

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Батракова Олексія Борисовича «Радіаційно-пучковий технологічний комплекс на базі імпульсних сильнострумівих прискорювачів релятивістських електронних пучків», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок.

Актуальність теми дисертації

Радіаційно-пучкові та іонно-плазмові технології набувають все більш інтенсивного застосування у сучасному новітньому передовому виробництві. Як результат, широкі перспективи відкриваються для розробки та створення сильнострумівих прискорювачів релятивістських електронних пучків (РЕП) та потоків плазми. РЕП високої інтенсивності мають сьогодні широкий діапазон технологічного та наукового використання, зокрема, вони стали ефективним джерелом для генерування потужного гальмівного рентгенівського випромінювання (ГРВ), термічної обробки матеріалів, нанесення покриттів, отримання нових конструкційних матеріалів. На основі сильнострумівих прискорювачів РЕП створено також джерела імпульсного електромагнітного випромінювання надвисокої потужності, а також ряд прикладних напрямків його використання. Взагалі можна відзначити, що прискорювачі, як галузь техніки та технологій, не втрачають, а навіть набувають все більш значного впливу на розширення горизонтів знань та практичного досвіду. Так, наприклад, у США публікується офіційний звіт під назвою «Роль прискорювачів для майбутнього Америки» (Accelerators for America's Future), в якому розглядаються основні напрями розвитку та досягнення у використанні прискорювачів та наголошується на важливість прогресу цієї галузі науки і технологій.

Серед широкого спектру використання прискорювачів РЕП важливим є побудова на їх основі джерел імпульсного гальмівного рентгенівського випромінювання та розробки технологій тестування конструкційних матеріалів на стійкість до радіаційного навантаження, створення нових конструкційних та технологічних матеріалів для різних галузей. Основним параметром, що характеризує ГРВ є його жорсткість, і саме прискорювачі на основі сильнострумівих РЕП дозволяють отримати імпульсне випромінювання з потрібним контрольованим рівнем жорсткості та можливістю відтворення параметрів випромінювання з потрібною точністю. Тобто виникає актуальне науково-технічне завдання щодо розробки

принципів побудови та створення технологічного комплексу на основі сильнострумowego прискорювача РЕП, розв'язанню якого присвячена дисертація, що розглядається.

Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Обґрунтування наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації, виконано на основі ретельного аналізу науково-технічних джерел за даною проблемою, що дозволило переконливо визначити мету і поставити задачі дослідження. При цьому автор опирався на сучасні методи теоретичного та експериментального дослідження, робив зіставленні та проводив критичний аналіз отриманих результатів та порівняння їх із результатами інших дослідників, робив висновки. Теоретичні дослідження виконано з використанням сучасного математичного апарату.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок математичних задач, застосуванням стандартних процедур математичного аналізу й методів математичної фізики, відповідністю змісту математичних конструкцій фізичній суті процесів, що описуються. Наукові результати здобувача були впроваджені на радіаційно-пучковому технологічному комплексі та використовувалися в Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій ННЦ «ХФТ», як експериментально-дослідна база при виконанні проектів № X-815 «Експериментальне та теоретичне дослідження ядерних матеріалів з нано- і квазікристалічною структурою на основі перехідних металів Ti, Zr, Hf, Ni під впливом потужного імпульсного гальмівного рентгенівського випромінювання» і проекту № X-5-527 «Дослідження змін структури і властивостей конструкційних матеріалів ядерних реакторів під дією імпульсних пучків електронів і рентгенівського випромінювання великої потужності». Впровадження підтверджено відповідним актом.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

1. Запропоновано новий підхід до збільшення потужності концентрованих потоків енергії та гальмівного рентгенівського випромінювання на прискорювачах РЕП при незмінному енергетичному запасі, який полягає у: виявленні закономірностей впливу комплексного застосування розроблених конструкцій елементів вакуумного діоду в області формування та транспортування РЕП, застосуванні комбінованої магнітної системи з підвищеною до $1,7 \cdot 10^6$ А/м напруженістю магнітного поля, використанні безмасляної криогенної вакуумної системи з робочим тиском

залишкових газів у вакуумному діоді прискорювача на рівні $1 \cdot 10^{-4}$ Па, розробленої конструкції генератора ГРВ та в створенні на цій основі комплексного методу підвищення їх параметрів.

2. Проведено ретельний критичний аналіз використання сильнострумових прискорювачів РЕП в дослідженнях проблем ядерного реакторобудування, відзначено високий рівень вітчизняної прикладної науки, зокрема, результати досліджень ННЦ ХФТІ щодо розробки основ прискорювальної техніки та досліджень взаємодії високоінтенсивних пучків заряджених частинок та імпульсного випромінювання із речовинами та середовищами.

3. Вперше створено потужний радіаційно-пучковий технологічний комплекс, який дає можливість опромінювати концентрованими потоками (РЕП) з енергією до $E_n \approx 0,75$ MeV та струмом до $I_n \approx 21$ кА, а також потужним ГРВ з максимальною експозиційною дозою в 9100 Р та енергією квантів ГРВ до $E_\gamma \approx 0,75$ MeV за імпульс без створення наведеної активності на зразках. Таким чином, технологічний комплекс забезпечує як реалізацію дії матеріального фактору у формі високоенергетичних електронних потоків, фактору польового діяння у вигляді високоенергетичного випромінювання, так і комбінацію обох діючих факторів. Така спроможність значно розширює технологічні можливості розробленого комплексу та сфери його практичного використання.

4. Вперше розроблено магнітну систему з основними і коригувальними секціями, що працює з керованою частотою проходження імпульсів без використання накопичувачів, газових комутаторів, трансформаторів, баластних опорів та транспортує РЕП до області взаємодії.

5. Вперше реалізовано криогенний безмасляний режим роботи вакуумної системи прискорювача РЕП «Темп-Б», який дозволив збільшити потужність РЕП та його тривалість до 1,5 мкс за рахунок використання розробленого та запатентованого автором дисертації криогенного конденсаційно-адсорбційного насосу.

6. Показано експериментально, що дозу ГРВ можна збільшити на 70% використовуючи трубчастий, а не суцільний РЕП. Вперше отримано просторово-кутовий розподіл інтенсивності ГРВ від РЕП трубчастої геометрії з $E_n \approx 750$ кеВ і $I_n \approx 21,5$ кА з корисною поверхнею опромінення $S \approx 700$ мм².

7. Вперше в конструкції радіаційно-пучкового технологічного комплексу розроблено модульну синхронізуючу стійку з гальванічним розв'язком вхідних і вихідних кіл, що зменшує вплив контурних струмів, які протікають в загальних колах заземлення та впливають на роботу

вимірювальної апаратури та системи керування комплексом. Вона дозволяє встановлювати затримки імпульсів в діапазоні від 1 мкс до десятків мілісекунд.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

1. Результати, що представлені в дисертації, використані при створенні сильнострумowego радіаційно-пучкового технологічного комплексу для дослідження процесів взаємодії потужного ГРВ з конструкційними матеріалами стійкими до радіаційного навантаження. Розширено можливості діючих прискорювачів, зокрема прискорювача РЕП «Темп-Б», що дає можливість використовувати їх для вирішення таких технологічних завдань, як модифікація поверхневих властивостей матеріалів, пошук дефектів в металевих конструкціях, у медичній фізиці. Показано можливість впровадження теоретичних результатів та експериментальних розробок для модернізації існуючих та створенні нових технологічних комплексів на основі прискорювачів РЕП.

2. Створена магнітна система дозволяє вивести РЕП до місця взаємодії з об'єктом опромінювання. Розроблено джерело живлення магнітного поля, що працює без використання накопичувачів, розрядників, трансформаторів і баластних опорів, що дозволило зменшити розміри магнітної системи.

3. Розроблено та створено безмасляну кріогенну вакуумну систему, що дозволяє отримувати робочий тиск на рівні $P = 1 \cdot 10^{-4}$ Па та забезпечити високу якість електронного пучка.

4. На основі аналізу електромагнітної обстановки, яка виникає при роботі прискорювального комплексу, розроблено систему синхронізації з гальванічною розв'язкою між колами керування та контролю параметрів комплексу, що забезпечує захист від впливу контурних струмів та дозволяє керувати прискорювачем і отримувати результати досліджень без впливу електромагнітних завад, що може бути використано на ядерно-фізичних опромінюючих установках.

5. Для вимірювання струму та напруги на виході ГПНа розроблено комбінований прилад, який дозволив вимірювати ці параметри в одній точці і без часового зсуву.

6. Розроблено методику з вимірювання заряду останнього конденсатора в кожному каскаді ГПНа. За рахунок використання системи оптичного зв'язку інформація про заряд конденсаторів передається на осцилограф через оптичне волокно.

7. Отримав подальший розвиток метод нанесення покриттів на поверхню твердого тіла трубчастими РЕП з енергією до $E_e \approx 0,75$ MeV.

8. Розроблено вакуумні рентгенівські канали з комбінованими конвертерами зі збільшеним терміном служби.

Високої позитивної оцінки заслуговує саме експериментальна частина дисертації, де в значній мірі автором було проявлено навички практичної дослідницької роботи, спроможність самостійного розв'язання складних технічних завдань, планування, методичного обґрунтування та оцінювання результатів експериментів. Слід додати, що актуальність теми роботи та практична цінність результатів дисертації підтверджується також тим, що вона пов'язана з виконанням таких державних науково-технічних програм:

а) «Програма проведення фундаментальних досліджень з ядерних матеріалів та радіаційних технологій», № д/р 080901UP0009 в рамках теми: «Експериментальне та теоретичне дослідження ядерних матеріалів з нано та квазікристалічною структурою на основі перехідних металів Ti, Zr, Hf, Ni під впливом потужного імпульсного гальмівного рентгенівського випромінювання»;

б) «Програма проведення фундаментальних досліджень з ядерних матеріалів та радіаційних технологій.». № д/р 080999UP0009 в рамках теми: «Дослідження зміни структури та властивостей конструкційних матеріалів ядерних реакторів під впливом імпульсних пучків електронів і рентгенівського випромінювання великої потужності»;

с) «Програма фундаментальних досліджень по атомній науці і техніці ННЦ ХФТІ на 2011–2015 роки.». № д/р 0111U009554. «Створення на базі сильно-струмових РЕП імпульсних потужних джерел НВЧ та рентгенівського випромінювання для випробування радіоелектронних пристроїв і матеріалів реакторобудування».

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Розробка, створення та експлуатація такого складного технологічного об'єкту, як прискорювач електронів, неможливо виконати одноосібно. Втім, розгляд опублікованих робіт показує, що автором зроблено особистий внесок на усіх стадіях наукового дослідження та технічної експлуатації. Основні положення та результати дисертаційної роботи з достатньою повнотою опубліковано в 16 наукових працях, з яких сім статей, а також, патент задовольняють вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України до публікацій, на яких ґрунтується дисертація. Дві статті додатково характеризують дисертацію. Аналіз представлених публікацій та матеріалів конференцій дає підставу стверджувати, що всі основні положення дисертації в повній мірі опубліковано та апробовано на наукових конференціях відповідного рівня.

Оцінка змісту дисертаційної роботи:

Структурно дисертаційна робота Батракова О.Б. складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел та 2 додатків.

У **вступі** виконано обґрунтування актуальності теми дисертації, показано взаємозв'язок проведених досліджень із планами науково-технічної діяльності ННЦ «ХФТ», сформульовано мету та задачі дослідження. Розкрито наукову новизну й практичну цінність результатів виконаних досліджень, надано інформацію про публікації, апробацію та особистий внесок здобувача.

У **першому розділі** представлено огляд сучасних джерел генерування та формування імпульсного ГРВ та високоінтенсивних потоків енергії, розглянуто їх застосування в радіаційній фізиці та фізиці твердого тіла. На підставі аналізу взаємодії ГРВ з речовинами та матеріалами сформульовано вимоги до потужного джерела ГРВ без наведеної активності. На підставі загальних і специфічних вимог до отримання, фокусування та транспортування концентрованих потоків енергії розроблено концепцію підвищення потужності РЕП без збільшення запасеної енергії. Таким чином, показано перспективи підвищення ефективності технологічного прискорювального комплексу. Як один з способів його досягнення обґрунтована необхідність використання безмасляної криогенної вакуумної системи у прискорювачах для збільшення інтенсивності та подовження тривалості імпульсу струму концентрованих потоків енергії.

У **другому розділі** представлено результати досліджень з розробки комплексного методу підвищення потужності РЕП при незмінному енергетичному запасі. Розроблено комп'ютерну модель, на основі якої проведено числове моделювання та визначено вплив форми анодних вставок та розміру катод-анодного проміжку на формування РЕП і показано, що доцільність використання анодних вставки конічного профілю. Представлено результати досліджень з розробки магнітної системи з коригувальними секціями соленоїда магнітного поля для транспортування РЕП до місця взаємодії. Також проведено аналіз результатів досліджень комбінованої імпульсної магнітної системи з напруженістю магнітного поля $1,7 \cdot 10^6$ А/м. Проведено дослідження залежності тривалості та інтенсивності сильнострумівих РЕП від рівня залишкових газів у вакуумному просторі прискорювача. Удосконалено систему безмасляної криогенної вакуумної відкачки прискорювача РЕП «Темп-Б» при використанні розробленого форвакуумного криогенного конденсаційно-адсорбційного насосу. Також у

даному розділі представлено опис експериментального устаткування, розробленого комплексу вимірювальних елементів, методів дослідження.

У третьому розділі представлено результати числових розрахунків, метою яких було визначення основних параметрів жорсткого ГРВ та результати досліджень з розробки джерела на базі потужних імпульсних РЕП, що генерує жорстке ГРВ. Також проведено аналіз експериментальних результатів з визначення просторово-кутового розподілу інтенсивності ГРВ в залежності від сили струму, енергії та геометрії РЕП. Для цього дослідження були удосконалені методи вимірювання жорсткого ГРВ та пристрої для генерування та діагностики ГРВ. Для опроміюваних матеріалів та діагностичної апаратури було розроблено вакуумні рентгенівські вводи з комбінованими конвертерами.

У четвертому розділі представлено результати досліджень з впливу потужних РЕП на матеріали конвертерів та конструкційних матеріалів, стійких до радіаційного навантаження. Опроміненню підлягали конвертери з вольфраму, танталу, молібдену. Проведено металографічні дослідження конвертерів після дії на них РЕП. Удосконалено метод нанесення покриттів на поверхню твердого тіла за допомогою газоплазмового факела (ГПФ), що утворюється при дії трубчастих РЕП мікросекундної тривалості з енергією до 750 кеВ на поверхню мішені.

Висновки до окремих розділів та за результатами роботи сформульовані достатньо чітко, що дозволяє встановити послідовність проведення наукових досліджень автором.

Список використаних джерел достатньо повний і охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації із 156 найменувань.

Зміст автореферату відповідає змісту дисертації та в достатній мірі дозволяє оцінити науковий рівень виконаних досліджень, наукові результати та практичну цінність роботи та особистий внесок здобувача в їх отримання.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. Автором недостатньо сильно робиться акцент на саме відтворюваність параметрів технології та, зокрема, розробленого технологічного комплексу, що має надважливе значення. Але ж генерування випромінювання із заздалегідь заданими параметрами становлять основу радіаційної технології.

2. В ході роботи автором було виконано багаточисленні вимірювання в умовах дії електромагнітних завад високої інтенсивності, що завжди супроводжують роботу прискорювача РЕП. Задачі метрологічного забезпечення та електромагнітної сумісності, які вирішувались автором в ході роботи, потребують більш ретельного висвітлювання в дисертації і

особливо в авторефераті.

3. В тексті зустрічаються подекуди сленгові терміни; ККД поглинання замість коефіцієнта поглинання, збільшення імпульсу струму замість збільшення тривалості імпульсу струму, тощо.

Втім, вказані зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

Дисертація Батракова О.Б. є завершеною науковою роботою, яка виконана за актуальною темою «Радіаційно-пучковий технологічний комплекс на базі імпульсних сильнострумівих прискорювачів релятивістських електронних пучків», якій отримані нові науково обґрунтовані теоретичні та експериментальні результати, що в сукупності є важливими для фізики електронних пучків та за змістом відповідає паспорту спеціальності 01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок. Вважаю, що дисертація відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», щодо кандидатських дисертацій, а її автор, Батраков Олексій Борисович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок.

Професор кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів
Харківського національного університету радіоелектроніки
МОН України,
доктор технічних наук, професор



В.І. Чумаков

Підпис доктора технічних наук, професора,
професора кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів
Харківського національного університету радіоелектроніки
МОН України, Чумакова В.І., **завіряю.**

Учений секретар

Харківського національного університету радіоелектроніки

МОН України



І.В. Магдаліна