

УДК 621.3.049.77

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2313-5352-2019-14-27>

Шипелик Ю.П., Федосов С.А., д.ф.-м.н.

Східноєвропейський національний університет імені Лесі Українки

МЕТОДИКИ ТА ТЕХНІКИ ВИМІРЮВАННЯ ІОНІЗАЦІЇ ТА ЇХ ПРОБЛЕМАТИКА

У роботі описуються особливості вимірювання концентрації заряджених частинок у повітрі (іонів). Розглядається використання аспіраційного конденсатора в якості модельного датчика для вимірювання розподілу іонізованих частинок. Запропоновано технічні рішення побудови приладу та шляхи коректного обрахунку результатів розподілу іонів різної рухливості, встановлено переваги та недоліки. Робота переслідує мету розв'язання науковцями проблемних питань з вимірювання потоку іонів та можливі шляхи їх усунення.

Ключові слова: іонізація, іони, аспіраційний конденсатор, відхиляючий електрод, вимірювальний електрод, аспіраційна камера.

Вступ. Іонізація – перетворення електричнонейтральних частинок середовища на заряджені. Іонізація газів – відщеплення від атомів (молекул) газу одного або кількох електронів, а також приєднання вільних електронів до деяких нейтральних атомів (молекул), завдяки чому виникають позитивні й негативні іони та вільні електрони і газ стає провідником електричного струму. Відбувається під дією ультрафіолетового, X- й гамма-випромінювання внаслідок ударів прискорених електронів та іонів, при високій температурі та ін. Іонізація атмосфери, що відбувається під впливом зовнішніх факторів, призводить до утворення іоносфери. У повітрі під впливом електричних полів можуть утворюватися легкі, середні й важкі іони. До легких належать іони кисню, яким властива висока швидкість ($1 \div 2$ см/с за напруженості електричного поля 1 В/см). Важкі іони – це наелектризовані мікрочастинки пилу, диму тощо. Швидкість їхнього руху становить $\approx 0,001$ см/с. Джерелами природної іонізації повітря (аероіонізації) є ультрафіолетове випромінювання Сонця, космічне проміння, електричні розряди в атмосфері, радіоактивні випромінювання та ін. За нормальних умов атоми, молекули газів, вологи та інших частинок електричнонейтральні. Під впливом зовнішніх фізичних чинників від молекул відриваються електрони і рівновага порушується – утворюється нестабільні позитивні легкий іон та вільний електрон, які у свою чергу взаємодіють з молекулами повітря, утворюючи стабільні легкі іони. Процесами іонізації повітря можна пояснити запах моря, гірського повітря, хвойного лісу, грозового розряду тощо. Звичайна концентрація негативних аероіонів у повітрі становить $1\ 000 \div 10\ 000$ іонів/см³, у кімнаті – $400 \div 1\ 000$. Іони, утворені в повітрі, потрапляють до живого організму через дихання, осідаючи на частинках водяної пари, вони (вже у вигляді важких іонів) заряджають стінки трахеї, бронхів та бронхіол. Біологічну й фізіологічну дію аероіонів на здоров'я людини відкрив у 1919 р. російський біофізик О.Чижевський, який встановив, що для оптимального обміну речовин у повітрі має бути певна кількість від'ємних іонів кисню, та з'ясував, що від'ємні аероіони сприятливо впливають на всі функції, тоді як позитивні – негативно [1]. Розроблена ним методика генерації зазначених іонів за допомогою іонізаторів набула практичного застосування у медицині та сільському господарстві. Процеси іонізації застосовують у детекторах іонізуючого випромінювання під час контролю забруднення повітря та води, оцінювання якості й безпеки харчових та сільськогосподарських продуктів. Тому питання методики та техніки вимірювання іонізації має велике практичне значення і потребує вдосконалень у розрізі уникнення факторів, що спричиняють великі похибки даних вимірювань та коректної оцінки результатів досліджень.

Викладення основного матеріалу.

Модель аспіраційного конденсатора. Фізична модель вимірювання концентрації іонів полягає у наступному (рис. 1). На зовнішню обкладку циліндричного конденсатора подають так званий відхиляючий потенціал, а з внутрішньої обкладки знімають сигнал [2]. Наявність заряджених частинок у повітрі формує струм між зовнішнім і внутрішнім електродом. Цей струм вимірюють і він характеризує кількісні показники іонізованого повітря. Даний метод називається методом аспіраційного конденсатора.

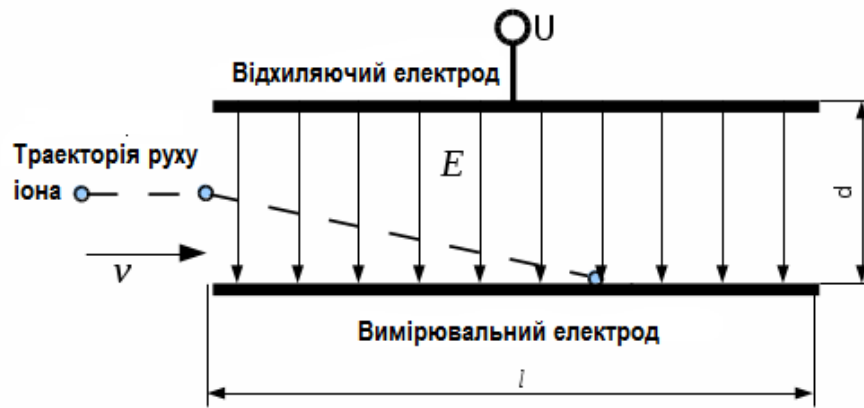


Рис. 1. Спрощена схема аспіраційного конденсатора

Конденсатор має довжину l відстань між пластинами d . Через конденсатор протягується повітря зі швидкістю v (м/с). На відхиляючий електрод подається напруга U (В). Слід зважити на таку характеристику іона – як рухливість. Якщо взяти сферичний іон у вакуумі і помістити його в електричне поле, то він почне рухатись з прискоренням і теоретично до швидкості світла. Але атмосфера Землі і наявність у ній інших частинок з якими зіштовхується іон призводить до прискорення рівним, або майже рівним нулю і сталої швидкості. Саме ця швидкість, котру набуває іон в одиничному електричному полі і є рухливістю іона.

За рухливістю у $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$ іони діляться на три групи: легкі – більше 0,77, середні – від 0,77 до $1,21 \cdot 10^{-2}$, важкі – від $1,21 \cdot 10^{-2}$ до $0,97 \cdot 10^{-4}$. Виходячи з цих умов маємо формулу:

$$\lambda_+ = e \sum n_+ u_+ \quad (1)$$

$$\lambda_- = e \sum n_- u_- \quad (2)$$

де λ_- , λ_+ – провідність атмосфери, n – концентрація іонів та u їх рухливість.

Виходячи з цих умов, можна стверджувати, що основний вклад у провідність атмосфери дають легкі іони. Даним методом (аспіраційним конденсатором) вимірюють не концентрацію іонів, а струм, що створюється всіма іонами одночасно. Тому варто добрати методики по їх розділенню.

Відділити іони за рухливістю не є надто складною задачею. Вимірюючи спектр атмосферних іонів за рухливістю [3] виявили, що оскільки повітря в переважній більшості не надто забруднене, то піків у спектрі не так і багато. У результаті пристрій, який буде фіксувати лише іони конкретного діапазону рухливості, а також знаючи що заряд іону переважно дорівнює елементарному, можна зробити перерахунок сили струму в концентрацію. Спираючись на рис. 1, визначений на вимірювальному електроді струм задається інтенсивністю потоку іонів на цей електрод

$$I = e \frac{dn(u)}{dt} \quad (3)$$

де I – сила струму, e – елементарний заряд, $n(u)$ – концентрація іонів з рухливістю u .

Звичайно, чим більша площа електроду тим більша сила струму. Габарити конденсатора і швидкість протягу повітря задають мінімальну вимірювальну рухливість u . Формула:

$$u \geq u_{\min} = \frac{d^2 v}{|U|l} \quad (4)$$

де u – рухливість на яку пристрій буде гарантовано реагувати, u_{\min} – мінімальна рухливість, d – відстань між електродами конденсатора, U – відхиляючий потенціал, v – швидкість протягу повітря.

Таким чином пристрій дає інформацію про всі іони, рухливість яких більша за u_{\min} . Звичайно іони з швидкістю меншою u_{\min} також будуть вносити свій вклад у результуючий струм, але чим менша їх рухливість тим менший шум створюваний ними. Це перша похибка, яку складно усунути.

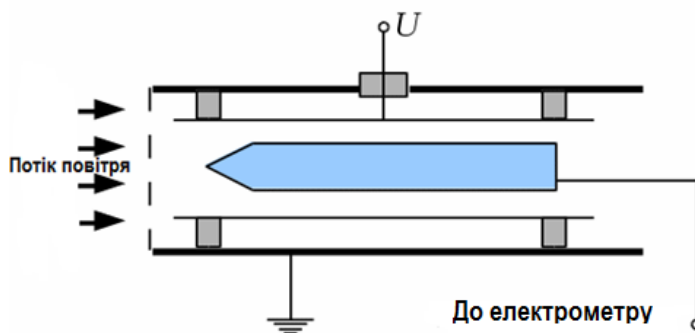


Рис. 2. Циліндричний конденсатор

Знаючи діапазон рухливості та силу струму створювану іонами в полі конденсатора, можна розрахувати еквівалентну концентрацію іонів. При розрахунку, як правило вважається, що кожен заряд іона (навіть важкого) дорівнює одному елементарному заряду. Але як відомо, що зустрічаються, хоча і рідко, факти подвійної іонізації, що дає нам другу похибку. Оскільки даний аспіраційний конденсатор буде вимірювати не тільки важкі іони, а всі що більше u_{\min} , то є декілька технічних рішень для обрахунку розподілу іонів різної рухливості.

Технічні рішення побудови приладу для вимірювання розподілу іонізованих частинок.

Перший спосіб: послідовний. В одній трубі (рис. 3) розміщують декілька конденсаторів послідовно. Конденсатори мають різні розміри і на них подаються різні напруги (для захоплення відповідних іонів). Через трубу протягують повітря, а з вимірювальних електродів конденсаторів знімають струм.

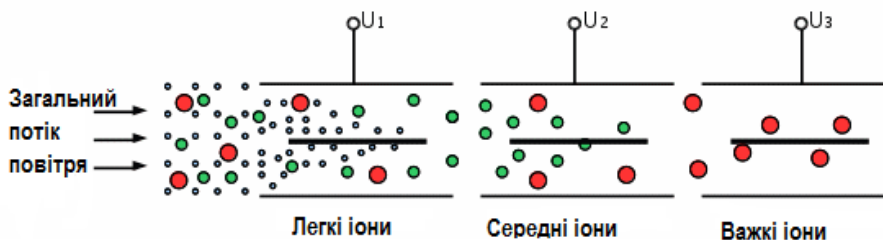


Рис. 3. Послідовний аспіраційний конденсатор

Переваги: кожен вимірний струм пропорційний тій чи іншій концентрації іонів. Недоліки: багато шумів, тому що кожен конденсатор дає наводку на наступний (конденсатор для легких іонів, при деякому збігу обставин, буде фіксувати частину середніх і важких іонів).

Другий спосіб: паралельний. У даному випадку (рис. 4) декілька конденсаторів отримують повітря з одного отвору, але вони різні і налаштовані на різні рухливості.

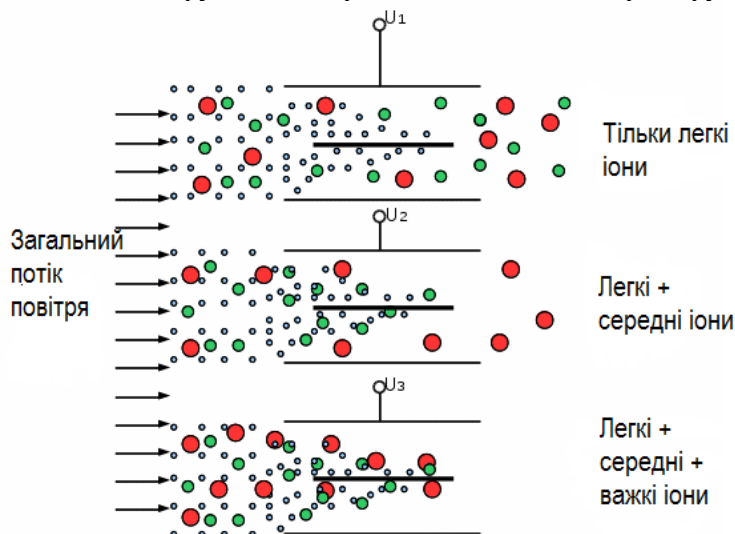


Рис. 4. Паралельний аспіраційний конденсатор

Переваги: немає наводок від попереднього конденсатора, а недоліки: потрібно застосовувати математичні розрахунки, оскільки конденсатор для легких іонів помірєє тільки легкі, конденсатор для середніх іонів помірєє середні і легкі, а конденсатор для важких – помірєє всі. Але це проста математична задача, де шляхом віднімання струмів, що зчитуються з конденсаторів, просто отримати об'єктивні результати. Даний метод є найбільш поширеним.

Третій спосіб: змінної напруги. У даному способі (рис. 5) потік повітря пропускають через один конденсатор змінюючи напругу на відхиляючому електроді.

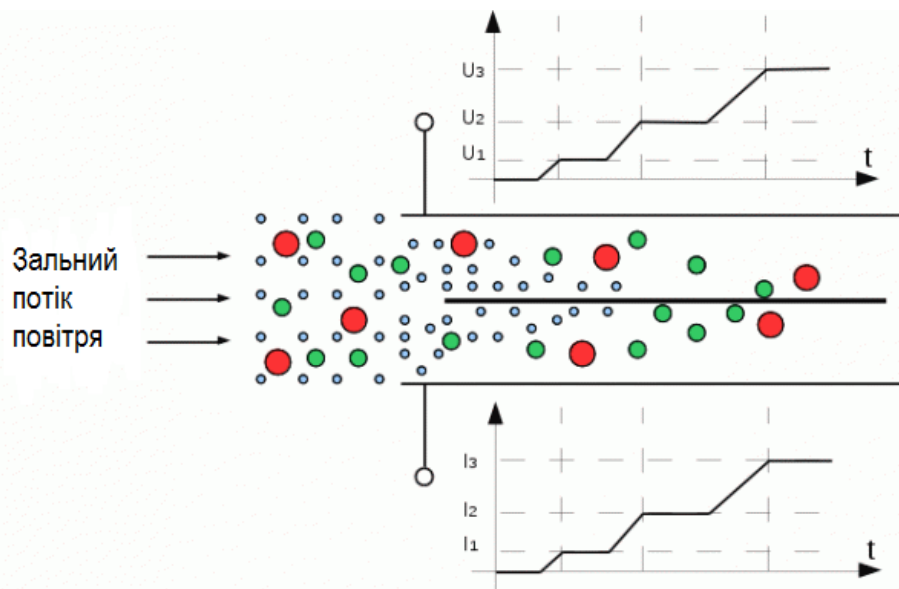


Рис. 5. Аспіраційний конденсатор змінної напруги

Переваги: малі розміри, а недоліки: ті ж самі що і при паралельному способі, а також технічна складність реалізації, так як для відхилення легких іонів інколи достатньо 10 ÷ 20 В, а для важких на тому ж конденсаторі потрібно до декількох кіловольт. Крім того, ще потрібно відмежувати ефекти перехідних процесів.

Тому перший і третій способи цікаві для експериментальних та наукових цілей, а другий для практичних вимірювань.

Проблемні питання та можливі шляхи їх усунення. При створення приладу з вимірювання потоку іонів ідеальним було б створення сферичного пристрою в умовах вакууму. При побудові в звичайних умовах виявляються проблеми, котрі значно впливають на якісні показники:

Проблема № 1. Потік повітря. Повітря достатньо складне середовище в розрізі руху і як будь яка в'язка система має властивість формувати турбулентні внутрішні вихрові потоки. Ця властивість вносить суттєву похибку: на вимірювальний включений конденсатор вихрові потоки повітря подадуть як негативні так і позитивно зарядженні іони і результат кількості від'ємних частинок буде від'ємним. Тобто кількість від'ємна, що буде свідчити про перевагу протилежно заряджених іонів. А заміри нікчемними. Тому форма, поверхня, геометричні розміри конденсатора повинні бути такими, щоб потік повітря всередині був ламінарним, тобто без будь яких завихрень.

Проблема № 2. Ізоляція. Це лише технічне питання. Оскільки струми, що знімаються з вимірювального електроду можуть бути в діапазонах нано- і пікоампер, то струми втрат мають мати ще нижчі показники. Звичайно для побутових приладів можна використати прокладки із фторопласта чи аналогічних матеріалів. Проте для цілей експериментальної геофізики таких допусків замало. Якщо наприклад поставити задачу виміряти концентрацію легких іонів від 1 іона/см³ не в лабораторних умовах, а у відкритому середовищі природи, то ця задача буде ускладнена низкою природних додаткових факторів, таких як роса, комахи, пилюка, пилок рослин та ін. Все це зумовить швидке забруднення ізоляторів, що призведе до збільшення величини струму витоку.

Для уникнення природних факторів впливу слід забезпечити такі умови:

- від опадів прилад закрити захисним кожухом виводячи назовні лише втягуюче сопло та вихідний отвір втягуючого вентилятора;

- від роси варто забезпечити внутрішній підігрів ізоляторів та електричної частини;
- для зменшення струму витoku обладнання варто розмістити на діелектричному підвісі;
- щоб уникнути завихрень вітру та зміни швидкості руху повітря всередині аспіраційного конденсатора, прилад варто розмістити соплом забору вниз;
- окремою складністю є усунення похибок від пилу та комах, оскільки заземлена чи ні сітка збирає заряд на своїй поверхні і повністю невілює точність замірів; у таких умовах можливо забезпечити якість експерименту лише періодичною механічною чисткою приладу; при промиванні забруднених поверхонь слід також зважити антисептик, який для цього використовується, так як було помічено, що запах етилового спирту дуже приваблює деякі види комах. Для даної цілі варто використовувати ацетон;
- знизити вплив токів витoku можна наступним чином: подати на відхиляючий електрод високу напругу. У лабораторних умовах достатньо подати 300 В на відхиляючий електрод, а підсилювач встановити з вхідною напругою +/- 15 В. Проте для умов замірів на природі будь-яка комаха чи павутина з росою спричинить коротке замикання, що призведе до виходу із строю приладу.

Проблема № 3. Динамічні характеристики. Оскільки в аспіраційну камеру пристрою повітря заповнюється не миттєво, а поступово, наприклад за 10 с, то пристрій фіксуватиме вірні показники тільки у випадку, коли зміна фону іонізації буде не швидше 10 с. Пришвидшити період заміни повітря в аспіраційній камері можна шляхом збільшення швидкості втягування та при цьому виникає проблема з турбулентністю. Тому при розрахунку приладу слід враховувати середовище в якому проводитимуться заміри в аспекті теоретичної оцінки швидкості зміни іонізації.

Висновки.

1. Аспіраційний конденсатор дає інформацію про всі іони, рухливість яких більша за мінімальну рухливість u_{\min} . Іони з швидкістю меншою u_{\min} також вносять свій вклад у результуючий струм, що створює одну з основних похибок, яку складно усунути.

2. При розрахунку, як правило вважається, що кожен заряд іона (навіть важкого) дорівнює одному елементарному заряду. Подвійна іонізація створює додаткову похибку результатів вимірів.

3. Запропоновано три способи (послідовний, паралельний, змінної напруги) технічного рішення побудови приладу реєстрації розподілу іонізованих частинок методом аспіраційного конденсатора для коректної оцінки результатів вимірів. Перший і третій способи цікаві для експериментальних та наукових цілей, а другий для практичних вимірювань.

4. При створення приладу з вимірювання потоку іонів ідеальним було б створення сферичного пристрою в умовах вакууму. При побудові в звичайних умовах виявляються проблеми, котрі значно впливають на якісні показники.

Інформаційні джерела

1. Чижевский А. Л. Аэроионификация в народном хозяйстве. Москва : Стройиздат, 1989. 488 с.
2. Посудін Ю. І. Фізика. : підручник. Біла Церква : Білоцерк. нац. агр. ун-т, 2008. 463 с.
3. Смирнов В.В. Ионизация в тропосфере. СПб : Гидрометеоиздат, 1992. 312 с.
4. Смирнов В.В. Природа и эволюция сверхмалых аэрозольных частиц в атмосфере. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 6. С. 723–748.
5. Сальм Я.Й. Ионы в приземном слое атмосферы. Химия плазмы. 1993. Вып. 17. С. 194–217.
6. Смирнов В.В. Электризация аэрозоля, обводняющегося в биполярноионизированном воздухе. Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т. 46. № 3. С. 321–331.

Шипелик Ю.П., Федосов С.А., д.ф.-м.н.

Восточноевропейский национальный университет имени Леси Украинки

МЕТОДИКИ И ТЕХНИКИ ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗАЦИИ И ИХ ПРОБЛЕМАТИКА

В работе описываются особенности измерения концентрации заряженных частиц в воздухе (ионов). Рассматривается использование аспирационного конденсатора в качестве модельного датчика для измерения распределения ионизированных частиц. Предложено

технические решения построения прибора и пути корректного расчета результатов распределения ионов различной подвижности, установлено преимущества и недостатки. Работа преследует цель решения учеными проблемных вопросов по измерению потока ионов и возможные пути их устранения.

Ключевые слова: ионизация, ионы, аспирационный конденсатор, отклоняющий электрод, измерительный электрод, аспирационная камера.

Shypelik Yu.P., Fedosov S.A., Dr. Phys. & Math. Sc.

Lesya Ukrainka Eastern European National University

METHODS AND TECHNIQUES OF MEASUREMENT OF IONIZATION AND THEIR PROBLEMS

The paper describes the features of measuring the concentration of charged particles in the air (ions). The use of an aspiration capacitor as a model sensor for measuring the distribution of ionized particles is considered. The technical solutions for constructing the device and the ways of correct calculation of the results of distribution of ions of different mobility are proposed, advantages and disadvantages are established. The work is aimed at solving problems of ion flow measurement by scientists and possible ways of their elimination.

Keywords: ionization, ions, aspiration capacitor, deflecting electrode, measuring electrode, aspiration chamber.