теплоти до повітря робочої зони погіршують умови праці виробничого персоналу, призводять до неприпустимих значень температури повітря та інтенсивності теплового випромінювання, що негативно впливає на здоров'я робітників.

Найбільш ефективним засобом боротьби з підвищеною температурою повітря робочої зони виробничих приміщень металургійних цехів є загальна (загально обмінна) вентиляція. Вимоги до систем загально обмінної вентиляції встановлюють ДБН «Опалення, вентиляція та кондиціювання» [1] з метою забезпечення нормативних санітарно-епідеміологічних параметрів мікроклімату робочих зон виробничих приміщень, що, в свою чергу, регламентуються ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [2].

**Аналіз досягнень.** Методи розрахунків витрат вентиляційного повітря для підтримки заданої температури робочої зони виробничих приміщень добре розроблені та широко відомі [3-6]. Складнощі виникають під час аналізу ро-

боти вентиляційної системи в умовах змінювання температури повітря, тобто за нестационарних умов виділення теплоти.

Для описування процесу повітрообміну під час видалення надлишків теплоти з приміщення можна використовувати видозмінене головне диференціальне рівняння вентиляції [5]:

$$N d\tau + Q \cdot i_{n,c} d\tau - Q \cdot i d\tau = V di, \quad (1)$$

де  $N$  – потужність теплових виділень, кВт;  $Q$  – витрати вентиляційного повітря (продуктивність вентиляційної установки), м<sup>3</sup>/с;  $V$  – внутрішній обсяг приміщення, м<sup>3</sup>;  $i_{n,c}$ ,  $i$  – ентальпія повітря навколишнього середовища та повітря у приміщенні (середня за його обсягом), кДж/м<sup>3</sup>, відповідно;  $\tau$  – час процесу, с.

Прийнявши теплоємність повітря за постійну величину, що припустимо у діапазоні вентиляційних температур, можна записати

$$N \cdot c^{-1} d\tau + Q \cdot t_{n,c} d\tau - Q \cdot t d\tau = V d\tau, \quad (2)$$

де  $c$  – теплоємність повітря, кДж/(м<sup>3</sup> °С);  $t_{n,c}$ ,  $t$  – температура повітря навколишнього середовища та температура всередині приміщення (середня за його обсягом), °С, відповідно.

Рівняння (2) можна привести до вигляду

$$\frac{dT}{d\tau} + \frac{Q \cdot T}{V} = \frac{N + Q \cdot c \cdot T_{n,c}}{V \cdot c}. \quad (3)$$

У роботі [6] запропоновано загальне вирішення рівняння (3), що описує змінювання температури в приміщенні металургійного цеху за роботи загальнообмінної вентиляції:

$$t = \exp\left(-\int \frac{Q}{V} d\tau\right) \cdot \left[\int \left(\frac{N}{c \cdot V} + \frac{Q \cdot t_{n.c}}{V}\right) \cdot \exp\left(\int \frac{Q}{V} d\tau\right) d\tau + K\right], \quad (4)$$

де  $K$  – постійна інтегрування.

Частинне вирішення, яке відповідає початковим умовам  $\tau = 0$ ,  $t = t_1$ , за постійних значень  $Q$ ,  $V$  і  $t_{n.c}$ , після перетворень має вигляд:

$$t = \frac{1}{c \cdot V} \cdot \exp\left(-\frac{Q \cdot \tau}{V}\right) \cdot \int_0^\tau N \cdot \exp\left(\frac{Q \cdot \tau}{V}\right) d\tau + t_{n.c} + (t_1 - t_{n.c}) \cdot \exp\left(-\frac{Q \cdot \tau}{V}\right), \quad (5)$$

де  $t_1$  – температура повітря у приміщенні на початку роботи вентиляції, °C.

За умов, коли потужність виділення теплоти має постійне значення, тобто  $N = \text{const}$  вирішення рівняння (5) можна записати як

$$t = t_{n.c} + \frac{N}{c \cdot Q} + \left(t_1 - t_{n.c} - \frac{N}{c \cdot Q}\right) \cdot \exp\left(-\frac{Q \cdot \tau}{V}\right). \quad (6)$$

Відомо, що коли виділення теплоти у повітря робочої зони відбувається тільки від предметів, які охолоджуються всередині зазначеної зони, наприклад, розігрітого металу, то процес охолодження з достатньою точністю можна подати експоненційною залежністю:

$$N = N_0 \cdot \exp(-a \cdot \tau), \quad (7)$$

де  $N_0$  – початкова потужність виділення теплоти, (за  $\tau = 0$ ), кВт;  $a$  – стала, яку визначають (за

Приймаємо, що  $k = \text{const}$ , тоді рівняння (5) можна записати як

$$t = \frac{1}{c \cdot V} \cdot \exp\left[-\left(\frac{k \cdot F}{c \cdot V} + \frac{Q}{V}\right) \cdot \tau\right] \cdot \int_0^\tau N \cdot \exp\left(\left(\frac{k \cdot F}{c \cdot V} + \frac{Q}{V}\right) \cdot \tau\right) d\tau + t_{n.c} + (t_1 - t_{n.c}) \cdot \exp\left[-\left(\frac{k \cdot F}{c \cdot V} + \frac{Q}{V}\right) \cdot \tau\right]. \quad (10)$$

У разі коли  $N = \text{const}$  рівняння (5) з урахуванням втрат теплоти до навколишнього середовища має вигляд:

$$t = t_{n.c} + \frac{N}{c \cdot Q + k \cdot F} + \left(t_1 - t_{n.c} - \frac{N}{c \cdot Q + k \cdot F}\right) \cdot \exp\left[-\left(\frac{k \cdot F}{c \cdot V} + \frac{Q}{V}\right) \cdot \tau\right]. \quad (11)$$

Час, протягом якого температура змінюється від  $t_1$  до  $t_2$  за роботи вентиляції з постійною продуктивністю одержують з рівняння (11), якщо прийняти  $t = t_2$ :

$$\tau = \frac{c \cdot V}{c \cdot Q + k \cdot F} \cdot \ln \left[ \frac{t_1 - t_{n.c} - N / (c \cdot Q + k \cdot F)}{t_2 - t_{n.c} - N / (c \cdot Q + k \cdot F)} \right]. \quad (12)$$

Виконаємо оцінку змінювання температури у робочій зоні виробничого приміщення металу-

$\tau = 0$ ), кВт;  $a$  – стала, яку визначають умови теплообміну,  $\text{с}^{-1}$ .

За таких умов вирішення рівняння (5) матиме вигляд:

$$t = t_0 + \frac{N_0}{c \cdot (Q - a \cdot V)} \cdot \exp(-a \cdot \tau) + \left[t_1 - t_{n.c} - \frac{N_0}{c \cdot (Q - a \cdot V)}\right] \cdot \exp\left(-\frac{Q \cdot \tau}{V}\right). \quad (8)$$

Проте у рівняннях (6) та (8) не враховано втрати теплоти через огороження приміщення до навколишнього середовища. Зазначені втрати іноді суттєво впливають на процес змінювання температури у робочій зоні виробничого приміщення.

*Постановка завдання.* У роботі було поставлено завдання знайти як залежності температури у виробничому приміщенні під час роботи вентиляційної установки, так і обернені залежності, що дозволяють знаходити час роботи вентиляції, який є необхідним для досягнення заданої температури, з урахуванням втрат теплоти через огороження робочої зони приміщення. Такі залежності слід знайти для випадків постійної потужності теплових виділень та потужності, яка змінюється за експоненціальним законом (охолодження гарячих об'єктів).

*Головна частина досліджень.* Втрати теплоти через огороження робочої зони виробничого приміщення можна подати відомою залежністю:

$$N_{em} = k \cdot F \cdot (t - t_{n.c}), \quad (9)$$

де  $N_{em}$  – втрати теплоти до навколишнього середовища, кВт;  $k$  – коефіцієнт теплопередачі, кВт/(м<sup>2</sup>·K);  $F$  – площа огорожень, м<sup>2</sup>.

ргійного цеху без урахування та з урахуванням втрат теплоти через його огороження. Приймаємо внутрішній обсяг приміщення  $V = 5000 \text{ м}^3$ ; площу конструкцій, що огорожують,  $F = 2000 \text{ м}^2$ ; потужність виділень теплоти  $N = 50 \text{ кВт}$ ; продуктивність вентиляційної установки  $Q = 2,778 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $t_{n.c} = 15 \text{ °C}$ ;  $t_1 = 35 \text{ °C}$ . Середній коефіцієнт теплопередачі через зовнішні огороження за практичними даними  $k = 0,65$

Вт/(м<sup>2</sup>·с) [7]; об'ємна теплоємність повітря за постійним тиском  $c = 1,32$  кДж/(м<sup>3</sup>·°С) [8].

Розрахунки з використанням рівнянь (8) та (11) показують, що протягом 30 хвилин роботи вентиляційної установки температура у приміщенні без урахування втрат теплоти через огороження становить 31,0 °С, а з їх урахуванням – 27,6 °С. Значення рівноважної температури, що встановлюється у приміщенні ( $\tau \Rightarrow \infty$ ) у першому разі складає 28,6 °С, у другому – 25,0 °С, тобто врахування втрат теплоти дозволяє одержати економію електроенергії за рахунок зниження потужності вентиляційної установки або за рахунок скорочення часу її роботи.

$$t = t_{n.c} + \frac{N_0}{c \cdot (Q - a \cdot V) + k \cdot F} \cdot \exp(-a \cdot \tau) + \left[ t_1 - t_{n.c} - \frac{N_0}{c \cdot (Q - a \cdot V) + k \cdot F} \right] \cdot \exp \left[ - \left( \frac{k \cdot F}{c \cdot V} + \frac{Q}{V} \right) \cdot \tau \right]. \quad (13)$$

Для визначення залежності часу роботи вентиляційної установки від температури, яку потрібно встановити у приміщенні, рівняння (13) можна подати у вигляді:

$$t = t_0 + \alpha \cdot \exp(-a \cdot \tau) + \beta \cdot \exp(-b \cdot \tau), \quad (14)$$

де

$$\alpha = \frac{N_0}{c \cdot (Q - a \cdot V) + k \cdot F};$$

$$\beta = t_1 - t_{n.c} - \frac{N_0}{c \cdot (Q - a \cdot V) + k \cdot F};$$

$$b = \frac{k \cdot F}{c \cdot V} + \frac{Q}{V}.$$

$$t - t_{n.c} - \alpha - \beta = \left( \alpha + \beta \cdot \frac{b}{a} \right) \cdot x + \frac{\beta \cdot b}{2a} \cdot \left( \frac{b}{a} - 1 \right) \cdot x^2 + \frac{\beta \cdot b}{6a} \cdot \left( \frac{b}{a} - 1 \right) \cdot \left( \frac{b}{a} - 2 \right) \cdot x^3 + \dots \quad (16)$$

Виконуючи підставлення значень параметрів  $\alpha$  і  $\beta$  до виразу  $(t - t_{n.c} - \alpha - \beta)$ , маємо

$$t - t_{n.c} - \alpha - \beta = t - t_1. \quad (17)$$

$$x = \frac{t - t_1}{\alpha + \beta \cdot B} - \frac{\beta \cdot B \cdot (B - 1)}{2(\alpha + \beta \cdot B)^3} \cdot (t - t_1)^2 + \frac{0,5\beta^2 \cdot B^2 \cdot (B - 1)^2}{(\alpha + \beta \cdot B)^5} - \frac{(\alpha + \beta \cdot B) \cdot B \cdot (B - 1) \cdot (B - 2)}{6\beta \cdot (\alpha + \beta \cdot B)^5}, \quad (18)$$

де  $x$  – допоміжна перемінна, яка дозволяє виконати необхідні перетворення.

$$\tau = \frac{1}{a} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{t - t_1}{\alpha + \beta \cdot B} - \frac{\beta \cdot B \cdot (B - 1)}{2(\alpha + \beta \cdot B)^3} \cdot (t - t_1)^2 + \frac{0,5\beta^2 \cdot B^2 \cdot (B - 1)^2 - 1/6\beta \cdot [(\alpha + \beta \cdot B) \cdot B \cdot (B - 1) \cdot (B - 2)]}{(\alpha + \beta \cdot B)^5} \cdot (t - t_1)^3 + \dots \right\}^{-1}. \quad (19)$$

Виконаємо оцінку точності розрахунків за формулою (19). Приймаємо, що початкова температура у виробничому приміщенні складає  $t_1 = 42$  °С, а початкова потужність виділень теплоти становить  $N_0 = 100$  кВт. Припустимо (за практичними даними), що протягом години величина зазначеної потужності зменшується вдвічі. Тоді

Знаходимо час роботи вентиляційної установки для зниження температури повітря у приміщенні з 35 до 30 °С, приймаючи інші дані такими, як і у попередньому розрахунку. За рівнянням (12) значення зазначеного параметра складає  $\tau = 935$  с, а без врахування втрат теплоти  $\tau = 2720$  с, тобто майже у три рази більше.

Обчислюємо змінювання температури у приміщенні за часом, враховуючи втрати теплоти через огороження, якщо потужність виділень теплоти змінюється за експоненціальним законом (7). При цьому рівняння (5) має вирішення:

Представимо другий і третій доданки рівняння (14) як

$$\exp(-a \cdot \tau) = 1 + x;$$

$$\exp(-b \cdot \tau) = (1 + x)^{b/a}.$$

Тоді рівняння (14) матиме вигляд

$$t = t_0 + \alpha \cdot \exp(-a \cdot \tau) + \beta \cdot \exp(-b \cdot \tau)^{b/a}. \quad (15)$$

Після розкладання другого доданку рівняння (15) у ряд Тейлора та складання його з першим доданком, а також виконання подальших перетворень, формулу (15) можна записати як:

Згідно до формул для обернення ступеневого ряду [9], обмежуючи його першими трьома доданками та позначивши  $b/a = B$ , можна записати

Перейшовши до змінної  $\tau$ , після нескладних перетворень, одержуємо:

з рівняння (7) після нескладних перетворень маємо  $a = 1,925 \cdot 10^{-4}$ .

Якщо взяти інші дані ( $V$ ,  $F$ ,  $Q$ ,  $k$  і  $c$ ) такими ж, як у попередньому розрахунку, то, після підставлення у відповідні формули, одержуємо нижче наведені значення коефіцієнтів  $b$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $B$ :  
 $b = 7,525 \cdot 10^{-4}$ ;  $\alpha = 27,05$ ;  $\beta = -0,05$ ;  $B = 3,909$ .

Час, протягом якого температура у робочій зоні виробничого приміщення знизиться до рівня 30 °С, що обчислюють за рівнянням (18), становить 3063 с. Якщо не враховувати доданок третього ступеню у фігурних дужках рівняння (19), то розрахунковий термін буде складати 3057 с. Така різниця не є суттєвою для інженерних розрахунків. Тому остаточно формулу для обчислення терміну роботи вентиляції у робочій зоні виробничого приміщення металургійних цехів приймаємо у вигляді:

$$\tau = \frac{1}{a} \cdot \ln \left[ 1 + \frac{t - t_1}{\alpha + \beta \cdot B} - \frac{\beta \cdot B \cdot (B - 1)}{2(\alpha + \beta \cdot B)^3} \cdot (t - t_1)^2 \right]^{-1}. \quad (20)$$

*Висновки.*

1. Знайдено залежності температури у робочій зоні виробничого приміщення металургійних цехів з джерелами виділення теплоти постійної потужності, а також потужності, що змінюється

за експоненціальним законом, від терміну роботи вентиляційної установки, які враховують втрати теплоти через огороження робочої зони.

2. Одержано рівняння для визначення часу, протягом якого температура у робочій зоні виробничого приміщення з джерелами виділення теплоти постійної потужності, а також потужності, що змінюється за експоненціальним законом, досягає заданої величини під час роботи вентиляційної установки з постійною продуктивністю та враховує втрати теплоти через огороження виробничого приміщення.

#### Бібліографічний список

1. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування [Текст] / Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. – 141 с. – Бібліогр.: с. 140. – Код УКНД 91.140.
2. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Текст] : Постанова № 42 від 01.12.1999. – Київ : Міністерство охорони здоров'я, 2000. – 12 с.
3. Пономарчук, І. А. Вентиляція та кондиціонування повітря [Текст] : Навч. посібник / І. А. Пономарчук, О. Б. Волошин. – Вінниця : ВНТУ, 2004. – 121 с. – Бібліогр.: с. 97. – 300 прим.
4. Жидецький, В. Ц. Основи охорони праці [Текст] : Підручник / В. Ц. Жидецький. – Львів : Афіша, 2004. – 318 с. – Бібліогр.: с. 312-313. – 300 прим. – ISBN 966-8013-11-5.
5. Дроздов, В. Ф. Отопление и вентиляция [Текст] / В. Ф. Дроздов. – В двух частях. Ч. 2. Вентиляция. – М. : Высшая школа, 1984. – 263 с. – Бібліогр.: с. 260. – 40000 экз.
6. Рыжков, В. Г. К расчету вентиляции для удаления теплоизбытков [Текст] / В. Г. Рыжков // Металлургия : Научные труды Запорожской государственной инженерной академии. – Запорожье : РИО ЗГИА, 2003. – Вып. 8. – С. 117-119. – Библиогр.: с. 119.
7. Справочник по системам вентиляции и кондиционирования LENNOX [Електронний ресурс] / Режим доступу: [http://innovation-group.com.ua/book/3\\_3\\_2\\_2.php](http://innovation-group.com.ua/book/3_3_2_2.php). – Выборка 22.08.2016.
8. Лариков, Н. Н. Теплотехника [Текст] : Учебник для вузов / Н. Н. Лариков. – М. : Стройиздат, 1985. – 432 с. – Библиогр.: с. 425. – 50000 экз.
9. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М. : Лань, 2009. – 608 с. – Библиогр.: с. 585-588. – 200 экз. – ISBN 978-5-8114-0906-8.

Стаття надійшла до редакції 04.07.2016 р.  
Рецензент, проф. Г.Б. Кожемякін

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука  
<http://www.zgia.zp.ua>