





МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ТА КОНТРОЛЮ ПОЛІВ ОПРОМІНЕННЯ МІКРОТРОНА М-30

М. І. Романюк , Й. Й. Гайніш, О. М. Турховський, М. В. Гошовський,

Г. Ф. Пітченко, І. Г. Мегела , О. О. Парлаг , В. Т. Маслюк 

Інститут електронної фізики НАН України,

вул. Університетська 21, Ужгород, 88017, Україна,

e-mails: nani.ier@gmail.com; myk.romanyuk@gmail.com; volodymyr.maslyuk@gmail.com

(Отримано 10 червня 2021 р.; в остаточному вигляді — 30 грудня 2021 р.; прийнято до друку — 04 січня 2022 р.; опубліковано онлайн — 05 лютого 2022 р.)

Представлено результати формування та дослідження параметрів радіаційних полів ядерно-фізичних установок. Наведено такі ж дані для пучків електронів мікротрона М-30 ІЕФ НАН України (1–18 МеВ). Запропоновано комплексний підхід, коли встановлюються як поглинута доза, так і просторово-енергетичний рельєф її щільності на площі опромінення, що важливо для розробки протоколів радіаційних випробувань матеріалів та приладів різного призначення. Розглянуто декілька варіантів формування радіаційних полів із можливістю регулювання їхнього просторового розподілу та встановлення допустимих розмірів об'єктів, що проходять радіаційну обробку. Із використанням циліндра Фарадея, атестованого до енергій 30 МеВ, отримано результати досліджень й аналітичні залежності дози випромінювання від віддалі до вузла виводу М-30. Обговорено питання, як використовувати отримані дані для встановлення дозиметричних характеристик змішаних: електрон, гамма- та нейтронних полів опромінювання.

Ключові слова: мікротрон (1–30 МеВ), радіаційні поля, формування, однорідність, доза, контроль.

DOI: <https://doi.org/10.30970/jps.26.1201>

I. ВСТУП

Радіаційні технології – важливий сегмент сучасного промислового виробництва, що швидко розвивається. Відомими є сфери застосування радіації в хімічній, медичній та фармацевтичній галузях [1–3], а також забезпечення надійності матеріалів, обладнання для космічного, енергетичного та спеціального застосувань [4–7]. Ефективне використання радіаційних технологій потребує виконання низки складних науково-технічних завдань, пов'язаних із режимами обробки об'єктів дослідження та дозиметричним супроводом процесу. Реалізація таких завдань потребує знань про сорт використовуваного ядерного випромінювання, режими прискорення, тип радіаційної установки та розміри об'єктів, що проходять радіаційну обробку. Використання прискорювачів електронів для цих задач дуже привабливе порівняно з коштовнішими та складнішими ядерними установками, що генерують пучки високоенергетичних протонів чи легких ядер. Щобільше, електронні прискорювачі можуть бути джерелами гальмівного γ -випромінювання або нейтронних потоків через взаємодію пучків електронів із відповідними мішенями.

У цій роботі подано результати дослідження дозиметричних та просторових характеристик полів опромінення електронного прискорювача — мікротрона М-30 Інституту електронної фізики НАН України. Зроблено також огляд аналогічних досліджень для інших ядерно-фізичних установок.

Електронні прискорювачі забезпечують меншу собівартість опромінення, можливість управління його параметрами та надійний контроль дозиметричних

характеристик. Виконання останнього завдання потребує комплексного дослідження створюваних ними радіаційних полів, їхніх імпульсних та енергетичних характеристик, щільність та однорідність потоку опромінення. Установлення цих параметрів важливе для розробки методик дозиметричного супроводу, і такі дослідження мають проводитися індивідуально для кожної ядерно-фізичної установки. У цій статті подано результати дослідження дозиметричних і просторових характеристик полів опромінення електронного прискорювача — мікротрона М-30 Інституту електронної фізики НАН України.

II. ЕЛЕКТРОННИЙ ПРИСКОРЮВАЧ ДЛЯ РАДІАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ МІКРОТРОН М-30

Мікротрон М-30 — циклічний прискорювач релятивістських електронів зі змінною кратністю прискорення [8–10]. У ньому прискорювальним модулем є об'ємний резонатор, що збуджується імпульсним магнетроном. Силова установка мікротрона використовує як генератор НВЧ магнетрон МІ-262 з потужністю в імпульсі 9 МВт, частотою генерації 3200 МГц, тривалістю імпульсу опромінення — 0.2–0.3 мкс, прогальністю — 3300–5000. Імпульс випромінювання мікротрона являє собою послідовність згустків електронів, які слідуєть один за одним із частотою 3200 МГц і тривалістю 30 пс. Струм прискорених електронів в імпульсі досягає 50 мА, тривалість імпульсу струму пучка 0.15–0.20 мкс, частота повторення імпульсів 1 кГц.



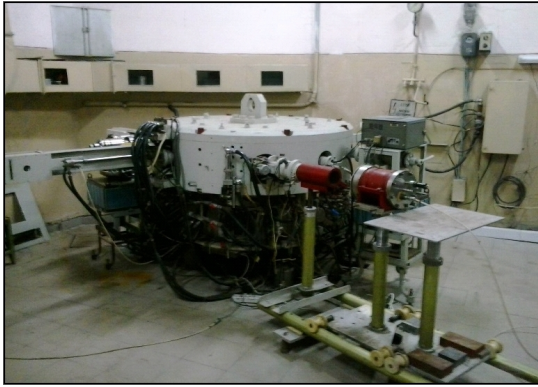


Рис. 1. Загальний вигляд прискорювача М-30
Fig. 1. General view of the M-30 accelerator

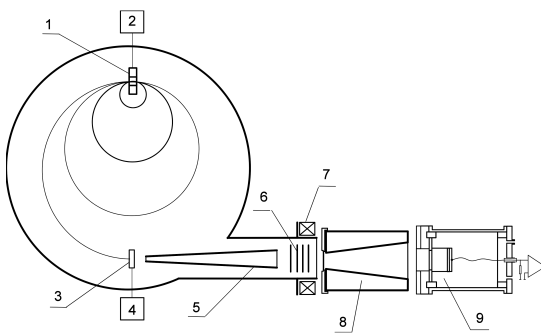


Рис. 2. Схема розташування пристроїв мікротрона: 1 — резонатор; 2 — генератор надвисокої частоти (НВЧ); 3 — колектор орбіт; 4 — вимірювач струму; 5 — вузол виводу пучка; 6 — монітор вторинної емісії; 7 — індукційний датчик; 8 — перетворювач; 9 — циліндр Фарадея (ЦФ)
Fig. 2. Layout of microtron devices: 1 — resonator; 2 — ultra-high frequency (UHF) generator; 3 — orbit collector; 4 — current meter; 5 — beam output node; 6 — secondary emission monitor; 7 — induction sensor; 8 — the converter; 9 — Faraday cylinder (FC)

Ефективність виводу електронів із мікротрона М-30 сягає 80–100%, середній струм пучка електронів може змінюватися в межах від 0.01 до 50 мкА або щільності потоку до $3.12 \cdot 10^{14}$ ел·см⁻²·с⁻¹. Пучок електронів із прискорювача виводиться через вікно з титану завтовшки 25 мкм (11.3 мг·см⁻²) із утратою до 30 кеВ від початкової енергії. Електронний пучок на виході з прискорювача М-30 має форму еліпса з діагоналями, які становлять 10–12 мм по горизонталі та 3–4 мм по вертикалі; розбіжність виведеного пучка електронів до вивідного вікна: у вертикальному напрямку — $1.5 \cdot 10^{-3}$ радіан, у горизонтальному — $1.5 \cdot 10^{-2}$ радіан. У мікротроні М-30 за кожне проходження пучка електронів через резонатор енергія електронів зростає на 0.51 МеВ, і вони починають рухатися вже по наступній орбіті більшого радіуса в магнітному полі. Кількість орбіт у вакуумній камері М-30 становить 29, зміна енергії відбувається плавно в межах 1–3 МеВ з пульта управління мікротроном і

ступінчато — у межах від 1.4 до 24 МеВ. Ступенева зміна енергії потребує 5–6 годин. Основними параметрами, що визначають енергію прискорених електронів в М-30, є кількість кругових орбіт і величина магнітного поля вакуумної камери. Регулювання енергії прискорених електронів може відбуватися: покроково, в межах 3–30 МеВ з кроком 1.5 МеВ, використанням відповідних хвилевидних вставок, розміщених у вакуумній камері, а також плавно, унаслідок зміни величини прискорювального потенціалу в резонаторі та подальшою зміною напруженості ведучого магнітного поля. Управління мікротроном, контроль параметрів прискорювача, його вмикання і вимикання здійснюється дистанційно з пульта управління, який модернізовано для таких задач.

Загальний вигляд мікротрона М-30, метрологічної лави для радіаційних експериментів представлено на рис. 1, схема ж розташування пристроїв М-30 — представлена на рис. 2. Висока моноенергетичність пучка електронів і можливість їх конвертації в радіаційні поля нейтронного, гамма або змішаного ядерного випромінювання дозволили створити на базі М-30 радіаційний стенд для дослідження радіаційної стійкості матеріалів і приладів для задач космічного, реакторного, чи спеціального призначення.

ІІІ. МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ РАДІАЦІЙНИХ ПОЛІВ ОПРОМІНЕННЯ

Розподіл щільності потоку електронів у поперечному перерізі є одним із основних характеристик пучків. Різноманітні методи його дослідження мають як переваги, так і недоліки [12]. Переважно для цього використовують 2D сканери, що містять малогабаритний ЦФ із малою апертурою [13]. Також використовують металічні електроди, що переміщуються механічними приводами різних конструкцій [14–17].

У таких конфігураціях вихідний струм прискорювача контролюється фольговими датчиками (моніторами вторинної емісії), індукційними датчиками або циліндрами Фарадея. Їх вибір зумовлений як питаннями зручності використання, так й економічними міркуваннями. Часто для детектування струму прискорених електронів як у вакуумі, так і в атмосфері використовують провідники з різних металів та конфігурацій (рис. 3). Інший приклад, де вимірювальні електроди нерухомі, та одна із схем моніторингу вихідного струму прискорювача показано на рис. 4.

Складний варіант моніторингу не лише положення, а й форми електронного пучка в атмосфері можна бачити на рис. 5. У наведених прикладах зафіксовано лише струм пучка електронів, поля γ -випромінювання проігноровано.

Гальмівне випромінювання, що виникає, коли електрони проходять мішень, зазвичай спрямоване вперед. Для його рівномірного розподілу в пучок вводять вирівнювальний фільтр, як зазначено на рис. 6. На електрони такі фільтри впливають аналогічно.

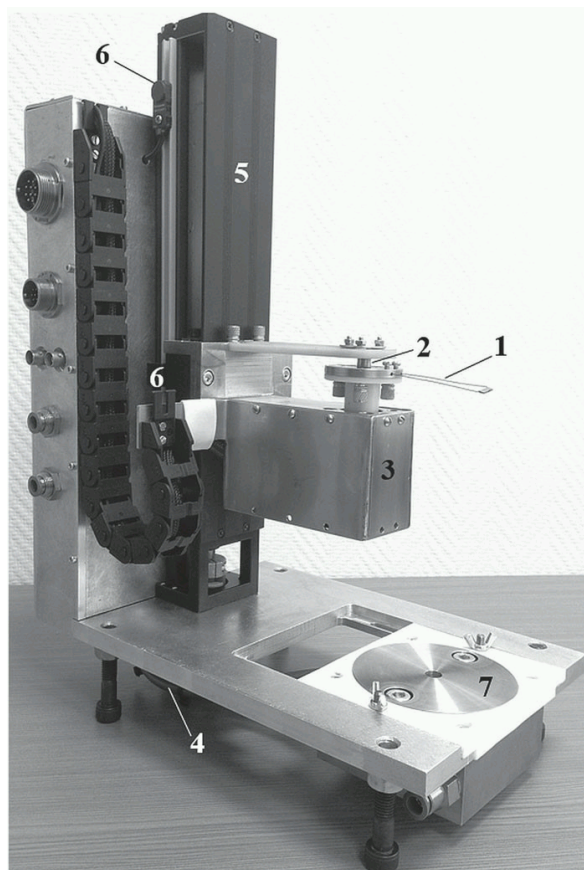


Рис. 3. Зовнішній вид подвійного сканера: 1 — вольфрамові дроти; 2 — ковзний контакт; 3 — вихровий двигун; 4 — кроковий двигун; 5 — інтерфейсний блок; 6 — індуктивні датчики; 7 — колектор [18]

Fig. 3. Appearance of the double scanner: 1 — tungsten wires; 2 — sliding contact; 3 — vortex engine; 4 — stepper motor; 5 — interface unit; 6 — inductive sensors; 7 — collector [18]

Нерозсіяне вимірювання змінюється з відстанню від джерела як обернений квадрат відстані. Це прямий наслідок того факту, що для ізотропного випромінювання з точкового джерела загальна кількість частинок, що перетинають сферу радіуса r із центром у джерелі, не залежить від r . Тому потік (флюенс) частинок на відстані r , одержаний діленням цього числа частинок на площу поверхні сфери, змінюється пропорційно r^{-2} . Оскільки доза пропорційна потоку частинок, вона також змінюється як r^{-2} . Цю залежність звичайно називають “закон оберненого квадрата”. Потрібно мати на увазі, що цей закон виконуватиметься лише в певних умовах. Наприклад, коли пучок розсіюється, закон оберненого квадрата не виконуватиметься точно. Також можна зробити висновок, що на осі пучка потужність дози в повітрі спадає близько до “закону оберненого квадрата”, якщо енергія така, що ослабленням та розсіянням у повітрі можна знехтувати (на практиці, це виконується за енергії фотонів дещо вище десятків кілоелектронвольт та енергії електронів вище декількох MeV), і якщо відстань від розсіювальних матеріалів (вузол виводу пучка, стіни залу опромінення, підлога) досить велика.

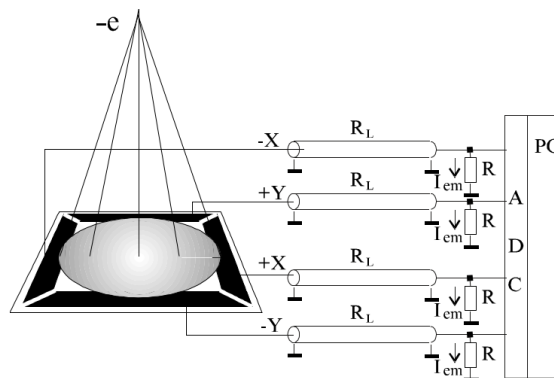


Рис. 4. Схема монітора. R — узгоджувальний опір коаксіального кабелю; R_L — опір кабелю РК75; PC — персональний комп’ютер; ADC — аналого-цифровий перетворювач [16]

Fig. 4. Monitor diagram. R is the matching resistance of the coaxial cable; R_L — cable resistance RK75; PC — personal computer; ADC — analog-to-digital converter [16]

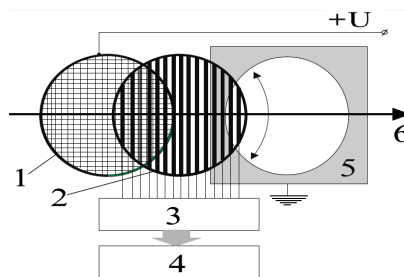


Рис. 5. Структурна схема монітора. 1 — збиральний електрод; 2 — електроди емісії; 3 — вимірювальний пристрій; 4 — обчислювальна машина; 5 — платформа пристрою з приводом обертання; 6 — спадний пучок заряджених часток [17]

Fig. 5. Block diagram of the monitor. 1 — collecting electrode; 2 — emission electrodes; 3 — measuring device; 4 — computer; 5 — platform of the device with the rotation drive; 6 — falling beam of charged particles [17]

Чисельна модель профілю електронного пучка, обробленого вирівнювальними фільтрами з різних матеріалів (алюмінію та АВС-пластику), була розроблена на основі експериментальної оцінки форми та профілю електронного пучка, одержаного на мікротроні TPU [20]. Виготовлені фільтри використані в експерименті, який показав хороший збіг із розрахованими профілями електронного пучка.

Ці дані були одержані сканувальним пристроєм [15, 21], розробленим для виміру щільності потоку електронів у поперечному перерізі пучка (рис. 9). Запропонований метод полягає в скануванні пучка плоским тонким провідником (смужкою), що частково перекриває електронний потік, при цьому струм вимірюється циліндром Фарадея. Цим розглянутий пристрій відрізняється від [17] (рис. 5), де струм пучка реєструється вузькими смужками алюмінієвої фольги, розміщеними поперек електронного пучка. Сканування по-

вторюється багатократно у площині поперечного перерізу за різних кутів повороту з фіксованим кутом зсуву. Реконструкція поперечного перерізу щільності потоку здійснена з використанням зворотного перетворення Радона [22].

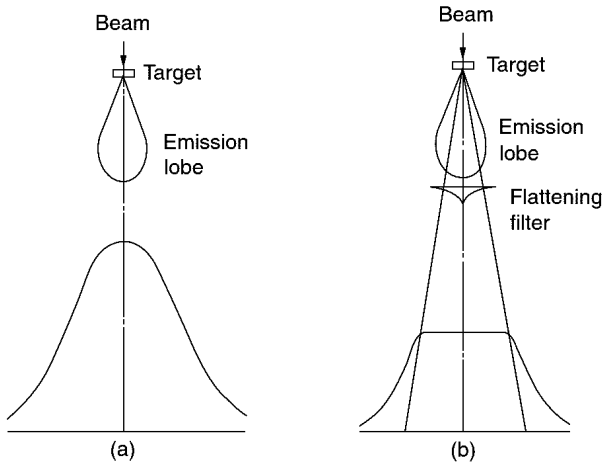


Рис. 6. Пучок на виході прискорювача без (а) та з вирівнювальним фільтром (б) [19, с. 216]
 Fig. 6. Beam at the output of the accelerator without (a) and with an equalizing filter (b) [19, p. 216]

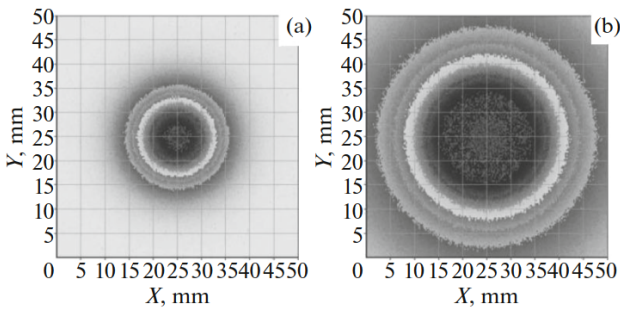


Рис. 7. Форма електронного пучка на відстані 15 см від вихідного вікна: (а) без вирівнювального фільтра; (б) з фільтром із алюмінію [20]
 Fig. 7. The shape of the electron beam at a distance of 15 cm from the output window: (a) without an equalizing filter; (b) with aluminum filter [20]

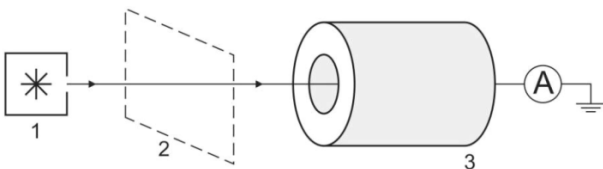


Рис. 8. Геометрія експерименту [21]: 1 — джерело електронів; 2 — площина сканування; 3 — циліндр Фарадея
 Fig. 8. Geometry of the experiment [21]: 1 — source of electrons; 2 — scanning plane; 3 — Faraday cylinder

Із рис. 9 можна бачити, що результати моделювання добре узгоджуються з експериментом. Невелика розбіжність результатів, отриманих експериментально та розрахунковими, у зоні високих доз між профілями пояснюється впливом матеріалу сканера на поглинання пучка.

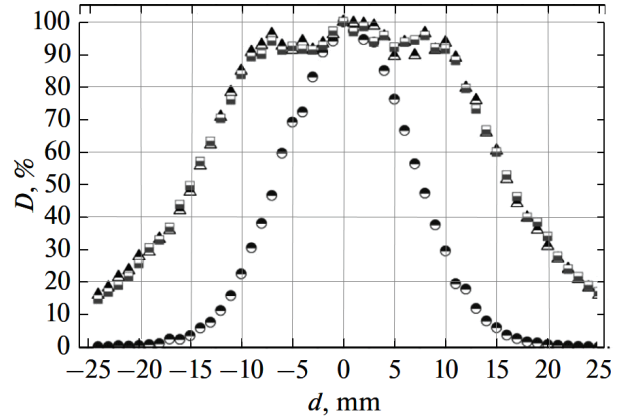


Рис. 9. Нормований профіль електронного пучка на відстані 15 см від вихідного вікна прискорювача [15]: (●) без фільтра; (▲) з алюмінієвим фільтром; (■) з фільтром із ABS-пластика
 Fig. 9. Normalized profile of the electron beam at a distance of 15 cm from the output window of the accelerator [22]: (●) without filter; (▲) with aluminum filter; (■) with filter made of ABS plastic

Розглянуті монітори-сканери дозволяють оперативного одержувати інформацію про просторовий розподіл заряджених частинок. Ціною оперативності є використання досить складних механічних та електронних пристроїв. Альтернативою можуть бути планарні реєструвальні середовища органічного чи неорганічного походження, характеристики яких змінюються під дією радіації [23, 24]. Оперативність утрачається внаслідок необхідності їх хімічної та оптичної обробки. Зміна оптичної густини або потемніння характеризує просторовий розподіл опромінювальних частинок, електронів або гамма-квантів гальмівного випромінювання.

Для реєстрації можна використати натрій-силікатні стекла складу: $(0.72)\text{SiO}_2$ $(0.02)\text{Al}_2\text{O}_3$ $(0.04)\text{MgO}$ $(0.07)\text{CaO}$ $(0.15)\text{Na}_2\text{O}$ (віконні), прозорість яких змінюється під час опромінення. Відомо, що під дією радіації у склі виникають центри забарвлення електронного чи діркового типу, а скло темніє й утрачає прозорість. Якщо величина такої зміни є пропорційною поглинутій дозі, матеріал може слугувати індикатором однорідності поля опромінення. Градація потемніння скла відображає ступінь неоднорідності радіаційного поля як пучка електронів, так і гальмівного випромінювання для досліджуваної площі опромінення. Використання скла як детекторів випромінювання має декілька переваг, до яких належать: хімічна інертність, жорсткість, нерозчинність та низька вартість. Недолік, пов'язаний із вицвітанням опроміненого скла, обходиться вибором часу початку обробки після опромінення.

Типовий результат вимірів просторового розподілу прискорених електронів із використанням скляної пластини як реєструвального елемента зображено на рис. 10.

Дозиметричні характеристики скла, виміряні в [26], показують, що комерційне віконне скло може бути застосоване до вивчення високих доз радіації з урахуванням вицвітання за кімнатної температури. Отримані залежності свідчать, що цей матеріал можна використати в діапазоні поглинутих доз 50 Gy–20 kGy (50 Гр–20 кГр).

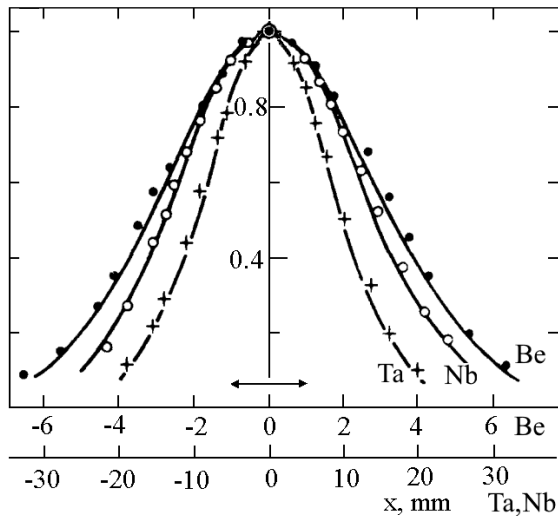


Рис. 10. Експериментальні розподіли розсіяних на тонких фольгах Be, Nb і Ta електронів енергії 50 MeV. Абсциса показує координату щодо осі пучка, а ордината — відносне потемніння скла. Для Be вказано розмір колімованого пучка [25]

Fig. 10. Experimental distributions of 50 MeV electrons scattered on thin Be, Nb, and Ta foils. The abscissa shows the coordinate relative to the beam axis, and the ordinate shows the relative darkening of the glass. In the case of Be, the size of the collimated beam is indicated [25]

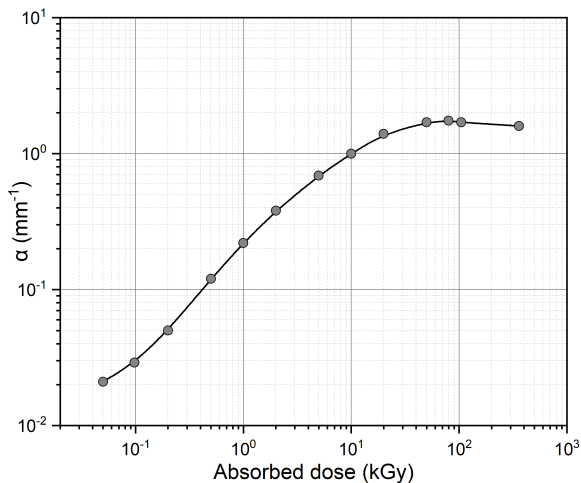


Рис. 11. Калібрувальна крива скла для ^{60}Co . Вимірювання здійснено денситометром; α — коефіцієнт поглинання [26, Fig. 3]

Fig. 11. Calibration glass curve for ^{60}Co . The measurement was performed using a densitometer; α is the absorption coefficient [26, Fig. 3]

Використання комерційного скла як дозиметра для високих дози опромінення також досліджено в [27]. Скло опромінювали дозами в діапазоні 1–50 кГр, використовуючи ^{60}Co γ -джерело, а також 4 MeV та 12 MeV електронні прискорювачі. Зразки піддано термічній обробці після опромінення (150°C протягом 20 хв), щоб поліпшити стабільність вимірюваного оптичного поглинання, оскільки його швидке затухання спостерігаємо за кімнатної температури відразу після опромінення. Вимірювали оптичне поглинання опромінених зразків, що зберігаються в темряві та за кімнатної температури, протягом декількох тижнів. Зразки, подані на термічну обробку, показали зменшення приблизно на 10–15% від конкретного оптичного поглинання, що стало набагато менш вираженим через 10 днів від опромінення. Це дослідження свідчить про доцільність використання комерційного віконного скла як дозиметра в певному діапазоні дози після належного калібрування.

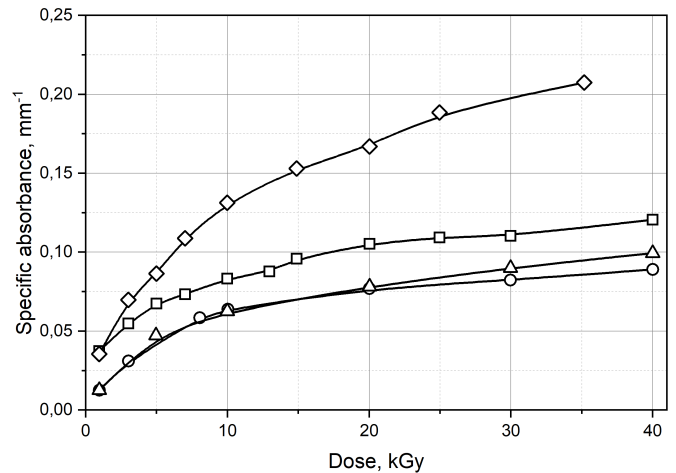


Рис. 12. Калібрувальні криві скла для: (\diamond) електрони 8.4 MeV; (\square) електрони 3.4 MeV; (Δ) ^{60}Co γ -випромінювання 6 кГр/год; (\circ) ^{60}Co γ -випромінювання 1 кГр/год. Оптичні вимірювання зроблені за 410 нм [27, Fig. 2]

Fig. 12. Calibration glass curves for: (\diamond) electrons 8.4 MeV; (\square) electrons 3.4 MeV; (Δ) ^{60}Co γ -radiation 6 kGy/h; (\circ) ^{60}Co γ -radiation 1 kGy/h. Optical measurements were made at 410 nm [27, Fig. 2]

У наступній роботі 1D і 2D оптичні сканери використано для дослідження просторового профіля електронного пучка в поперечному перерізі. Метод полягає в генерації центрів забарвлення в скляних пластинах під час опромінення, а потім у їх скануванні під час освітлення світлодіодом (LED) у спектральному діапазоні 520–560 нм [28]. Використано 6 мм скляні пластини (SiO_2 : 76%) замість дорогих дозиметричних плівок. Дози випромінювання від прискорювача Rhodotron варіювалися від 7.8 кГр до 20 кГр. Експериментальні результати, отримані в цьому дослідженні, цілком узгоджуються з результатами інших робіт, але вони ефективніші за ціною та точністю.

Переваги — це полегшення вимірювання, вартість, точність. Недоліками є виміри в режимі off-line, нестабільність кольорових центрів за доз вище 10 кГр, а

також імовірність пошкодження скла за високої щільності струму вище 1.25 мкА/мм^2 . Цей метод підходить для аналізу просторового розподілу електронів з максимальною щільністю струму 1.25 мкА/мм^2 та 25 мкА/мм^2 , за максимальної дози 10 кГр і 25 кГр у статичному та сканувальному режимі прискорювача Rhodotron, відповідно.

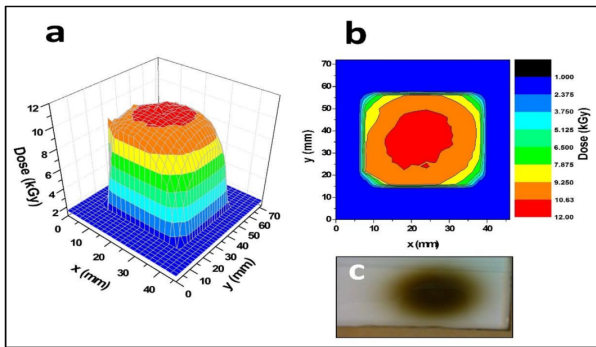


Рис. 13. (а) 3D-діаграма, отримана після опромінення скла 10 MeV електронним пучком прискорювача Rhodotron у статичному стані; (б) двовимірний розподіл; (с) скляна пластина після опромінення [28, Fig. 8]

Fig. 13. (a) 3D diagram obtained after irradiation of a 10 MeV electron beam with an Rhodotron accelerator in a static state; (b) two-dimensional distribution; (c) glass plate after irradiation [28, Fig. 8]

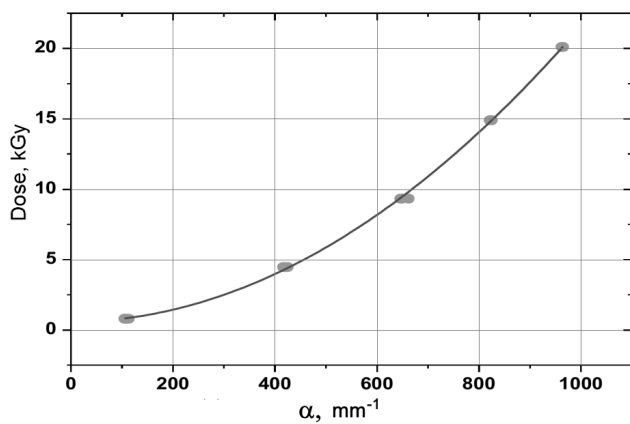


Рис. 14. Виміряне поглинання скла залежно від дози в спектральному діапазоні $520\text{--}560 \text{ нм}$ [28, Fig. 5]

Fig. 14. Measured dose-dependent glass absorption in the spectral range $520\text{--}560 \text{ nm}$ [28, Fig. 5]

IV. ДОЗИМЕТРИЧНІ ТА ПРОСТОРОВІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛЯ ОПРОМІНЕННЯ М-30

Розроблений комплект апаратури та програмне забезпечення дозволяють одночасно фіксувати миттєві значення струму на площині опромінення за допомогою ЦФ, розв'язує задачу визначення поглинутої дози в зразку.

Поля опромінювання мікротрона М-30 створювали трьома різними способами: власне, потоками прискорених електронів вузла виводу мікротрона М-30; із використанням циліндричного формувача пучка електронів (ФПЕ), що концентрує електрони, розсіювані в повітрі; із використанням ФПЕ, на вході якого поміщаються тонкі фольги із Та, товщинами 0.025 ; 0.05 ; 0.1 та 1 мм (0.0114 ; 0.0227 ; 0.0454 та 0.4540 г/см^2). Взаємодія прискорених електронів із такими фольгами призводить як до генерації гальмівного γ -випромінювання, так і до покращення однорідності полів електронного опромінювання. Параметри радіаційних полів досліджували вздовж метрологічної лави, орієнтованої вздовж пучка електронів, виміри проводили для віддалей $0\text{--}400 \text{ см}$ від вузла виводу пучка електронів М-30. Дозиметричні характеристики встановлювали декількома способами: із використанням клінічного медичного дозиметра ROBOTRON та за допомогою циліндра Фарадея (ЦФ), спеціально розробленого для діагностики пучків електронів з енергією до 30 MeV . На рис. 15 наведено дані про потужність дози радіаційних гамма-та електронних полів випромінювання мікротрона М-30 для різних значень струму та відстаней від вузла виводу, одержані з використанням дозиметра ROBOTRON. Дані, наведені на рис. 15,а, отримано за допомогою камери 70108 без ковпачка, на рис. 15,б) — камерою 70110 без ковпачка), які застосовують для контролю, відповідно, полів γ та електронного випромінювання.

Використання ЦФ для встановлення дозиметричних характеристик потребує даних про ступінь однорідності полів опромінювання М-30. Це пояснюється тим, що ЦФ є інтегровальним пристроєм і дані про щільність потоку електронів будуть справедливими лише для площі його реєструвального елемента, яким є його вхідний отвір. Поширення цих даних на площу опромінення, що вивчається, залежатиме від ступеня просторової однорідності радіаційного поля.

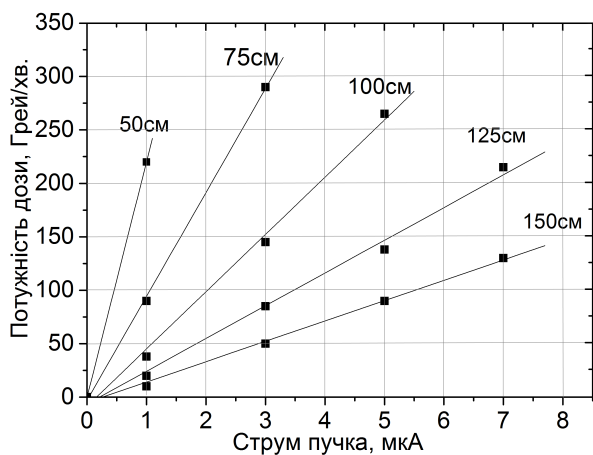
У цій роботі для контролю однорідності радіаційного поля був використаний метод реєструвальних середовищ на основі скляних пластин, ступінь однорідності радіаційного поля встановлювали за зміною їхніх оптичних характеристик, зокрема ступеня потемніння.

На рисунку 16 зображено результати досліджень лінійності ступеня потемніння скла від дози радіації на віддалі 65 см від вузла виводу. Скляні детектори встановлювали по центру ЦФ, ступінь потемніння фіксували за найбільш затемненою ділянкою детектора. Як видно, відбувається насичення ступеня потемніння скла за доз радіації $6.0 \cdot 10^{14} \text{ ел/см}^2$, вище від яких їх використання втрачає зміст. Для менших значень із рис.16 можна встановити значення коефіцієнта кореляції Пірсона або ступеня лінійної залежності між потемнінням скла та дозою у 86% в інтервалі $[0\text{--}5.5 \cdot 10^{14}] \text{ ел/см}^2$ або 93% в інтервалі $[0\text{--}2.5 \cdot 10^{14}]$.

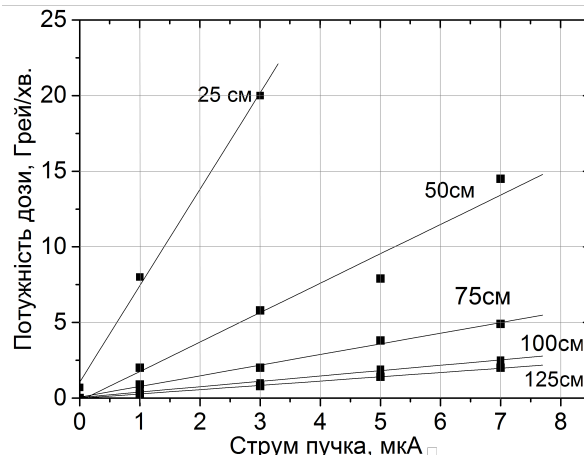
Потрібно враховувати, що такі виміри будуть коректними лише для ділянки лінійності потемніння скла від поглинутої дози, що потребує спеціальної орга-

нізації радіаційного експерименту. Для встановлення залежності ступеня потемніння скла від поглинутої

дозы необхідно є одночасна фіксація потоків електронів, що виводяться з вузла виводу М-30 та ЦФ на площі опромінення.



((a))



((b))

Рис. 15. Потужність дози мікротрона М-30 для різних значень струму М-30 та віддалей до мішені по осі пучка: (а) гальмівне γ -випромінювання, $E_{\gamma\max} = 6$ MeV; (b) електрони, $E = 6$ MeV

Fig. 15. Dose power of the M-30 microtron for different values of the M-30 current and distances to the target along the beam axis: (a) bremsstrahlung γ -radiation, $E_{\gamma\max} = 6$ MeV; (b) electrons, $E = 6$ MeV

Для контролю інших параметрів радіаційного поля — однорідності та енергії пучка електронів — розроблено, відповідно, автоматизовані прилади RadScan та RadEnergy [13, 29]. Останній використовує метод визначення енергії за поглинанням пучка електронів у речовині [30]. Застосування комплексу RadScan, що використовує багатоелементну йонізаційну камеру, обмежується лише електронним компонентом радіаційного поля, а чутливість його для реєстрації слабких потоків електронів не висока.

Вимірювали потемніння зразків віконного скла під дією радіації з використанням сканера Epson Perfection 1260 у режимі 8-бітного сірого кольору. Одержані зображення обробляли попередньо розробленою утилітою, що формує двовимірну матрицю, елементи якої містять ступінь почорніння скла, та виводить її у форматі Excel для подальшої обробки й побудови контурного розподілу ступеня почорніння. Метод забезпечує достатню швидкість та достовірність радіаційного контролю в разі встановлення залежності потемніння скла від поглинутої дози.

На рис. 17 наведено результати графічної обробки затемнення пластин листового скла під час опромінення їх флюенсом електронів $1.0 \cdot 10^{13}$ ел/см², що відповідає ділянці лінійності на рис. 16. Енергія пучка електронів на виході із М-30 становила 12.5 MeV. Як бачимо, на відстані 100 см та з використанням ФПЕ радіаційне поле досить однорідне. Ці ж дані наведені на рис. 18 для центру електронного пучка, але лише вздовж горизонтальної (OX) та вертикальної (OY) осей. Видно, що наявність формувача суттєво поліпшує однорідність радіаційного поля. Отже, формувач радіаційного поля на віддалі 100 см від вузла виведення забезпечує опромінення зразків розмірами

12×13 см² із однорідністю радіаційного поля на площині опромінювання 30%, що задовольняє умови радіаційних випробувань більшості об'єктів.

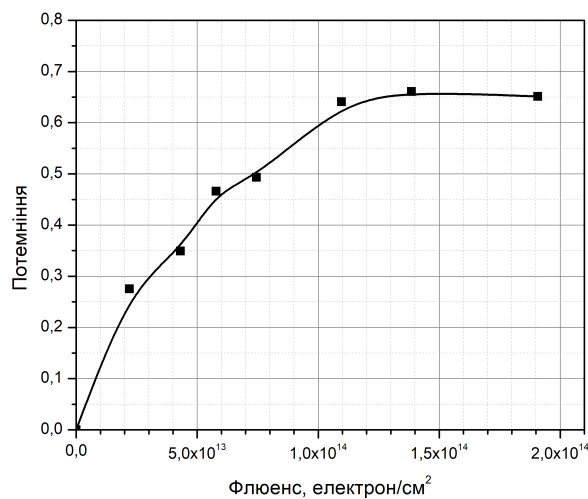


Рис. 16. Дозові залежності потемніння віконного скла, розташованого на віддалі 65 мм від вікна виводу М-30
Fig. 16. Dose dependences of the darkening of window glass located at a distance of 65 mm from the M-30 output window

Із викладеного можна зробити висновок, що використання листового скла є ефективним та експрес-методом діагностики однорідності поля опромінення, а поєднання даних про дозові залежності потемніння скла з даними дослідження однорідності радіаційних полів важливе для розробки технології дозиметричного супроводу опромінення.

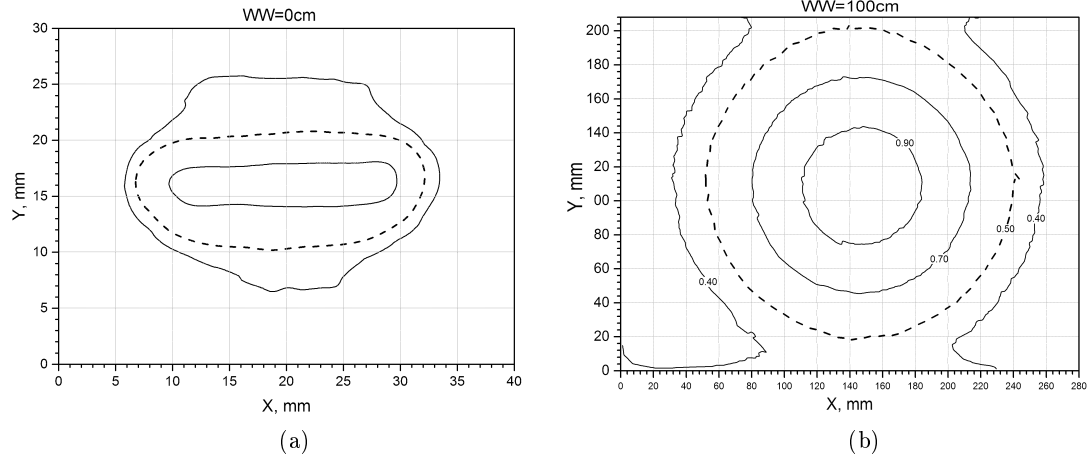


Рис. 17. Профілі затемнення опроміненої ділянки скла в системі $x-y$ координат: (а) — на виході прискорювача; (б) — на відстані 100 см від вузла виводу за наявності ФПЕ

Fig. 17. Darkening profiles of the irradiated part of the glass in the $x-y$ coordinate system; (a) — at the output of the accelerator; (b) — at a distance of 100 cm from the output node in the presence of an electron beam shaper

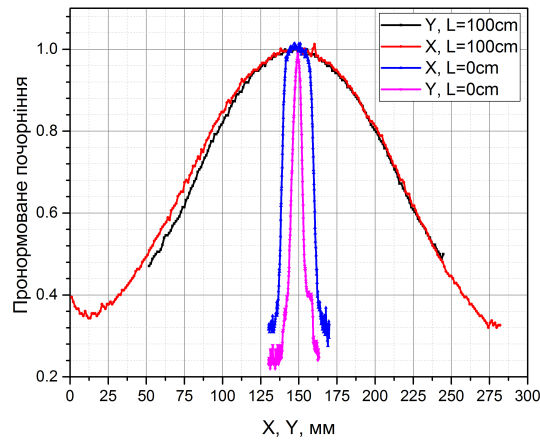


Рис. 18. OY та OX профілі почорніння для центру пластин та різних віддалей між вузлом виводу та ЦФ
Fig. 18. OY and OX darkening profiles for the center of the plates and different distances between the output node and the FC

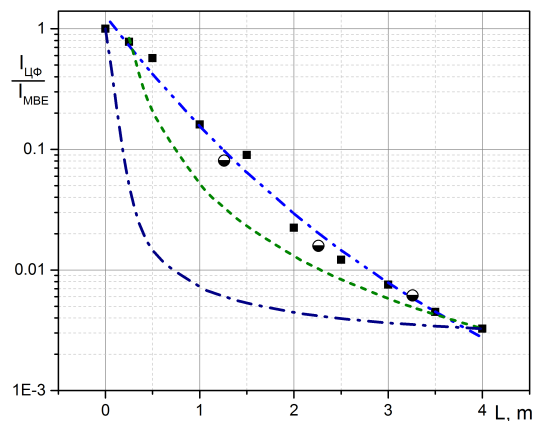


Рис. 19. Залежність відношення струмів на ЦФ та МВЕ від відстані до вузла виводу: (■●) — експериментальні виміри струмів; (····) — аналітична апроксимація; (---) тілесний кут пучка із розходженням по OX та OY $1.5 \cdot 10^{-2}$ рад $1.5 \cdot 10^{-3}$ рад; (- - -) тілесний кут циліндра Фарадея ($S = 19.625 \text{ cm}^2$)

Fig. 19. Dependence of the ratio between the FC and SEM currents on the distance to the output node: (■●) — experimental measurements of currents; (····) — analytical approximation; (---) body angle of the beam with a difference of OX and OY $1.5 \cdot 10^{-2}$ rad $1.5 \cdot 10^{-3}$ rad; (- - -) body angle of Faraday cylinder ($S = 19.625 \text{ cm}^2$)

Можливості контролю однорідності полів опромінення дозволяють дослідити їхні дозиметричні характеристики з використанням ЦФ уздовж метрологічної лави М-30 для різних способів формування пучка електронів. Ізотропне випромінювання з точкового джерела розповсюджується у вакуумі відповідно до закону обернених квадратів. Для прискорювачів вихідний пучок не є ізотропним, на його розподіл впливають як ефекти фокусування, так і розсіяння на елементах вихідного вузла, тому його розподіл із віддаленням від вихідного вузла описується теж монотонно спадною, але складнішою функціональною залежністю. На рис. 19 наведено виміряні дані спадання відношення струмів I_{CF}/I_{MWE} на площі опромінення для різних положень ЦФ на метрологічній лаві. Такі дані потрібні під час планування радіаційних експериментів для об'єктів різного габариту, щоб забезпечити однакові умови опромінення всіх їхніх ділянок.

Потрібно зауважити, що дозиметричні характеристики, отримані за допомогою ЦФ, дають занижені показники щільностей радіації, оскільки не враховують наявності гальмівного випромінювання та фотонейтронів. Отримані криві ілюструють зменшення цього параметра з віддаленням, зумовлене як ослабленням радіаційного поля внаслідок розсіяння пучка електронів у повітрі, так і деформацією його енергетичного спектра [31], що опосередковано впливає на ефективність його розсіювання.

V. ВИСНОВКИ

Наведені дані важливі для розробки атестаційних методик контролю умов опромінення в умовах імпульсного електронного випромінювання високої потужності мікротрона М-30 і дають змогу поліпшити дозиметрію радіаційного експерименту. Показано, що розв'язання цієї задачі потребує комплексних досліджень характеру поширення пучка електронів і топології розподілу інтенсивності випромінювання на площині опромінювання. Отримані результати дозволили встановити аналітичні залежності характеристик радіаційних полів уздовж метрологічної лави М-30, дослідити можливості регулювати ступінь його гомогенності на площі опромінювання. Останнє суттєве для прикладного застосування, оскільки визначає габарити об'єкта опромінення. Розроблена система візуалізації просторового розподілу дозволяє реєструвати не лише електронне, але може бути придатна для фіксації конвертованих на М-30 гальмівного, нейтронного чи змішаного типів випромінювання. І, нарешті, розроблені методи та апаратурні засоби для контролю умов опромінення на мікротроні М-30 можуть бути поширені для використання на інших дослідницьких та медичних прискорювачах, бути основою для створення методичних основ метрологічної атестації їхніх полів опромінювання.

-
- [1] M. R. Cleland, in *Industrial Applications of Electron Accelerators* (CERN Accelerator School, Zeegse, Netherlands, 2005), p. 383; <https://doi.org/10.5170/CERN-2006-012>.
- [2] ISO 11137-3:2006. Sterilization of health care products – Radiation – Part 3: Guidance on dosimetric aspects; <https://www.iso.org/standard/33955.html>.
- [3] N. P. Dikiy *et al.*, *Probl. At. Sci. Technol.* **37**, 26 (2001); https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2001_1/article_2001_1_26.pdf.
- [4] V. Maslyuk *et al.*, in *Space Research in Ukraine. 2016–2018*, edited by O. Fedorov (Akademperiodyka, Kyiv, 2018), p. 130; https://cosparhq.cnes.fr/assets/uploads/2020/09/Ukraine_2016-2018.pdf.
- [5] Ю. А. Похил *та ін.*, *Косм. наука технол.* **15**(6), 73 (2009); <https://www.mao.kiev.ua/biblio/jscans/knit/2009-15/knit-2009-15-6-09.pdf>.
- [6] Л. С. Новиков, *Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов* (Университетская книга, Москва, 2010).
- [7] А. И. Акишин, *Методы радиационных испытаний космических материалов* (Изд-во Моск. ун-та, Москва, 2005).
- [8] С. П. Капица, В. Н. Мелехин, *Микротрон* (Наука, Москва, 1969).
- [9] Ю. М. Ципенюк, *Фундаментальные и прикладные исследования на микротроне* (Физматгиз, Москва, 2009).
- [10] В. Т. Маслюк, *Вісн. НАН України*, №11, 46 (2016).
- [11] Н. И. Романюк *и др.*, в кн. *Тезисы докладов VI конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям* (ННЦ ХФТИ, Харьков, 2008), с. 92.
- [12] В. В. Смалюк, *Диагностика пучков заряженных частиц в ускорителях* (Параллель, Новосибирск, 2009).
- [13] Н. И. Романюк *и др.*, в кн. *Тезисы докладов VI конференции по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям* (ННЦ ХФТИ, Харьков, 2008), с. 101.
- [14] S. Okabe *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **5**, 68 (1966); <https://doi.org/10.1143/jjap.5.68>.
- [15] А. А. Красных *и др.*, *Науч. вед. Белгород. гос. ун-та. Сер. Мат. Физ.* **50**, 323 (2018); <https://core.ac.uk/download/pdf/161830918.pdf>.
- [16] V. N. Boriskin *et al.*, *Probl. At. Sci. Technol.*, No 1, 74 (2004); https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2004_1/article_2004_1_74.pdf.
- [17] Н. И. Айзацкий *и др.*, *Вісн. Харк. ун-ту*, № 657. Сер. фіз. “Ядра, частинки, поля”, вип. 1(26), 77 (2005); [http://nuclear.univer.kharkov.ua/lib/657_1\(26\)_05_p77-80.pdf](http://nuclear.univer.kharkov.ua/lib/657_1(26)_05_p77-80.pdf).
- [18] M. Andreev, S. Kovalsky, S. Kornilov, M. Motorin, N. Rempe, *AIP Adv.* **7**, 015033 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.4974499>.
- [19] P. Mayles, A. Nahum, J. C. Rosenwald, *Handbook of Radiotherapy Physics: Theory and Practice* (Taylor & Francis Group, CRC Press, Boca Raton, FL, 2007).

- [20] I. A. Miloichikova *et al.*, Phys. Part. Nucl. Lett. **13**, 890 (2016); <https://doi.org/10.1134/S1547477116070384>.
- [21] S. G. Stuchebrov *et al.*, AIP Conf. Proc. **1772**, 060016 (2016); <https://doi.org/10.1063/1.4964596>.
- [22] S. R. Deans, *The Radon Transform and Some of Its Applications* (Courier Corporation, 2007).
- [23] С. М. Бреховских, Ю. Н. Викторова, Л. М. Ланда, *Радиационные эффекты в стеклах* (Энергоиздат, Москва, 1982).
- [24] F. H. Attix, *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry* (Wiley, 1986); <https://doi.org/10.1002/9783527617135>.
- [25] Yu. M. Aleksandrov, V. F. Grushin, A. N. Zinevich, L. Z. Dzhilavyan, V. A. Oboznyr, Sov. Phys.-JETP **41**, 801 (1975); http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_041_05_0801.pdf.
- [26] L. V. E. Caldas, M. I. Teixeira, Radiat. Prot. Dosim. **101**, 149 (2002); <https://www.ipen.br/biblioteca/2002/08491.pdf>; <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a005957>.
- [27] P. G. Fuochi *et al.*, in *Astroparticle, Particle and Space Physics, Detectors and Medical Physics Applications. Conference proceedings* (2008), p. 70; https://doi.org/10.1142/9789812819093_0012.
- [28] M. Askarbioki, M. B. Zarandi, S. Khakshournia, S. P. Shirmardi, M. Sharifian, J. Instrum. **13**, T12003 (2002); <https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/12/t12003>.
- [29] Н. И. Романюк *и др.*, в кн. *XV конференция по физике высоких энергий и ядерной физике и ускорителям. Тезы докл.* (ННЦ ХФТИ, Харьков, 2017), с. 74.
- [30] F. P. Korshunov, A. P. Lazar, Instrum. Exp. Tech. **48**, 89 (2005); <https://doi.org/10.1007/s10786-005-0016-z>.
- [31] В. Т. Маслюк *та ін.*, у кн. *XXVII щорічна наукова конференція інституту ядерних досліджень НАН України. До 50-річчя ІЯД НАН України* (ІЯД НАН України, Київ, 2020), с. 92.

METHODS OF FORMATION AND CONTROL OF RADIATION FIELDS OF M-30 MICROTRON

M. I. Romanyuk, J. J. Gaynish, O. M. Turhovskiy, M. V. Goshovsky, G. F. Pitchenko, I. G. Megela, O. O. Parlag,
V. T. Maslyuk

*Institute of Electron Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
21, Universytetska St., UA-88017, Uzhhorod,*

e-mails: nanu.iep@gmail.com; myk.romanyuk@iep.org.ua; myk.romanyuk@gmail.com; volodymyr.maslyuk@gmail.com

The paper describes the accelerator “Mikrotron M-30” (1–18 MeV) of the Institute of Electronic Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine and its main characteristics. Also, it briefly reviews articles on the formation of radiation fields and discusses their characteristics for nuclear physics installations. It includes application of various methods of measuring the currents of charged particles, methods of detecting radiation fields using various recording media and changing the spatial distribution using flattening filters. Attention is also paid to an alternative low-cost registration method using commercial window glass.

For the “Mikrotron M-30” accelerator, parameters of the radiation fields were investigated on a metrological bench oriented along the electron beam at distances of 0–400 cm from the M-30 beam output node. Dosimetric characteristics were determined using ionization chambers of the ROBOTRON dosimeter and a Faraday cylinder designed for diagnostics of electron beams with energies up to 30 MeV.

In this work, to control the spatial uniformity of the radiation field, we used a registration method based on glass plates; the degree of uniformity of the radiation field was determined by a change in their optical characteristics, namely, the degree of darkening. For correctness of the obtained distributions, the radiation dose was limited to the region of linearity of glass darkening from the absorbed dose. The use of a radiation shaper ensured irradiation of samples with radiation of a uniform field in the irradiation plane of 30%, which satisfies the conditions of radiation tests for most objects.

Analytical dependencies of the radiation dose on the distance to the output node M-30 were obtained using a Faraday cylinder. The combination of these dose dependencies of glass darkening, the spatial homogeneity of the fields, along with the dose dependence on the distance to the source node, made it possible to develop protocols for dosimetric tracking of the irradiation process for materials and devices for various purposes.

Key words: microtron (1–30 MeV), radiation fields, formation, homogeneity, dose, control.