

УДК 537.565  
© 2017

*Петровський О. М., кандидат технічних наук,  
Кузнецова Т. Ю., кандидат хімічних наук,  
Куриць Ю. О., асистент*

Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка

## ТЕОРЕТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ІОНІЗАЦІЇ СЕРЕДОВИЩА

*Рецензент – доктор технічних наук, професор Л. І. Леві*

*Проведено аналіз принципів знезараження повітря поєднанням двох способів випромінювання: іонізаційного та ультрафіолетового. Висвітленні основні конструкції аероіонізаторів для вибору найефективнішої системи знезараження фізико-математичного моделювання його роботи.*

*Запропоновано електрофізичну модель роботи іонновітрового ультрафіолетового озонатора-знезаражувача повітря, яка враховує процеси створення електричного вітру, негативних аероіонів, озону, знезараження за допомогою ультрафіолетового випромінювання, що може застосовуватися під час проектування відповідного обладнання.*

**Ключові слова:** іонізатори, ультрафіолетове випромінювання, іонний вітер, коронний розряд.

**Постановка проблеми.** Запобігання розповсюдження захворювань – основне завдання процесу знезараження повітря та поверхонь. Особливо гостро ця проблема стоїть у місцях великого скупчення людей, тварин, погано вентильованих приміщеннях, а також у приміщеннях з рециркуляцією повітря.

Застосування різних фізичних впливів у даний час стає все більш актуальним, оскільки є одним з головних методів інактивації вірусів, бактерій і грибків [9]. Поява штучних джерел ультрафіолетового випромінювання дала змогу вирішити питання бактерицидного знезараження середовищ [10, 2]. Особливо актуальним є поєднання ультрафіолетового опромінення з іншими фізичними факторами впливу, такими як озонування й іонізація.

**Аналіз літературних джерел і публікацій, у яких започатковано розв'язання проблеми.** Штучні іонізатори бувають: електричні уніполярні і біполярні, радіоактивні, з використанням ефекту розбризкування води, ультрафіолетового випромінювання й інші. Найчастіше застосовують штучні іонізатори, засновані на використанні коронного розряду. Першими застосовувалися уніполярні іонізатори, які окрім корисних ефектів виробляли ще й електростатичне поле і озон.

Для з'ясування якості штучно іонізованого повітря були досліджені всі можливі види іонізаторів [2–5, 7, 8].

Термоелектронні аероіонізатори. Принцип дії аероіонізаторів цього типу заснований на використанні термоелектронної емісії розпечених металів під час їх нагрівання до високої температури (500–2000 °С). Звільнення електронів з металу вимагає витрати певної енергії, яку називають «енергія виходу» або «робота виходу».

Радіоізотопні аероіонізатори. Принцип дії аероіонізаторів цього типу заснований на властивості променів радіоактивних речовин іонізувати повітря.

Фотоелектричні аероіонізатори. Принцип дії аероіонізаторів цього типу заснований на використанні короткохвильових ультрафіолетових променів, що випускаються ртутно-кварцовими лампами [3, 4]. Найбільш відомі конструкції аероіонізаторів Я. Ю. Рейнета і А. К. Гумана. Фотоелектричні аероіонізатори не отримали широкого розповсюдження.

Гідродинамічні аероіонізатори. Принцип дії гідродинамічних аероіонізаторів (гідроаероіонізатори) заснований на баллоелектричному ефекті, що полягає в електризації найдрібніших крапель рідини, що виникають у разі дроблення і розпилення води. Гідроаероіонізатори являють собою чашу, у верхній частині якої знаходяться трубки, що закінчуються розпилювачами. Викидаючись із розпилювачів струмені води вдаряються об корборундовий диск, у результаті чого відбувається баллоелектричний ефект. Концентрація легких аероіонів, що виникають при цьому, залежить від тиску води, яка витікає з розпилювачів.

Коронні аероіонізатори [5, 1]. У аероіонізаторів цього типу повітря іонізується за допомогою коронного розряду, що утворюється поблизу вістря або тонкого дроту при напрузі в декілька тисяч вольт.

Поряд з аероіонізацією важливим аспектом створення мікроклімату є обеззараження повітря. Зменшити кількість бактерій можливо наступними способами:

- озонуванням;
- ультрафіолетовим опроміненням;
- розпиленням дезінфікуючих розчинів.

Збільшення кількості озону досягається в процесі створення іонного вітру в області коронуєчого електроду, або під час іскрового розряду. Змінюючи режими роботи іонновітрового знезаражувача (зміна напруги на електродах, зміна полярності, зміна відстані між електродами), можна досягати різних концентрацій озону. Найменша концентрація озону  $O_3$  наявна за негативної корони 15 г/кВт·год [8, 7, 11]. Середня концентрація 25 г/кВт·год – за позитивної корони. Найбільша концентрація під час іскрового розряду до 250 г/кВт·год. Проте великі концентрації озону в повітрі шкідливі.

Висока окислююча здатність озону і утворення в багатьох реакціях з його участю вільних радикалів кисню визначають його високу токсичність. Вплив озону на організм може призводити до передчасної смерті. Найбільш небезпечна дія:

- на органи дихання прямим подразненням і пошкодженням тканин;
- на холестерин у крові людини з утворенням нерозчинних форм, що призводить до атеросклерозу;
- на органи розмноження у самців усіх видів тварин, зокрема і людини (вдихання цього газу вбиває чоловічі статеві клітини і перешкоджає їх утворенню).

**Мета досліджень:** моделювання фізичних процесів іонізації середовищ; створення конструктивно простих і технологічно ефективних іонізаторів середовищ, в основу роботи яких покладено принцип іонного вітру, ефекту Бифельда-Брауна, коронного розряду, ультрафіолетового випромінювання.

**Методи досліджень.** Застосовані методи опису і аналізу літературних джерел. Метод фізико-математичного моделювання процесу створення іонного вітру і наявності аероіонів різної полярності. Удосконалені математичні моделі ефекту Бифельда-Брауна і аероіонізації Чижевського. Метод експериментальних досліджень визначення швидкості іонного вітру.

**Результати досліджень.** Іонний вітер – електрофізичне явище, при якому рух газу створюється за допомогою електричного поля, що створюється електростатичним прискорювачем. Електростатичний прискорювач (ЕП) –

пристрій, що надає рух газам, зокрема – повітря без яких-небудь рухомих частин. Замість механічної енергії лопатей, що обертаються, як в звичайних вентиляторах, ЕП використовує електричне поле для додачі рушійного моменту електрично зарядженим молекулам повітря.

ЕУ є досить простими пристроями, що містять «гострий» і «тупий» електроди з приєднаним до них джерелом високовольного живлення. Гострим електродом може бути голка, лезо, тонкий дріт.

Прискорення молекул газу відбувається таким чином [11]. ЕП генерує коронний розряд у безпосередній близькості від «гострого» електроду, званого коронуєчим електродом, і електрично заряджає молекули повітря, перетворюючи їх на іони. На другому етапі іони, що утворилися, прискорюються під дією сильного електричного поля у напрямку до протилежного електроду, званого осаджуючим електродом. У процесі руху іони стикаються з нейтральними молекулами і надають їм рух у тому ж напрямі (ефект Бифельда-Брауна).

На третьому етапі іони й інші заряджені частки досягають поверхні осаджуючого електроду і віддають йому отриманий раніше електричний заряд. У результаті рухоме повітря стає знову нейтральним і, до того ж, очищеним від домішок.

Між анодом (коронуєчим електродом) і катодом (осаджуючим електродом) прикладена висока різниця потенціалів (25–50 кВ), причому в разі позитивної корони різниця між величиною анодного і катодного потенціалів – позитивна, анод (+), катод (–).

Для створення коронного розряду обов'язковою умовою є достатня різниця потенціалів між цими електродами.

Додатковою умовою є наявність «гострого» коронуєчого електроду, який показаний у вигляді голки. Під час позитивного коронного розряду (рис. 1) вільні електрони, які завжди наявні в атмосферному повітрі, спрямовуються до позитивного анода. На відстані десятків (іноді сотень) мікрон від анода напруженість електричного поля досягає критичного рівня. При цьому швидкість електронів виявляється достатньою для вибивання нових електронів з нейтральних атомів і молекул. У результаті утворюються як вільні електрони, так і позитивно заряджені іони. Цей процес називається електронною лавиною. Пари «електрон-позитивний іон» утворюються також у результаті фотоіонізації. Процеси фотоіонізації і електронної лавини утворюють, врешті-решт,

область плазми. Основними носіями позитивних зарядів у повітрі є іони азоту  $N^+$  і кисню  $O^+$ . У вологому повітрі до них додаються позитивні іони води.

Область іонізації, у разі позитивної корони, випромінює рівне пурпурно-блакитне світіння, що оточує «гострий» електрод. У випадку позитивної корони відбувається генерація озону на цьому електроді.

Встановлено, що аероіони, на відміну від усіх інших фізичних факторів, діють на організм людини і тварин переважно через легеневий апарат. Характер дії аероіонів на організм визначається насамперед знаком електричного заряду. Сприятливий вплив на організм надають, як правило, аероіони негативного знака. Тому саме негативні аероіони і застосовуються з профілактичними і лікувальними цілями. Позитивні аероіони діють на організм протилежно негативним, дія та їх значення в лікуванні потребує подальшого вивчення. Другим чинником, що визначає характер фізіологічної та терапевтичної дії іонізованого повітря, є застосовувана доза аероіонів. Недостатня доза аероіонів може не надати помітного впливу на організм. Занадто велика доза, що перевищує лікувальну, завжди несприятливо діє на організм. Перевищення кількості озону, який інтенсивно генерується у випадку позитивної корони також негативно впливає на біологічні об'єкти. Однак озон може

проявляти дезінфікуючу дію. В цьому сенсі використання позитивної корони доцільне.

Процеси іонізації електронів описуються рівнянням [11]:

$$dn = \alpha n dx, \quad (1)$$

де  $dn$  – кількість вільних електронів, що з'явилися в результаті пробігу  $n$  електронів на дистанції  $dx$  в електричному полі;

$\alpha$  – коефіцієнт, що залежить від властивостей газу і його щільності, а також є функцією напруженості електричного поля.

Кількість аероіонів у повітрі, що створюються між коронуючим і осаджуючим електродами за одну секунду можна підрахувати за формулою [7],

$$n = \frac{I}{(1,6 \cdot 10^{-19}) S}, \quad (2)$$

де  $I$  – сила струму корони, мкА;  $1,6 \cdot 10^{-19}$  – заряд аероіонів, Кл;  $S$  – площа екрану (осаджуючого електроду),  $cm^2$ .

Сила струму корони пов'язана з напругою на електродах і рухливістю іонів може бути знайдена за формулою [11]:

$$I = \frac{52 \cdot 10^{-6}}{d^2} U (U - U_0) \quad (3)$$

де  $U$  – напруга між електродами, кВ;  $U_0$  – початкова напруга корони (напруга запалювання), кВ.

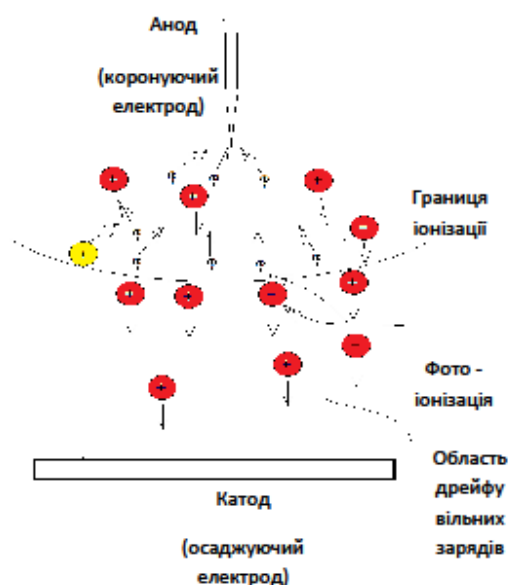


Рис. 1. Принцип створення позитивної корони і іонного вітру

Формула Ф. Пика для критичного поля запалювання корони в повітрі має вигляд [11]:

$$E_0 = 31\delta \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{r\delta}} \right), \quad (4)$$

де  $\delta$  – відношення щільності повітря до нормальної, що відповідає тиску  $p = 760$  мм рт. ст., і температурі  $t = 25$  °C;  $r$  – радіус внутрішнього (коронуючого) електроду, см.

$$\delta = \frac{(1 + 0,00367 \cdot 25)b}{(1 + 0,00367 \cdot t)760}, \quad (5)$$

де  $b$  – тиск, мм рт. ст.;  $t$  – температура, °C. Враховуючи:

$$E = \frac{U}{d},$$

де  $d$  – відстань між електродами, м.

Одержимо напругу запалювання, що визначається за формулою [11]:

$$U_0 = 31n_{en} \delta \left( 1 + \frac{0,308}{\sqrt{\delta r}} \right) d, \quad (6)$$

де  $n_{en}$  – постійна, що враховує коефіцієнт забруднення коронуючого електроду, його шорсткість поверхні і зміщення відносно осі симетрії,  $n_{en} = 0,6-1$ , для чистих співвісних електродів  $n_{en} = 1$ .

З урахуванням наведених вище формул, після перетворень, кількість аероіонів створених за одну секунду буде дорівнювати:

$$n = \frac{52U \left( Ur - n_{en} d \left( 31\delta r + 9,548\sqrt{\delta r} \right) \right)}{1,6 \cdot 10^{-13} Srd^2}. \quad (7)$$

Під час горіння коронних розрядів будь-якого типу виникають газодинамічні явища у формі електричного вітру (ЕВ) [6]. ЕВ являє собою колективний рух газу в розрядному проміжку, що виникає в результаті зіткнень заряджених молекул, що рухаються у напрямку силових ліній поля з нейтральною компонентою газового середовища. У результаті тертя газових потоків рух стає вихровим і складним на місце мас газу, що зміщуються надходять нові, виникає циркуляція газу від коронуючих точок коронуючого електрода до осаджуючого електрода. Швидкість електричного вітру  $V_e$  приблизно обернено пропорційна кореню квадратному з величини відстані до коронуючого електрода, досягає 0,5–1,0 м/с і може бути підрахована за наближеною формулою Ланденбурга, справедливою для повітря при звичайній температурі (м/с):

$$V_e = 5,34 \cdot 10^{-9} \frac{E}{\sqrt{d}}, \quad (8)$$

де  $E$  – напруженість електричного поля, В/м (прийнята рівною в просторі між електродами);  $d$  – відстань між коронуючим і осаджуючим електродами, м.

У процесі руху швидкість аероіонів зменшується за рахунок передачі частини імпульсу під час зіткнення з молекулами повітря. За рахунок передачі імпульсу повітря рухається.

Для визначення швидкості електричного вітру необхідно визначити напруженість поля між електродами [6].

Для одиночного провода над площиною ( $b \rightarrow \infty$ ) напруженість визначається:

$$E_{1np\max} = \frac{U}{r \ln(2d/r)}. \quad (9)$$

Для вибраної конструкції іонновітрового бактерицидного знезаражувача-озонатора проведені розрахунки. Використовуючи залежності (8) і (9), визначено швидкість електричного вітру (швидкість потоку, що проходить через установку):

$$V_e = 5,34 \cdot 10^{-9} \frac{U}{r \ln(2d/r) \sqrt{d}}, \quad (10)$$

де  $r$  – радіус поперечного перерізу провода (радіус закруглення),  $r = 0,00015$  м;  $d$  – відстань між електродами,  $d = 0,052$  м;  $U$  – напруга на електродах,  $U = (5-25$  кВ).

**Розробка конструкції обладнання.** Враховуючи теоретичні засади і аналіз існуючих систем запропоновано іонновітровий бактерицидний знезаражувач-озонатор призначений для знезараження повітря в закритих приміщеннях у присутності людей. Використовується для зниження мікробної обсемененості повітря та поверхонь за рахунок циркуляції повітряних мас, що знаходяться в приміщенні через поле коронного розряду, де збагачується аероіонами і озonom, а потім опромінюється ультрафіолетовим опроміненням. Під час роботи пристрою враховується умова, що забір та викид повітря виконується без обмежень та співпадає з напрямками основних конвекційних потоків (наприклад, поблизу приладів опалення, вікон та дверей). Знезаражувач-озонатор може монтуватись у вентиляційну систему в вертикальному або горизонтальному положенні на висоті не нижче 1,5 м від підлоги.

Особливістю іонновітрового бактерицидного знезаражувача-озонатора є:

– використання різних фізичних явищ (іоніза-

ція, озонування, УФ-опромінення) з метою очищення і іонізації повітря;

– рух повітря забезпечується іонним вітром, що дає можливість використовувати знезаражувач-озонатор без примусових систем вентиляції (вентилятори, кондиціонери, калорифери, припливно-витяжні труби), але можливе його використання і в системі припливної вентиляції;

– швидкість потоку повітря (іонного вітру) регулюється напругою, що подається на електроди в межах 5–25 кВ;

– кількість вироблених іонів регулюється напругою на електродах у межах 5–25 кВ і полярністю електродів (позитивна або негативна корона);

– кількість генерованого озону регулюється напругою на електродах у межах 5–25 кВ і полярністю електродів (позитивна або негативна корона);

– використання осаджуючого електроду оригінальної форми (щестикутна зірка) дає змогу збільшити швидкість потоку повітря за рахунок збільшення його площі в порівнянні з електродами циліндричної форми, що дає змогу використовувати корпус невеликого діаметру;

– вбудований світловідбиваючий прошарок (плівка), який покриває внутрішню поверхню кожуха, дає змогу, за рахунок своїх фізичних властивостей, підсилити бактерицидну дію УФ випромінювання на повітряну масу в 1,8 рази;

– електроди, які використовуються для створення примусового конвекційного потоку, мають плавну систему зміни величини розряду за рахунок зміни живлення помножувача напруги, а значить, плавне регулювання величини швидкості руху повітря;

– іонізуючі електроди і бактерицидна лампа мають окремі системи живлення, що дає змогу використовувати їх разом або окремо.

**Експериментальні дослідження.** З метою перевірки теоретичних розрахунків параметрів іонновітрового бактерицидного знезаражувача-озонатора проведено низку експериментів по визначенню основних технологічних параметрів, а саме: залежність швидкості електричного вітру

$$V_e = f(U)$$

від напруги на електродах. Дослідження проводились наступним чином. За допомогою регульованого джерела живлення на електродах встановлювалась певна напруга в межах 5–25 кВ, із кроком 5 кВ. За допомогою ареометра визначалась швидкість руху повітря у випадку позитивного і негативного коронного розряду. В результаті дослідів отриманні експериментальні дані засвідчили, що близькі до розрахункових, середня відносна похибка не

перевищує 10 %. Залежності  $V_e = f(U)$  можуть бути представлені графіком (рис. 2).

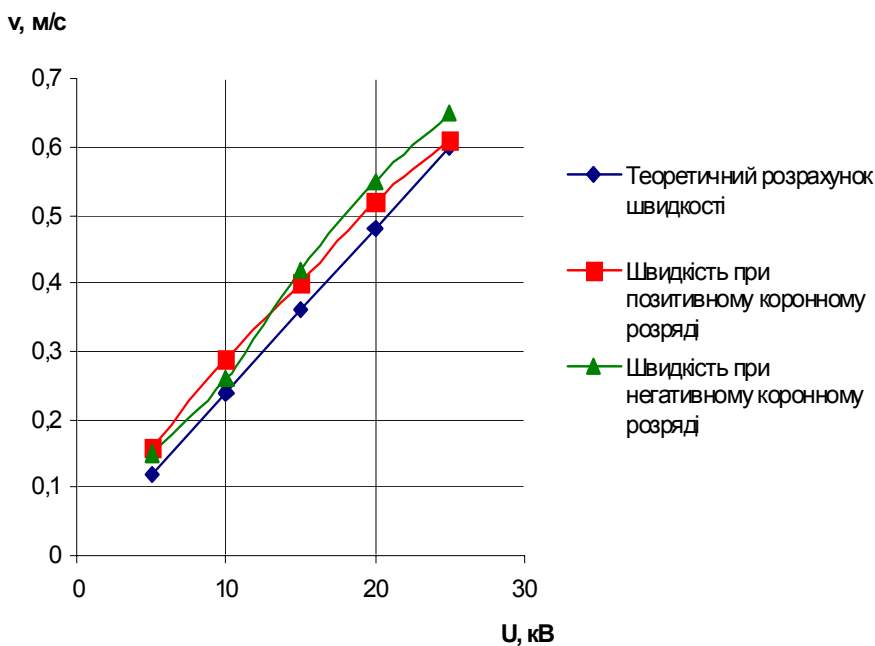


Рис. 2. Залежність швидкості вітру від напруги на електродах іонновітрового бактерицидного знезаражувача-озонатора  $V_e = f(U)$

**Висновки:**

1. Проведено аналіз принципів знезараження повітря поєднанням двох способів випромінювання: іонізаційного та ультрафіолетового. Висвітлені основні конструкції аероіонізаторів для вибору найефективнішої системи знезараження фізико-математичного моделювання його роботи.
2. Запропоновано електрофізичну модель роботи іонновітрового ультрафіолетового озонатора-знезаражувача повітря, яка враховує процеси створення електричного вітру, негативних аероіонів, озону, знезараження за

допомогою ультрафіолетового випромінювання, що може застосовуватися під час проектування відповідного обладнання.

3. Проведені експериментальні дослідження показали, що швидкість руху повітря через озонатор-знезаражувач знаходиться в межах 0,16–0,65 м/с при напрузі на електродах 5–25 кВ, що дає змогу дезінфікувати значні об'єми приміщень. Залежність між напругою електродів і швидкістю руху повітря є лінійною а відповідно її можна збільшувати, використовуючи більш потужне живлення.

**БІБЛІОГРАФІЯ**

1. Александров Г. Н. Физические условия формирования коронирующего разряда переменного тока / Г. Н. Александров // Советская физика. – 1956. – Т. 1, № 8. – С. 1714–1726.
2. Вассерман А. Л. Ультрафиолетовые бактерицидные установки для обеззараживания воздушной среды помещений / А. Л. Вассерман. – М. : изд-во Дом света, 1999. – Вып. 8(20).
3. Вассерман А. Л. Сравнительные характеристики бактерицидных облучателей с ксеноновыми импульсными лампами и с ртутными лампами НД / А. Л. Вассерман // Светотехника. – 2011. – №5. – С. 51–52.
4. Пат. 2080285 Рос. Федерация, МПК С 01 В 13/11. Устройство для получения озона / Виктор А. И., Марунчак Н. М. ; заявитель и патентообладатель Производственно-коммерческая и внедренческая компания «Альфа-Омега». – № 93038125/25 ; заявл. 26.07.1993 ; опубл. 27.05.1997.
5. Пат. 2153886 Рос. Федерация, МПК А 61 L 9/20. Устройство для обеззараживания воздуха / Сизиков В. П. ; заявитель и патентообладатель Сизиков Владимир Петрович. – № 99106031/14 ; заявл. 29.03.2000 ; опубл. 10.08.2000.
6. Райзер Ю. П. Физика газового разряда / Ю. П. Райзер. – М. : Наука, 1987. – 536 с.
7. Токарев А. В. Коронный разряд и его применение [Электронный ресурс] / А. В. Токарев. – Бишкек : КРСУ, 2009. – 138 с. – Режим доступа : <http://arch.kyrlibnet.kg/uploads/Tokarev%20A.V.pdf>.
8. Чижевский А. Л. Аэроионификация в народном хозяйстве / А. Л. Чижевский. – [2-е изд., сокр]. – М. : Стройиздат, 1989. – 488 с.
9. Germicidal ultraviolet irradiation. Modern effective methods to combat pathogenic microflora [Stephen B., Martin Jr., Chuck Dunn, James D. Freihaut, William P. Bahnfleth, Josephine Lau, Nedeljko Davidovic Ana] // ASHRAE JOURNAL. – August. – 2008.
10. Keklik N. M. Microbial decontamination of food by ultraviolet (UV) and pulsed UV light / N. M. Keklik, K. Krishnamurthy, A. Demirci // Microbial decontamination in the food industry. – 2012. – P. 344–369.
11. Townsend J. S. Electricity and Magnetism / J. S. Townsend. – [5th ed.]. – New York : Cambridge University Press. – 2003. – P. 927.