

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”  
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОННИХ ПРИЛАДІВ ТА ПРИСТРОЇВ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З КУРСУ “ЕЛЕКТРОННО-ФОТОННІ МЕТОДИ  
В ЕКОЛОГІЇ”

для студентів спеціальності  
“Електронні прилади та пристрої”  
всіх форм навчання

Ухвалено методичною  
комісією факультету (інституту)  
Факультету електроніки  
(назва факультету, інституту)

Протокол №01/13 від 28 січня 2013 р.

Голова методичної комісії

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

Програму рекомендовано кафедрою  
Кафедра електронних приладів та  
пристроїв  
(назва кафедри)

Протокол № від «  » 2012 р.  
(протокол №, дата)

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Писаренко Л.Д.  
(підпис) (ініціали, прізвище)

Київ – 2013

Методичні вказівки до лабораторних робіт з курсу “Електронно-фотонні методи в екології” для студентів спеціальності «Електронні прилади та пристрої» / Уклад.: А.І. Кузьмичев, С.Б. Сидоренко, О.М. Бевза –К.: НТУУ «КПІ», 2013. – 32 с.

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ  
до лабораторних робіт з курсу  
“Електронно-фотонні методи в екології”

Укладачі: А.І. Кузьмичев, , канд. техн. наук, доц, С.Б. Сидоренко, інж,  
О.М. Бевза, ас.

Відповідальний  
за випуск А.І. Кузьмичев, канд. техн. наук, доц.

Рецензенти: Л.М. Шмирева, канд. техн. наук, доц.

## ЗМІСТ

Лабораторна робота № 1 КОНТРОЛЬ ЗАБРУДНЕНOSTІ БЕТА-АКТИВНИМИ ІЗОТОПАМИ.	4
Лабораторна робота № 2 КОРОННИЙ РОЗРЯД АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В ЕКОЛОГІЇ .....	20

## Лабораторна робота № 1

### КОНТРОЛЬ ЗАБРУДНЕНOSTІ БЕТА-АКТИВНИМИ ІЗОТОПАМИ

**Мета роботи:** ознайомитися з одиницями вимірювання радіоактивності, методами вимірювання радіоактивності та принципом роботи радіометра РКБ-20.01-"БЕТА", його конструкцією. Провести виміри рівня радіоактивної забрудненості різних зразків.

#### Загальна характеристика радіоактивності.

*Відкриття радіоактивності.* Під природною радіоактивністю розуміють здатність речовин, що містять певні елементи, мимовільно, без зовнішньої дії, випускати невидиме випромінювання, що має складний вміст. Природна радіоактивність солей урану була відкрита французьким ученим Антуаном Анрі Беккерелем (1852-1908) в 1896 р.

*Склад випромінювання.* Було встановлено, що випромінювання, що випускається радіоактивними речовинами, має складний вміст. Якщо пропустити вузький пучок радіоактивного випромінювання через магнітне поле, то пучок розщеплюється на:

- а) потік позитивних частинок, що слабо відхилюються ( $\alpha$ -промені,  $\alpha$ -частки);
- б) пучок негативних частинок, що сильно відхилюються ( $\beta$ -промені,  $\beta$ -частки);
- в) пучок нейтральних частинок, що не відхилюється ( $\gamma$ -промені,  $\gamma$ -частки).

$\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$ - промені мають різні проникаючу й іонізуючу здатність: проникаюча здатність максимальна для  $\gamma$ -променів, мінімальна для  $\alpha$ -променів, іонізуюча здатність мінімальна для  $\gamma$ -променів, максимальна для  $\alpha$ -променів.

*Природа випромінювань.* Випромінювання містить  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $\gamma$ -промені тільки для з'єднань, які містять декілька радіоактивних елементів. Чистий радіоактивний елемент випускає або  $\alpha$ , або  $\beta$ -промені, які можуть супроводжуватися  $\gamma$ -променями. Випуск одного тільки  $\gamma$ -випромінювання спостерігається дуже рідко.

Радіоактивність є внутрішнім процесом. Це витікає з того, що на нього не діють вид хімічного з'єднання, агрегатний стан, великий тиск, температури, електричні і магнітні поля, тобто всі ті дії, які можуть змінити стан електронної оболонки. На процес природної радіоактивності можна впливати лише шляхом зміни стану ядра, наприклад, при опромінюванні ядер нейтронами.

$\alpha$ -промені є ядрами гелію  ${}^4_2\text{He}$ . Це було доведено прямими дослідями Резерфорда і Содді. Газ радон (еманація радію)  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ , поміщений в запаяній судині, випускаючи  $\alpha$ -промені, приводить до появи спектральних ліній гелію. Якщо зібрати  $\alpha$ -частки у судині, закритій достатньо товстою фольгою, прозорою для них, то в судині з'являється газ гелій, що знаходиться по спектру випромінювання. Маспектроскопічний аналіз показує, що відношення  $e/m$  для  $\alpha$ -часток рівно відношенню  $e/m$  для двічі іонізованих атомів  ${}^4_2\text{He}$ , тобто для ядер гелію,  $\alpha$ -частки володіють лінійним спектром енергій, який може складати декілька мега-електронвольт.

$\beta$ -промені є потоком електронів. Це витікає, зокрема, з того, що вони надають таку ж дію, що і катодні промені, і мають рівний з ними питомий заряд  $e/m$ , вимірюваний при їх русі в полях  $E$ ,  $H$ .  $\beta$ -частки мають суцільний спектр енергій, максимальна енергія складає 15 кеВ – 15 МеВ.

$\gamma$ -промені є потоком квантів, фотонів великої енергії і, отже, характеризуються великою частотою відповідного хвильового процесу. Вони мають таку природу, як світло або рентгенові промені, що виникають при гальмуванні швидких електронів, створених в рентгенівських

трубках або прискорювачах, і відрізняються від  $\gamma$ -променів, одержуваних в прискорювачах, лише механізмом виникнення,  $\gamma$ -промені мають лінійний спектр. Їх довжина хвилі  $\sim 10^{-12}$  м, а частота  $\sim 10^{20}$  Гц.

### Одиниці радіоактивності.

Основним процесом, що підлягає реєстрації і вимірюванню при радіоактивних перетвореннях, є розпад, що супроводжується випуском альфа- або бета-частинок, нейтронів і гамма-квантів. Для кількісної характеристики будь-яких дискретних подій (імпульсів, ударів і т.п.) застосовується загальна одиниця секунда в мінус першому ступені ( $s^{-1}$ ). Очевидно, ця ж одиниця повинна характеризувати активність джерела. Проте на практиці зручно указувати конкретно, про який саме процес йде мова. Тому, звичайно, за одиницю активності приймають як один розпад в секунду (розп/с). Для одного розпаду в секунду встановлено назву беккерель (Бк). Одиниця активності, яка складає  $10^6$  Бк, називається *резерфорд* (Рд).

Разом з одиницями розпад в секунду і резерфорд застосовується одиниця *кюрі* (Ки) і її часткові одиниці. Активність 1 Ки рівна  $3,7 \cdot 10^{10}$  розп./с. Походження цієї одиниці наступне. Якщо в закриту судину помістити радій, то спочатку кількість радону (еманації радію), що є продуктом розпаду радію, зростатиме. Оскільки сам радон також розпадається (з періодом напіврозпаду, рівним 3,82 діб), то врешті-решт встановиться рівновага між знов виникаючим радоном і тим, що розпадається. При цьому число актів розпаду, які щомить скоюються, залишатиметься практично постійним, якщо не враховувати зміну маси самого радію, яка відбувається вельми повільно, з періодом напіврозпаду близько 1600 років. Тому радіоактивність радію можна порівняти з радіоактивністю радону, що знаходиться в рівновазі з деякою кількістю радію. Одиниця радіоактивності кюрі є радіоактивністю радону, що знаходиться в рівновазі з одним грамом радію. Кількість радону, відповідне радіоактивності один-кюрі, має масу  $6,51 \cdot 10^{-6}$  г і містить  $1,78 \cdot 10^{16}$  атомів. Альфа-частки, що випускаються радоном (без урахування подальших продуктів його розпаду), здатні створити в повітрі іонізаційний струм насичення 0,92 мА.

Таким чином, 1 Кюрі є така радіоактивність, яку створює 1 г радію. Оскільки в 1 г радію в секунду розпадається  $3,7 \cdot 10^{10}$  ядер, то, отже,  $1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10}$  Бк.

Для вимірювання концентрації радіоактивного препарату іноді застосовується одиниця *еман* – концентрації в  $10^{-10}$  Ки на літр рідини або газу.

Раніше застосовувалася одиниця концентрації *махе*, рівна 3,46 емана і характеризується тим, що альфа-частки, що випускаються радоном, що знаходиться в одному літрі, здатні створити в повітрі іонізаційний струм насичення  $10^{-3}$  СГС- одиниці струму.

Частинки, що випускаються радіоактивним препаратом, утворюють потік, вимірюваний числом частинок в секунду. Число частинок, що доводяться на одиницю площі (квадратний метр або квадратний сантиметр), визначає густину потоку частинок.

### Одиниці величин, що характеризують іонізуючі випромінювання (дозиметрія).

При достатньо великій енергії атомні частинки (електрони, атоми, іони), ядерні частинки і фотони, поглинаючись в газі, здатні викликати його іонізацію. Ця здатність визначає експериментальні способи реєстрації подібних випромінювань і їх кількісні характеристики. Тому разом з енергетичними одиницями, що визначають потужність випромінювання, потік енергії і т.п., застосовують і деякі специфічні одиниці, зокрема такі, якими вимірюється здатність даного випромінювання виробити певну іонізацію газу. Деякі з цих одиниць побудовані на базі одиниць СІ, деякі – на базі одиниць СГС, інші – позасистемні.

Потік частинок або квантів – число частинок або квантів, що проходять крізь дану поверхню в одиницю часу. Звичайно, потік відносять до однієї секунди і відповідно визначають його одиницю: секунда в мінус першому ступені ( $s^{-1}$ ). Потік частинок, що доводиться на одиницю поверхні, розташовану перпендикулярно напрямку потоку, визначає густину потоку

частинок. Залежно від того, в якій системі одиниць проводиться вимірювання, потік відносять до одного квадратного метра або одного квадратного сантиметра і відповідно одиницями будуть  $\text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$  і  $\text{с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$  (секунда в мінус першому ступені – сантиметр в мінус другому ступені).

Потік випромінювання або густина потоку випромінювання, виміряні не числом частинок, а енергією, що переноситься (вати і ерги в секунду або відповідно вати на квадратний метр і ерги в секунду на квадратний сантиметр), вимірюють потік енергії випромінювання і густину потоку енергії випромінювання або його інтенсивність. Обидві ці величини і їх одиниці повністю співпадають із загальними енергетичними одиницями випромінювання.

Доводиться зустрічатися з об'ємною густиною енергії і її одиницями. При дослідженні іонізуючих випромінювань ця величина набуває особливого значення, характеризуючи енергію, поглинену в одиниці об'єму в результаті переходу енергії випромінювання в інші види. Загальна кількість поглиненої енергії вимірюється загальними енергетичними одиницями (Дж, ерг), а об'ємна густина поглиненої енергії – тими ж одиницями, що і об'ємна густина енергії ( $\text{Дж}/\text{м}^3$ ,  $\text{ерг}/\text{см}^3$ ).

Проте при вимірюванні виробленої випромінюванням іонізації істотною величиною є відношення поглиненої енергії не до об'єму, а до маси поглинаючої речовини. Це легко зрозуміти, якщо розглянути поглинання в газі. Оскільки іонізація відбувається при взаємодії частинок або квантів випромінювання з атомами або молекулами газу, то, очевидно, при удвічі меншому тиску потрібно удвічі більший об'єм газу, щоб одержати однакову іонізацію. Енергію, поглинену одиницею маси даної речовини, називають *поглиненою дозою випромінювання*. Її розмірність

$$|D| = L^2 \cdot T^{-2}$$

і одиниці – Дж/кг, ерг/г (джоуль на кілограм, ерг на грам). При цьому

$$1 \text{ Дж/кг} = 10 \text{ ерг/г}.$$

Ця одиниця одержала назву *грей* (Гр): 1 Гр — 1 Дж/кг.

Якщо  $D$  – поглинена доза,  $W$  – енергія, поглинена опроміненою речовиною,  $M$  – маса речовини,  $\rho$  – його густина,  $V$  – його об'єм :

$$D = \frac{W}{M} = \frac{W}{\rho V}$$

Застосовується також одиниця *рад*, рівна  $10 \text{ Дж/кг} = 10 \text{ ерг/г}$ ,  $1 \text{ Гр} = 100 \text{ рад}$ .

Поглинена доза випромінювання, віднесена до часу поглинання, називається потужністю поглиненої дози випромінювання  $p$ . Її розмірність

$$[p] = L^2 T^{-3}$$

і одиниці – Вт/кг і ерг/(с·г) (ват на кілограм і ерг в секунду на грам). Для характеристики випромінювання по виробленій їм іонізації служить величина, яка називається *експозиційною дозою випромінювання*. У СІ відповідною одиницею є кулон на кілограм (Кл/кг) – доза, що виробляє в одному кілограмі сухого повітря число іонів, сумарний заряд яких складає один кулон кожного знаку. Одиниця системи СГС СГС-одиниця заряду на грам, очевидно, в  $3 \cdot 10^6$  разів менше одиниці СІ.

Широко застосовується одиниця рентген (Р), яка визначається як *експозиційна доза* рентгенівських або гамма-променів, при якій в результаті повного іонізаційного поглинання в одному кубічному сантиметрі повітря за нормальних умов утворюються іони із загальним зарядом 1 СГС-одиниця кожного знаку. Цьому відповідає  $2,082 \cdot 10^9$  пар іонів в  $1 \text{ см}^3$  або  $1,61 \cdot 10^{12}$  пар іонів в 1г повітря. Оскільки маса кубічного сантиметра повітря при  $0^\circ\text{C}$  і  $760 \text{ мм}$

рт.ст. дорівнює  $1,293 \cdot 10^{-6}$  кг, то, враховуючи співвідношення між кулоном і СГС-одиноцею заряду, знайдемо

$$1 \text{ Р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}, 1 \text{ Кл/кг} = 3,88 \cdot 10^3 \text{ Р}.$$

Оскільки відома енергія, необхідна для іонізації повітря, експозиційну дозу можна виразити через поглинену дозу:  $1 \text{ Р} = 8,77 \text{ мДж/кг} = 8,77 \cdot 10^{-3} \text{ Гр}$ .

На практиці, звичайно, доводиться користуватися частковими одиницями : мкКл/кг (мікрокулон на кілограм), мР (мілірентген) і дрібнішими.

На основі одиниць експозиційної дози випромінювання утворюються одиниці потужності експозиційної дози – ампер на кілограм і рентген в секунду (А/кг і Р/с).

Вимірювання дози випромінювання по її іонізуючій здатності дозволяє встановити *фізичний еквівалент одиниці дози випромінювання*. Враховуючи середню енергію, що витрачається на іонізацію молекули повітря (близько 33 еВ), можна розрахувати, що 1 Р еквівалентний 85 ерг/г. Ця величина називається механічним або фізичним еквівалентом рентгена (позначається реф або фер),

При оцінці випромінювання по його біологічній дії застосовується біологічний еквівалент рентгена, що позначається реб або бер.

Біологічна доза визначається шляхом множення поглиненої дози на перевідний коефіцієнт Q. Якщо De – еквівалентна доза випромінювання, то

$$Q_e = Q \cdot D$$

### Перевідний коефіцієнт

Види випромінювання	бер/гр	бер/рад	Види випромінювання	бер/гр	бер/рад
Рентгенівські промені	100	1	α-промені	1000	10
γ-промені	100	1	повільні нейтрони	300	3
β-промені	100	1	швидкі нейтрони	1000	10

З даних таблиці виходить, що найбільш небезпечні з погляду внутрішньої поразки біологічних тканин є α-промені і нейтронні потоки, що пов'язано з великою масою цих частинок. Але з тієї ж причини від цих частинок можна захиститися при зовнішньому опромінюванні.

До одиниць іонізуючих випромінювань в деякій мірі примикає спеціальна одиниця ейнштейн (Е), що застосовується іноді при дослідженні фотохімічних процесів. Ця одиниця визначається як  $Na \cdot h\nu$ , де Na – число Авогадро, а  $h\nu$  – енергія кванта. З цього визначення видно, що одиниця ейнштейн не є загальною одиницею енергії, а має різне значення, залежно від довжини хвилі світла.

## МЕТОДИ РЕЄСТРАЦІЇ ЯДЕРНИХ ЧАСТИНОК

*Постановка задачі.* Методи реєстрації заряджених ядерних часток полягають в реєстрації або вимірюванні великого числа іонізованих ними атомів або молекул. Нейтральні частинки можуть іонізувати лише невелике число частинок, передавши їм свою енергію. Виниклі при цьому заряджені частинки реєструються по їх іонізуючій здатності.

Втрати реєстрованою частинкою енергії на іонізацію практично не залежать від її швидкості і визначаються в основному властивостями середовища. Для створення однієї пари іонів в повітрі потрібен 32 ев – для електронів з енергією близько 0,3 Мев, 36,0 ев – для протонів з енергією 2,5÷7,5 Мев; 36,1 і 36,5 – для α-часток з енергією 5,3 Мев,  $I_0=21,4$  ев. Тому по числу виниклих пар іонів можна судити про енергію і вид частинки. Електрони, звільнені частинкою, що летить, називаються первинними електронами, вони мають достатню енергією для

вторинної іонізації. Приведені вище чисельні характеристики відносяться до повної (усередненої) іонізації. Відмінність в методах реєстрації ядерних частинок базується на відмінності принципів реєстрації виникаючих іонів і електронів. Для виявлення частинок застосовуються наступні прилади: іонізаційна камера, лічильники Гейгера-Мюллера, кристалічні і сцинтиляційні лічильники, камера Вільсона, ядерні фотоемульсії, бульбашкова камера.

*Іонізаційна камера.* Іони, що виникають в результаті проходження ядерної частинки через камеру, будуть дифундувати. Для реєстрації їх в іонізаційній камері накладається електричне поле малої величини такої, щоб енергія, що набирається іонами або електронами на довжині вільного пробігу була менша за ту, яка необхідна для вторинної іонізації атомів або молекул газу, що займає камеру. Іонізаційні камери можуть бути циліндричної форми, плоскими. Між зовнішнім електродом і збираючим прикладається деяка різниця потенціалів від батареї. Якщо в камері утворилися іони, то в ланцюгу потече струм, який створює на опорі  $R$ . Ця напруга за звичай подається на вхід підсилювача. Величина струму, який протікає через опір, залежить від різниці потенціалів між електродами. Починаючи з деякого  $U$ , струм досягне насичення, коли всі виникаючі іони реєструються, їх рекомбінація припиняється. Вибираючи конструкцію камери, можна пристосувати її для реєстрації частинок певного сорту. Струми, що виникають в іонізаційних камерах, за звичай, складають величину порядку  $10^{-3}$  А. Величина струму пропорційна енергії частинок. Напруга на камері складає 200-300 В.

*Лічильники Гейгера,* Лічильники Гейгера-Мюллера є газорозрядними приладами, принцип дії яких заснований на іонізації газу частинками випромінювання, що реєструється. Джерелом іонізації можуть служити  $\gamma$ -промені, рентгенівське, ультрафіолетове і світлове випромінювання. У простому вигляді лічильник є скляним або металевим балоном, наповненим одним з інертних газів, із зовнішнім електродом – катодом і внутрішнім електродом – анодом.

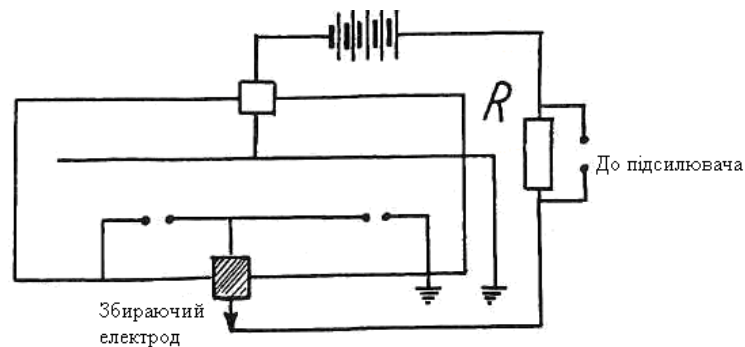


Рис. 1. Іонізаційна камера

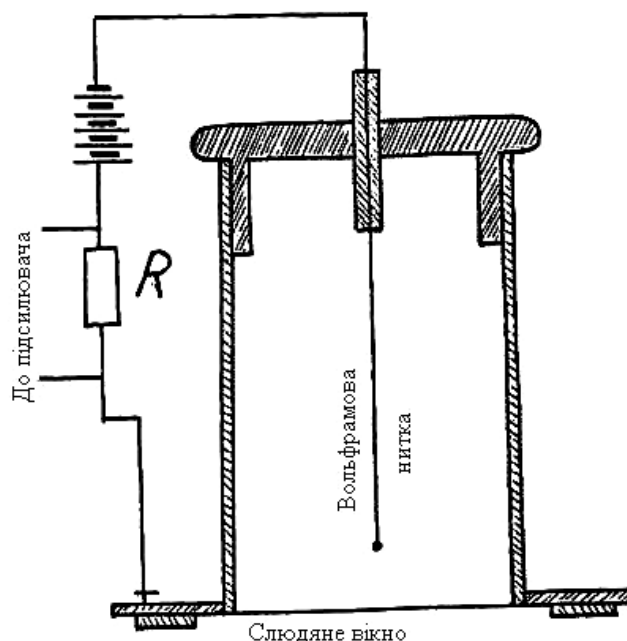


Рис. 2. Газорозрядний лічильник

Катодом є металевий балон або металізований шар, нанесений на внутрішню поверхню скляного балона, а анодом служить тонкий металевий дріт з вольфраму або ковару, встановлений уздовж вісі балона. При прикладенні напруги між анодом і катодом струм через лічильник протікає у випадку, якщо газ, що знаходиться в балоні, буде іонізований ядерними частинками, що потрапили в нього. При іонізації газу відбувається газовий розряд, а в ланцюзі анода лічильника протікає імпульс струму. Амплітуда імпульсів, яка визначається в основному напругою джерела живлення і розмірами лічильника, для лічильників Гейгера-Мюллера достатньо велика (від десятків часток вольт до десятків вольт). При постійній інтенсивності випромінювання кількість імпульсів залежить від напруги на електродах. Ця залежність називається рахунковою характеристикою. У деякій області прикладених напруг середня швидкість змінюється поволі, у зв'язку з чим лічильники Гейгера-Мюллера відносяться до класу повільних. Ділянка, з повільною швидкістю рахунку називається "плато" і є робочою областю лічильника. Чим більша робоча область, тим менш стабільною може бути напруга джерела живлення.

При роботі лічильника після першого імпульсу виникає стійкий самостійний розряд і лічильник не реагує на подальші ядерні частинки. Для відновлення працездатності лічильника розряд гаситься спеціальним електронним пристроєм гасіння. Окрім лічильників з пристроєм гасіння, застосовуються галогенові лічильники, що самогасяться, наповнені сумішшю газів, до складу якої входить спеціальна "гасяча" суміш у вигляді якого-небудь галогену. Проте в лічильниках, що самогасяться, унаслідок властивих особливостей після розряду виникає період нечутливості (мертвий час) порядку 100-500 мксек.

На практиці для реєстрації елементарних частинок застосовуються лічильники Гейгера-Мюллера в поєднанні з фотоелектронними помножувачами і електронними схемами гасіння. Фотоелектронний помножувач (ФЕП) є електронним приладом, в якому спеціальні матеріали імітують фотоелектрони під дією світлового випромінювання, а виникаючий фотоелектронний струм посилюється за допомогою вторинної емісії спеціальних електродів діодів. В теперішній час створені ФЕП з коефіцієнтом посилення до  $10^{10}$ . Вихідний струм ФЕП без інерційний, змінюється при зміні падаючого світлового потоку до частот порядку тисяч мегагерц, що обумовлює його застосування в поєднанні з лічильниками Гейгера-Мюллера.

*Кристалічні лічильники.* Кристалічними лічильниками є напівпровідникові матеріали, що використовуються для реєстрації частинок великої енергії. Якщо до напівпровідникового

кристалу з великою шириною забороненої зони прикласти різницю потенціалів, то в ланцюзі струму не буде унаслідок великого опору такого напівпровідника. Але якщо в напівпровідник потрапляє частинка з великою енергією, то виникає велике число вільних носіїв в зоні провідності, і через лічильник протече імпульс струму, який створює імпульс напруги на зовнішньому опорі. Величина імпульсу струму пропорційна числу первинно створених електронів. Тривалість імпульсу визначається часом збирання електронів і складає величину порядку  $10^{-7}$  сек.

Кристалічні лічильники мають високу ефективністю для  $\gamma$ -квантів. У алмазі завтовшки 2 мм виникає близько  $4,5 \cdot 10^{-2}$  комптонівських електронів на 1  $\gamma$ -квант з енергією 1 Мев. У хлористому сріблі виникає  $6 \cdot 10^{-2}$  комптоно-електронів на квант.

Для кристалічних лічильників використовуються кристали хлористого срібла, колоїди талія, сульфід цинку і кадмію, алмаз. Кристали CdS використовуються для реєстрації рентгенівського проміння, германієві прилади з  $p$ -,  $n$ -переходом використовуються для виявлення окремих  $\alpha$ -частинок. Для створення вільних носіїв струму витрачається енергія 4 - 10 еВ.

*Сцинтиляційні лічильники.* Ідея методу полягає у тому, що при проходженні іонізуючих частинок через деякі речовини в них збуджується флюоресценція. Спалахи світла реєструються візуально або за допомогою фотопомножувача. Для цього кристал, що сцинтилює, розміщується перед вхідним вікном фотопомножувача.

При проходженні однієї іонізуючої частинки через антрацен створюється близько 6000 фотонів на Мев втраченої енергії. Пропорційність між втраченою енергією і величиною сцинтиляційного імпульсу спостерігається для електронів і протонів, дещо гірше для  $\alpha$ -частинок. Сцинтиляційні лічильники мають велику роздільну здатність в часі, оскільки час висвічення у речовинах, що використовуються порядку  $10^{-8}$  с. Ефективність органічних сцинтиляційних лічильників розміром в 1 см для  $\gamma$ -квантів складає біля 10%, що у багато разів більше ефективності звичайного лічильника Гейгера-Мюллера. Для важких неорганічних речовин ефективність для  $\gamma$ -квантів зростає до 100%. Простота конструкції, велика ефективність для  $\gamma$ -квантів, велика роздільна здатність в часі, пропорційність світлового імпульсу обумовлюють все більше їх використання для виявлення частинок і вимірювання їх характеристик. Для лічильників використовуються йодний натрій, нафталін, антрацен, стільбен та інші тверді і рідкі речовини.

*Камера Вільсона.* Камера Вільсона дозволяє зробити шлях частинок видимим. Принцип роботи камери полягає в наступному. Для конденсації пересиченої пари необхідна наявність центрів конденсації. Ними є порошинки, скупчення молекул (флуктуації густини), позитивні і негативні іони. Отже, якщо через пересичену пару пропустити частинку з великою енергією, на іонах, що утворилися на її шляху, конденсуватиметься пара – утворюються крапельки, які зроблять шлях частинки видимим. Для отримання пересиченої пари здійснюють адіабатичне збільшення об'єму камери, наповненого насиченою парою, що приводить до пониження температури газу і пари і переходу насиченої пари в пересичену. З цієї метою використовуються пари води, етилового і пропілового спиртів і деяких інших рідин. Час чутливості камери може мінятися від 0,1 до декількох секунд.

Конструктивно камера Вільсона представляє порожнистий циліндр, закритий, з одного боку, плоскою скляною пластиною, а з іншого боку, – рухомим поршнем або рухомим пружно закріпленим дном. Сліди частинок ("треки"), що утворилися в камері, фотографуються в розсіяному ними світлі. Фотографування проводиться або двома фотокамерами, або однією фотокамерою фотографується трек і його зображення в плоскому дзеркалі. Одержувані стереоскопічні знімки при промірі дозволяють точно вимірювати просторові характеристики треків. Для видалення залишкових іонів в об'ємі камери створюється слабе електричне поле перед розширенням.

Для вимірювання енергій легких частинок камера поміщається в магнітне поле (по методу Скобельцина). По радіусу кривизни траєкторії можна обчислити імпульс частинки:

$$p=erB.$$

*Метод фотоемульсії.* Рух іонізуючої частинки у фотоемульсії призводить до розкладання галлоїдного срібла емульсії. Атоми, що піддалися дії рухомої частинки, є центрами, що роблять здатними зерна до прояву. Число зерен набагато менше числа пар іонів, але при не дуже великій питомій іонізації густина зерен, здібних до прояву, пропорційна втраті енергії. Ядерні емульсії мають вищу концентрацію галлоїдного срібла (приблизно в 4 рази), ніж оптичні емульсії, дуже малі зерна (від 0,1 до 0,6μ) добре розділені один від одного, і товсті шари (від 25 до 2000μ). Чим дрібніші зерна срібла, тим більшою іонізуючою здатністю повинна володіти реєстрована частинка. Вибором емульсії можна виділяти різні частинки. Вони дозволяють реєструвати уламки поділу, α-частинки, мезони, електрони. Для вимірювання енергії по довжині пробігу користуються відомими співвідношеннями між пробігом і енергією, або калібрують емульсії за допомогою однотипного випромінювання з відомою енергією частинок. Вид частинки може бути встановлений по характеру траєкторій. Вимірювання пробігу проводяться на мікроскопі з великою точністю відліків, фотообробка ядерних емульсій значно відрізняється від обробки оптичних емульсій.

*Бульбашкові камери.* Недоліком камери Вільсона і дифузійної камери є мала гальмівна здатність газів, а фотоемульсій – трудність їх обробки. У той же час трекові прилади мають велику перевагу перед іншими приладами реєстрації. У 1952 р. Глезер запропонував бульбашкову камеру-судину, наповнену перегрітою рідиною. Іонізуюча частинка, що проходить через камеру, викликає іонізацію. Іони є центрами паротворення, і тому траєкторія частинки відмічається бульбашками газу. В якості робочої рідини використовуються ксенон, етилен, пропан, фреони, водень, гелій та інші рідини або їх суміші. Робота камери зводиться до наступних операцій. Температура камери підтримується постійною. За деякий час до проходження досліджуваних частинок спрацьовує розширювальний пристрій, тиск в камері падає до величини, значно меншої тиску насиченої пари рідини при даній температурі. Рідина виявляється перегрітою і камера – чутливою до іонізуючого випромінювання. Пропускається пучок досліджуваних частинок, запалюються освітлювальні лампи, виконується фотографування треків. Розширювальний пристрій підвищує тиск до первинної величини, пара конденсується. Після цього камера готова до нового циклу. Час чутливості великих камер складає соті частки секунди.

Бульбашкові камери широко застосовуються при дослідженні частинок великих енергій.

## Технічний опис радіометра РКБ-20.01-"БЕТА" і інструкція з експлуатації.

### 1. ПРИЗНАЧЕННЯ

1.1. Радіометр бета-випромінювання РКБ-20 "БЕТА" (далі по тексту радіометр) призначений для контролю забрудненості води і продуктів харчування бета-активними радіонуклідами, а також для контролю радіоактивного забруднення різних поверхонь.

### 2. ОСНОВНІ ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

2.1. Радіометр забезпечує вимірювання питомої активності бета-випромінюючих нуклідів в рідких і сипких речовинах в діапазоні від  $5 \cdot 10^{-9}$  до  $10^{-6}$  Ку/кг (Ку/л).

Номінальне значення чутливості радіометра по зразковим пробам питомої активності  $^{90}\text{Sr}$  +  $^{90}\text{Y}$  складає  $4,3 \cdot 10^7$  кг(л)  $\cdot$  с $^{-1}$   $\cdot$  Ку $^{-1}$ . Відхилення чутливості від номінального значення  $\pm 10\%$ .

2.2. Радіометр забезпечує вимірювання поверхневої забрудненості бета-випромінюючими нуклідами в діапазоні від 10 до 1500 част/см $^2$ ·хв.

Градувальний коефіцієнт вимірювання поверхневої забрудненості складає 3,5 част  $\cdot$  с/см $^2$   $\cdot$  хв. Відхилення градувального коефіцієнта від номінального значення  $\pm 25\%$ .

2.3. Основна погрішність радіометра при вимірюванні активності твердих зразкових джерел  $^{90}\text{Sr}$  +  $^{90}\text{Y}$  в нормальних умовах і часі вимірювання 1000с не перевищує  $\pm 25\%$  при довірчій вірогідності  $P=0,95$ .

Перехідний коефіцієнт від чутливості радіометра за твердими зразковими радіоактивними джерелами до чутливості по зразковим радіоактивним розчинам складає  $2,2 \cdot 10^2$  кг $^{-1}$ (л $^{-1}$ ) з похибкою не більше  $\pm 15\%$ .

2.4. Додаткова погрішність вимірювання поверхневої забрудненості бета-активними радіонуклідами при зовнішньому гамма-фоні 100 мкР/ч не перевищує 50%.

2.5. Час вимірювання встановлюється оператором і може складати: 1; 10; 100; 500; 1000; 2000 с.

2.6. Живлення радіометра здійснюється від зовнішнього блоку живлення напругою  $(5 \pm 1)$  В з допустимим рівнем пульсації  $\pm 200$  мВ або від вбудованих сухих елементів типу "Уран" ТУ 16.729.125-78 загальною напругою 4,5 В, при цьому струм споживання радіометра при номінальній напрузі живлення рівній  $(4,5 \pm 0,45)$  В не перевищує 25 мА.

2.7. Час встановлення робочого режиму не перевищує 1 хв.

2.8. Радіометр подає звуковий сигнал після закінчення вимірювання.

2.9. Габаритні розміри :

блоку індикатора – 170x80x38 мм;

блоку детектора – 91x74x56 мм;

свинцевого будиночка – 155x150x129 мм.

2.10. Маса:

блоку індикатора – 0,25 кг;

блоку детектора – 0,23 кг;

свинцевого будиночка – 19,0 кг.

2.11. Напрацювання до відказу радіометру не менше 6000 год.

2.12. Середній строк служби радіометра не менше 6 років.

### 3. УСТРІЙ І ПРИНЦИП РОБОТИ

3.1 Принцип роботи.

3.1.1. Як датчик іонізуючого випромінювання в радіометрі використовується газорозрядний лічильник. При появі в робочому об'ємі лічильника іонізуючих частинок в ньому розвивається електричний розряд, внаслідок чого на виході лічильника з'являються імпульси, які підраховуються за допомогою електронної схеми і відображаються на цифровому індикаторі.

Для зменшення впливу високого  $\gamma$ -фона газорозрядний лічильник і вимірювані препарати проби поміщають в свинцевий будиночок.

### 3.2. Структурна схема радіометра.

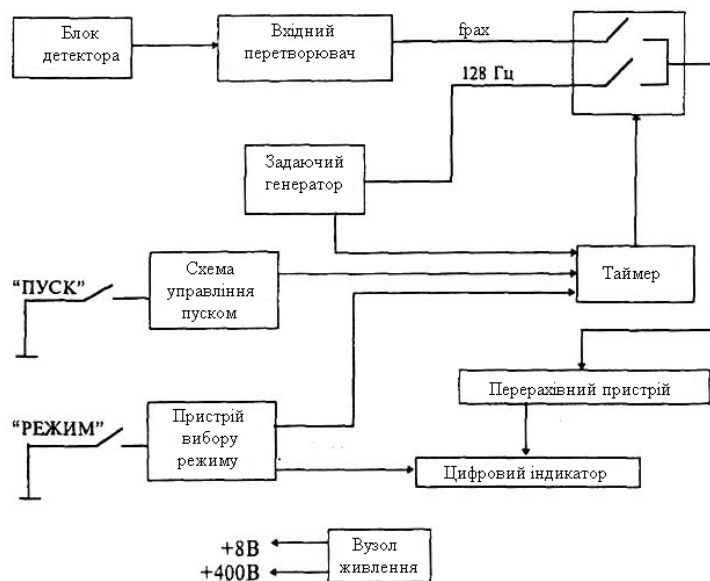


Рис. 3. Структурна схема радіометра

3.2.1. На рис.3 наведена структурна схема радіометра, що включає наступні основні вузли :

- блок детектора (на базі лічильника СБТ-10А) зі струмообмежувальним резистором, накопичувальною і розділовою ємкостями;
- вузол живлення блоку індикатора і блоку детектора, перетворюючий низьковольтну напругу джерела живлення в стабілізовану напругу +8 В і +400 В;
- вхідний перетворювач, призначений для формування імпульсів, що поступають від блоку детектора, по тривалості і амплітуді;
- задаючий генератор, що формує необхідні імпульсні послідовності;
- таймер, що формує визначені по тривалості вимірювальні інтервали;
- пристрій вибору режиму, призначений для завдання необхідних режимів роботи радіометра і індикації вибраного режиму роботи на цифровому індикаторі;
- пристрій перерахування, що робить підрахунок імпульсів за вибраний часовий інтервал;
- цифровий індикатор, що відображає результат вимірювання і вибраний режим роботи;
- схему управління пуском, призначену для пуску радіометра при вибраному режимі роботи і обнуління попереднього результату вимірювання.

3.3. Призначення органів управління і режимів роботи радіометра.

" $\odot$ " – перемикач, за допомогою якого включається живлення радіометра;

РЕЖИМ – кнопка, за допомогою якої вибирається і встановлюється необхідний режим роботи радіометра ;

ПУСК – кнопка, за допомогою якої здійснюється запуск радіометра на вимірювання.

**УВАГА!** Кнопка "ПУСК" стробується секундними імпульсами, тому утримувати її в натиснутому стані потрібно не менше 1с;

" $\varnothing$ " – перемикач, що включає звукову сигналізацію, наявність якої інформує про закінчення вимірювання.

3.4. Кількість режимів, функціональне призначення кожного і його характеристики приведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Номер режиму	Час вимір., с	Функціональне призначення
0	–	Режим загального скидання і установки радіометра в початкове положення при включенні живлення. У цьому режимі радіометр на вимірювання не запускається.
1	1	Режим автоматичного запуску радіометра на повторне вимірювання. Час індикації результату вимірювання 1с. Призначений для вимірювання поверхневої забрудненості і визначення очікуваної швидкості при вимірюванні питомої активності.
2	10	Режим вимірювання питомої і об'ємної активності
3	100	Те ж
4	500	Те ж
5	1000	Те ж
6	2000	Режим вимірювання питомої і об'ємної активності
7	неперервний	Режим функціонального контролю блоку індикатора. На цифровому індикаторі спостерігається безперервний підрахунок імпульсів. Для зупинки рахунку радіометр необхідно перевести на режим "0".

#### 4. КОНСТРУКЦІЯ РАДІОМЕТРА

4.1. Радіометр конструктивно виконаний у вигляді портативного переносного приладу. Зовнішній вигляд і склад радіометра представлений на рис.4.

4.2. Блок індикатора поз.1 є прямокутним корпусом, що складається з двох частин, скріплених між собою. Всередині корпусу розташована печатна плата з елементами. Розміщення всіх елементів на платі зроблено з таким розрахунком, щоб при знятій кришці забезпечувався вільний доступ до них і була можливість заміни їх при ремонті. На лицьовій панелі корпусу є вікно для цифрового індикатора,

У верхній частині корпусу блоку індикатора розташовані перемикачі включення живлення "⊕" і звукового індикатора "⚡", а також роз'єм для підключення блоку детектора.

На лицьовій панелі блоку індикатора розташовані кнопки вибору режиму РЕЖИМ і пуску радіометра ПУСК.

В нижній частині корпусу блоку індикатора розташований роз'єм для підключення зовнішнього джерела живлення.

Для установки сухих елементів живлення, на тильній стороні корпусу розташований спеціальний відсік з кришкою, що легко знімається.

4.3. Блок детектора поз.3 складається з лічильника типу СБТ-10А, встановленого в корпусі з удароміцного поліаміду. Для з'єднання з блоком індикації призначений кабель зв'язку, що закінчується роз'ємом.

4.4. Свинцевий будиночок поз.4 складається з камери і дверці. Стінки камери і дверці є порожнистими конструкціями, залитими свинцем.

Всередині свинцевого будиночка встановлені пластмасові корпус і екран, що є захистом від власного бета-випромінювання металевих частин конструкції. У корпусі передбачені пази для установки блоку детектора і кювет.

У задній стінці будиночка є отвір для виводу кабелю блоку детектора. В отворі розташований пристрій фіксації кабелю блоку детектора, що складається з двох сухариків і нажимної гайки.

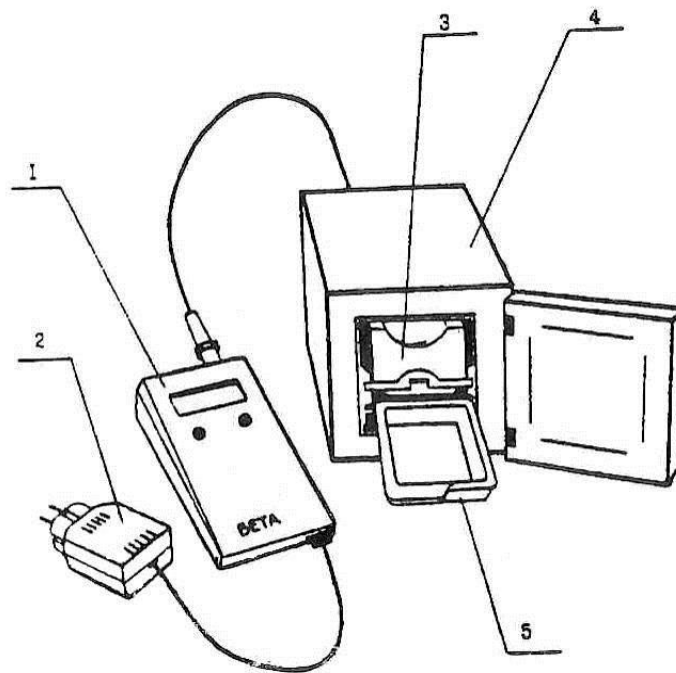


Рис. 4. Комплект радіометра «Бета»

## 5. ВКАЗІВКА ЗАХОДІВ БЕЗПЕКИ

5.1 При проведенні випробувань радіометра з використанням джерел іонізуючих випромінювань необхідно керуватися інструкціями за правилами роботи з радіоактивними речовинами і іншими джерелами іонізуючих випромінювань та нормами радіаційної безпеки НРБ-76 "Норми радіаційної безпеки НРБ-76" (Енергоиздат, М., 1981), ООП-72/80 "Основні санітарні правила роботи з радіоактивними речовинами і іншими джерелами іонізуючих випромінювань ООП-72/80" (Енергоиздат, М., 1981),

5.2. Не вмикайте радіометр при знятій кришці блоку індикатора або блоку детектора.

5.3. Підключення і відключення блоку детектора необхідно проводити при вимкненому живленні блока індикації.

5.4. Не встановлюйте в свинцевий будиночок кювету, проба в якій розміщена вище за її верхню кромку. Це може привести до пошкодження детектора.

5.5. Не поміщайте в свинцевий будиночок хімічно агресивні проби.

5.6. При установці і знятті захисної кришки або захисної сітки робочого вікна блоку детектора дотримуйтесь особливої обережності. Не робіть різких рухів і міцних стиснень при захопленні їх пальцями.

Не допускайте дотику руками і будь-якими іншими предметами до слюдяної пластини лічильника.

Обдування лічильника з боку слюдяної пластини потоком повітря (газу), що створює тиск більше 1,2 кГс/см – не допустимі.

## 6. ПІДГОТОВКА РАДІОМЕТРА ДО РОБОТИ

6.1. Після витягання радіометра з упаковки необхідно переконатися у відсутності пошкоджень, наявності пломби підприємства-виробника і перевірити комплектність виробу.

6.2. До початку роботи з радіометром вивчіть справжній паспорт, принцип роботи і призначення органів управління.

6.3. Робота з радіометром повинна проводитися в умовах, які відповідають робочим умовам експлуатації.

6.4. Радіометр повинен бути розміщений в світлому опалювальному приміщенні.

6.5. Всі блоки, що входять до складу радіометра, повинні розташовуватися на одному робочому місці.

6.6. Відстань між свинцевим будиночком і блоком індикатора не повинна перевищувати 1м.

6.7. Кювети, що входять до складу радіометра, перед вимірюванням повинні бути ретельно промиті і висушені. Наявність слідів радіоактивної забрудненості не допускається.

6.8. Для роботи радіометра від сухих елементів живлення необхідно зняти кришку відсіку живлення і встановити елементи у відсік, дотримуючись полярності.

6.9. У разі роботи радіометра від мережі підключіть мережевий блок живлення до блоку індикатора через штатний роз'єм.

6.10. Включіть радіометр, для чого переведіть движок перемикача "О" в положення, при якому з'являться цифри на індикаторному табло.

**УВАГА.** Відсутність світіння або мерехтіння індикатора радіометра при роботі від сухих елементів інформує про необхідність заміни останніх.

## 7. ПЕРЕВІРКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ

7.1. Перевірка функціонування блоку індикатора здійснюється при установці режиму "7". У цьому режимі на вхід пристрою перерахування подаються імпульси з частотою 128 Гц і на цифровому індикаторі спостерігається підрахунок імпульсів. Послідовна зміна цифр на індикаторному табло свідчить про нормальне функціонування блоку індикації.

## 8. ПОРЯДОК РОБОТИ

8.1. Обслуговування радіометра здійснюється одним оператором. Оператор зобов'язаний знати загальний пристрій радіометра, вимоги справжньої інструкції і мати допуск до роботи з радіометром.

8.2. Визначення радіоактивного забруднення різних поверхонь і продуктів харчування.

8.2.1. Підготувати радіометр до роботи, для чого:

8.2.1.1. Підключіть до блоку індикатора поз.1 (рис.2) блок живлення "Електроніка Д-10М" поз.2 і включіть блок живлення в мережу 220В. При відсутності електричної мережі вставте в блок індикатора три елементи типу А316 ТУ 16.729.125-78, як вказано в розділі 6.

8.2.1.2. Підключіть блок детектора поз.3 до блоку індикатора поз.1.

8.2.1.3. Встановіть на робоче вікно блоку детектора захисну кришку із сталеву пластину (встановлена при упаковці).

8.2.1.4. Включіть блок індикатора і встановіть необхідний режим роботи (10 або 100 с).

8.2.2. Послідовно натискаючи кнопку ПУСК, виконайте три вимірювання швидкості рахунку фонових імпульсів  $N_{\phi i}$  і визначте середнє значення по формулі :

$$\bar{N}_{\phi} = \frac{\sum_{i=1}^3 N_{\phi i}}{n} ,$$

де  $N_{\phi i}$  – швидкість рахунку фонових імпульсів,  $c^{-1}$ ;

$n$  – число вимірювань;

$\bar{N}_{\phi}$  - середнє значення швидкості рахунку фонових імпульсів,  $c^{-1}$ .

8.2.3. Зніміть з робочого вікна блоку детектора захисну кришку із сталеву пластину і встановіть захисну сітку з комплекту радіометра.

8.2.4. Помістіть блок детектора на відстань не більш 1 см від досліджуваного об'єкту і проведіть три вимірювання швидкості рахунку імпульсів з поверхні.

8.2.5. Визначте середнє значення швидкості рахунку імпульсів з поверхні по формулі:

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n},$$

де  $\bar{N}$  – середнє значення швидкості рахунку імпульсів з поверхні,  $c^{-1}$ ;

$N_i$  – швидкість рахунку імпульсів з поверхні,  $c^{-1}$ ;

$n$  – число вимірювань.

8.2.6. Визначте рівень забрудненості поверхні бета-активними радіонуклідами по формулі:

$$P = k_3(\bar{N} - \bar{N}_\phi),$$

де  $P$  – забрудненість поверхні бета-активними радіонуклідами, част/см<sup>2</sup> · хв;

$k_3$  – коефіцієнт градування рівний 3,5 част·с/см<sup>2</sup>;

$\bar{N}$  – середнє значення швидкості рахунку імпульсів з поверхні,  $c^{-1}$ ;

$\bar{N}_\phi$  – середнє значення швидкості рахунку фонових імпульсів,  $c^{-1}$ .

8.3. Визначення об'ємної (ОА) і питомої (ПА) активності бета-випромінюючих нуклідів в пробах.

8.3.1. Підготуйте проби до вимірювань згідно "Методики експресного визначення об'ємної і питомої активності бета-випромінюючих нуклідів у воді, продуктах харчування, продукції рослинництва і тваринництва методом "прямого" вимірювання "товстих" проб" (перероблена і доповнена, М., 1987), затвердженої Держагропромом СРСР, Мінохоронздоров'я СРСР і Держстандартом СРСР.

8.3.2. Підготуйте радіометр до роботи з свинцевим будиночком для чого вставте блок детектора у верхній паз корпусу свинцевого будиночка і підключіть його до блоку індикатора.

8.3.3. Включіть живлення і встановіть режим роботи "3". У середній паз свинцевого будиночка помістіть кювету з дистильованою водою, закрийте дверці будиночка і проведіть  $n$  вимірювань швидкості рахунку фону  $N_{\phi i}$ . Обчисліть середнє значення швидкості рахунку фону по формулі:

$$\bar{N}_\phi = \frac{\sum_{i=1}^n N_{\phi i}}{n},$$

де  $\bar{N}_\phi$  – середнє значення швидкості рахунку фонових імпульсів,  $c^{-1}$ ;

$N_{\phi i}$  – швидкість рахунку фонових імпульсів, зміряна при  $i$ -му вимірюванні,  $c^{-1}$ ;

$n$  – число вимірювань,  $n = 3, 4, 5$ .

8.3.4. Протягом дня проводьте вимірювання фону через кожні 1,5-2 години роботи.

Якщо за наслідками подальших вимірювань фону його значення збільшуються більш, ніж на 50%, то свинцевий будиночок, вимірювальна кювета і блок детектора підлягає дезактивації.

8.3.5. Помістіть в свинцевий будиночок кювету з пробєю і проведіть вимірювання швидкості рахунку в одному з режимів роботи "3" – "5".

Визначте середнє значення швидкості рахунку від проби:

$$\bar{N} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{n},$$

де  $\bar{N}$  – середнє значення швидкості рахунку від проби,  $c^{-1}$ ;

$N_i$  – швидкість рахунку імпульсів від проби, зміряна при  $i$ -му вимірюванні,  $c^{-1}$ ;

$n$  – число вимірювань,  $n = 3, 4, 5$ .

8.3.6. Розрахунок ОА і ПА виконується по формулі:

$$g = \frac{\bar{N} - \bar{N}_\phi}{S^p},$$

де  $g$  – питома, Бк/кг (Ку/кг) або об'ємна Бк/л (Ку/л) активність проби;

$S^p$  – чутливість радіометра для даного виду радіоактивної речовини;

$\bar{N}$  – середнє значення швидкості рахунку від проби,  $c^{-1}$ ;

$\bar{N}_\phi$  – середнє значення швидкості рахунку фонових імпульсів,  $c^{-1}$ .

**Примітка.** На радіометр "БЕТА" розповсюджується "Методика експресного визначення об'ємної і питомої активності бета-випромінюючих нуклідів у воді, продуктах харчування рослинництва і тваринництва методом "прямого" вимірювання "товстих проб", затверджена Держстандартом СРСР, Держагропромом СРСР і Головним Державним санітарним лікарем СРСР 26.05.87г. з тими ж значеннями чутливості, як і для радіометра КРВП-ЗАБ.

Для ізотопів  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{90}\text{Y}$  чутливість радіометра визначена при атестації і дорівнює  $4,3 \cdot 10^7 \text{ кг(л)} \cdot c^{-1} \cdot \text{Ку}^{-1}$ .

8.4. Контроль радіаційної чистоти різних поверхонь і продуктів харчування без використання свинцевого будиночка слід проводити по "Методичних рекомендаціях, по дозиметричному контролю, затвердженим Академією наук УРСР і Міністерством охорони здоров'я УРСР.

### 1. Загальні вказівки.

Для підготовки до лабораторної роботи вивчити матеріал в розділі «Загальні відомості про радіоактивність і методи її вимірювання». Звернути увагу на взаємозв'язок одиниць радіоактивності. Вивчити методи її вимірювання.

Ознайомитися з технічним описом радіометра "Бета" та інструкцією з експлуатації.

Підготувати протокол до проведення лабораторної роботи, в який виписати розрахункові формули для визначення забрудненості бета-активними ізотопами поверхні, води, зразків ґрунту і продуктів харчування.

### 2. Опис лабораторного устаткування.

Для проведення лабораторної роботи використовуються два радіометри РКБ-20.01-"БЕТА". Перший радіометр застосовується для вимірювання забрудненості поверхонь (його блок детектора на базі лічильника СБТ-10А використовується без свинцевого будиночка). Другий радіометр застосовується спільно з свинцевим будиночком (його блок детектора на базі лічильника СБТ-10А розміщений усередині будиночка).

Для живлення блоку індикатора застосовується допоміжний блок живлення «Електроніка-Д2-10 М», що підключається відповідно до мережевої розетки і блоку індикатора.

Як об'єкт для вимірювання забрудненості поверхні використовуються поверхня лабораторного столу.

Як об'єкт для вимірювання забрудненості води використовується звична водопровідна вода, наливана в кювету.

Як об'єкт для вимірювання забрудненості твердих (сипких) тіл і продуктів харчування використовуються матеріали, що надаються лаборантом в кюветах.

**УВАГА!** Не Допускати дотику руками і іншими предметами до слюдяної пластини лічильника. Не здавлюйте сильно корпус блоку детектора.

### 3. Методика визначення радіоактивної забрудненості поверхні.

При виконанні вимірювань керуватися вказівками п.8.2 технічного опису радіометра. Застосовувати перший радіометр, видаваний лаборантом.

Визначити середнє значення швидкості рахунку фонових імпульсів ( п. 8.2.2), при цьому на блок детектора повинна бути надіта кришка із сталєвою пластинєю.

Замінити захисну кришку на захисну сітку на робочому вікні блоку детектора (п. 8.2.3).

Помістити блок детектора на відстані не більш 1см від поверхні лабораторного столу і провести три вимірювання швидкості рахунку імпульсів (п. 8.2.4).

Визначити рівень забрудненості лабораторного столу по формулах, приведеніх в п.8.2.5 і 8.2.6.

Занести результати вимірювань і розрахунків в протокол.

#### **4. Методика визначення радіоактивного забруднення проб за допомогою свинцевого будиночка.**

При виконанні вимірювань керуватися вказівкам п.8.3 технічного опису радіометра. Застосовувати другий радіометр, блок детектора якого розміщений усередині свинцевого будиночка.

**УВАГА!** Щоб уникнути забруднення слюдяної пластини лічильника перед поміщенням в свинцевий будиночок кювет з пробами вставити в паз нижче за робоче вікно блоку детектора пластмасову пластинку, видану лаборантом. Після розміщення кювети з пробєю перед вимірюванням пластинку вийняти. Після вимірювань перед вийманням кювети з будиночка знову вставити пластинку в паз нижче за робоче вікно блоку детектора.

#### **5. Зміст протоколу.**

Протокол повинен містити :

1. Завдання по роботі з вказівкою послідовності дій по вимірюванню радіоактивного забруднення поверхні і проб.
2. Розрахункові формули.
3. Результати вимірювань і розрахунків.
4. Висновки згідно одержаних результатів.

#### **6. Контрольні питання.**

1. Поняття про радіоактивність. Види радіоактивності.
2. Одиниці вимірювання радіоактивності.
3. Одиниці вимірювання радіоактивних випромінювань.
4. Одиниці дози випромінювання.
5. Чому про радіоактивне випромінювання судять після виробленої ним іонізації?
6. Апаратура і методи для вимірювання радіоактивності.
7. У чому полягають труднощі вимірювання окремих видів радіоактивності? Як вони долаються?
8. Поняття про об'ємну і питому активність радіонуклідів.
9. Чим викликані фонові імпульси світла?

## Лабораторна робота № 2

### КОРОННИЙ РОЗРЯД АТМОСФЕРНОГО ТИСКУ І ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ В ЕКОЛОГІЇ

**Мета роботи:** вивчити особливості і характеристики коронного розряду атмосферного тиску і його можливі застосування для вирішення екологічних проблем.

#### 1. Короткі відомості про коронний розряд

При порівняно великому тиску в неоднорідному електричному полі в розрядному проміжку з малим радіусом кривизни одного з електродів виникає специфічний вид самостійного розряду, що одержав назву коронного розряду.

При поступовому збільшенні різниці потенціалів між електродами виникає несамотійний тихий розряд з дуже слабким струмом, а потім при певній *початковій напрузі* з'являється коронний розряд, що характеризується тонким шаром, що світиться, – короною біля електроду малого радіусу кривизни.

Корона може виникати біля негативного і позитивного електродів. Якщо обидва електроди мають малі радіуси кривизни, то утворюється дипольна корона.

Механізм утворення негативної корони розглянемо на прикладі електродів, що є коаксіальними циліндрами (рис. 1). Коронуючим є внутрішній електрод – нитка малого діаметру, що має негативний потенціал.

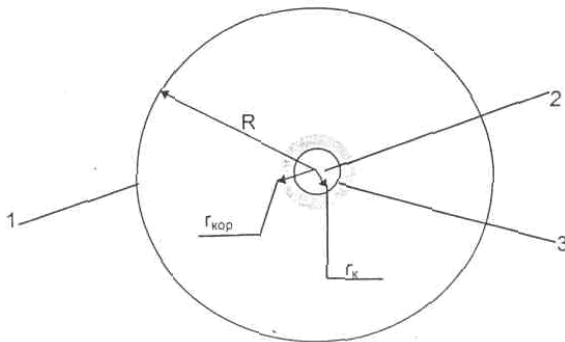


Рис. 1. Коронний розряд в системі циліндр-нитка.

1 – зовнішній циліндр; 2 – нитка; 3 – шар, що світиться, біля нитки

У циліндровому конденсаторі розподіл потенціалу не лінійний, а підкоряється закону

$$U_r = C \cdot \ln \frac{r}{r_k},$$

де  $r_k$  – радіус внутрішнього циліндра або нитки.

Відповідно, напруженість електричного поля обернено пропорційна координаті  $r$ :

$$\frac{dU}{dr} = -E_r = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R}{r_k}} = \frac{const}{r},$$

або

$$E_r \cdot r = const,$$

Тут  $R$  – радіус зовнішнього циліндричного електроду.

Таким чином, напруженість поля найбільша біля центрального електроду – катода:

$$E_{r, \max} = \frac{U}{r_k \cdot \ln \frac{R}{r_k}},$$

При збільшенні напруги між електродами саме біля поверхні катода швидкість електронів  $v_{ek} = K_e \cdot E_r$  досягає величин, при яких стає можливою іонізація атомів газу і виникнення електронної лавини, тут  $K_e$  – рухливість електронів. Ця лавина, проте, не розповсюджується до анода, оскільки на деякій відстані  $r_{кор}$ , яка представляє зовнішній радіус шару, що коронується, напруженість поля зменшується настільки, що припиняється іонізація, а потім і збудження атомів газу.

Таким чином, в зовнішній області корони немає електронної лавини, а є лише невеликий об'ємний заряд електронів, що дрейфують до анода у відносно слабкому електричному полі. При коронному розряді в повітрі разом з електронами утворюються і негативні іони. Їхній появі сприяє велика густина газу і невелика напруженість поля в зовнішній області корони, тобто малі швидкості руху електронів. Негативні іони утворюються, головним чином, за рахунок реакції прилипання електронів до молекул електронегативного газу (кисню, фтору і т.д.).

Наявність електронної лавини лише в межах шару, що коронується, говорить про те, що і умова самостійності розряду  $\mu = 1$  повинна виконуватися в межах цієї області. Вона може бути записане у вигляді :

$$\mu = \gamma \cdot \left( \exp \int_{r_k}^{r_{кор}} \alpha dr - 1 \right) = 1,$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії катода;  $r_k$  – радіус катода;  $r_{кор}$  – зовнішній радіус корони;  $\alpha$  – коефіцієнт іонізації газу. При рішенні цього рівняння можуть бути використані граничні умови, що полягають у тому, що при  $r = r_k$   $E_r = E$  – початкової напруженості на катоді, при якій виникає корона, а при  $r = r_{кор}$   $\alpha = 0$ .

Поява об'ємного заряду електронів, позитивних і негативних іонів в шарі, що коронується, приводить до деякого перерозподілу падіннь напруг на окремих його ділянках, внаслідок чого, як і при розвитку будь-якого розряду, величина  $\mu$  спочатку збільшується, а потім, пройшовши через максимум, зменшується і стає рівною одиниці в сталому режимі. Особливість коронного розряду полягає, проте, у тому, що в перерозподілі потенціалів бере участь і зовнішня область корони. Формування шару, що коронується, і збільшення струму приводять до збільшення падіння напруги на зовнішній області і зменшенню напруги на шарі, що коронується. Зовнішня область корони виконує роль великого баластного опору, включеного послідовно в ланцюг. Тому коронний розряд стабілізується навіть за відсутності опору в зовнішньому ланцюзі при струмі, у багато разів меншому, ніж при пробі в однорідному полі і виникненні тліючого розряду.

У позитивній короні електрони, що зароджують лавину, входять в коронуючий шар через його зовнішню поверхню. У зовнішній області корони струм переноситься позитивними іонами, що утворюються в коронуючому шарі і дрейфують до катода – зовнішнього циліндра. Малі швидкості іонів при підході до катода дають підставу вважати, що число вибитих ними вторинних електронів незначне. Крім того, шар, що коронується, розташовується достатньо далеко від катода, тому цілком вірогідно, що електронна лавина, з'являється біля кордону коронуючого шару в результаті фотоіонізації атомів газу випромінюванням корони.

При різниці потенціалів між електродами більше початкової напруги корони, розряд розвивається. Відбувається розширення шару, що коронується, і збільшення розрядного струму,

що супроводжується зростанням напруженості поля в зовнішній області корони. Це приводить до нового рівноважного стану.

У зв'язку з цим необхідно знати, за яких умов починається коронний розряд, які чинники визначають початкову напругу або початкову напруженість  $E_k$  поля.

Численні експерименти дозволили встановити, що початкова напруженість  $E_k$  поля залежить від тиску газу і радіусу коронуючого електроду. Ця залежність дається емпіричною формулою **Піку**, виведеною для коаксіальних циліндрових електродів в повітрі :

$$E_k = 3,04 \cdot \delta \cdot \left( 1 + \frac{0,0298}{\sqrt{\delta \cdot r_k}} \right) \cdot 10^6 \text{ В/м} \quad (1)$$

де  $r_k$  – радіус коронуючого електроду, м;

$\delta$  – густина повітря, віднесена до густини за нормальних умов.

Звідси початкова напруга  $U_k$  виникнення корони виражається формулою :

$$U_k = E_k \cdot r_k \cdot \ln \frac{R}{r_k}, \quad (2)$$

де  $R$  – радіус зовнішнього циліндричного електроду.

Цією формулою з достатнім ступенем точності можна користуватися і при циліндричному дроті та паралельній йому площині.

Розраховувавши по рівнянню початкову напруженість поля, можна визначити початкову напругу  $U_k$  виникнення корони між дротом і площиною по формулі :

$$U_k = E_k \cdot r_k \cdot \ln \frac{2h}{r_k},$$

де  $h$  – відстань між дротом і площиною.

Нарешті, при деякій напрузі коронуючий шар досягає зовнішнього електроду або коронуючого шару другого електроду (при двополярній короні), зникає область просторового заряду, обмежуюча струм, і відбувається іскровий пробій проміжку.

Таким чином, при коронному розряді виникає неповний пробій розрядного проміжку, що завершується при іскровому пробіі.

У техніці високих напруг корона є небажаним явищем. Поява корони між дротами високої напруги приводить до збільшення втрат при передачі енергії, руйнуванню поверхні ізоляторів і т.п.

Коронний розряд знаходить застосування в електрофільтрах для очищення газів, і деяких типах лічильників частинок. Розроблена серія стабілізаторів високої напруги з використанням коронного розряду.

Коронний розряд застосовується в озонаторах для вироблення озону з повітряного або чистого кисню, в плазмохімічних процесах, для електричної обробки полімерних матеріалів перед їх склеюванням або фарбуванням для поліпшення адгезії.

Слабкострумний коронний розряд застосовується в медицині для проведення фізіотерапевтичних процедур.

## 2. Опис лабораторної установки

Зовнішній вигляд лабораторної установки показано на рис. 2. Вона виконана у вигляді металевого корпусу 1, на кришці якого розміщений коронатор 2 у вигляді циліндрової труби. На передній панелі розташовані прозоре вікно 3 для візуального ознайомлення з внутрішніми елементами установки, мережевий тумблер 4, лампочка 5 для індикації включеного стану

установки, ручка 6 регулятора струму коронного розряду (і його напруги), кіловольтметр 7 і мікроамперметр 8. На задній панелі розташовані контакт захисного заземлення і вихід мережевого шнура живлення.

Коронатор 2 є циліндричною коаксіальною системою електродів типу "циліндр-нитка". Нитка має діаметр 0,1 мм і виконана з вольфраму. На передній поверхні коронатору є подовжнє віконце, що дозволяє спостерігати за свіченням нитки під час коронного розряду.

На нитку подається постійна напруга до 20 кВ, що генерується в установці за допомогою тиристорного однопольового перетворювача напруги. На рис. 3 показана спрощена електрична схема установки. Перетворювач містить тиристорний генератор імпульсів, що складається з розрядного конденсатора С2, тиристора Т і високочастотного підвищувачого трансформатора Тр. До вторинної обмотки трансформатора підключений діодно-конденсаторний помножувач напруги ПН, який одночасно випрямляє, помножує і фільтрує вихідну напругу негативної полярності.

Частота спрацьовування тиристора Т задається за допомогою генератора релаксації на діністорі Д, який спрацьовує, коли напруга на конденсаторі С1 досягає порогового значення. Час зарядки цього конденсатора і частота спрацьовування тиристора встановлюються за допомогою резистора R1, його ручка виведена на передню панель установки.

Зміною частоти генерації імпульсів регулюється напруга на виході помножувача ПН і на нитковому катоді коронатора К. Напруга коронатора контролюється за допомогою кіловольтметра PV, струм коронного розряду – за допомогою мікроамперметра РА. Ці прилади розташовані на передній панелі установки (див. рис. 2).

Установка працює таким чином. При включенні мережевого тумблера на передній панелі починає світитися індикаторна лампочка, а на перетворювач подається постійна напруга від внутрішнього джерела живлення. Перемиканням ручки регулятора струму встановлюємо задану напругу на виході помножувача і, відповідно, напругу і струм коронного розряду. Установка вимикається тим же мережевим тумблером.

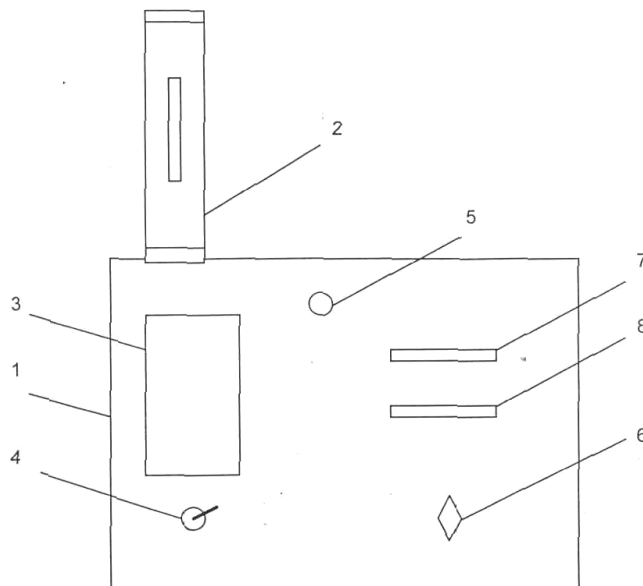


Рис. 2. Зовнішній вигляд лабораторної установки.

1 – корпус; 2 – коронатор (циліндр-нитка); 3 – вікно; 4 – мережевий тумблер; 5 - індикаторна лампочка; 6 – ручка регулятора струму; 7 – кіловольтметр; 8 - мікроамперметр.

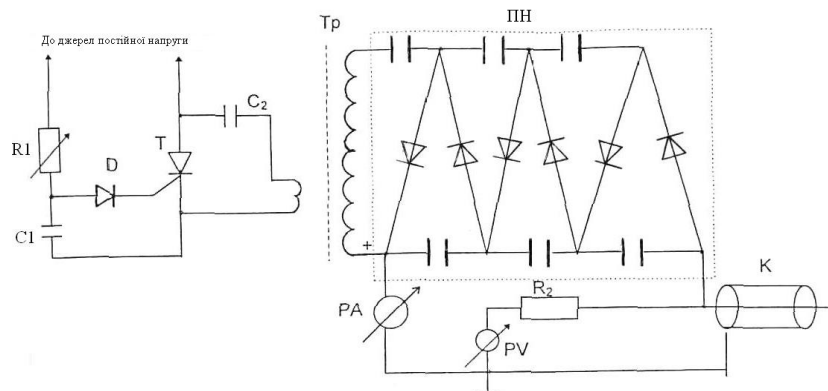


Рис. 3. Спрощена електрична схема установки

- C1 – конденсатор, що задає час,
- C2 – розрядний конденсатор,
- R1 – резистор, що задає час,
- R2 – додатковий опір кіловольтметра,
- D – діод,
- T – тиристор,
- Tr – високочастотний трансформатор,
- ПН – помножувач напруги,
- PV – кіловольтметр,
- PA – мікроамперметр,
- K – коронатор "циліндр-нитка".

### 3. Програма виконання лабораторної роботи

1. Ознайомитися із змістом методичних вказівок і матеріалом, приведеним в додатку. Рекомендується додатково вивчити науково-технічну літературу по коронному розряду і його застосуванню в екології і технології.

До лабораторної роботи допускаються студенти, що заздалегідь вивчили матеріал по коронному розряду, пройшли співбесіду з викладачем по темі роботи і підготували заготівку звіту.

2. Підготувати установку до проведення роботи. Для цього перевірити підключення до корпусу установки захисного заземлення і цілісність ізоляції мережевого шнура живлення, а також елементів на передній панелі.

Лабораторну роботу виконувати тільки у присутності викладача або лаборанта після проведення інструктажу по техніці безпеки.

3. Встановити ручку регулятора струму в крайнє ліве (проти годинникової стрілки) положення, а мережевий тумблер – в нижнє вимкнене положення.

Вставити вилку шнура живлення в мережеву розетку і приступити до проведення вимірювань.

4. Включити тумблер мережевого живлення переводом його вгору. При цьому повинна засвітитися індикаторна лампочка на передній панелі і лампочка освітлення усередині корпусу. Оглянути через віконце на передній панелі внутрішній устрій лабораторної установки.

Послідовно встановлюючи ручку регулятора струму в різні положення, виміряти і записати в звіт значення струму і напруги коронного розряду.

Спостерігати за свіченням нитки через віконце на коронаторі. Візуально визначити товщину шару, що світиться. Замалювати в звіт спостережувану картину світіння.

5. Побудувати вольт-амперну характеристику коронного розряду.

Розрахувати густину струму розряду на нитковому катоді з урахуванням його діаметру 0,1 мм.

Розрахувати для трьох точок вольт-амперної характеристики опір коронного розряду на постійному струмі.

Розрахувати початкову напругу виникнення корони і порівняти його із зміряними значеннями. Для розрахунку  $U_k$  використовувати формулу (2), де  $E_k$  розраховується по формулі (1),  $r_k = 0,1$  мм,  $R = 60$  мм.

Одержані дані занести в звіт.

#### 4. Вимоги до звіту

Звіт повинен містити мету лабораторної роботи, спрощену електричну схему лабораторної установки, короткий опис порядку виконання роботи, результати вимірювань і розрахунків.

#### 5. Контрольні питання

1. Основні ознаки і зовнішні прояви коронного розряду.
2. Механізм підтримки коронного розряду.
3. У чому полягає відмінність коронного розряду від тліючого і дугового?
4. Чому не потрібен зовнішній баластний опір для стійкої підтримки коронного розряду?
5. Чому свічення коронного розряду спостерігається на вістрях і нитках, а не на плоских електродах?
6. Основні області застосування коронного розряду в екології і технології.
7. Чому коронний розряд шкідливий і небезпечний для високовольних елементів радіоелектронної апаратури і ліній електропередач?
8. Чому в коронному розряді генеруються хімічно активні речовини і, зокрема, озон?
9. Основні токсичні газові речовини, що знаходяться в атмосферному повітрі і в димових газах. Їх походження.
10. Чим небезпечний бенз(а)пірен?
11. У чому причина утворення кислотних дощів?
12. Методи очищення газів?
13. Чому вдається очистити гази за допомогою газових розрядів?
14. Пристрій плазмохімічних реакторів на коронному розряді?

#### Література

1. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987.
2. Соболев В.Д. Физические основы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1979. .
3. Ворончев Т.Д., Соболев В.Д. Физические основы электровакуумной техники. – М.: Высшая школа, 1967.
4. Мик Д., Крегс Д. Электрический пробой в газах. – М.: Иностран. лит-ра, 1960.
5. Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно – ионной технологии. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
6. Русанов А.А., Урбах И.И., Анастасиади А.П. Очистка дымовых газов в промышленной энергетике. – М.: Энергия, 1969.
7. Справочник по пыли – и золоулавливанию/ М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др. – М.: Энергоатомиздат, 1983.
8. Лифшиц М.Н., Садовский Ф.Т. Электронно–ионная очистка воздуха от пыли в промышленности строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1968.
9. Чижевский А.П. Аэроионификация в народном хозяйстве. – М.: Госпланиздат, 1960.
10. Лифшиц М.Н. Аэроионификация: Практическое применение. – М.: Стройиздат, 1990.

## Застосування імпульсного коронного розряду для очищення газів

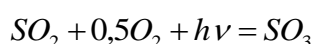
Очищення викидів промислових установок від оксидів азоту і сірки, фенолів і т.д. є важливою екологічною задачею. Особливо гостро ця проблема стоїть для димових газів теплових електростанцій. Так, наприклад, електростанція, що виробляє в рік 800 МВт електроенергії, і споживає при цьому близько 6 млн. тонн низькокалорійного бурого вугілля із змістом сірки в ньому 1,5%, викидає в рік близько 170 тисяч тонн діоксиду сірки ( $SO_2$ ).

### Оксиди сірки

В процесі спалювання палива сірка переходить не тільки в димові гази у вигляді  $SO_x$ , але може частково зв'язуватися твердими продуктами згорання: золою і шлаком при спалюванні вугілля, коксом і золотими відкладеннями при спалюванні мазуту.

Оксиди сірки є одним з основних забруднювачів атмосфери.

Сірчистий ангідрид  $SO_2$  є безбарвним газом з гострим запахом. При вдиханні дратує дихальні шляхи, порушує обмінні і ферментні процеси. При концентрації  $SO_2$  в атмосферному повітрі 0,1 – 0,2 мг/м<sup>3</sup> люди відчувають дискомфорт. Найчутливішими до  $SO_2$  є хвойні дерева, у яких спостерігається процес в'янення. Присутність сірчистого ангідриду спільно з димом і сажею в атмосферному повітрі (при високій вологості останнього) є причиною утворення в промислових центрах відновлювальних смогів в ранкові години. Тривалість перебування  $SO_2$  в атмосфері порівняно невелика (від 2 до 20 діб). За цей час відбувається його повне окислення до  $SO_3$ , яке протікає значно швидше під дією сонячного світла:



Сірчаний ангідрид (або тріоксид сірки)  $SO_3$  є безбарвним газом, подразнюючим дихальні шляхи. У вологому повітрі утворює туман (аерозоль) сірчаної кислоти, яка активно руйнує конструкції, будівлі і устаткування.

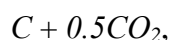
### Оксиди азоту

При спалюванні будь-яких органічних палив азот, що міститься в повітрі і в паливі, стає реакційноспроможним і, з'єднуючись з киснем, утворює оксиди:  $NO_x = NO + NO_2 + N_2O$ . Експериментальні і промислові дослідження показали, що основна частка утворених  $NO_x$ , а саме 95 – 100%, доводиться на монооксид (оксид) азоту  $NO$ . Діоксид  $NO_2$  і геміоксид  $N_2O$  азоту утворюються в значно менших кількостях. Помітні концентрації  $NO_2$  були знайдені лише у вихлопних газах газових турбін.

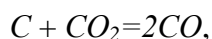
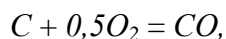
Існує два принципово різних джерела утворення оксиду азоту  $NO$  при горінні органічних палив. Це окислення атмосферного (молекулярного) азоту повітря  $N_2$ , що використовується як окислювач при горінні, і окислення азотовміщуючих складових палива. У першому випадку утворюються термічні і "швидкі" оксиди азоту, а в другому – паливні  $NO$ .

### Оксиди вуглецю

При спалюванні палива відбувається окислення вуглецю і його з'єднань з киснем повітря з утворенням діоксиду вуглецю (або вуглекислого газу)  $CO_2$  як кінцевий продукт повного окислення (згорання).



В той же час, внаслідок локальних недоліків повітря або несприятливих теплових і аеродинамічних умов, в топках і камерах згорання утворюються продукти неповного згорання, величезну частку яких складає монооксид вуглецю  $CO$  (чадний газ):



Оксиди вуглецю  $CO_x = CO_2 + CO$  входять до складу атмосфери Землі, приймаючи участь в глобальних циклах перетворення (кругообігу) вуглецю в біосфері.

Оксид вуглецю є безбарвним, позбавленим смаку газом, що має токсичну дію. Потрапляючи в організм,  $CO$  реагує з гемоглобіном крові, перешкоджаючи нормальному перенесенню кисню. Дослідження показали, що дія  $CO$ , навіть в порівняно малих кількостях, може викликати порушення поведінки, невідчутні для самого постраждалого. Негативні ефекти, пов'язані з підвищенням змісту чадного газу в атмосферному повітрі, виявляються в першу чергу при складних діях, що вимагають високого рівня уваги, наприклад, при виконанні монотонних робіт.

Концентрація  $CO$  в повітрі невелика і складає всього-на-всього близько  $0,13 \cdot 10^4$  % об. Проте дія  $CO$  на міське населення стає вельми важливою проблемою для крупних промислових регіонів. Вміст вуглекислого газу  $CO_2$  в атмосфері в даний час досягає  $0,03 - 0,032$  % об., проте є тенденція його збільшення на  $(0,6 - 0,7) \cdot 10^4$  % об. у рік в результаті активної промислової діяльності людини.

$CO_2$  пропускає короткохвильове світлове випромінювання сонця, але ефективно поглинає довгохвильове випромінювання, відзеркалене від поверхні Землі. Тому вуглекислий газ, присутній в атмосфері, діє як "захисний екран", зменшуючи теплові втрати планети. "Парниковий" ефект, пов'язаний з присутністю  $CO_2$ , – важливий чинник, регулюючий температуру земної кулі.

Так, за даними деяких дослідників, підвищення концентрації  $CO_2$  в атмосфері до величини  $0,6$  % об. приведе, у свою чергу, до підвищення середньорічної температури на Землі на  $3 - 4$ . Це приведе до танення льодовиків і морського льоду і затопленню приблизно четвертої частини суші. Тому діоксид вуглецю, поступаючий з антропогенних джерел, в глобальному масштабі слід розглядати як забруднювач.

### Поліциклічні ароматичні вуглеводні

Серед шкідливих компонентів димового газу особливе місце займає велика група поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ). Багато ПАВ має високу канцерогенну і (або) мутагенну активність, активізують фотохімічні смоги в містах, що вимагає строгого контролю їх емісії. Знаходячись в повітрі, водоймищах і ґрунті, вони поглинаються живими організмами (у тому числі і людиною) і накопичуються в різних тканинах. В той же час деякі ПАВ, наприклад, флуорантен, пірен і ряд інших фізіологічно майже інертні і не є канцерогенно небезпечними. Зважаючи на велику кількість різних ПАВ в димових газах і складнощі вимірювання їх концентрації, прийнято рівень канцерогенної забрудненості продуктів згорання і атмосферного повітря оцінювати по концентрації найсильнішого і стабільнішого канцерогену – бенз(а)пірена(Б(а)П).

Бенз(а)пірен  $C_{20}H_{12}$  є твердою кристалічною речовиною жовтого кольору з температурою плавлення  $179^\circ C$  і кипіння  $500-570^\circ C$ . Тому в газовому тракті казанів Б(а)П залежно від температур продуктів згорання може знаходитися в газоподібному, рідкому аерозолі або твердому станах. Разом з твердими частинками можливе часткове його видалення з димових газів в систему золоуловлювання. При цьому ступінь уловлювання Б(а)П в електрофільтрах і комбінованих золоуловлювачах досягає  $60-80$  %, а в – мокрих золоуловлювачах  $60-70$  %.

Вочевидь, наявність Б(а)П в продуктах згорання свідчить також про присутність інших канцерогенних ПАВ або підтверджує сприятливі умови їх утворення. Концентрація Б(а)П в димових газах сучасних парових казанів залежить від складу палива, режиму спалювання і коливається в широких межах, досягаючи 1–10 мгм/100 м<sup>3</sup> при спалюванні природного газу, 2–40 мгм/100 м<sup>3</sup> при спалюванні мазуту і 30–140 мгм/100 м<sup>3</sup> при спалюванні вугілля. Масовий викид Б(а)П в навколишнє середовище при спалюванні мазуту в казаноагрегаті блоку 300 МВт складає 0,2 г/год. Хоча на перший погляд ці цифри невеликі в порівнянні з викидами оксидів азоту 400–500 кг/год велика увага до Б(а)П обумовлена його високою канцерогенною активністю: за даними онкологів його дія у присутності оксидів азоту і сірки різко посилюється.

#### Питомі викиди шкідливих продуктів згорання при факельному спалюванні органічного палива в енергетичних казанах.

Викиди	Природний газ г/м <sup>3</sup> газу	Мазут кг/т мазуту	Вугілля кг/т вугілля
Оксиди сірки $SO_x$ (у перерахунку на $SO_2$ )	0,006–0,01	~21*S <sup>P</sup>	(7–19)*S <sup>P</sup>
Оксиди азоту $NO_x$ (у перерахунку на $NO_2$ )	5–11	5–14	4–14
Монооксид вуглецю $CO$	0,002 – 0,005	0,005 – 0,05	0,01 – 0,045
Вуглеводні	0,016	0,1	0,45 – 1,0
Водяні пари $H_2O$	1000	700	230 – 360
Діоксид вуглецю $CO_2$	2000	~3000	2200 – 3000
Летюча зола і шлак	–	10*A <sup>P</sup>	10*A <sup>P</sup>

Умовні позначення:

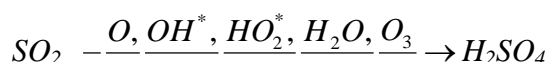
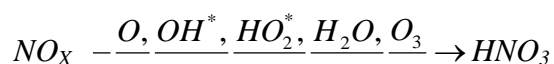
A<sup>P</sup>, S<sup>P</sup> – відповідно зміст золи і сірки на робочу масу палива, %

#### Методи очищення газів

Крім традиційних фізико-хімічних методів очищення (адсорбція, абсорбція, хіміко-каталітична обробка) продовжується розробка електрофізичних методів, в яких використовуються електронні пучки і імпульсні газові розряди. Перевагою цих методів є одночасне видалення  $SO_2$  і  $NO_x$  і висока економічність цих процесів.

Схема очищення за допомогою газового розряду полягає в наступному. Димові гази піддаються дисоціації електронним ударом у нерівноважній плазмі. При цьому виникають хімічно активні вільні радикали і молекули ( $OH$ ,  $O$ ,  $HO_2$ ,  $N$ ,  $O_3$ , і т.д.). Продукти дисоціації, взаємодіючи з оксидами сірки і азоту, окисляють їх зрештою до сірчаної і азотної кислот.

Для них бруто-процеси окислення активними частинками можуть бути записані таким чином:



Для нейтралізації кислот, що утворюються, використовують лужний реагент.

Якщо при цьому в газ додається аміак, то у присутності кисню і пари води він доокислює частину  $SO_2$  і нейтралізує кислоти з утворенням нітратів і сульфатів амонію в твердому стані, які видаляються за допомогою фільтрації.

Дослідження по електрофізичних методах ведуться на лабораторних і відносно малопотужних дослідно-промислових установках (енерговитрати на очищення до 180 кВт. Одним з перспективних електрофізичних методів представляється використання стримерної корони. Метод експериментально перевірений, реалізується на простому устаткуванні і допускає просте масштабування для очищення великих об'ємів газу. При цьому з метою зменшення капітальних витрат для очищення на крупних установках запропоновано використовувати конструкції реакторів, близькі до стандартних електрофільтрів, які використовуються для очищення диму від пилу. Розрядні методи очищення по енергетичній ефективності близькі до електронно-променевого методу. Із збільшенням питомої потужності енерговнеску енергетична ефективність електрофізичних методів погіршується. Газорозрядний метод дозволяє зберегти ефективність простим конструктивним збільшенням площі електродів.

На рис. П.1 приведені залежності ступеня очищення димових газів від  $NO_x$  від питомого енерговнеску в газовий розряд або електронний пучок.

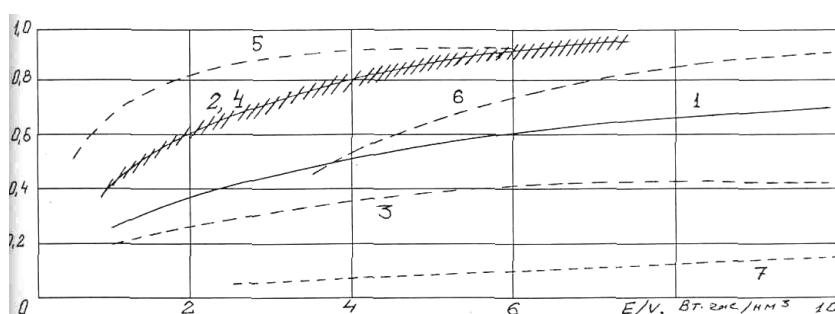
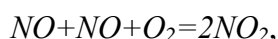


Рис. П.1. Залежність ступеня очищення димових газів від  $NO_x$  від питомого енерговнеску : 1,2,3,6 – імпульсний коронний розряд (1 –  $O_2 = 0,5\%$ , 2 –  $O_2 = 4\%$ ), 4,5 – електронний пучок, 7 – стаціонарний коронний розряд.

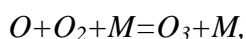
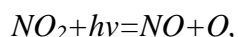
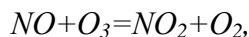
Експериментальні роботи по використуванню стримерної корони для очищення ведуться в Італії (Центр термоядерних досліджень), в США (Флоридський університет), в Японії (Фукуйський технологічний інститут), в Голландії (Ейндховенський університет), в Росії (ІВТАН, ТРІНІТІ, ІХФ). У дослідженнях застосовувалися різні конфігурації електродів в реакторах: вістря–площина, система коаксціальних електродів дріт–циліндр і конструкції, аналогічні стандартним електрофільтрам. Застосовувалися різні схеми живлення розряду, які давали різну ефективність очищення. Аналіз робіт приводить до висновку, що перспективним є використання імпульсів напруги наносекундної тривалості.

### Кінетика видалення $NO_x$ з димових газів з використанням газового розряду

У проблемі охорони атмосфери в першу чергу беруть до уваги монооксид  $NO$  і діоксид азоту  $NO_2$ , суму яких позначають  $NO_x$ . Джерелом оксидів азоту може бути молекулярний азот повітря, який використовується як окислювач при горінні, або компоненти палива, що містять азот. У зв'язку з цим оксиди азоту прийнято підрозділяти на повітряні або паливні. Повітряні, у свою чергу, можна розділити на термічні, утворюються при високих температурах за рахунок окислення молекулярного азоту атомарним киснем, і, так звані "швидкі" оксиди азоту, що утворюються в зоні порівняльно низьких температур в результаті реакції вуглеводневих радикалів з молекулою азоту і подальшої взаємодії атомарного азоту з гідроксидом  $OH$ .  $NO_x$  в димових газах ТЕЦ на 97–98% складаються з монооксиду азоту, уловлювання якого відомими хімічними методами складне. Оксид азоту  $NO$  хімічно малоактивний, а його розчинність у воді складає всього  $0,047 \text{ см}^3/\text{г}$  при кімнатній температурі і атмосферному тиску. При викиді в атмосферу відбувається доокислення  $NO$  в  $NO_2$ :

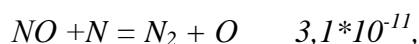
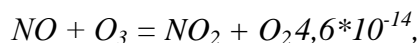
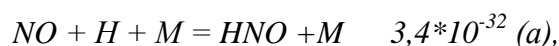
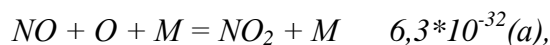
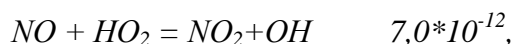


Остання реакція виконує значну роль тільки в шлейфі димових газів за відсутності інтенсивного перемішування з повітрям. Характерний час цієї реакції в повітрі при концентрації  $NO$   $360 \text{ мг/м}^3$  (мінімальний вміст  $NO$  в димових газах ТЕЦ з продуктивністю казанів  $200\text{--}1250 \text{ т/год}$ ) складає  $2 \cdot 10^3 \text{ с}$ , якщо прийняти константу швидкості реакції  $k=1,4 \cdot 10^{38} \text{ см}^6 \text{ с}^{-1}$ . При розбавленні диму в атмосфері динаміка окислення  $NO$  визначається трьома процесами:



По токсичності  $NO_2$  значно перевершує  $NO$ . У СРСР прийнята гранична разова концентрація  $NO$  в приземному повітрі  $0,60 \text{ мг/м}^3$ , а для  $NO_2$  –  $0,085 \text{ мг/м}^3$ .

Основні реакції з відповідними константами швидкостей при температурі  $350^\circ\text{K}$ , що приводить до знищення  $NO$  в газовій фазі, при дисоціації димових газів наступні:



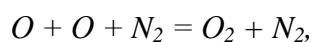
де розмірність для парних реакцій –  $\text{см}^3/\text{с}$ , а для потрійних реакцій –  $\text{см}^6/\text{с}$ .

Застосування реакції з озоном при використуванні мокрих методів очищення димових газів пройшло стадію напівпромислових випробувань. Озон виходив окремо з повітря в озонаторах. Отримання озону і його подальше транспортування до димового газу вимагає використання високолегованих або полімерних матеріалів, здатних витримувати дію корозійно-активних середовищ.

Якщо газовий розряд запалюється безпосередньо в потоці димових газів, то створення активних радикалів і окислення відбувається практично в одній і тій же зоні. Якщо прийняти концентрації  $NO$  і  $OH$  рівними  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ , то характерний час протікання, наприклад, реакція  $NO + OH = NO_2$  при температурі  $350^\circ\text{K}$  складе

$$t = 1/k [NO] = 10^{-5} \text{ с},$$

де  $k$  – константа швидкості реакції. При швидкості руху димових газів близько  $1 \text{ м/с}$  диокислення відбувається на відстані не більш  $1 \text{ см}$ . Процес загибелі радикалів при рекомбінації в реакціях типу



при температурі  $350^\circ\text{K}$  йде при атмосферному тиску значно повільніше:

$$t_{\text{рек}} = 1/k_2 [N_2] * [O] = 10^{-3} \text{ с},$$

де  $k_2 = 3 \cdot 10^{33} \text{ см}^6/\text{с}$ . Отже, радикали, не встигаючи рекомбінувати, вступають у взаємодію з оксидом  $NO$ . Таким чином, активні частинки реагують з оксидами азоту і утворюють вищі оксиди, а потім азотну кислоту. Далі вводяться компоненти, наприклад аміак, які реагують з кислотами, утворюючи з'єднання, що перетворюються на тверді частинки у присутності води і надлишку аміаку. Уловлювання частинок потім відбувається в електрофільтрах. Застосування електричного розряду в крупних установках вимагає високої енергетичної ефективності генерації радикалів. Для цього необхідно створювати нерівноважну плазму з температурою електронів 3–5 еВ. З цією метою слід прагнути до реалізації електричних полів, при яких величина параметра  $E/N$  ( $E$  – напруженість поля,  $N$  – густина газу) досягає оптимальних значень.

В теперішній час для отримання радикалів все частіше використовується стримерна корона. Стримерна корона є розрядом, який розвивається від високовольтного електроду у вигляді окремих плазових шнурів (радіус 0,1–1 мм) уздовж напрямку зовнішнього поля. Швидкість стримерів складає 106 – 108 см/с. Довжина розповсюдження стримерів, як правило, від декількох сантиметрів до десятків сантиметрів.

Також було запропоновано використовувати для цілей очищення стаціонарний тліючий розряд атмосферного тиску, підтримуваний в швидкому потоці газу. Перевагою такого розряду є те, що в ньому, на відміну від коронного розряду, сильні електричні поля і, відповідно, зона генерації активних частинок займає весь міжелектродний проміжок. При використуванні такого розряду для синтезу озону в повітрі була одержана енергетична ціна озону близько 85 г/кВт\*год. Проте необхідність реалізації високої швидкості потоку (100–200 м/с) вимагає додаткових витрат енергії і робить проблематичним використання такого розряду в енергетиці.

Дослідження окислення  $NO$  в  $NO_2$  і  $N_2O_5$  в коронному розряді показали, що генерація корисних радикалів при цьому зосереджена в тонкому шарі поблизу коронуючого електроду. Експерименти проводилися при температурі 50°C, при  $H_2O=10$  об.%,  $O_2=5$  об.% і початкової концентрації  $NO$  300 ppm. Діаметр зовнішнього електроду складав 2,8 см, коронуючого – 0,2 мм. При видаленні 80%  $NO$  енерговитрати склали 3,2 г( $NO$ ) /кВт\*год, що в перерахунку на витрату димового газу  $10^6 \text{ км}^3/\text{год}$  (характерний викид енергоблоку в 300 МВт) складе 78 МВт. Але енерговитрати на очищення більше 2% встановленої потужності в даний час вважаються неприйнятними.

Проводилися експерименти по видаленню оксидів азоту з сухого і вологого повітря за допомогою стримерної корони при добавці в газ аміаку. Концентрація  $NO$  складала 180 ppm. На реактор подавалися імпульси напруги від –60 до +60 кВ, з фронтом 50 нс і тривалістю близько 300 нс. Застосовувався також комбінований режим живлення. Діаметр високовольтного електроду мінявся в межах 3–12 мм, діаметр зовнішнього електроду складав 10 см. Позитивний вплив збільшення вологості повітря на видалення як  $NO$  так і  $NO_2$  спостерігалось тільки при достатньо високій амплітуді імпульсів напруги (більше 45 кВ) позитивної полярності. Збільшення температури повітря до 250°C приводило до значного зменшення ефективності очищення від  $NO$  за допомогою корони. Наголошувалося, що для видалення  $NO$  при температурах, вищих за 150°C, негативна корона краща. Ефективність очищення від  $NO$  негативною короною в сухому повітрі визначається величиною параметра

$$\frac{P}{Q} \sqrt{T_k}$$

де  $P$  – середня потужність,  $Q$  – швидкість прокачування газу через реактор,  $T_k$  – час перебування газу в реакторі. Це пояснюється можливим впливом зворотних реакцій. Енергетична ефективність видалення  $NO$  досягала значень близько 30 г/кВт\*год в суміші повітря- $NO$ . При цьому ефективність позитивної і негативної корони була однаковою, якщо

порівнювати експерименти при одному і тому ж часі знаходження газу в реакторі і однакових енерговнесках.

Експерименти також проводилися при витраті газів  $100 \text{ м}^3/\text{год}$ , які відводилися від пилевугільного енергоблоку при наступному складі:  $(N_2) \approx 73\%$ ,  $(CO_2) \approx 13\%$ ,  $(O_2) \approx 6\%$ ,  $(H_2O) \approx 8\%$  при вмісті твердих частинок  $150 \text{ мг}/\text{м}^3$ . Розмір частинок складав  $1\text{--}10 \text{ мкм}$ . Використовувалися імпульси напруги амплітудою  $150 \text{ кВ}$  з фронтом  $200 \text{ нс}$  і тривалістю  $1,2 \text{ мкс}$ . При концентрації  $NO_x$  і  $SO_2$  в межах  $400\text{--}530 \text{ ppm}$  і при додаванні аміаку видалалося  $50\text{--}60\%$   $NO_x$  і  $80\%$   $SO_2$  при енерговнеску  $12\text{--}14 \text{ Вт} \cdot \text{год}/\text{м}^3$ . Максимальна енергетична ефективність очищення складала  $55 \text{ г}(\text{NO}) / \text{кВт} \cdot \text{год}$  при видаленні  $25\%$   $NO_x$ . Із збільшенням ступеня очищення питомі енерговитрати зростали.

### **Пристрій плазмохімічного реактора на коронному розряді**

Розрядна камера реактора є горизонтально розташованою металевією трубою діаметром  $200 \text{ мм}$ , по осі якої натягнутий дріт з неіржавіючої сталі діаметром  $1,5 \text{ мм}$ . Труба складається з трьох роз'ємних секцій, кожна завдовжки  $1000 \text{ мм}$ , так, що довжину розрядної камери можна міняти від  $2000$  до  $3000 \text{ мм}$ . У торцях кінцевих секцій є кварцові вікна діаметром  $200 \text{ мм}$ , через які можна спостерігати розряд і робити оптичну діагностику складу робочого середовища уздовж розрядного пристрою на будь-якій відстані від осі. На боковій поверхні в центрі кожної секції є по два кварцові вікна діаметром  $60 \text{ мм}$ , розташованих навпроти один одного для спостереження і діагностики в поперечному перетині розрядної камери. Поблизу торцевих вікон збоку зроблені фланці для під'єднування димаря. Вся конструкція виконана з неіржавіючої сталі. Збоку камери на відстані  $200 \text{ мм}$  від торцевих вікон зроблені високовольтні введення, що закінчуються на зовнішній стороні труби високовольтними широкосмуговими роз'ємами. Електричні вводи дозволяють передавати на дротяний електрод імпульсну напругу амплітудою до  $70 \text{ кВ}$  в діапазоні частот  $0\text{--}1 \text{ МГц}$ . У середині труби вводи закінчуються електродами кулястої форми. Дріт закріплюється на кулястих електродах, один з яких забезпечений пристроєм натягнення дроту. Ізоляція введень виконана з фторопласту.