

УДК 539.128.4.04+539.1.05  
 PACS 29.20.-с  
 DOI 10.24144/2415-8038.2020.47.63-73

Т.В. Ковалінська<sup>1</sup>, І.А. Хомич<sup>1</sup>, В.І. Сахно<sup>1</sup>, Ю.В. Іванов<sup>1</sup>,  
 О.В. Мельниченко<sup>2</sup>, В.В. Шлапацька<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут ядерних досліджень НАН України, 47, проспект Науки, Київ, 03028, Україна

<sup>2</sup>Державне підприємство "РАДМА", 31, проспект Науки, Київ, 03028, Україна

## РАДІАЦІЙНІ ФУНКЦІОНАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОНКИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЇ НА ВИКОРИСТАННЯ В КРИТИЧНОМУ ОБЛАДНАННІ ЯДЕРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Викладена методика використання мегавольтних електронів для досліджень функціональності тонких полімерних плівок з поліціануратів (ПЦ). Актуальність досліджень визначається планами їх використання як функціональної основи трекових технологій виробництва термостійких нанопористих фільтруючих матеріалів підвищеної міцності. Такі плівки створюються для нових технологій полімерних фільтруючих матеріалів за Програмою асоційованої європейської лабораторії LIA, де іонізуючі випромінювання застосовуються в більшості технологічних етапів. Через відмінності у фізико-хімічних властивостях ПЦ від традиційних полімерів для трекових технологій, необхідно докладно вивчити негативні ефекти, що можуть виникати на різних етапах їх виготовлення та експлуатації. Ці ефекти можуть призводити до втрати функціональної придатності полімерів для практичного використання. З цією метою перспективним є розробка радіаційних методів контролю властивостей матеріалу за допомогою мегавольтних електронів. Радіація зарекомендувала себе ефективним інструментом моделювання більшості процесів в досліджуваному матеріалі - старіння, деструкції, полімеризації, пластичності, міцності, термостійкості, і надавати об'єктивну підставу кваліфікувати матеріал на придатність застосовувати під визначені цілі. В даному випадку їх проведення пов'язане з вирішенням низки проблем опромінювання надзвичайно тонких полімерних плівок великими дозами іонізуючої радіації. З цією метою було розроблено методику радіаційного контролю функціональності тонких плівкових полімерних матеріалів з використанням потужних пучків електронів 1-2 MeV. Дане дослідження спрямоване на пошуки можливості і шляхів здійснювати всебічні дослідження характеристик і граничних можливостей нових полімерних плівок на потужній вітчизняній радіаційній установці з резонансним прискорювачем електронів ИЛУ-6, здатного генерувати електронні пучки потужністю 20 кВт. З цією метою розроблено локальні підпучкові засоби трансформації енергії випромінювання в різні види радіації з можливістю одночасно формувати їх енергетичний склад. Обговорюються особливості цих методів та результати їх застосування для досліджень функціональності тонких плівок з ПЦ для практичного використання.

**Ключові слова:** пучки електронів, ядерні мембрани, термостійкі полімери, радіаційна стійкість, функціональні випробування.

### Вступ

Коректність експертних висновків щодо кваліфікації обладнання, критичного для надійної роботи ядерних об'єктів визначається сумою факторів функціональної придатності конструктивних елементів цього обладнання та матеріалів, з яких воно виготовляється.

До найбільш поширених відносяться електротехнічне і електромеханічне обладнання, що експлуатується в гермозонах промислових ядерних реакторів. Воно характерне широким використанням полімерних матеріалів нового покоління. Для більшості матеріалів відсутні об'єктивні дані про кваліфікацію на придатність працювати в радіацій-

них умовах і це усладнює формування вичерпних висновків щодо його надійності і експлуатаційного прогнозу. Аналіз свідчить, що попри принципово просту схему таких досліджень, без спеціалізованої радіаційної техніки та відповідних методик експериментів їх практично неможливо здійснити для ізоляційних та конструкційних елементів з полімерних плівок в електротехнічному обладнанні. До нових полімерних матеріалів діють жорсткі вимоги кваліфікації на застосування в критичних галузях економіки (до атомної енергетики включно). Їх характеристики потребують спеціальних досліджень на придатність для промислового використання. В даній роботі досліджуються можливості здійснення функціональних досліджень полімерних матеріалів на доступній в Україні технічній базі радіаційних технологій [1].

Радіація є ефективним інструментом моделювання більшості процесів в досліджуваному матеріалі - старіння, деструкції, полімеризації, пластичності, міцності [2, 3]. Проведені за допомогою радіації випробування надають об'єктивну підставу кваліфікувати матеріал на придатність застосовувати під визначені цілі. В даному випадку проведення випробувань пов'язане з вирішенням низки проблем опромінювання надзвичайно тонких полімерних плівок великими дозами іонізуючої радіації для контролю можливих радіаційно-хімічних перетворень і структурної деградації.

Останнім часом набувають поширення методи контролю функціональності матеріалів і виробів за допомогою різних видів іонізуючої радіації [4]. Для таких досліджень використовуються інтенсивні потоки іонізуючого випромінювання з широким енергетичним спектром. З цією метою необхідно або створити парк з кількох джерел іонізуючого випромінювання, або знайти можливість використати одне потужне джерело з пристроями трансформації енергії випромінювання в різні види радіації, бажано з можливістю одночасно формувати їх енергетичний склад.

Дане дослідження спрямоване на пошуки оптимальних шляхів використання єдиного потужного джерела мегавольтних

електронів.

## Стан проблеми

Поняття функціональності матеріалу визначає ефективність експлуатації готових полімерних виробів, а також прогнози стабільності матеріалу на усіх етапах його виготовлення та експлуатації. Функціональна придатність полімерів для практичного використання визначається структурою енергетичних зв'язків атомів в органічних сполуках, хімічним складом органіки, фізичними характеристиками (міцністю, термостійкістю, електропровідністю, густиною).

Радіація, як інструмент кваліфікації, приваблює багатокомпонентними процесами поглинання енергії випромінювання в матеріалі, ланцюгами процесів її трансформації в інші види [5] і таким чином впливає практично на усі функціонально значимі параметри полімерів, з переліку тих, що можуть надійно контролюватися. Парк науково-дослідних спеціалізованих приладів і установок для вимірювання функціональних характеристик полімерів досить широкий і дозволяє з високою точністю робити експертні висновки. Але лише за умови, що при функціональних дослідженнях будуть генеруватися необхідні експлуатаційні і зовнішні фактори впливу на матеріал [6]. При виконанні цих умов, можна встановити функціональність матеріалу (кваліфікувати матеріал, виробу, сировину) вимірюванням реакції фізико-хімічних показників матеріалу (його структури, складу, фізичних параметрів) на радіаційні та радіаційно-стимульовані впливи.

Для коректного вивчення динаміки функціональних показників полімерних плівок важливо знайти оптимальні методи передачі енергії радіації в піддослідні зразки. Головною є проблема узгодження товщини плівки з довжиною пробігу електронів в ній до повного гальмування. Самим прямим шляхом вирішення цієї проблеми для плівок 15-30 мкм є зниження енергії електронів до 50-200 кеВ [7]. Хоча і в цьому випадку залучають певні технологічні хитрощі, самим простим з яких є багатократне прохо-

дження плівки через область опромінення. На даний час це основна промислова технологія опромінення рулонних плівкових виробів. При відсутності засобів генерації електронів низької енергії, доводиться проводити дослідження з електронами більш високих енергій і розробляти для цього методи максимально ефективної передачі їх енергії в тонкий матеріал. Більш високі енергії електронів перспективні для обробки товстих плівок або готових фільтрувальних виробів. В даній роботі дослідження були орієнтовані на використання потужної промислової установки ИЛУ-6 з електронами 1-2 МеВ після її відповідної адаптації до таких задач.

При розробці шляхів адаптації установки було враховано, що для деяких з перспективних вітчизняних розробок полімерів (наприклад поліціануратів) є отримання плівок тонше 50 мкм з суворо рівномірною структурою по усій площі, та виготовлення з них рулонних плівкових матеріалів. Для їх виготовлення може бути необхідним залучити радіацію на етапах отримання і стабілізації характеристик плівкових матеріалів, а також при формуванні функціонально закінчених виробів (вузлів).

Через інші фізико-хімічні параметри нових полімерів та методичну різницю між промисловими технологіями і науковими дослідженнями, не вдається скористатися нагромадженим досвідом опромінення рулонних плівкових матеріалів. Наприклад, експериментальні (лабораторні) екземпляри плівок з поліціануратів поступають на дослідження у вигляді досить крихких аркушів невеликого розміру. Технологія опромінення аркушів ПЦ розмірами 150x150 мм і завтовшки 30-50 мкм розроблена в ІЯД НАН України лише для обробки їх легкими іонами з метою напрацювання треків [8]. Але технології їх сенсibiliзації пікохвильовим випромінюванням та електронами поки що не розроблялась і передбачена при організації радіаційних функціональних досліджень полімерних елементів критичного обладнання.

## Методи експериментів

Постановка радіаційних досліджень передбачала розробку методики експериментів, яка включає формування необхідних радіаційних полів та створення підпучкового обладнання для опромінення піддослідних зразків. Завданням і специфікою розробки методики було подолання проблеми слабого поглинання енергії електронів 1-2 МеВ полімерними виробами завтовшки усього кілька десятків мікрон. Мета – формування структури і складу радіаційного поля, оптимального для подолання вказаних проблем.

В основу ідеї формування необхідних радіаційних полів (рис. 1) покладена суперпозиція поля прямих мегавольтних електронів  $W$ , електромагнітного пікохвильового випромінювання ( $\gamma$ -квантів  $h\nu$ ), та низько енергетичних електронів  $W_e$ , як результат конверсії енергії прямого пучка електронів на важкій мішені.

Ідея реалізується спеціальною конструкцією мішенного вузла, де передбачається закріплювати піддослідні зразки плівок в рамках. При опроміненні цього (підпучкового) вузла прямими мегавольтними електронами  $e^-$  в місці закріплення зразків плівки утворюється вказана суперпозиція полів прямих та вторинних електронів і гальмівного випромінювання.

При розробці конструкції використано канонічну модель передачі енергії випромінювання в матеріали. В найпростішому випадку для ефективності процесу опромінювання електронами 1-2 МеВ, після плівок досить встановити товсту гальмівну мішень (підложку). При бомбардуванні мегавольтними електронами в мішені генеруються гамівне випромінювання ( $\gamma$ ) з широким енергетичним спектром в пікохвильовому діапазоні електромагнітних хвиль, вторинні електрони ( $W_e$ ) та інфрачервоне випромінювання (ІЧВ). В залежності від параметрів мішені потужність пучка падаючих електронів між вказаними ефектами розподіляється нерівномірно. При бомбардуванні, наприклад, електронами 1 МеВ мішень з вольфраму [?, 9, 10] у гальмівне випромінювання згідно формули ( $k=W_e z/800$ , тут,

$W_e$  – кінетична енергія електронів MeV,  $z$  – заряд ядра,  $k$  – коефіцієнт перетворення) трансформується не більше 3% енергії пучка, у вторинні електрони близько 10%, у інфрачервоне випромінювання (тепло) близько 87%. Таким же нерівномірним є і розподіл цих випромінювань у просторі. Теплова енергія в основному поширюється у напрям-

ку первинного пучка електронів, вторинні електрони на товстій мішені в основному генеруються проти напрямку руху первинно пучка в діапазоні кутів до  $0-2\pi$  від точки взаємодії електронів з матеріалом. Гальмівне випромінювання від падаючих електронів цього діапазону енергії поширюються в просторі на кути близько до  $4\pi$ .

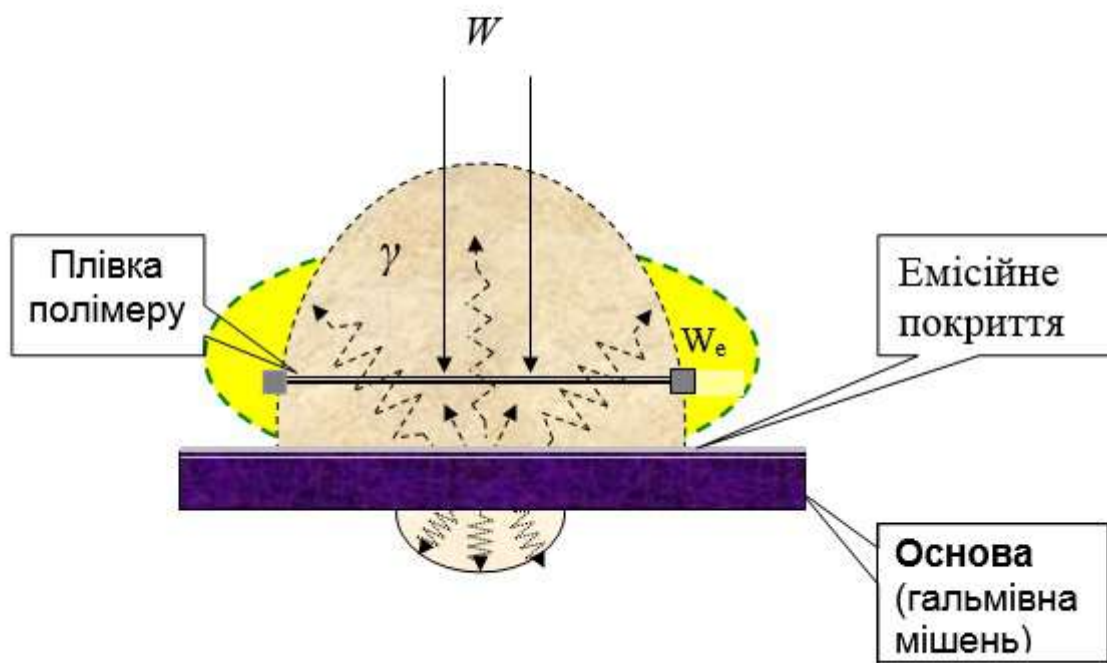


Рис. 1: Схема формування радіаційного поля для опромінення тонких зразків полімерів.

Вказані механізми дозволяють в досить широких межах регулювати різні чинники радіації для докладного вивчення процесів старіння та деструкції досліджуваного матеріалу. З урахування необхідності в майбутньому реалізувати і промисловий технологічний процес, були досліджені перспективи максимально-можливого використання енергії первинного пучка для отримання прийнятних показників виробництва. Технологічним ресурсом для цього є зменшення вкладу гальмівного випромінювання в напрямку руху первинного пучка після мішені-підложки та втрат енергії пучка на її нагрівання. З цих міркувань товщину гальмівної мішені було збільшено щоб спрямувати основний потік тепла (інфрачервоного ви-

промінювання – ІЧВ) в сторону досліджуваної плівки, а також підвищити ефективність емісії вторинних електронів шляхом нанесення на робочу поверхню гальмівної мішені матеріалу з великим коефіцієнтам електронної емісії та ефективним генеруванням зворотно-розсіяних гама-квантів.

Така можливість була досліджена на спеціальній експериментальній установці шляхом бомбардування плоских зразків з різних матеріалів електронним пучком та направленим колімованим потоком гамма-випромінювання. Вимірювання інтенсивності відбитого та зворотно/розсіяного радіаційного поля вимірювались в діапазоні кутів  $45-135^\circ$  до площини зразка. Методика і результати цих досліджень наведено на рис. 2.

УДК 539.128.4.04+539.1.05  
 PACS 29.20.-с  
 DOI 10.24144/2415-8038.2020.47.63-73

Т.В. Ковалінська<sup>1</sup>, І.А. Хомич<sup>1</sup>, В.І. Сахно<sup>1</sup>, Ю.В. Іванов<sup>1</sup>,  
 О.В. Мельниченко<sup>2</sup>, В.В. Шлапацька<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут ядерних досліджень НАН України, 47, проспект Науки, Київ, 03028, Україна

<sup>2</sup>Державне підприємство "РАДМА", 31, проспект Науки, Київ, 03028, Україна

## РАДІАЦІЙНІ ФУНКЦІОНАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТОНКИХ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК ДЛЯ КВАЛІФІКАЦІЇ НА ВИКОРИСТАННЯ В КРИТИЧНОМУ ОБЛАДНАННІ ЯДЕРНИХ ОБ'ЄКТІВ

Викладена методика використання мегавольтних електронів для досліджень функціональності тонких полімерних плівок з поліціануратів (ПЦ). Актуальність досліджень визначається планами їх використання як функціональної основи трекових технологій виробництва термостійких нанопористих фільтруючих матеріалів підвищеної міцності. Такі плівки створюються для нових технологій полімерних фільтруючих матеріалів за Програмою асоційованої європейської лабораторії LIA, де іонізуючі випромінювання застосовуються в більшості технологічних етапів. Через відмінності у фізико-хімічних властивостях ПЦ від традиційних полімерів для трекових технологій, необхідно докладно вивчити негативні ефекти, що можуть виникати на різних етапах їх виготовлення та експлуатації. Ці ефекти можуть призводити до втрати функціональної придатності полімерів для практичного використання. З цією метою перспективним є розробка радіаційних методів контролю властивостей матеріалу за допомогою мегавольтних електронів. Радіація зарекомендувала себе ефективним інструментом моделювання більшості процесів в досліджуваному матеріалі - старіння, деструкції, полімеризації, пластичності, міцності, термостійкості, і надавати об'єктивну підставу кваліфікувати матеріал на придатність застосовувати під визначені цілі. В даному випадку їх проведення пов'язане з вирішенням низки проблем опромінювання надзвичайно тонких полімерних плівок великими дозами іонізуючої радіації. З цією метою було розроблено методику радіаційного контролю функціональності тонких плівкових полімерних матеріалів з використанням потужних пучків електронів 1-2 MeV. Дане дослідження спрямоване на пошуки можливості і шляхів здійснювати всебічні дослідження характеристик і граничних можливостей нових полімерних плівок на потужній вітчизняній радіаційній установці з резонансним прискорювачем електронів ИЛУ-6, здатного генерувати електронні пучки потужністю 20 кВт. З цією метою розроблено локальні підпучкові засоби трансформації енергії випромінювання в різні види радіації з можливістю одночасно формувати їх енергетичний склад. Обговорюються особливості цих методів та результати їх застосування для досліджень функціональності тонких плівок з ПЦ для практичного використання.

**Ключові слова:** пучки електронів, ядерні мембрани, термостійкі полімери, радіаційна стійкість, функціональні випробування.

### Вступ

Коректність експертних висновків щодо кваліфікації обладнання, критичного для надійної роботи ядерних об'єктів визначається сумою факторів функціональної придатності конструктивних елементів цього обладнання та матеріалів, з яких воно виготовляється.

До найбільш поширених відносяться електротехнічне і електромеханічне обладнання, що експлуатується в гермозонах промислових ядерних реакторів. Воно характерне широким використанням полімерних матеріалів нового покоління. Для більшості матеріалів відсутні об'єктивні дані про кваліфікацію на придатність працювати в радіацій-

них умовах і це усладнює формування вичерпних висновків щодо його надійності і експлуатаційного прогнозу. Аналіз свідчить, що попри принципово просту схему таких досліджень, без спеціалізованої радіаційної техніки та відповідних методик експериментів їх практично неможливо здійснити для ізоляційних та конструкційних елементів з полімерних плівок в електротехнічному обладнанні. До нових полімерних матеріалів діють жорсткі вимоги кваліфікації на застосування в критичних галузях економіки (до атомної енергетики включно). Їх характеристики потребують спеціальних досліджень на придатність для промислового використання. В даній роботі досліджуються можливості здійснення функціональних досліджень полімерних матеріалів на доступній в Україні технічній базі радіаційних технологій [1].

Радіація є ефективним інструментом моделювання більшості процесів в досліджуваному матеріалі - старіння, деструкції, полімеризації, пластичності, міцності [2, 3]. Проведені за допомогою радіації випробування надають об'єктивну підставу кваліфікувати матеріал на придатність застосовувати під визначені цілі. В даному випадку проведення випробувань пов'язане з вирішенням низки проблем опромінювання надзвичайно тонких полімерних плівок великими дозами іонізуючої радіації для контролю можливих радіаційно-хімічних перетворень і структурної деградації.

Останнім часом набувають поширення методи контролю функціональності матеріалів і виробів за допомогою різних видів іонізуючої радіації [4]. Для таких досліджень використовуються інтенсивні потоки іонізуючого випромінювання з широким енергетичним спектром. З цією метою необхідно або створити парк з кількох джерел іонізуючого випромінювання, або знайти можливість використати одне потужне джерело з пристроями трансформації енергії випромінювання в різні види радіації, бажано з можливістю одночасно формувати їх енергетичний склад.

Дане дослідження спрямоване на пошуки оптимальних шляхів використання єдиного потужного джерела мегавольтних

електронів.

## Стан проблеми

Поняття функціональності матеріалу визначає ефективність експлуатації готових полімерних виробів, а також прогнози стабільності матеріалу на усіх етапах його виготовлення та експлуатації. Функціональна придатність полімерів для практичного використання визначається структурою енергетичних зв'язків атомів в органічних сполуках, хімічним складом органіки, фізичними характеристиками (міцністю, термостійкістю, електропровідністю, густиною).

Радіація, як інструмент кваліфікації, приваблює багатокомпонентними процесами поглинання енергії випромінювання в матеріалі, ланцюгами процесів її трансформації в інші види [5] і таким чином впливає практично на усі функціонально значимі параметри полімерів, з переліку тих, що можуть надійно контролюватися. Парк науково-дослідних спеціалізованих приладів і установок для вимірювання функціональних характеристик полімерів досить широкий і дозволяє з високою точністю робити експертні висновки. Але лише за умови, що при функціональних дослідженнях будуть генеруватися необхідні експлуатаційні і зовнішні фактори впливу на матеріал [6]. При виконанні цих умов, можна встановити функціональність матеріалу (кваліфікувати матеріал, виробу, сировину) вимірюванням реакції фізико-хімічних показників матеріалу (його структури, складу, фізичних параметрів) на радіаційні та радіаційно-стимульовані впливи.

Для коректного вивчення динаміки функціональних показників полімерних плівок важливо знайти оптимальні методи передачі енергії радіації в піддослідні зразки. Головною є проблема узгодження товщини плівки з довжиною пробігу електронів в ній до повного гальмування. Самим прямим шляхом вирішення цієї проблеми для плівок 15-30 мкм є зниження енергії електронів до 50-200 кеВ [7]. Хоча і в цьому випадку залучають певні технологічні хитрощі, самим простим з яких є багатократне прохо-

дження плівки через область опромінення. На даний час це основна промислова технологія опромінення рулонних плівкових виробів. При відсутності засобів генерації електронів низької енергії, доводиться проводити дослідження з електронами більш високих енергій і розробляти для цього методи максимально ефективної передачі їх енергії в тонкий матеріал. Більш високі енергії електронів перспективні для обробки товстих плівок або готових фільтрувальних виробів. В даній роботі дослідження були орієнтовані на використання потужної промислової установки ИЛУ-6 з електронами 1-2 МеВ після її відповідної адаптації до таких задач.

При розробці шляхів адаптації установки було враховано, що для деяких з перспективних вітчизняних розробок полімерів (наприклад поліціануратів) є отримання плівок тонше 50 мкм з суворо рівномірною структурою по усій площі, та виготовлення з них рулонних плівкових матеріалів. Для їх виготовлення може бути необхідним залучити радіацію на етапах отримання і стабілізації характеристик плівкових матеріалів, а також при формуванні функціонально закінчених виробів (вузлів).

Через інші фізико-хімічні параметри нових полімерів та методичну різницю між промисловими технологіями і науковими дослідженнями, не вдається скористатися нагромадженим досвідом опромінення рулонних плівкових матеріалів. Наприклад, експериментальні (лабораторні) екземпляри плівок з поліціануратів поступають на дослідження у вигляді досить крихких аркушів невеликого розміру. Технологія опромінення аркушів ПЦ розмірами 150x150 мм і завтовшки 30-50 мкм розроблена в ІЯД НАН України лише для обробки їх легкими іонами з метою напрацювання треків [8]. Але технології їх сенсibiliзації пікохвильовим випромінюванням та електронами поки що не розроблялась і передбачена при організації радіаційних функціональних досліджень полімерних елементів критичного обладнання.

## Методи експериментів

Постановка радіаційних досліджень передбачала розробку методики експериментів, яка включає формування необхідних радіаційних полів та створення підпучкового обладнання для опромінення піддослідних зразків. Завданням і специфікою розробки методики було подолання проблеми слабого поглинання енергії електронів 1-2 МеВ полімерними виробами завтовшки усього кілька десятків мікрон. Мета – формування структури і складу радіаційного поля, оптимального для подолання вказаних проблем.

В основу ідеї формування необхідних радіаційних полів (рис. 1) покладена суперпозиція поля прямих мегавольтних електронів  $W$ , електромагнітного пікохвильового випромінювання ( $\gamma$ -квантів  $h\nu$ ), та низько енергетичних електронів  $W_e$ , як результат конверсії енергії прямого пучка електронів на важкій мішені.

Ідея реалізується спеціальною конструкцією мішенного вузла, де передбачається закріплювати піддослідні зразки плівок в рамках. При опроміненні цього (підпучкового) вузла прямими мегавольтними електронами  $e^-$  в місці закріплення зразків плівки утворюється вказана суперпозиція полів прямих та вторинних електронів і гальмівного випромінювання.

При розробці конструкції використано канонічну модель передачі енергії випромінювання в матеріали. В найпростішому випадку для ефективності процесу опромінювання електронами 1-2 МеВ, після плівок досить встановити товсту гальмівну мішень (підложку). При бомбардуванні мегавольтними електронами в мішені генеруються гамівне випромінювання ( $\gamma$ ) з широким енергетичним спектром в пікохвильовому діапазоні електромагнітних хвиль, вторинні електрони ( $W_e$ ) та інфрачервоне випромінювання (ІЧВ). В залежності від параметрів мішені потужність пучка падаючих електронів між вказаними ефектами розподіляється нерівномірно. При бомбардуванні, наприклад, електронами 1 МеВ мішень з вольфраму [?, 9, 10] у гальмівне випромінювання згідно формули ( $k=W_e z/800$ , тут,

$W_e$  – кінетична енергія електронів MeV,  $z$  – заряд ядра,  $k$  – коефіцієнт перетворення) трансформується не більше 3% енергії пучка, у вторинні електрони близько 10%, у інфрачервоне випромінювання (тепло) близько 87%. Таким же нерівномірним є і розподіл цих випромінювань у просторі. Теплова енергія в основному поширюється у напрямку

первинного пучка електронів, вторинні електрони на товстій мішені в основному генеруються проти напрямку руху первинно пучка в діапазоні кутів до  $0-2\pi$  від точки взаємодії електронів з матеріалом. Гальмівне випромінювання від падаючих електронів цього діапазону енергії поширюються в просторі на кути близько до  $4\pi$ .

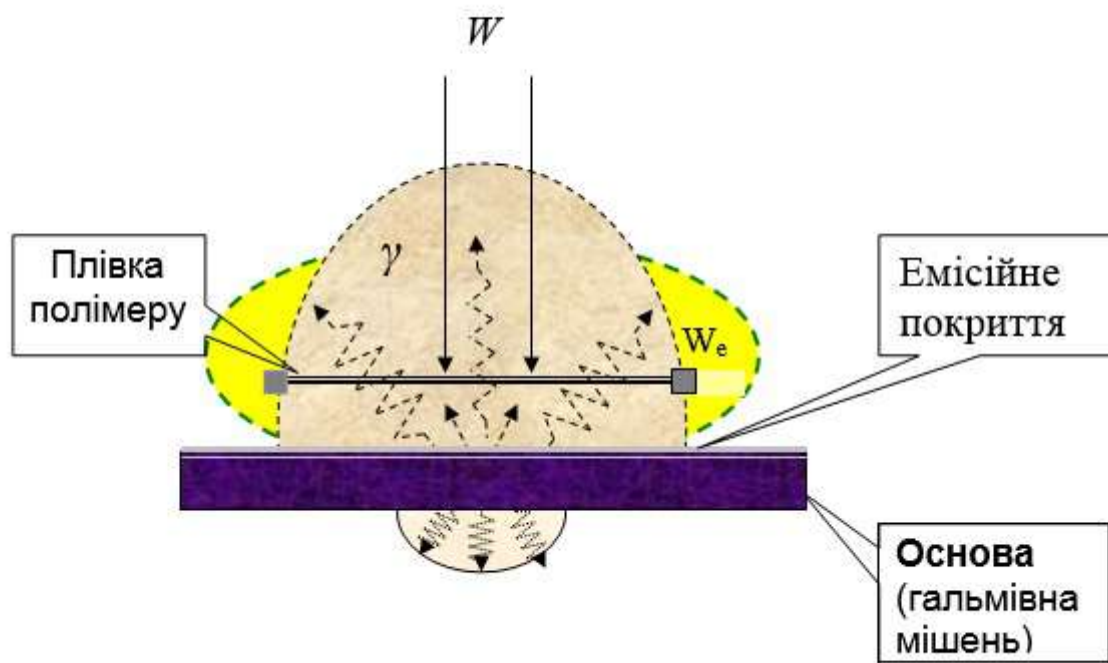


Рис. 1: Схема формування радіаційного поля для опромінення тонких зразків полімерів.

Вказані механізми дозволяють в досить широких межах регулювати різні чинники радіації для докладного вивчення процесів старіння та деструкції досліджуваного матеріалу. З урахування необхідності в майбутньому реалізувати і промисловий технологічний процес, були досліджені перспективи максимально-можливого використання енергії первинного пучка для отримання прийнятних показників виробництва. Технологічним ресурсом для цього є зменшення вкладу гальмівного випромінювання в напрямку руху первинного пучка після мішені-підложки та втрат енергії пучка на її нагрівання. З цих міркувань товщину гальмівної мішені було збільшено щоб спрямувати основний потік тепла (інфрачервоного ви-

промінювання – ІЧВ) в сторону досліджуваної плівки, а також підвищити ефективність емісії вторинних електронів шляхом нанесення на робочу поверхню гальмівної мішені матеріалу з великим коефіцієнтам електронної емісії та ефективним генеруванням зворотно-розсіяних гама-квантів.

Така можливість була досліджена на спеціальній експериментальній установці шляхом бомбардування плоских зразків з різних матеріалів електронним пучком та направленим колімованим потоком гамма-випромінювання. Вимірювання інтенсивності відбитого та зворотно/розсіяного радіаційного поля вимірювались в діапазоні кутів  $45-135^\circ$  до площини зразка. Методика і результати цих досліджень наведено на рис. 2.



Були досліджені особливості електронної емісії та розсіяння гальмівного випромінювання на різних матеріалах. Досліджувалась емісійна здатність матеріалів, поширених в радіаційній техніці – вода і орга-

нічні матеріали ( 1,0–1,3 г/см<sup>3</sup>), мармуру (1,8 г/см<sup>3</sup>), бетону (2,2 г/см<sup>3</sup>), залізі, нікелю (7-8,9 г/см<sup>3</sup>), свинцю (11 г/см<sup>3</sup>) та інших конструкційних матеріалів.

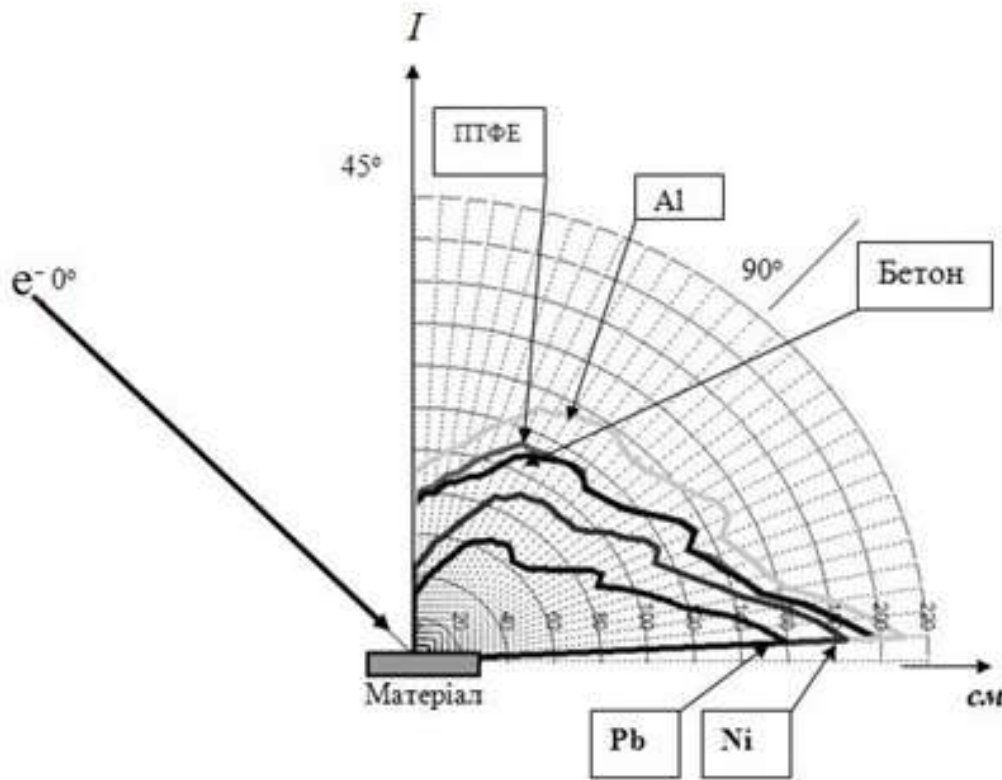


Рис. 2: Дослідження емісійної і відбиваючої здатності різних матеріалів.

В здійснених експериментах потоки електронів  $e^-$  спрямовувались під кутом  $45^\circ$  до мішені у вигляді пластин з різних матеріалів. В результаті виникало гальмівне випромінювання з широким енергетичним спектром та потоки вторинних електронів, інтенсивність яких вимірювали скануванням простору в діапазоні азимутів  $45^\circ$  до  $135^\circ$ . Були отримані сімейства функцій розподілу їх інтенсивності для різних матеріалів і встановлено, що найбільшим емісійними властивостями характеризуються мішені з алюмінію та органічних матеріалів.

Як і очікувалось, енергія вторинного випромінювання виявилась слабо залежною від енергії первинного випромінювання. Енергії вторинного зворотно-розсіяного гама-випромінювання, кути виходу яких зна-

ходяться в межах від  $0$  до  $\pi$ , а також комптонівські електрони, кут вильоту яких не перевищує  $\pi/2$ , в основному знаходяться в інтервалі  $0,17-0,25$  MeV. З графіків розподілу інтенсивності випромінювання на рис. 2 видно, що при опроміненні електронами з енергією  $1$  MeV і вище, максимум інтенсивності вторинних (розсіяних і відбитих) випромінювань припадає на кути, близькі до  $90^\circ$ . Отримані дані з похибкою близько  $20\%$  для кутів відбивання  $0-85^\circ$  співпадають з даними традиційних розрахунків [12, 13]. Результати експериментів було використано в конструкціях обладнання для закріплення і опромінення досліджуваних плівок, за допомогою яких більш ефективно використовується енергія первинних електронів для формування радіаційного поля в місці розташу-

Були досліджені особливості електронної емісії та розсіяння гальмівного випромінювання на різних матеріалах. Досліджувалась емісійна здатність матеріалів, поширених в радіаційній техніці – вода і орга-

нічні матеріали ( 1,0–1,3 г/см<sup>3</sup>), мармуру (1,8 г/см<sup>3</sup>), бетону (2,2 г/см<sup>3</sup>), залізі, нікелю (7-8,9 г/см<sup>3</sup>), свинцю (11 г/см<sup>3</sup>) та інших конструкційних матеріалів.

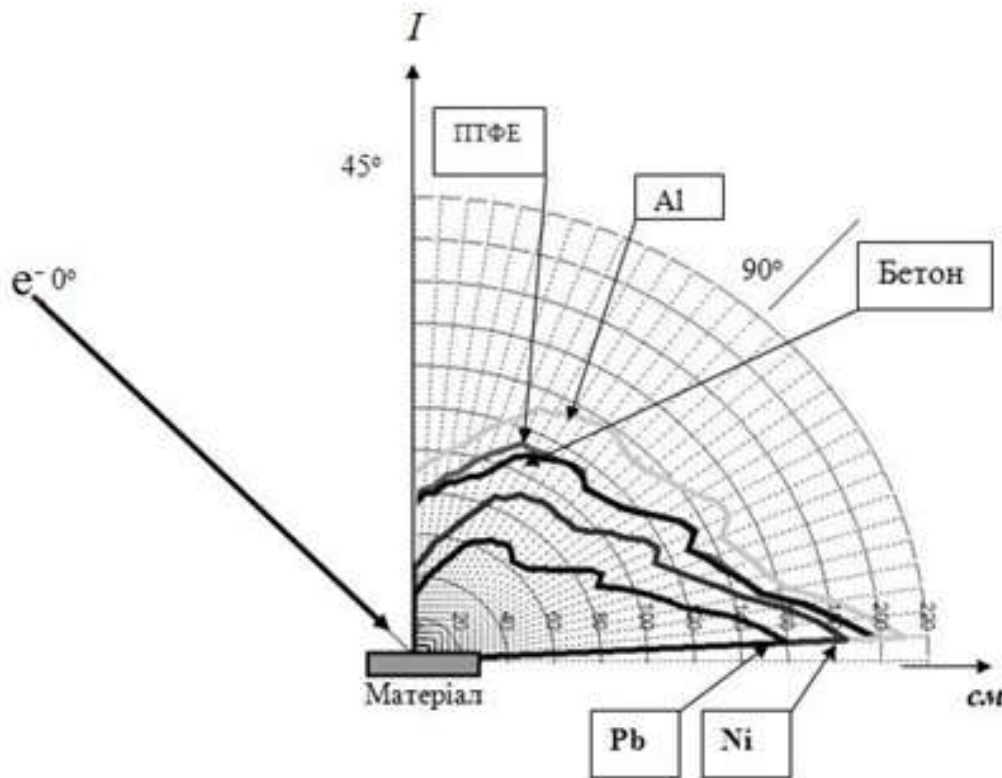


Рис. 2: Дослідження емісійної і відбиваючої здатності різних матеріалів.

В здійснених експериментах потоки електронів  $e^-$  спрямовувались під кутом  $45^\circ$  до мішені у вигляді пластин з різних матеріалів. В результаті виникало гальмівне випромінювання з широким енергетичним спектром та потоки вторинних електронів, інтенсивність яких вимірювали скануванням простору в діапазоні азимутів  $45^\circ$  до  $135^\circ$ . Були отримані сімейства функцій розподілу їх інтенсивності для різних матеріалів і встановлено, що найбільшим емісійними властивостями характеризуються мішені з алюмінію та органічних матеріалів.

Як і очікувалось, енергія вторинного випромінювання виявилась слабо залежною від енергії первинного випромінювання. Енергії вторинного зворотно-розсіяного гама-випромінювання, кути виходу яких зна-

ходяться в межах від  $0$  до  $\pi$ , а також комптонівські електрони, кут вильоту яких не перевищує  $\pi/2$ , в основному знаходяться в інтервалі  $0,17-0,25$  MeV. З графіків розподілу інтенсивності випромінювання на рис. 2 видно, що при опроміненні електронами з енергією  $1$  MeV і вище, максимум інтенсивності вторинних (розсіяних і відбитих) випромінювань припадає на кути, близькі до  $90^\circ$ . Отримані дані з похибкою близько  $20\%$  для кутів відбивання  $0-85^\circ$  співпадають з даними традиційних розрахунків [12, 13]. Результати експериментів було використано в конструкціях обладнання для закріплення і опромінення досліджуваних плівок, за допомогою яких більш ефективно використовується енергія первинних електронів для формування радіаційного поля в місці розташу-

вання зразків.

## Особливості формування радіаційного поля

При розробці технології опромінення багатокомпонентним радіаційним полем з продуктів взаємодії мегавольтних електронів з важкими мішенями було знайдено шляхи ефективного управління конфігурацією і співвідношенням різних фракцій інтегрального поля в області опромінення зразків, необхідних для кваліфікації тонких полімерних плівок. Це показано на рис. 1.

Зменшено інтенсивність гальмівного випромінювання на її зворотній стороні гальмівної мішені. З цією метою її виготовлено з вольфраму завтовшки 4 мм, суттєво більшої за пробіг електронів в цьому мате-

ріалі і розмірами що більші за розміри плівок зразків. Збільшення інтенсивності поля вторинних електронів забезпечується тонким емісійним шаром алюмінію на робочій поверхні гальмівної мішені-підложки.

Товста вольфрамова підложка забезпечила максимальний коефіцієнт перетворення енергії електронів у гальмівне випромінювання і формування потоку гама-квантів переважно в області розташування досліджуваного матеріалу (оранжева область). Одночасно досить висока теплопровідність підложки при її розмірах забезпечила ефективність конвективного охолодження і запобігав додатковому температурному впливу на досліджуваний матеріал. Останній параметр є визначальним для безпечного опромінення плівок з метою сенсibilізації пучками електронів дозами до 200 кГр.

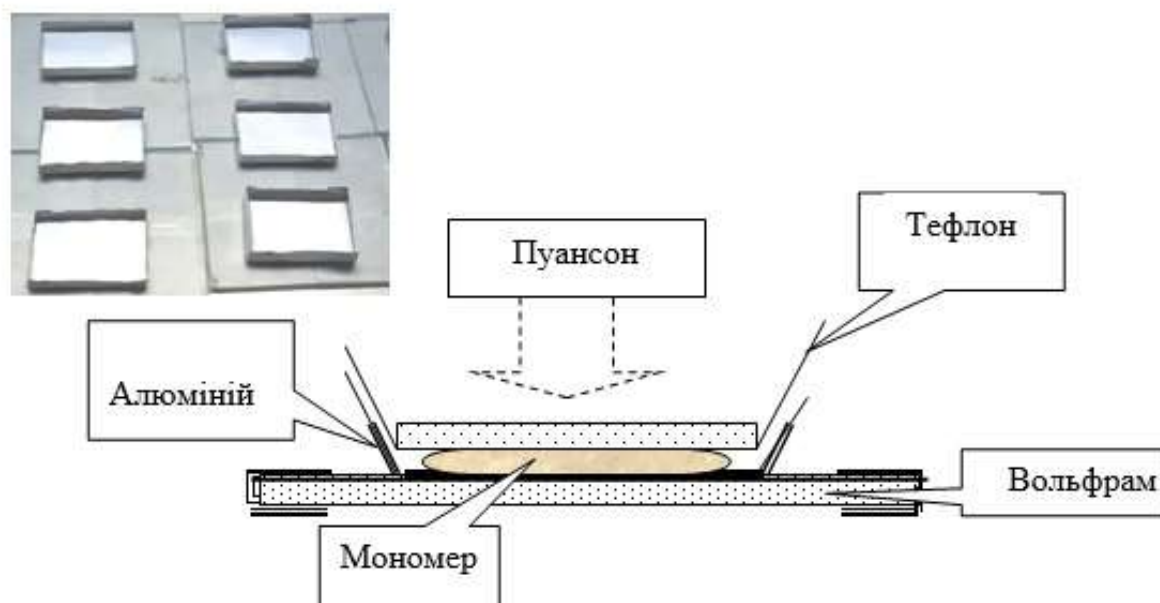


Рис. 3: Схема приготування тонких рідких зразків мономерів.

Були проведені попередні експерименти опромінення плівки типу ПВХ, ПТФЕ та ін. широко поширені плівкові матеріали, які підтвердили можливість пошкодження матеріалу при прямому опроміненні мегавольтними електронами. В експериментах на пучках електронів енергією 4 МеВ щільністю до 0,4 А в імпульсі, незважаючи на теоретично малу втрату енергії електронів при проходженні через плівки завтовшки всього 10-25 мкм, матеріал практично випаровувався. Очевидно, під дією електронів відбувалось інтенсивна радіаційно-хімічна, а можливо, і термічна деструкція полімеру і втрату ним своєї функціональності. Попередні розрахунки можливих наслідків опроміню-

вання зразків. Збільшення інтенсивності поля вторинних електронів забезпечується тонким емісійним шаром алюмінію на робочій поверхні гальмівної мішені-підложки. Товста вольфрамова підложка забезпечила максимальний коефіцієнт перетворення енергії електронів у гальмівне випромінювання і формування потоку гама-квантів переважно в області розташування досліджуваного матеріалу (оранжева область). Одночасно досить висока теплопровідність підложки при її розмірах забезпечила ефективність конвективного охолодження і запобігав додатковому температурному впливу на досліджуваний матеріал. Останній параметр є визначальним для безпечного опромінення плівок з метою сенсibilізації пучками електронів дозами до 200 кГр.

вання мегавольтними електронами показали, що при середньому струмові 0,3-0,4 А в імпульсі за час набору поглинутої дози 200 кГр температура може підвищитися на 50-60 °С. Експериментально це підтвердили моделювання на водному фантомі.

Вказана методика досліджень реалізована і для тонких рідких зразків, наприклад мономерів. В конструкції мішенного вузла, який показано на рис. 3, передбачено усі раніше вказані елементи формування радіаційного поля з урахуванням особливостей рідких зразків. Порядок виготовлення рідких зразків зрозумілий з рис. 3.

Головним елементом під пучкового обладнання для опромінення рідких зразків є гальмівна мішень (вольфрам), на якій закріплюється емісійний шар (алюміній). Досліджуваний мономер наливається в кювету (також з алюмінієвої фольги) вистелену ізолюючим шаром тефлонової плівки і через таку ж тефлонову плівку розтискається пуансоном до потрібної товщини. В результаті після видалення пуансона, тонкий шар рідини залишається затиснутим між тефлоновими прокладками і допускає подальші маніпуляції з ними при опроміненнях чи дослідженнях. На фото рис. 3 - кювети рідких зразків та гальмівні мішені-підложки.

Тверді зразки з тонких полімерних плівок виготовляли з використання стандартних фото рамок для спрощення їх зміни.

## Висновки

Вирішена задача оптимізації технології радіаційних функціональних досліджень та кваліфікації полімерів, яка забезпечує максимальну трансформацію енергії потужних пучків електронів 1-2 МеВ (20 кВт) в досліджуваний процес. В області досліджуваних тонких зразків полімерів сформовано радіаційне поле, як суперпозиція прямого електронного пучка, гальмівного випромінювання та потоку низькоенергетичних вторинних електронів.

Розроблено і реалізовано метод підвищення інтенсивності вторинних іонізуючих випромінювань шляхом накладання на робочу поверхню гальмівної мішені шару матеріалу з високим емісійними показниками, вибраного за результатами спеціальних досліджень.

Розроблено і випробувано оригінальну методику радіаційної обробки тонких плівок з полімерних матеріалів мегавольтними електронами. Розроблена методика надала можливість отримати дані про вплив радіації на основні фізичні, структурні та хімічні властивості нових вітчизняних матеріалів, та кваліфікувати їх на придатність для виготовлення термостійких ядерних фільтрів з поліціануратів [14, 15], стійких до дії радіації дозою до 200 кГр.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] В.И. Сахно Радиационно-технологический комплекс ускорителей «Радма» ИФХ НАН Украины : Тез. докл. XV междунар. семинара по линейным ускорителям заряженных частиц, 16–21 сентября, Алушта, Крым / Сахно В.И., Шлапацкая В.В. – Х. : ННЦ ХФТИ – 1997. – С. 18–19.
- [2] Т.В. Ковалінська Електрофізичний імітатор ушкоджуючих факторів ядерної енергії / Ковалінська Т.В., Сахно В.І. // Ядерна фізика та енергетика. – 2019. – №20 (1). – С. 84–89.
- [3] Програма по квалификации оборудования АЭС Украины ГП «НАЭК» «Энергоатом» : ПМ-Д.02.09.841.03.00. – Офиц. изд. – К. : НАЭК, 2000. – 143 с. (Стандарты ГП «НАЭК» «Энергоатом»).
- [4] С.Є. Донець Випробування лопаток газотурбінних двигунів з застосуванням прискорювача сильноточових релятивістських електронів / Донець С.Є., Клепиков В.Ф., Литви-

ненко В.В., Прохоренко Є.М., Лонін Ю.Ф., Пономарьов А.Г., Старцев О.А., Уваров В.Т. // Ядерна фізика та енергетика. – 2020.– №21 (1). – С. 95–100.

- [5] Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов / Абрамян Е.А. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 248 с.
- [6] IEEE 323-2003 Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations [Електроний ресурс]. – Режим доступу: <https://standards.ieee.org/standard/323-2003.html>.
- [7] М.П. Свињин Ускорители электронов для радиационной модификации текстильных материалов : Материалы 4-го Вс.совещ. по применеию ускорителей заряж.частиц в народном хозяйстве / Свињин М.П., Писманник К.Д. – Л. : НИИЭФА – 1982. – Т.1. – С. 16–24.
- [8] А.Є. Борзаковський Удосконалення технології виготовлення трекових мембран / Борзаковський А.Є., Ковалінська Т.В., Сахно В.І., Хомич І.А. // Ядерна фізика та енергетика. – 2018.– №19 (4). – С. 400–405.
- [9] Шиллер З. Электронно-лучевая технология / Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. ; пер. с нем. Цишевского В.П. – М. : Энергия, 1980. – 528 с.
- [10] Амусья М.Я. Тормозное излучение / Амусья М.Я. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 208 с.
- [11] Аккерман А.Ф. Моделирование траекторий заряженных частиц в веществе / Аккерман А.Ф. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 200 с.
- [12] Жучко В.Е. Расчет спектров тормозного излучения под различными углами в диапазоне энергий 1-30 МэВ / В.Е. Жучко, Ю.Б. Ципенюк // Атомная энергия. – 1975. – Т. 39.– Вып. 1. – С. 66–68.
- [13] Абрамян Е.А. Интенсивные электронные пучки. Физика. Техника. Применение / Абрамян Е.А., Альтеркоп Б.А., Кулешов Г.Д. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 233 с.
- [14] О.П. Григор'єва Радіаційна стійкість термостійкого сітчастого поліціанурату модифікованого диметилфталатом : Матеріали Всеукраїнської наукової конференції «Актуальні задачі хімії: дослідження та перспективи» / Григор'єва О.П., Старостенко О.М., Файнлейб О.М., Пилипенко А.М., Сахно В.І., Ковалінська Т.В., Гранде Д. – Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І.Франка – 2020. – С. 194-196.
- [15] Материалы полимерные. Требования к оценке радиационной стойкости : ГОСТ 25645.331-91. – [Дата введения 1992-07-01]. – М.: Издательство стандартов, 1991.– 32 с.

Стаття надійшла до редакції 22.04.2020

Т.В. Ковалинская<sup>1</sup>, И.А. Хомич<sup>1</sup>, В.И. Сахно<sup>1</sup>, Ю.В. Иванов<sup>1</sup>,  
А.В. Мельниченко<sup>2</sup>, В.В. Шлапацкая<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, 03028, Украина

<sup>2</sup>Государственное предприятие "РАДМА", Киев, 03028, Украина

## РАДИАЦИОННЫЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОНКИХ ПОЛИМЕРНЫХ ПЛЕНОК ДЛЯ КВАЛИФИКАЦИИ НА ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В КРИТИЧЕСКОМ ОБОРУДОВАНИИ ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ

Изложена методика использования мегавольтных электронов для исследований функциональности тонких полимерных пленок с полициануратов (ПЦ). Актуальность исследований определяется планами их использования в качестве функциональной основы трековых технологий производства термостойких нанопористых фильтрующих материалов повышенной прочности. Такие пленки создаются для новых технологии полимерных фильтрующих материалов по Программе ассоциированной европейской лаборатории LIA, где ионизирующие излучения применяются в большинстве технологических этапов. Из-за различия у физико химических свойствах ПЦ от традиционных полимеров для трековых технологий, необходимо подробно изучить негативные эффекты, которые могут возникать на разных этапах их изготовления и эксплуатации. Эти эффекты могут приводить к потере функциональной пригодности полимеров для практического использования. С этой целью перспективным является разработка радиационных методов контроля свойств материала с помощью мегавольтных электронов. Радиация зарекомендовала себя эффективным инструментом моделирования большинства процессов в исследуемом материале — старение, деструкции, полимеризации, пластичности, прочности, термостойкости, и предоставляет объективное основание квалифицировать материал на пригодность применять для определенных целей. В данном случае их проведения связано с решением ряда проблем облучения чрезвычайно тонких полимерных пленок большими дозами ионизирующей радиации. С этой целью была разработана методика радиационного контроля функциональности тонких пленочных полимерных материалов с использованием мощных пучков электронов 1-2 МэВ. Данное исследование направлено на поиски возможности и путей осуществлять всесторонние исследования характеристик и предельных возможностей новых полимерных пленок на мощной отечественной радиационной установке с резонансным ускорителем электронов ИЛУ-6, способного генерировать электронные пучки мощностью 20 кВт. С этой целью разработаны локальные подпучковые средства трансформации энергии излучения в различные виды радиации с возможностью одновременно формировать их энергетический состав. Обсуждаются особенности этих методов и результаты их применения для исследований функциональности тонких пленок с ПЦ для практического использования.

**Ключевые слова:** пучки электронов, ядерные мембраны, термостойкие полимеры, радиационная стойкость, функциональные испытания.

T.V. Kovalinska<sup>1</sup>, I.A. Khomych<sup>1</sup>, V.I. Sakhno<sup>1</sup>, Yu.V. Ivanov<sup>1</sup>,  
A.V. Melnichenko<sup>2</sup>, V.V. Shlapatskaya<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 03028, Ukraine

<sup>2</sup>State-Owned Enterprise "RADMA", Kiev, 03028, Ukraine

## RADIATION FUNCTIONAL STUDIES OF THIN POLYMER FILMS FOR THE QUALIFICATION ON USAGE IN CRITICAL EQUIPMENT OF NUCLEAR OBJECTS

**Purpose.** The methodology of using megavolt electrons to research the functionality of thin polymer films with polycyanurates (PCs) is described. The relevance of research is determined by the plans for their usage as a functional basis for track technologies of the production of heat-resistant nanoporous filter materials of increased strength. Such films are created for the new technologies of polymer filtering materials under the Program of the associated European laboratory LIA, where ionizing radiation is used at most technological stages. Due to the difference between physicochemical properties of PCs and traditional polymers for track technologies, it is necessary to study in detail the negative effects that can occur at different stages of their production and operation. These effects can lead to the loss of functional suitability of polymers for their practical usage.

**Methods.** For this purpose, the development of radiation methods for controlling the properties of the material using megavolt electrons is promising. Radiation has shown itself as an effective tool for modeling most of the processes in the researched material, like aging, degradation, polymerization, strength, heat resistance, and provides objective basis to qualify the material for the suitability to be used for certain goals. In this case, their implementation is associated with solving a number of problems of irradiation of extremely thin polymer films with large doses of ionizing radiation. For this purpose, the methodology of radiation control of the functionality of thin film polymeric materials using powerful electron beams of 1-2 MeV was developed.

**Results.** This research is aimed at searching for the opportunities and ways to carry out comprehensive surveys of the characteristics and ultimate capabilities of new polymer films at the powerful domestic radiation installation with the resonant electron accelerator ILU-6, capable of generating electron beams with a power of 20 kW. For this purpose, local under-beam means of transforming radiation energy into various types of radiation with the possibility to form their energetic composition simultaneously are developed.

**Conclusions.** The specificities of these methods and the results of their application for researching the functionality of thin films with CC for practical usage are discussed.

**Keywords:** electron beams, nuclear membranes, heat-resistant polymers, radiation resistance, functional tests.

### REFERENCES

- [1] Sakhno, V.I., Shlapatskaya, V.V. (1997), Radiation-technological complex of accelerators "Radma" IFC NAS of Ukraine [Radiatsionno-tehnologicheskiiy kompleks uskoriteley «Radma» IFKH NAN Ukrainy], NPC KhPTI, Kharkiv, pp. 18–19.
- [2] Kovalinska, T.V., Sakhno, V.I. (2019), Electrophysical simulator of nuclear energy striking factors [Elektrofizychnyy imitator poshkodzhuyuchykh faktoriv yadernoyi enerhiyi], [Nuclear Physics and Atomic Energy \[Yaderna fizyka ta enerhetyka\]](#), No. 20 (1), pp. 84–89.
- [3] Program for qualification of NPP equipment of Ukraine SE «NNEGC» «Energoatom» [Programma po kvalifikatsii oborudovaniya AES Ukrainy GP «NAEK» «Energoatom»]: PM-D.02.09.841.03.00. NNEGC, Kiev, 143 p.

- [4] Donets, S.E., Klepikov, V.F., Lytvynenko, V.V., Prokhorenko, E.M., Lonin, Yu.F., Ponomarev, A.G., Startsev, O.A., Uvarov, V.T. (2020), Testing of gas-turbine blades engines using the accelerator of high current relativistic electrons [Vyprobuvannya lopatok hazoturbinykh dvyhuniv z zastosuvannyam pryskoryuvacha syl'nostrumovykh relyatyvists'kykh elektroniv], Nuclear Physics and Atomic Energy [Yaderna fizyka ta enerhetyka], No. 21 (1), pp. 95–100.
- [5] Abramyan, E.A. (1986), Industrial electron accelerators [Promyshlennyye uskoriteli elektronov], Energoatomizdat, Moskva, 248 p.
- [6] IEEE 323-2003 Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations, available at: <https://standards.ieee.org/standard/323-2003.html>.
- [7] Svinin, M.P., Pismannik, K.D. (1982) Electron accelerators for radiation modification of textile materials [Uskoriteli elektronov dlya radiatsionnoy modifikatsii tekstil'nykh materialov], NIIIEFA, Leningrad, pp. 16–24.
- [8] Borzakovskiy, A.E., Kovalinska, T.V., Sakhno, V.I., Khomych, I.A. (2018), Improved technology of track membranes manufacture [Udoskonalennya tekhnolohiyi vyhotovlennya trekovykh membran], Nuclear Physics and Atomic Energy [Yaderna fizyka ta enerhetyka], No. 19 (4), pp. 400–405.
- [9] SHiller, Z., Gaizig, U., Pantser, Z. (1980) Electron beam technology Trans. from Gem. [Elektronno-luchevaya tekhnologiya per. s nem.], Energiia, Moskva, 528 p.
- [10] Amusia, M.Ya. (1990), «Bremsstrahlung» [«Tormoznoye izlucheniye»], Energoatomizdat, Moskva, 208 p.
- [11] Akkerman, A.F. (1991), Modeling the trajectories of charged particles in matter [Modelirovaniye trayektoriy zaryazhennykh chastits v veshchestve], Energoatomizdat, Moskva, 200 p.
- [12] Zhuchko, V.E., Tsypeniuk, Yu.B. (1975), Calculation of the bremsstrahlung spectra at different angles in the energy range 1-30 MeV [Raschet spektrov tormoznogo izlucheniya pod razlichnymi uglami v diapazone energiy 1-30 MeV], Atomic Energy [Atomnaya energiya], No. 39 (1), p. 66–68.
- [13] Abramyan, E.A., Alterkop, B.A., Kuleshov, G.D. (1984), Intense electron beams. Physics. Equipment. Application [Intensivnyye elektronnyye puchki. Fizika. Tekhnika. Primeneniye], Energoatomizdat, Moskva, 233 p.
- [14] Hryhorieva, O.P., Starostenko, O.M., Fainleib, O.M., Pylypenko, A.M., Sakhno, V.I., Kovalinska, T.V., Hrande, D. (2020), Radiation resistance of dimethyl phthalate-modified heat-resistant mesh polycyanurate [Radiatsiyna stykist' termostiykoho sitchastoho politsianuratu modyfikovanoho dymetylfталatom], ZhDU Im. I.Franka, Zhytomyr, pp. 194-196.
- [15] (1991), Polymer materials. Radiation Resistance Assessment Requirements [Materialy polimernyye. Trebovaniya k otsenke radiatsionnoy stoykosti], State standard 25645.331-91. – Standards Publishing, Moskva, 32 p.