УДК 538 61:331

ВИЗНАЧЕННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ЗМІНИ АЕРОІОННОГО СКЛАДУ ПОВІТРЯ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕНЬ

В. А. Глива, В. І. Клапченко, кандидати технічних наук (КНУБА), С. М. Пономаренко, канд. фіз.-мат. наук (КНУБА), Л. О. Левченко, канд. екон. наук, Д. С. Смаковський, асп. (НТУУ «КПІ)

Описана методика определения аэроионного состава воздуха в рабочих помещениях.
Ключевые слова: аэроионизация, диффузия, рекомбинация.

Описано методику визначення аероіонного складу повітря у робочих приміщеннях.
Ключові слова: аероіонізація, дифузія, рекомбінація.

The method to define aeroionic air composition in working rooms is described.
Keywords: aeroionization, diffusion, deionization.

Аероіонний склад повітря виробничих, навчальних та побутових приміщень є найбільш динамічним фізичним фактором, чисельні значення якого суттєво змінюються у часі та просторі [1]. Аероіонний режим приміщень залежить як від об'єктивних чинників (пора року, температура та вологість зовнішнього повітря), так і суб'єктивних – кількості людей, що постійно перебувають у приміщенні, наявності дрібнодисперсного пилу, аерозолів у повітрі, кількості та характеристик обладнання, що впливає на ці параметри, тощо [2, 3]. Усе це потребує постійного контролю аероіонного складу повітря та його відповідності чинним санітарним нормам [4]. Проте апаратура для таких вимірювань є досить дорогою, потребує високої кваліфікації у експлуатації та обслуговуванні і має велику паспортну похибку вимірювань (до 40 %). До того ж норми вимагають проведення контролю один раз на квартал, при впровадженні нових технологічних процесів та організації нових робочих місць. Це на сьогоднішній день не можна вважати задовільним з причин, наведених вище, та постійної зміни (періодичності) функціонування обладнання (наприклад, комп'ютерного). Таким чином, актуальним та доцільним є розроблення методу контролю аероіонного складу повітря робочих приміщень, який би вимагав мінімальної кількості вимірювань і базувався на проведенні розрахунків. Проте навіть за відомих аналітичних розв'язків відповідних рівнянь, що характеризують поширення аероіонів у часі та просторі, отримання чисельних даних потребує громіздких розрахунків. Тому для практичного використання розрахункового методу фахівцями з охорони праці бажана їх автоматизація.

Метою статті є розроблення методики визначення аероіонного складу повітря у робочих приміщеннях шляхом розв'язання необхідних рівнянь та отримання чисельних значень за допомогою комп'ютерних програм і надання практичних рекомендацій щодо їх використання.

Розрахунки щодо просторового розподілу аероіонів виконувались виходячи з рівняння неперервності [5] та відомих співвідношень математичної фізики [6], які у випадку стаціонарності процесу (неперервна дія джерел іонізації : $\frac{dn}{dt} = 0$) у одному з напрямків мають вигляд [7]

$$D\frac{d^2n}{dx^2} - g + \frac{n - n_0}{\tau} = 0\,,$$

де D – коефіцієнт дифузії; n – концентрація іонів у даній точці; n_0 – середня (фонова) концентрація іонів; g – продуктивність джерела іонів; τ – середній час життя іонів; x – відстань від джерела до точки визначення концентрації n.

З наведених параметрів експериментального визначення потребує лише продуктивність джерел іонізації g, яка, враховуючи однотипність обладнання, може бути виміряна для його кожного типу і використовуватись постійно. Решта сталих та коефіцієнтів або відома і береться з довідкової літератури, або може бути визначена розрахунками.

$$\frac{d^2n}{dx^2} - \frac{1}{D\tau} = \frac{g}{D} - \frac{n_0}{D\tau}\,.$$

Для отримання чисельного розв'язку рівняння необхідно ввести крайові умови

$$n\,|_{x=0} = n_1$$

$$n\,|_{x=l} = n_0\,,$$

де n_1 – керуючий параметр; l – відстань, на якій концентрація аероіонів практично урівнюється з фоновою.

Використовуючи стандартну процедуру розв'язання лінійного диференціального рівняння другого порядку з постійними коефіцієнтами, отримуємо загальний розв'язок

$$n = c_1 e^{\frac{x}{\sqrt{D\tau}}} + c_2 e^{\frac{-x}{\sqrt{D\tau}}} + n_0 - g\tau.$$

Отримаємо n_1 таким чином, щоб $c_1 = 0$, тоді керуючий параметр має значення

$$n_1 = g\tau e^{\frac{l}{\sqrt{D\tau}}} + n_0 + g\tau\,,$$

а остаточний чисельний розв'язок має вигляд

$$n(x) = g\tau e^{\frac{l-x}{\sqrt{D\tau}}} + g\tau .$$

Отриманий результат у більшості просторових інтервалів дає значні розбіжності з експериментом (крім випадку $l \approx x$). Причиною є, на нашу думку, некоректність побудови рівняння (1) для даного випадку. Розповсюдження аероіонів відбувається сферично від джерела. Крім того, рівняння не може бути трансформоване в окремі конкретні випадки, які треба проаналізувати з урахуванням рекомбінації аероіонів.

Розглянемо процес зміни концентрації аероіонів з часом.

Відомо [5], що

$$\Delta n = \gamma n^2 ,$$

де Δn – кількість зникаючих аероіонів; γ – коефіцієнт їх рекомбінації; n – початкова концентрація аероіонів.

У найпростішому випадку, за умови припинення дії джерела іонізації (неприродного походження), часова зміна концентрації буде

$$\frac{dt}{dn} = -\gamma n^2 \qquad \text{або} \qquad \gamma dt = -\frac{dn}{n^2} .$$

Таким чином

$$\int_0^t \gamma dt = -\int_{n_0}^{n} \frac{dn}{n^2} ,$$

де n_0 і n – концентрація у момент припинення дії іонізатора і через час t.

Виконавши інтегрування, маємо

$$\gamma t = \frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} ,$$

$$n = \frac{n_0}{1 + \gamma n_0 \tau} . \qquad (2)$$

У більш складному випадку і такому, що досить наближений до реальних умов у виробничих приміщеннях, коли джерела іонізації функціонують неперервно,

$$\frac{dn}{dt} = g - \gamma n^2 ,$$

де g – продуктивність джерела іонізації повітря.

Розв’язуючи це диференціальне рівняння з граничною умовою n = 0 при t = 0 і приймаючи $\tau = \sqrt{\frac{1}{g\gamma}}$, $g - \gamma n^2 > 0$, маємо

$$n = \sqrt{\frac{g}{\gamma}} th \left(\frac{t}{\tau} \right); \qquad (3)$$

$$n = c_1 e^{\frac{x}{\sqrt{D\tau}}} + c_2 e^{\frac{-x}{\sqrt{D\tau}}} + n_0 - g\tau .$$

Графічне представлення рівняння (3) наведено на рис. 1.

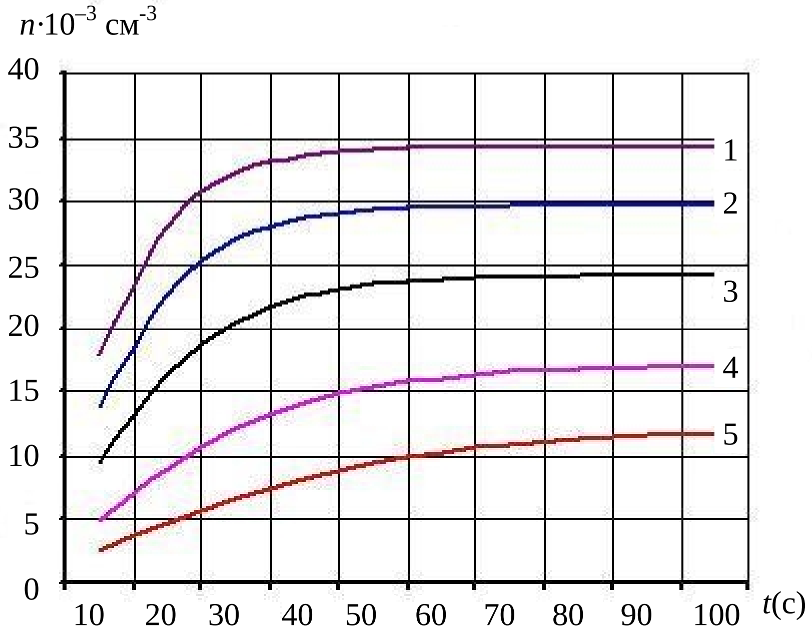

Рис. 1. Часові зміни концентрацій аероіонів за різних продуктивностей джерела аероіонів: криві *1–5* відповідають продуктивностям 2000, 1500, 1000, 500, 250 см$^{-3}$·с$^{-1}$ відповідно

Для отримання кількісних даних, необхідних для практичного використання, треба мати чисельні значення сталих, які входять у рівняння (1)–(3). З довідкової літератури [8] відомо, що коефіцієнт рекомбінації іонів у повітрі за нормальних умов $\gamma \approx 1{,}67 \cdot 10^{-6}$ см^3/с, а коефіцієнт дифузії $D \approx 0{,}1$ см^2/с.

Потребують розрахункового визначення середній час життя і початкова концентрація аероіонів. Останній параметр є найбільш критичним, бо від нього залежить час життя. Вихідні концентрації аероіонів у вільному повітрі для кожної місцевості відомі або можуть бути виміряні один раз (деякі коливання залежать від пори року та кліматичної обстановки). Проте у робочих приміщеннях концентрація аероіонів залежить від радіоактивного фону, що створюється радіоактивними елементами, які входять до складу будівельних та оздоблювальних матеріалів. Аналіз цього параметра наведено у [1].

Але зазвичай емісійні властивості будматеріалів у конкретному приміщенні невідомі. Нами запропонований метод розрахункового визначення додаткової кількості пар іонів (до фонового) за рахунок радіоактивного випромінювання. Рівень радіоактивності може бути виміряний будь-яким детектором як професійного, так і побутового призначення.

Наприклад, якщо радіоактивний фон у приміщенні 40 мкР/год (що для міста Києва дуже типово), то за умови, що 1 Р ≈ $2{,}6\cdot10^{-4}$ Кл/кг, в 1 $м^3$ повітря генерується іонізаційний заряд $3{,}4\cdot10^{-4}$ Кл. Таким чином, 40 мкР/год відповідає $136\cdot10^{-10}$ Кл/$м^3$год. Вважаючи аероіони однозарядними ($\pm e$), отримуємо, що за зазначених умов у повітрі приміщення додатково генерується 25 $см^{-3}с^{-1}$ пар іонів.

Середній час життя аероіонів доцільно визначати, використовуючи фундаментальні співвідношення молекулярно-кінетичної теорії газів:

$$\tau = \frac{\overline{\lambda}}{\overline{V}},$$

де $\overline{\lambda}$ – середня довжина пробігу молекул; V – їх середня швидкість.

Це випливає з того, що наведені параметри для молекул і їх іонів практично не відрізняються. Середня довжина вільного пробігу визначається зі співвідношення

$$\overline{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}}\frac{1}{\pi\sigma\ n_0},$$

де σ – ефективний діаметр іонів.

Як видно з наведеного співвідношення, λ залежить від концентрації іонів n_0, тому доцільно визначити час життя аероіонів для різних їх концентрацій [4] – оптимальної, мінімально та максимально допустимих. При цьому треба враховувати, що для нормальних умов $\overline{V} \approx 5\cdot10^4$ см/с , а $\sigma \approx 2{,}8\cdot10^{-6}$ см.

Таким чином, для негативних аероіонів за їх оптимальної, максимально та мінімально допустимих концентрацій середній час життя становить:

$T_{opt} \approx 1{,}2\cdot10^2$ с; $\tau_{min} \approx 1\cdot10^3$ с; $\tau_{max} \approx 1{,}2$ с.

Отримані чисельні значення дають вихідні дані для виконання розрахунків.

Найбільш наближеним до реальних умов є рівняння, яке враховує процеси дифузії і рекомбінації аероіонів та їх сферичне розповсюдження від джерела:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g + D\left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial n}{\partial r}\right) - \gamma n^2 .$$

Це рівняння не може бути розв’язане у загальному вигляді і потребує використання чисельних методів, що було реалізовано з використанням методу кінцевих різниць з неявною різницевою схемою на адаптивній сітці на мові *C*++. При цьому вводився розмір джерела, який для наших розрахунків приймався r_0 = 0,3 м.

Результатом розрахунків є тривимірне представлення, яке у проекції (t, n) має вигляд, показаний на рис. 2. Зображення має спотворення при отриманні проекції.

Проекція *r*, *n* показана на рис. 3.

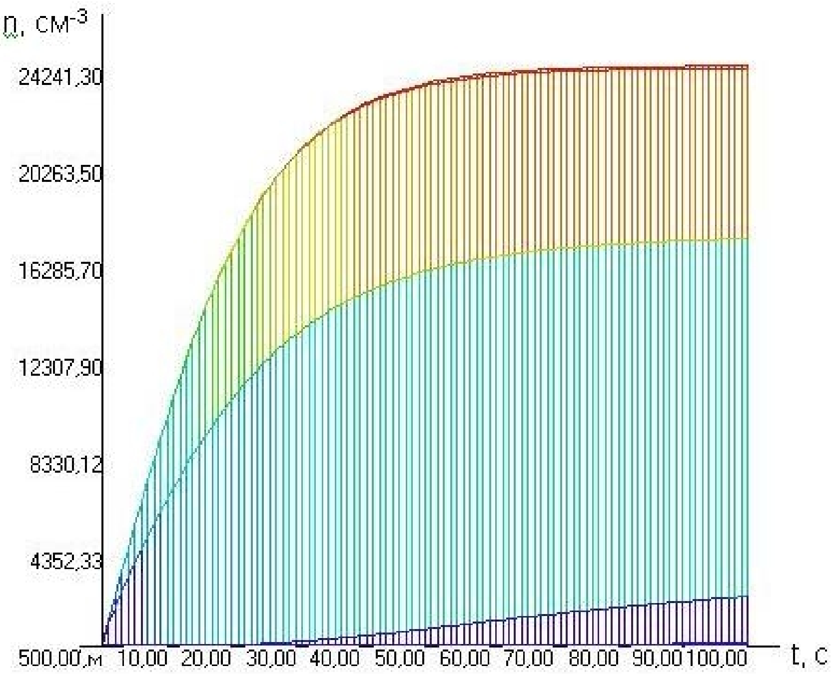

Рис. 2. Часова залежність концентрації аероіонів у приміщенні: n_0 = 400 см$^{-3}$; g = 1000 см$^{-3}$·с$^{-1}$

Аналіз отриманих кривих показує, що за наявності джерел аероіонізації у робочих приміщеннях має місце явище насичення (див. рис. 1), показник якого є відправною точкою для подальших розрахунків. Поширення аероіонів за рахунок дифузійних процесів досить обмежене і суттєве тільки поблизу джерела (критична відстань залежить від його продуктивності). Через деякі спрощення реального процесу, не враховується вихідна (фонова) концентрація

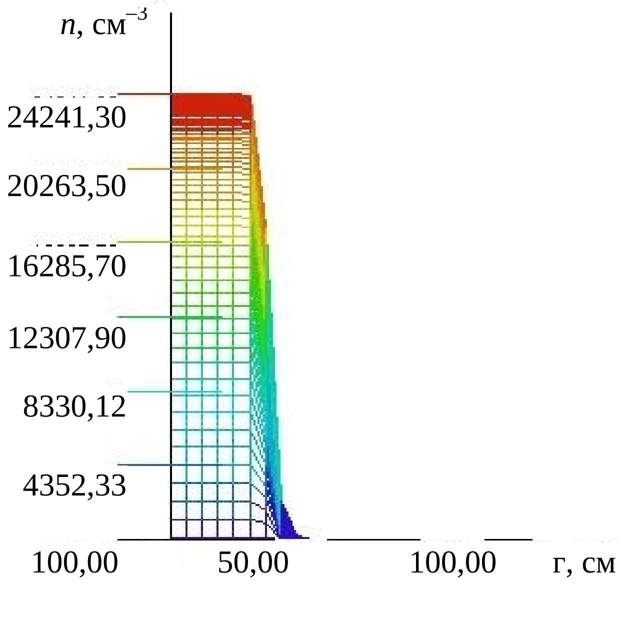

Рис. 3. Просторова залежність концентрації іонів поблизу джерела

аероіонів, яка повинна додаватися до концентрацій, визначених графічно. Дана модель не враховує спрямованого руху повітря у приміщенні (за рахунок функціонування систем вентиляції кондиціювання повітря, систем охолодження технічних засобів тощо). Складання відповідних рівнянь дуже ускладнене, тому відповідні задачі доцільно реалізувати чисельно, використовуючи алгоритм покрокових розрахунків, виходячи з прийнятної формальної моделі.

Висновки

Аналіз існуючих підходів до розрахунків концентрацій аероіонів, власні теоретичні і натурні дослідження довели, що найменш трудомістким є визначення необхідних параметрів з графічного представлення з мінімальними кількостями апаратних вимірювань.

Визначення концентрацій аероіонів повинне спиратися на загальну або окремі моделі динаміки аероіонів, притаманні конкретному приміщенню або використовуваного робочого обладнання.

Поширення аероіонів техногенного походження за рахунок дифузійних процесів досить обмежене, що дозволяє надійно визначити безпечні відстані для окремих технічних засобів.

Потребує розроблення математична модель поширення аероіонів внаслідок примусового руху повітря у приміщеннях, що є наступним кроком досліджень.

1. *Шилкин А. А.* Аэроионный режим в гражданских зданиях / А. А. Шилкин, Ю. Д. Губернский, А. М. Миронов. – Стройиздат, 1988. – 168 с.

2. *Милова Л. Н.* Ионизация воздушной среды в условиях промышленного города и ее влияние на здоровье населения (на примере г. Липецка): дис… канд. мед. наук: 14.00.07 / Милова Лариса Николаевна. – М., 2004. – 246 с.

3. *Коваленко О. В.* Гігієнічні критерії оптимізації іонізованості повітря приміщень багатофункціональних житлових комплексів / О. В. Коваленко, В. Я. Акіменко // Гігієна населених місць. – 2007. – Вип. 49. – С. 138–211.

4. *Санитарно-гигиенические нормы* допустимых уровней ионизации воздуха производственных и общественных зданий СНиП 2152-80. – [Введен в действие 1980-12-02]. – М.: МЗ СССР, 1980. – 7 с. – (Межгосударственный стандарт).

5. *Белицкий А. В.* Явления переноса в слабоионизированной плазме / А. В. Белицкий, Л. А. Толчина, Б. М. Смирнов: М.: Атомиздат, 1975. – 336 с.

6. *Тихонов А. Н.* Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Сомарский. – М.: Наука, 1997. – 736 с.

7. *Бахрушин В. Е.* Моделирование распределения концентраций ионов вблизи ионизатора / В. Е. Бахрушин, М. А. Игнахина, Д. В. Вертинский, А. Д. Евсюков // Складні системи і процеси. – 2002. – № 1. – С. 30–35.

8. *Кузмичев В. Е.* Законы и формулы физики / В. Е. Кузмичев: К.: Наук. думка, 1989. – 864 с.