

ТЕХНІКА ТА МЕТОДИ ЕКСПЕРИМЕНТУ
ENGINEERING AND METHODS OF EXPERIMENT

УДК 621.039-78:613.648.4:614.8.086.54

<https://doi.org/10.15407/jnpae2024.02.165>**В. В. Чумак^{1,2,*}, В. М. Волоський^{1,2}**¹ ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології НАМН України»,
Київ, Україна² Науково-виробниче підприємство «Дозиметрика», Київ, Україна

*Відповідальний автор: chumak.vadim24@gmail.com

**ОГЛЯД ТА ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ СИСТЕМ
ІНДИВІДУАЛЬНОГО ДОЗИМЕТРИЧНОГО КОНТРОЛЮ ДЛЯ АЕС УКРАЇНИ**

Поточний індивідуальний дозиметричний контроль (ІДК) зовнішнього опромінення персоналу ядерно-енергетичних об'єктів є ключовим елементом системи радіаційного захисту, традиційно входить до відання цехів радіаційної безпеки АЕС та здійснюється відповідним чином оснащеними лабораторіями індивідуального дозиметричного контролю. Обладнання ІДК АЕС, яке було введено в експлуатацію в середині 2000-х років добігає кінця свого життєвого циклу й на порядок денний виходить питання заміни обладнання. Нові системи ІДК, які працюватимуть наступні 10 - 15 років, мають відповідати сучасним вимогам, враховувати світові тенденції радіологічного захисту та розвитку приладового забезпечення ІДК, а вибір нових систем спиратися на світовий та вітчизняний досвід, міркування відповідності дозиметричних характеристик та практичності експлуатації. Огляд присвячено порівнянню характеристик перспективних систем на основі пасивних персональних дозиметрів, призначених для індивідуального дозиметричного контролю персоналу АЕС України. На основі аналізу літературних даних, міжнародних стандартів та рекомендацій, інформації виробників та власного практичного досвіду проводиться узагальнення відомостей про наявні та перспективні системи ІДК, пропонується бачення найбільш оптимального вибору систем для переоснащення лабораторій дозиметричного контролю АЕС на наступне десятиріччя.

Ключові слова: індивідуальний дозиметричний контроль, професійне опромінення, АЕС, персонал, радіаційний захист, оптико-стимульована люмінесценція, термолюмінесценція, радіофотолюмінесценція.

**1. Обладнання індивідуального
дозиметричного контролю на АЕС.
Історичний огляд**

Персонал АЕС від початку становлення атомно-енергетичної галузі України наприкінці 1970-х років був забезпечений індивідуальним дозиметричним контролем (ІДК), технічний рівень якого приблизно відповідав тогочасному рівню розвитку дозиметрії та вимірювальної техніки [1]. За цей час у світі змінилися чотири принципово відмінних покоління обладнання ІДК, двічі відбувся перегляд концепцій радіаційного захисту (ознаменовані Публікаціями 60 [2] та 103 МКРЗ [3]), очікується введення нових дозиметричних величин МКРО [4].

ІДК першого покоління забезпечувався фотоплівковими дозиметрами типу ІФК-У, що давали можливість визначати дозу опромінення всього тіла у досить вузькому діапазоні доз (верхня межа – близько 20 мЗв) та енергій випромінювання.

У середині 1980-х років відбувся перехід на системи ІДК другого покоління – «ручні» системи ІДК на основі комплексу термолюмінесцентних дозиметрів (ТЛД) КДТ-02М. Ці системи мали більш прийнятний робочий діапазон доз та поліпшену енергетичну залежність, але точність

визначення доз суттєво залежала від кваліфікації персоналу та варіювала залежно від конкретних методик вимірювання, які впливали на трудомісткість калібрування дозиметрів та визначення доз [5].

Наразі на всіх АЕС України використовуються системи ІДК третього покоління – автоматизовані системи ІДК двох типів (RADOS та Harshaw), а Аварійно-технічний центр НАЕК «Енергоатом» продовжує користуватися дозиметрами КДТ-02М. Технологічний рівень та дозиметричні характеристики цих систем відповідають кінцю 1980-х років, коли на світовому ринку з'явилися автоматизовані ТЛД системи. Системи третього покоління в основному відповідають поточним вимогам [6], але за цілою низкою показників поступаються більш сучасним системам четвертого покоління.

Від початку 2000-х років на світовому ринку з'явилися системи ІДК, які можна віднести до четвертого покоління та які використовують нові дозиметричні матеріали й відмінні принципи накопичення та зчитування інформації про індивідуальну дозу. Додатковою перевагою цих систем є орієнтація на відповідність новим та перспективним вимогам до контролю доз професійного опромінення [4].

© В. В. Чумак, В. М. Волоський, 2024

Системи ІДК усіх чотирьох поколінь належать до класу пасивних дозиметричних систем, які під час експонування та накопичення інформації про дозу не потребують живлення. Такі системи складаються із зчитувача та комплексу індивідуальних (персональних) дозиметрів. Пасивні дозиметричні системи мають необхідний ступінь надійності реєстрації випромінювання й тому прийняті за основу поточного ІДК (на відміну від оперативного чи спеціального).

2. Попереднє переоснащення лабораторій ІДК АЕС: позитивний та негативний досвід

Національний науковий центр радіаційної медицини, гематології та онкології (ННЦРМГО) НАМН України (на той час – Всесоюзний науковий центр радіаційної медицини АМН СРСР) стояв у витоків використання автоматичних ТЛД систем ІДК: ALNOR (RADOS) від 1987 р. та Harshaw від 1991 р. Від 1995 р. практична та науково-методична діяльність у галузі дозиметричного контролю професійного опромінення здійснювалася в НДІ Радіаційного захисту АТН України, а від 2019 р. повністю перейшла до новоствореного Науково-виробничого підприємства «Дозиметрика». За роки функціонування був накопичений неабиякий власний досвід здійснення ІДК і розробки нових методик контролю [7, 8], постійно збирався та узагальнювався кращий міжнародний досвід, відбувалося спілкування із розробниками та експлуатантами обладнання ІДК.

За наслідками Перевірки діяльності служб ІДК АЕС України (проводилася у 1995 - 1996 рр. з ініціативи ННЦРМ НАМН України на підставі Припису Головного санітарного лікаря України від 27.02.1995 № 7.02/70) на початку 2000-х років відбулося переоснащення лабораторій ІДК на автоматизовані ТЛД системи двох виробників у трьох варіантах, а саме – RADOS (РАЕС, ЗАЕС, ЮУАЕС) та Harshaw (ЧАЕС, ХАЕС). Цей захід мав безсумнівно позитивний ефект: розширилася номенклатура дозиметричних величин, що контролюються, підвищилася точність визначення доз, знизився поріг чутливості, за рахунок автоматизації процесу зчитування було зведено до мінімуму ймовірність помилок. Відповідність профільним вимогам стандарту ISO 14146 [9] була підтверджена під час проведення Першого національного інтеркалібрування лабораторій ІДК України (2014 р.) [10, 11].

Водночас, нехтування рекомендаціями фахівців ННЦРМ НАМН України призвело до несповна оптимального вибору на користь обладнання RADOS, яке, як впливало з нашого попереднього практичного досвіду використання та порівняння двох конкуруючих систем, має дещо

гірші експлуатаційні показники. На жаль, подальший досвід експлуатації на АЕС України підтвердив наші застереження. Тому питання огляду та порівняльного аналізу нових систем ІДК є нагальним та, сподіваємося, дасть можливість підійти до завдання переоснащення лабораторій ІДК АЕС відповідально та з найбільшим ефектом. Автори мають намір докласти всіх зусиль до різнобічного та об'єктивного порівняння можливих варіантів переоснащення лабораторій ІДК НАЕК «Енергоатом» на обладнання, що забезпечуватиме дозиметричний контроль та радіаційний захист впродовж наступних років.

3. Світові тенденції ІДК професійного опромінення та перспективи розвитку

3.1. Дозиметрія кришталіка ока

Останніми роками відбулися значні зрушення у системі радіаційного захисту: було прийнято нові основні стандарти безпеки МАГАТЕ та було введено в дію Директиву 59/2013 Євратом [12], яка має зобов'язуючий характер для країн-членів ЄС та країн, що мають асоційований статус, зокрема – України. У світлі євроінтеграційних зобов'язань України невідворотно впливає імплементація зазначеної директиви у вигляді нових Норм радіаційної безпеки на заміну нині діючим НРБУ-97. З позицій забезпечення радіаційного захисту персоналу категорії А, найбільший вплив має зниження ліміту дози опромінення кришталіка ока у 7,5 раза – до 20 мЗв на рік. Отже, найбільшим викликом стає необхідність визначення доз на кришталік ока за допомогою спеціалізованих індивідуальних дозиметрів, каліброваних у термінах дозиметричної величини Нр(3) та розміщених поблизу очей особи, чия доза контролюється.

3.2. Відмова від ТЛД

Іншою світовою тенденцією є відмова від ТЛД на користь нових методів дозиметричного контролю – оптико-стимульованої люмінесценції (ОСЛ), радіофотолюмінесценції (РФЛ) та напівпасивних дозиметрів на основі принципу прямого зберігання іонів (Direct Ion Storage – DIS).

Головними недоліками добре перевіреного принципу ТЛД [13] є:

- неселективне зчитування інформації (під час зчитування уся інформація стирається) без можливості повторного зчитування та аналізу;
- більш складна конструкція зчитувача (потреба в блоці прецизійного нагріву);
- потреба у витратних матеріалах (газоподібний азот високого очищення);

- тривалий порівняно з ОСЛ системами цикл зчитування (30 - 60 с на одне зчитування);
- вплив профілю нагріву на результати визначення доз;
- суттєвий фединг (самочинна втрата інформації з часом), величина якого залежить від матеріалу детектора та режиму зчитування;
- поступова зміна дозиметричних властивостей (чутливості) в процесі експлуатації дозиметра, що залежать від кількості циклів нагрівання / охолодження;
- чутливість форми кривої висвітлювання до впливу неконтрольованих факторів; як наслідок – необхідність вибіркового аналізу кривих висвітлювання на відсутність артефактів;
- собівартість виготовлення ТЛД об'єктивно в рази більша, ніж ОСЛ чи РФЛ, що впливає на вартість індивідуальних дозиметрів.

Цих недоліків позбавлені нові системи ОСЛ та РФЛ, причому, в останньому випадку процес зчитування в принципі не супроводжується втраченою дозиметричної інформації, тобто, повторне зчитування та аналіз можливі необмежену кількість разів. При зчитуванні ОСЛ дозиметра втрата інформації про накопичену дозу (концентрації електронів на пастках) відбувається поступово, тобто при короткочасному впливі стимулюючого світла (короткому циклі зчитування) втрачається лише декілька відсотків збереженого заряду, а зчитування дозиметра може бути повторене для отримання більш статистично надійного результату (серія зчитувань) чи використане для повторного аналізу того ж самого дозиметра через певний проміжок часу. Фізичний механізм накопичення інформації про поглинену дозу в ОСЛ [14] дозиметрів цілком аналогічний такому при ТЛД, однак спосіб зчитування (оптична замість термічної стимуляції) є більш зручним та простішим у реалізації. Крім того, обидві (ОСЛ та РФЛ) системи потенційно мають властивість 2-D чи навіть 3-D зчитування, тобто, дають можливість отримувати інформацію про розподіл дози по площині детектора (подібно до фотоплівкових дозиметрів) чи профілю дози по глибині детектора. Відносним недоліком ОСЛ та РФЛ систем є потреба у додатковому елементі систем – пристрої для стирання (занулення) дозиметричної інформації, який послуговується термічним або УФ способом стирання. Слід відзначити, що найбільш сучасні зразки ОСЛ систем позбавлені цього недоліку, позаяк функція стирання реалізована в самому ОСЛ зчитувачі.

3.3. Нова концепція дозиметричних величин МКРО

Наступною, гідною згадки, тенденцією останніх років є концептуальний перегляд дозиметри-

чних величин та підходів до контролю доз професійного опромінення, який був ініційований новою Публікацією 95 МКРО [4]. Пропонується при оцінці доз професійного опромінення людини враховувати енергетичний спектр та кутові характеристики поля випромінювання на робочому місці через застосування відповідних конверсійних коефіцієнтів. Отже, оптимальні індивідуальні дозиметри повинні мати слабку енергетичну залежність у широкому діапазоні енергій та ізотропний відгук дозиметрів. Це означає, що з погляду на перспективу, перевагу слід віддавати дозиметрам, що мають вказані вище властивості. Задля об'єктивності слід зазначити, що перехід на нові величини МКРО займе не один рік, тож наразі це міркування не є визначальним, а з новими вимогами, очевидно, матиме справу вже наступне покоління систем ІДК.

4. Джерела інформації для порівняльного аналізу

При проведенні порівняльного аналізу були використані такі джерела інформації:

- інформація від виробників – з відкритих джерел та безпосередньо від представників виробника;
- наукова література – статті у наукових журналах, огляди, публікації з фундаментальних аспектів тих чи інших методів дозиметрії;
- результати інтеркалібрувань (сліпих тестів) – за участю систем, що розглядаються;
- відгуки користувачів (у міру можливості) та власний практичний досвід авторів.

5. Потенційно прийнятні системи

З урахуванням викладених вище міркувань та зважаючи на доступність відповідного обладнання для споживачів в Україні, для подальшого порівняння були обрані такі перевірені та комерційно доступні системи ІДК:

- ОСЛ система OSLR250 Automatic Reader виробництва Landauer (США / Франція) <https://www.landauer.com/product/oslr-reader-series>;
- ОСЛ система BeOSL від MIRION Technologies (раніше – Dosimetrics) (США / Німеччина) <https://www.mirion.com/products/medical/occupational-dosimetry/dosimetry-systems/modular-beosl-systems/beosl-reader>;
- ОСЛ система MyOSL4.0 від RadPro International (Німеччина) <https://www.myosl.eu/myosl-4-0/>;
- РФЛ система Glass Dosimeter Automatic Reader FGD-660 виробництва Chiyoda Technol (Японія)

https://www.c-technol.co.jp/cms/wp-content/uploads/02018/03/Personal-Monitoring-Pamphlet_8_9.pdf.

Усі перелічені системи відповідають вимогам профільного стандарту IEC 62387:2020 [6] та мають подібні характеристики з погляду продуктивності (швидкість обробки дозиметрів, автоматизація, ємність магазину для одночасного завантаження дозиметрами) й тому вважаються придатними для здійснення ІДК великої кількості персоналу категорії А на АЕС. Два з чотирьох виробників мають також зчитувачі / системи нижчого класу (меншого масштабу), але їхня продуктивність не відповідає потребам АЕС.

ТЛД системи не були включені до детального розгляду чи обговорення через описані вище вади та з огляду на те, що ТЛД обладнання представлено на ринку тими ж моделями розробки 1990-х років, які вже добре відомі експлуатантам на АЕС України та не потребують додаткового представлення. Однак, у порівняльних таблицях представлено також характеристики ТЛД систем для того, щоб була можливість самостійної оцінки нових систем порівняно із наявним на АЕС обладнанням.

Система на основі принципу прямого зберігання іонів (DIS) не була включена до розгляду через відносно мале розповсюдження й недостатню вивченість та, головне, через те, що DIS дозиметри не є в повному сенсі пасивними, позаяк потребують електричного живлення під час експонування.

6. Загальна характеристика виробників та систем, що порівнюються

З практичної точки зору велику роль при виборі виробника обладнання дозиметричного контролю для критичних об'єктів, якими є АЕС, відіграє його надійність, тяглість та стійкість (фінансова та виробнича) на перспективу десяти й більше років. Досить згадати, що цьому аспекту присвячено окремий розділ стандарту ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 [15].

Тому вважаємо за доцільне представити короткий огляд компаній-виробників обладнання, яке було включено до нашого огляду.

Компанія Landauer (США, дочірні підприємства у Європі, Азії, Австралії) – найбільший у світі провайдер послуг ІДК та у галузі медичної фізики. Заснована у 1954 р., 2000 р. вивела на ринок інноваційний продукт – ОСЛ систему Luxel. Згодом, було представлено економ-версію ОСЛ дозиметричної системи InLight виробництва Landauer Europe. Оригінальна версія зчитувача системи InLight представляла собою перероблений ТЛД зчитувач Panasonic, у якому блок

нагріву та зчитування було замінено на ОСЛ модуль при збереженні точної механіки добре перевіреного зчитувача. Таке конструктивне рішення дало можливість швидко завоювати ринок завдяки модернізації дозиметричного обладнання вже існуючих користувачів ТЛД зчитувачів Panasonic. Система OSLR250 є другим поколінням ОСЛ зчитувачів InLight, які є сумісними з індивідуальними дозиметрами першого покоління.

Компанію Dosimetrics (нині у складі MIRION Technologies) було створено 2013 р. як результат науково-бізнесового партнерства між Дрезденським технічним університетом та найбільшою в Німеччині службою ІДК Дослідницького центру ім. Гельмгольца (м. Мюнхен) – нині підрозділ MIRION Medical, яка стала стартовим користувачем нової системи ОСЛ BeOSL. Основною нішею для конструктивно простого «ручного» зчитувача BeOSL передбачалася заміна фотоплівкових дозиметричних систем, час яких минув, у першу чергу, через припинення виробництва ядерно-емульсійних фотоплівок. При створенні системи BeOSL було застосовано такі нововведення як детектори ОСЛ на основі оксиду берилію та модульна конструкція системи, коли на основі окремих блоків (ОСЛ зчитувач, стиращ та калібратор) у поєднанні з механізмами подачі дозиметрів можна створювати систему, яка найбільше відповідатиме потребам конкретної служби ІДК. Персональні дозиметри BeOSL, розроблені із урахуванням поточних і перспективних вимог, враховують досвід розробки та експлуатації попередніх поколінь пасивних дозиметрів.

Компанія RadPro International (Німеччина) діє з 2003 р. із спеціалізацією в галузі розробки та постачання ТЛД та ОСЛ систем. У співробітництві з іншою німецькою технологічною компанією Freiberg Instruments (спін-оф Технічного університету Гірська академія, м. Фрайберг) розробила та вивела на ринок ОСЛ систему на основі детекторів з оксиду берилію. Система MyOSL4.0 була створена пізніше вищезгаданої системи BeOSL і врахувала усі виявлені під час її експлуатації вади та недоліки. Так, при розробці MyOSL4.0 одразу передбачалася можливість масштабування залежно від зміни (зростання) потреб лабораторії-користувача – від ручного зчитувача до автоматизованих систем на 50/500/4000 дозиметрів. Важливою перевагою цієї системи є поєднання в одному пристрої (модулі) функції зчитування та стирання (занулення) дозиметрів ОСЛ.

Корпорація Chiyoda Technol (Японія), заснована 1958 р., є провідним виробником дозимет-

ричного та радіометричного обладнання в Японії, є оператором найбільшої служби ІДК в азійсько-тихоокеанському регіоні (річний обіг 6 млн. дозиметрів). Система FGD-660, що серійно випускається з 2006 р., є другим поколінням РФЛ дозиметричних систем на основі фосфатного скла, активованого іонами срібла. Спеціалізацією зазначеної системи є використання у дозиметричних службах із дуже великим навантаженням, основна увага приділяється надійності механічних вузлів та стійкості системи в цілому. Стартовим користувачем системи на європейському континенті стала служба ІДК Інституту радіаційного захисту та ядерної безпеки IRSN (Франція), з 2019 р. РФЛ систему FGD-660 було введено в експлуатацію у лабораторії дозиметричного моніторингу МАГАТЕ (Австрія, м. Відень).

7. Критерії оцінювання та порівняння систем ІДК

Усі чотири включені до розгляду системи ІДК плюс існуючі ТЛД системи розглядаються за представленими нижче показниками, згрупованими у такі категорії:

Дозиметричні характеристики

- матеріал та дозиметричні властивості детектора випромінювання;
- номенклатура дозиметричних величин;
- набір спеціалізованих дозиметрів для вимірювання окремих дозиметричних величин;
- діапазон доз;
- енергетична залежність;
- кутова залежність;
- фединг (самочинна втрата інформації);
- можливість 2-D та 3-D зчитування.

- ### Експлуатаційні характеристики
- продуктивність;
 - автоматизація;
 - можливість повторного аналізу;
 - занулення інформації про дозу («стирання попередньо отриманої дози»);
 - пакування дозиметрів, забезпечення сховності детекторів.

Вартість придбання та володіння

- вартість зчитувача;
- вартість дозиметрів;
- експлуатаційні витрати.

Потенціал розвитку та вдосконалення

Здатність до інтеграції в існуючу інфраструктуру АЕС

- сумісність із системами контролю доступу;
- інтеграція до пристроїв зберігання індивідуальних дозиметрів
- потенціал адаптації програмного забезпечення та створення інтерфейсу з наявними й перспективними інформаційними системами АЕС.

8. Результати порівняння та підсумки

Показники для порівняння представлено у таблицях, на основі яких сформульовані висновки та рекомендації. Табл. 1 містить загальні характеристики різних систем, у Табл. 2 наведено конкретні показники по кожній із згаданих вище категорій, які, на думку авторів, є визначальними при виборі оптимальної системи – кандидата на переоснащення лабораторій ІДК АЕС України сучасним обладнанням для здійснення індивідуального дозиметричного контролю персоналу на найближчі десятиріччя.

Таблиця 1. Загальна характеристика систем ІДК

Показник	Наявні ТЛД (найкращий зразок)	OSLR250	BeOSL	MyOSL4.0	FGD-660
Принцип дозиметрії	ТЛД	ОСЛ	ОСЛ	ОСЛ	РФЛ
Матеріал детектора	LiF:Mg, Ti	Al ₂ O ₃ :C	BeO	BeO	фосфатне скло, активоване Ag ⁺
Тканинно-еквівалентність детектора	так	ні	так	так	ні
Кількість детекторів у дозиметрі	2 або 4	4	2 або 4	4	одна пластина з 5 фільтрами та ділянкою 2-D детектування
Набір спеціалізованих дозиметрів для вимірювання окремих дозиметричних величин (دوزи на кінцівки, шкіру, кришталик ока)	так	ні	так	так	ні

Показник	Наявні ТЛД (найкращий зразок)	OSLR250	BeOSL	MyOSL4.0	FGD-660
Архітектура зчитувача	моноблок з магазинною подачею дозиметрів	моноблок з магазинною подачею дозиметрів	модульна	модульна	моноблок з магазинною подачею дозиметрів
Індивідуальне калібрування детекторів	вбудоване або в окремому пристрої джерело ^{90}Sr	не потрібне	не потрібне	не потрібне	не потрібне
Зчитувач	так	так	так	так	так
Калібратор	так ¹	ні	так ¹	так ¹	ні
Окремий стирач дозиметрів	ні	так	так	ні ²	так
Індивідуальні дозиметри всього тіла	так	так	так	так	так
Індивідуальні дозиметри кінцівок	ні ³	ні	так	так	ні
Індивідуальні дозиметри кришталіка ока	ні	ні	так	так	ні
Автоматизація зчитування (механізм подачі дозиметрів)	вбудована	вбудована	окремий пристрій на дві позиції (два зчитувачі або зчитувач та стирач)	модулі автоматичної подачі на 50, 500 або 4000 дозиметрів	вбудована
Ємність пристрою подачі дозиметрів	1200	250	240	до 4000 ⁴	2000

Примітки.

¹ Опціонально.

² Функція стирання дозиметрів реалізована у комбінованому зчитувачі / стирачі.

³ Можливі як опція, але наразі на АЕС України відсутні.

⁴ Передбачається можливість масштабування в міру зростання потреб дозиметричної служби – ручна, на 50, 500 та 4000 дозиметрів.

Таблиця 2. Суттєві показники та характеристики систем ІДК

Показник	Наявні ТЛД (найкращий зразок)	OSLR250	BeOSL	MyOSL4.0	FGD-660
Дозиметричні характеристики					
Дози, що контролюються відповідно до НРБУ-97					
Ефективна доза – гамма та рентген	так	так	так	так	так
дозиметрична величина	Hp(10) фотони	Hp(10) фотони	Hp(10) фотони	Hp(10) фотони	Hp(10) фотони
спеціалізований дозиметр	дозиметр всього тіла	дозиметр всього тіла	дозиметр всього тіла	дозиметр всього тіла	дозиметр всього тіла
адекватність для визначення дози	висока	висока	висока	висока	висока
Ефективна доза – нейтрони	так	так	ні	на стадії розробки	ні
дозиметрична величина	Hp(10) нейтрони	Hp(10) нейтрони		Hp(10) нейтрони	
спеціалізований дозиметр	альbedo	альbedo		альbedo	
адекватність для визначення дози	обмежена	обмежена		обмежена	

Показник	Наявні ТЛД (найкращий зразок)	OSLR250	BeOSL	MyOSL4.0	FGD-660
Еквівалентна доза на кінцівки	ні¹	так	так	так	ні
дозиметрична величина		H _p (0,07) бета, фотони	H _p (0,07) бета, фотони	H _p (0,07) бета, фотони	
спеціалізований дозиметр	можливі, відсутні на АЕС	немає ²	кільцеві та браслети	кільцеві та браслети	
адекватність для визначення дози	висока	обмежена	висока	висока	
Еквівалентна доза на шкіру	індикація	так	так	так	так
дозиметрична величина		H _p (0,07) бета, фотони	H _p (0,07) бета, фотони	H _p (0,07) бета, фотони	H _p (0,07) бета, фотони
спеціалізований дозиметр	ні	ні	ні	ні	ні
адекватність для визначення дози	обмежена	висока	висока	висока	висока
Еквівалентна доза на кришталік	індикація	ні	так	так	ні
дозиметрична величина			H _p (3) бета, фотони	H _p (3) бета, фотони	
спеціалізований дозиметр	ні	ні	так	так (EYE-D)	ні
адекватність для визначення дози	низька		висока	висока	
Метрологічні характеристики					
Діапазон доз (лінійний відгук)	0,02 мЗв - 10 Зв	0,05 мЗв - 10 Зв (відхилення до 5 %)	0,05 мЗв - 10 Зв	0,05 мЗв - 10 Зв	0,02 мЗв - 10 Зв
Діапазон енергій (фотони)	20 кеВ - 7 МеВ	15 кеВ - 6 МеВ	16 кеВ - 7 МеВ	16 кеВ - 7 МеВ	10 кеВ - 10 МеВ
Енергетична залежність	до 50 %	до 11 %	до 11 %	немає даних ³	до 10 %
Кутова залежність ($\pm 60^\circ$)	2,5 %	до 6 %	немає даних ³	немає даних ³	до 10 %
Федінг (самочинна втрата інформації)	до 5 % за півроку ⁴	до 1,5 % на місяць ⁵ до 55 % за 45 діб для елемента № 1 ⁶	до 1 % за півроку	до 1 % за півроку	відсутній
Реалізація 2-D та 3-D зчитування	ні	ні	ні	ні	так
Експлуатаційні характеристики					
Продуктивність, кількість дозиметрів на годину	до 50 (RADOS) до 120 (Harshaw)	до 300	до 250	>200 (лише зчитування) >80 (зчитування - стирання - контрольне зчитування)	300
Автоматизація	на рівні окремого зчитувача	на рівні окремого зчитувача	модульна	модульна, масштабована	на рівні окремого зчитувача
Разове завантаження дозиметрів	200	250	272	50/500/4000	2000

Показник	Наявні ТЛД (найкращий зразок)	OSLR250	BeOSL	MyOSL4.0	FGD-660
Потреба у розбиранні дозиметрів перед зчитуванням	ручна або механізована	ручна	не потрібна	не потрібна	ручна або автоматична
Можливість повторного зчитування та аналізу	відсутня	обмежена	обмежена	обмежена	необмежена
Занулення інформації (принцип очищення дозиметрів та апаратна реалізація)	термічний під час зчитування	УФ на окремому пристрої	УФ на окремому пристрої	УФ на тому ж самому приладі зчитування	термічний на окремому пристрої
Пакування дозиметрів, забезпечення схоронності детекторів	окремі детектори чи цілісний слайд	проблеми з ущільненням від світла	щільне пакування	щільне пакування	скляна пластина, стійка до зовнішніх впливів
Витрати, пов'язані з контролем якості	регулярне індивідуальне калібрування усіх детекторів	періодична перевірка системи	періодична перевірка системи	періодична перевірка системи	відсутні
Економічні показники (вартість придбання та експлуатації)					
Вартість зчитувача	висока	помірна	низька	низька	дуже висока
Вартість дозиметрів	висока	помірна	низька	низька	низька
Експлуатаційні витрати	високі	низькі	відсутні	відсутні	відсутні
Витратні матеріали	азот високої очистки	фіксатор (замок) дозиметра	немає	немає	немає
Інші суттєві показники					
Потенціал розвитку та вдосконалення	вичерпаний	немає даних	високий	високий	обмежений
Придатність до інтеграції в існуючу інфраструктуру АЕС					
сумісність із системами доступу	відсутня	відсутня	можлива реалізація RFID маркування	можлива реалізація RFID маркування	RFID маркування
інтеграція до пристроїв зберігання індивідуальних дозиметрів	сумнівна	сумнівна	висока	висока	висока

*Примітки.*¹ Можливі як опція, але наразі на АЕС України відсутні.² Пропонується закріплювати дозиметр всього тіла на зап'ясті за допомогою ремінця. Кільцеві дозиметри відсутні.³ Кількісний показник у відкритих джерелах недоступний, є інформація про відповідність вимогам стандарту ІЕС 62387-1.⁴ За умови термообробки перед зчитуванням.⁵ Інформація виробника.⁶ Опромінення денним світлом; дані статті <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq543>

Далі підсумуємо переваги та недоліки окремо для кожної з розглянутих систем. З погляду практичного застосування систем ІДК для контролю опромінення персоналу АЕС, переваги та недоліки кожної розглянутих систем можна сформулювати таким чином:

8.1. Система ОСЛ OSLR250 Automatic Reader виробництва Landauer

Переваги:

- помірна ціна зчитувачів та дозиметрів;
- наявність опції контролю доз нейтронного випромінювання за допомогою оригінальної тех-

нології OSLN (накриття детектора шаром нейтронного перетворювача на основі ${}^6\text{Li}_2\text{CO}_3$).

Недоліки:

- сильна енергетична залежність матеріалу детектора $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$, для компенсації якої потрібне використання багатодетекторних дозиметрів;
- відсутність у виробничій лінійці спеціалізованих дозиметрів для контролю доз на кінцівки та кришталік ока як наслідок згаданої вище нетканинно-еквівалентності $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$;
- аномально високий фединг на елементі № 1 (контроль дози на шкіру);
- брак гнучкості в питанні масштабування автоматичної подачі дозиметрів – зчитувач постачається як моноблок із завантаженням на 250 дозиметрів.

8.2. Система ОСЛ BeOSL виробництва MIRION (Dosimetrics)

Переваги:

- низька ціна зчитувачів та дозиметрів;
- тканинно-еквівалентність матеріалу BeO (наслідок – притаманна матеріалу незначна енергетична залежність відгуку, що уможливило використання односторонніх дозиметрів для контролю доз на кришталік ока та кінцівки);
- наявність спеціалізованих дозиметрів для контролю доз на кінцівки та кришталік ока;
- модульна конструкція та певні можливості адаптації для задоволення конкретних потреб у здійсненні ІДК.

Недоліки:

- неможливість контролю доз нейтронного випромінювання;
- механічно складна конструкція пристрою подачі дозиметрів, що вимагає додаткових витрат на фахове технічне обслуговування та ремонт.

8.3. Система ОСЛ MyOSL 4.0 виробництва RadPro International

Оскільки в якості детектора випромінювання використовується оксид берилію BeO, основні дозиметричні характеристики цієї системи є аналогічними вищезгаданій системі BeOSL, однак, ця система відрізняється на краще від аналога більш вдалим технічними рішеннями. Так, через реалізацію функції стирання (занулення) ОСЛ сигналу в тому ж самому приладі (комбінований зчитувач / стиращ), відпадає необхідність у окремому технічно складному та високовартісному пристрої для стирання дозиметрів. Більш вдалою є також автоматизація вимірювань, яка відрізняється простотою механізму та значним потенціалом для покрового масштабування в

міру зростання потреб дозиметричної служби – пропонується ціла лінійка взаємозамінних пристроїв подачі дозиметрів (ручна/50/500/4000 дозиметрів). Іншою потенційною перевагою перед конкуруючою ОСЛ системою BeOSL є аносоване виробником створення дозиметра нейтронного випромінювання.

8.4. Система РФЛ Dosimeter Automatic Reader FGD-660 виробництва Chiyoda Technol

Переваги:

- можливість необмеженого повторного зчитування інформації з дозиметра;
 - відсутність федингу;
 - низька вартість дозиметрів;
 - можливість 2-D зчитування (детектування штучного статичного опромінення);
 - висока довготривалість обладнання, розрахованого на інтенсивне використання;
- #### Недоліки:
- дуже висока вартість зчитувача;
 - відсутність у виробничій лінійці спеціалізованих дозиметрів для контролю доз на кінцівки та кришталік ока;
 - особливі вимоги до умов зберігання дозиметрів (контроль вологості);
 - географічна віддаленість виробника та ускладнена логістика у разі впровадження в Україні.

9. Актуальні для АЕС аспекти контролю індивідуальних доз опромінення персоналу

9.1. Питання дозиметрії нейтронного випромінювання

Розглянуті дозиметричні системи пропонують нейтронну дозиметрію на основі дозиметрів альbedo, що використовують властивість чутливості до теплових нейтронів детекторів чи перетворювачів з включенням ${}^6\text{Li}$. Обмеженням цієї технології є вкрай виражена енергетична залежність, яка унеможливило універсальне використання їх у нейтронних полях невідомого чи змішаного енергетичного складу. Жодна з цих систем не задовольняє профільний стандарт ISO 21909-1:2015 [16]. Через це використання опціональних нейтронних дозиметрів у складі ТЛД/ОСЛ системи може мати оманливий ефект.

Натомість, еталонним методом пасивної нейтронної дозиметрії є використання трекових детекторів з товстошаровою ядерною емульсією (плівка CR-39 або подібні), для зчитування яких потрібне спеціалізоване обладнання (проявочне, мікроскоп, програмно-апаратний комплекс для підрахунку та аналізу треків). Через складність

методики та високі вимоги до кваліфікації персоналу, такі лабораторії діють лише в окремих країнах, зазвичай трекові детектори надсилаються до них для аналізу та визначення доз нейтронного випромінювання, в тому числі у транскордонний спосіб.

Нещодавно корпорація Chiyoda Technol вивела на ринок повністю автоматичну систему нейтронної трекової дозиметрії WNP на основі детекторів TechnoTrack2. За даними тестів ця система відрізняється низьким власним фоном, дає можливість визначати дози нейтронного випромінювання у широкому діапазоні енергій нейтронів. Метрологічні характеристики системи WNP відповідають вимогам стандарту ISO 21909-1:2015. Очевидно, оптимальним рішенням було б облаштувати таким обладнанням одну (центральну) лабораторію, яка могла б забезпечувати централізований контроль доз нейтронного опромінення персоналу всіх АЕС України.

9.2. Питання визначення доз опромінення кришталіка ока

Проблема контролю доз опромінення кришталіка ока має глобальний характер, позаяк, після перегляду нормативу безпечного опромінення кришталіка та введення нового, значно нижчого, ліміту дози, дійсні раніше емпіричні критерії достатнього захисту ока (одночасне неперевіщення лімітів дози опромінення шкіри та всього тіла) виявилися застарілими. Отже постає завдання контролю (числового визначення величини) доз опромінення кришталіка ока через оцінку операційної дозиметричної величини $H_p(3)$ із використанням спеціалізованих дозиметрів, які мають бути розташовані та експонуватися поблизу очей працівника. У контексті дозиметричного контролю персоналу АЕС треба враховувати, що подекуди суттєвий внесок у дозу опромінення кришталіка дає не тільки фотонне, але й бета-випромінювання. Оскільки ця проблема постала більше десяти років тому, провідні виробники дозиметричного обладнання вже підготували відповідні спеціалізовані дозиметри. Слід підкреслити, що через практичні обмеження, що диктують однодетекторну конструкцію дозиметра, використання нетканинно-еквівалентних детекторів є неможливим. Отже, основою для детекторів таких спеціалізованих «очних» дозиметрів мають бути тканинно-еквівалентні матеріали. Найближче цьому критерію відповідають ОСЛ детектори на основі BeO , дещо гірші характеристики має LiF , який використовується у більшості ТЛД систем, але не годиться для ОСЛ дозиметрії. Таким чином, при виборі перспективної системи ОСЛ слід зважати на вико-

ристання детекторів на основі BeO та наявність у виробничій лінійці виробника спеціалізованих дозиметрів для визначення операційної дозиметричної величини $H_p(3)$, а отже – прямого контролю доз опромінення кришталіка ока.

10. Висновки та рекомендації

1. Нові ОСЛ та РФЛ системи мають суттєві переваги над ТЛД системами попереднього покоління, зокрема, простіше та дешевше обладнання, менше енергоспоживання та відсутність витратних матеріалів, значно вища продуктивність, можливість повторного зчитування та аналізу того ж самого дозиметра.

2. Метрологічні характеристики усіх систем, що порівнювались, є досить подібними. Усі дозиметричні системи відповідають вимогам стандарту ІЕС 62387:2020.

3. Важливою відмінністю нових ОСЛ та РФЛ систем від традиційного ТЛД обладнання є висока стабільність та відтворюваність дозиметричних властивостей застосованих детекторів. Через це відпадає необхідність в індивідуальному калібруванні окремих детекторів та періодичному повторенні цієї процедури. Виробники ОСЛ обладнання пропонують послугу надання еталонних дозиметрів для періодичної перевірки систем у цілому.

4. Відмінними є номенклатура дозиметричних величин, які можна контролювати за допомогою дозиметричних систем та, головне, набір спеціалізованих дозиметрів для їх контролю.

5. Суттєво відрізняються підходи різних виробників до реалізації функціоналу автоматичного зчитування дозиметрів та занулення (стирання інформації) перед новим циклом вимірювань.

6. За підсумками порівняльного аналізу на експертну думку авторів можна сформулювати такі рекомендації:

- При виборі нової системи для переоснащення лабораторій ІДК АЕС слід зосередитися на сучасних ОСЛ та РФЛ системах.

- При виборі конкретної системи / виробника слід, насамперед, зважити на номенклатуру дозиметричних величин та наявність у виробничій лінійці спеціалізованих дозиметрів, призначених для вимірювання та контролю цих величин.

- При виборі системи ІДК та її конкретної конфігурації необхідно враховувати її модульність та можливості масштабування (майбутнє розширення функціоналу чи продуктивності за рахунок додаткового придбання окремих відносно недорогих елементів системи).

– При оцінці фінансових показників слід враховувати не тільки сукупну вартість обладнання (зчитувачів, індивідуальних дозиметрів, допоміжного обладнання), але й вартість володіння (експлуатаційні витрати, вартість та доступність запасних частин і сервісу).

– За сукупністю дозиметричних та експлуатаційних показників, найбільш оптимальною є система ОСЛ дозиметрії MyOSL у складі комбінованих ОСЛ зчитувачів / стирачів дозиметрів, автоматизації магазинного типу та комплекту дозиметрів всього тіла та спеціалізованих дозиметрів кінцівок та кристалика ока. За умови конкурентності ціни, цій системі слід віддати перевагу при виборі системи ІДК нового поко-

ління для оснащення лабораторій дозиметричного контролю АЕС України.

– Оскільки усі ТЛД/ОСЛ системи, оснащені «нейтронними дозиметрами», мають украй обмежені можливості вимірювання доз нейтронного випромінювання, пропонується наразі продовжити використання існуючих ТЛД систем із дозиметрами альбедро. На перспективу слід розглянути можливість оснащення єдиної (центральної) лабораторії системою нейтронної дозиметрії на основі трекових детекторів з товстошаровою ядерною емульсією (плівка CR-39 або подібні) для контролю індивідуальних доз нейтронного випромінювання на всіх об'єктах атомної енергетики України.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. В.П. Романов. *Дозиметрист АЭС* (Москва: Энергоатомиздат, 1986) 280 с. / V.P. Romanov. *Dosimetrist of NPP* (Moskva: Energoatomizdat, 1986) 280 p. (Rus)
2. Радиационная безопасность. Рекомендации МКРЗ 1990 г. Ч. 1 (Москва: Энергоатомиздат, 1994) 192 с. / ICRP Publication 60: 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP* 21(1-3) (1991) 209 p.
3. ICRP Publication 103: The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. *Ann. ICRP* 37(2-4) (2007) 332 p.
4. ICRU Report 95. Operational Quantities for External Radiation Exposure. *Journal of ICRU* 20(1) (2020) 24.
5. V. Chumak et al. Comparative performance testing of Harshaw 8800 and KDT-02M TLD systems. *Radiat. Prot. Dosim.* 101 (2002) 593.
6. IEC 62387:2020. International Standard. Radiation protection instrumentation – Dosimetry systems with integrating passive detectors for individual, workplace and environmental monitoring of photon and beta radiation (International Electrotechnical Commission, 2020) 180 p.
7. V.V. Chumak, E.V. Bakhanova. Assessment of effective dose with personal dosimeters: Account of the effect of anisotropy of workplace fields. *Radiation Measurements* 43 (2008) 655.
8. V. Volosky, E. Bakhanova, V. Chumak. Determination of angular distributions of workplace photon fields in a context of effective dose estimation. *Radiat. Prot. Dosim.* 144 (2011) 636.
9. ISO 14146:2018. International Standard. Radiological protection – Criteria and performance limits for the periodic evaluation of dosimetry services (International Standards Organization, 2018) 12 p.
10. Результати першого національного інтеркалібрування лабораторій індивідуального дозиметричного контролю в Україні. Аналітична довідка (ДУ «ННЦРМ НАМН України», 2014) 60 с. / Results of the first national intercalibration of individual dosimetric monitoring laboratories in Ukraine. Analytical report (State Institution “National Research Center for Radiation Medicine of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine”, 2014) 60 p. (Ukr)
11. V. Chumak et al. Current status of individual dosimetric monitoring in Ukraine. *Radiat. Prot. Dosim.* 170 (2016) 117.
12. Council Directive 2013/59/EURATOM of 5 December 2013 laying down basic safety standards for protection against the dangers arising from exposure to ionising radiation, and repealing Directives 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom and 2003/122/Euratom. *Official Journal of the European Union* L 13/1 (2014).
13. S.W.S. McKeever. *Thermoluminescence of Solids* (Cambridge: Cambridge University Press, 1985) 376 p.
14. E.G. Yukihiro, S.W.S. McKeever. *Optically Stimulated Luminescence: Fundamentals and Applications* (John Wiley & Sons, Ltd, 2011) 384 p.
15. ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020) 31 с. / State Standard of Ukraine EN ISO/IEC 17025:2019. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories (Kyiv: State Enterprise “Ukrainian Research Center for Standardization, Certification and Quality”, 2020) 31 p. (Ukr)
16. ISO 21909-1:2021. International Standard. Passive neutron dosimetry systems – Part 1: Performance and test requirements for personal dosimetry (International Standards Organization, 2021) 42 p.

V. V. Chumak^{1,2,*}, V. M. Volosky^{1,2}

¹ *State Institution "National Research Center for Radiation Medicine, Hematology and Oncology of the National Academy of Medical Sciences of Ukraine", Kyiv, Ukraine*

² *Research and Production Enterprise "Dosimetrika", Kyiv, Ukraine*

*Corresponding author: chumak.vadim24@gmail.com

**REVIEW AND COMPARATIVE ANALYSIS
OF POTENT INDIVIDUAL DOSIMETRIC MONITORING SYSTEMS FOR UKRAINIAN NPPs**

Individual dosimetric monitoring (IDM) of external exposure of the personnel of nuclear power facilities is a key element of the radiation protection system, is traditionally within the responsibility of NPP radiation safety shops and is carried out by appropriately equipped IDM laboratories. The equipment of the IDM at NPPs, which was commissioned in the mid-2000s, is coming to the end of its life cycle and the issue of equipment replacement is on the agenda now. New IDM systems that will operate for the next 10 - 15 years should meet modern requirements, take into account global trends in radiological protection and the latest developments of IDM instrumentation, while the choice of new systems should be based on international and domestic experience, adequacy of dosimetric performance and operational practicality. The review is devoted to the comparison of the characteristics of the potent passive personal dosimetry systems considered for IDM of Ukrainian NPP personnel. Based on the analysis of literature data, international standards and recommendations, information from manufacturers and authors' own practical experience, a generalization of information on existing and future IDM systems is carried out, a vision of the most optimal choice of systems for re-equipping laboratories for dosimetric monitoring of nuclear power plants good for the next decade is proposed.

Keywords: individual dosimetric monitoring, occupational exposure, NPP, personnel, radiation protection, optically stimulated luminescence, thermoluminescence, radiophotoluminescence.

Надійшла / Received 26.02.2024