

Моніторинг та управління концентраціями іонів у повітрі приміщень промислового та громадського призначення

Б. В. Болібрух, В. А. Глива, Н. В. Касаткіна, Л. О. Левченко, О. М. Тихенко, О. В. Панова, О. І. Богатов, Т. Б. Петруньок, І. О. Азнаурян, С. В. Зозуля

Обґрунтовано метод і розроблено пристрій управління концентраціями іонів повітря приміщень згідно європейських стандартів SBM 2015. Застосування ультразвукового зволожувача повітря потужністю 25 Вт упродовж двох годин підвищує концентрацію негативних іонів навколо пристрою з 240 до 560 см^{-3} , позитивних з 260 до 410 см^{-3} . Напруженість електростатичного поля полімерного покриття знижується з 5,1 до 0,2 кВ/м. Недоліком зволожувача є малий радіус впливу (1,0–1,5 м) та неможливість керування полярністю іонів. Експериментально встановлено, що системи охолодження повітря (спліт-системи) деіонізують повітря приміщень. Ступені деіонізації і переважні полярності непередбачувані і різні для пристроїв різних виробників і марок. Для регулювання іонного складу повітря одночасно з підтриманням нормативної відносної вологості та напруженостей статичних полів запропоновано конструкцію і випробувано ефективність біполярного ультразвукового іонізатора повітря з керованою продуктивністю та переважною полярністю. Максимальна продуктивність іонізатора становить 4000–5000 см^{-3} . Радіус впливу – 5 м (зниження концентрації іонів з відстанню до нормативних 500 см^{-3}). За пропускання іонізованого повітря крізь повітряний конденсатор кількість та переважна полярність іонів повітря регулюється полярністю та напругою на обкладинках конденсатора. Встановлено, що для обслуговування приміщення площею 50 м^2 достатньо ультразвукового випромінювача потужністю 25 Вт. Регульованість продуктивності пристрою дозволяє зменшити або збільшити площу обслуговування. Показана можливість очищення повітря від завислих частинок. За дві години роботи іонізатора вміст пилу знизився з 4,3–4,4 мг/м^3 до 1,4–1,6 мг/м^3 .

Ключові слова: мікроклімат, іонізація повітря, електростатичний заряд, ультразвуковий зволожувач, трибоелектричний ефект, очищення повітря.

1. Вступ

Фізико-хімічні властивості повітря є одними з головних показників якості виробничого та побутового середовища. Наявність у повітрі хімічних сполук техногенного походження розглядають на підприємствах певного профілю або у районах їх розташування. У переважній більшості виробничих та побутових умов якість повітря оцінюють за мікрокліматичними показниками – температурою, відотною вологістю та швидкістю спрямованого руху повітря. Ці параметри впливають на теплообмін людини з оточуючим середовищем. При цьому поза увагою залишаються такі важливі показники як іонізація повітря, статична електрика. Ці показники вважаються кліматичними і кількісно регламентують-

ся у європейському будівельному стандарті SBM-2015 [1]. Концентрації іонів обох знаків повинні бути більшими за 500 см^{-3} , напруженість електростатичного поля меншою за $0,5 \text{ кВ/м}$. Однак концентрації іонів у повітрі залежать від напруженості електростатичних полів. Взаємно залежними є концентрації іонів та дрібнодисперсного пилу і аерозолей. Завислі частинки деіонізують повітря до значень, нижчих за нормативні [2]. Ці фактори та залежності необхідно враховувати при оцінці і регулюванні параметрів повітряного середовища. Навіть сучасні автоматизовані системи клімат-контролю не вирішують цих задач. При цьому на іонний склад повітря впливають навіть матеріали, з яких виготовлені повітроводи систем вентиляції, лопаті вентиляторів тощо. А деіонізоване повітря негативно впливає на здоров'я, біологічний вік і працездатність людей [3].

Враховуючи неоднозначний вплив системи вентиляцій, електризацію полімерних поверхонь, різну якість повітря ззовні будівлі, яке використовується для вентиляції, актуальною задачею є розроблення загальних засад управління якістю повітря у приміщеннях різного призначення. Це вимагає проведення експериментальних досліджень динаміки мікрокліматичних параметрів за умови функціонування систем охолодження і зволоження повітря, штучної іонізації тощо. Це дозволить розробити організаційно-технічні заходи з нормалізації і підтримання на нормативному рівні усіх критичних параметрів, які впливають на якість повітря промислових та громадських приміщень.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Проблеми, пов'язані з підтриманням нормативних значень основних мікрокліматичних параметрів – температури, відносної вологості та швидкості спрямованого руху повітря, технічно майже вирішені. Більшість сучасних досліджень щодо якості повітряного середовища стосуються його іонізації, вмісту пилу та аерозолей. У роботі [4] показано, що наявність переважної кількості негативних іонів у повітрі сприяє підвищенню працездатності людини і покращує самопочуття. Дослідження [5] доводить, що за допомогою штучної іонізації повітря можливим є видалення з повітря дрібнодисперсного пилу та аерозолей, що зменшує імовірність поширення COVID-19, який передається крапельним шляхом. Але при цьому не надано будь-яких технічних рішень. У роботі [6] показана можливість застосування іонізатора повітря для часткового очищення від дрібнодисперсного пилу. Але застосування іонізації повітря за рахунок коронних розрядів має значні побічні ефекти – генерацію озону та оксидів азоту, що мають токсичний вплив на організм людини. За великих продуктивностей іонізатора можливі перевищення гранично допустимих рівнів цих хімічних сполук. До того ж осідання пилу на електричних пластинах потребує його періодичного видалення. Математичний апарат, який дозволяє оцінити зв'язок концентрацій іонів обох знаків та зважених частинок у повітрі наведений у [7]. За деякого вдосконалення його можна застосувати для розрахунків потрібної продуктивності іонізатора. У дослідженні [8] проведено моделювання поширення іонів від джерел штучної іонізації повітря. Але розглядаються поширення іонів без їх осідання на пил та аерозолі, тому закономірності поширення іонізованого повітря доцільно уточнити експериментально. Моделювання поширен-

ня іонів у роботі [9] є геометричним, тобто не враховано рекомбінацію іонів у процесі їх розповсюдження. У статті [10] показано можливість застосування ультразвукових випромінювачів для іонізації повітря за рахунок балоелектричного ефекту. У ній оцінено кількісні характеристики іонізації з використанням води різного хімічного складу. Але наведені експерименти свідчать про неможливість керування кількістю іонів кожної полярності, що незручно.

Ультразвукові зволожувачі повітря виробляються серійно і принципово не відрізняються від наведеного у [10]. Тому доцільно з використанням такого зволожувача дослідити зміну іонного складу повітря у ізольованому приміщенні разом зі зміною температури і відносної вологості повітря. При цьому також можливо визначити взаємний вплив електризації поверхонь і іонізації повітря. Це надасть фактичні дані щодо динаміки взаємозалежних факторів і матеріали для проектування пристрою для створення необхідних концентрацій іонів і забезпечення максимально досяжної якості повітря.

3. Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розроблення методу управління концентраціями іонів у повітрі приміщень різного призначення, що забезпечить нормалізацію концентрацій іонів, напруженостей електростатичних полів розробленого ультразвукового пристрою.

Для досягнення мети визначено такі задачі:

- дослідити вплив джерела штучного зволоження повітря на концентрації іонів обох знаків та на напруженість електричного поля електризованої полімерної поверхні;
- дослідити вплив системи охолодження повітря (split-системи) на концентрації іонів обох знаків;
- розробити ультразвуковий пристрій іонізації повітря з керованою переважною полярністю.

4. Матеріали та методи дослідження

Вимірювання виконувалися у тестовому приміщенні площею 20 м² та об'ємом 60 м³. Уся підлога вкрита покриттям з синтетичного матеріалу, що виробляється серійно. Поверхневий електростатичний заряд створювався за рахунок трибоелектричного ефекту. Температура у приміщенні встановлювалася за допомогою стандартної split-системи. Повітрообміну із зовнішнім простором під час проведення вимірювань не було. Дослідження проводились на п'ятому поверсі стандартної будівлі офісного призначення у літню пору року. Система примусової вентиляції відсутня.

Для зміни вологості та іонізації повітря застосовувався серійний ультразвуковий зволожувач повітря SaturnST-AN2107 потужністю 25 W з витратою води 0,28 кг/год (Україна).

Відносна вологість і температура повітря вимірювалися повіреним комбінованим приладом CX 601 D (Китай).

Радіаційний фон вимірювався каліброваним приладом СРП-68-01 (Російська Федерація).

Під час експериментів фон був стабільним і складав 0,18–0,20 мкЗв/год. Концентрації іонів обох знаків вимірювалися каліброваним лічильником іонів Сапфір-3К (Російська Федерація) згідно інструкції з експлуатації. Максимальна основна похибка вимірювань складала 20 %. Кожне вимірювання складалося з трьох серій. У кожену серію входили 24 покази приладу по обох полярностях. Результати вимірювань оброблялися за методикою [11]. Результат заносився у таблиці (n^- , n^+). Вимірювальні прилади розташовувалися на відстані 1 м від зволожувача повітря на висоті 0,5 м від рівня підлоги. Вимірювання напруженості електричного поля вимірювалося повіреним переносним вимірювачем ВЕЗ-П (Республіка Молдова). Максимальна основна похибка вимірювань не перевищувала 10 %. Вимірювання здійснювалися у 10 точках за радіусом 1 м навколо зволожувача повітря, і оброблялися згідно інструкції з експлуатації приладу і заносилися у таблиці.

5. Результати досліджень іонізації повітря та розроблення і тестування біполярного іонізатора повітря

5.1. Дослідження динаміки концентрацій іонів обох знаків у залежності від часу роботи зволожувача повітря

Враховуючи залежність іонізації повітря від його стану за межами приміщення в залежності від часу доби, фіксувався час проведення вимірювань. Перша серія вимірювань починалася о 12:00 за Київським часом. Час $T=0$ відповідає даним, виміряним перед вмиканням зволожувача повітря. Результати вимірювань наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Зміна іонізації повітря (n), відносної вологості (φ) та напруженості електричного поля (E) електростатичних зарядів полімерної поверхні від часу роботи (T) ультразвукового зволожувача повітря у денний час

| T , h | t , °C | φ , % | E , кВ/м | n , см ⁻³ | |
|---------|----------|---------------|------------|------------------------|-------|
| | | | | n^- | n^+ |
| 0,0 | 24,0 | 37 | 5,1 | 240 | 260 |
| 0,5 | 23,5 | 39 | 4,8 | 480 | 410 |
| 1,0 | 22,5 | 44 | 4,0 | 720 | 530 |
| 1,5 | 22,5 | 44 | 2,1 | 430 | 380 |
| 2,0 | 22,5 | 45 | 0,2 | 560 | 410 |

Динаміка концентрацій іонів відносної вологості повітря та напруженостей електростатичного поля наведено на рис. 1–3.

Концентрації іонів наближаються до мінімально допустимих значень за дві години роботи зволожувача. При цьому відносна вологість підвищується до значень, регламентованих для більшості виробничих та побутових умов (40–60 %), а температура перебуває у нормативних межах (20–24 °C) [1]. Цей процес супроводжується нейтралізацією електростатичних зарядів, про що свідчить різке зниження напруженості електричного поля.

Аналогічні вимірювання, але з кроком у 1 годину, були проведені у вранішній час (початок – 6:00 ранку за Київським часом, табл. 2).

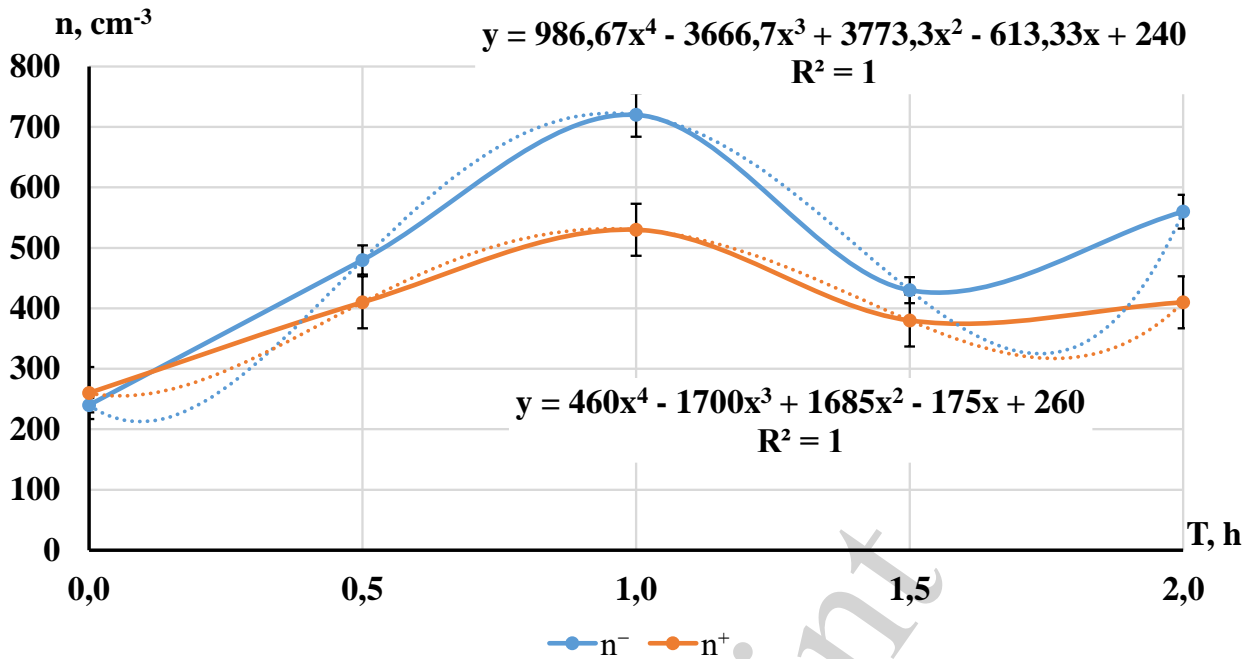


Рис. 1. Зміна концентрацій іонів у залежності від часу роботи зволожувача повітря на відстані 1 м від пристрою

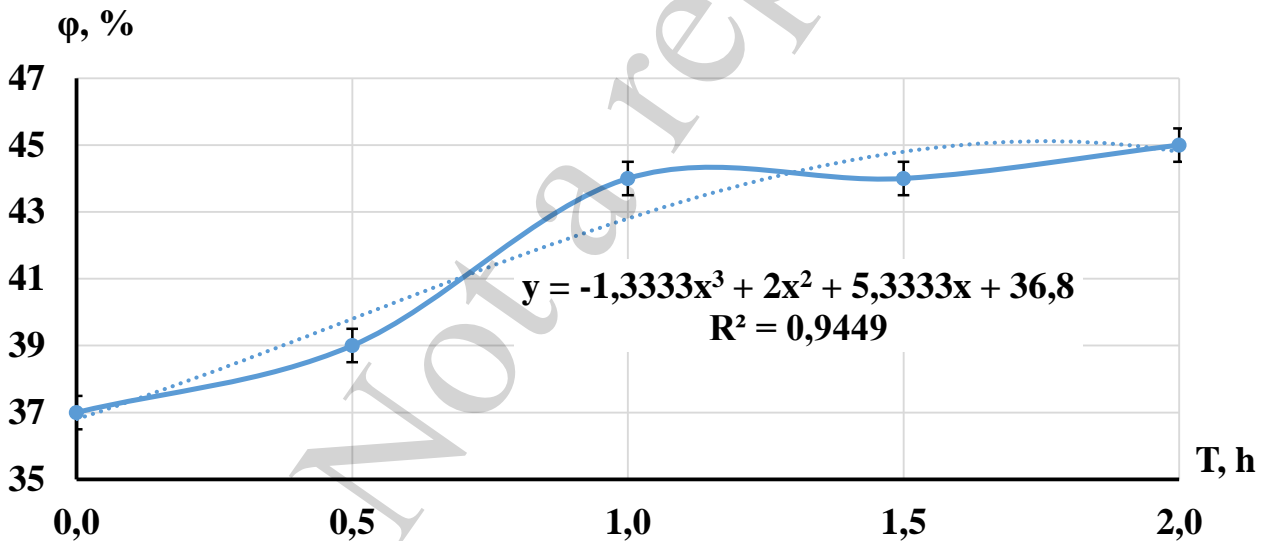


Рис. 2. Залежність відносної вологості повітря від часу роботи зволожувача повітря на відстані 1 м від пристрою

Дані табл. 1, 2 свідчать, що вихідні параметри у приміщенні (концентрації іонів, напруженість електростатичного поля) відрізняються у залежності від часу доби, незважаючи на близькі значення температури і відносної вологості. Концентрації іонів вранці більші (з переважною негативною іонізацією), а напруженості електростатичних полів – менші. Це може бути наслідком різного складу повітря, яке поступає ззовні та інших причин. Наприклад, відомо, що електричний заряд Землі від'ємний. Тому за відсутності руху повітря (у тому числі і конвекційного, під впливом сонячного світла) у приповерхневому шарі

накопичуються переважно позитивні іони. Така пропорція у табл. 2 на початку вимірювань може бути наслідком цього явища. У подальшому за роботи зволожувача і перемішування повітря це явище стає несуттєвим. Але наведені дані свідчать, що за допомогою стандартного пристрою з нерегульованою генерацією іонів кожного знаку досягти потрібного (прогнозованого) результату неможливо. До того ж це ускладнюється наявністю інших чинників впливу на концентрації іонів, наприклад систем охолодження повітря та вентиляції.

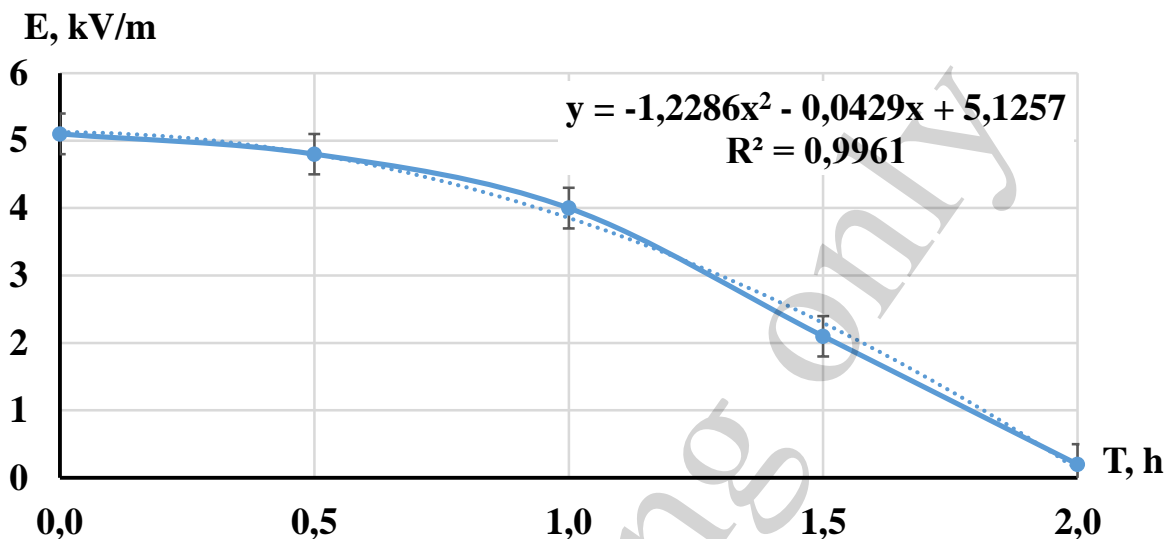


Рис. 3. Залежність напруженості електростатичного поля від часу роботи зволожувача повітря на відстані 1 м від пристрою

Таблиця 2

Зміна іонізації повітря, відносної вологості та напруженості електричного поля електростатичних зарядів полімерної поверхні від часу роботи ультразвукового зволожувача повітря у вранішній час

| T, h | t, °C | φ, % | E, кВ/м | n, см ⁻³ | |
|------|-------|------|---------|---------------------|----------------|
| | | | | n ⁻ | n ⁺ |
| 0 | 24,0 | 40 | 1,2 | 300 | 490 |
| 1 | 23,5 | 44 | 0,8 | 810 | 710 |
| 2 | 23,0 | 52 | 0,5 | 1700 | 960 |
| 3 | 22,5 | 51 | 0,1 | 1540 | 1150 |

5. 2. Дослідження впливу системи охолодження повітря на концентрації іонів обох знаків

Системи вентиляції та охолодження можуть суттєво впливати на концентрації іонів та їх переважну полярність [11]. Особливо це стосується split-систем. Тому було проведено дослідження щодо їх впливу на іонізацію повітря. Приміщення попередньо провітрювалися. Час T=0 відповідає параметрам до вмикання охолодження повітря. Зволожувач повітря не використовувався. Початок вимірювань 6:00 – за Київським часом.

Результати, наведені у табл. 1–3, отримані із застосуванням однієї split-системи.

Таблиця 3

Вплив системи охолодження повітря на концентрації іонів обох знаків

| T, h | t, °C | φ, % | n, см ⁻³ | |
|------|-------|------|---------------------|----------------|
| | | | n ⁻ | n ⁺ |
| 0 | 26,0 | 52 | 180 | 430 |
| 1 | 23,0 | 45 | 130 | 450 |
| 2 | 22,5 | 47 | 120 | 410 |
| 3 | 22,5 | 46 | 110 | 320 |

З табл. 3 видно, що у результаті впливу системи охолодження повітря відбувається часткова деіонізація повітря, при цьому вона непропорційна для іонів різних знаків.

Було досліджено зміну концентрацій іонів у трьох приміщеннях з різними марками split-систем (торгові марки не прийнято рекламувати з етичних міркувань).

Результати вимірювань наведено у табл. 4.

Таблиця 4

Ступені деіонізації повітря системами охолодження повітря різних марок

| Room | T=0 год | | T=3 год | |
|------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|
| | n, см ⁻³ | | n, см ⁻³ | |
| | n ⁻ | n ⁺ | n ⁻ | n ⁺ |
| № 1 | 630 | 740 | 420 | 480 |
| № 2 | 620 | 740 | 600 | 390 |
| № 3 | 480 | 690 | 120 | 100 |

Як видно з даних табл. 4, чіткої тенденції щодо зміни іонного складу повітря немає. Слід враховувати, що значні відмінності даних можуть бути обумовлені термінами експлуатації пристроїв (наприклад, нашаруванням пилу на лопотях). Це може бути пов'язане з конструктивними особливостями, наприклад, різною електризацією полімерів, з яких виготовлено повітроводи і лопаті вентиляторів.

Наведене обумовлює актуальність розроблення ультразвукового іонізатора повітря з регульованою полярністю генерації іонів.

5. 3. Розроблення ультразвукового пристрою іонізації повітря з керованою продуктивністю та переважною полярністю іонів

Дані, наведені у табл. 1, 2, отримані на відстані 1 м від зволожувача повітря. На більших відстанях концентрації іонів швидко зменшується через природні процеси (наприклад, рекомбінація іонів). За відсутності достатньої кількості іонів не відбувається нейтралізація поверхневих електростатичних зарядів. Подолання цих вад можливе примусовим розповсюдженням іонів струменем пові-

тря. Крім того, генерація іонів стандартним пристроєм не регулюється. Потрібно забезпечити керування полярностей іонів у залежності від параметрів чинників деіонізації повітря у приміщенні, знаків електростатичних зарядів на полімерних поверхнях, показників зовнішнього повітря.

Виходячи з цього, головні вимоги до іонізатора повітря повинні бути такими:

– достатня продуктивність щодо генерування іонів обох знаків принаймні для нормалізації і підтримання на нормативному рівні їх концентрацій та нейтралізації поверхневих електростатичних зарядів;

– регульованість генерації іонів кожного знаку у залежності від знаку статичних поверхневих зарядів та фактичного коефіцієнта полярності іонізації повітря у даному приміщенні;

– відсутність побічних ефектів щодо генерації потенційно небезпечних речовин (озону, оксидів азоту тощо).

Таким вимогам відповідає іонізатор з використанням у якості робочого вузла ультразвукового випромінювача, який іонізує молекули води за рахунок балоелектричного ефекту. Генерація іонів завжди парна, а відмінність концентрацій обумовлена тільки геофізичним фактором та поглинанням іонів одного знаку поверхнями або предметами, зарядженими протилежно. Для отримання необхідного результату достатньо великої генерації іонів обох знаків і часткове поглинання іонів одного знаку спеціальним вузлом пристрою.

Принципова схема біполярного іонізатора повітря наведена на рис. 4.

Іонізатор працює наступним чином. Від ультразвукового генератора 1 електричні сигнали ультразвукової частоти подаються на випромінювач 2. З ємності 3 трубкою 4 на випромінювач подається вода, яка під впливом ультразвукових коливань іонізується. Вентилятором 5 іонізоване повітря задувається між обкладинками повітряного конденсатора 6. Ключ 7 вмикає на обкладинках конденсатора напругу потрібного знаку від джерела 8. Іони протилежного знаку осідають на обкладинках конденсатора а їх кількість регулюється реостатом 9.

Розрахувати необхідні параметри пристрою нескладно. Для усіх аспіраційних систем визначення концентрацій іонів використовується співвідношення:

$$K = \frac{V_1}{4pCU}, \quad (1)$$

де K – рухомість іонів, $\text{см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$;

V_1 – об'єм повітря, яке проходить крізь конденсатор за одиницю часу, $\text{см}^3/\text{с}$;

C – ємність конденсатора, см ;

U – напруга на обкладинці конденсатора, В .

Усіма нормативами легким вважаються іони рухомостями $K \geq 0,4 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Тобто, можна визначити параметри конденсатора, вентилятора та напруги елемента живлення за відомої рухомості іонів.

За регулювання напруги опором 9 концентрація іонів, які осідають на конденсаторі за 1 s, визначається із співвідношення:

$$U = IR = Rn'eV_1, \quad (2)$$

де I – електричний струм у колі;

R – опір ρ у даний момент часу, Ω ;

n' – концентрація іонів, які осідають за 1 с, $\text{см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$;

e – одиничний заряд іона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ С).

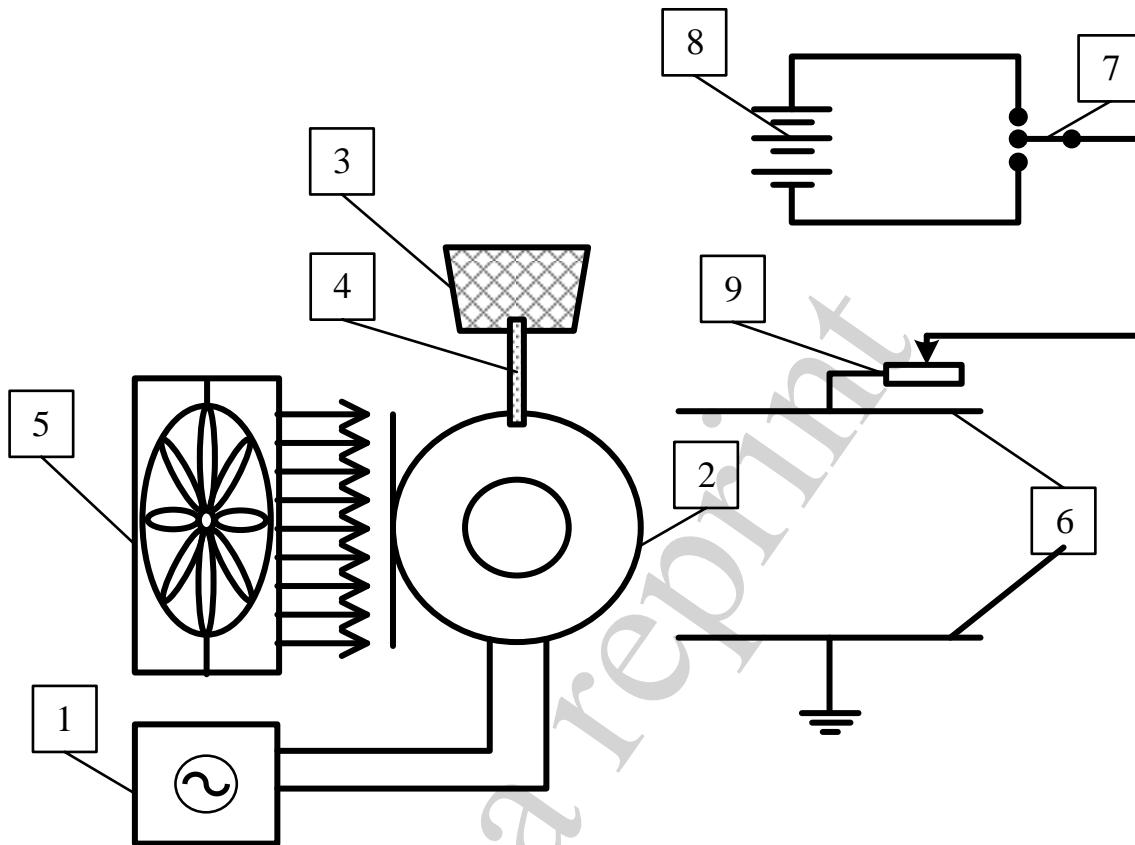


Рис. 4. Схема біполярного ультразвукового генератора повітря: 1 – ультразвуковий генератор, 2 – ультразвуковий випромінювач, 3 – ємність з водою, 4 – трубка для подачі води, 5 – вентилятор, 6 – обкладки конденсатора, 7 – ключ перемикачності полярності конденсатора, 8 – джерело постійної напруги, 9 – реостат

Тому, за відомої продуктивності іонізатора у пристрої поглинається необхідна частина іонів потрібного знаку для підтримання у приміщенні концентрацій іонів на нормативних рівнях і полярностях.

Лабораторні дослідження макету біполярного іонізатора довели, що для регулювання іонного складу повітря та нейтралізації статичних зарядів у приміщенні площею до 50 м^2 достатньо генератора потужністю 25 Вт з амплітудою коливань 18–20 мкм на частотах 23–25 кГц. Повітряний конденсатор може бути як пласкої, так і циліндричної форми. Напруга батареї 12 В є достатньою.

Регульованість концентрацій іонів даним пристроєм коливається від фонового до $4000\text{--}5000^3 \text{ см}^{-3}$ іонів кожного знаку по усій площі тестового приміщення. Порівняльний аналіз розповсюдження іонів обох полярностей від розробленого біполярного іонізатора повітря та зволожувача повітря наведено на рис. 5. Вимірювання здійснювалося після двох годин роботи пристрою.

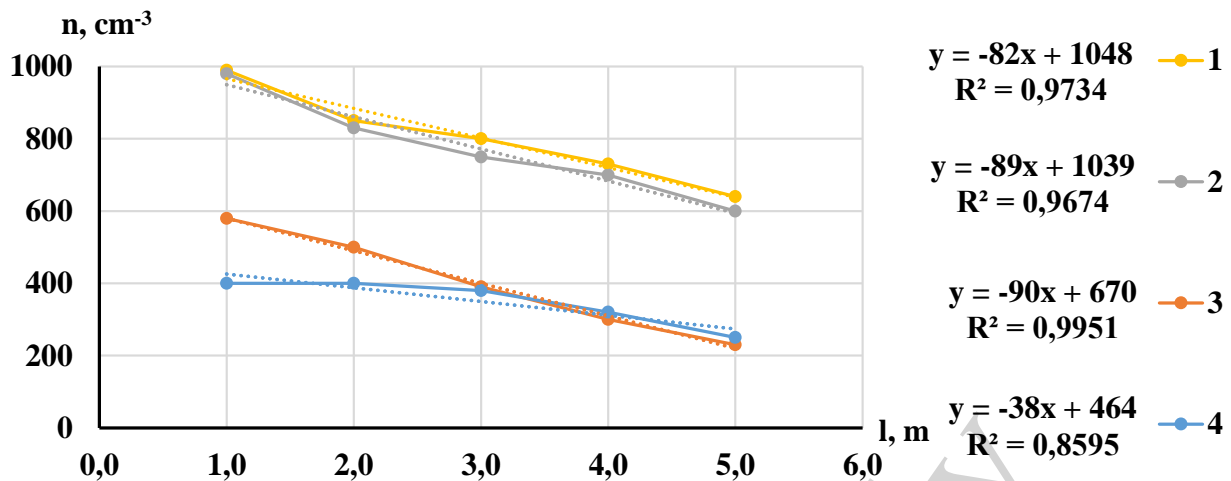


Рис. 5. Поширення іонів від джерела іонізації повітря: 1 – зміна концентрацій негативних іонів з відстанню від іонізатора повітря, 2 – зміна концентрацій позитивних іонів від біполярного іонізатора повітря, 3 – зміна концентрацій негативних іонів від зволожувача повітря, 4 – зміна концентрацій позитивних іонів від зволожувача повітря

Зниження концентрацій іонів з відстанню від іонізатора відбувається практично лінійно і залежить від обертів вентилятора та кількості води, що подається на випромінювач.

Усі серійні іонізатори повітря генерують іони високовольтними коронними розрядами і є різновидами загально відомої люстри Чижевського. Такі іонізатори не передбачають примусове поширення іонів регульованої полярності і мають принциповий недолік – генерацію в результаті розрядів озону та оксидів озоту, шкідливих для людей.

6. Обговорення результатів дослідження динаміки іонного складу повітря та тестування біполярного іонізатора

Експериментальні дані (табл. 1, 2) свідчать, що після однієї-двох годин роботи іонізатора і зростання концентрацій іонів відбувається їх зниження. Поясненням цьому є різке зниження рівнів електростатичних полів. Іонізатор розташований достатньо близько від підлоги, починається стійкий дрейф іонів до зарядженої поверхні. Після нейтралізації поверхневого потенціалу концентрація іонів починає знову зростати. Пролонгованість цього процесу за неперервної роботи іонізатора робить перспективним процес очищення повітря від дрібнодисперсного пилу та аерозолей. За умов наявності генерації іонів у приміщенні або високої природної іонізації повітря дрібнодисперсні зважені частинки стають важкими іонами дрібнодисперсні зважені частинки стають важкими іонами. В основному це процес приєднання легких іонів до частинок. Він описується рівняннями:

$$\frac{dn^-}{dt} = q - \alpha n^- n^+ - \beta^- n^- N^+ - \beta_0^- n^- N, \quad (3)$$

$$\frac{dn^+}{dt} = q - \alpha n^- n^+ - \beta^- + n^+ N^- - \beta_0^+ n^+ N, \quad (4)$$

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

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

α – коефіцієнт рекомбінації легких іонів;

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

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

β_0^- , β_0^+ – коефіцієнти осадження негативних та позитивних легких іонів на нейтральних частинках;

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

Даний баланс справедливий для простору, віддаленого від заряджених поверхонь, біля яких на відстанях кількох сантиметрів баланс інший [2]. Необхідні коефіцієнти у більшості відомі з довідкових джерел [7, 8]. Значення коефіцієнтів $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$; $\beta^- = 4 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$; $\beta^+ = 3,97 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$; $\beta_0^- = 1,67 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$; $\beta_0^+ = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ см}^3/\text{с}$. Тому для впровадження очищення повітря можна оцінити потрібну генерацію легких іонів іонізатором. У цьому випадку процес взаємодії з електризованою поверхнею буде мати таку певну послідовність. Легкі іони осідають на завислі частинки, під впливом руху повітря та електростатичних сил вони дрейфують до протилежно зарядженої поверхні, на якій осідають. Для перевірки можливості очищення повітря від дрібнодисперсного пилу було виміряно вміст пилу у повітрі приміщення об'ємом 60 м^3 до початку роботи іонізатора та після двох годин його роботи. Вимірювання здійснювалися аспіраційним методом – прокачуванням фіксованого об'єму повітря з використанням електроаспіратора ЕФ-2С через ємність з водою. Зважування ємності з водою здійснювалося до та після прокачування повітря. Встановлено, що вихідний вміст завислих частинок у приміщенні складав $4,3\text{--}4,4 \text{ мг}/\text{м}^3$. Після двох годин роботи іонізатора вміст частинок складав $1,4\text{--}1,6 \text{ мг}/\text{м}^3$. Таким чином, вміст пилу у повітрі знизився практично у три рази.

При цьому нейтралізується поверхневий електростатичний заряд. Головною умовою є віддаленість іонізатора від заряджених поверхонь, щоб уникнути переважного процесу швидкого осідання іонів на електризовану поверхню через одну годину роботи іонізатора (рис. 1).

Результати, наведені у табл. 3, 4, свідчать, що ступені деіонізації повітря та переважні полярності деіонізації split-системами не мають закономірностей і непередбачувані. Тому перед впровадженням організаційно-технічних заходів управління якістю повітря у приміщенні будь-якого призначення необхідно здійснити моніторинг рівнів і динаміки необхідних фізичних факторів. Він виключає контроль іонізації повітря у приміщенні; цей показник для зовнішнього повітря, що поступає у приміщення; ступені деіонізації повітря системами охолодження і вентиляції; значення і полярність статичних зарядів, що накопичується на полімерних поверхнях. Ця інформація дозволить з меншою витратою часу і ресурсів

здійснити керування якістю повітря навіть у приміщеннях зі складною динамічною значень мікрокліматичних показників у автоматичному режимі.

Проведені дослідження і розробки свідчать про можливість за допомогою серійної системи охолодження повітря та біполярного іонізатора повітря управляти усіма мікрокліматичними параметрами, принаймні нормованим міжнародним нормативом [1]. На відміну від традиційних серійних пристроїв іонізації повітря за рахунок коронних розрядів, які генерують озон та оксиди азоту, розроблений пристрій є повністю безпечним. Високовольтні пристрої як ультразвукові зволожувачі повітря мають обмежений радіус впливу (1,0–1,5 м), що обумовлено відсутністю систем примусового поширення іонів та небезпекою у разі підвищення потужності. Розроблений пристрій, навіть у макетному варіанті, має гарантовану зону обслуговування до 5 м, на якій досягається концентрація іонів обох знаків 500 см^{-3} . Перевагою іонізатора порівняно з аналогами є одночасне підвищення вологості повітря до нормативних значень 40 % і більше та можливість очищення повітря. Це важливо через те, що у нормативі [1] для житлових приміщень концентрація завислих частинок не повинна перевищувати $50 \text{ мкм}/\text{м}^3$ (для частинок, менших за 10 мкм). Тому для них доцільно застосовувати пристрій, який немає шкідливих побічних ефектів у вигляді хімічних сполук та виконує кілька функцій – іонізацію та очищення повітря, а також нейтралізацію статичних зарядів.

Обмеженість досліджень полягає у тому, що розглядається нормалізація параметрів, які впливають на якість повітря. Доцільно розглянути можливість керування усім комплексом фізичних факторів виробничого та побутового середовища. Задачі захисту людей від впливу техногенних електромагнітних та акустичних полів із застосуванням ризик-орієнтованого підходу на основі моделювання поширення фізичних факторів є актуальними [12, 13]. Такі задачі можливо розв'язувати у комплексі з розглянутим у даній статті. Так, у роботі [14] розроблено і досліджено захисні властивості композиційного електромагнітного і шумозахисного екрана. Цей матеріал виготовлено з дешевих матеріалів – залізорудного пилу та латексу. Такі компоненти у разі потреби можна використати для облицювання поверхонь великих площ для екранування електромагнітних полів та шуму широких частотних діапазонів. Перевагою основного компонента (латекс – за вагою до 85–90 %) є те, що він не електризується під будь-яким фізичним впливом. Тобто у цьому випадку спрощується задача уникнення деіонізації повітря. Також спрощується процес очищення повітря від зважених частинок, які можна осаджувати на заряджені пластини, аналогічні обкладинкам конденсатора біполярного ультразвукового іонізатора повітря.

Окреслений напрям досліджень уявляється перспективним і дозволить створити цілісну систему керування рівнями фізичних факторів виробничого та побутового середовищ.

7. Висновки

1. Дослідження динаміки іонного складу повітря виробничих та побутових приміщень довели, що засобом нормалізації концентрацій іонів обох знаків, відносної вологості та температури є застосування пристроїв охолодження повітря (split-систем) та ультразвукових зволожувачів повітря. Крім цього, це до-

зволяє практично повністю нейтралізувати електростатичні заряди, що утворюються на полімерних поверхнях. Він дозволяє підвищити упродовж кількох годин концентрацію іонів до мінімально допустимих рівнів та майже повністю нейтралізувати поверхневий електростатичний заряд. Недоліком способу є некерованість переважною полярністю іонів у залежності від умов застосування обладнання (фонові значення іонізації, знаки електростатичних зарядів) та малий радіус ефективності (1,0–1,5 м).

2. З'ясовано, що split-система охолодження повітря у тестовому приміщенні деіонізує його. У процесі зниження температури з 26,0 °C до 22,2 °C і відносної вологості повітря з 52 % до 46 % концентрація негативних іонів у повітрі знижується зі 180 см⁻³ до 110 см⁻³, позитивних – з 430 см⁻³ до 320 см⁻³. Встановлено, що це явище має системний характер. Засоби охолодження повітря з однаковими принципами дії деіонізують повітря непередбачуваним чином, з різними переважними полярностями деіонізації. Трьома різними split-системами за однаковими режимами роботи концентрації негативних іонів знизилися на 33 %, 3 % та 75 %, а позитивних – на 35 %, 41 % та 72 %. Такі дані необхідно отримувати для усіх конкретних умов і враховувати при застосуванні штучної іонізації повітря.

3. Розроблений біполярний іонізатор повітря дозволяє регулювати переважну полярність генерованих іонів у залежності від фонових концентрацій повітря та властивостей джерел деіонізації. Пристрій дозволяє підтримувати нормативні концентрації іонів у радіусі 5 м. За рахунок спрямованого руху повітря зниження концентрацій іонів відбувається практично лінійно. Максимальна продуктивність іонізатора складає 4000–5000 см⁻³ обох знаків. Вимірювання показали, що у тестовому приміщенні за роботи іонізатора упродовж двох годин вміст завислих частинок у повітрі знизився з 4,3–4,4 мкм/м³ до 1,4–1,6 мкм/м³ за об'ємом приміщення 60 м³. Перевагою біполярного іонізатора порівняно з серійними високовольтними іонізаторами є великий радіус впливу та відсутність генерації шкідливих речовин.

Література

1. Standard of Building Biology Testing Methods SBM. Germany: Institut für Baubiologie + Nachhaltigkeit IBN. URL: <https://buildingbiology.com/building-biology-standard/>

2. Глива, В. А., Ніколаєв, К. Д., Тихенко, О. М., Тимошенко, О. П. (2019). Дослідження рівнів фізичних факторів у приміщеннях диспетчерських служб аеропортів цивільної авіації. Системи управління, навігації та зв'язку, 1 (53), 32–35. doi: <https://doi.org/10.26906/sunz.2019.1.032>

3. Назаренко, В. І., Чередніченко, І. М., Никифорок, О. І., Мартіросова, В. Г., Тихонова, Н. С., Беседа, О. Ю., Палійчук, С. П. (2017). Фізіолого-гігієнічна оцінка умов праці банківських працівників. Український журнал з проблем медицини праці, 4 (53), 35–41. doi: <https://doi.org/10.33573/ujoh2017.04.035>

4. Jiang, S.-Y., Ma, A., Ramachandran, S. (2018). Negative Air Ions and Their Effects on Human Health and Air Quality Improvement. International Journal of Molecular Sciences, 19 (10), 2966. doi: <https://doi.org/10.3390/ijms19102966>

5. Suwardi, A., Ooi, C. C., Daniel, D., Tan, C. K. I., Li, H., Liang, O. Y. Z. et al. (2021). The Efficacy of Plant-Based Ionizers in Removing Aerosol for COVID-19 Mitigation. *Research*, 2021, 1–11. doi: <https://doi.org/10.34133/2021/2173642>
6. Sidorov, A. V. (2014). The technique of small air ions concentration measurement at the PC operator working place. *Engineering industry and life safety*, 1, 36–41. URL: http://www.mbsd.ru/1_2014-36eng/
7. 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>
8. Беляєв, Н. Н., Цыганкова, С. Г. (2015). Оценка аэроионного режима в рабочей зоне при искусственной ионизации воздуха в помещении. *Науковий вісник будівництва*, 3 (81), 158–161.
9. Толкунов, І. О., Попов, І. І. (2011). Вплив природних джерел аероіонізації на процес формування полів концентрації аероіонів у повітряному середовищі приміщень. *Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил*, 1 (27), 243–246.
10. Sukach, S., Kozlovs'ka, T., Serhiienko, I., Khodakovskyy, O., Liashok, I., Kipko, O. (2018). Studying and substantiation of the method for normalization of air-ionic regime at industrial premises at the ultrasonic ionization of air. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (10 (94)), 36–45. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.141060>
11. Сукач, С. В., Сидоров, О. В. (2016). Методологічні засади підвищення якості контролю аероіонного складу повітря виробничого середовища. *Проблеми охорони праці в Україні*, 32, 127–133.
12. Glyva, V., Lyashok, J., Matvieieva, I., Frolov, V., Levchenko, L., Tykhenko, O. et al. (2018). Development and investigation of protective properties of the electromagnetic and soundproofing screen. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (5 (96)), 54–61. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.150778>
13. Zaporozhets, O., Levchenko, L., Synylo, K. (2019). Risk and exposure control of aviation impact on environment. *Advanced Information Systems*, 3 (3), 17–24. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.3.02>
14. Khodakovskiy, O., Levchenko, L., Kolumbet, V., Kozachuk, A., Kuzhavskiy, D. (2021). Calculation apparatus for modeling the distribution of electromagnetic fields of different sources. *Advanced Information Systems*, 5 (1), 34–38. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.04>