

УДК 628.83:697.911]:613.63

DOI <https://doi.org/10.26661/2071-3789-2020-1-18>

Рижков Вадим Генієвич, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0002-0768-544X

Бєлоконь Карина Володимирівна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-2000-4052

Манідіна Євгенія Анатоліївна, доцент, кандидат технічних наук, Запорізький національний університет. ORCID: 0000-0003-4090-9991

Троїцька Олена Олександрівна, доцент, кандидат біологічних наук, Запорізький національний університет., ORCID 0000-0003-0214-5476

Радченко Юрій Миколайович, доцент, кандидат технічних наук, Національна металургійна академія України. ORCID: 0000-0002-5055-6707

ДО РОЗРАХУНКУ ВЕНТИЛЯЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ ЗА УМОВ ВИДІЛЕННЯ ДЕКІЛЬКОХ ШКІДЛИВИХ РЕЧОВИН

Визначено необхідну продуктивність вентиляційної установки для зменшення концентрації шкідливих речовин за умов одночасного виділення до повітря робочої зони декількох речовин. Розглянуто варіанти речовини різноспрямованої дії; речовини односпрямованої дії з адитивним ефектом; речовини односпрямованої дії з підсилюючим (потенційованим) ефектом; речовини односпрямованої дії з послаблюючим (антагоністичним) ефектом. Запропоновано рівняння, що описують продуктивність вентиляційної установки для зазначених варіантів надходження шкідливих речовин до повітря.

Ключові слова: вентиляція, концентрація, продуктивність, рівняння, шкідлива речовина

Вступ. Шкідливі речовини у повітрі робочої зони виробничих приміщень є одним з головних чинників, що погіршують санітарно-гігієнічний стан на робочому місці. Особливо це стосується металургійних цехів та інших приміщень підприємств чорної та кольорової металургії. Виділення шкідливих газів парів та пилу до повітря робочої зони виробничих приміщень, погіршують умови праці, підвищують рівень їх концентрацій до значень, які перевищують граничнодопустимі концентрації (ГДК) та негативно впливають на здоров'я робітників. Наприклад, у конверторних цехах концентрація фіброгенного пилу може перевищувати ГДК у шість разів [1], а у мартенівських цехах – у п'ятдесят чотири рази [2]. Концентрація оксидів азоту на розливному майданчику мартенівського цеху перевищує ГДК майже у вісім разів [2].

Одним з найбільш ефективних засобів боротьби з підвищеною концентрацією шкідливих речовин у повітрі робочої зони є виробнича загальна та місцева вентиляції. Вимоги до систем загальної вентиляції встановлюють ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» [3], ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (ССБП. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони) [4], ДСТУ Б EN 13779:2011 «Вентиляція громадських будівель» [5], ДСН 3.3.6.042-99 «Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень» [6] тощо.

Аналіз досягнень. Для описування процесу повітрообміну під час видалення шкідливих речовин з повітря виробничих приміщень можна використовувати головне диференціальне рівняння вентиляції [7]:

$$Mdt + Q \cdot c_0 dt - Q \cdot c dt = Vdc \quad , \quad (1)$$

де M – швидкість виділення шкідливих речовин до об'єму приміщення, кг/с або кг/год.; Q – витрати вентиляційного повітря (продуктивність вентиляційної установки), м³/с або м³/год.; V – внутрішній об'єм приміщення, м³; c – поточне значення концентрації

шкідливих речовин у повітрі приміщення (середнє за об'ємом), $\text{кг}/\text{м}^3$; c_0 – концентрація шкідливих речовин у зовнішньому повітрі, $\text{кг}/\text{м}^3$; t – час, с, або год.

Аналізуючи рівняння (1) треба мати на увазі, що за роботи будь якої системи вентиляції (припливної, витяжної, припливно-витяжної) кількість видаленого повітря дорівнює його кількості, що принесено зовні, тому що приміщення не є герметичним і в ньому постійно відбувається повітрообмін.

Розглядаємо процес, що відбувається у приміщенні за подаванням і видаленням повітря у кількості Q за елементарний відрізок часу dt . За цей час концентрація шкідливої речовини у приміщенні зміниться на dc .

У лівій частині рівняння (1) надано кількість шкідливої речовини, що виділяються від внутрішніх джерел (перший член), які потрапляють із зовнішнім повітрям (другий член) і видаляються з приміщення (третій член), у його правій частині – наведено приріст кількості шкідливої речовини у приміщенні за час dt .

Рівняння (1) має загальне вирішення:

$$c = \exp\left(-\int \frac{Qdt}{V}\right) \cdot \left[\int \left(\frac{M + Q \cdot c_0}{V}\right) \cdot \exp\left(\int \frac{Qdt}{V}\right) dt + C \right], \quad (2)$$

де C – стала інтегрування.

У роботі [8] наведено розв'язання рівняння (1) за умов $M = \text{const}$, $Q = \text{const}$, $c_0 = \text{const}$ та за початкових умов $t=0$, $c = c_n$:

$$c = c_0 + \frac{M}{Q} + \left[c_n - c_0 - \frac{M}{Q} \right] \cdot \exp\left(-\frac{Q \cdot t}{V}\right), \quad (3)$$

де C_n – початкова концентрація шкідливої речовини

У роботі [9] виконано розкладання експоненти у другому доданку рівняння (3) в ряд Тейлора за ступенями $\exp(-Q \cdot t / V)$. Згідно формулам для обернення ступеневого ряду отримано рівняння для визначення продуктивності вентиляційної установки, що забезпечує зниження концентрації шкідливої речовини до прийняттого значення за наданий проміжок часу для умов постійної швидкості виділення цієї шкідливої речовини, яке має вигляд:

$$Q = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \left(c_n - c_0 + \frac{M \cdot t}{V} \right)^i, \quad (4)$$

$$\text{де } a_1 = \frac{2V^2}{2V \cdot (c_n - c_0) \cdot t + M \cdot t^2}; \quad a_2 = \frac{4 \left[3V \cdot (c_n - c_0) \cdot t^2 + M \cdot t^3 \right] \cdot V^3}{3 \left[2V \cdot (c_n - c_0) \cdot t + M \cdot t^2 \right]^3};$$

$$a_3 = \frac{4V^4 \cdot \left[4V^2 \cdot (c_n - c_0)^2 + 2V \cdot (c_n - c_0) \cdot M \cdot t + 0,33M^2 \cdot t^2 \right]}{3t \cdot \left[2V \cdot (c_n - c_0) + M \cdot t \right]^5}.$$

$$a_4 = \frac{1}{\left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t}{V} + \frac{M \cdot t^2}{2V^2} \right]^7} \cdot \left\langle 5 \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t}{V} + \frac{M \cdot t^2}{2V^2} \right] \cdot \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t^2}{2V^2} + \frac{M \cdot t^3}{6V^3} \right] \right\rangle.$$

$$\cdot \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t^3}{6V^3} + \frac{M \cdot t^4}{24V^4} \right] - \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t}{V} + \frac{M \cdot t^2}{2V^2} \right]^2 \cdot \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t^4}{24V^4} + \frac{M \cdot t^5}{120V^5} \right] -$$

$$-5 \left[\frac{(c_n - c_0) \cdot t^2}{2V^2} + \frac{M \cdot t^3}{6V^3} \right]^3 \Bigg\rangle, c_k - \text{кінцева концентрація шкідливої речовини, яку не}$$

обхідно забезпечити за роботи системи вентиляції.

Подальше розкладання рівняння (4) у ряд Тейлора свідчить про складність і громіздкість його наступних членів. Для практичних розрахунків достатньо обмежитися його трьома...чотирма першими членами.

У разі виділення однієї шкідливої речовини до повітря робочої зони виробничого приміщення має виконуватися нерівність:

$$c_k \leq g, \quad (5)$$

де g – гранично допустима концентрація (ГДК) шкідливої речовини у повітрі робочої зони.

У такому разі мінімально потрібну продуктивність вентиляції обчислюють за формулою:

$$Q = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \left(c_n - g + \frac{M \cdot t}{V} \right)^i. \quad (6)$$

Постановка завдання. На практиці до повітря виробничого приміщення часто прямує декілька шкідливих речовин. Тому завданням роботи є отримання відповідних залежностей для продуктивності вентиляційної установки за умов виділення декількох речовин різноспрямованої дії; односпрямованої дії з адитивним ефектом; односпрямованої дії з підсилюючим (потенційованим) ефектом; односпрямованої дії з послаблюючим (антагоністичним) ефектом.

Головна частина досліджень. Речовинами різноспрямованої дії є загально токсичні речовини (пари ртуті), хімічно задушливі речовини (оксид вуглецю) та речовини фіброгенної дії (пил двооксиду кремнію). У такому разі потрібно розглядати кожен речовину окремо та обчислювати для неї витрату вентиляційного повітря за формулою (5). Після цього з декількох отриманих значень витрат для реалізації обирають максимальну величину: $Q = (Q_i)_{\max}$.

Характер дії на організм робітника речовин односпрямованої дії з адитивним ефектом є однаковим. Тому наслідки впливу декількох речовин з адитивним ефектом підсумовуються. До таких речовин слід віднести насичені вуглеводні – метан, етан, пропан, бутан тощо, або галогени – хлор, фтор, йод, бром.

Якщо до повітря виробничого приміщення виділяються дві речовини односпрямованої дії з адитивним ефектом, то повинна виконуватися нерівність:

$$\frac{c_1}{g_1} + \frac{c_2}{g_2} \leq 1, \quad (7)$$

де c_1, c_2 – концентрації першої та другої речовини відповідно; g_1, g_2 – їх ГДК.

Якщо занесення шкідливих речовин зовні є відсутнім, то їх концентрація у повітрі c буде прямо пропорційною швидкості їх виділення M :

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{M_1}{M_2}. \quad (8)$$

Для визначення максимально допустимих кінцевих значень концентрацій обох речовин $c_{1к}$ і $c_{2к}$ знак нерівності у формулі (6) замінюють на знак рівності та додають формулу (7). Записують систему рівнянь:

$$\frac{c_1}{g_1} + \frac{c_2}{g_2} = 1 \quad (9)$$

$$\frac{c_1}{c_2} = \frac{M_1}{M_2} \quad (10)$$

розв'язання якої відносно концентрацій $c_{1к}$ і $c_{2к}$ має вигляд:

$$c_{1к} = \frac{M_1 \cdot g_1 \cdot g_2}{M_1 \cdot g_2 + M_2 \cdot g_1}; \quad (11)$$

$$c_{2к} = \frac{M_2 \cdot g_1 \cdot g_2}{M_1 \cdot g_2 + M_2 \cdot g_1}. \quad (12)$$

Використовуючи отримані значення $c_{1к}$ і $c_{2к}$ можна обчислити мінімально потрібну продуктивність вентиляційної установки шляхом перетворення формули (4), яку для обох речовин можна записати як:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \left(c_{1n} - \frac{M_1 \cdot g_1 \cdot g_2}{M_1 \cdot g_2 + M_2 \cdot g_1} + \frac{M_1 \cdot t}{V} \right)^i; \quad (13)$$

$$Q_2 = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cdot \left(c_{2n} - \frac{M_2 \cdot g_1 \cdot g_2}{M_1 \cdot g_2 + M_2 \cdot g_1} + \frac{M_2 \cdot t}{V} \right)^i, \quad (14)$$

де c_{1n} , c_{2n} – відповідно початкова концентрація першої та другої шкідливої речовини.

З двох отриманих значень Q_i обирають більшу величину.

Розглянемо випадок, коли у повітрі виробничого приміщення знаходиться n речовин односпрямованої дії з адитивним ефектом і швидкістю виділення до повітря i -ої речовини M_i , ГДК якої дорівнює g_i . Тоді маємо:

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{g_i} \leq 1. \quad (15)$$

Використовуючи вище наведений алгоритм для двох шкідливих речовин, отримують залежності для максимально допустимих кінцевих концентрацій речовин:

$$c_{ік} = \frac{M_1 \cdot \prod_{j=1}^n g_j}{\sum_{k=1}^n M_k \cdot \prod_{j \neq k}^n g_j}. \quad (16)$$

Отриману залежність застосовують у формулах для розрахунків витрати вентиляційного повітря:

$$Q_i = \sum_{p=1}^{\infty} a_p \cdot \left(c_{in} - \frac{M_1 \cdot \prod_{j=1}^n g_j}{\sum_{k=1}^n M_k \cdot \prod_{j \neq k}^n g_j} + \frac{M_i \cdot t}{V} \right)^p, \quad (17)$$

де c_{in} – початкова концентрація i -ої шкідливої речовини у повітрі; коефіцієнти a_p відповідають коефіцієнтам a_i у формулі (4).

З усіх визначених значень витрат вентиляційного повітря для реалізації також обирають максимальне значення $Q = (Q_i)_{\max}$.

У разі односпрямованої дії речовин з підсилюючим (потенційованим) ефектом на організм робітників її характер є однаковим, але слід зазначити, що наслідки впливу декількох речовин з підсилюючим ефектом більш тяжкі, ніж сума ефектів окремих речовин. Так, мідь підсилює отруйну дію нікелю у десять разів, етанол підвищує тяжкість отруєння аніліном. Також потенційований ефект спостерігають за одночасної дії сірководню та вуглеводнів. Таке явище ще називають синергізмом [10]. Для синергізму має виконуватися нерівність:

$$\sum_{i=1}^n \frac{c_i}{g_i} \leq K < 1, \quad (18)$$

де K – константа, що залежить від виду шкідливої речовини.

Для речовин з підсилюючим ефектом отримано таку залежність:

$$Q_i = \sum_{p=1}^{\infty} a_p \cdot \left(c_{in} - K \cdot \frac{M_1 \cdot \prod_{j=1}^n g_j}{\sum_{k=1}^n M_k \cdot \prod_{j=1, j \neq k}^n g_j} + \frac{M_i \cdot t}{V} \right)^p. \quad (19)$$

Під час односпрямованої дії двох шкідливих речовин з послаблюючим (антагоністичним) ефектом одночасно одна речовина послаблює дію іншої. Прикладом може бути взаємодія між інсектицидом езерину та атропіном (атропін є протиотрутою, антидотом). Токсичність аміаку послаблюється дією двооксиду вуглецю. Антагоністичний ефект спостерігають за одночасної дії хлору та двооксиду сірки [10].

Логічно було би у цьому разі використовувати формулу (18) за умови $K > 1$. Проте, фахівці з безпеки життєдіяльності та охорони праці [11,12] вважають, що доцільніше застосовувати залежність (15). Тому під час обчислень витрат вентиляційного повітря за умови виділення шкідливих речовин з антагоністичним ефектом слід використовувати формулу (17).

Висновки. Отримано залежності для розрахунку мінімально потрібної продуктивності вентиляційної установки, що забезпечує зниження концентрації шкідливих речовин до прийняттого рівня за наданий проміжок часу за умов виділення до повітря робочої зони з постійною швидкістю речовин різноспрямованої дії; речовин односпрямованої дії з адитивним ефектом, речовин односпрямованої дії з підсилюючим (потенційованим) ефектом, також речовин односпрямованої дії з послаблюючим (антагоністичним) ефектом.

Бібліографічний перелік

1. Гасило Ю. А., Крюковська О. А. Дослідження умов праці працівників конверторних цехів. URL: http://www.rusnauka.com/36_NIO_2008/Tecnic/39311doc.htm.
2. Охрана труда. Информационный ресурс. URL: http://ohrana-bgd.ru/metal/metal1_11.html.
3. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування [Чинний від 01.01.2014] / Київ : Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2013. 141 с.
4. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (ССБП. Загальні санитарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони) [Чинний від 01.01.1989] / Київ : Міністерство охорони здоров'я, 2000. 95 с.
5. ДСТУ Б EN 13779:2011 Вентиляція громадських будівель. Вимоги до виконання систем вентиляції та кондиціонування повітря (EN 13779:2007, IDT) [Чинний від 01.01.2013].
6. ДСН 3.3.6.042-99 Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень [Чинний від 01.12.1999] Київ : Міністерство охорони здоров'я України, 2000. 10 с.
7. Дроздов В. Ф. Отопление и вентиляция. В двух частях. Москва : Высшая школа, 1984. Ч. 2. Вентиляция. 263 с.
8. Рыжков В. Г. К расчету вентиляции производственных помещений металлургических предприятий. Металлургия : Научные труды ЗГИА. 2002. Вып. 6. С.172-176.
9. Рижков В. Г., Белоконь К. В., Манідіна Є. А., Троїцька О. О. До розрахунку вентиляції виробничих приміщень з урахуванням змінювання виділення шкідливих речовин Металургія : Наукові праці ЗДІА. 2019. Вип. 1 (41). С. 119 -122.
10. Информационный сайт по безопасности жизнедеятельности. URL : <http://www.kornienko-ev.ru/BCYD/page232/page384/index.html>.
11. Гелашвили Д. Б., Безель В. С., Безруков М. Е. Принципы и методы экологической токсикологии / . Нижний Новгород : Издательство Нижегородского книверситета, 2015. 745 с.

12. Радоуцкий В. Ю., Партигул Е. О., Янишин В. В. Производственная санитария и охрана труда : учебно-методический комплекс. Белгород : БГТУ, 2005. 287 с.

References

1. Gasylo Yu. A., Kryukovska O. A. Doslidzhennya umov pratsi pratsivnykiv konvertornykh tsekhiv. URL: http://www.rusnauka.com/36_NIO_2008/Tecnic/39311 doc.htm.
2. Okhrana truda. Informacziornyj resurs. URL: http://ohrana-bgd.ru/metal/metal1_11.html.
3. DBN V.2.5-67:2013. Opalennya, ventilyatsiya ta kondytsiyuvannya [Chynnyi vid 01.01.2014] / Kyiv : Ministerstvo regionalnogo rozvytku, budivnytszta ta zhytlovo-komunalnogo gospodarstva Ukrainy, 2013. 141 p.
4. GOST 12.1.005-88 SSBT. Obshchie sanitarno-gigienicheskie trebovaniya k vozdukhу rabochej zony (SSBP. Zagal'ni sanitarno-gigiyenichni vymogy do povitrya robochoyi zony) [Chynnyi vid 01.01.1989] : Kyiv : Ministerstvo oxorony zdorovya, 2000. 95 p.
5. DSTU B EN 13779:2011 Ventilyatsiya gromadskykh budivel. Vymogy do vykonannya system ventilyatsiyi ta kondytsionuvannya povitrya (EN 13779:2007, IDT) [Chynnyi vid 01.01.2013].
6. DBN 3.3.6.042-99 Derzhavni sanitarni normy mikroklimatu vyrobnychkykh prymishchen [Chynnyi vid 01.12.1999] Kyiv : Ministerstvo oxorony zdorovya Ukrainy, 2000. 10 p.
7. Drozdov V. F. Otoplenie i ventilyatsiya. V dvukh chastyakh. Moskva : Vysshaya shkola, 1984. Ch. 2. Ventilyatsiya. 263 p.
8. Ryzhkov V. G. K raschyotu ventilyatsii proizvodstvennykh pomeshhenij metallurgicheskikh predpriyatii. *Metallurgiya : Nauchnye trudy Zaporozhskoj gosudarstvennoj inzhenernoj akademii*. Zaporozh'e : 2002. vol. 6. pp. 172-176.
9. Ryzhkov V. G., Byelokon K. V., Manidina Ye. A., Troyitszka O. O. Do rozrakhunku ventilyatsiyi vyrobnychkykh prymishchen z urakhuvannyam zminyuvannya vydilennya shkidlyvykh rehovyn *Metallurgiya : Naukovi pratsi ZDIA*. 2019. vol. 1 (41). pp. 119-122.
10. Informacziornyj sajt po bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti. URL : <http://www.kornienko-ev.ru/BCYD/page232/page384/index.html>.
11. Gelashvili D. B., Bezel' V. S., Bezrukov M. E. Printsipy i metody ekologicheskoy toksikologii / Nizhnij Novgorod : Izdatel'stvo Nizhegorodskogo universiteta, 2015. 745 p.
12. Radoutszkij V. Yu., Partigul E. O., Yanishin V. V. Proizvodstvennaya sanitariya i okhrana truda : uchebno-metodicheskij kompleks. Belgorod : BGTU, 2005. 287 p.

Ryzhkov Vadim, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Belokon' Karina, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Manidina Eugenia, associate professor, candidate of technical sciences, Zaporozhe national university.

Troits'ka Helen, associate professor, candidate of biological sciences, Zaporozhe national university.

Radchenko Yurii, associate professor, candidate of technical sciences, National metallurgical academy of Ukraine, c. Dnepr.

TO CALCULATION OF VENTILATION FOR SHOPFLOORS AT CONDITIONS OF SEGREGATION OF A FEW NOXIOUS MATTERS

This article discusses the problem of finding the minimum necessary air exchange to remove several harmful substances from the volume of the working room with a different nature of action. The authors determined the required performance of the ventilation unit to reduce the concentration of harmful substances to acceptable values for a given period of time. The conditions for the simultaneous release of several harmful substances into the air of the working zone were considered. As a basis for analysis, the well-known main differential equation of air exchange (ventilation) was adopted. After appropriate mathematical transformations, the authors obtained equations describing the performance of the ventilation unit for four options for the entry of harmful substances into the air. The first option involves the release of substances of multidirectional action (that is, each substance has an effect on the body of a certain nature, independent of the effects of other substances). For example, it can be a substance with a general

toxic effect, such as mercury, chemically asphyxiating, like carbon monoxide and a substance with fibrogenic action, like silicon dioxide. The second option is the allocation of unidirectional substances with the effect of summation (additive effect). Moreover, the effects of exposure to substances are summarized. Such properties are, for example, hydrocarbons: methane, ethane, propane, etc. The third option is the release of unidirectional substances with an enhancing effect, when one substance enhances the toxic effect of another (like ethanol and aniline). The fourth option is the release of unidirectional substances with a weakening effect, when one substance weakens the toxic effect of another (like chlorine and sulfur dioxide). For each option, dependencies are proposed that allow you to determine the minimum required flow rate of ventilation air.

Стаття надійшла: 19.06.2020 р.