

**БЕТА-РАДІОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЮ ПОВЕРХНЕВОГО
ЗАБРУДНЕННЯ ТРУБ РІЗНОГО ДІАМЕТРА**

Л. С. Салтиков, В. І. Слісенко, С. В. Шевченко, Ю. С. Стрюк, В. С. Прокопенко

Розроблено переносний β -радіометр з набором блоків детектування для контролю забруднення зовнішніх і внутрішніх поверхонь труб діаметром 50 мм і більше. Визначено основні параметри блоків детектування - власний фон, чутливість до β - та γ -випромінювання, а також мінімальну вимірювану питому активність при різних режимах роботи радіометра. Радіометр випробувано в реальних умовах при контролі β -забруднення труб різного діаметра.

Наявність радіоактивних відходів різної категорії при знятті з експлуатації ядерних установок вимагає різних методик їхнього видалення та поховання. Визначення категорії відходів залежно від виду й рівня радіоактивності забезпечується відповідною радіометричною апаратурою.

Відсутність радіометрів для контролю внутрішніх поверхонь труб малого діаметра (50 - 250 мм) зумовила необхідність розробки β -радіометрів для проведення такого контролю.

Найбільш важливими параметрами радіометричної апаратури являються мінімальна вимірювана питома активність (МВПА) A_{\min} та продуктивність контролю P .

При певній чутливості радіометра, допустимій відносній похибці вимірів δ , часі вимірювання t_0 в умовах фону n_f МВПА визначається як [2 - 4]

$$A_{\min} = \frac{1}{2\epsilon t_0 \delta^2} \left(1 + \sqrt{1 + 4n_f t_0 \delta^2} \right) \quad (1)$$

при продуктивності контролю

$$P = S/t_0, \quad (2)$$

де S - площа робочого вікна блока детектування.

Продуктивність контролю квадратично збільшується зі збільшенням площі чутливої поверхні блока детектування. Здавалося б, що для підвищення продуктивності контролю необхідно її збільшувати до максимально можливої в даних умовах. Але при застосуванні блока детектування з площею детектування, що перевищує нормативне значення, виникають проблеми відновлення розподілу величин площі, по якій визначається рівень забруднення (наприклад, не більше 100 см² питомої поверхневої активності з "нормативним" кроком по площі). Тому можна однозначно стверджувати - максимальна ефективність контролю досягається при застосуванні радіометрів з площею детектуючої поверхні, рівною нормативному значенню площі усереднення.

Контроль рівнів поверхневого забруднення нерухомих об'єктів може проводитися в двох режимах - це режим протяжки й кроковий.

Режим протяжки - блок детектування безперервно сканує поверхню об'єкта, рухаючись з деякою постійною швидкістю. Обчислення поверхневої активності проводиться при обробці послідовності чисел відліків блока детектування за час експозиції t_0 .

Кроковий режим дискретний як у часі, так і просторі. У цьому режимі проводиться контроль окремих локальних ділянок площею S за час t_0 . Переміщення блока детектування на крок $\Delta S = S$ відбувається за час $t_n \ll t_0$, тобто вплив t_n на продуктивність контролю

несуттєвий. Таким чином, за загальним часом обстеження поверхневого радіоактивного забруднення певного об'єкта ці два режими майже еквівалентні.

У реальних умовах забруднення на поверхні об'єктів розподілено по площі досить нерівномірно й першочерговою метою контролю є виявлення й локалізація ділянок із рівнем поверхневої активності, яка перевищує гранично допустимий рівень. На практиці такі виміри проводяться з похибкою близько 30 %. Проведення вимірів з похибкою, меншою за 30 %, має сенс лише в окремих випадках, наприклад при дослідженнях ефективності технології дезактивації.

У більшості нормативних документів рекомендується, що площа, на якій визначається середня величина β -забруднення, повинна дорівнювати 100 см^2 . Як відомо, найбільшу продуктивність контролю, при інших рівних умовах, мають радіометри з робочою поверхнею детектора, що дорівнює цій нормативній площі. Таку велику робочу поверхню радіометра важко створити при використанні напівпровідникових детекторів, а при застосуванні сцинтиляційних детекторів виникають суттєві труднощі із світлозбором від різних точок сцинтилятора у випадку розташування його в трубах малого діаметра. Її можна легко отримати, використовуючи як елемент детектуючого блока і лічильники Гейгера (торцеві чи циліндричні).

Таким чином, не дивлячись на недоліки газонаповнених детекторів для реєстрації β -випромінювання (відносно низька ефективність реєстрації β -випромінювання [5], наявність власного фону та ін.), радіометри, що створені на їх основі для контролю поверхневого β -забруднення всередині труб малого діаметра, можуть мати велику перевагу перед іншими. Варто також відзначити, що β -радіометри з використанням лічильників Гейгера значно простіші за конструкцією, ніж інші лічильники, і мають значно меншу вартість.

При розробці β -радіометра в якості елемента детектуючого блока було вибрано лічильники Гейгера типу СТБ-10А, СБМ-19, СБМ-20.

Нами розроблено чотири варіанти блока детектування, умовно позначені № 1, 2, 3, 4.

Блок № 1 складається з трьох лічильників СБТ-10А, що розташовані в одній площині в корпусі з нержавіючої сталі. Вікно блока закрито лавсановою плівкою товщиною 10 мкм для захисту від пилу й вологи, а також проволочною сіткою від можливих фізичних ушкоджень.

Блок № 2 являє собою збірку із 8 лічильників СБМ-20 на зразок "колеса білки". Зовнішній діаметр збірки 48 мм, довжина чутливої області 55 мм, площа чутливої поверхні 86 см^2 .

У блоці № 3 також використано 8 лічильників СБМ-20, які розташовано так само, як і в блоці № 2, але розділено на дві групи по 4 лічильники. Ці групи можуть зміщатися одна відносно до другої таким чином, щоб вони завжди притискалися до внутрішньої поверхні труби.

У блоці № 4 використано 4 лічильники СБМ-19, змонтовані у вигляді гнучкого "килимка". Один бік "килимка" притискається до поверхні, що контролюється, другий екранується від β -частинок решти поверхні труби металеву заслінкою.

Усі лічильники в блоках закриті лавсановою плівкою товщиною 10 мкм.

У корпусі кожного блока розміщено блок живлення детекторів та емітерний повторювач для передачі сигналу по кабелю довжиною 10 м від лічильників до блока реєстрації. Напряга живлення 4.5 В надходить по кабелю від блока реєстрації. Як блок реєстрації використано модернізований блок індикатора β -радіометра "БЕТА". Сигнали, що надходять від детекторів на блок реєстрації, формуються за тривалістю, амплітудою й полярністю вхідним перетворювачем. Блок реєстрації має 8 режимів роботи, два з яких служать для загального скидання показників індикаторів та контролю роботи блока. Інші

режими дозволяють встановлювати тривалість вимірів - 1, 100, 500, 1000 та 2000 с. У режимі 1 с відбувається автоматичний запуск системи на повторні виміри.

Для визначення технічних характеристик радіометрів було виготовлено два гнучких джерела β -випромінювання. Для їх виготовлення використовувався зразковий розчин ^{137}Cs з питомою активністю $3.5 \cdot 10^5 \text{ Бк/л}$. Основою цих джерел був папір формату А-4 ($210 \times 297 \text{ мм}^2$) та густиною 100 мг/см^2 , який закривався з обох боків лавсановою плівкою товщиною 10 мкм. Оцінка витрат розчину, а також виміри поверхневої активності промисловим радіометром МКС-01Р показали, що одержана питома поверхнева активність цих джерел дорівнює (5.9 ± 0.9) і $(0.8 \pm 0.09) \text{ Бк/см}^2$. Неоднорідність поверхневої активності по площі джерела заміряна тим же приладом МКС-01Р і не перевищує 10 %.

У процесі проведених лабораторних випробувань виготовлених блоків детектування отримано дані про власний фон, фон у природних умовах, чутливість до γ - та β -випромінювання та залежність останньої від діаметра труб, проведено оцінку внеску β -випромінювання поверхні поза габаритами блока детектування.

Фон блока має дві основні складові - власний фон і фон як наслідок ненульової чутливості до зовнішнього γ -випромінювання. Сумарний фон при конкретних вимірах визначається за стандартною схемою, тобто шляхом вимірів числа імпульсів за деякий час при закритій заслінці. Оцінку власного фону n_f і чутливості до зовнішнього γ -випромінювання ϵ_γ можна провести за результатами вимірів загального фону в γ -полях з різною потужністю експозиційної дози (ПЕД) на основі співвідношень

$$n_{f1} = n_{fc} + \epsilon_\gamma D_1, \quad (3)$$

$$n_{f2} = n_{fc} + \epsilon_\gamma D_2,$$

де n_{f1} - загальний фон при ПЕД D_1 ; n_{f2} - загальний фон при ПЕД D_2 ;
звідки

$$\epsilon_\gamma = (n_{f2} - n_{f1}) / (D_2 - D_1), \quad (4)$$

$$n_{fc} = (n_{f1} D_2 - n_{f2} D_1) / (D_2 - D_1). \quad (5)$$

Для ПЕД 12; 37.4 і 60 мкр/год значення фону блока № 1 дорівнюють 6.2; 17.1 і 26.5 імп/с, відповідно. З цих даних отримуємо середні значення власного фону й чутливості блока до γ -випромінювання: $n_{fc} = 1.2 \text{ імп/с}$ ($\sim 0.4 \text{ імп/с}$ на лічильник), $\epsilon_\gamma = 0.4 \text{ (імп/с)/(мкр/год)}$ ($\sim 0.13 \text{ (імп/с)/(мкр/год)}$ на лічильник). Паспортні дані про лічильники: $n_{fc} \leq 2.1 \text{ імп/с}$; $\epsilon_\gamma \sim 0.1 \text{ (імп/с)/(мкр/год)}$.

Таким чином, основний вклад у фон блока № 1 дає його γ -складова, порівняно з якою власним фоном лічильників можна знехтувати.

Чутливість блока детектування до β -випромінювання плоского джерела виміряна з застосуванням виготовленого гнучкого джерела β -випромінювання з поверхневою активністю $(5.9 \pm 0.9) \text{ Бк/см}^2$ і дорівнює $(17.4 \pm 3) \text{ (імп/с)/(Бк/см}^2)$.

Для визначення чутливості блока № 1 до β -випромінювання поверхневого забруднення труб останнє моделювалось шляхом притискання гнучких джерел до зовнішніх і внутрішніх поверхонь труб. Для труби діаметром 220 мм вона не відрізняється від чутливості у випадку плоского джерела. Якщо поверхня вікна детектування плоска, то при вимірах забруднення кривих поверхонь виникає додаткова похибка, пов'язана з неоднорідністю питомої чутливості блока до β -випромінювання. Для оцінки відхилень чутливості від середнього значення на випробуваннях застосовувалось екранування джерела гнучкими заслінками з утворенням щілин різної ширини. Чутливість блока № 1 при вимірах

забруднення зовнішніх поверхонь труб відносно слабо залежить від величини їх діаметра й при зменшенні діаметра труби в 5 разів від 220 до 57 мм її значення зменшується на 30 %. Для внутрішніх поверхонь труб у діапазоні діаметрів 100 - 250 мм значних відхилень чутливості від середнього значення не спостерігається.

У практичних вимірах, як правило, виконується максимально точно вимірювання середнього значення фону при експозиції $t \gg t_0$ і в подальшому його величина використовується при виставленні порогів виявлення й при обчисленні абсолютних значень рівнів поверхневої активності. Тому при вимірах активностей, особливо малих, на точність оцінки поверхневої активності значною мірою впливає не величина середнього значення фону $\langle N_f \rangle = n_f t_0$, а флуктуації внаслідок неоднорідності фону в просторі та випадковості чисел фонових відліків у конкретному вимірюванні (так званий шум вимірів). Внесок просторових флуктуацій у кожному конкретному вимірюванні індивідуальний, але реально в більшості випадків незначний і його можна не враховувати. Статистичні флуктуації принципово неможливо ліквідувати при реальному часі вимірювання. Якість приладу можна охарактеризувати відношенням ефект / шум, що визначається як

$$N/\eta = (A-B)/\eta, \quad (6)$$

де A - середнє значення показів приладу при вимірюванні суміші фон + ефект; B - середнє значення показів при вимірюванні фону; η - середньоквадратичне відхилення окремих вимірів від середнього значення.

Оцінку N/η для блока № 1 і радіометра МКС-01Р було проведено за вибіркою із 50 спостережень, час спостереження – 10 с. Як сигнальний випромінювач використовувалося гнучке джерело з поверхневою активністю (0.8 ± 0.09) Бк/см². При цьому одержано значення: $N/\eta = 5.62$ - для приладу МКС-01Р; $N/\eta = 10.1$ - для блока № 1.

Тобто відношення ефект/шум для блока № 1 в 1.8 разів більше, ніж для радіометра МКС-01Р. Враховуючи те, що площа контролюючої поверхні блока детектування в 3 рази більша за аналогічну для МКС-01Р, продуктивність контролю поверхні з використанням блока № 1 у 5 - 6 разів більша за продуктивність МКС-01Р.

Контроль внутрішніх циліндричних поверхонь у діапазоні діаметрів 50 - 100 мм можливий при використанні блоків № 2, 3, 4.

Блок № 2 не адаптується до діаметра труби. При вимірах він розміщується всередині труби по її осі. Виміри чутливості до β -випромінювання кільцевого циліндричного джерела ¹³⁷Cs площею 100 см² з різними діаметрами показали, що її величина при збільшенні діаметра від 56 до 98 мм зменшується в 2.6 рази - від (3.7 ± 1.0) до (1.4 ± 1.0) (імп/с)/(Бк/см²). Чутливість до β -випромінювання довгого циліндричного джерела зменшується не так різко. Це пов'язано зі збільшенням внеску β -частинок з поверхні джерела, розташованої за межами габаритів лічильника.

Блок № 3 адаптується до діаметра труби й складається з двох груп лічильників СБМ-20, що можуть зміщуватися одна відносно до другої при зміні діаметра труби. Внаслідок відсутності аксіальної симетрії спостерігається залежність чутливості блока № 3 від азимутального кута. Величина відхилень від середнього значення збільшується при збільшенні діаметра труби. Якщо чутливість блока № 2 до β -випромінювання вузького циліндричного джерела при центральному положенні блока зменшується приблизно в 2 рази при збільшенні діаметра джерела від 56 до 98 мм, то чутливість блока № 3 практично постійна у вказаному діапазоні діаметрів. Залежність чутливості до β -випромінювання довгого циліндричного джерела для блока № 3 відносно мала й збільшується всього приблизно на 20 % при збільшенні діаметра від 56 до 98 мм.

В основному покази блоків № 2 і 3 визначаються випромінюванням поверхневого поясу в межах габаритів лічильників блоків. Внесок випромінювання поверхні за межами габариту збільшується з 5 до 25 % при зміні діаметра труби від 56 до 98 мм. Для зменшення впливу “підсвітки” можна використовувати відповідні екрани. За допомогою них можна також забезпечити однакову площу контрольованої ділянки труб різного діаметра.

У блоці № 4 використано 4 лічильники СБМ-19, змонтовані у вигляді гнучкого “килимка”, один бік якого притискується до контрольованої поверхні, а другий екранується від β -частинок решти поверхні труби металевими заслінками. При цьому за одне вимірювання контролюється прямокутна ділянка поверхні розміром $80 \times 100 \text{ мм}^2$, що становить 80 % нормативної величини. Чутливість цього блока практично не залежить від діаметра труби й складає $(4.0 \pm 1.5) (\text{імп/с})/(\text{Бк/см}^2)$.

У таблиці для всіх розроблених блоків детектування наведено значення мінімальної вимірюваної питомої активності, розраховані за формулою (1) у припущенні, що відносна похибка δ визначення поверхневої активності дорівнює 0.3.

Значення МВПА для блоків детектування

| № блока | n_b імп/с | ϵ , (імп/с)/(Бк/см ²) | $A_{\text{мін}}$, Бк/см ² | | | | |
|---------|----------------|---|---------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|
| | | | $t_0 = 1 \text{ с}$ | $t_0 = 2 \text{ с}$ | $t_0 = 10 \text{ с}$ | $t_0 = 50 \text{ с}$ | $t_0 = 100 \text{ с}$ |
| 1 | 6.5 | 1.7 | 0.9 | 0.55 | 0.2 | 0.08 | 0.05 |
| 2 | 2.7 | 3.7 | 3.6 | 2.0 | 0.65 | 0.24 | 0.16 |
| 3 | 2.7 | 3.0 | 4.5 | 2.5 | 0.8 | 0.3 | 0.2 |
| 4 | 5 | 4.0 | 3.7 | 2.2 | 0.7 | 0.3 | 0.2 |

Як видно з таблиці, навіть при часі вимірювання $t_0 = 1 \text{ с}$ МВПА для всіх блоків детектування не перевищує рівня звільнення радіоактивних відходів і побічних радіоактивних матеріалів із поверхневим забрудненням β -активними радіонуклідами від радіаційного контролю.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Порядок* звільнення радіоактивних відходів і побічних радіоактивних матеріалів від регуляційного контролю. НП 306.3.04/2.001-97.
2. *Тустановский В.Т.* Оценка точности и чувствительности активационного анализа. - М.: Атомиздат, 1976. - 72 с.
3. *Currie L.A.* // Anal. Chem. - 1968. - Vol. 40. - P. 583.
4. *Бабенко В.В., Казимиров А.С., Рудик А.Ф.* Проблема определения малых активностей. - Киев, 1998. - 18 с. - (Препр. / НТЦ “Атомкомплексприбор”; АКП-2-98).
5. *Прайс В.* Регистрация ядерного излучения. - М.: ИИЛ, 1960. - 464 с.

БЕТА-РАДИОМЕТР ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ТРУБ РАЗЛИЧНОГО ДИАМЕТРА

Л. С. Салтыков, В. И. Слисенко, С. В. Шевченко, Ю. С. Стрюк, В. С. Прокопенко

Разработан переносной β -радиометр с набором блоков детектирования для контроля загрязнения наружных и внутренних поверхностей труб диаметром 50 мм и больше. Определены основные параметры блоков детектирования - собственный фон, чувствительность к β - и γ -излучению, а также минимальная измеряемая поверхностная активность при различных режимах работы радиометра. Радиометр испытан в реальных условиях при контроле β -загрязнения труб разного диаметра.

**BETA-RADIOMETER FOR THE CONTROL SURFACE CONTAMINATION
OF DIFFERENT DIAMETER TUBES****L. S. Saltykov, V. I. Slisenko, S. V. Shevchenko, Yu. S. Stryuk, V. S. Prokopenko**

The portable β -radiometer with composition of detector blocks for control contamination of external and inner surface tube with diameter 50 mm and charger have been developed. The main parameters of blocks detection - natural background, sensitivity to β - and γ -radiation's and surface minimum measuring activity under different mode of operation radiometer were determined. The radiometer was tested in the real conditions under control β -contamination of different diameter tubes.