

В.Ф. Фролов¹, О.В. Панова¹, С.В. Зозуля²

¹Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна

²Національний авіаційний університет, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ АЕРОІОННОГО СКЛАДУ ПОВІТРЯ ЗА НАЯВНОСТІ ПРИРОДНИХ І ШТУЧНИХ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗАЦІЇ

Показано, що для проектування будівель і окремих приміщень з нормативними концентраціями легких аероіонів обох полярностей доцільне попереднє розрахункове оцінювання динаміки цього показника у просторі і часі. У загальному випадку для одного напрямку можливо використати рівняння неперервності для слабо іонізованої плазми. Це обумовлене малою концентрацією аероіонів у повітрі. Для визначення необхідних показників – середнього часу життя аероіонів, довжини вільного пробігу використовується співвідношення молекулярно-кінетичної теорії газів. Для визначення середньої швидкості – розподіл Максвелла. Показано, що розповсюдження аероіонів за рахунок дифузійних процесів незначне, а відповідні розрахунки мають великі похибки. Надано розрахунки щодо розповсюдження аероіонів спрямованим рухом повітря від джерела штучної іонізації. Найбільш точно можна розрахувати розподіл концентрацій аероіонів з урахуванням їх рекомбінації, осідання на важкі аероіони та нейтральні завислі частини (дрібнодисперсний пил та аерозолі). Відповідні коефіцієнти у більшості видані з довідкових джерел. За наявності у приміщеннях електростатичних полів, генерованих за рахунок трибоелектричного ефекту та інших чинників необхідно враховувати осідання аероіонів на ці поверхні. Для коректного визначення концентрацій аероіонів крім значень рухомостей негативних та позитивних аероіонів необхідні дані щодо напруженостей електростатичних полів. Значення таких полів непередбачувані, тому вони вимірюються відповідними приладами в аналогічних умовах. Верифікація розрахункових даних з використанням приладів вимірювання електростатичних зарядів та лічильника аероіонів довела прийнятну збіжність очікуваних і реальних даних. Доцільним є розроблення дво- та тривимірних моделей поширення аероіонів обох полярностей у приміщеннях різного призначення, конфігурації розміщення обладнання, наявністю штучних джерел іонізації та спрямованого руху повітря.

Ключові слова: аероіон, штучна іонізація, рекомбінація, електростатичне поле.

Постановка проблеми

Концентрації аероіонів обох полярностей у повітрі виробничих, побутових приміщень та за межами будівлі є важливим показником якості середовища. Тому цей параметр регламентується національними та міжнародними санітарними нормами. Особливістю цього показника є наявність мінімально допустимих концентрацій, що обумовлює, у разі потреби застосовувати штучну іонізацію повітря.

Вимірювання концентрацій аероіонів складне через необхідність здійснювати контроль упродовж принаймні цілого дня великими серіями. Це обумовлене великими паспортними похибками існуючих лічильників аероіонів (30–50%). При цьому показники аероіонізації залежать не тільки від природного радіаційного фону, а й активності будівельних і оздоблювальних матеріалів, електризації поверхонь, мікрокліматичних показників та часу доби.

Тому доцільно запропонувати розрахунковий алгоритм придатний, для оцінювання динаміки

аероіонного складу повітря у залежності від природних чинників, наявності джерел іонізації та деіонізації повітря тощо. Це надасть можливість визначити потребу у додатковій іонізації повітря, продуктивність іонізатора у залежності від розмірів приміщень та організації вентиляції, якості зовнішнього повітря і т. ін.

Наявність розрахункового апарату прийнятної точності за припущеннями й спрощеннями для конкретних умов дозволить попередньо оцінити якість повітря у приміщеннях та розробити раціональні схеми розміщення обладнання й робочих місць, необхідну продуктивність вентиляції та показники інших взаємопов'язаних фізичних чинників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На сьогоднішній день більшість уваги приділяється розробленню пристроїв штучної іонізації повітря та моделюванню розповсюдження аероіонів від джерела іонізації [1–3]. Якщо розроблення засобів штучної іонізації повітря спрямоване на

відмову від високовольтних розрядних пристроїв, що є слушним, то моделювання поширення аероіонів спирається виключно на класичні роботи [4, 5].

Застосований у них математичний апарат певним чином застарів через зміну врахованих критичних чинників впливу на концентрації аероіонів. Крім того для багатьох випадків запропонований математичний апарат є надлишковим і може бути використаний для складних моделей, що не завжди потрібно у практичній діяльності.

В останні роки виконано низку досліджень, які є комбінацією розрахункових та експериментальних методів [6, 7]. Такі комбінації показали прийнятну збіжність змодельованих і вимірених показників. Але ці роботи мають окремий характер і стосуються конкретних умов і засобів іонізації повітря.

Не дивлячись на відому залежність аероіонізації повітря від радіаційного фону, цей фактор ніколи не враховується у розрахунках (вважається сталим іонний склад).

Крім того змінився характер електризації поверхонь, що пов'язане не тільки з трибоелектричним ефектом, а й зміною моделі технологічного обладнання [8]. Майже в усіх дослідженнях вважається, що джерело штучної іонізації працює неперервно і визначаються концентрації аероіонів обох полярностей на різних відстанях [9]. Але у реальних умовах генерація іонів може бути від'ємною (деіонізація повітря технічними засобами), а спрямований рух повітря – довільним.

На сьогоднішній день відсутні або не систематизовані прості у використанні співвідношення, які дозволяють оперативно оцінити динаміку аероіонного складу повітря у просторі та часі.

Мета статті

Надати прийнятний за похибками і зручний у практичній роботі розрахунковий апарат для оцінки динаміки концентрацій аероіонів у приміщеннях в умовах впливу різних факторів іонізації та деіонізації повітря.

Виклад основного матеріалу

Відомо, що концентрації аероіонів обох знаків у нормальних умовах (без штучної іонізації/деіонізації повітря) залежить від рівня іонізуючих фонових випромінювань. Для оцінки цього впливу доцільно застосувати позасистемну одиницю іонізуючого випромінювання – рентген.

За визначенням $1P \approx 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$, що відповідає генерації за нормальних умов (300 K ; $1,3013 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$) у сухому повітрі складає $2,08 \cdot 10^9$ пар іонів у одному кубічному сантиметрі повітря. Таким чином, можна визначити

природну генерацію аероіонів у залежності від радіаційного фону у приміщенні.

Але процес генерації аероіонів супроводжується їх рекомбінацією, тобто існує середній час життя аероіонів у даних умовах. Малогабаритні характеристики іонів практично не відрізняються від характеристик неіонізованих молекул. Середній час життя τ можливо розрахувати, виходячи зі співвідношень молекулярно-кінетичної теорії газів:

$$\tau = \frac{\lambda}{v},$$

де λ – середня довжина пробігу до зіткнення з іншим іоном, v – середня швидкість іона.

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

де σ – ефективний діаметр іона;
 n_0 – концентрація.

Середні швидкості молекул визначаються розподілом Максвелла. Для нормальних умов $v \approx 5 \cdot 10^4 \text{ см/с}$, $\sigma \approx 2,8 \cdot 10^{-6} \text{ см}$. Тому для мінімально допустимих концентрацій негативних аероіонів $1 \cdot 10^3 \text{ с}$, для оптимальних концентрацій $\tau \approx 1,2 \cdot 10^2 \text{ с}$.

Для зміни концентрацій аероіонів з часом та відстанню від джерела іонізації можливо застосувати рівняння неперервності для слабоіонізованої плазми:

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

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

$g(r, t)$ – кількість аероіонів, що генеруються у даній точці у одиниці об'єму у одиницю часу;

n_0 – фонові концентрація аероіонів;

τ – середній час життя аероіону;

g – його заряд;

j – густина електричного струму за рахунок руху аероіонів;

v – швидкість потоку повітря.

Зазвичай, без спеціальних заходів швидкість руху невелика, тому електричним струмом можна нехтувати:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g_0 - \frac{n - n_0}{\tau}.$$

Враховуючи, що:

$$g_0 = \frac{n_0}{\tau} - const,$$

маємо лінійне диференціальне рівняння першого порядку, розв'язком якого є:

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

Стала інтегрування C визначається за конкретних умов – з початкової умови Коші:

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

За малих концентрацій аероіонів порівняно з концентраціями молекул повітря та відсутності його спрямованого руху доцільно застосувати співвідношення кінетичної теорії газів для розповсюдження за рахунок дифузійних процесів:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = g(x, t) - D \left(\frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \right) - \frac{n - n_0}{\tau_n},$$

де D – коефіцієнт дифузії іонів;

τ_n – середній час життя за концентрації n .

Враховуючи, що рухомості легких аероіонів відомі зі спектра рухомостей, коефіцієнт дифузії однозарядного іона визначається із формули Ейнштейна:

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

де k – стала Больцмана;

T – температура;

K – рухомість аероіона;

e – заряд електрона.

Практичний інтерес в умовах штучної іонізації повітря представляє випадок неперервної роботи джерела іонізації:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 0.$$

За цієї умови рівняння неперервності набуває вигляду:

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

Для отримання кількісних даних необхідно задати крайові умови:

$$n|_{x=0} = n_1, \quad n|_{x=l} = n_0,$$

де l – відстань, на якій концентрація аероіонів зрівнюється з фоновою.

За стандартного розв'язку рівняння отримуємо:

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

Цей розрахунок може бути тільки оціночним через значні розбіжності з експериментом, що можна пояснити неврахованим електростатичним полем та взаємодіями іонів з нейтральними молекулами.

У найпростішому випадку, за припинення штучної генерації іонів:

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

де n – концентрація аероіонів;

α – коефіцієнт рекомбінації.

Тобто:

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

де n_0 – концентрація аероіонів у момент припинення їх генерації;

n – за проміжок часу t .

$$n = \frac{n_0}{1 + \alpha n_0 t}.$$

Але у приміщеннях обмежених об'ємів з наявністю у повітрі дрібнодисперсного пилу та аерозолів ці фактори необхідно враховувати для отримання коректних результатів.

Для більш точного визначення концентрацій легких аероіонів необхідно враховувати наявність у повітрі нейтральних частинок і важких аероіонів, на які відбувається осадження легких аероіонів. Це зменшує їх концентрації у повітрі приміщень. Такий процес можна описати рівняннями:

$$\frac{dn^-}{dt} = q - \alpha n^- n^+ - \beta^- n^- N^+ - \beta_0^- n^- N \quad (1)$$

$$\frac{dn^+}{dt} = q - \alpha n^- n^+ - \beta^+ n^+ N^- - \beta_0^+ n^+ N \quad (2)$$

де n^-, n^+ – концентрації негативних та позитивних легких аероіонів, см^{-3} ;

q – рівень генерації пар легких аероіонів, см^{-3} ;

α – коефіцієнт рекомбінації легких аероіонів;

β^-, β^+ – коефіцієнти осадження негативних та позитивних аероіонів на важкі;

N^-, N^+ – концентрації важких негативних та позитивних аероіонів, см^{-3} ;

β_0^-, β_0^+ – коефіцієнти осадження негативних та позитивних аероіонів на нейтральні частинки;

N – концентрація нейтральних частинок, см^{-3} .

Усі необхідні коефіцієнти або відомі з довідкових джерел, або можуть бути визначені експериментально.

Якщо у приміщеннях наявні поверхні, що несуть статичні заряди (наелектризовані підлогові покриття, полімерні оздоблювальні матеріали, незаземлене обладнання тощо) це треба враховувати при визначенні концентрацій легких аероіонів.

Необхідні складові рівнянь (1) і (2) визначаються з фундаментальних співвідношень електростатики. У цьому випадку до рівняння (1) додається:

$$-\frac{\mu^- E n^-}{r^2} + \frac{\mu^- E n_{r+1}^-}{(r+1)^2},$$

а до рівняння (2) додається:

$$-\frac{\mu^+ E n^+}{r^2} + \frac{\mu^+ E n_{r+1}^+}{(r+1)^2},$$

де μ^+ , μ^- – рухливості негативних та позитивних легких аероіонів, $\text{см}^2/\text{Вс}$;

E – напруженість електростатичного поля на відстані l см від його джерела, В/см ;

r – відстань від джерела електростатичного поля до досліджуваної зони, см;

n_{r+1}^+ , n_{r+1}^- – концентрації позитивних та негативних аероіонів у 1 см^3 об'єма, суміжних з досліджувальними з боку джерела електростатичного поля.

Рухомості легких аероіонів відомі, а напруженості електростатичних полів необхідно вимірювати у конкретних умовах.

Для перевірки адекватності розрахункового апарату була виконана серія експериментів. Напруженість електростатичного поля вимірювалася вимірювачем електростатичних зарядів ІЕЗ-П, а концентрації легких аероіонів – лічильником аероіонів МАС-01. Експерименти довели прийнятну збіжність розрахункових та експериментальних даних.

Отримані результати свідчать про доцільність попереднього оцінювання концентрацій та просторового розподілу аероіонів під час проектування розміщення обладнання у приміщеннях, організації систем вентиляції та кондиціонування повітря.

Перспективним напрямом досліджень є дво- та тривимірне моделювання розподілу аероіонів у приміщеннях з урахуванням спрямованих рухів повітря та розміщення обладнання.

Висновки

1. Показано, що під час проведення проектвальних робіт з розміщення обладнання та робочих

місць у виробничих приміщеннях доцільне попереднє розрахункове оцінювання аероіонного режиму приміщень.

2. Метод розрахунків обирається у залежності від фонових значень концентрацій легких аероіонів, якості зовнішнього повітря, наявності у приміщеннях джерел іонізації (деіонізації) повітря, швидкості спрямованого руху повітря, наявності поверхонь з електростатичними зарядами тощо.

3. Для спрощення та прискорення робіт з проектування виробничих, навчальних та побутових приміщень з нормативними значеннями концентрацій легких аероіонів доцільно розробити на основі наведених математичних співвідношень дво- та тривимірних моделей розподілу концентрацій аероіонів з урахуванням усіх критичних факторів впливу на цей показник.

Література

1. Марченко В.Г. Исследование термовлажностных процессов в аппаратах кондиционирования воздуха, изменяющих аэроионный состав воздуха // Проблемы региональной энергетики. – 2015. – Вып. 3(29). – С. 86–91.
2. Magnier-Bergeron L. Three-dimensional model of air speed in the secondary zone of displacement ventilation jet / Magnier-Bergeron L., Derome D., Zmeureanu R. // Building and Environment. – 2017. – Vol. 114. – P. 483–494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.003>
3. Беляев Н.Н. Математическое моделирование аэроионного режима в помещении при искусственной ионизации воздуха / Беляев Н.Н., Цыганкова С.Г. // Строительство, материаловедение, машиностроение. – 2015. – № 83. – С. 40–46.
4. Кузмичев В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузмичев. – К. : Наукова думка, 1989. – 864 с.
5. Fletcher L.A. Air Ion Behavior in Ventilated Rooms / Fletcher L.A., Noakes C.J., Sleigh P.A., Beggs C.B., Shepherd S.J. // Indoor and Built Environment. – 2008. – Vol. 17, Is. 2. – P. 173–182. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326x08089622>
6. Glyva V. Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields / Glyva V., Bakharev V., Kasatkina N., Levchenko O., Levchenko L., Burdeina N., Guzii S., Panova O., Tykhenko O., Biruk Y. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – Vol. 3, No 6 (111), 25–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>
7. Ченчевой В.В. Дослідження параметрів гідроаероіонного складу повітря робочого приміщення з ультразвуковою іонізацією / Ченчевой В.В., Сукач С.В., Ченчева О.О., Федорова Н.С., Григор'єва Д.С. // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2020. – Вып. 2(47). – С. 168–174. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-168-175>
8. Глива В.А. Дослідження рівнів фізичних факторів у приміщеннях диспетчерських служб аеропортів цивільної авіації / Глива В.А., Ніколаєв К.Д., Тихенко О.М., Тимошенко О.П. // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2019. – Вып. 1(53). – С. 32–35. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.032>
9. Беляев Н.Н. Оценка аэроионного режима в рабочей зоне при искусственной ионизации воздуха в помещении /

Беляев Н.Н., Цыганкова С.Г. // *Научный вестник строительства*. – 2015. – № 3(81). – С. 158–161.

References

1. Marchenko, V.G. (2015). Research of the temperature and humidity processes in the air conditioning apparatus varying air ion concentration. *Problemele Energeticii Regionale*, 3(29), 86–91. [in Russian]
2. Magnier-Bergeron, L., Derome, D., Zmeureanu, R. (2017). Three-dimensional model of air speed in the secondary zone of displacement ventilation jet. *Building and Environment*, 114, 483–494. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.003>
3. Belyaev, N.N., Cygankova, S.G. (2015). Matematicheskoe modelirovanie aeroionnogo rezhima v pomeshenii pri iskusstvennoj ionizacii vozduha. *Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie*, 83, 40–46. [in Russian]
4. Kuzmichev, V.E. (1989). *Zakony i formuly fiziki*. Kiev, Naukova dumka. [in Russian]
5. Fletcher, L.A., Noakes, C.J., Sleight, P.A., Beggs, C.B., Shepherd, S.J. (2008). Air Ion Behavior in Ventilated Rooms. *Indoor and Built Environment*, 17(2), 173–182. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326x08089622>
6. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., Biruk, Y. (2021). Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3 (6(111)), 25–31. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>
7. Chenchevoy, V., Sukach, S., Chencheva, O., Fjodorova, N., Hryhorieva, D. (2020). Study of parameters of hydro-aero-ionic composition of working room air with ultrasonic ionization. *Journal of Donetsk Mining Institute*, 2(47), 168–174. DOI: <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2020-2-168-175> [in Ukrainian]
8. Glyva, V., Nikolaiev, K., Tykhenko, O., Tymoshenko, O. (2019). The study of physical factors levels in the control

tower service premises of civil aviation airport. *Control, navigation and communication systems*, 1(53), 32–35. DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2019.1.032> [in Ukrainian]

9. Belyaev, N.N., Cygankova, S.G. (2015). Ocenka aeroionnogo rezhima v rabochej zone pri iskusstvennoj ionizacii vozduha v pomeshenii. *Naukovij visnik budivnictva*, 3(81), 158–161. [in Russian]

Рецензент: д-р техн. наук, проф. О.С. Волошкіна, Київський національний університет будівництва і архітектури, Україна.

Автор: ФРОЛОВ Валерій Федорович
доктор технічних наук, проф., проф. кафедри фізики
Київський національний університет будівництва і архітектури

E-mail – frolov.vf@knuba.edu.ua

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1675-8476>

Автор: ПАНОВА Олена Василівна
кандидат технічних наук, доц., доц. каф. фізики
Київський національний університет будівництва і архітектури

E-mail – elenapanova169@gmail.com

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7975-1584>

Автор: ЗОЗУЛЯ Сергій Васильович
старший викладач кафедри цивільної та
промислової безпеки

Національний авіаційний університет

E-mail – sergeyoz@ukr.net

ID ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1192-8088>

FORECASTING THE AEROION COMPOSITION OF AIR IN THE PRESENCE OF NATURAL AND ARTIFICIAL SOURCES OF IONIZATION

V. Frolov¹, O. Panova¹, S. Zozulya²

¹Kyiv National University of Construction and Architecture, Ukraine

²National Aviation University, Ukraine

It is shown that for the design of buildings and individual rooms with normative concentrations of light air ions of both polarities, a preliminary estimated assessment of the dynamics of this indicator in space and time is appropriate. In the general case, it is possible to use the continuity equation for weakly ionized plasma for one direction. This is due to the low concentration of air ions in the air. The ratio of molecular kinetic theory of gases is used to determine the necessary indicators - the average lifetime of air ions, free path length. To determine the average speed - Maxwell's distribution. It is shown that the propagation of air ions due to diffusion processes is insignificant, and the corresponding calculations have large errors. Calculations on the propagation of air ions by directed air movement from the source of artificial ionization are given. The distribution of air ion concentrations can be most accurately calculated taking into account their recombination, deposition on heavy air ions and neutral suspended parts (fine dust and aerosols). Relevant coefficients are mostly issued from reference sources. If there are electrostatic fields in the premises, generated due to the triboelectric effect and other factors, it is necessary to take into account the deposition of air ions on these surfaces. In order to correctly determine the concentrations of air ions, in addition to the values of the mobility of negative and positive air ions, data on electrostatic field strengths are required. The values of such fields are unpredictable, so they are measured by appropriate instruments in similar conditions. Verification of calculated data using electrostatic charge meters and air ion counter proved the reasonable convergence of expected and actual data. It is advisable to develop two- and three-dimensional models of the propagation of air ions of both polarities in rooms of different purposes, configurations of equipment placement, the presence of artificial ionization sources and directional air movement.

Keywords: aeroion, artificial ionization, recombination, electrostatic field.