

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

Батраков Олексій Борисович



УДК 537.531.2, 537.533.9

**РАДІАЦІЙНО-ПУЧКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС НА БАЗІ
ІМПУЛЬСНИХ СИЛЬНОСТРУМОВИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ
РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ**

01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті плазмової електроніки та нових методів прискорювання Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» Національної академії наук України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, старший науковий співробітник
Лонін Юрій Федорович, начальник відділу Інституту плазмової електроніки та нових методів прискорювання Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Чумаков Володимир Іванович,
Харківський національний університет радіоелектроніки
Міністерства освіти і науки України,
професор кафедри інженерії вбудованих систем управління

доктор фізико-математичних наук, професор
Пономарьов Олександр Георгійович,
Інститут прикладної фізики НАН України,
завідувач відділу фізики пучків заряджених частинок

Захист відбудеться « 4 » грудня 2018 р. о 16⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01 у Національному науковому центрі «Харківський фізико-технічний інститут» за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1, конференц-зал.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» за адресою: 61108, м. Харків, вул. Академічна, 1.

Автореферат розісланий « 1 » листопада 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 64.845.01



Мануйленко О.В.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний рівень розвитку техніки та енергетики постійно вимагає проведення досліджень для вирішення завдань в області тестування конструкційних матеріалів, стійких до радіаційного навантаження, та елементної напівпровідникової бази радіоелектронних пристроїв на стійкість та сумісність до радіаційного та електромагнітного імпульсного опромінювання великої потужності. Дослідження проводяться на моделюючих установках і опромінювальних комплексах, як окремими видами випромінювання, так і комплексним впливом іонізуючого випромінювання. Особлива увага приділяється проведенню науково-дослідних робіт з безпеки ядерної енергетики, вивченню поведінки реакторних матеріалів, вузлів, елементів і пристроїв ядерних енергетичних установок. Одним з найбільш потужних прискорювальних комплексів є ЛПЕ-300 – ЛПЕ-2000 Національного Наукового Центру «Харківський фізико-технічний інститут».

В науці та техніці існує широкий спектр напрямків, де використовується гальмівне рентгенівське випромінювання (ГРВ): фундаментальні (ядерна фізика, фізика твердого тіла); прикладні (матеріалознавство, медицина і біологія) дослідження. Сфери його застосування визначаються жорсткістю ГРВ, яка залежить від енергії електронів, що гальмуються у мішені. Характерна жорсткість-енергія пучка електронів для ядерних досліджень необхідна в межах $E_p \sim 1 \dots 100$ МеВ. Такі параметри електромагнітного випромінювання забезпечуються лінійними електронними прискорювачами. Крім жорсткості, в більшості прикладних досліджень потрібна певна поглинена доза випромінювання і швидкість наростання її на об'єкті дослідження. Поглинена доза не повинна спричиняти наведеної активності. Вирішення такої науково-технічної задачі можливо завдяки використанню імпульсних сильнострумівих прискорювачів релятивістських електронних пучків (РЕП). На існуючих генераторах ГРВ виникає необхідність в збільшенні інтенсивності виходу ГРВ. Зростання інтенсивності імпульсу ГРВ при незмінному енергетичному запасі реалізується завдяки збільшенню потужності РЕП та удосконаленню конструкції генератора ГРВ. Виникає необхідність розробити метод, що дозволить збільшити потужність існуючих радіаційно-пучкових комплексів, не змінюючи їх енергетичний запас. Саме цим і обумовлено актуальність та доцільність проведення дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація виконана в відділі сильнострумівих релятивістських технологій Інституту плазмової електроніки та нових методів прискорювання Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут». Результати, що становлять основу дисертації, отримано в рамках виконання наступних державних планових науково-дослідних робіт:

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». (шифр теми № X-815), ІФТТМТ ННЦ ХФТІ. Постанови Кабінету Міністрів України від 08.09.04 № 1165

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». (шифр теми Х-5-527), ІФТТМТ ННЦ ХФТІ. Розпорядження Президії НАН України №178 від 21.03.2007 р.

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». (шифр теми III-9-11). Постанова Бюро ВЯФЕ НАН України від 07.10.10, протокол №7 (76), п. 2.

Дисертант у даних роботах виступав виконавцем.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є вирішення науково-технічної задачі зі створення та експериментального дослідження радіаційно-пучкового технологічного комплексу (РПтК) на базі імпульсних сильнострумових прискорювачів РЕП. Для виконання цієї мети необхідно вирішити наступні основні задачі:

1. Розробити комплексний метод збільшення потужності РЕП та ГРВ при незмінному енергетичному запасі.

2. Методами математичного і фізичного моделювання електричних полів розробити конструкцію елементів вакуумного діода прискорювача, що задовольняє вимогам по збільшенню потужності РЕП.

3. Для зменшення втрат інтенсивності РЕП розробити магнітну систему для формування та транспортування РЕП.

4. Для збільшення потужності та тривалості імпульсу РЕП розробити безмасляну криогенну вакуумну систему прискорювача РЕП з можливістю отримання робочого тиску залишкових газів у ньому на рівні $1 \cdot 10^{-4}$ Па.

5. Розробити конструкцію потужного генератора ГРВ. Дослідити просторово-кутовий розподіл інтенсивності ГРВ в залежності від сили струму, енергії та геометрії РЕП.

6. Розробити систему синхронізації для управління прискорювачем РЕП з захистом від впливу потужних електромагнітних опромінювань та контурних струмів.

7. Дослідити метод нанесення покриттів на поверхню твердого тіла за допомогою трубчастих РЕП з енергією до $E_n \approx 0,75$ MeV.

Об'єктом дослідження є процеси отримання РЕП сильнострумовими прискорювачами для генерації ГРВ та його використання в області тестування конструкційних матеріалів стійких до радіаційного навантаження та в радіаційних технологіях.

Предметом дослідження є фізичні характеристики сильнострумових РЕП для генерації ГРВ та технічні характеристики елементів прискорювачів РЕП.

Методи дослідження. При виконанні дисертації були використані стандартні методи фізики пучків заряджених частинок та прискорювальної техніки. Для визначення параметрів потужних РЕП-методи вимірювання високих напруг і

струмів, калориметричні та радіаційні вимірювання. При дослідженні ГРВ застосовувалися осцилографічний, рентгенівський, термолюмінесцентний аналізи. Фрактографічні дослідження проводили з використанням растрового електронного мікроскопа (РЕМ-10), металографічні дослідження проводили з використанням мікроскопа (МІМ-10). Для вивчення складу залишкової атмосфери використано омегатронний мас-спектрометр (ШДО-2). Отримані експериментальні дані оброблялися з використанням методів математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів. В результаті проведення досліджень отримані наступні нові результати:

1. Запропоновано новий підхід до збільшення потужності концентрованих потоків енергії та ГРВ на прискорювачах РЕП при незмінному енергетичному запасі, що 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. Вперше створено потужний радіаційно-пучковий технологічний комплекс, який дає можливість опромінювати концентрованими потоками (РЕП) з енергією до $E_{\pi} \approx 0,75$ МеВ та струмом до $I_{\pi} \approx 21$ кА, а також потужним ГРВ з максимальною експозиційною дозою в 9100 Р та енергією квантів ГРВ до $E_{\gamma} \approx 0,75$ МеВ за імпульс без створення наведеної активності на зразках.

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

4. 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 [3].

5. 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 $E_{\pi} \approx 750$ кеВ і $I_{\pi} \approx 21,5$ кА з корисною площею опромінення $S \approx 700$ мм².

6. Вперше для радіаційно-пучкового технологічного комплексу розроблено модульну синхронізуючу стійку з гальванічною розв'язкою вхідних і вихідних ланцюгів, що зменшує вплив контурних струмів, які протікають в загальних колах заземлення та впливають на роботу вимірювальної апаратури. Вона дозволяє встановлювати затримки імпульсів в діапазоні від 1 мкс до десятків мілісекунд.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

1. Результати, що представлені в дисертації, використані при створенні сильнострумового РПтК для дослідження процесів взаємодії потужного ГРВ з конструкційними матеріалами стійкими до радіаційного навантаження. Розширено

можливості діючих прискорювачів, що дає можливість використовувати їх для вирішення таких технологічних завдань, як модифікація поверхневих властивостей матеріалів, пошук дефектів в металевих конструкціях, у медичній фізиці.

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

3. Розроблена безмасляна кріогенна вакуумна система, що дозволяє отримувати робочий тиск на рівні $P = 1 \cdot 10^{-4}$ Па.

4. Розроблена система синхронізації з гальванічною розв'язкою, що забезпечує захист від впливу контурних струмів та дозволяє керувати прискорювачем і отримувати результати досліджень без впливу електромагнітних перешкод, що може бути використано на ядерно-фізичних опромінюючих установках.

5. Для вимірювання струму та напруги на виході генератора імпульсної напруги (ГІНа) 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 ГІНа. 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 $E_{\pi} \approx 0,75$ МеВ.

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

9. В Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій ННЦ «ХФТІ» були використані імпульсні сильнострумові прискорювачі РЕП, 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». Акт про впровадження матеріалів дисертації наведено у додатку Б.

Особистий внесок здобувача.

Особистий внесок здобувача полягає в наступному: проводив аналіз літературних джерел, ставив завдання досліджень, проводив вибір наукових підходів до їх вирішення, проводив числові розрахунки, розробляв конструкції елементів прискорювача. Спільно з співавторами аналізував здобуті результати, проводив підготовку їх до публікації, готував статті та презентації доповідей за темою дисертації. Ним особисто отримані всі результати, що представлені в дисертації. При підготовці експериментів, формулюванні висновків, підготовці публікацій за результатами досліджень внесок автора був визначальним. У спільних роботах здобувачеві також належить обґрунтування рішень з вибору конструкції

прискорювача та генератора рентгенівського опромінювання, методів і пристроїв застосованої діагностики.

В роботі [1] автором проведено аналіз конструкцій різних кріогенних насосів. На основі цих досліджень ним запропоновано конструкцію конденсаційно-адсорбційного насоса для прискорювачів РЕП, який дозволяє зменшити час на адсорбування вуглеводню, водяних парів і водню.

В роботі [2] автором проведено теоретичне дослідження і числове моделювання імпульсного джерела ГРВ для дослідження фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів стійких до радіаційного навантаження. Удосконалено метод вимірювання поглинутої дози ГРВ при опроміненні мішені трубчастим РЕП, що дозволило отримати просторово-кутовий розподіл інтенсивності ГРВ.

В роботі [3] здобувачем проведено розрахунки основних параметрів кріогенного конденсаційно-адсорбційного насоса та розроблено його конструкцію. На насос було отримано Патент на винахід №63554.

В роботі [4, 11] автором представлено дослідження системи кріогенної вакуумної відкачки прискорювача РЕП. Для збільшення струму РЕП запропоновано модернізувати штатну систему відкачування залишкових газів шляхом впровадження конденсаційно-адсорбційного насоса. Це дозволило збільшити тривалість імпульсу струму РЕП до 1,5 мкс.

В роботі [5] автором запропоновано та обґрунтовано необхідність використання джерела живлення магнітної системи, що працює без залучення накопичувачів, розрядників, трансформаторів і баластних опорів, що забезпечило зменшення розмірів магнітної системи. Для транспортування РЕП до міста взаємодії методом числового моделювання розраховано напруженість магнітного поля соленоїда, що має основні і коригувальні секції. Запропоновано схему комутації секцій, що дозволила зменшити їх нагрівання при роботі магнітного поля.

В роботі [6] здобувачем представлено теоретичне дослідження і числове моделювання граничного струму і енергії РЕП з метою збільшення дози і інтенсивності ГРВ. Запропоновано та обґрунтовано вибір конструкції елементів і вузлів вакуумного діода, що дозволило збільшити струм РЕП до 20 кА.

В роботі [7] автором на основі розрахунків розроблено магнітну систему з двома соленоїдами, що забезпечує умови фокусування та транспортування РЕП.

У роботах [8, 12, 13] здобувач брав участь в організації та проведенні експериментів з опромінювання конвертерів з різних конструкційних матеріалів та їх подальшому фрактографічному дослідженню на растровому електронному мікроскопі (РЕМ-10). Зробив висновки по вибору матеріалу для конвертера генератора ГРВ.

У роботах [9, 14] автором представлено теоретичне дослідження і числове моделювання параметрів ГРВ. Запропоновано конструкцію джерела ГРВ і розроблено конструкцію рентгенівських вакуумних ввідів. Розроблено та реалізовано методику з отримання просторово-кутового розподілу інтенсивності ГРВ в залежності від сили струму, енергії та геометрії РЕП. За результатами експериментів проведено порівняльний аналіз експлуатаційних властивостей матеріалів, що можуть бути використані в якості конвертерів.

В роботах [10, 15] автором запропоновано та обґрунтовано необхідність використання діагностичного модуля для налагодження розроблених елементів конструкції прискорювачів РЕП. Запропоновано схему для вимірювання заряду конденсаторів у каскадах ГІНа.

В роботі [16] здобувачем запропоновано для впровадження модульно-блочну схему компонування синхронізуючої стійки, що дає можливість при наявності потреби збільшити кількість працюючих каналів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи були представлені та отримали позитивну оцінку на вітчизняних та міжнародних конференціях: ХІХ Міжнародному семінарі по прискорювачам заряджених частинок, Алушта, Крим 2005 [11], ХVІІІ Міжнародної конференції по фізиці радіаційних явищ та радіаційному матеріалознавству, Алушта, Крим 2008 [12], ХХІІІ Міжнародному семінарі по прискорювачам заряджених частинок, Алушта, Крим 2013 [13], ХХІV International Workshop on Charges Particle Accelerators, Kharkov, Ukraine, 2015 [14]. International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Kharkov, Ukraine, 2016 [15]. ХХV Міжнародному семінарі по прискорювачам заряджених частинок, Харьков, Україна, 2017 [16].

Публікації. Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано у 16 наукових роботах, 7 з яких [1, 2, 5 - 9] – статті у фахових виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science. Дві статті, що додатково характеризують дисертацію, опубліковані у спеціалізованому науковому виданні іноземної держави (Росія) [4] та у ВАНТ за 2017 р. №1 (107) [10], 6 робіт у збірниках наукових праць у тезах і матеріалах доповідей на профільних наукових конференціях [11-16]. Отримано Патент України на винахід [3]. Статті [1, 2, 5-9], а також, патент [3] задовольняють вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України до публікацій, на яких ґрунтується дисертація.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів основного тексту з 44 рисунками та 10 таблицями, висновків і списку використаних джерел із 156 найменувань та 2 додатків. Повний обсяг дисертації становить 160 сторінок, у тому числі список використаних літературних джерел займає 17 сторінок, 4 сторінки займають додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації. Показано взаємозв'язок проведених досліджень із планами науково-технічної діяльності ННЦ «ХФТІ», сформульовано мету та задачі дослідження. Відзначено наукову новизну й практичну цінність результатів досліджень, надано інформацію про публікації, апробацію та особистий внесок дисертанта.

Перший розділ «Сильнострумові прискорювачі релятивістських електронних пучків та джерела гальмівного рентгенівського випромінювання» є оглядом літератури. Розглянуто потужні джерела електронних пучків, висвітлено результати досліджень з отримання та транспортування РЕП для збільшення параметрів ГРВ. Особлива увага приділена методам вакуумної підготовки прискорювачів. Викладено механізми та ефекти, що виникають у твердому тілі під

впливом ГРВ. Розглянуто основні процеси, які приводять до втрат експлуатаційних властивостей матеріалів при взаємодії з ними жорсткого ГРВ. На основі аналізу літературних джерел сформульовані вимоги до РПтК на базі імпульсних сильноточових прискорювачів РЕП. Зроблено висновок, про доцільність розробки комплексного методу збільшення потужності РЕП та ГРВ при незмінному енергетичному запасі прискорювача.

У другому розділі «Отримання, фокусування, транспортування релятивістських електронних пучків» представлено результати досліджень по розробці комплексного методу збільшення потужності РЕП та ГРВ при незмінному енергетичному запасі. Також представлено опис експериментального устаткування: розробленого комплексу вимірювальних елементів, методів дослідження.

РПтК було розроблено на базі імпульсних сильноточових прискорювачів РЕП «Темп-А» з $E_n \approx 350$ кеВ та «Темп - Б» з $E_n \approx 750$ кеВ. Джерелом живлення таких прискорювачів є ГІН. Для контролю заряду ГІНа було розроблено методику з вимірювання заряду останнього конденсатора в кожному каскаді ГІНа. Для вимірювання струму та напруги на виході ГІНа, було розроблено комбінований прилад, який дозволив вимірювати ці параметри в одній точці і без тимчасового зсуву.

Представлено результати числових розрахунків з метою визначення основних параметрів РЕП для різних форм анодних вставок, які передбачалося використовувати в прискорювачі. Для числового моделювання використано модуль CST Particle Studio, який є складовою частиною CST Studio Suite 2010 [6]. Основною метою цих досліджень було визначити струм пучка на колекторі в залежності від розмірів катода і його положення від входу в камеру дрейфу. Першою розглянуто циліндрична анодна вставка. РЕП формувався в вакуумній діоді з магнітною ізоляцією і через анодну вставку інжектувався в камеру дрейфу. Приклад траєкторного аналізу генерації і транспортування РЕП з циліндричною анодною вставкою надано на рис. 1. Різні кольори траєкторій відповідають різним енергіям

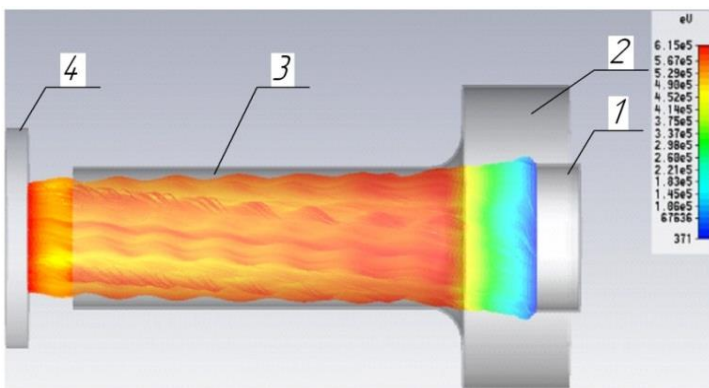


Рис 1. Приклад числового моделювання руху РЕП в прискорювачі з циліндричною анодною вставкою. 1 - кромковий катод, 2 - анодна вставка, 3 - камера дрейфу, 4 - колектор

траєкторного числового аналізу генерації і транспортування РЕП в камері дрейфу з конусною анодною вставкою рис. 2 (а) та розрахункову форму відбитку РЕП на

електронів. Максимальна енергія електронів дорівнювала ~ 615 кеВ. Були виконані числові розрахунки емісії та транспортування пучка для різної довжини катод-анодного проміжку. Розрахунок показав, що оптимальний проміжок між кромкою катода та анодною вставкою дорівнює 22 мм при цьому вдається стійко транспортувати електронний пучок із струмом 7,55 кА.

Далі досліджувався вплив форми конусної анодної вставки на струм РЕП. На рис. 2 наведено приклад одного з розрахунків

колекторі рис. 2 (б) Різні кольори траєкторій відповідають різним енергіям електронів.

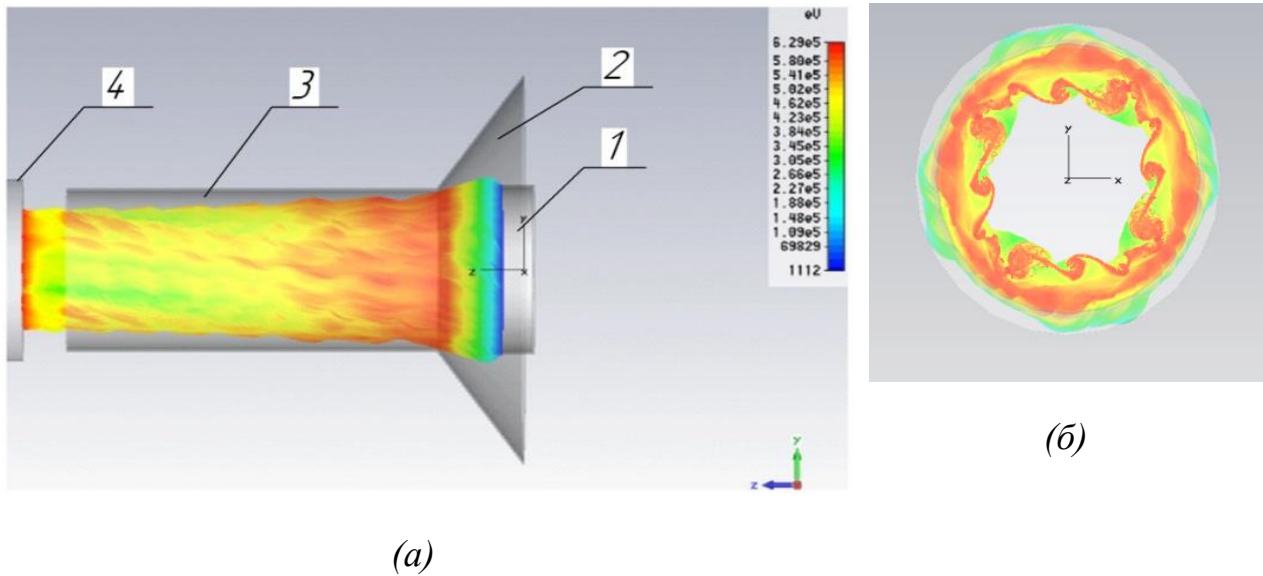


Рис. 2. Приклад числового моделювання руху РЕП (а) та розрахована форма відбитку пучка на колекторі (б) в прискорювачі з конусною анодною вставкою.

1 - кромковий катод, 2-анодна вставка, 3 - камера дрейфу, 4 -колектор

Максимальна енергія електронів дорівнювала ~ 630 кеВ. Розрахунок показав, що оптимальний проміжок між кромкою катода та анодною вставкою дорівнює 10 мм при цьому вдається стійко транспортувати електронний пучок із струмом 17,17 кА

Як видно з рис. 2 (б), пучок на колекторі має трубчасту форму із середньою товщиною ~ 15 мм. Розрахунки показали, що існує ймовірність отримання азимутальної неоднорідності форми пучка (пов'язана з діокотронною нестійкістю трубчастого пучка). Присутнє збудження азимутальної моди $l=4$.

Представлені числові розрахунки траєкторного аналізу генерації і транспортування повного струму в камері дрейфу з конусною анодною вставкою для катодів з діаметром від 64 до 80 мм, катод-анодним проміжком від 30 до 50 мм та збільшеною до $1,7 \cdot 10^6$ А/м напруженістю магнітного поля показали, що при довжині катод - анодного проміжку 30 мм та діаметру кромки катода $\varnothing 72$ мм, вдається отримати струм пучка 21,4 кА.

Також представлено результати досліджень з розробки магнітної системи для транспортування РЕП до місця взаємодії. Максимальне значення напруженості магнітного поля до модернізації дорівнювало $4 \cdot 10^5$ А/м, але в місці взаємодії вона зменшувалась вдвічі. Тому було запропоновано та розроблено магнітну систему з коригувальними секціями соленоїда магнітного поля. Конструкція вакуумного діода з магнітною системою, що містить основні секції (1) та коригувальні секції (2) соленоїда магнітного поля представлена на рис. 3, а розподіл напруженості на його осі - на рис. 4.

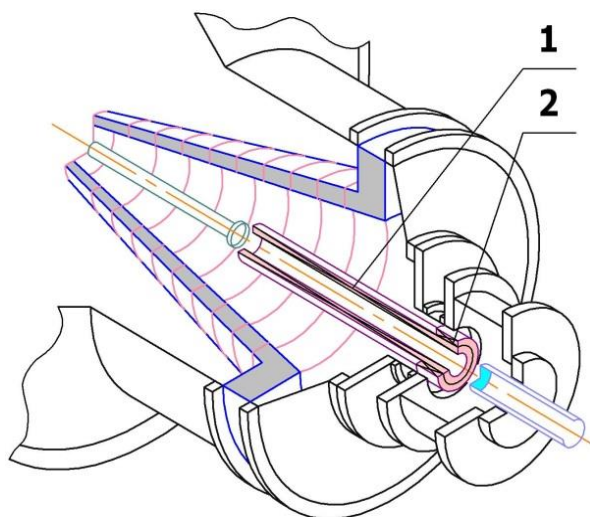


Рис. 3. Вакуумний діод з магнітною системою, що містить основні (1) та коригувальні (2) секції соленоїда

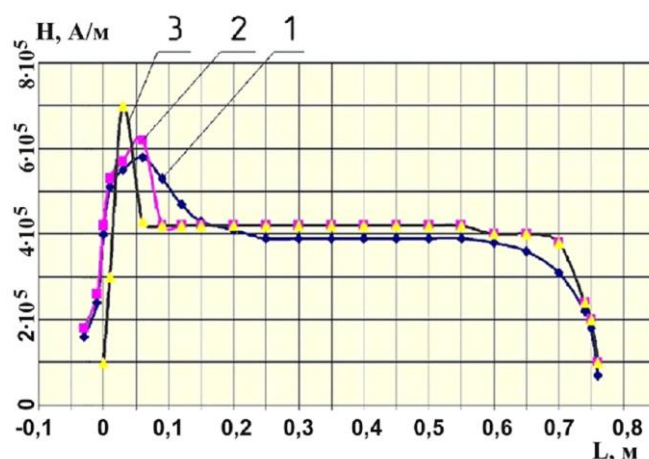


Рис. 4. Розподілення напруженості магнітного поля.

1 - експеримент з кор. секцією $l - 80$ мм,
2 - розрахунок з кор. секцією $l - 80$ мм,
3 - розрахунок з кор. секцією $l - 40$ мм

Використання соленоїда з декількома секціями, що містять велику кількість витків та споживають менший струм, в значній мірі зменшує вимоги до ізоляції обмоток соленоїда, та значно зменшує пондеромоторні сили, які діють на провідники, що живлять соленоїд. Для зменшення струму в дротах обмоток соленоїдів основні секції були з'єднані паралельно. Коригувальні секції з'єднані послідовно з головними секціями.

Дано оцінку впливу довжини коригувальних секцій соленоїда на напруженість у місті взаємодії РЕП. На рис. 4 нульова точка є містом взаємодії РЕП з опромінюваною поверхнею. Із представленої залежності видно, що 80 мм є оптимальним значенням довжини коригувальних секцій. Магнітна система добре вирішує завдання з транспортування РЕП до площини взаємодії, але для отримання ще більших значень струму РЕП потрібно збільшувати напруженість магнітного поля в соленоїді.

Для підвищення потужності прискорювача РЕП була розроблена магнітна ізоляція вакуумного діоду та підвищена напруженість магнітного поля у ньому. Результати досліджень комбінованої імпульсної магнітної системи показали, що для фокусування та транспортування РЕП необхідно мати дві магнітні системи, що розташовані у вакуумному діоді та поверх нього. Соленоїди запропонованої магнітної системи вмикались таким чином, щоб максимальні значення напруженості збігалися в часі, що забезпечувалось обраними затримками включення другого соленоїда на стійці синхронізатора. Напруженість магнітного поля розробленої магнітної системи дорівнює $1,7 \cdot 10^6$ А/м. Її робота контролювалась за допомогою датчика Холла, при застосуванні якого, була розроблена методика з вимірювання струму до 1000 кА датчиком Холла з межами вимірювань ± 200 А.

Схему вакуумного діоду з комбінованою магнітною системою наведено на рис. 5, а розподіл напруженості силових ліній магнітного поля на осі прискорювальної колони - на рис. 6.

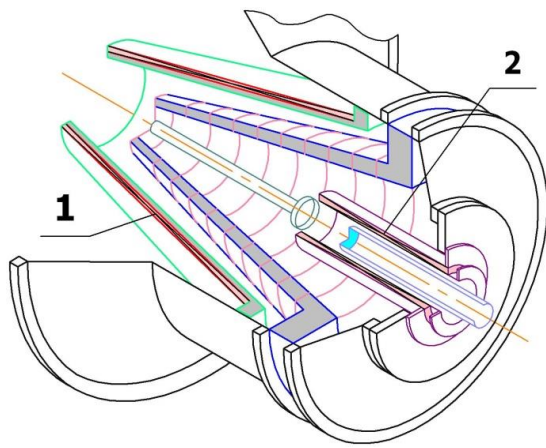


Рис. 5. Схема діоду з комбінованою магнітною системою. 1 - конічний соленоїд, 2 - циліндричний соленоїд

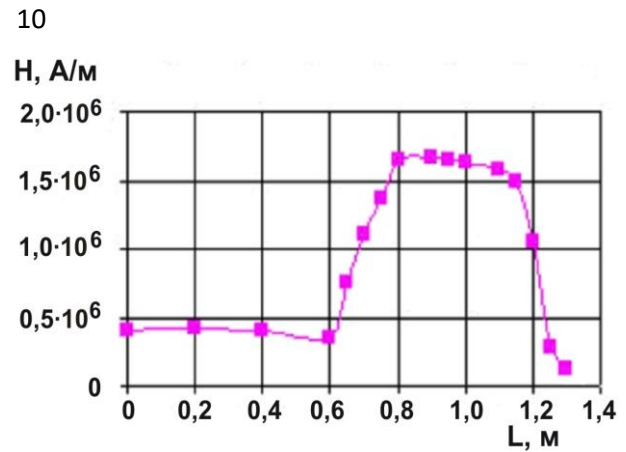


Рис. 6. Розподілення напруженості магнітного поля по осі, де L —довжина колони прискорювача, H —напруженість магнітного поля на осі

Розроблена система запалювання розрядників ГПНа та система синхронізації імпульсних джерел зменшує електромагнітні перешкоди, які виникають при роботі прискорювача РЕП. Також з метою забезпечення надійності роботи діагностичної апаратури від дії електромагнітних наведень було розроблено синхронізуючу стійку [16] з гальванічною розв'язкою. Оскільки всі канали затримки імпульсів системи синхронізації мають одне загальне джерело живлення, то необхідно було всі вихідні каскади розв'язати за допомогою імпульсного трансформатора. У такий спосіб надана схема дозволяє усунути контурні струми, що протікають у загальних ланцюгах заземлення й впливають на діагностику.

Проведено дослідження тривалості та інтенсивності сильнотимових РЕП в залежності від рівня залишкових газів в прискорювачі. Була розроблена система безмасляної кріогенної вакуумної відкачки прискорювача РЕП «Темп-Б» на базі розробленого форвакуумного кріогенного конденсаційно-адсорбційного насосу рис. 7, на який було отримано патент на винахід [3]. Використання розробленої

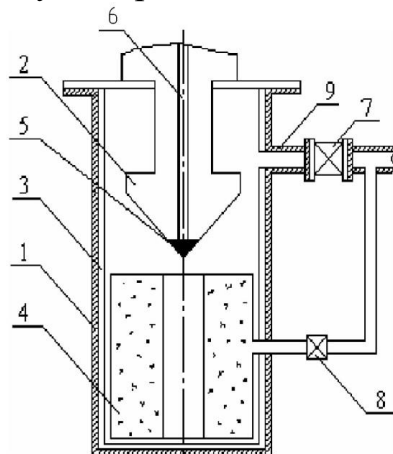


Рис. 7. Схема форвакуумного конденсаційно - адсорбційного насосу:

1 - корпус; 2 - конденсаційний елемент;
3 - збірник конденсату; 4 - адсорбційний патрон; 5 - вентиль; 6 - направляючий стрижень; 7,8 - клапани; 9 - вакуум провід

системи збільшило тривалість імпульсу струму РЕП до 1,5 мкс та дозволило отримати у діоді безмасляний вакуум з робочим тиском до $1 \cdot 10^{-4}$ Па [4]. Конструкційною особливістю цього насосу є те, що сорбційна частина насоса охолоджується не тільки холодоагентом, а й рідким конденсатом. Застосування конденсаційно-адсорбційного насосу дозволяє використовувати один, а не два насоси. Для дослідження його роботи використовувався омеготронний мас-спектрометр (ШДО-2).

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах [1, 3, 4, 5, 6, 7, 10] та доповідались на конференціях [11, 15,16].

У третьому розділі «Генератори гальмівного рентгенівського випромінювання на базі імпульсних сильноточових прискорювачів релятивістських електронних пучків» виконано числові розрахунки параметрів ГРВ та дослідження ефективності перетворення енергії РЕП на енергію ГРВ на прискорювачах РЕП. Представлено експериментальні результати з визначення просторово-кутового розподілу інтенсивності ГРВ в залежності від значення струму, енергії та геометрії РЕП. Для цього дослідження були удосконалені методи вимірювання жорсткого ГРВ та пристрої для генерування та діагностики ГРВ [9]. Результати розрахунків експозиційної дози D та її потужності \dot{D} на різних відстанях R від мішені з Та для різних енергій РЕП надано у таблиці 1.

Таблиця 1.

Результати розрахунків експозиційної дози D та її потужності \dot{D} на різних відстанях R від конвертора для різних енергій прискорювачів РЕП

| Прискорювач «Темп-Б» (0,75 MeV) | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Відстань R , мм | 5 | 15 | 25 | 50 | 80 | 100 | 120 |
| Експозиційна доза, D , Р | $5,6 \cdot 10^4$ | $6,3 \cdot 10^3$ | $2,3 \cdot 10^3$ | $5,6 \cdot 10^2$ | $2,2 \cdot 10^2$ | $1,4 \cdot 10^2$ | $9,8 \cdot 10^1$ |
| Потужність, \dot{D} , Р/сек | $3,7 \cdot 10^{10}$ | $4,2 \cdot 10^9$ | $1,5 \cdot 10^9$ | $3,7 \cdot 10^8$ | $1,5 \cdot 10^8$ | $9,4 \cdot 10^7$ | $6,5 \cdot 10^7$ |
| Прискорювач «Темп-А» (0,35 MeV) | | | | | | | |
| Відстань R , мм | 5 | 15 | 50 | 70 | | | |
| Експозиційна доза, D , Р | $4,8 \cdot 10^3$ | $5,4 \cdot 10^2$ | $4,8 \cdot 10^1$ | $2,5 \cdot 10^1$ | | | |
| Потужність, \dot{D} , Р/сек | $3,2 \cdot 10^9$ | $3,6 \cdot 10^8$ | $3,2 \cdot 10^7$ | $1,6 \cdot 10^7$ | | | |

Результати розрахунку інтенсивності гальмівного рентгенівського випромінювання- $J_{\text{торм}}$ Вт, відносного енергетичного виходу ГРВ- (η) та максимальної величини проникнення електронів у речовину- (δ) мк для конвертерів з Та, W та Мо при напругах $U=350$ кВ та $U=750$ кВ представлено у таблиці 2.

Таблиця 2.

Результати розрахунку інтенсивності ГРВ, відносного енергетичного виходу ГРВ та максимальної величини проникнення електронів у речовину для конвертерів з W, Та, Мо при потенціалі на катоді $U=350$ кВ та $U=750$ кВ

| Параметри | Матеріал конвертера | | | | | |
|---------------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | W | | Та | | Мо | |
| Напруга U ,кВ | 350 | 750 | 350 | 750 | 350 | 750 |
| Інтенсивність $J_{\text{торм}}$,Вт | $4,8 \cdot 10^7$ | $4,44 \cdot 10^8$ | $2,72 \cdot 10^7$ | $4,44 \cdot 10^8$ | $2,72 \cdot 10^7$ | $2,52 \cdot 10^8$ |
| Відносний енергетичний вихід, η | 0,016 | 0,030 | 0,009 | 0,0298 | 0,009 | 0,017 |
| Проникнення у речовину, δ ,мкм | 27 | 96,2 | 31,2 | 110 | 50,8 | 180 |

Як видно з таблиці 2, із зростанням атомного номера матеріалу зменшується глибина проникнення РЕП у конвертер, але збільшується інтенсивність глибоко проникаючого ГРВ. Розрахунки свідчать, що ефективність перетворення енергії РЕП у енергію ГРВ має максимум у зоні малої товщини конвертерів та залежать від атомного номеру речовини. Для зручності проведення експериментів було розроблено і створено вакуумні рентгенівські канали з корисною площиною опромінювання $\sim 480 \text{ мм}^2$ та $\sim 700 \text{ мм}^2$.

Важливим критерієм вибору конструкції конвертера є механічні та теплофізичні якості, які забезпечують його високу стійкість під дією імпульсних теплових навантажень. Тантал виявився найбільш стійким до дії ГРВ та РЕП, тому джерела ГРВ було зроблено з нього. Для дослідження просторово-кутового розподілу інтенсивності ГРВ була обрана методика, що базується на використанні термолюмінесцентних датчиків з LiF , та напівпровідникових датчиків на основі $CdTe$. Для реєстрації сигналу з напівпровідникового детектора було розроблено підсилювач струму на основі операційного підсилювача, який мало шумить та має низьке значення вхідного струму.

Діаграми просторово-кутового розподілу інтенсивності ГРВ від трубчастого РЕП та місце розташування детекторів ГРВ на РПтК наведено на рис. 8.

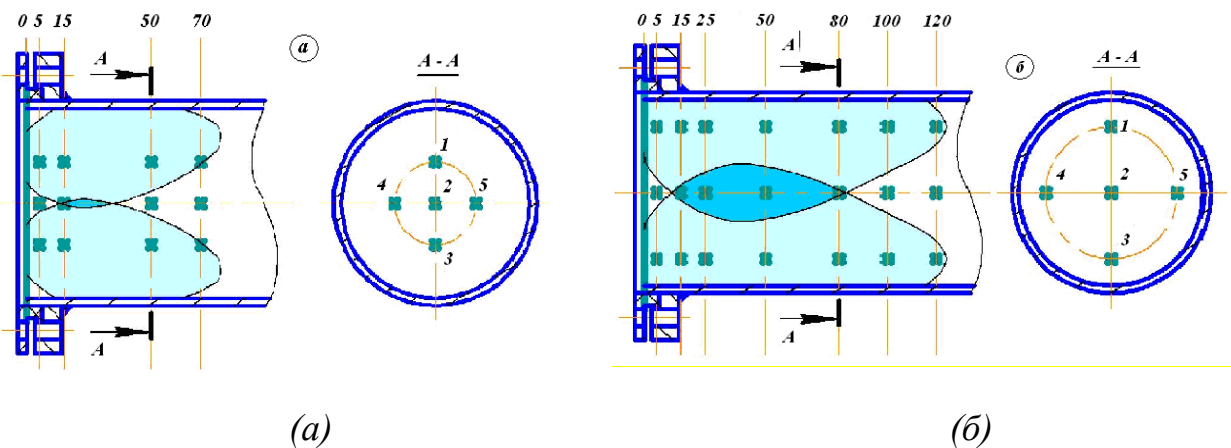
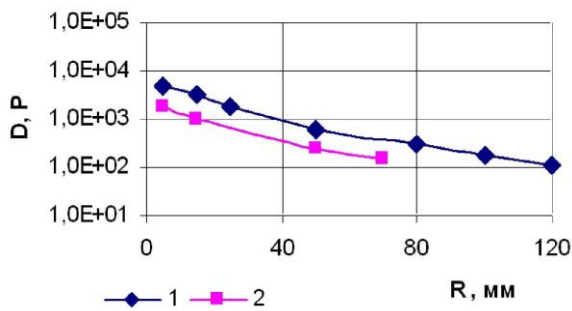


Рис. 8. Розташування датчиків та діаграма напрямку дії ГРВ на РПтК.
а - Прискорювач «Темп-А» (0,35 MeV), б - прискорювач «Темп-Б» (0,75 MeV)

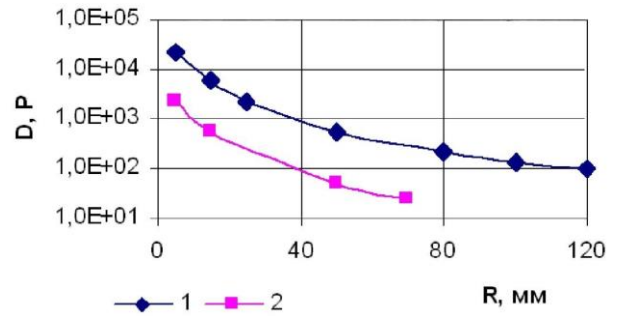
Схеми розташування датчиків з LiF та діаграми напрямку ГРВ, що отримані на прискорювачі «Темп-А» представлено на рис. 8 (а). На прискорювачі для отримання ГРВ використовувався РЕП з параметрами: $I=4 \text{ кА}$, $E=350 \text{ кеВ}$, $\tau=5 \text{ мкс}$. Використовувався кромковий катод $\varnothing 55 \text{ мм}$, відбиток, що зробив пучок мав $\varnothing 45 \text{ мм}$.

Схеми розташування датчиків з LiF та діаграми напрямку ГРВ, що отримані на прискорювачі «Темп-Б» представлено на рис. 8 (б). На прискорювачі для отримання ГРВ використовувався РЕП з параметрами: $I=21 \text{ кА}$, $E=750 \text{ кеВ}$, $\tau=1,5 \text{ мкс}$. Використано кромковий катод $\varnothing 96 \text{ мм}$, відбиток від нього мав $\varnothing 54 \text{ мм}$.

На рис. 9 показано розподіл доз ГРВ від суцільного РЕП отриманих експериментально рис. 9 (а) та за допомогою числового моделювання рис. 9 (б).



(a)

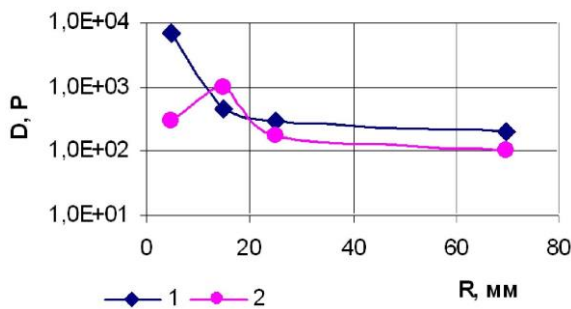


(б)

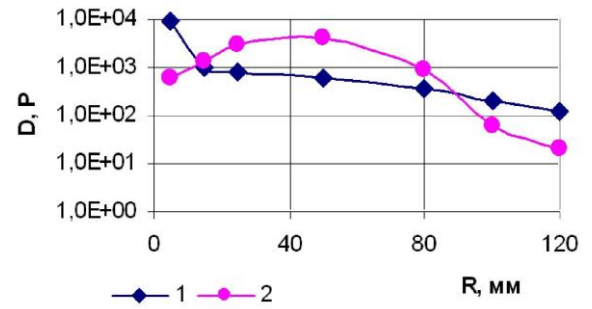
Рис. 9. Розподіл доз ГРВ від суцільного РЕП на прискорювачах:
а – експериментальні дані, б – розрахункові дані.

1 - «Темп-Б» (0,75 MeV) 2 - «Темп-А» (0,35 MeV)

На рис. 10 представлено залежності розподілу доз ГРВ отриманого від трубчастого РЕП на прискорювачах «Темп-А» рис. 10 (а) та «Темп-Б» рис. 10 (б).



(a)



(б)

Рис. 10. Розподіл доз ГРВ від трубчастого РЕП на прискорювачах:

а - РЕП з енергією 0,35 MeV, б - РЕП з енергією 0,75 MeV

Представлена залежність (1) на обох графіках відповідає розподілу доз ГРВ за середнім значенням показників датчиків №1, №3, №4, №5 розташованих на радіусу відбитку пучка, а залежність (2) – за значенням доз ГРВ з датчиків №2, які розташовані на осі прискорювача. З графіків видно, що зони та області збільшеної дози ГРВ для трубчастого пучка в першу чергу залежать від енергії електронів та можуть бути збільшені по осі прискорювача на 70% за рахунок використання кромкових катодів, що значно розширює можливості з дослідження дії ГРВ на матеріали, що опромінюються на РПтК.

Отримані результати дозволили використовувати РПтК, як експериментально - дослідницьку базу для виконання проектів № X-815 та № X-5-527. На, що було отримано акт про впровадження матеріалів дисертації [додаток Б].

Матеріали цього розділу опубліковані в роботах [2, 9] та доповідались на конференціях [12, 14].

У четвертому розділі «Опромінення конструкційних матеріалів сильнотрумовими релятивістськими електронними пучками» представлені результати досліджень з впливу потужних РЕП на матеріали конвертерів та конструкційних матеріалів стійких до радіаційного навантаження. Опромінювалися

конвертери з Та, W та Мо. Були проведені металографічні дослідження конвертерів після дії на них РЕП. На рис. 11 показано фотографії загального вигляду конвертера з W після опромінення, внизу він же, тільки зі збільшеною областю руйнування.

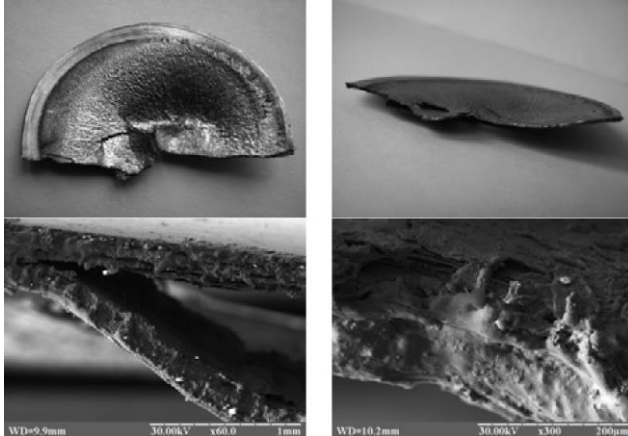


Рис. 11. Конвертер з вольфраму після опроміненням РЕП

Експерименти показали, що в якості матеріала конвертера на прискорювачах слід використовувати Та.

Було удосконалено метод нанесення покриттів на поверхню твердого тіла за допомогою газоплазмового факела (ГПФ), що утворюється при впливі трубчастих РЕП на поверхню конвертера. Метод нанесення покриття полягає в наступному. Речовина випаровується під дією трубчастого РЕП. В цьому випадку фокус ГПФ є концентратором густини

частинок речовини (до $\approx 10^{21}$ см⁻³), що випаровуються під дією РЕП з поверхні конвертера при рівні потужності $q \approx (10^9 \dots 10^{10})$ Вт/см². Наявність потужного електричного поля між катодом і анодом прискорювача забезпечує прискорення значної кількості іонізованих частинок і вкорінення їх в основу, що сприяє більш міцному зчепленню покриття з основою. При такому осадженні ГПФ не відбувається істотного нагрівання основи, а покриття що утворюється буде охолоджуватись за рахунок дифузії тепла вглиб основи. Застосуванням дуплексної обробки, яка полягає в повторному опроміненні покриття, нанесеного на поверхню, було досягнуто хорошого зчеплення матеріалу покриття та підкладки.

Матеріали цього розділу опубліковані в роботі [8] і доповідалися на конференції [13].

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна задача зі створення та експериментального дослідження радіаційно-пучкового технологічного комплексу на основі імпульсних сильнострумівих прискорювачів РЕП, який використовується в області тестування конструкційних матеріалів стійких до радіаційного навантаження та в радіаційних технологіях.

Основні **результати і висновки**, які отримано в дисертаційній роботі, полягають в наступному.

1. Вперше розроблено комплексний метод збільшення потужності РЕП та ГРВ при незмінному енергетичному запасі. Метод полягає у комплексному застосуванні розроблених конструкцій елементів вакуумного діоду в області формування та транспортування РЕП, застосуванні комбінованої магнітної системи з підвищеною до $H=1,7 \cdot 10^6$ А/м напруженістю магнітних полів, використанні криогенної безмасляної вакуумної системи з робочим тиском на рівні $P=1 \cdot 10^{-4}$ Па у вакуумному діоді прискорювача, розробленої конструкції генератора ГРВ.

2. Вперше створено потужний радіаційно-пучковий технологічний комплекс, який дає можливість опромінювати, як концентрованими потоками енергії (РЕП з

енергією $0,35 < E_{\pi} < 0,75$ MeV та струмом до $I_{\pi} \approx 21$ кА), так і потужним ГРВ з максимальною експозиційною дозою в 9100 Р за імпульс без наведеної активності. Поглинену дозу можна змінювати від 10^2 Гр до 10^5 Гр. за імпульс струму прискорювача. Експериментально встановлено, що для сильнострумівих РЕП з енергією $E \approx 0,75$ MeV необхідно використовувати конвертери з Та.

3. Вперше розроблено та апробовано магнітну систему з основними та коригувальними секціями соленоїда магнітного поля для фокусування та транспортування РЕП, що працює з керованою частотою проходження імпульсів без використання накопичувачів, розрядників, трансформаторів, баластних опорів. Вперше встановлено, що комбінована магнітна система з напруженістю магнітного поля $H = 1,7 \cdot 10^6$ А/м, дає можливість сформувати і провести до камери взаємодії РЕП із струмом більше 20 кА.

4. Вперше реалізовано кріогенний режим роботи вакуумної системи прискорювача РЕП «Темп-Б», який дозволив отримувати робочий тиск на рівні $P = 1 \cdot 10^{-4}$ Па. Застосування запатентованого автором дисертації кріогенного насоса [3] дозволило отримати безмасляний вакуум та збільшило час імпульсу струму РЕП до 1,5 мкс.

5. Вперше отримано просторово-кутовий розподіл інтенсивності ГРВ від РЕП трубчастої геометрії з $E_{\pi} \approx 750$ кеВ і $I_{\pi} \approx 21,5$ кА та корисною площею опромінення до $S \approx 700$ мм². Показано експериментально, що дозу ГРВ можна збільшити на 70% використовуючи трубчастий, а не суцільний РЕП.

6. Вперше, розроблено модульну синхронізуючу стійку з гальванічною розв'язкою вхідних і вихідних ланцюгів з захистом від перешкод, що дозволяє встановлювати затримки імпульсів в діапазоні від 1 мкс до десятків мілісекунд. При її роботі усувається вплив контурних струмів, що протікають в загальних колах заземлення, та впливають на роботу вимірювальної апаратури.

7. Удосконалено метод нанесення покриттів на поверхню твердого тіла за допомогою трубчастих РЕП з енергією $E_{\pi} \approx 750$ кеВ мікросекундної тривалості.

В Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій ННЦ «ХФТІ» були використані імпульсні сильноструміві прискорювачі РЕП і розроблені на їх базі генератори ГРВ, як експериментально-дослідницька база.

Таким чином, отримані результати дисертаційного дослідження дають змогу розробити потужні радіаційно-пучкові технологічні комплекси з двома опромінюючими факторами: концентрованими потоками енергії та гальмівним рентгенівським опроміненням, що необхідно при проведенні тестування конструкційних матеріалів на стійкість до радіаційного навантаження та розширює можливості застосування радіаційно-пучкових технологічних комплексів в радіаційних технологіях.

СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Batrakov A.B., Kravchenko V.A., Lonin Yu.F., Chernyshenko V.Ya. Cryogenic adsorption pumps for REB accelerators // Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Nuclear physics investigations (42). 2004. № 1. P. 206 – 208.
2. Batrakov A.B., Egorov A.M., Gaponenko N.I., Glushko E.G., Lonin Yu.F., Rudnev N.I., Sereda B.V., Necklyudov I.M., Parkhomenko A.A., Grivo A.G., Mazilov

A.V. Development of a pulsed bremsstrahlung source on a base of a nanosecond and microsecond REB accelerators // Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Nuclear physics investigations (43). 2004. № 2. P. 206 – 207.

3. Батраков О.Б., Кравченко В.О., Чернишенко В.Я. Криогенный конденсационно-адсорбционный насос // Патент на винахід. № 63554. 10.05.2007. Бюл. № 6. С. 3.

4. Батраков А.Б., Волков Ю.Н., Кравченко В.А., Лонин Ю.Ф., Серeda Б.В. Система вакуумной откачки ускорителя релятивистского электронного пучка (РЭП) «ТЕМП-Б» // Вакуумная техника и технология. 2006. Т. 16. № 1. С. 41 – 43.

5. Батраков А.Б., Залкинд В.М., Лонин Ю.Ф., Пономарев А.Г., Уваров В.Т., Чупиков П.Т. Магнитная система для транспортировки сильноточного релятивистского электронного пучка, работающего в адиабатическом режиме // Вопросы Атомной Науки и Техники. Сер.: Плазменная электроника и новые методы ускорения (6). 2008. № 4. С. 303 – 305.

6. Батраков А.Б., Бондаренко С.П., Лонин Ю.Ф., Пономарев А.Г., Сотников Г.В. Оптимизация параметров релятивистских электронных пучков для генерации мощного рентгеновского тормозного излучения // Вопросы Атомной Науки и Техники. Сер.: Плазменная электроника и новые методы ускорения (7). 2010. № 4 (68). С. 21 – 24.

7. Batrakov A.B., Glushko E.G., Zinchenko A.A., Lonin Yu.F., Ponomaryov A.G., Fedotov S.I. Pulsed magnetic system of the relativistic electron beam accelerator «Temp-B» // Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma electronics and new methods of acceleration (8). 2013. № 4 (86). P. 7 – 9.

8. Batrakov A.B., Bazaleev M.I., Donets S.E., Klepikov V.F., Lonin Yu.F., Lytvynenko V.V., Ponomarev A.G., Uvarov V.V., Uvarov V.T., Robuk V.N. The particularities of the high current relativistic electron beams influence on construction materials targets // Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Nuclear physics research (61). 2013. № 6 (88). P. 225 – 229.

9. Батраков А.Б., Глушко Е.Г., Егоров А.М., Зинченко А.А., Литвиненко В.В., Лонин Ю.Ф., Пономарев А.Г., Рыбка А.В., Федотов С.И., Уваров В.Т. Исследование жёсткого тормозного рентгеновского излучения на радиационно-пучковом комплексе «ТЕМП» // Вопросы Атомной Науки и Техники. Сер.: Ядерно-физические исследования (65). 2015. № 6 (100). С. 100 – 104.

10. Batrakov A.B., Glushko E.G., Yegorov A.M., Zinchenko A.A., Lonin Y.F., Ponomarev A.G., Fedotov S.I. Diagnostic module for the radiation beam system «Temp» // Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Plasma physics (23). 2017. №1 (107). P. 112 – 114.

11. Батраков А.Б., Волков Ю.Н., Кравченко В.А., Лонин Ю.Ф., Серeda Б.В. Система безмасляной откачки сильноточного ускорителя РЭП микросекундной длительности «ТЕМП-Б» // XIX Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, 12 - 18 сентября 2005 г., г. Харьков: тезисы докладов / ННЦ «ХФТИ». Харьков, 2005. С. 52 – 53.

12. Ажажа В.М., Бакай А.С., Батраков А.Б., Лавриненко С.Д., Пилипенко Н.Н., Пономарев А.Г., Стоев П.И., Уваров В.Т. Влияние импульсного излучения большой мощности на акустическую эмиссию сплавов типа ХАСТЕЛЛОЙ // XVIII

Международная конференция по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению, 8 - 13 сентября 2008г., г. Алушта: тезисы докладов / ННЦ «ХФТИ». Харьков, 2008. С. 64.

13. Батраков А.Б., Базалеев М.И., Донец С.Е., Клепиков В.Ф., Лонин Ю.Ф., Литвиненко В.В., Пономарев А.Г., Уваров В.В., Уваров В.Т., Робук В.Н. Особенности воздействия сильноочных релятивистских электронных пучков на мишени из конструкционных материалов // XXIII Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, 8 - 14 сентября 2013г., г. Алушта: тезисы докладов / ННЦ «ХФТИ». Харьков, 2013. С. 29.

14. Batrakov A.B., Glushko E.G., Yegorov A.M., Zinchenko A.A., Lonin Yu.F., Ponomaryov A.G., Rybka A.V., Fedotov S.I., Uvarov V.T. Study of hard x-ray bremsstrahlung at the radiation-beam complex «TEMP» // XXIV International Workshop on Charged Particle Accelerators, 21-25 September 2015, Kharkiv: abstracts / National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology». Kharkiv, 2015. P. 81.

15. Batrakov A.B., Glushko E.G., Zinchenko A.A., Lonin Y.F., Ponomarev A.G., Fedotov S.I. Diagnostic module for the radiation beam system «Temp» // International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, 12-15 September 2016, Kharkov: abstracts / National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology». Kharkiv, 2016. P. 110.

16. Батраков А.Б., Глушко Е.Г., Зинченко А.А., Лонин Ю.Ф., Пономарев А.Г., Федотов С.И. Цифровое устройство запускающих импульсов для радиационно пучкового комплекса «ТЕМП» // XXV Международный семинар по ускорителям заряженных частиц, 18 - 22 сентября 2017 г., г. Харьков: тезисы докладов / ННЦ «ХФТИ». Харьков, 2017. С. 25.

АНОТАЦІЯ

Батраков О.Б. «Радіаційно-пучковий технологічний комплекс на базі імпульсних сильнострумівих прискорювачів релятивістських електронних пучків» – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.04.20 – Фізика пучків заряджених частинок. – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут». – Харків, 2018.

У дисертації вирішена задача зі створення та експериментального дослідження радіаційно-пучкового технологічного комплексу на основі імпульсних сильнострумівих прискорювачів РЕП. Розроблено комплексний метод збільшення потужності РЕП та ГРВ при незмінному енергетичному запасі. Метод полягає у комплексному застосуванні розроблених конструкцій елементів вакуумного, застосуванні комбінованої магнітної системи з підвищеною до $H=1,7 \cdot 10^6$ А/м напруженістю магнітних полів, використанні криогенної безмасляної вакуумної системи з робочим тиском на рівні $P=1 \cdot 10^{-4}$ Па у вакуумному діоді прискорювача, розробленої конструкції генератора ГРВ. Потужний комплекс дає можливість опромінювати, як РЕП з $E_{\pi} \approx 750$ кеВ і $I_{\pi} \approx 21,5$ кА, так і потужним ГРВ з експозиційною дозою в 9100 Р за імпульс без наведеної активності. Експериментально встановлено, що для сильнострумівих РЕП з $E \approx 0,75$ МеВ необхідно використовувати конвертери з Та. Отримано просторово-кутовий

розподіл інтенсивності ГРВ від РЕП трубчастої геометрії з $E_{\pi} \approx 750$ кеВ і $I_{\pi} \approx 21,5$ кА та площею опромінення до $S \approx 700$ мм². Показано експериментально, що дозу ГРВ можна збільшити на 70% використовуючи трубчастий, а не суцільний РЕП. Розроблено магнітну систему для фокусування та транспортування РЕП до камери взаємодії, що працює без використання накопичувачів, розрядників, трансформаторів, баластних опорів. Застосування запатентованого автором дисертації криогенного насосу [3] дозволило отримати безмасляний вакуум та збільшило час імпульсу струму РЕП до 1,5 мкс. Розроблено модульну перешкоду захищену синхронізуючу стійку. У роботі удосконалено метод нанесення покриттів на поверхню твердого тіла трубчастими РЕП з $E_{\pi} \approx 750$ кеВ.

Ключові слова: сильнострумний релятивістський електронний пучок, генератор імпульсних напруг, прискорювач електронів, вакуумний діод, генератор рентгенівського випромінювання.

АННОТАЦІЯ

Батраков А.Б. «Радиационно-пучковый технологический комплекс на базе импульсных сильноточных ускорителей релятивистских электронных пучков» – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.20 – физика пучков заряженных частиц. – Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт». – Харьков, 2018.

В диссертационной работе решена важная научно-техническая задача по созданию и экспериментальному исследованию радиационно-пучкового технологического комплекса на базе импульсных сильноточных ускорителей РЭП, который используется, как в области тестирования конструкционных материалов, устойчивых к радиационной нагрузке, так и в радиационных технологиях. Разработан комплексный метод увеличения мощности РЭП и ТРИ при неизменном энергетическом запасе. Метод заключается в комплексном применении разработанных конструкций элементов вакуумного диода в области формирования и транспортировки РЭП, применении комбинированной магнитной системы с повышенной до $H = 1,7 \cdot 10^6$ А/м напряженностью магнитного поля, использовании криогенной безмасляной вакуумной системы с рабочим давлением на уровне $P = 1 \cdot 10^{-4}$ Па в вакуумном диоде ускорителя, разработанной конструкции генератора ТРИ. Созданный мощный радиационно-пучковый технологический комплекс дает возможность облучать, как концентрированными потоками энергии (РЭП с энергией $0,35 < E_{\pi} < 0,75$ МэВ и током до $I_{\pi} \approx 21$ кА), так и мощным ТРИ с максимальной экспозиционной дозой в 9100 Р по импульс без наведенной активности. Поглощенную дозу можно изменять от 10^2 Гр до 10^5 Гр за импульс тока ускорителя. Экспериментально установлено, что для сильноточных РЭП с энергией $E \approx 0,75$ МэВ необходимо использовать конвертеры из Та. Получено пространственно-угловое распределение интенсивности ТРИ для РЭП трубчатой геометрии с энергией до $E_{\pi} \approx 750$ кеВ, $I_{\pi} \approx 21$ кА, полезной площадью облучения до $S \approx 700$ мм². Показано экспериментально, что дозу ТРИ можно увеличить на 70% используя трубчатый, а не сплошной РЭП.

Найдена оптимальная геометрия электродов и их место размещения в вакуумном диоде ускорителя. Усовершенствование конструкции вакуумного диода, оптимизация магнитных и электрических полей позволили получить РЭП с $I_{\text{п}} \approx 21$ кА и $E_{\text{п}} \approx 750$ кэВ эффективностью преобразования энергии генератора импульсного напряжения в пучок - 70%. Благодаря этому получено ТРИ с дозой до 9100 Р за импульс тока РЭП на ускорителе «Темп-Б» и 3500 Р за импульс тока РЭП на ускорителе «Темп-А». Разработана и апробирована магнитная система с основными и корректирующими соленоидами для фокусировки и транспортировки РЭП, работающая с управляемой частотой следования импульсов без использования накопителей, разрядников, трансформаторов, балластных сопротивлений она обеспечивает получение напряжённости магнитного поля на уровне $H = 5,8 \cdot 10^5$ А/м, что позволило вывести РЭП в камеру взаимодействия. Для увеличения тока РЭП была разработана комбинированная магнитная система, состоящая из двух соленоидов магнитных полей с напряженностью магнитного поля $H = 1,7 \cdot 10^6$ А/м, что дало возможность сформировать и провести в камеру взаимодействия РЭП с током более 20 кА.

Создана криогенная вакуумная система ускорителя РЭП «Темп-Б», которая позволила получить рабочее давление в вакуумном диоде на уровне $P = 1 \cdot 10^{-4}$ Па. Применение запатентованного автором диссертации криогенного насоса [3] позволило получить безмасляный вакуум и увеличило время импульса тока РЭП до 1,5 мкс. Впервые сделано устройство-вакуумный рентгеновский канал с комбинированным конвертором. Он позволяет проводить исследования по облучению материалов, не изменяя вакуумных условий ускорителя, что снижает эксплуатационные и энергетические затраты на генерирование ТРИ.

Получил дальнейшее развитие метод защиты элементов ускорителя от мощных электромагнитных помех, который основан на использовании оптических пар и воздушных трансформаторов. Созданная схема запуска разрядников генератора импульсного напряжения обеспечивает уменьшение влияния контурных токов на работу ускорителя. Разработанная модульная помеха защищенная синхронизирующая стойка с гальванической развязкой входных и выходных цепей, позволяет устанавливать задержки импульсов в диапазоне от 1 мкс до десятков миллисекунд. При ее работе устраняется влияние контурных токов, протекающих в общих цепях заземления, и влияющих на работу измерительной аппаратуры.

В работе усовершенствован метод нанесения покрытий на поверхность твердого тела трубчатыми РЭП с $E_{\text{п}} \approx 750$ кэВ микросекундной длительности.

Ключевые слова: сильнооточный релятивистский электронный пучок, генератор импульсных напряжений, ускоритель, вакуумный диод, длительность импульса, генератор рентгеновского излучения.

ABSTRACT

A.V. Batrakov. «Radiation-beam technological complex based on the high-current pulsed relativistic electron beam accelerators» – Manuscript.

Thesis for the scientific degree of the candidate of Thesis for the scientific degree of the candidate of technical sciences by specialty 01.04.20 – physics of charged particle

beams. – National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology». – Kharkiv, 2018.

For the first time a new approach is proposed for increasing the power of concentrated energy fluxes and X-ray bremsstrahlung on the REB accelerators with constant margin of energy. The approach consists in investigating the complex effect of the developed vacuum diode elements in the field of REB production and transport, using a combined magnetic system with a magnetic field strength increased to $1,7 \cdot 10^6$ A/m, using an oil-less cryogenic vacuum system with an operating residual gas pressure in the accelerator vacuum diode at the level of $1 \cdot 10^{-4}$ Pa and developed XRB generator, as well as, designing on the base of the foregoing of a complex method for increasing the above-mentioned parameters. The radiation beam system was developed for the first time. It is characterized by two irradiative factors: concentrated energy flows (electron beams $0,35 < E_b < 0,75$ MeB, $I_b \approx 21$ kA) and the intense slowing-down X-radiation with the exposure dose of 9100P/ pulse without the induced activity. The accelerator of electron beams «Temp-A» with the energy up to 450keV provided the slowing-down X-radiation with the dose of 3500 P/ current pulse. The accelerator of electron beams «Temp-B» with the energy of up to 750 keV provided the slowing –down X-radiation with the dose of 9100 P/ current pulse. The methods used for the retrofit of accelerators allowed for a decrease in their weight and overall dimensions and also for a reduction of power inputs required for their operation.

For the first time due to the use of a cryogenic condensation-adsorption pump (developed and patented by the dissertation's author [3]) a cryogenic oil-less operation mode of the vacuum system in the REB accelerator «Temp-B» is realized that permits to increase the power REB and its duration to 1,5 μ s.

It has been established that the sleeve cathodes should be used to increase a dose of slowing-down X-ray. These cathodes increase a dose of slowing-down X-ray by 70% along the accelerator axis. The diagrams showing the direction of action of slowing-down X-radiation were obtained for the developed intense sources of slowing-down X-radiation.

Key words: heavy-current relativistic electron beam, pulse voltage generator; electron accelerator, vacuum diode and the X-ray emitter.