

Запобігання та ліквідація надзвичайних ситуацій

УДК 538.61:331:45

doi: 10.26906/SUNZ.2018.4.157

В. А. Глива¹, Л. О. Левченко², О. М. Тихенко¹

¹ Національний авіаційний університет, Київ, Україна

² Національний технічний університет України «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЙ АЕРОІОНІВ У ПРИМІЩЕННЯХ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ЇХ ЗМІН

На основі аналізу рівняння неперервності потоку повітря при наявності джерела його іонізації розглянуто можливі закономірності розповсюдження аероіонів у приміщенні. Надано розв'язок рівняння за наявності спрямованого руху повітря. Показано, що процеси дифузії мало впливають на розповсюдження аероіонів. Проведено моделювання поширення аероіонів при неперервному функціонуванні джерела іонізації повітря за різних його продуктивностей. Розраховано параметри для визначення динаміки аероіонів – середні довжини вільного пробігу та час життя. Визначено час життя аероіонів при їх різних концентраціях. Розраховано середню генерацію аероіонів у залежності від рівнів природної радіоактивності у приміщенні. Надано рекомендації щодо використання результатів у практичній діяльності.

Ключові слова: іонізація повітря, концентрація аероіонів, аероіонізація.

Вступ

Постановка проблеми. Стійкою тенденцією останніх років є збільшення та ущільнення розміщення різноманітного обладнання у виробничих приміщеннях. Значна його частина може впливати на аероіонний склад повітря. Відомо, що концентрації аероіонів обох полярностей є важливим показником якості повітря виробничого середовища та навчальних приміщень. Особливо це є актуальним для останніх, у зв'язку з постійною зміною кількості людей, які одночасно перебувають в аудиторії або лабораторії та різну кількість обладнання, яке функціонує. На сьогоднішній день актуальною є задача прогнозування концентрацій аероіонів, особливо на стадіях проектування розміщення обладнання у приміщеннях. Це вимагає узагальнення методів розрахунку концентрацій аероіонів при різних внутрішніх та зовнішніх впливах на стан середовища та здійснення моделювання динаміки аероіонного складу повітря.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У зв'язку з появою джерел деіонізації повітря спостерігається підвищена увага до цієї проблематики, про що свідчить збільшення кількості публікацій щодо впливу аероіонів на здоров'я людей, дослідження розподілу аероіонів у приміщеннях та його динаміки, удосконалення метрологічної бази. Більшість з них присвячено розробленню і дослідженню засобів аероіонізації повітря у приміщеннях [1, 2] та приладів з контролю концентрації аероіонів [3, 4]. Останнє дуже важливе через те, що паспортні похибки вимірювань більшості лічильників аероіонів складають біля 40 % при рухомостях $(\geq 0,4 \text{ см}^2 / (B \cdot c))$. При

цьому поза увагою залишаються питання розподілу аероіонів у приміщеннях та дослідження динаміки їх концентрацій. Деякі роботи у цих напрямках, як, наприклад, [5] стосуються специфічних умов, а не більшості приміщень перебування людей. Винятком є робота [6], у якій на основі експериментальних

досліджень та аналізу розробок з цих питань запропоновані оптимальні рішення з нормалізації аероіонного складу повітря у приміщеннях з приливно-витяжною вентиляцією, а також зроблено ґрунтовне порівняння обладнання для іонізації повітря у приміщеннях. Проте важливим є створення математичного апарату для попередніх розрахунків фактичного стану та динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях. У [7] зроблено спробу моделювання таких процесів, але запропонований математичний апарат має ряд недоліків: недостатньо коректно визначені граничні умови та розв'язане рівняння неперервності. Сучасний підхід до моделювання розповсюдження аероіонів надано у [8], але його практичне використання складне і базується на не зовсім коректних математичних співвідношеннях.

Потребують уточнення розрахунки щодо просторової та часової динаміки аероіонного складу повітря і порівняння їх з натурними вимірюваннями.

Мета статті – проаналізувати процес розповсюдження аероіонів та надати прийнятний за точністю та простий у практичному використанні математичний апарат, щодо динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях, придатний для моделювання динаміки концентрацій аероіонів.

Виклад основного матеріалу

Зважаючи на дуже малу концентрацію аероіонів порівняно з концентрацією молекул повітря, для опису динаміки аероіонів можливе використання співвідношень, що описують слабоіонізовану плазму. У випадку наявності джерела (джерел) іонізації повітря відповідне рівняння неперервності у загальному випадку буде мати вигляд:

$$\frac{n(r, t)}{t} = g(r, t) + \frac{n(r, t) - n_0}{\tau} - \frac{1}{q} \operatorname{div} j - \left(\frac{n(r, t)}{x} \right) v(r, t),$$

де $n(r, t)$ - концентрація аероіонів у точці з радіус-вектором \mathbf{r} у момент часу t , $g(r, t)$ - кількість аеро-

іонів, що генеруються у точці об'єму з одиницю часу, n_0 – концентрація аероіонів у нормальних умовах, τ – час життя аероіонів, q – заряд аероіонів, j – густина струму за рахунок їх руху, v – швидкість повітряного потоку.

Найбільш поширеними джерелами аероіонів у сучасних умовах є обладнання масового використання – лазерні принтери, копіювальна техніка, системні блоки комп'ютерів, які або не створюють повітряні потоки, або впливають на рух повітря незначним чином. У цьому випадку електричним струмом за рахунок руху аероіонів можна нехтувати. За таких припущень рівняння неперервності має вигляд:

$$\frac{\partial n(r,t)}{\partial t} = g(r,t) + \frac{n(r,t) - n_0}{\tau} \text{ або}$$

$$\frac{\partial n(r,t)}{dt} = g_0 - \frac{n_0}{\tau} + \frac{n(r,t)}{\tau} \text{ (у скалярному вигляді).}$$

Враховуючи, що $g_0 - n_0/\tau = \text{const}$, маємо лінійне диференціальне рівняння першого порядку. Для його розв'язання доцільно використовувати формальну підстановку Бернуллі:

$$n(r,t) = u(t)v(t), \text{ тобто } \frac{dn}{dt} = u'v + uv'.$$

Розв'язком рівняння є функція:

$$n(r,t) = Ce^{t/\tau} - g_0\tau + n_0,$$

де C – стала, яка визначається у кожному конкретному випадку, наприклад, з початкової умови Коші $n(t)|_{t=0} = n_1$.

Як видно з розв'язку рівняння, концентрація аероіонів повинна збільшуватися, що і відбувається у безпосередній близькості до джерела іонізації та підтверджується експериментом [9]. Але з деякого моменту часу спостерігається зниження концентрації аероіонів, при чому аналітичні функції, що його описують, у кожному конкретному випадку дещо відрізняються.

Рівняння неперервності у наведеному вигляді не враховує явища рекомбінації аероіонів різних знаків – дуже важливого процесу, який найбільше впливає на концентрації аероіонів, особливо за умов відсутності генерації. При цьому для характеристики розповсюдження аероіонів доцільно використовувати такий показник, як їх коефіцієнт дифузії.

У загальному випадку $j = qDradn$, де \bar{j} – електрострум за рахунок руху аероіонів, q – заряд аероіонів.

У більшості випадків $q = e$ – заряду електронів. Враховуючи відносно низькі концентрації аероіонів у повітрі, для визначення D можливе використання фундаментального співвідношення кінетичної теорії ідеального газу:

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v},$$

де λ – довжина вільного пробігу аероіонів, \bar{v} – його середня швидкість. Проте для практичного викорис-

тання більш прийнятним є застосування однозначного зв'язку між коефіцієнтом дифузії D та рухомістю K (формула Ейнштейна):

$$D = kTK/q,$$

де k – стала Больцмана, T – температура, q – заряд аероіона.

Рухомості аероіонів визначають або з достатньо досліджених спектрів рухомостей [3], або, для попередньої оцінки, з визначення легких аероіонів, наданого у відповідних санітарних нормах [10].

Для спрощення розрахунків доцільно розглядати розповсюдження аероіонів уздовж одного з трьох ортогональних напрямків. У цьому випадку рівняння буде мати вигляд:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g - D \left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \right) + \frac{n - n_0}{\tau} + \frac{\partial n}{\partial x} v.$$

При розв'язанні рівняння слід врахувати, що у більшості реальних випадків джерела іонів працюють з постійною (або близькою до неї) продуктивності, тобто $\frac{\partial n}{\partial t} = 0$. Таким чином, остаточно рівняння набуває вигляду:

$$D \frac{d^2 n}{dx^2} - \frac{dn}{dx} v = g + \frac{n - n_0}{\tau}.$$

При цьому за умов наявності примусової циркуляції повітря швидкість його спрямованого руху буде мати деяке фіксоване значення, а за відсутність циркуляції – дорівнюватиме нулю.

Таким чином, маємо лінійне неоднорodne диференціальне рівняння другого порядку:

$$D \frac{d^2 n}{dx^2} + \frac{1}{\tau} n - g + \frac{n_0}{\tau} = 0.$$

При використанні стандартних методів розв'язання такого рівняння, його розв'язок має вигляд:

$$n = C_1 e^{x/\sqrt{D\tau}} + C_2 e^{-x/\sqrt{D\tau}},$$

де C_1, C_2 – сталі інтегрування.

У кожному конкретному випадку сталі C_1, C_2 залежать від початкових умов, які визначаються за критерієм Коші:

$$n(x)|_{x=0} = g + n_0, \quad n(x)|_{x=e} = n_0.$$

Додатній показник ступеня у рівнянні, який свідчить про експоненціальне зростання концентрації аероіонів, має фізичний сенс. Таке зростання відбувається у випадках, коли продуктивність джерел іонізації повітря g перевищує розтікання іонів за рахунок дифузії D . В іншому випадку, у наведеному рівнянні привалює другий член рівняння. Порівняння результатів розрахунків з експериментальними даними [9] свідчить про задовільну їх кореляцію. Відмінності (до 7 - 8%) пояснюються деякою залежністю коефіцієнта дифузії від мікрокліматичних умов у приміщенні та залежністю ступеня рекомбінації іонів від їх концентрації, який визначається співвідношенням:

$$\Delta n = \gamma n_0^2,$$

де Δn – кількість зникаючих аероіонів, γ - коефіцієнт рекомбінації.

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 $t=0$ та вважаючи $\tau = \sqrt{1/(g\gamma)}$; $g - \gamma n^2 > 0$, маємо

$$n = \sqrt{\frac{g}{\gamma}} \operatorname{th}\left(\frac{t}{\tau}\right), \quad n = c_1 e^{\frac{x}{\sqrt{D}\tau}} + c_2 e^{-\frac{x}{\sqrt{D}\tau}} + n_0 - g\tau.$$

Графічне представлення рівняння – на рис. 1

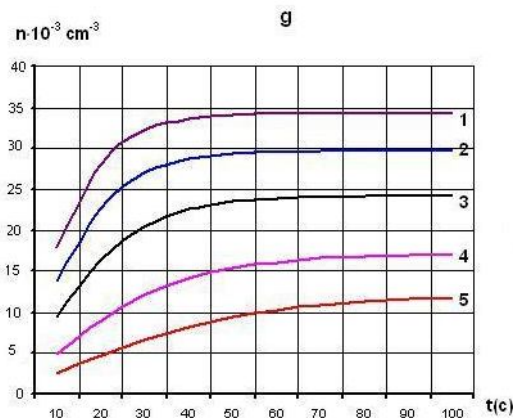


Рис. 1. Часові зміни концентрацій аероіонів за різних продуктивностей джерела аероіонів: 1-5 відповідають продуктивностям 2000, 1500, 1000, 500, 250 $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ відповідно.

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

Потребують розрахункового визначення середньої час життя аероіонів та їх початкова концентрація. 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.

Але зазвичай емісійні властивості будматеріалів у конкретному приміщенні невідомі. Нами запропонований метод розрахункового визначення додаткової кількості пар іонів (до фонового) за рахунок ра-

діоактивного випромінювання. Рівень радіоактивності може бути вимірний будь-яким детектором як професійного, так і побутового призначення. Наприклад, якщо радіоактивний фон у приміщенні 40 мкР/год, то за умови $1P \approx 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$, у 1 м^3 повітря генерується іонізаційний заряд $3,4 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$. Таким чином 40 мкР/год відповідає $136 \cdot 10^{10} \text{ Кл/м}^3 \cdot \text{год}$. Вважаючи аероіони однозарядними отримуємо, що за зазначених умов у повітрі приміщення додатково генерується $25 \text{ см}^3 \cdot \text{с}^{-1}$ пар іонів.

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

$$\tau = \bar{\lambda} / \bar{v},$$

де $\bar{\lambda}$ – середня довжина пробігу молекул, \bar{v} – їх середня швидкість.

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

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

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 – оптимальної, мінімально та максимально допустимих. При цьому враховувати, що для нормальних умов $\bar{v} \approx 5 \cdot 10^4 \text{ см/с}$, а $\sigma \approx 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ см}$.

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

$$\tau_{\text{opt}} \approx 1,2 \cdot 10^2 \text{ с},$$

$$\tau_{\text{min}} \approx 1 \cdot 10^3 \text{ с},$$

$$\tau_{\text{max}} \approx 1,2 \text{ с}.$$

Отримані числові значення дають вихідні дані для виконання розрахунків та моделювання поширення та зміни концентрації аероіонів.

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, притаманну конкретному приміщенню або використовуюваного робочого обладнання з урахуванням природного радіоактивного фону у приміщенні.

Розповсюдження аероіонів техногенного походження за рахунок дифузійних процесів досить обмежене, тому для поширення аероіонів від джерела іонізації або в бік джерела деіонізації здійсню-

ється примусово. Потребує розроблення математич- ванням зниження швидкості повітряного потоку, на модель розповсюдження аероіонів внаслідок підвищення рекомбінації за великих концентрацій примусового руху повітря у приміщеннях, з ураху- аероіонів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бурцев С. И. Современные подходы к ионизации и озонированию воздуха вентилируемых помещений / С.И. Бурцев, А. А. Варгузин, А. А. Дударев, Г. А. Спичкин // Инженерные системы. – 2006. – № 4. – С.46–49.
2. Запорожець О. І. Нормування аероіонного складу повітря робочих приміщень та основні напрями його вдосконалення / О. І. Запорожець, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Вісник національного авіаційного університету. – 2011. – № 1. – С. 139–143.
3. Беляков В. В. Экспериментальные исследования спектрометра ионной подвижности с источником ионизации на основе коронного разряда / В. В. Беляков, А. А. Головин, В. С. Першенков // Датчики и системы. – 2009. – № 2. – С.12–13.
4. Запорожець О. І. Принципи моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях / О. І. Запорожець, В. А. Глива, О. В. Сидоров // Вісник Національного авіаційного університету. – 2011. – № 2 (47). – С. 120–124.
5. Глива В. А. Дослідження впливу мікрокліматичних параметрів повітрообміну на аероіонний склад повітря робочих приміщень / В. А. Глива // Проблеми охорони праці в Україні: збірник наукових праць. – 2011. – Вип. 20. – С. 58–65.
6. Сукач С. В. Оцінка та шляхи мінімізації ймовірного шкідливого впливу комплексів «аероіони–хімічні речовини» повітря замкнутих виробничих приміщень / С. В. Сукач, Т. Ф. Козловська, О. М. Кравець // Електромеханічні і енергозберігаючі системи : щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 3/2016 (35). – С. 82–88.
7. Бахрушин В.Е. Моделирование распределения концентрации ионов вблизи ионизатора / В. Е. Бахрушин, М. А. Игнашина, Д. В. Вертинский, А. Ю. Евсюкова // Складні системи і процеси. – 2002. – № 1. – С.30–35.
8. Цыганкова С. Г. Проблемно-ориентированный пакет программ для расчета аэроионного режима в помещениях / С. Г. Цыганкова // Збірник наукових праць Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – № 49. – С. 280 – 284.
9. Сукач С. В. Дослідження динаміки аероіонного складу повітря навчальних приміщень / С. В. Сукач, В. М. Гусев, Р. М. Левківський // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – Вип. 3(39). – С. 126–128.
10. Санітарно-гігієнічні норми допустимих рівнів іонізації повітря виробничих та громадських приміщень: ДНАОП 0.03-3.06-80 [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://dnaop.com/html/2296/doc-ГН_2152-80.

Рецензент: д-р техн. наук, проф. М. І. Адаменко,

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків

Received (Надійшла) 21.06.2018

Accepted for publication (Прийнята до друку) 15.08.2018

Методы определения концентраций аэроионов в помещениях и моделирование их изменений

В. А. Глыва, Л. О. Левченко, О. Н. Тихенко

На основе анализа уравнения непрерывности потока воздуха при наличии источника его ионизации рассмотрены возможные закономерности распространения аэроионов в помещении. Предоставлено решение уравнения при наличии направленного движения воздуха. Показано, что процессы диффузии мало влияют на распространение аэроионов. Проведено моделирование распространения аэроионов при непрерывном функционировании источника ионизации воздуха при его различной производительности. Рассчитаны параметры для определения динамики аэроионов - средние длины свободного пробега и время жизни. Определено время жизни аэроионов при их различных концентрациях. Рассчитано среднюю генерацию аэроионов в зависимости от уровней естественной радиоактивности в помещении. Даны рекомендации по использованию результатов в практической деятельности.

Ключевые слова: ионизация воздуха, концентрация аэроионов, аэроионизация.

Methods of determination of aeronian concentrations in premises and their changes modeling

V. Glyva, L. Levchenko, O. Tykhenko

The process of aeroions propagation is analyzed, and the mathematical apparatus is presented with acceptable level of accuracy and easy to use. It is proved that this method is suitable for simulating the dynamics of aeroions concentration in premises. On the basis of the analysis of the equation of the airflow continuity in the presence of ionization source, possible patterns of the aeroions propagation of in the room are considered. The solution of the equation in the presence of directed air movement is given. It has been established that diffusion processes have little effect on the propagation of aeroions. The determination of aeroions concentrations should be based on the general or individual models of aeroion dynamics that are inherent to the particular room or working equipment used, taking into account the natural radioactive background in the room. The simulation of the propagation of aeroions with the continuous functioning of the air ionization source has been carried out for various levels of the ionizer productivity. The parameters for determining the air ion dynamics are calculated - mean free run and lifetimes. The lifetime of negative aeroions is determined for their different concentrations - optimal, maximum and minimum permissible. The resulting numerical values give the initial data to calculate the model of their propagation and change of their concentration. Also, the average generation of aeroions has been calculated, depending on the levels of natural radioactivity in the room. It is established that there is a need to develop a mathematical model for the aeroions propagation as a result of the forced movement of air in the premises, taking into account the reduction of the air flow rate, the increased recombination at high concentrations of aeroions. Recommendations on the use of results on practice are provided.

Keywords: ionization of air, concentration of aeroions, aeroionization.