

ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

УДК 613.155:537.568.001.57(045)

¹О.І. Запорожець, д.т.н., проф.
В.А. Глива, к.т.н., докторант
²О.В. Сидоров, асп.

**ПРИНЦИПИ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ
АЕРОІОННОГО СКЛАДУ ПОВІТРЯ У ПРИМІЩЕННЯХ**

Національний авіаційний університет

¹E-mail: zap@nau.edu.ua²E-mail: sidorovav@ukr.net

Запропоновано підходи до моделювання часової та просторової змін концентрації аероіонів у приміщеннях. Проведено порівняння розрахункових даних з експериментальними. Наведено рекомендації щодо практичного використання отриманих результатів.

The methods of modeling of temporal and spatial changes of the concentration of air ions in rooms is suggested. Comparing of calculation data with experimental data is conducted. Advices of practical use of received results is given.

Рассмотрены методы моделирования временного и пространственного изменения концентрации аэроионов в помещениях. Проведено сравнение расчётных данных с экспериментальными. Даны рекомендации по практическому использованию полученных результатов.

Вступ

Якість повітря побутових, виробничих, навчальних приміщень є одним з основних факторів якості середовища перебування людей.

Вагомий показник якості повітря є його аероіонний склад, що доведено у роботах О.А. Чижевського [1], Ю.Д. Думанського [2], А.А. Мінха [3], М.Г. Шандали [4] та ін.

Останніми роками спостерігається підвищення уваги до цієї проблеми як в Україні, так і за кордоном. Про це свідчить збільшення кількості публікацій про вплив аероіонів на здоров'я людей, дослідження розподілу аероіонів у приміщеннях та його динаміки, удосконалення метрологічної бази.

Більшість публікацій присвячено розробленню і дослідженню засобів аероіонізації повітря у приміщеннях [5; 6] та приладів з контролю аероіонізації [7; 8].

Паспортні похибки вимірювань більшості лічильників аероіонів становлять близько 40 % за фіксованих рухомостей ($\geq 0,4 \text{ см}^2/\text{Вс}$).

Поза увагою залишаються питання розподілу аероіонів у приміщеннях та дослідження динаміки їх концентрацій.

Поодинокі роботи в цих напрямках стосуються специфічних умов, а не більшості приміщень перебування людей [9].

Винятком є робота [10], в якій на основі експериментальних досліджень та аналізу напрацювань з цих питань запропоновано оптимальні рішення щодо нормалізації аероіонного складу повітря у приміщеннях з припливно-витяжною вентиляцією, а також зроблено ґрунтовне порівняння обладнання для іонізації повітря у приміщеннях.

Постановка завдання

Натепер становлять інтерес створення математичного апарату для попередніх розрахунків фактичного стану та динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях.

У роботі [11] зроблено спробу моделювання таких процесів, але запропонований математичний апарат має такі недоліки [12]:

– недостатньо коректно визначено граничні умови та розв'язано рівняння неперервності;

– не розглянуто різні реальні ситуації зміни аероіонного складу повітря (постійна генерація іонів, ситуація після її припинення, стан динамічної рівноваги тощо);

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

Мета роботи – надати прийнятний за використаними припущеннями та простий у практичному використанні математичний апарат для моделювання динаміки аероіонного складу повітря у приміщеннях із різними початковими та граничними умовами.

Математичний апарат моделювання аероіонного складу

Зважаючи на дуже малу концентрацію аероіонів порівняно з концентрацією молекул повітря, для опису динаміки аероіонів можна використовувати співвідношення, що описують слабоіонізовану плазму [12]. За наявності джерела (джерел) іонізації повітря відповідне рівняння неперервності у загальному випадку згідно з роботою [11] матиме вигляд

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

де $n(r,t)$ – концентрація аероіонів у точці з радіус-вектором r у момент часу t ;

$g(r,t)$ – кількість аероіонів, що генеруються в одиниці об'єму за одиницю часу;

n_0 – концентрація аероіонів у нормальних умовах (фонова);

τ – час життя аероіонів;

q – заряд аероіонів;

v – швидкість повітряного потоку;

j – густина струму за рахунок їх руху.

Найпоширенішими джерелами аероіонів у сучасних умовах є обладнання масового використання – лазерні принтери, копіювальна техніка, системні блоки комп'ютерів, які або не створюють повітряних потоків, або значно впливають на рух повітря.

У цьому разі електричним струмом за рахунок руху аероіонів можна нехтувати.

За таких припущень рівняння неперервності має вигляд

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

або скалярний вигляд

$$\frac{dn(r,t)}{dt} = g_0 - \frac{n_0}{\tau} + \frac{n(r,t)}{\tau}.$$

Оскільки $g_0 - \frac{n_0}{\tau} = \text{const}$, маємо лінійне диференціальне рівняння першого порядку.

Для його розв'язання доцільно використовувати формальну підстановку Бернуллі:

$$n(r,t) = u(t)v(t),$$

тобто

$$\frac{dn}{dt} = u'v + uv'.$$

Розв'язком рівняння є функція

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

де C – стала, яка визначається в кожному конкретному випадку, наприклад, з початкової умови Коші:

$$n(t) \Big|_{t=0} = n_0.$$

Тоді розв'язком рівняння є

$$n = g_0\tau e^{\frac{t}{\tau}} - g_0\tau + n_0.$$

Як видно з розв'язку рівняння, концентрація аероіонів має збільшуватися, що і відбувається в безпосередній близькості до джерела іонізації та підтверджується експериментом [13].

Проте з деякого моменту часу спостерігається зниження концентрації аероіонів, причому аналітичні функції, що його описують, у кожному конкретному випадку дещо розрізняються.

Відповідно до регресійного аналізу експериментальних кривих дістаємо $n \sim L^{-1,5+1,8}$ з коефіцієнтами кореляції 0,96 – 0,98.

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

У загальному випадку

$$j = qD \operatorname{grad} n.$$

У більшості випадків заряд аероіонів дорівнює заряду електронів

$$q = e.$$

Ураховуючи відносно низькі концентрації аероіонів у повітрі, для визначення коефіцієнта дифузії D можна використовувати фундаментальне співвідношення кінетичної теорії ідеального газу:

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

де λ – довжина вільного пробігу аероіонів;

\bar{v} – середня швидкість пробігу аероіонів.

Проте для практичного використання більш прийнятне застосування однозначного зв'язку між коефіцієнтом дифузії D та рухомістю K (формула Ейнштейна):

$$D = \frac{kTK}{q},$$

де k – стала Больцмана;

T – температура.

Рухомості аероіонів визначають або з достатньо досліджених спектрів рухомостей [7], або для попереднього оцінювання з визначення легких аероіонів, наданого у відповідних санітарних нормах [14].

Для спрощення розрахунків розглянемо поширення аероіонів уздовж одного з трьох ортогональних напрямків.

У цьому випадку рівняння матиме вигляд:

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

Розв'язуючи рівняння, слід врахувати, що у більшості реальних випадків джерела іонів працюють з постійною (або близькою до неї) продуктивністю, 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 умови наявності примусової циркуляції повітря швидкість його спрямованого руху v буде мати деяке фіксоване значення, а без циркуляції – дорівнюватиме нулю.

Таким чином, маємо лінійне неоднорідне диференціальне рівняння другого порядку:

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

З використанням стандартних методів розв'язання такого рівняння [15], це рівняння набуває вигляду:

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

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:

$$n(x)|_{x=0} = n_1,$$

$$n(x)|_{x=l} = n_0.$$

Обираючи n_1 таким чином, щоб $C_1 = 0$, маємо

$$n_1 = g_0 \tau e^{\frac{l}{\sqrt{D\tau}}} + n_0 + g_0 \tau,$$

а остаточно числовий розв'язок має вигляд

$$n(x) = g_0 \tau e^{\frac{l-x}{\sqrt{D\tau}}} + n_0 - g_0 \tau.$$

Аналіз отриманої моделі свідчить, що вона задовільна для $x > l$, а у безпосередній близькості до джерела аероіонів результати

не відповідають експериментальним даним (значно перевищують реальні концентрації). Це пояснюється великими значеннями показника ступеня через значення коефіцієнта дифузії порядку 10^{-5} м²/с.

Таким чином ускладнюється визначення зміни концентрацій у приміщеннях малих розмірів (параметр l). Для усунення цього недоліку слід враховувати рекомбінацію іонів, яка залежить від початкової концентрації:

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

де Δn – кількість зникаючих іонів;

γ – коефіцієнт рекомбінації,

а також те, що іони поширюються сферично.

У цьому випадку рівняння балансу аероіонів має вигляд

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

де r – відстань до точки визначення концентрації аероіонів.

Загального розв'язку це рівняння не має, і він можливий тільки з використанням числових методів. Обраховували за різних початкових умов і крайових умов

$$n|_{r=0} = n_0,$$

$$n|_{r=\infty} = n_0$$

та порівнявши результати з експериментом [13], можна отримати цілком задовільні результати. Крім того, з наведеного рівняння впливають частинні випадки:

– стаціонарний стан $\left(\frac{dn}{dt} = 0\right)$;

– зміна концентрації за припинення дії іонізатора ($g = 0$).

Таким чином отримано несуперечливу модель розподілу та динаміки аероіонів у приміщеннях за різних умов. Автоматично враховуються процеси, що привалюють на цьому етапі, – дифузія або рекомбінація аероіонів. Сучасне програмне забезпечення дозволяє виконувати розрахунки швидко та з мінімальною трудомісткістю.

Висновки

Моделювання динаміки аероіонного складу повітря дає змогу отримувати задовільні результати для практичного використання.

Наведений метод дозволяє визначити необхідні параметри без використання трудомістких вимірювань.

Розрахунковий метод дозволяє здійснювати оцінку аероіонного складу повітря, яка передуює розміщенню необхідного обладнання у приміщеннях.

Запропонований метод дає змогу оптимізувати розміщення обладнання, яке є джерелом іонів щодо нормалізації аероіонного складу повітря в зонах постійного перебування людей.

Перспективою досліджень є визначення кількісних показників генерації аероіонів найбільш поширеними побутовими і промисловими приладами та врахування спрямованих рухів повітря у приміщеннях.

Література

1. *Чижевский А.А.* Аэроионификация в народном хозяйстве / А.А. Чижевский. – М.: Госпланиздат, 1960. – 758 с.
2. *Думанский Ю.Д.* Умеренно повышенные концентрации лёгких аэроионов и их гигиеническое значение: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. мед. наук / Ю.Д. Думанский. – К., 1963. – 23 с.
3. *Минх А.А.* Ионизация воздуха и её гигиеническое значение / А.А. Минх. – М.: Медгиз, 1963. – 352 с.
4. *Шандала М.Г.* Аэроионизация как неблагоприятный фактор внешней среды / М.Г. Шандала. – К.: Здоровье, 1974. – 164 с.
5. *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.
6. *Жембенко М.Г.* Гигиеническая оценка эффективности применения аэроионизации для повышения умственной работоспособности / М.Г. Жембенко // Гигиена населенных місць. – 2009. – Вип.54. – С. 206–209.

7. *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.
8. *Aplin K.L.* Instrumentation for atmospheric ion measurement: A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Department of Meteorology/ K.L. Aplin // The University of Reading, 2000 – 274 p.
9. *Агрунова А.М.* Биотехнические основы и математическое моделирование создания количественного аэроионного состава газовой среды обитаемых герметичных объектов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук / А.М. Агрунова. – М., 2007. – 30 с.
10. *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. 198–211.
11. *Моделирование* распределения концентрации ионов вблизи ионизатора / В.Е. Бахрушин, М.А. Игнахина, Д.В. Вертинский, А.Ю. Евсюкова // Складні системи і процеси. – 2002. – № 1. – С. 30–35.
12. *Елецкий А.В.* Явление переноса в слабо ионизированной плазме/ А.В. Елецкий, Л.А. Палкина, Б.М. Смирнов. – М.: Атомиздат, 1975. – С. 274–276.
13. *Глива В.А.* Дослідження просторових розподілів аероіонів навколо джерел іонізації повітря у робочих приміщеннях / В.А. Глива // Проблеми охорони праці в Україні. – 2010. – Вип. 19. – С. 123–127.
14. *ДНАОП 0.03-3.06-80* Санітарно-гігієнічні норми допустимих рівнів іонізації повітря виробничих та громадських приміщень № 2152-80. – Режим доступу: www.knukim.edu.kiev.ua
15. *Смирнов В.И.* Курс высшей математики / В.И. Смирнов. – М.: Наука, 1976. – 656 с.

Стаття надійшла до редакції 05.10.2010.