

В. А. Глива¹, О. М. Тихенко², Г. Ю. Краснянський¹, С. В. Зозуля²

¹ Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

² Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ КОНЦЕНТРАЦІЙ АТМОСФЕРНИХ АЕРОЗОЛІВ, ПИЛУ ТА АЕРОІОНІВ

Анотація. Проведено дослідження змін концентрації атмосферних аероіонів та завислих частинок. Дослідження здійснювалося за припущення, що легкі аероіони однаковим чином осідають на частинки аерозолів та дрібнодисперсного пилу. За вихідні дані необхідно брати генерацію аероіонів внаслідок природної радіоактивності, яка є у даному випадку головним фактором іонізації. У відповідних рівняннях коефіцієнти рекомбінації аероіонів, осідання на нейтральні та протилежно заряджені завислі частинки бралися середніх значень, які відомі з довідкових джерел. Наявність електричного поля масиву аероіонів не враховувалося через відносно малі концентрації аероіонів у атмосферному повітрі за нормальних умов. Проведено верифікацію результатів розрахунків у тестовому приміщенні з відомою генерацією аероіонів та завислих частинок у вигляді аерозолів. Результати тестування показали прийнятний збіг розрахованих та експериментальних даних. Невідповідності, зокрема немонотонність кривих змін концентрацій аероіонів та аерозолів обумовлена великими паспортними похибками вимірювальної апаратури та впливом аерозолів на вимірювання концентрації аероіонів. Для оцінки динаміки концентрацій аероіонів та завислих частинок у реальній атмосфері слід враховувати градієнт та спрямований рух аероіонів у приземному шарі повітря та неоднороззначний вплив відносної вологості повітря на концентрації аероіонів. Враховуючи складність вимірювань малих концентрацій у повітрі частинок усіх категорій, розрахунковий метод можна вважати цілком прийнятним.

Ключові слова: аероіони, аерозоль, пил, завислі частинки, коефіцієнт рекомбінації.

Вступ

Концентрації аерозолів, пилу та аероіонів є важливим показником якості повітря. Тому дослідженню змін концентрацій завислих частинок та аероіонів приділяється багато уваги. Більшість робіт у цьому напрямі стосується великих концентрацій пилу у повітрі промислових майданчиків, промислових підприємств – кар'єрів, гірничо-збагачувальних комбінатів, об'єктів будівництва. Це ж стосується аерозолів. Зміни концентрацій аероіонів визначаються здебільшого у приміщеннях у залежності від радіаційного фону, електризації поверхонь, рекомбінації іонів різної полярності тощо. При цьому недостатньо уваги приділяється дослідженню їх взаємодії. Відомо, що аероіони осідають на завислі частинки і надають їм електричний заряд, тобто створюються важкі аероіони, які також взаємодіють між собою. Тому актуальною задачею є дослідження одночасних змін концентрацій аероіонів та завислих частинок різного походження.

Огляд літературних джерел. Більшість робіт з цієї проблематики стосується аероіонного режиму приміщень [1, 2]. Вони розглядають залежності концентрацій аероіонів від наявності джерел деіонізації. Такими джерелами є засоби обчислювальної техніки. У дослідженні [3] показано, що існує прямий зв'язок між концентраціями аероіонів, вологістю повітря та складом атмосферного повітря – значенням полярності аероіонів. У роботах [4–6] ґрунтовно досліджено зв'язок між концентраціями аероіонів та напруженостями електростатичних полів. У роботах [7, 8] показана залежність концентрацій пилу та аероіонів. Ці роботи базуються на рівняннях класичних досліджень [9, 10]. Але отримані результати суто теоретичні. Тому частина коефіцієнтів у рівняннях балансу аероіонів не представлена. Виходячи з цього доцільно визначити експериментально зміну концентрацій аероіонів та завислих частинок за рахунок їх взаємодії.

Мета роботи – дослідження змін концентрацій завислих частинок у атмосферному повітрі за рахунок взаємодії з аероіонами.

Викладення основного матеріалу

Процеси взаємодії атмосферних аероіонів із завислими частинками можна описати аналітично за умови наявності експериментальних даних щодо фонових значень концентрацій усіх частинок та відповідних коефіцієнтів щодо їх взаємодії. Такими коефіцієнтами є коефіцієнти рекомбінації легких аероіонів протилежних знаків, коефіцієнти осадження аероіонів на завислі частинки, коефіцієнти осадження аероіонів на важкі іони (ними можна вважати заряджені аерозолі та порошинки).

У загальному випадку рівняння балансу аероіонів та завислих частинок мають вигляд:

$$\frac{dn^-}{dt} = q - \alpha n^- n^+ - \beta^- n^- N^+ - \beta_0^- n^- N,$$

$$\frac{dn^+}{dt} = q - \alpha n^- n^+ - \beta^+ n^+ N^- - \beta_0^+ n^+ N,$$

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} .

У разі наявності електростатичних полів до рівнянь додаються наступні складові:

– до першого рівняння додається:

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

– до другого рівняння 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, $\text{см}^2/\text{В}/\text{с}$; E – напруженість електростатичного поля на відстані 1 см від його джерела, $\text{В}/\text{см}$; 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'єму, суміжних з досліджувальними з боку джерела електростатичного поля.

У реальних умовах відкритого повітря концентрації аероіонів не перевищують $1000\text{--}1200 \text{ см}^{-3}$, а відсутність заряджених поверхонь дозволяє нехтувати наявністю електростатичних полів та загальним електростатичним полем аероіонів. Коефіцієнти рекомбінації іонів у кожному окремому випадку може бути визначений зі значення радіоактивного фону. В умовах динамічної рівноваги кількість генерованих іонів дорівнює кількості рекомбінованих. Розрахунок можна здійснити, виходячи з іонізаційного визначення одиниці експозиційної дози іонізуючого випромінювання ($1\text{P} \approx 2,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}/\text{кг}$, у 1 м^3 повітря генерується іонізаційний заряд $3,4 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$).

За нормальних умов коефіцієнт рекомбінації

$$\alpha = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}.$$

З експериментальних даних відомо, що

$$\beta^- = 4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}, \quad \beta^+ = 3,97 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с},$$

$$\beta_0^- = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}, \quad \beta_0^+ = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}.$$

Для оцінки адекватності розрахунків було проведено експериментальне дослідження взаємозалежності концентрацій аероіонів та завислих частинок. Виконання такого експерименту у відкритому атмосферному повітрі ускладнюється малими концентраціями аероіонів та аерозолів і великими похибками вимірювальної апаратури. Тому експеримент здійснювався у тестовому приміщенні. Температура повітря складала $24\text{--}25 \text{ }^\circ\text{C}$, відносна вологість – $90\text{--}100 \%$. Зміни концентрацій досліджувальних частинок наведено на рис. 1. Отриманий результат свідчить про чітку взаємну залежність концентрацій аероіонів та завислих частинок. Оцінка здійснювалася за негативними іонами.

У загальному випадку це не зовсім коректно, але врахування аероіонів обох знаків обумовлює врахування електричного поля, що неможливо здійснити експериментально. Існуючі прилади не реєструють поля сукупності аероіонів, а наявність заряджених поверхонь автоматично веде до появи градієнтів концентрацій частинок. Також слід враховувати, що в умовах реальної атмосфери поза приміщенням існує природний градієнт концентрацій аероіонів у

приземному шарі і залежність концентрацій аероіонів від відносної вологості повітря (рис. 2).

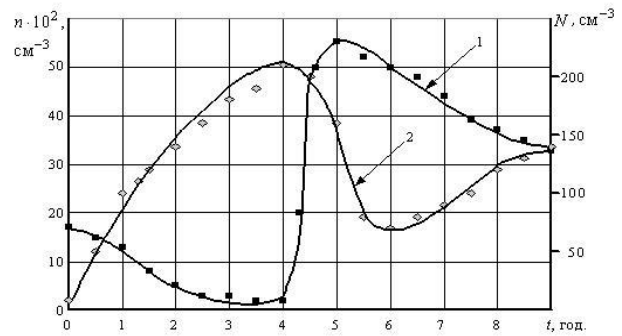


Рис. 1. Зміна концентрацій легких аероіонів (n – графік 1) та завислих частинок (N – графік 2) у приміщенні

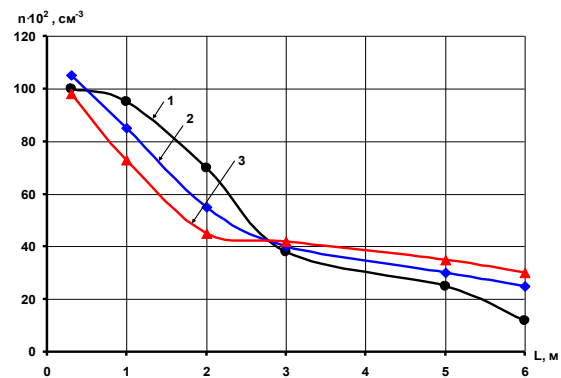


Рис. 2. Зміна концентрацій легких негативних аероіонів з відстанню від джерела для різних відносних вологостей повітря: 1, 2, 3 відповідають відносним вологостям повітря відповідно 40 %, 50 %, 60 %

У даному випадку відстань від джерела іонізації відображає інтенсивність осідання аероіонів на аерозольні частинки. Як видно з рис. 2, за більш високої вологості за великих концентрацій аероіонів вони інтенсивніше осідають на частинки води, утворюючи важкі іони, але зі зменшенням концентрацій ці процеси нівелюються.

Отримані дані взаємної залежності концентрацій аерозолів та аероіонів можуть бути використані для очищення повітря у приміщеннях з великими концентраціями завислих частинок. Як зазначалося вище, аероіони однаковим чином осідають на частинки аерозолів та дрібнодисперсного пилу. Якщо за допомогою іонізатора повітря підвищити концентрації аероіонів, то вони будуть заряджати завислі частинки. В умовах формування електростатичного поля вони будуть дрейфувати у бік поверхонь та осідати на них. Таким чином буде здійснюватися очищення повітря від механічних домішок. Застосування ультразвукового іонізатора дозволить вирішити ще одну задачу. Принцип роботи ультразвукового іонізатора полягає у наступному: коливання ультразвукової частоти подрібнюють воду, яка подається на випромінювач. Внаслідок балоелектричного ефекту відбувається утворення аероіонів. Таким чином відбувається як іонізація повітря, так і його зволоження. Більш вологе повітря сприяє додатковому видаленню дрібнодисперсного пилу.

Представлені математичні співвідношення та реальні коефіцієнти рекомбінації та осідання аероіонів на нейтральні та заряджені завислі частинки з різними зарядами дозволяє попередньо оцінити необхідні продуктивності іонізатора для очищення повітря та ступені деіонізації повітря у залежності від концентрації завислих частинок. У зв'язку цим доцільно доопрацювати наведені співвідношення з метою зниження похибки розрахунків. Для цього необхідно отримати експериментальні дані щодо напруженості електростатичних полів усієї сукупності аероіонів, а також дані щодо напруженості електростатичних полів поверхневих зарядів і пов'язаних з ними градієнтів концентрацій аероіонів поблизу поверхні. Також доцільно визначити переважні знаки поверхневих електростатичних зарядів на типовому обладнанні з полімерними облицюваннями.

В цілому, враховуючи складність одночасних вимірювань концентрацій аероіонів та завислих частинок, розрахунковий метод є прийнятним, для оцінки стану атмосферного повітря.

Висновки

1. Для оцінки стану атмосферного повітря за вмістом аероіонів та зважених частинок доцільно використовувати розрахунковий метод. Для коректного визначення шуканих параметрів необхідно мати надійні дані щодо генерації легких аероіонів. Це можливо здійснювати за значеннями радіоактивного фону.

2. Верифікація результатів розрахунків у тестовому приміщенні за фіксованої генерації аероіонів та аерозолів довела прийнятний збіг розрахункових та експериментальних даних. Велика похибка вимірювань обумовлена впливом завислих частинок на лічильника аероіонів.

3. В умовах реальної атмосфери необхідно враховувати градієнт та спрямований рух аероіонів у приземному шарі повітря та суттєву залежність концентрацій аероіонів та їх просторових змін від відносної вологості повітря.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Панова О.В., Левченко Л.О., Теслицький І.А. Дослідження аероіонізації повітря у приміщеннях з експлуатації комп'ютерної техніки. *Комунальне господарство міст*. Серп: Техн. науки та архітектура. 2021. Т/4, № 164. С.215-219.
2. Касаткіна Н.В., Панова О.В., Ніколаєв К.Д. Інноваційні підходи до нормалізації якості повітря виробничого середовища. Збірник наукових праць «Системи управління навігації та зв'язку». Полтава. 2021. Вип. №4 (66) С. 87-89.
3. Volibrukh, V., Glyva, V., Kasatkina, N., Levchenko, L., Tykhenko, O., Panova, O., Bogatov, O., Petrunok, T., Aznaurian, I., & Zozulya, S. (2022). Monitoring and management ion concentrations in the air of industrial and public premises. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10(115)), 24–30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.253110>.
4. Глива В. А., Бурдейна Н. Б., Зозуля С. В. Дослідження динаміки аероіонного складу повітря на робочому місці користувача персонального комп'ютера з урахуванням електромагнітних чинників. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Т. 2 (68). С. 99–101
5. Фролов В. Ф., Панова О. В., Зозуля С. В. Прогнозування аероіонного складу повітря за наявності природних і штучних джерел іонізації. *Комунальне господарство міст*. 2022. 1 (168), С. 129–133
6. Глива В. А., Тихенко О. М., Зозуля С. В., Козлітін О. О. Дослідження впливу електростатичних полів на концентрації аероіонів на комп'ютеризованих робочих місцях. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2023. Т. 2 (72). С. 179–182.
7. Водяник А.О., Бесараб О.М., Сербінова Л.А. Методи й засоби визначення аероіонного складу повітря та концентрацій пилу в виробничих умовах. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2011. № 20. С. 66–70.
8. Сукач С.В., Сидоров О.В. Методологічні засади підвищення якості контролю аероіонного складу повітря виробничого середовища. *Проблеми охорони праці в Україні*. 2016. № 32. С. 127–133.
9. Виснапуу Л.Ю. Электрическое заряджение частиц аэрозоля с применением коронного разряда. *Ученые записки Тартуского государственного университета*. 1981. Тарту. Вып. 588. С. 77 – 83.
10. Noakes C.J., Sleigh P.A., Beggs C.B. Modelling the air cleaning performance of negative air ionisers in ventilated rooms. *Proceeding of the 10 th Int.Conference on Air Distribution in Rooms (Roomvent 2007)*, 13 – 15 June 2007. – Helsinki, 2007. – 11 p.

Received (Надійшла) 12.12.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 07.02.2024

Study of the dynamics of atmospheric aerosols, dust and aeroions concentrations

V. Glyva, O. Tykhenko, G. Krasnianskyi, S. Zozulya

Abstract. A study of changes in the concentration of atmospheric aeroions and suspended particles was carried out. The research was carried out under the assumption that light aeroions settle on aerosol particles and fine dust particles in the same way. As the initial data, it is necessary to take the generation of aeroions as a result of natural radioactivity, which is the main factor of ionization in this case. In the corresponding equations, the coefficients of recombination of aeroions, settling on neutral and oppositely charged suspended particles were taken as average values, which are known from reference sources. The presence of the electric field of the array of aeroions was not taken into account due to the relatively small concentrations of aeroions in atmospheric air under normal conditions. Verification of the calculation results was carried out in a test room with a known generation of aeroions and suspended particles in the form of aerosols. The test results showed an acceptable match between the calculated and experimental data. Discrepancies, in particular non-monotony of the curves of changes in the concentrations of aero-ions and aerosols, are caused by large passport errors of the measuring equipment and the influence of aerosols on the measurement of the concentration of aero-ions. To assess the dynamics of concentrations of air ions and suspended particles in the real atmosphere, one should take into account the gradient and directional movement of air ions in the surface layer of the air and the ambiguous influence of relative air humidity on the concentration of air ions. Considering the complexity of measuring small concentrations of particles in the air of all categories, the calculation method can be considered quite acceptable.

Keywords: aeroions, aerosol, dust, suspended particles, recombination coefficient.