

**Т. В. Ковалінська\*, В. І. Сахно, Ю. В. Іванов***Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

\*Відповідальний автор: sungel@i.ua

**ЕКСПЛУАТАЦІЯ ПРОМИСЛОВОГО ПРИСКОРЮВАЧА ЕЛЕКТРОНІВ  
ПРИ МІНІМАЛЬНІЙ ІНТЕНСИВНОСТІ ПУЧКА**

Вирішується проблема залучення потужної промислової радіаційної техніки для радіаційної модифікації медичних розчинів та досліджень методик їхнього застосування. Відповідальним етапом вирішення цієї проблеми є радіаційні біологічні експерименти з модифікованими медичними розчинами. Здійснення їх вимагає модернізації радіаційної техніки і приведення її параметрів у відповідність зі специфікою таких експериментів. Досліджено й обґрунтовано шляхи вдосконалення потужної радіаційної установки для медико-біологічних робіт, у тому числі in-vivo.

*Ключові слова:* прискорювач електронів, темновий струм пучка, автоматичне регулювання.

**1. Вступ**

Експериментальна науково-технологічна радіаційна установка ІЯД НАН України [1] є оригінальним технічним комплексом для досліджень і розробок промислових радіаційних технологій у різних галузях виробництва – промисловій індустрії, екології, матеріалознавстві. Цей комплекс об'єднує лінійний прискорювач електронів, системи забезпечення, силову електроніку, системи метрології та широкий перелік спеціальних підпучкових технічних засобів для опромінення різноманітних матеріалів і виробів. Установка забезпечує формування радіаційних полів з інтенсивністю близько 0,3 кГрс і надійну експлуатацію з максимальним струмом пучка електронів, потужність якого сягає 5 кВт. У конструкції радіаційної установки ІЯД передбачено можливості оперативної адаптації під широке коло експериментальних робіт. При зміні напрямку досліджень передбачається відповідна модернізація, удосконалення або створення нових пристроїв. Але слід зазначити, що будь-яке вдосконалення такого комплексу є складним процесом технічного узгодження вже досягнутих параметрів із новими завданнями експериментаторів і вимагає детального врахування всіх проблем модернізації, бо мова йде про ефективність використання ресурсу дорогої радіаційної техніки та про якість і достовірність отриманих на ній наукових результатів.

**Метою даного** дослідження є удосконалення технічної бази радіаційних експериментів для виконання Державного завдання за темою «Розробка радіаційних технологій отримання та дослідження методів застосування гідролізних наноматеріалів для ядерної та традиційної медици-

ни» і для проведення експериментів in-vivo. Уперше вирішується проблема залучення потужної промислової радіаційної техніки не тільки до досліджень радіаційно-хімічних ефектів опромінення іонізуючою радіацією медичних рідин, але й для біологічних ефектів їхнього застосування в ядерній медицині. Такі дослідження вимагають формування радіаційних полів мінімальної інтенсивності, суттєво нижчих за ті, що прийняті у традиційних радіаційних технологіях.

**Проблема.** Промисловий прискорювач радіаційної установки ІЯД належить до переліку потужної радіаційної техніки і розрахований на експлуатацію в максимальному режимі. Навіть «темновий» потік радіації від допоміжного обладнання установки вже є суттєвим для впливу на фізіологічний відгук піддослідних тварин. Характеристика регулювання пучка електронів стає лінійною лише при значимих інтенсивностях його струму, надлишковому для медико-біологічних досліджень. А конструкція прискорювачів виключає можливість установлювати в її склад будь-які нештатні вузли.

**Вимоги біологічних досліджень.** При аналізі проблем адаптації радіаційної установки ІЯД до медико-біологічних досліджень даного проекту виявилися численні проблеми, мало привабливі для модернізації технологічної радіаційної установки великої потужності. Деякі з них становлять непросту проблему для цієї потужної радіаційної техніки, оскільки «біологічна» інтенсивність радіаційних полів повинна бути в тисячі разів менша за прийняті у традиційних радіаційних технологіях. Крім того, для моделювання процесів дії радіації на біологічні об'єкти необхідно формувати не тільки «чисті» радіаційні

поля, але і їхні суперпозиції. Завданням модернізації є формування нових параметрів установки:

1) інтенсивність радіаційних полів повинна бути знижена в тисячу разів;

2) необхідно вдосконалити систему радіаційних вимірювань, бо традиційна технологічна дозиметрія, створена для промислових процесів, занадто груба для медико-біологічних досліджень.

## 2. Експериментальні роботи

Досліджено шляхи досягнення мети, не пов'язані із втручанням у конструкцію прискорювача. З аналізу теорії прискорювачів установлено, що при малих струмах слід очікувати сильне спотворення форми імпульсів пучка, зростання його нестабільності від зовнішніх факторів – теплові дрейфи, добові і сезонні коливання, старіння комплектуючих. У процесі прискорення відбуваються ковзання фази руху електронів відносно фази НВЧ хвилі, зростає вплив дрейфів вхідних параметрів прискорювача. При низьких струмах порушується оптимальний режим інжекції електронів до прискорення. У режимі, близькому до «темнового» пучка, неоднозначною є енергія електронів на кінцевому етапі прискорення. Усунення останнього ефекту було вибрано як оптимальний напрямок досягнення поставленої мети.

Для визначення необхідних заходів удосконалення системи інжекції експериментально виміряно залежність параметрів вихідного пучка від умов інжекції електронів на початковій фазі прискорення. Спрощену схему цих досліджень наведено на рис. 1.

Завданням цих досліджень є встановлення залежності вихідного пучка прискорених електронів від температури катода та величини напруги інжекції. Регульованим параметром був струм розжарення катода інжектора і напруга живлення інжектора (витягуюча напруга).

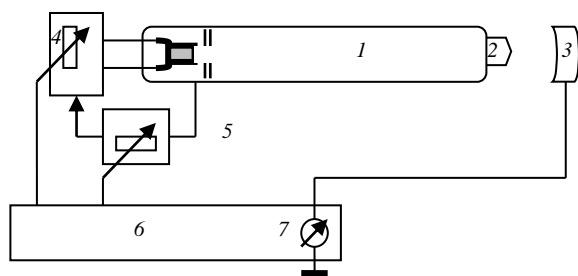


Рис. 1. Схема вимірювань залежності струму пучка від режиму інжекції: 1 – діафрагмований хвилепровід; 2 – випускне вікно; 3 – колектор електронів; 4 – підігрів катода; 5 – джерело напруги інжекції; 6 – пульт управління; 7 – вимірювання струму.

Ці параметри визначають ефективність захоплення електронів до прискорення. Завданням досліджень є пошук таких режимів, при яких вольт-

амперна характеристика прискорювача на початкових ділянках стане пологою і регульованою. Електрони, що прискорювалися в діафрагмованому хвилепроводі 1 виводилися в атмосферу через випускне вікно 2 і збиралися на колекторі 3. Струм контролювався електронними приладами 7 на пульті управління установкою 6.

Було експериментально підтверджено сподівання на сильну залежність струму пучка та його енергії на виході прискорювача від електричних режимів роботи інжектора. У номінальному паспортному режимі роботи прискорювача його вольт-амперна ідеалізована характеристика, наведена на рис. 2 пунктиром, має гладенький параболічний вид, характерний для електронно-емісійних приладів. Генерація помітної інтенсивності пучка електронів починається лише з половини діапазону регулювання напруги інжекції, а далі стрімко зростає. Лінійна частина характеристики досить коротка і сягає не більше 30 - 35 % від її протяжності.

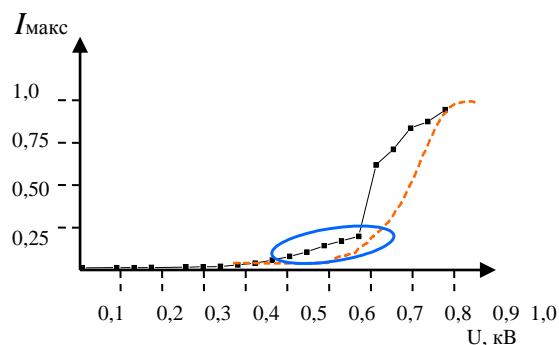


Рис. 2. Вольт-амперна характеристики прискорювача при різних режимах живлення інжектора (пунктирна лінія – типова характеристика, суцільна лінія – оптимізована).

Експериментально підтверджено вплив температури катода інжектора на вольт-амперну характеристику прискорювача. Як і очікувалося, згідно з теорією електронної емісії, при зниженні температури емітуючої поверхні спостерігається збіднення електронної хмари в камері інжектора прискорювача і деформація його вольт-амперної характеристики.

Відповідним підбором електричних режимів інжектора можна отримати іншу форму цієї характеристики, у тому числі й таку, що лінійна на початковій ділянці. Але при цьому функція регулювання втрачає гладкий характер – при збільшенні напруги інжекції з'являються ділянки з різкими перепадами струму пучка. Це свідчило про можливість його оптимізації для досягнення поставленої мети дослідження. Було отримано характеристику прискорювача (див. рис. 2), яка забезпечує плавне регулювання струму пучка на

початкових ділянках його регулювання (виділено овалом на рис. 2), перспективну для стабільної роботи прискорювача при мінімальному струмі пучка.

У цих експериментах підтвердилося припущення, що емісійна характеристика інжектора може стати ефективним регульованим параметром у режимі отримання пучків мінімальної інтенсивності. Знайдено оптимальні режими інжекції

та розроблено технічні засоби для регулювання та оптимізації режиму роботи вузла інжектора.

Водночас для покращення регульовальних можливостей установки досліджено й розроблено методику ступеневого регулювання та обмеження максимальної інтенсивності пучка шляхом вибору співвідношення імпульсів інжектора і магнетронного генератора НВЧ енергії (рис. 3).

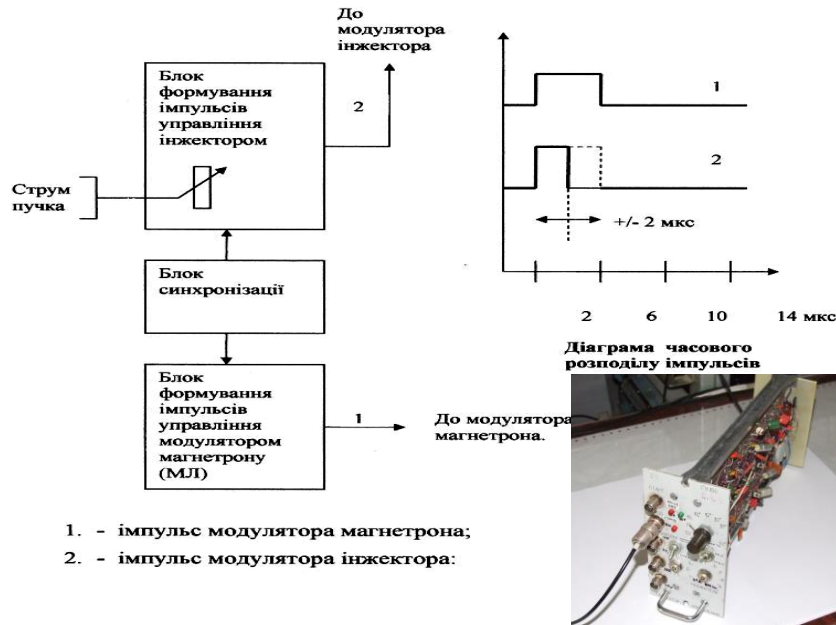


Рис. 3. Принцип регулювання струму пучка через канал імпульсного управління інжектором.

Було реалізовано й досліджено методику оперативного вкорочування фактичного імпульсу пучка в межах імпульсу прискорювальної напруги НВЧ. Розроблено нову фазно синхронізовану систему імпульсного управління прискорювачем. Нова система більш багатофункціональна і прив'язана до мережі змінного струму живлення всього комплексу. По іншому здійснюється алгоритм розподілу синхроімпульсів і забезпечується можливість плавного регулювання їхніх часових параметрів.

На рис. 3 внизу справа показано спеціальний електронний блок для реалізації нових алгоритмів роботи системи синхронізації не тільки прискорювача, але й усіх інших вузлів радіаційного дослідницького комплексу, із засобами метрології та радіаційних вимірювань. Блок фактично цифрового управління замінив на прискорювачі заводську штатну систему синхронізації і дозволив реалізувати нестандартні алгоритми управління установкою, важливі для експлуатації її при мінімальному струмі пучка на рівні одиниць мікроампер з плавним регулюванням. Зросла стабільність пучка, виключено субгармонічні спотворення форми його імпульсу.

**Контроль характеристик виведеного пучка.** В експерименті контролювалися щільність струму пучка, огинаюча імпульсу пучка і величина енергії [2]. З цією метою використано створені для даної установки спеціальні засоби. Для фізичних вимірювань на радіаційному комплексі ІЯД було розроблено оригінальні чутливі елементи, що перетворюють вимірюваний параметр (тут – струм пучка) в електричний сигнал із компенсацією впливу перешкод. Таких датчиків використовується два типи – традиційний вимірювач щільності пучка типу циліндра Фарадея та прозорий для пучка датчик імпульсу струму. Щільність струму вимірювалася циліндром Фарадея, розробленим для енергій до 7 MeV (рис. 4).

Установлено специфіку застосування циліндра Фарадея для лінійних прискорювачів. Головною проблемою є врахування особливостей енергетичного спектра генерованих електронів залежно від струму пучка. Виникаючі тут похибки визначаються не тільки вагомим внеском вторинних електронів у поглиначі циліндра Фарадея в корисний сигнал, але також і через імпульсний характер сигналу та значну реактивну складову в амплітудно-частотній характеристиці усєї сис-

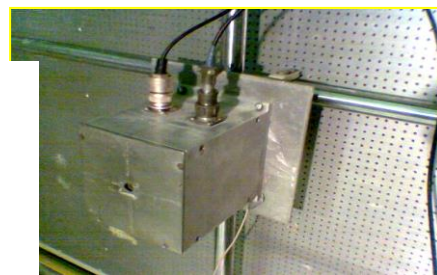
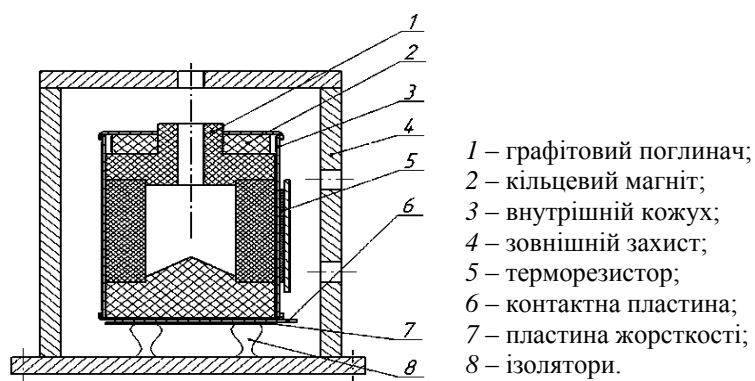


Рис. 4. Датчик щільності струму пучка по типу циліндра Фарадея.

теми вимірювань. Ці ефекти обумовлюють необхідність більш складної конструкції датчика. Установлено конструктивні доповнення, які бажано внести в датчик для вимірювань імпульсних потоків електронів. Було показано важливість правильного проектування геометрії передньої стінки датчика, у тому числі й оптимальний вибір матеріалу. Вивчено особливості проектування геометрії внутрішньої камери циліндра Фарадея та вузла повертання вторинних електронів. Експериментально підтвердилася доцільність суміщення в конструкції циліндра Фарадея

двох функцій – вимірювання щільності пучка та контролю дози опромінення калориметричним методом.

Амплітуда і форма імпульсу виведеного пучка в атмосфері контролювалася спеціальним «прозорим» магнітно-індукційним датчиком струму оригінальної конструкції (рис. 5). Специфікою цієї розробки є інваріантність до імпульсних і електромагнітних перешкод від енергетичного обладнання прискорювача. З цієї метою його структура побудована за еквівалентною схемою, наведеною на рис. 5, а.

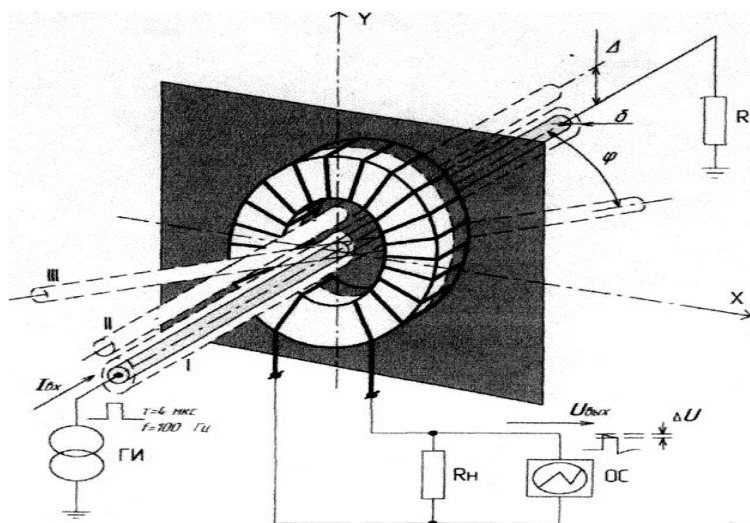


Рис. 5. «Прозорий» магнітно-індукційний датчик струму виведеного пучка:  
а – еквівалентна схема; б – конструкція на прискорювачі.

Така структура вибрана для того, щоб компенсувати вплив низки перешкод від різноманітного електричного обладнання, відхилення осі пучка від апертури датчика А та кутового відхилення φ. Властивий прискорювачу великий рівень полів електромагнітних перешкод в основному формуються магнетронним генератором НВЧ з імпульсною потужністю більше 9 МВт та гене-

ратором імпульсного живлення магнетрона імпульсами до 50 кВ при струмові більше 200 А. Було також установлено, що при поглинанні в мішені енергія електронів трансформуються у вторинне гальмівне електромагнітне випромінювання в діапазоні від сантиметрового до пікометрового діапазону [3].

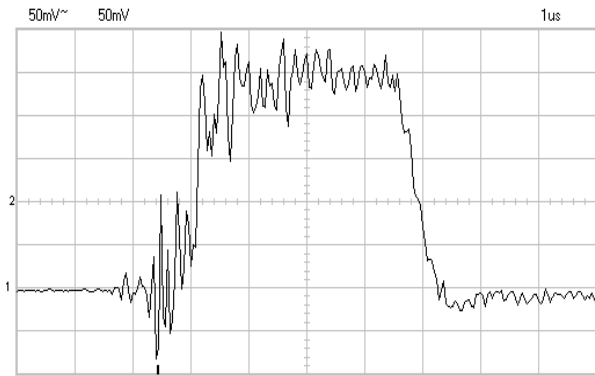


Рис. 6. Сигнал про огинаючу імпульсу пучка, отриманий при вимірюваннях малого струму пучка в реальних умовах дії сильних електромагнітних перешкод.

Обробка інформації з індукційного датчика здійснювалася комп'ютерною системою PC-lab із використанням програмних фільтрів для очищення сигналу від сильних перешкод від працюючих систем прискорювача. У результаті було

отримано надійну інформацію про фактичну огинаючу імпульсу пучка електронів (рис. 6).

### 3. Висновки

1. Досліджено й розроблено методику отримання радіаційних полів низької і наднизької інтенсивностей шляхом оптимізації режиму інжектора та системи імпульсного управління.

2. Розроблено технічні засоби модернізації прискорювача електронів для експлуатації при максимально низьких струмах пучка електронів.

3. Удосконалено систему вимірювань імпульсних потоків електронів.

Вищенаведені заходи забезпечують плавне регулювання інтенсивності радіаційного поля в «біологічному» діапазоні радіаційних досліджень. Після такої модернізації вузлів комплексу відкривається можливість експлуатувати потужний прискорювач електронів в екзотичному для нього режимі малих струмів пучка. Оцінена експериментально результуюча інтенсивність пучка відповідає вимогам радіаційних медико-біологічних досліджень in-vivo.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. В.И. Сахно и др. Радиационная установка с ускорителем электронов ИЯИ НАН Украины. *Атомная энергия* 94(2) (2003) 163.
2. А.Г. Зелінський та ін. Розробка та дослідження параметрів датчика струму пучка електронів радіаційної установки ІЯД. *Зб. наук. праць Ін-ту ядерних дослідж.* 2(10) (2003) 146.
3. І.М. Вишневський та ін. Дослідження розсіяного випромінювання лінійного прискорювача електронів. *Ядерна фізика та енергетика* 2(20) (2007) 126.

**Т. В. Ковалинская\*, В. И. Сахно, Ю. В. Иванов**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

\*Ответственный автор: sungel@i.ua

### ЕКСПЛУАТАЦІЯ ПРОМИСЛОВОГО УСКОРИТЕЛЯ ЕЛЕКТРОНІВ ПРИ МИНІМАЛЬНІЙ ІНТЕНСИВНОСТІ ПУЧКА

Решается проблема привлечения мощной промышленной радиационной техники для радиационной модификации медицинских растворов и исследований методик их применения. Ответственным этапом решения такой проблемы являются радиационные биологические эксперименты с модифицированными растворами. Их выполнение требует модернизации радиационной техники и приведения ее параметров в соответствие со спецификой таких экспериментов. Исследованы и обоснованы пути совершенствования мощной радиационной установки для медико-биологических работ, в том числе in-vivo.

*Ключевые слова:* ускоритель електронів, темновий ток пучка, автоматичне регулювання.

**T. V. Kovalinska\*, V. I. Sakhno, Yu. V. Ivanov**

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: sungel@i.ua

### OPERATION OF THE INDUSTRIAL ACCELERATOR OF ELECTRONS WITH MINIMUM BEAM INTENSITY

Problem of attracting the powerful industrial radiation technique for radiation modification of the medical solutions and research of methods for their application is being solved. The important step in solving this problem is radiation biological experiments with modified solutions. Their implementation requires modernization of radiation technique

and bringing its parameters in accordance with the specific of such experiments. The ways of modernization of the powerful radiation setting for medical and biological works were investigated, including in-vivo.

*Keywords:* accelerator of electrons, dark current of beam, automatical regulation.

#### REFERENCES

1. V.I. Sakhno et al. Radiation facility with electron accelerator in INR NAS of Ukraine. *Atomnaya Energiya* 94(2) (2003) 163. (Rus)
2. A. G. Zelinskiy et al. Development and researches of parameters of the electron bunch current sensor of the KINR radiation plant. *Zbirnyk Naukovykh Prats Instytutu Yadernykh Doslidzhen (Scientific papers of the Institute for Nuclear Research)* 2(10) (2003) 146. (Ukr)
3. I. M. Vyshnevskyi et al. The research of the scattered radiation of electrons linear accelerator. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 2(20) (2007) 126. (Ukr)

Надійшла 23.04.2018

Received 23.04.2018