



**HAL**  
open science

## ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК ЩІЛЬНИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ПУЧКАМИ

T V Kovalins'ka, V I Sakhno, Yu V Ivanov, V V Shlapatska, O V Mel'nychenko, A.  
M. Fainleib, O P Grygorieva, O M Starostenko, Daniel Grande

### ► To cite this version:

T V Kovalins'ka, V I Sakhno, Yu V Ivanov, V V Shlapatska, O V Mel'nychenko, et al.. ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК ЩІЛЬНИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ПУЧКАМИ. *Polymer journal*, 2020, 42 (4), pp.254 - 261. <10.15407/polymerj.42.04.254>. <hal-03313259>

**HAL Id: hal-03313259**

**<https://hal.science/hal-03313259>**

Submitted on 3 Aug 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



<https://doi.org/10.15407/polymerj.42.04.254>  
УДК: 539.1.043: 547.8

**Т. В. КОВАЛІНСЬКА,**

Інститут ядерних досліджень НАН України, 47, проспект Науки, Київ, 03028, Україна,  
ORCID: 0000-0002-5633-7396

**В. І. САХНО,**

Інститут ядерних досліджень НАН України, 47, проспект Науки, Київ, 03028, Україна  
ORCID: 0000-0003-1032-9793

**Ю. В. ІВАНОВ,**

Інститут ядерних досліджень НАН України, 47, проспект Науки, Київ, 03028, Україна

**В. В. ШЛАПАЦЬКА,**

Державне підприємство “РАДМА”, 31, проспект Науки, Київ, 03028, Україна

**О. В. МЕЛЬНИЧЕНКО,**

Державне підприємство “РАДМА”, 31, проспект Науки, Київ, 03028, Україна

**О. М. ФАЙНЛЕЙБ,**

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, 48, Харківське шосе, Київ, 02160, Україна  
e-mail: fainleib@i.ua  
ORCID: 0000-0001-8658-4219

**О. П. ГРИГОР’ЄВА,**

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, 48, Харківське шосе, Київ, 02160, Україна  
ORCID: 0000-0003-1781-7124

**О. М. СТАРОСТЕНКО,**

Інститут хімії високомолекулярних сполук НАН України, 48, Харківське шосе, Київ, 02160, Україна  
ORCID: 0000-0002-8989-704X

**D. GRANDE,**

Institut de Chimie et des Materiaux Paris-Est, UMR 7182 CNRS – Universite Paris-Est Creteil, Val de Marne, 2 rue  
Henri Dunant, BP 28, 94320, Thiais, France  
e-mail: grande@icmpe.cnrs.fr  
ORCID: 0000-0002-9987-9961

## **ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ПЛІВОК ЩІЛЬНИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ПУЧКАМИ**

*Викладена методика використання мегавольтних електронів для досліджень функціональності тонких полімерних плівок із поліціануратів (ППЦ). Актуальність досліджень визначається перспективами використання плівок як функціональної основи удосконалених трекових технологій нанопористих ядерних фільтрів, де іонізуючі випромінювання застосовуються в більшості технологічних етапів їх виробництва. Контроль функціональності – основний критерій кваліфікації плівок на їх придатність для виробництва ядерних фільтрів. Перспективною є розробка радіаційних методів контролю функціональності фільтрів за допомогою мегавольтних електронів. Радіаційні методики належать до переліку універсальних і здатні забезпечити максимальну інформативність досліджень характеристик матеріалів для кваліфікації їх на придатність щодо практичного застосування. Для контролю функціональних можливостей плівок розроблено методику досліджень і випробувань тонких плівокових полімерних матеріалів з використанням потужних пучків електронів енергією 1–2 МеВ. Обговорені особливості цих методів і результати їх застосування при контролі за функціональністю та для*

Цитування: Ковалінська Т.В., Сахно В.І., Іванов Ю.В., Шлапацька В.В., Мельниченко О.В., Файнлейб О.М., Григор’єва О.П., Старостенко О.М., Grande D. Функціональні випробування полімерних плівок щільними електронними пучками. *Полімерний журнал*. 2020. 42, № 4. С. 254—261. <https://doi.org/10.15407/polymerj.42.04.254>

кваліфікації плівок із сітчастих ПЦ, отриманих шляхом *in situ* поліциклотримеризації диціанового естеру бісфенолу Е (ДЦБЕ), за присутності диметилфталату (ДМФ), складу ПЦ/ДМФ=70/30 % мас., на придатність для виробництва нанопористих трекових мембран.

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

## Вступ

Критерієм оптимального підбору матеріалів є його кваліфікація на придатність застосування у вибраній галузі. Поняття кваліфікації визначальне в критичних галузях сучасного виробництва [1, 2] і свідчить, що обладнання, яке містить цей матеріал, «...протягом усього періоду експлуатації здатне виконувати проектні функції безпеки за умов впливу навколишнього середовища, екстремальних зовнішніх подій та аварій (вібрація, магнітні та електричні поля, значна температура, тиск, радіація, корозійно-активне середовище, вологість), враховуючи деградацію обладнання внаслідок старіння».

Такий підхід коректний і для органічних матеріалів, якщо планується їх промислове застосування. На сьогодні спостерігається зростання обсягів полімерів для виготовлення вузлів критичного обладнання, наприклад, на атомних енергетичних об'єктах. Тому, до традиційних методів контролю властивостей полімерів на хімічному виробництві необхідно додати і новітні методики оцінювання їх надійності та кваліфікувати їх згідно з галузевими вимогами. Особливо високі вимоги пред'являються до функціональності матеріалів, які передбачається використовувати на об'єктах критичної інфраструктури, наприклад, в атомній енергетиці [3, 4].

Поняття функціональність матеріалу визначає ефективність експлуатації готових полімерних виробів, а також прогнози стабільності матеріалу на всіх етапах їх виготовлення. До функціональності матеріалів для обладнання АЕС пред'являються жорсткі вимоги кваліфікації на застосування, які потребують спеціальних функціональних досліджень. Аналіз проблеми дає підставу запропонувати використання радіації як унікального універсального й ефективного інструменту моделювання більшості процесів у тонких плівкових виробках з полімерів – старіння, деструкції, полімеризації, пластичності та міцності [5].

На рис. 1 показано основні механізми трансформації енергії прискорених електронів при взаємодії їх із досліджуванним матеріалом [6]. Співвідношення вказаних процесів визначається параметрами електронів, матеріалами та геометрією опромінення. Проведені за допомогою радіації комплексні випробування надають об'єктивну підставу кваліфікувати матеріал на придатність щодо практичного застосування.

Автори [6] запропонували спосіб формування радіаційного поля за допомогою двох джерел радіації – прямого пучка електронів і гальмівного іонізуючого рентгенівського випромінювання широкого енергетичного спектра менш потужного випромінювання, які ефективніше поглинаються тонкими плівковими виробами. Досягали цього за рахунок металевого конвертора, розташованого за плівкою. В результаті відомих механізмів відбувалася конверсія прямого пучка в потоки гальмівного іонізуючого рентгенівського випромінювання і вторинних електронів. Спільна дія енергії прямого пучка та енергії вторинного випромінювання формувала змішане радіаційне поле (суперпозиції). Розглянуто випадок використання



**Рис. 1.** Спосіб радіаційної обробки тонких полімерних плівок з металевим конвертором

єдиного потужного електрофізичного джерела мегавольтних електронів. Результати цієї розробки дали можливість досягти поставленої мети – максимально ефективно використати енергію прямого пучка для опромінення тонких плівок. Запропонований спосіб і технічний пристрій для його здійснення були випробувані на відомому матеріалі тефлон і на нових плівкових виробках з поліціануратів (ПЦ) для визначення їх функціональної придатності як основи ядерних фільтрів.

## Стан проблеми

Радіація, як інструмент кваліфікації, приваблює дослідників багатокомпонентними процесами трансформації енергії випромінювань у матеріалі, що впливають практично на всі функціонально значимі параметри полімерів, які можна надійно контролювати. Останнім часом набувають поширення методи контролю функціональності матеріалів і виробів за допомогою різних видів іонізуючої радіації та установок [7], що дає оптимістичні прогнози для розробки оптимальних методів оцінювання функціональності і кваліфікації нових полімерних матеріалів.

Функціональна придатність полімерів визначається структурою енергетичних зв'язків атомів, хімічним складом і фізичними характеристиками (міцністю, термостійкістю, електропровідністю чи густиною). Для їх контролю в хімічній галузі використовують різноманітні науково-дослідні спеціалізовані прилади і установки. За їх показаннями можна з високою точністю робити експертні висновки щодо функціональних можливостей полімерів. Але лише за умови, що для функціональних досліджень будуть генеровані необхідні експлуатаційні та зовнішні фактори впливу на матеріал і відтворені умови експлуатації, близькі до реальних. У цій роботі залучено потужну промислову установку ИЛУ-6 з електронами енергією 1–2 МеВ після її відповідної адаптації для таких цілей. Поєднання можливостей потужних потоків електронів і сучасної метрології реальних параметрів полімерів – основа визначення функціональності матеріалу і його кваліфікації на придатність щодо необхідного застосування. Підставою для експертних висновків є результати вимірювання відгуку

фізико-хімічних показників матеріалу (його структури, складу й фізичних параметрів) на радіаційні та радіаційно-стимульовані впливи.

Метою роботи є створення радіаційного методу кваліфікації тонких плівкових полімерних матеріалів. Наявна радіаційна техніка вимагала розробки нестандартних методик через надто слабе поглинання енергії електронів 1–2 МеВ полімерними плівковими матеріалами малої товщини – десятки-сотні мікрон. Тому одна з основних проблем таких випробувань – формування структури і складу радіаційного поля, оптимальних для її вирішення.

## Методи експериментів

Розроблена методика функціональних експериментів для полімерних плівок включає формування необхідних радіаційних полів, а також створення підпучкового обладнання для опромінювання дослідних зразків.

За основу ідеї формування радіаційних полів для функціональних випробувань і кваліфікації тонких полімерних плівок взята суперпозиція прямого пучка електронів, електромагнітного пікохвильового випромінювання  $\gamma$ -квантів ( $h\nu$ ) і вторинних електронів ( $W_e$ ) як результат конверсії електронів прямого пучка мегавольтних електронів. Загальний принцип показано на рис. 2.

Для формування необхідного радіаційного поля розроблено спеціальну конструкцію мішеневого вузла, який встановлюється під пучок мегавольтних електронів і на ньому закріплюються дослідні зразки плівок. При опромінюванні вузла прямими електронами ( $e^-$ ) на

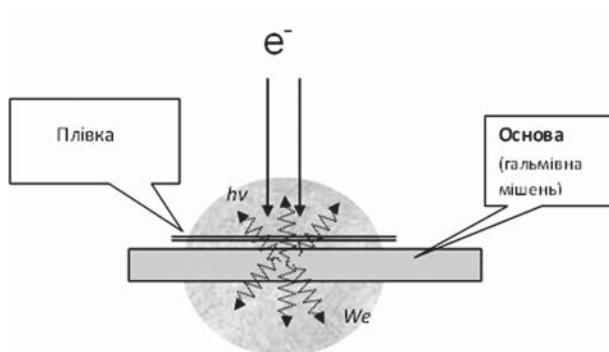


Рис. 2. Принципи створення комбінованого радіаційного поля суперпозицією різних видів випромінювання



зразки плівки крім прямих електронів починають діяти  $h\nu$  гальмівного випромінювання та потоки вторинних електронів від гальмівної мішені (основи), як це показано на рис. 2.

При розробці конструкції мішеневого вузла використано канонічну модель передавання енергії електронів у матеріали (сталь), наведену раніше на рис. 1. У найпростішому випадку для підвищення ефективності радіаційного процесу з електронами енергією 1–2 МеВ за плівками (які прямий пучок електронів долає практично без втрат енергії) досить встановити товсту гальмівну мішень. При попаданні електронів на мішень генеруються гальмівні іонізуючі рентгенівські випромінювання ( $\gamma$ ) з широким енергетичним спектром у пікометровому діапазоні електромагнітних хвиль, вторинні електрони ( $W_e$ ) та інфрачервоне випромінювання (ІЧВ). Залежно від параметрів мішені потужність пучка падаючих електронів між вказаними ефектами розподіляється нерівномірно. При бомбардуванні, наприклад, електронами енергією 1 МеВ зразків полімерів ( $z=6-9$ ) [8], у гальмівне іонізуюче рентгенівське випромінювання (згідно з формулою  $k=W_e z/800$ , де,  $W_e$  – кінетична енергія електронів, МеВ;  $z$  – заряд ядра;  $k$  – коефіцієнт перетворення) трансформується близько 1 % енергії пучка. Для важких мішеней і більших енергій цей показник може сягати 3 %. У вторинні електрони трансформується близько 10 %, у ІЧВ (тепло) – близько 87 % енергії пучка. Такий же нерівномірний 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 первинного пучка в діапазоні кутів  $0-2\pi$  від точки взаємодії електронів із матеріалом. Гальмівне іонізуюче рентгенівське випромінювання від падаючих електронів такого діапазону енергії поширюється в просторі на кути близько  $4\pi$ .

Сумарну інтенсивність радіаційного поля в області плівки можна підвищити удосконаленням конструкції конвертора. Резервом для цього є формування головного пелюстка поширення гальмівного випромінювання переважно в напрямку плівки та зменшення витрат енергії пучка на її нагрівання. Було збільшено товщину гальмівної мішені, а на її робочій поверхні встановлено пластину з алюмінію –

матеріалу, який має вищий показник електронної емісії і зворотно-розсіяного  $h\nu$ .

Дослідження показників відбитого та зворотно-розсіяного випромінювання в діапазоні кутів  $45-135^\circ$  різними матеріалами зі щільністю від 1,0 до 11,0 г/см<sup>2</sup> дали змогу підвищити інтенсивність поля вторинних електронів і забезпечити керування потоком тепла (ІЧВ) в області опромінення плівки.

### Радіаційні методи контролю теплофізичних параметрів матеріалів

Основою радіаційних методів контролю теплофізичних параметрів є ефект трансформації енергії електронів у тепло при взаємодії з опромінюваним матеріалом, як це показано на рис. 3. За допомогою теплофізичних досліджень визначали діапазон безпечного опромінення полімерних плівок з метою сенсibilізації пучками електронів дозами до 200 кГр. Такі дані будуть корисні при виборі оптимальних режимів сенсibilізації для запобігання руйнування матеріалу потужним пучком електронів при виготовленні ядерних фільтрів, а також для визначення безпечного діапазону робочих температур полімерних виробів на реальному об'єкті. Попередні експерименти опромінення плівки типу полівінілхлорид (ПВХ), політетрафторетилен (ПТФЕ) та ін. свідчать про можливість пошкодження матеріалу при прямому опроміненні електронами і втрату

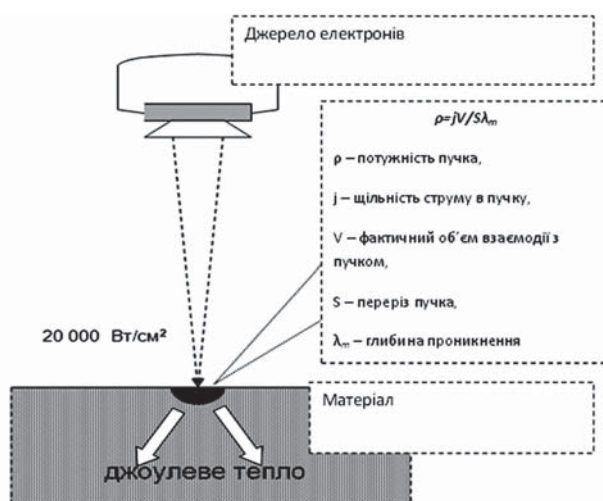


Рис. 3. Схема використання електронів для кваліфікації матеріалу на стійкість до впливу температури

ним функціональності. В експериментах на пучках електронів енергією 4 МеВ щільністю до 0,4 А в імпульсі, незважаючи на малу втрату енергії електронів при проходженні через плівки завтовшки 15–25 мкм, матеріал практично випаровувався, що і спонукало розробити кардинально інший метод опромінення за допомогою потужних пучків електронів. Попередні розрахунки можливих наслідків опромінювання мегавольтними електронами і моделювання на водному фантомі показали, що за сили струму 0,3–0,4 А за час набору поглинутої дози 200 кГр температура вказаних плівок підвищується на 50–60 °С і більше.

### Обговорення результатів досліджень

За викладеною вище методикою проведено перші експерименти щодо функціональності сітчастих ПЦ [9, 10], запропонованих для виготовлення термостійких і міцних нанопористих [11, 12] фільтраційних виробів з підвищеною стійкістю до іонізуючої радіації. Досліджено вплив радіації на основні фізичні, структурні та хімічні властивості ПЦ, які визначають функціональність матеріалу і можливість кваліфікувати його на придатність для виготовлення ядерних фільтрів за новими радіаційними технологіями та оцінювання надійності подальшої експлуатації у складі обладнання критичних елементів сучасної енергетики.

Для дослідження використовували радіаційну установку ИЛУ-6 у режимі генерації

пучка електронів потужністю до 20 кВт енергією 1,5 МеВ, спектрометр Tensor 37 фірми Bruker і прилади TA Instruments TGA Q50 і DSC Q2000. Об'єктами дослідження були тонкі плівки (товщиною 120–150 мкм) з модифікованого ПЦ, що належать до класу густосітчастих полімерів, і характеризуються високою хімічною, термічною та вогнестійкістю, високою температурою склування ( $T_{ск} \geq 250$  °С), а також стабільністю розмірів. ПЦ з такими властивостями можуть бути використані при отриманні пористих і нанопористих матеріалів широкого застосування, зокрема для створення нових і перспективних термостійких ядерних фільтрів підвищеної міцності. Наприклад, для розділення ізоотопів, димо-газових сумішей [13], аналізу складових високотемпературних хімічних сумішей у гемозонах атомних реакторів, мікробіологічних об'єктів тощо.

Досліджували функціональну придатність композитів, отриманих шляхом *in situ* поліциклотримеризації диціанового естеру бісфенолу Е (ДЦБЕ), за наявності диметилфталату (ДМФ), складу ПЦ/ДМФ=70/30 % мас. до застосування при виробництві трекових нанопористих матеріалів. Зміну хімічної структури вивчали за допомогою методу ІЧ-спектроскопії з використанням спектрометра Tensor 37 фірми Bruker з Фур'є перетворенням у діапазоні частот 4000–600  $\text{см}^{-1}$ . Для кожного спектра усереднено 32 послідовних скани роздільної здатності 4  $\text{см}^{-1}$ . Стійкість до термоокиснювальної деструкції досліджували методом термогравиметрії

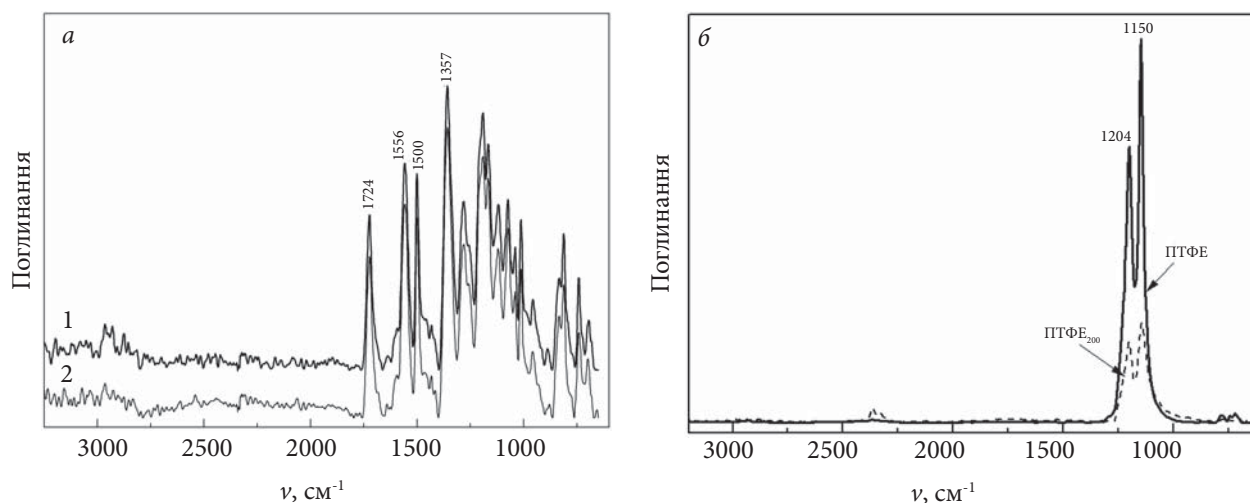


Рис. 4. ІЧ-спектри досліджуваних: ПЦ/ДМФ (а) і ПТФЕ (б) вихідного (1) і опроміненого (2)

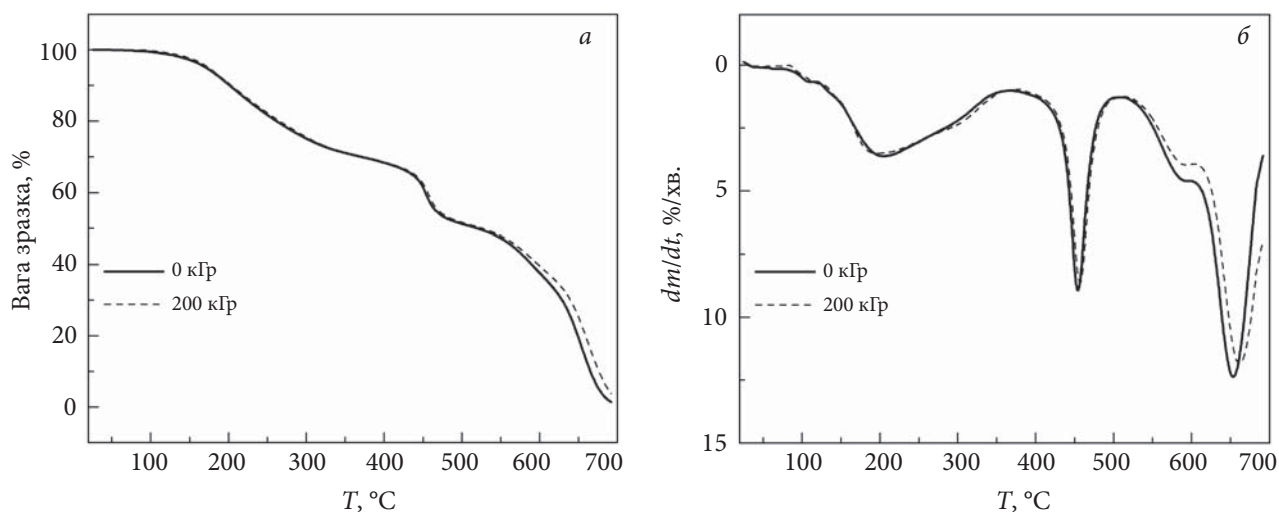


Рис. 5. ТГА криві (а) та відповідні їм похідні ДТА криві (б) вихідного ПЦ/ДМФ і опроміненого ПЦ/ДМФ200

(ТГА) (в атмосфері повітря) на обладнанні “TA Instruments TGA Q50” в інтервалі температур 20–700 °С зі швидкістю нагрівання 20 °С/хв. Теплофізичні властивості зразків вивчали на приладі TA Instruments DSC Q2000 у температурному діапазоні від 25–200 °С за швидкості нагрівання 20 °С/хв. За температуру склування ( $T_{ск}$ ) зразка приймали середину ендотермічного переходу на кривій температурної залежності теплоємності  $C_p = f(T)$ .

На рис. 4а наведено ІЧ-спектри вихідного композиту ПЦ/ДМФ і радіаційно опроміненого дозою 200 кГр – ПЦ/ДМФ<sub>200</sub>. На спектрах обох композитів наявні смуги поглинання із максимумами 1357 і 1556  $\text{см}^{-1}$ , що відповідають валентним коливанням N–C-зв’язків із N–C–O-груп і C=N-зв’язків із C=N–C поліціануратних циклів ПЦС відповідно. Крім того, смуга за 1724  $\text{см}^{-1}$  належить до валентних коливань C=O-груп ДМФ. Порівняння цих двох спектрів виявило, що застосування опромінення (сенсibilізації) практично не впливає на хімічну структуру досліджуваних ПЦ/ДМФ композитів, оскільки інтенсивність основних смуг поглинання майже не змінюється після радіаційної обробки дозою 200 кГр. Для порівняння було досліджено хімічну структуру зразка ПТФЕ, який використовували як підкладку при опроміненні. На рис. 4б наведено ІЧ-спектри вихідного ПТФЕ і ПТФЕ<sub>200</sub> (радіаційно-опроміненого дозою 200 кГр). Чітко видно, що після опромінення різко спадає інтенсивність піків за 1204 і 1150  $\text{см}^{-1}$ , що

відповідають симетричним і асиметричним  $\text{CF}_2$  і C–C валентним коливанням. Причина таких змін хімічної структури досліджуваних зразків ПТФЕ – руйнування хімічних зв’язків у полімері з наступним розривом полімерних ланцюгів у процесі опромінення.

Стійкість до термоокиснювальної деструкції вихідного і опроміненого зразків ПЦ/ДМФ досліджували за допомогою методу ТГА, отримані дані наведені на рис. 5. Видно, що криві ТГА ПЦ/ДМФ і ПЦ/ДМФ<sub>200</sub> практично збігаються, термоокиснювальна деструкція досліджуваних композитів відбувається за три стадії: перша в області температур 170–340 °С відповідає видаленню висококиплячого розчинника ДМФ із

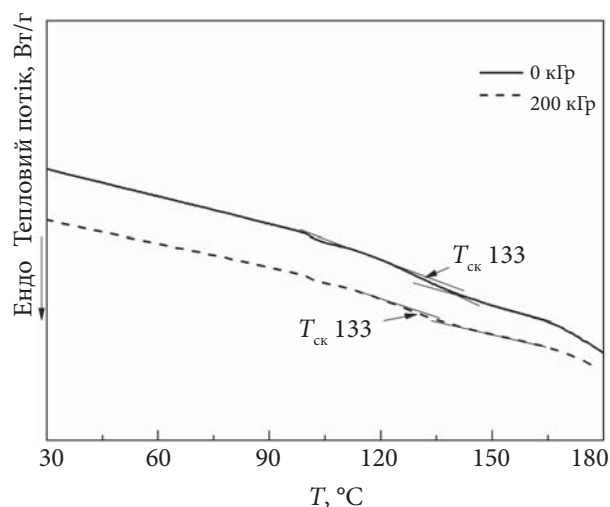


Рис. 6. ДСК термограми вихідного ПЦ/ДМФ і опроміненого ПЦ/ДМФ200

композиту, друга в інтервалі температур 427–487 °С пов'язана з розривом зв'язків феніл-триазин у ПЦ, а на третій стадії за  $T = 615\text{--}690$  °С частково відбувається окиснення утворених внаслідок деструкції на другій стадії уламків з формуванням більш термостійких структур, що згодом деградують за вищих температур. При цьому чітко видно, що для обох зразків перша стадія деградації майже ідентична, тоді як дві інші стадії, що відповідають деструкції ПЦ матриці, дещо відрізняються температурними положеннями максимумів швидкості втрати ваги: для ПЦ/ДМФ<sub>200</sub> у порівнянні з непроміненим ПЦ/ДМФ вони зсуваються в бік вищих температур на 3 і 7 °С для другої і третьої стадії деструкції відповідно. Очевидно, при опроміненні відбувається додаткове зшивання ПЦ матриці, що сприяє підвищенню термостійкості таких зразків за високих температур.

За допомогою методу диференціальної сканувальної калориметрії (ДСК) визначено вплив радіаційного опромінення на  $T_{ck}$  ПЦ/ДМФ композиту. На рис. 6 наведені ДСК термограми досліджуваних зразків. Видно, що як вихідний ПЦ/ДМФ, так і опромінений ПЦ/ДМФ<sub>200</sub> характеризуються лише однією  $T_{ck}$ , яка залишається незмінною навіть після радіаційного опромінення.

## Висновки

Розроблено і випробувано оригінальну методику радіаційного опромінення мегавольтними електронами тонких плівок з полімерних матеріалів групи поліціануратів. Отримані дані про вплив радіації на основні

структурні та фізичні властивості нових вітчизняних матеріалів, важливі для оцінки (кваліфікації) їх функціональності при виготовленні термостійких ядерних фільтрів з поліціануратів.

Вирішене завдання оптимізації технології радіаційних функціональних досліджень і кваліфікації полімерів групи ПЦ, що забезпечило максимальну трансформацію енергії електронів 1–2 МеВ у досліджуваний процес. 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 нанесення на робочу поверхню гальмівної мішені шару матеріалу з високими емісійними показниками, вибраного за результатами спеціальних досліджень.

Підтверджено функціональність запропонованих полімерних композитів на основі диціанового естеру бісфенолу Е для використання при виробництві термо- і радіаційностійких нанопористих мембран підвищеної міцності. Встановлено, що сітчастий поліціанурат, модифікований диметилфталатом, стійкий за умов радіаційного опромінення дозою 200 кГр, оскільки зберігає цілісність хімічної структури і високі термічні характеристики.

Подяка. Автори вдячні за фінансову підтримку НАН України і CNRS (Франція) в рамках спільного проекту міжнародної асоційованої лабораторії (LIA) "ПОЛІНАНОПОР".

## REFERENCES

1. STP 0.08.050-2004 «Standart predpriyatiya. Kvalifikatsiya oborudovaniya i tehniceskikh ustroystv. Obshchiye trebovaniya». <https://doi.org/10.1088/1126-6708/2004/08/050>
2. ANSI/IEEE-323. IEEE Standart for Qualifying Class 1A Equipment for Nuclear Power Generating Stations.
3. IEEE 383-2003: «IEEE Standard for Type Test of Class IE Electric Cables, Field Splices, and Connections for Nuclear Generating Stations».
4. MAGATE 50-C-D Svod polozheniy po bezopasnosti atomnyh electrostantsyy.
5. Ivanov V.S. (Ed.) Radiation chemistry of polymers (Rus.). Leningrad: Himiya, 1988: 320. ISBN 5-7245-0004-3.
6. Abramyan E.A., Alterkop B.A., Kuleshov G.D. High Intensity Electron Beams: Physics, Engineering, Applications (Rus.). Moscow: Energoatomizdat, 1984: 231. ISBN 5-9900621-1-7.
7. Donets S.E., Klepikov V.F., Litvinenko V.V., Prokhorenko E.M., Lonin Yu.F., Ponomarev A.G., Startsev O.A., Uvarov V.T. Vyprobuvannya lopatok gazoturbinnykh dvyguniv z zastosuvannya pryskoryuvacha syl'nostrumovyyh relyatyvists'kykh elektroniv. Nuclear Physics and Atomic Energy (Ukr.), 2020, 21, no. 1: 95–100. <https://doi.org/10.15407/jnpae2020.01.095>



8. *Abramyan E.A.* Industrial Electron Accelerators and Applications. Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 1988: 302. ISBN 978-3-642-51690-0.
9. *Hamerton I.* (ed). Chemistry and Technology of Cyanate Ester Resins. London: Chapman & Hall, 1994: 357. ISBN: 978-0-7514-0044-1. [https://doi.org/10.1007/978-94-011-1326-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-94-011-1326-7_1).
10. *Fainleib A.* (ed). Thermostable Polycyanurates. Synthesis, Modification, Structure and Properties. New York: Nova Science Publisher, 2011: 362. ISBN: 978-1-60876-907-0.
11. *Fainleib O.M., Grigoryeva O.P., Guskova K.G., Sakhno V.I., Zelinsky A.G., Grande D.* Novel nanoporous thermostable polycyanurates for track membranes. Phys. Chem. Solid State (Ukr.), 2009, **10**, no. 3: 692–696. ISSN 1729-4428
12. *Grande D., Grigoryeva O., Fainleib A., Guskova K.* Novel mesoporous high-performance films derived from polycyanurate networks containing high-boiling temperature liquids. Eur. Polym. J., 2013, **49**, no. 8: 2162–2171. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.05.030>
13. Radiation processing: environmental applications. Vienna: IAEA, 2007: 71. <https://www.iaea.org/publications/7631/radiation-processing-environmental-applications>.

Received 23.05.2020

*T.V. Kovalins'ka,*

Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine, 47, Nauky av., Kyiv, 03028, Ukraine

*V.I. Sakhno,*

Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine, 47, Nauky av., Kyiv, 03028, Ukraine

*Yu. V. Ivanov,*

Institute for Nuclear Research NAS of Ukraine, 47, Nauky av., Kyiv, 03028, Ukraine

*V.V. Shlapatska,*

State-Owned Enterprise "RADMA", 31, Nauky av., Kyiv, 03028, Ukraine

*O.V. Mel'nychenko,*

State-Owned Enterprise "RADMA", 31, Nauky av., Kyiv, 03028, Ukraine

*A.M. Fainleib,*

Institute of Macromolecular Chemistry NAS of Ukraine, 48, Kharkivske shose, Kyiv, 02160, Ukraine

e-mail: [fainleib@i.ua](mailto:fainleib@i.ua)

*O.P. Grygorieva,*

Institute of Macromolecular Chemistry NAS of Ukraine, 48, Kharkivske shose, Kyiv, 02160, Ukraine

*O.M. Starostenko,*

Institute of Macromolecular Chemistry NAS of Ukraine, 48, Kharkivske shose, Kyiv, 02160, Ukraine

*D. Grande,*

Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est, UMR 7182 CNRS – Université Paris-Est Creteil, Val de Marne, 2 rue Henri Dunant, BP 28, 94320, Thiais, France

e-mail: [grande@icmpe.cnrs.fr](mailto:grande@icmpe.cnrs.fr)

#### STUDY OF FUNCTIONALITY OF POLYMER FILMS BY DENSE ELECTRON BEAMS

Methodology of using megavolt electrons for investigation of the functionality of thin polymer films of polycyanurates (PCN) is described. The relevance of research is determined by the prospects of using films as a functional basis for improvement of track-etched technologies of nanoporous nuclear filters, where ionizing radiation is used in most of technological stages of their production. Functionality control is the main criterion for the qualification of films on the suitability for production of nuclear filters on their base. Development of megavolt electrons radiation methods is promising for monitoring the functionality of filters. Radiation technologies are universal and able to provide maximum information content on investigations of the characteristics of materials to qualify them for suitability of practical use. To control the functionality of the films, the methodology for research and testing of thin polymer films using powerful electron beams of 1-2 MeV has been developed. The features of these methods and the results of their application at the control of functionality and for the qualification of the films based on crosslinked polycyanurates, synthesized by in situ polycyclotrimerization of dicyanate ester of bisphenol E in the presence of dimethylphthalate (DMPH) of the composition PCN/DMPH=70/30 wt.%, on the suitability for production of nanoporous track membranes are discussed.

**Key words:** electron beams, nuclear membranes, thermostable polycyanurates, radiation stability, functional testing.