

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

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

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

Батраков Олексій Борисович

УДК 537.531, 537.533.9

ДИСЕРТАЦІЯ

**РАДІАЦІЙНО – ПУЧКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ КОМПЛЕКС
НА БАЗІ ІМПУЛЬСНИХ СИЛЬНОСТРУМОВИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ**

РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ

01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок

Природничі науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Науковий керівник: Лонін Юрій Федорович, доктор технічних наук, старший науковий співробітник.

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Батраков О.Б. «Радіаційно - пучковий технологічний комплекс на базі імпульсних сильнострумівих прискорювачів релятивістських електронних пучків» - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна задача зі створення і експериментального дослідження потужного радіаційно-пучкового технологічного комплексу на основі імпульсних сильнострумівих прискорювачів РЕП, що використовуються в області ядерного матеріалознавства і радіаційних технологій. Вперше запропоновано новий підхід до збільшення потужності концентрованих потоків енергії та гальмівного рентгенівського випромінювання 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 кріогенної 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. Розроблено радіаційно-пучковий технологічний комплекс, що має два опромінюючих фактори:

- концентровані потоки енергії (релятивістські електронні пучки з енергією $0,35 < E_{\text{п}} < 0,75$ МеВ та струмом $I_{\text{п}} \approx 21$ кА);

- потужне гальмівне рентгенівське випромінювання з максимальною експозиційною дозою в 9100 Р та енергією квантів гальмівного рентгенівського випромінювання від 0,35 до 0,75 MeV за імпульс без наведеної активності.

Дисертація складається зі вступу і 4 розділів. У **першому розділі** наведено огляд літератури, що дозволяє дати оцінку і провести аналіз результатів, які були отримані іншими авторами в різних країнах. Аналіз робіт дозволяє зробити висновки про нові можливості в напрямку розробки та виготовлення потужного радіаційно - пучкового технологічного комплексу, які мало вивчені та не опубліковані в спеціальній літературі.

У **другому розділі** розглянуті питання, що стосуються отримання та транспортування потужних імпульсних РЕП.

Проведено дослідження з формування РЕП в вакуумному діоді прискорювача та транспортуванню його до місця взаємодії. Виконано числові розрахунки параметрів РЕП для різних форм анодних вставок, які передбачалося використовувати в прискорювачі.

Враховуючи результати числового моделювання досліджено вплив форми анодних вставок та розміру анод - катодного проміжку на формування РЕП, показано, що доцільно використовувати анодні вставки конічного профілю, тому що вони дозволяють отримати істотно більші струми ($I_{ТП} = 17,17$ кА) на колекторі в порівнянні з анодними вставками циліндричного профілю ($I_{ТП} = 7,55$ кА). Запропоновано оптимальну геометрію електродів і їх місце розміщення в вакуумному діоді прискорювача.

Проведено дослідження з розробки магнітної системи для транспортування РЕП до місця взаємодії. Розроблено і апробовано магнітну систему, що працює зі змінною частотою проходження імпульсів без використання накопичувачів, розрядників, трансформаторів, баластних опорів.

Проведено дослідження впливу довжини коригувальних секцій соленоїда магнітної системи на напруженість у місті взаємодії РЕП. Характеристики розробленої магнітної системи добре узгоджуються з розрахунковими. Магнітна система дозволяє транспортувати РЕП по камері дрейфу до камери взаємодії.

Одним із шляхів підвищення потужності прискорювача РЕП є створення магнітної ізоляції вакуумного діоду та підвищення напруженості магнітного поля у ньому. Представлено результати досліджень з розробки комбінованої імпульсної магнітної системи. Для збільшення струму РЕП та зменшення його втрат на елементах прискорювальної колонки було розроблено магнітну систему з двох соленоїдів. Встановлено, що магнітна система, яка складається з двох соленоїдів з напруженістю магнітного поля $1,7 \cdot 10^6$ А/м, дає можливість сформувати і провести РЕП із струмом > 20 кА. Запропонована конструкція магнітної системи повністю вирішує задачу по фокусуванню і транспортуванню РЕП до мішені, яка використовується для отримання максимальних доз ГРВ.

Проведено дослідження тривалості та інтенсивності сильноточових РЕП в залежності від рівня залишкових газів в прискорювачі. Для збільшення тривалості імпульсу РЕП було модернізовано вакуумну систему. За рахунок застосування криогенних засобів відкачування та створення безмасляного вакууму прискорювач РЕП працює в циклічному режимі. При роботі вакуумної системи було використано азотний конденсаційно-адсорбційний насос (Патент на винахід № 63554), який дозволив збільшити тривалість струму РЕП до 1,5 мкс. Модернізована система вакуумної відкачки дозволяє швидко виходити на робочий режим $1 \cdot 10^{-4}$ Па. і значно скоротити час підготовки вакуумної камери прискорювача між імпульсами. Експериментально встановлено, що однією з причин втрат енергетичного запасу РЕП, при його проходженні до мішені, є гальмування РЕП на молекулах органічних сполук, а також сконденсованих газів із відходом частини РЕП на стінки камери дрейфу.

Експериментальні результати досліджень наступні. Перше - поліпшено відкачування кисневих сполук, які погано відкачувалися наявними засобами відкачки, друге - зменшено час відкачування залишкових газів між імпульсами РЕП, третє - подовжено час імпульсу струму РЕП до 1,5 мкс.

Вперше за рахунок використання розробленого та запатентованого автором дисертації криогенного конденсаційно-адсорбційного насосу [3], реалізовано

криогенний безмасляний режим роботи вакуумної системи прискорювача РЕП «Темп-Б», який дозволив збільшити потужність РЕП та його тривалість.

Для моделювання роботи прискорювача та модернізації його частин було розроблено та зібрано діагностичний модуль з параметрами: зарядна напруга до 90 кВ, струм розряду до 50 кА, фронт наростання струму 600 нс. Це дозволяє моделювати роботу прискорювача та діагностувати розроблені вимірювальні пристрої. Розроблений високовольтний розрядник для діагностичного модуля дозволяє працювати йому в діапазоні напруг від 5 до 90 кВ.

У **третьому розділі** приведені розроблені джерела ГРВ на базі прискорювачів РЕП, працюючих в наносекундному та мікросекундному режимі.

Виконано числові розрахунки основних параметрів жорсткого ГРВ та наведено результати досліджень з розробки джерела жорсткого ГРВ на базі потужних імпульсних РЕП. Досліджено просторово-кутовий розподіл 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.

Виконано числові розрахунки параметрів ГРВ та дослідження ефективності перетворення енергії РЕП на енергію ГРВ на прискорювачах РЕП. На базі наносекундного і мікросекундного прискорювачів РЕП з енергією електронів $0,35 < E < 0,75$ МеВ створені джерела ГРВ з експозиційною дозою до 9100 Р за імпульс струму без наведеної активності з площею поперечного перерізу $12 < S_{\gamma} < 700$ мм². При цьому, поглинену дозу можна змінювати від 10^2 Гр до 10^5 Гр. Вперше, експериментально доведено, що на РПтК за рахунок використання кільцевої геометрії РЕП досягнуто підвищення дози ГРВ на 70% на осі прискорювача за конвертером. Експериментально встановлено, що для сильнострумівих імпульсних РЕП з енергією $E \approx 0,75$ МеВ необхідно використовувати конвертери з Та, тому що він має більший час життя до руйнації і, відповідно, забезпечує напрацювання більшої дози ГРВ. Для вводу зразків матеріалів під ГРВ без пошкодження вакуумних умов розроблені вакуумні рентгенівські канали з комбінованими конвертерами з корисною площею

опромінення до $\approx 700 \text{ мм}^2$. Проведені експериментальні дослідження по γ - опроміненню матеріалів для реакторобудування (типу Хастеллой). Показано, що мікроструктура сплавів до і після опромінення практично не відрізняється. Визначено величини доз жорсткого ГРВ за один імпульс РЕП для сильнострумових прискорювачів «Темп-А» і «Темп-Б». Розраховано і експериментально виміряні різними методами діаграми спрямованості ГРВ для різної геометрії РЕП (суцільного і трубчастого).

Обґрунтовано і реалізовано методику та техніку опромінювань ГРВ конструкційних матеріалів стійких до радіаційного навантаження на радіаційно - пучковому технологічному комплексі.

У **четвертому розділі** дисертації розглядаються питання застосування імпульсних потужних концентрованих потоків енергії (РЕП) з енергією 350 – 750 кеВ та струмом 2-20 кА.

Представлені результати досліджень з впливу потужних РЕП на матеріали конвертерів та конструкційних матеріалів стійких до радіаційного навантаження. Опромінювалися конвертери з вольфраму, танталу, молібдену. На основі металографічного дослідження конвертерів після дії на них РЕП, зроблено вибір матеріалу конвертера для генерації потужного ГРВ на РПтК. В експериментальних дослідженнях було запропоновано застосування дуплексної обробки, яка полягає в повторному опроміненні покриття, осадженого на поверхню. При цьому можна досягти міцного сплаву матеріалу покриття та підкладки. На підставі експериментальних результатів, пов'язаних з процесами формування і поширення газоплазмового факелу (ГПФ) при впливі трубчастих РЕП мікросекундної тривалості на поверхню твердого тіла, був розроблений метод нанесення покриттів на підкладку.

Вперше, в процесі виконання дисертаційних досліджень для РПтК «ТЕМП» розроблено комплекс вимірювальних елементів, методик і приладів:

- розроблена методика, що дозволила вимірювати струми в соленоїдах магнітних полів до 1000 кА датчиком Хола с межами вимірювань $\pm 200 \text{ А}$;

- розроблена конструкція комбінованого вимірювача струму та напруги на виході генератора імпульсної напруги (ГІНа), що дозволила вимірювати ці параметри в одній точці і без часового зсуву;

- розроблена методика для вимірювання заряду останнього конденсатора в кожному каскаді ГІНа. Інформація про заряд конденсаторів передається на пристрій, що реєструє її через оптичний кабель;

- розроблена для прискорювача РЕП «Темп-Б» синхронізуюча стійка з гальванічною розв'язкою вхідних і вихідних ланцюгів, що дозволяє встановлювати затримки імпульсів в діапазоні від 1 мкс до десятків мс і, при цьому, усуває вплив контурних струмів, що протікають в загальних колах заземлення і впливають на роботу вимірювальної апаратури.

Розроблений радіаційно - пучковий технологічний комплекс на базі імпульсних сильнотрумових прискорювачів релятивістських електронних пучків було використано в Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій ННЦ «ХФТІ», як експериментально-дослідна база при виконанні проектів № Х-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 № Х-5-527 «Дослідження змін структури і властивостей конструкційних матеріалів ядерних реакторів під дією імпульсних пучків електронів і рентгенівського випромінювання великої потужності» (акт впровадження додається).

Результати, отримані в дисертаційній роботі, дають змогу розробити потужні і більш ефективні прискорювачі електронних пучків для проведення ядерно-фізичних досліджень, а також використані при проектуванні і виготовленні потужних джерел гальмівного рентгенівського випромінювання, що не мають наведеної активності, для сучасних досліджень в галузі матеріалознавства та радіаційних технологій.

Ключові слова: сильнотрумовий релятивістський електронний пучок, генератор імпульсних напруг, прискорювач, вакуумний діод, генератор

гальмівного рентгенівського випромінювання.

Список публікацій, у яких опубліковано основні результати 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. Кріогенний конденсаційно-адсорбційний 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., Чуников П.Т. Магнитная система для транспортировки сильнооточного 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.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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, (участь в обговоренні).

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, (участь в обговоренні).

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 влияния сильнооточных 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, (участь в обговоренні).

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, (доповідач).

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, (доповідач).

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, (доповідач).

ABSTRACT

Batrakov A.B. «Radiation-beam technological complex on the basis of pulsed power-current the relativistic electron beam accelerators» – Research Project, Manuscript copyright.

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

The thesis presents the solution of an important scientific-and-engineering problem concerning the development and experimental investigation of high-energy radiation-beam technological complex based on the pulsed relativistic electron beam (REB) accelerators used in the field of nuclear materials science and radiation technologies.

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 developed radiation-beam complex has two irradiating factors:

- concentrated energy fluxes (REB with energy of $0,35 < E_{\pi} < 0,75$ MeV and $I_{\pi} \approx 21$ kA);
- high-energy X-ray bremsstrahlung with a maximum exposition dose of 9100 R and X-ray bremsstrahlung quantum energy from 0,35 to 0,75 MeV per pulse without induced activity.

The thesis consists of 4 chapters. **The first chapter** presents a review of the literature serving for estimation and analysis of the results obtained by other authors in different countries. Analysis of publications permits to make conclusions about new opportunities in developing and designing of high-energy radiation-beam technological complex that is little investigated and not reported in the special literature.

The second chapter considers the problem related to the production and transport of high-energy pulsed relativistic electron beam (REB).

The experiment on the formation of REB in the accelerator vacuum diode and its transport to the interaction zone has been carried out. Numerical calculations of REB parameters for diverse anode inserts, designed to use in the accelerator, has been performed. The influence of the conical anode insert on the REB current is studied.

On the base of the numerical simulation the influence of the anode insert shape and anode-cathode spacing size on the REB formation has been studied. It is shown that the use of the conical anode inserts is advisable because they allow obtaining of much higher currents ($I_{TH} = 17,17 \text{ kA}$) on the collector compared to the cylindrical anode inserts ($I_{TH} = 7,55 \text{ kA}$). An optimum geometry of electrodes and their arrangement in the accelerator vacuum diode is proposed.

The influence of the length of the correcting solenoid sections on the strength in the REB interaction zone has been investigated.

A magnetic system has been developed and tested. This system operates with an variable frequency of pulse repetition without use of storage rings, dischargers, transformers, ballast resistors. The influence of the length of the correcting solenoid sections a magnetic system on the strength in the REB interaction zone has been investigated. Characteristics of the developed magnetic system are in good coincidence with the design data. The magnetic system permits to transport REB through the drift chamber into the interaction chamber.

One of the ways for enhancing the REB accelerator power is to make a magnetic insulation of the vacuum diode and to increase the magnetic field strength in it. The results of designing a combined pulsed magnetic system are reported. In order to increase the REB current and decrease its loss on the accelerator column elements a

magnetic system consisting of two solenoids has been developed. It is shown that the magnetic system comprising two solenoids with a magnetic field strength of $1,7 \cdot 10^6$ A/m can provide the bunching and transport of REB with a current higher than 20 kA.

The proposed magnetic system design completely accomplishes a task on focusing and transport of REB to the target which is used for production of maximum X-ray bremsstrahlung doses.

The investigation on the duration and intensity of the high-current REB as a function of the residual gas level in the accelerator has been carried out. The vacuum system was upgraded to increase the REB pulse duration. The REB accelerator operates in the cyclic duty due to the use of cryogenic evacuation equipment and creation of oil-less vacuum. For the vacuum system operation a nitrogen condensate-adsorption pump (Patent for invention No 63554) was applied to increase the REB current duration by $1,5 \mu\text{s}$. The modernized vacuum pumping system allows one to attain the operating conditions of $1 \cdot 10^{-4}$ Pa and to reduce significantly the evacuation time of the accelerator vacuum chamber between the pulses. It is established experimentally that the energy store loss of REB passing to the target, is, in particular, the REB slowing-down on the molecules of organic compounds and condensed gases. Then a part of the REB goes away onto the drift chamber walls.

In the course of experiments the following is reached: first – the pumping-out of oxygen compounds, being poorly pumped with the available evacuation systems, is improved, second – the time of residual gas pumping between the REB pulses is decreased, third – the time of REB current pulse is increased to $1,5 \mu\text{s}$.

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.

A diagnostic module having a charging voltage of about 90 kV, discharge current of about 50 kA, current increasing front of 600 ns was developed and fabricated to simulate the operation of the accelerator, to upgrade its parts and to perform the

diagnostics of developed measuring devices. A high-voltage discharger designed for the diagnostic module allows its operation within the range of voltages from 5 to 9 kV.

The third chapter introduces the X-ray bremsstrahlung generator developed on the base of nanosecond and microsecond REB accelerators.

Numerical computations for critical parameters of hard X-ray bremsstrahlung (XRB) have been performed. The investigation results on the development of a high-energy pulsed REB-based source generating a hard XRB are presented. The space-angular XRB intensity distribution has been investigated as a function of the current, energy and geometry of REB. To carry out this experiment the hard XRB measuring procedures and devices for XRB generation and diagnostics have been upgraded.

Numerical calculations of XRB parameters have been performed. The efficiency of REB energy conversion into XRB energy on the REB accelerators has been investigated. On the basis of nanosecond and microsecond accelerators of REB with electron energy of $0,35 < E < 0,75$ MeV and cross-section area of $12 < S_{\gamma} < 700$ mm². The sources provide an exposition dose of about 9100 R per current pulse without induced activity, besides, the absorbed dose can be varied from 10^2 Gr to 10^5 Gr For the first time, on the RBC the X-ray bremsstrahlung dose was increased by 70% along the accelerator axis from the converter due to the use of REB annular geometry. It has been proved experimentally that for the high-current pulsed REB with $E \approx 0,75$ MeV it is necessary to use a Ta converter having a longer life time before fracture and, consequently, a higher X-ray bremsstrahlung dose can be obtained. The vacuum X-ray channels with combined converters, having the useful irradiation area of about 700 mm², were developed to expose the material samples to the X-ray bremsstrahlung without faulty vacuum conditions. Experimental investigations on the γ – irradiation of reactor materials (Hastalloy) were carried out. It is shown that the alloy microstructure before and after irradiation is almost the same. The hard X-ray bremsstrahlung dose per pulse of REB is determined for the high-current accelerators «Temp-A» and «Temp-B». The X-ray bremsstrahlung direction paths were calculated and experimentally measured by various methods for different REB geometry (continuous and tubular).

The methods and technology of irradiating the XRB structural materials resistant to the radiation action on the radiation-beam technological complex are described.

The fourth chapter describes the problems of using the pulsed concentrated high-energy energy fluxes (REB) with energy of 350 - 750 keV and current of 2-20 kA.

The results of investigations into the high-energy REB influence on the converter materials and structural materials being resistant to the radiation action are reported. The converters made from tungsten, tantalum, molybdenum have been irradiated with REB and then investigated using metallographic analysis. A material of the converter designed for generation of the high-energy X-ray bremsstrahlung on the radiation-beam complex (RBC) was selected.

It has been proposed to apply in experiments a duplex treatment consisting in the repeated irradiation of the coating deposited on the surface. By this way it is possible to reach a hard alloying between the coating material and the substrate. Basing on the experimental results, related with the processes of gas-plasma torch (GPT) forming and extending (under the influence of the tubular μ s REB) onto the solid surface, the method of coating deposition on the substrate was developed.

For the first time, in the process of the dissertation investigations for the radiation-beam technological complex of measuring elements, methods and devices was developed including:

- the procedure for measuring the currents in the magnetic field solenoids up to 1000 kA with the Hall device operating within the measurement range of ± 200 A;
- the design of a combined voltammeter for current and voltage measurement at the high-voltage generator (HVG) in one and the same point without short-time displacement;
- the procedure for measuring the charge of the last condenser in the HVG cascade each. The data on the condenser charges are sent to the device which records the information via the optical cable;
- the synchronizer, designed for the REB accelerator «Temp-B», provided with a galvanic separation of input and output circuits, which permits to set pulse delays in the

range from 1 μ s to tens of milliseconds and eliminates the effect of loop currents flowing in the common grounded circuits and exerting the influence on the measuring equipment operation.

The developed radiation-beam technological complex based on the high-current pulsed relativistic electron beam accelerators was used in the Institute of Solid State Physics, Material Sciences and Technologies in the NSC «KIPT» as a research base for fulfillment of Project № X-815 «Experimental and theoretical study of nuclear materials with nano- and quasi-crystalline structure based on transition Ti, Zr, Hf, Ni metals under the effect of high-energy X-ray bremsstrahlung» and Project № X-5-527 «Investigations on the changes in the structure and properties of structural reactor materials under the action of pulsed electron beams and high-energy X-ray bremsstrahlung» (Introduction Certificate is attached).

The results obtained in the dissertation work can be applied for developing more efficient high-energy electron beam accelerators designed for nuclear physics experiments and for designing and building high-energy X-ray bremsstrahlung sources without induced activity, as well as for current investigations in the field of materials science and radiation technologies.

Key words: High-current relativistic electron beam, high-voltage generator, accelerator, vacuum diode, pulse duration, X-ray source

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	21
ВСТУП.....	22
РОЗДІЛ 1. СИЛЬНОСТРУМОВІ ПРИСКОРЮВАЧІ РЕЛЯТИ- ВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ ТА ДЖЕРЕЛА ГАЛЬМІВНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	31
1.1. Джерела рентгенівського випромінювання на основі прискорювачів електронів, їх дослідження і особливості.....	31
1.2. Застосування потужного гальмівного рентгенівського випромінювання в радіаційній фізиці твердого тіла.....	34
1.3. Взаємодія гальмівного рентгенівського випромінювання з речовиною...	36
1.3.1. Коефіцієнти ослаблення гальмівного рентгенівського випроміню- вання в речовині.....	36
1.3.2. Особливості впливу жорсткого гальмівного рентгенівського випромінювання на тверде тіло	39
1.4. Отримання, фокусування і транспортування сильнострумових реляти- вістських електронних пучків в вакуумних діодах прискорювачів.....	41
1.4.1. Отримання електронного пучка.....	41
1.4.2. Фокусування електронних пучків у діодах.....	43
1.4.3. Подовження імпульсу струму релятивістських електронних пучків.....	46
1.5. Обґрунтування досліджень.....	49
1.6. Висновки	50

РОЗДІЛ 2. ОТРИМАННЯ, ФОКУСУВАННЯ, ТРАНСПОРТУВАННЯ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ.....	51
2.1. Сильнострумовий прискорювач електронів «Темп-А»	51
2.2. Сильнострумовий прискорювач релятивістських електронних пучків «Темп-Б» з низьким імпедансом.....	56
2.2.1. Генератор імпульсної напруги прискорювача релятивістських електронних пучків «Темп-Б»	59
2.2.2. Числове моделювання процесів генерації і транспортування релятивістських електронних пучків на прискорювачі «Темп-Б»... ..	66
2.2.3. Магнітна система для генерації і транспортування релятивістських електронних пучків.....	73
2.2.4. Комбінована імпульсна магнітна система прискорювача релятивістських електронних пучків «Темп-Б».....	78
2.3. Діагностика елементів, вузлів прискорювачів релятивістських електронних пучків та параметрів релятивістських електронних пучків	80
2.3.1. Схема управління, вимірювальні методики та елементи діагностики магнітної системи прискорювача релятивістських електронних пучків «Темп-Б».....	81
2.3.2. Діагностичний модуль та вимірювач зарядної напруги у генераторі імпульсної напруги	87
2.3.3 Вимірювання високих напруг і імпульсних струмів на радіаційно-пучковому комплексі.....	90
2.4. Дослідження залежності параметрів релятивістських електронних пучків від рівня тиску залишкових газів в вакуумному діоді прискорювача	93
2.4.1. Модифікована схема вакуумної відкачки прискорювача релятивістських електронних пучків.....	93
2.4.2. Вплив тиску залишкових газів на тривалість розряду прискорювача релятивістських електронних пучків	99
2.5. Висновки	102

РОЗДІЛ 3. ГЕНЕРАТОРИ ГАЛЬМІВНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БАЗІ ІМПУЛЬСНИХ СИЛЬНОСТРУМОВИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ.....	105
3.1. Розрахунок основних параметрів генератора гальмівного рентгенівського випромінювання на радіаційно-пучковому комплексі.....	105
3.2. Обґрунтування вибору матеріалу конвертера для отримання гальмівного рентгенівського випромінювання.....	108
3.3. Генератори гальмівного рентгенівського випромінювання.....	109
3.4. Експериментальне дослідження просторово-кутового розподілу інтенсивності гальмівного рентгенівського випромінювання.....	113
3.5. Дослідження впливу гальмівного рентгенівського випромінювання на конструкційні матеріали, перехідні метали Ti, Cr, Hf, Ni і сплав Хастеллой.....	120
3.6. Висновки.....	123
РОЗДІЛ 4. ОПРОМІНЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ СИЛЬНОСТРУМОВИМИ РЕЛЯТИВІСТСЬКИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ПУЧКАМИ.....	125
4.1. Особливості впливу сильнострумових релятивістських електронних пучків на конвертери з конструкційних матеріалів.....	125
4.2. Дослідження механізмів радіаційного впливу імпульсних релятивістських електронних пучків на конструкційні матеріали.....	130
4.3. Методи опромінення матеріалів електронними пучками на радіаційно-пучковому комплексі.....	133
4.4. Висновки.....	135
ВИСНОВКИ	137

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	140
ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ.....	157
ДОДАТОК Б. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ....	160

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ВЧ	високочастотний
РЕП	релятивістський електронний пучок
ГРВ	гальмівне рентгенівське випромінювання
РПК	радіаційно-пучкових комплекс
ЦФ	циліндр Фарадея
ГН	генератор імпульсних напруг
КДМІ	кільцевий діод з магнітною ізоляцією
КП	камера прискорювача
МН	магніторозрядний насос
ГПФ	газоплазмовий факел
АЕ	акустична емісія

ВСТУП

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 $E_{\text{п}} \sim 1 \dots 100 \text{ MeV}$. 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 сильнострумових 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 сильнострумових 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 X-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 на базі імпульсних сильнострумівих 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 кріогенну 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 $E_{\pi} \approx 0,75$ МеВ.

Об'єктом дослідження є процеси отримання РЕП сильнострумівими 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 сильнострумівих 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 (ПДО-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 гальмівного рентгенівського випромінювання 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 кріогенної 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 сильнотрумового радіаційно-пучкового технологічного комплексу для дослідження процесів взаємодії потужного ГРВ з конструкційними матеріалами стійкими до радіаційного навантаження. Розширено можливості діючих прискорювачів, це 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 забезпечує захист від впливу контурних струмів, 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 ГІНа розроблено комбінований прилад, який дозволив вимірювати ці параметри в одній точці і без тимчасового 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 сильноструміві прискорювачі РЕП, як експериментально-дослідна база, при виконанні проектів № Х-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 № Х-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: XIX Міжнародному семінарі по прискорювачам заряджених частинок, Алушта, Крим 2005 [11], XVIII Міжнародної конференції по фізиці радіаційних явищ та радіаційному матеріалознавству, Алушта, Крим 2008 [12], XXIII Міжнародному семінарі по прискорювачам заряджених частинок, Алушта, Крим 2013 [13], XXIV International Workshop on Charges Particle Accelerators, Kharkov, Ukraine, 2015 [14]. International Conference and School on Plasma Physics and Controlled Fusion, Kharkov, Ukraine, 2016 [15]. XXV 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.

РОЗДІЛ 1. СИЛЬНОСТРУМОВІ ПРИСКОРЮВАЧІ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ ТА ДЖЕРЕЛА ГАЛЬМІВНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

У даному розділі представлено огляд сучасних джерел для отримання ГРВ та концентрованих потоків енергії, розглянуто їх застосування в радіаційній фізиці твердого тіла. На підставі аналізу взаємодії ГРВ з речовиною сформульовані вимоги до потужного джерела ГРВ без наведеної активності. На підставі загальних і специфічних вимог до отримання, фокусування та транспортування концентрованих потоків енергії розроблена концепція збільшення потужності РЕП без збільшення запасеної енергії. Обґрунтована необхідність використання безмасляної криогенної вакуумної системи у прискорювачах для збільшення та подовження імпульсу струму концентрованих потоків енергії.

1.1 Джерела рентгенівського випромінювання на основі прискорювачів електронів, їх дослідження і особливості

Створення нових матеріалів і вивчення їх властивостей є одним з найважливіших завдань для реакторного машинобудування. Вивчати їх властивості під впливом опромінення можна за допомогою потужних джерел гальмівного рентгенівського випромінювання [17, 18, 19]. Серед джерел випромінювань одне з головних місць займають прискорювачі, що генерують РЕП з енергією в сотні кеВ [20-33].

У Сполучених Штатах Америки прискорювальний комплекс AURORA (Harry Diamond Laboratory, Вашингтон, США) генерував одночасно чотири електронних пучка з енергією електронів близько 10 МеВ, повним струмом 2мА, сумарною потужністю 20 ТВт при тривалості імпульсу $\tau \sim 120$ нс. Характерна енергія гамма - квантів, отриманих в цих експериментах, становила близько 3 МеВ. Доза гальмівного випромінювання в об'ємі 1 м³, що примикає до анодів

чотирьох електронних гармат, досягала значення $5 \cdot 10^4$ рад [34]. Прискорювач HERMES III в Sandia National Laboratory мав такі параметри електронного пучка: 19 MeV, 0,7 MA, 13 TW, 25 ns. На цьому прискорювачі на площі $S = 80 \text{ cm}^2$ отримана потужність дози до $3,5 \cdot 10^{13}$ рад/с [35, 36]. У свою чергу, для завдань рентгенографії рухливих об'єктів, необхідна наявність рентгенівських спалахів короткої тривалості на рівні 10 – 100 ns, що забезпечить розмиття деталей досліджуваного об'єкта, в масштабі не більше 1 мм навіть при русі його зі швидкістю 10^6 cm/s . Для цієї мети, наприклад, в експериментах на прискорювачі «PULSERAD 1480», створеного фірмою Physics International (США), було використано самофокусування електронного пучка в діоді з катодом у вигляді усіченого конуса, що забезпечило густину струму електронного пучка на аноді 1 - 2 кА/см² і характерний розмір джерела випромінювання масштабу $\sim 3,5$ мм. При цьому, на аноді була отримана густина потужності 10^{13} Вт/см² [37].

У Російській Федерації одним з найбільш потужних ядерно-опромінюючих комплексів (ЯОК) є комплекс «ПУЛЬСАР» Всеросійського науково-дослідного інституту експериментальної фізики (м. Саров), що має широкий спектр факторів опромінення: потужність дози, доза гамма-випромінювання, гальмівного випромінювання і флюенс нейтронів. Базовою установкою комплексу «ПУЛЬСАР» є потужний імпульсний лінійний індукційний прискорювач електронів ЛПУ-30 [38-40].

На Україні до аналогічних комплексів можна віднести лінійні прискорювачі електронів ЛПЕ-10, ЛПЕ-40, ЛПЕ-100, що спроектовані і працюють в ННЦ «ХФТІ», м. Харків [41-46]. Ці радіаційні комплекси були створені для [47-50]:

- проведення досліджень і випробувань на стійкість спеціальних виробів, їх елементів, електронно-компонентної бази, радіоелектронної апаратури, на моделюючих установках, та опромінюючих комплексах з одно факторним і комплексним впливом іонізуючих випромінювань.

- розробки методів досліджень і випробувань радіаційної стійкості вузлів виробів, електронної компонентної бази і апаратури космічних апаратів до дії іонізуючих випромінювань штучного і природного походження;

- проведення робіт по розробці, застосуванню та вдосконаленню методів вимірювань радіометричних і дозиметричних характеристик високоінтенсивних імпульсних полів гальмівного, гамма, нейтронного і електронного випромінювань для діагностики роботи моделюючих установок, комплексів опромінення, і визначення параметрів радіаційного навантаження випробовуваних об'єктів;

- проведення науково-дослідних робіт з вивчення поведінки реакторних матеріалів, вузлів, елементів і пристроїв в ядерних енергетичних установках.

Застосування прискорювачів РЕП, як джерел потужного ГРВ, має деякі особливості, що відрізняють їх від ізотопних джерел γ - випромінювання. Можливість їх використання зумовлена наступним:

- розроблено технології з опромінювання матеріалів, для реалізації яких застосування прискорювачів РЕП є технічно доцільним;

- розроблено методи розрахунку установок, застосування яких дозволяє визначити необхідні для цього процесу характеристики прискорювача: потужність, енергію, максимальний ККД, рівномірність поглинених доз, як по поверхні, так і по товщині об'єкта;

- значні потужності доз (на два-три порядки перевищують потужності доз, одержуваних за допомогою джерел γ - випромінювання), потребують менший час опромінення;

- витрати на опромінення за допомогою прискорювачів електронів набагато менші, ніж у джерел γ - випромінювання ^{60}Co або ^{137}Cs ;

- прискорювачі електронів у вимкненому стані, на відміну від ізотопних джерел випромінювань, не становлять небезпеки для навколишнього середовища і обслуговуючого персоналу.

Рентгенівські установки на прискорювачах електронів поділяють на установки для дослідницьких цілей і установки для проведення робіт в промисловому і напівпромисловому масштабах [51]. Принципова відмінність полягає в тому, що перші досить універсальні, а другі використовуються в вузьких межах технологічного процесу. Прискорювачі цих двох типів установок розрізняються за потужності пучка, за надійністю і довговічністю [52-54]. В

даний час, в промисловості і технологічних центрах усього світу використовується понад 1100 прискорювачів з енергією електронів 0.4...5 MeV і потужністю 10-200 кВт. На прискорювачах реалізовано понад 20 радіаційних технологій [55-58]:

1. Радіаційно-біологічні технології: стерилізація виробів медичного призначення, радіаційна обробка лікарської сировини, радаптертізація харчових, сільськогосподарських продуктів, біологічно активних домішок до їжі, передпосівне опромінення і радіаційна селекція насіння, радіаційне "зшивання" біологічно активної речовини з полімером для виробництва ліків, електронно-променева технологія виробництва гелів для використання в медицині і біотехнології.

2. Радіаційно-хімічні технології: радіаційне модифікування полімерів, труб, ізоляції проводів і кабелів, вулканізація гумотехнічних виробів, виробництво штучних шкір і склопластиків, затвердіння лакофарбових покриттів, виробництво радіаційно-модифікованих волокнистих плит і деревинно-стружкових виробів, радіаційно-термічний високотемпературний газофазний синтез надчистих реакційних продуктів, радіаційне затвердіння бетонполімерних матеріалів.

3. Радіаційно-фізичні технології: радіаційна модифікація напівпровідникових приладів, модифікація фізико-хімічних властивостей кристалів, дорогоцінних каменів, нано порошків, поверхневе зміцнення, полірування, легування металів, сплавів, кераміки, підвищення зносостійкості, корозійної стійкості, динамічної міцності при електронно-променевої обробці виробів.

1.2. Застосування потужного гальмівного рентгенівського випромінювання в радіаційній фізиці твердого тіла

На підставі наявної в літературі інформації слід виділити наступні основні напрямки використання потужних потоків γ -квантів в радіаційній фізиці твердого тіла:

- а) поліпшення параметрів напівпровідників;
- б) імітація впливу реакторного опромінення на властивості матеріалів;
- в) моделювання впливу іонізуючого випромінювання на гірські породи (кераміки) в рамках вирішення проблеми захоронення радіоактивних відходів.

Постійно зростаючі вимоги до стійкості напівпровідникової електроніки обумовлюють значний інтерес до досліджень і розробок способів зниження концентрації дефектів в напівпровідникових матеріалах приладів. Після γ опромінення з дозами $10^3 - 10^6$ Гр (від джерел ^{60}Co) кремнієвих НВЧ діодів, спостерігається істотне поліпшення їх параметрів. Такий підхід дозволяє використовувати γ - обробку як технологічний процес на завершальному етапі виготовлення діодів після їх складання у корпуси, коли високотемпературна обробка принципово неможлива.

В області реакторного матеріалознавства, в даний час, існує два підходи до проблеми оцінки впливу γ - квантів, які є одним з основних видів випромінювань в збірках матеріалів ділення. Відповідно до першого підходу, що розвивається в Інститут атомної енергії (ІАЕ) ім. Курчатова (м. Москва), вплив реакторного γ - випромінювання забезпечує радіаційний відпал дефектів. На алмазі, графіті та корпусній сталі було показано, що збільшення густини потоку γ - квантів призводить до зниження концентрації дефектів і зниження ступеню крихкості сталі. Інший підхід, що розвивається співробітниками Окриджської національної лабораторії ORNL (США), передбачає, що γ - опромінення в теплових реакторах може вносити істотний внесок в крихкість корпусів. Цей вклад особливо великий для реакторів з великим водяним зазором між активною зоною і корпусом реактора. Прикладами таких реакторів є "киплячі" реактори типу киплячий водяний реактор (BWR), тобто реактори, в яких відношення густини потоків γ - квантів до густини потоків нейтронів на корпус досягає значень $10^3 - 10^4$.

Поховання радіаційних відходів із значним енерговиділенням за акт розпаду радіонуклідів призводить до передачі енергії в ізолюючі оболонки у вигляді іонізуючого випромінювання і тепла. У зв'язку з цим, виникає завдання моделювання та імітації впливу випромінювання на структурні компоненти

сховищ з кварцу, глини, шпату і ін. При цьому, зміни, які фіксуються у приповерхневих шарах цих матеріалів, за рахунок радіації починають проявлятися вище граничної дози 10^6 Гр, а доза опромінення, при якій мінерали втрачають кристалічну структуру (друга гранична поглинена доза), становить $\sim 10^{10}$ Гр.

1.3. Взаємодія гальмівного рентгенівського випромінювання з речовиною

У даному підрозділі представлено огляд сучасних джерел для отримання ГРВ. На підставі аналізу взаємодії ГРВ з речовиною сформульовані вимоги до потужного джерела ГРВ без наведеної активності. Розглядається взаємодія гальмівного рентгенівського випромінювання з речовиною, та коефіцієнти ослаблення гальмівного рентгенівського випромінювання в речовині. Розглянуті особливості впливу жорсткого гальмівного рентгенівського випромінювання на тверде тіло.

1.3.1. Коефіцієнти ослаблення гальмівного рентгенівського випромінювання в речовині

Процеси взаємодії рентгенівського випромінювання з речовиною активно досліджуються в останні десятиріччя в зв'язку з проблемою захисту від випромінювань ядерно-технічних установок [59-67]. Особливої актуальності ця проблема набула у зв'язку зі створенням лазерів в рентгенівському діапазоні і інших потужних джерел γ - випромінювання. При взаємодії потоку жорстких фотонів з речовиною відбувається ослаблення випромінювання, при цьому втрачене випромінювання призводить до певних змін в самій речовині [68-70]. Очевидно, що характер взаємодії істотно залежить від енергії фотонів і від інтенсивності випромінювання [71].

Будемо спочатку вважати, що інтенсивність γ - випромінювання невелика і процес взаємодії фотонів з речовиною можна розглядати як послідовність статистично незалежних подій. Це припущення дозволяє вважати, що спад фотонів в пучку при взаємодії його з речовиною пропорційний пройденій відстані dx і числу падаючих фотонів n

$$dn = -\mu \times n \times dx, \quad (1.1)$$

де μ - так званий лінійний коефіцієнт ослаблення, m^{-1} .

Вирішуючи отримане рівняння, знаходимо:

$$n = n(0) \times e^{-\mu x}, \quad (1.2)$$

тобто, число фотонів, що залишилися в пучку, експоненціально зменшується з відстанню.

Коефіцієнт μ -число зіткнень фотонів на одиниці шляху. Тому, коефіцієнт μ визначає ймовірність зіткнень фотонів з електронами або ядрами (в залежності від енергії випромінювання). Оскільки ця ймовірність пропорційна щільності електронів (або ядер) в речовині N , то

$$\mu = \sigma \times N, \quad (1.3)$$

де σ - коефіцієнт пропорційності, який називають мікроскопічним поперечним перерізом. Одиниця виміру σ - 10^{-24} cm^2 , яка називається Барн.

Для того, щоб вивчити як характер ослаблення потоку в речовині, так і властивості речовини під дією випромінювання, необхідно знати елементарні процеси взаємодії жорстких фотонів з речовиною. Такими елементарними процесами є взаємодія фотонів з електронами, нуклонами ядра [72-75]. Найбільш важливими є наступні процеси:

1. Фотоелектричний ефект, який полягає в іонізації атомів. В результаті впливу фотонів, атоми речовини іонізуються - електрони переходять у вільний стан, якщо енергія фотона E_γ перевищує енергію зв'язку електрона.

2. Комптонівське розсіювання або ефект Комптона. Цей процес полягає в тому, що фотон, в результаті взаємодії з електроном, передає йому частину енергії

та змінює напрямок свого руху. При цьому довжина хвилі розсіяного фотона збільшується.

3. Народження фотоном електрон-позитронних пар у полі ядра або полі електрона. Якщо енергія фотонів більше, ніж енергія зв'язку нуклона в ядрі, то можуть відбуватися процеси взаємодії з ядром фотона, що супроводжуються випусканням нейтронів, протонів, дейтронів, тобто можуть відбуватися фотоядерні реакції. Відносна участь цих реакцій в процесах ослаблення пучка фотонів в речовині незначна, але вони можуть з успіхом застосовуватися для вибіркового впливу на тверде тіло.

Таким чином, при взаємодії жорстких фотонів з речовиною можливі кілька процесів, в результаті яких відбувається ослаблення пучка. Так як ці процеси відбуваються незалежно, то можна уявити коефіцієнт ослаблення пучка у вигляді трьох доданків $\bar{\mu} = \bar{\tau} + \bar{\xi} + \bar{\chi}$, обумовлених відповідно фотоефектом, комптонівським розсіюванням і народженням електрон-позитронних пар.

Для жорсткого ГРВ в діапазоні енергій $0,2 \text{ MeV} < E_\gamma < 1 \text{ MeV}$ для Fe і Al основним процесом є комптонівське розсіювання. У разі γ - випромінювання з енергіями фотонів $10 \text{ MeV} < E_\gamma < 200 \text{ MeV}$ (для тих же елементів) основними є процеси народження електрон-позитронних пар.

Якщо речовина являє собою хімічну сполуку атомів або суміш атомів, то масовий коефіцієнт ослаблення такої речовини визначається шляхом усереднення масових коефіцієнтів ослаблення складових атомів, відповідно до масової частки кожного елемента речовини

$$\bar{\mu} = \sum_i n_i \bar{\mu}_i, \quad (1.4)$$

де n_i - масова частка i -го елемента з масовим коефіцієнтом ослаблення.

Крім коефіцієнтів ослаблення часто використовують ще одну важливу величину, що характеризує процеси взаємодії випромінювання з речовиною - середню довжину вільного пробігу фотона. Для вузького пучка, тобто в який не повертаються розсіяні фотони, середня довжина вільного пробігу дорівнює

величині, зворотній лінійному коефіцієнту ослаблення і відповідає товщині поглинача, послаблюючого потік фотонів цієї енергії в e разів.

1.3.2. Особливості впливу жорсткого гальмівного рентгенівського випромінювання на тверде тіло

Дослідженням впливу ГРВ випромінювання на тверде тіло присвячена велика кількість робіт [76-82]. При цьому, результати впливу жорстких фотонів на тверде тіло мають ряд особливостей в порівнянні з іншими видами опромінення. Особливістю ГРВ є, як уже зазначалося, велика глибина проникнення жорстких фотонів в речовину і, отже, велика глибина пошкодження твердого тіла, в порівнянні наприклад, з результатами впливу пучка електронів. Природно, що інтенсивність впливу жорстких фотонів, відповідно, менше. Результати впливу ГРВ на тверде тіло часто порівнюють з такими у разі пучків електронів [83]. Це пояснюється тим, що жорсткі фотони не безпосередньо взаємодіють з атомами твердого тіла, а через початкові утворення швидких електронів, які і впливають на атоми [84-85]. Однак, при досить високих енергіях фотонів можлива передача енергії фотона безпосередньо атомному ядру. Головним з таких процесів є фотоядерні реакції.

Загальним в розглянутих двох способах передачі енергії є прямий вплив електронів або фотонів на атоми, при чому енергія передається в одиничному акті зіткнення. Для фотонів, а також для електронів, в певній категорії твердих тіл можливі процеси передачі енергії атомів третього типу - в результаті реакції електронних збуджень. Особливістю цих процесів є те, що потенційна енергія атомів в решітці накопичується в результаті декількох актів енергетичного обміну.

Перейдемо до питання утворення дефектів в твердому тілі при дії на нього ГРВ [86, 87]. Найпростіший вид радіаційного пошкодження виникає в тому випадку, якщо будь-який атом, що взаємодіє з випромінюванням, отримує енергію E_g , необхідну для незворотнього зміщення з вузла кристалічної решітки в

проміжному стані. В цьому випадку пошкодження являють собою точкові дефекти: міжвузлові атоми і вакансії, якщо, звичайно, температура настільки низька, що зазначені дефекти є нерухомими. Ця температура для металів дорівнює приблизно 20°K . У цьому випадку, коли температури досить для того, щоб міжвузловий атом або вакансія були рухливими, відкривається можливість скупчення точкових дефектів. Найпростішим варіантом є те, що дефект, що дифундує через тверде тіло, зустріне інший дефект і утворює з ним пов'язану пару. Зв'язаний стан міжвузлового атома і вакансії називають парою Френкеля [88].

Пара пов'язаних дефектів грає роль зародка для конденсації дефектів подібного типу. Центрами конденсації радіаційних дефектів можуть служити і вже наявні в твердому тілі дефекти-дислокації, границі зерен, домішкові атоми. Отже, для того щоб утворився точковий дефект необхідно, щоб атом необоротно змістився. Очевидно, що концентрація точкових дефектів визначається перерізом зміщення атомів. Наприклад, для міді середній переріз атомного перерізу для γ -випромінювання з енергією 2 МеВ дорівнює $\approx 1,4$ МБарн, тобто, одного порядку перерізу розсіювання швидких нейтронів (≈ 1 МБарн). Відомо, що в ядерних реакторах на один акт ділення виникає близько двох швидких нейтронів і п'яти жорстких фотонів з середньою енергією 2 МеВ. Таким чином, кількість первинних зміщених атомів під дією швидких нейтронів і γ -опромінення в матеріалах реактора слід вважати майже однаковими. Однак, створені нейтронами первинні зміщені атоми мають набагато більшу енергією, ніж створені γ -опроміненням. Ці високоенергетичні дефекти здатні викликати наступні зміщення. Для міді цей каскад складається з декількох сот зміщених атомів. Жорсткі фотони в цікавому для нас діапазоні інтенсивності пучка викликають лише поодинокі зсуви. Тому ефективність γ -опромінення на два-три порядки менше, ніж у випадку швидких нейтронів. Однак, відмінною рисою γ -опромінення є те, що створюючи дефекти в твердому тілі і пов'язані з ним зміни властивостей, воно не викликає наведеної радіоактивності.

1.4. Отримання, фокусування і транспортування сильнострумових релятивістських електронних пучків в вакуумних діодах прискорювачів

Отримання потужного гальмівного рентгенівського випромінювання на прискорювачах РЕП пов'язано, в першу чергу, з необхідністю отримання РЕП зі струмом в десятки кА і можливістю його транспортування до джерела ГРВ. Питанням отримання, фокусування, транспортування РЕП присвячена велика кількість робіт [89-94]. В роботі [95] розглядається питання отримання РЕП з високим ККД. Були отримані важливі результати з перетворення енергії ГІНа в енергію РЕП. Для збільшення струму РЕП, його інтенсивності в роботі [96] використовувалися різні форми електродів вакуумного діода прискорювача. Отримання граничних струмів РЕП розглядалось у роботах [97-102].

1.4.1. Отримання електронного пучка

Під сильнострумовими РЕП розуміють електронні пучки, струм яких обмежується їх власним магнітним полем у діоді. У той же час, магнітне поле пучка використовується для фокусування РЕП безпосередньо в самому діоді. Емісія електронного потоку проходить в результаті вибуху мікровістрів на поверхні холодного катода, в результаті чого утворюється шар густини плазми, з поверхні якої і виходить електронний пучок [103-108]. Під дією електронного бомбардування та інших фізичних факторів утворюється також шар густої анодної плазми [109-110]. Ці шари впливають на характеристики РЕП і його фокусування.

Застосування потужного зовнішнього магнітного поля, спрямованого уздовж електричного поля прискорення, дозволяє отримати сильнострумові пучки значної інтенсивності. У діодах інтенсивність пучка зростає з ростом магнітного поля [111-118]. Імпульсні сильнострумові електронні пучки формуються з використанням холодних катодів, що працюють в режимі вибухової електронної

емісії. Фізика електричного пробою вакуумних проміжків добре вивчена [119-123]. Принцип вибухової електронної емісії наступний. При подачі високої напруги в вакуумний проміжок на катод мікровістря з нього починають емітувати автоелектронний струм. Щільність струму автоелектронної емісії (A/m^2) визначається за формулою:

$$j = 2.3 \cdot 10^{-16} N_e \sqrt{T_e}, \quad (1.5)$$

де N_e – щільність електронів плазми, m^{-3} ; V/cm ; T_e – температура електронів плазми, eВ. У катодному факелі $N_e \approx 10^{26} m^{-3}$, $T_e \approx 1 \div 10, eВ$, отже щільність струму $j \approx 10^{12} A/m^2$ [124].

В результаті джоулевого розігріву вістрів автоемісійним струмом відбувається їх вибух, при якому відбувається фазовий перехід матеріалу катода в густу плазму. Питома енергія перед мікробибухом може досягати порядку $(2 - 8) \cdot 10^4 Дж/г^{-1}$. З цього моменту електрична міцність проміжку порушується, розвивається розряд зі зростаючою провідністю проміжку [125-126]. При цьому, в результаті взаємодії плазми з поверхнею катода, безперервно створюються умови для підтримки інтенсивної електронної емісії, і відбувається формування електронного пучка. Електрони, потрапляючи на анод, призводять до його нагрівання, випаровування і подальшої іонізації атомів у розрядному проміжку, так утворюється анодна плазма. Катодний і анодний факели рухаються назустріч один одному, плазма заповнює весь проміжок, що призводить до припинення формування пучка електронів [127]. Розряд після цього стає дуговим.

Емісійні властивості плазми катодного факела визначаються температурою, густиною плазми і величиною зовнішнього прикладеного електричного поля.

Утворення анодної плазми в потужних діодах є наслідком бомбардування пучком електронів поверхневого шару матеріалу анода. В роботі [128] було визначено питомий внесок енергії, необхідний для утворення шару анодної плазми в діоді, що складався з плоских катода і анода з графіту. Для цього експериментально вивчалася залежність первеанса електронного пучка від часу. За відхилення первеанса в бік його перевищення над теоретичною залежністю, що

відповідає закону $3/2$ для діода без іонів з плоскими електродами, і з урахуванням границі катодної плазми, що рухається, визначено момент утворення анодної плазми, достовірність якого була підтверджена також прямими оптичними вимірюваннями шару анодної плазми, що світився. Розрахунки питомого вкладу енергії електронного пучка в поверхневий шар графітового анода до моменту утворення дали середнє значення $\approx 0,4$ кДж/г. Так як це значення на порядок нижче, ніж необхідно для випаровування шару графіту, то передбачалось, що анодна плазма утворилася з газів, поглинених в графіті. В іншій роботі [129] за допомогою застосування різних прямих методик визначено питомий енергетичний вклад для утворення анодної плазми у поверхні алюмінію. Було встановлено, що потрібно від 1 до 3 кДж/г енергії електронного пучка для десорбції і іонізації газів з поверхневого шару матеріалу анода.

1.4.2. Фокусування електронних пучків в діодах

Фокусуванню РЕП в сильнострумових діодах приділяється велика увага [130-132]. У цих експериментах застосовувалися діоди, що мали діелектричні стрижневі або трубчасті катоди, діаметром 2 - 6 мм і більше, довжиною 20 - 40 см, що було необхідно для придушення предімпульса, з зазором між кромкою катода і плоским металевим анодом 0,5 - 5,0 см. Напруга, що прикладається до діода, змінювалась від 1,0 до 3,5 МВ. У дослідженнях на установці при напрузі на діоді 3,5 МВ було отримано сфокусований до ≈ 2 мм електронний пучок зі струмом до 40 кА і тривалістю 20 нс. Густина струму на діоді в цих дослідженнях досягала 1 MA/cm^2 . Імпеданс таких діодів становить десятки Ом, а струм діода був менше або дорівнював альфвенівському струму.

Експериментально було встановлено, що на початку імпульсу напруги електронний пучок, емітований з катода малого діаметру, розходився і формувався на аноді у відбиток ≈ 10 мм з відносно малою густиною струму. Щільна розгортка світіння плазми в зазорі між катодом і анодом показала [133], що пінчування РЕП в діоді відбувалося незадовго до перекриття проміжку

наявною плазмою, в результаті чого пучок фокусувався в відбиток на аноді діаметром близько 1 - 2 мм. У момент пінчування електронного пучка на осі діода між щільними шарами катодної і анодної плазми є плазма щільністю $\approx 10^{17}$ см⁻³, яка забезпечує нейтралізацію об'ємного заряду електронного пучка, що фокусується.

Як показують числові розрахунки сильнострумівих діодів з струмом $I < I_{кр}$ (де I – струм пучка, а $I_{кр}$ – критичний струм пучка), що представлені в роботі [131], кути падіння електронів на поверхню анода малі. Кути падіння електронів на анод зростають завдяки зростаючій дії власного магнітного поля пучка при підвищенні струму діода. Коли $I = I_{кр}$, характер електронних траєкторій змінюється, ламінарна течія електронів анод - катодного проміжку замінюється течією з пересічними орбітами. При струмі $I \geq I_{кр}$ ларморівський радіус електронів з енергією, що відповідає напрузі на діоді, стає рівним або менше зазору між катодом і анодом, і електрони починають рухатися в напрямку осі діоду. Відбувається пінчування електронного пучка, що призводить до його самофокусуванню на аноді. В роботі [134] представлені дані з фокусування сильнострумівих РЕП в діодах з трубчастим катодом і плоским анодом. Використання трубчастого катода дає змогу отримати вже на початку імпульсу вузький пучок, який стискується до осі системи зі швидкістю від 1 до 5 мм/нс, в залежності від матеріалу анода. Внаслідок, на аноді пучок електронів має діаметр менше 3 мм. Застосування таких катодів дає можливість отримати крутий фронт потужності сфокусованого РЕП [135]. На діодах, в яких використовувалася інжекція плазми, швидкість зростання потужності РЕП в пучку визначалася часом споживаної потужності в діоді, що складає близько 20-30 нс. Оптимальний розмір катода дозволяє більш 2/3 діодного струму сфокусувати в відбиток на аноді, площею в 0,1 см².

На прискорювачі GAMBLE - 1 (750 кеВ, 500 кА, 70 нс) при повній енергії в пучка від 8 до 9 кДж, а також на більш потужному прискорювачі GAMBLE - II (1,0 МВ, 670 кА, 50 нс) при повній енергії в РЕП близько 35 кДж проводилися експерименти з трубчастими катодами, що мають конусну форму на торці. Ці

катоди мали зовнішній діаметр 84 мм, а внутрішній - 39 мм, з кутом заточування на конус - 6° і анод - катодним проміжком 3,7 мм, імпеданс діода при цьому дорівнював 3 Ом. Цей катод забезпечував стабільне фокусування пучка на осі діода з діаметром його відбитка, який не перевищує $\varnothing 3$ мм. Щільність струму в відбитку досягала $1,6 \text{ MA/cm}^2$, а щільність потужності РЕП 10^{12} Вт/cm^2 . Швидкість наростання потужності становила 10^{11} Вт за час менше ніж 3 нс.

Швидкість стискання електронного пучка залежить від матеріалу анода. Передбачається, що на рух електронів у діоді впливає потік іонів, що йде з анода, і що швидкість стискання електронного пучка залежить від швидкості утворення і руху цих іонів. Автори [134] припустили, що іонний потік, що виходить з анода, породжено іонізацією газів, десорбційних газів з матеріалу анода внаслідок нагрівання його електронним пучком. З ростом атомного номеру матеріалу анода його поверхневий шар нагрівається швидше, так як питомі втрати енергії електрона в речовині зростають, що призводить до більш швидкої десорбції газу.

На думку авторів [134] умовами, що впливають на схлопування трубчастого сильнострумowego електронного пучка, є поверхневий нагрів анода, десорбція газу і утворення потоку іонів, спрямованого в бік катода.

Як показано в роботі [135], наявність анодного шару, що поширюється з поверхні анода, є необхідною і достатньою умовою для утворення пінча шляхом схлопування трубчастого циліндричного електронного пучка. Динаміка процесу така. При утворенні анодної плазми спочатку, в діоді спостерігається ламінарний потік електронів, що формується з катодної плазми. У більш пізній стадії, під дією електронного бомбардування виникає анодна плазма. Електрони, що входять в іонний шар поблизу границі анодної плазми під кутом ковзання, будуть повернуті назад в обсяг об'єму за рахунок дії магнітного поля і зниження дії електричного поля. Відбиті таким чином електрони будуть рухатися радіально в бік осі діода, доки не досягнуть області анода, де плазма відсутня. Збільшений електронний потік бомбардує анод, утворюючи досить щільний іонний шар, що забезпечує подальший радіальний рух електронного потоку. Утворення іонного шару, що забезпечує відображення в ньому електронів, відбувається за досить малий

проміжок часу ~ 1 нс, що й пояснює швидке схлопування електронного пучка. Оскільки рух утворених іонів практично не піддається дії магнітного поля, вони рухаються в напрямках, паралельних осі діода.

Основним висновком, зробленим в роботі [123] є те, що для початку фокусування електронів на ось діода необхідно не тільки перевищення струму діода над критичним $I \geq I_{кр}$, але і перевищення деякого критичного рівня енергетичного вкладу в матеріал анода (300 - 450 Дж/г для міді та латуні, для графіту 450 - 650 Дж/г).

1.4.3. Подовження імпульсу струму релятивістських електронних пучків

Електронні пучки останнім часом успішно застосовуються для нанесення покриття і отримання тонкої плівки за допомогою їх осадження на спеціальні підкладки при синтезі нанорозмірних ультрадисперсних порошоків. Необхідно відзначити чотири явних переваги застосування електронних пучків в порівнянні з лазерами, при отриманні газо-плазмового факелу при нанесення покриття:

- можливість опромінення великих площин (десятки см^2) з рівномірно розподіленою інтенсивністю, аж до 10^{12} Вт/ см^2 ;
- об'ємність поглинання виключає вибухове поглинання в тонкому розплавленому шарі мішені, яка характерна для лазерного опромінення;
- високий ККД поглинання пучків;
- можливість побудови одновимірної моделі процесу та більш точного опису взаємодії частинок з мішенню.

Для підвищення енергетичного вмісту в електронних пучках при збереженні стандартних параметрів установок, були проведені дослідження з подовження імпульсу генерації пучка від 100 нс до декількох мікросекунд. Тривалість генерації пучка в діоді обмежується різким зниженням його імпедансу через розширення потоків катодної і анодної плазми, що рухаються назустріч один одному. Для вирішення цього завдання є три способи. У першому випадку

збільшується анод - катодний проміжок при одночасному збільшенні площі катода, що дає можливість зберегти величину повного струму пучка. Збільшення магнітної компресії пучка необхідно для збільшення густини струму зі 100 А/см^2 до величини в кілька kA/см^2 . [136]. Внаслідок збільшення катод-анодного проміжку і збільшення густини струму, час заповнення плазмою діодного проміжку вдалося збільшити до 5 мкс . Енергетичний запас пучка в цих експериментах досягав 140 кДж при повному струмі пучка до 50 кА і при енергії електронів до 1 MeV . Другий спосіб збільшення тривалості генерації пучка пов'язаний з використанням магнітного поля для ізоляції анода від катода в вакуумному діоді. За цим принципом були побудовані перші коаксіальні діоди з магнітною ізоляцією (КДМІ), що мають кільцеву форму катода і анода. У цих діодах відсутня анодна фольга, яка використовується в якості анода в плоских діодах і є однією з причин швидкого заповнення діодного проміжку плазмою. При наявності магнітної ізоляції утворення катодної плазми в КДМІ не повинно призводити до швидкого перекриття діодного проміжку, оскільки швидкість її руху поперек магнітного поля повинна бути значно нижче, ніж уздовж нього. Однак, час генерації в цих діодах не вдається підняти вище $3\text{-}4 \text{ мкс}$ при густині струму 1 kA/см^2 всупереч нестійкості в шарах плазми в області аноду і катода. Як наслідок, для КДМІ не вдається передати в пучок енергію більше $50\text{-}100 \text{ кДж}$.

Третій спосіб збільшення імпульсу струму РЕП - отримання високого вакууму. При роботі форвакуумного насоса в робочий об'єм вакуумного діода прискорювача потрапляють пари масла [137]. При роботі прискорювача наявність парів масла призводить до перекриття катод - анодного проміжку і зриву високовольтної частини розряду. Він також призводить до суттєвих змін складу залишкової атмосфери у вакуумній камері і є вкрай небажаним.

Найпоширенішим методом удосконалення вакуумної системи, що працює з дифузійним насосом для зниження зворотного потоку масляних парів, є використання азотної пастки на вході в насос. Як показано в роботі [138], одним з ключових параметрів, що впливають на захисну здатність пастки, є температура її панелей, на яких конденсуються масляні пари. Так, питомий зворотний потік

масляних парів на годину з дифузійного насоса без пастки становить 5 мг год/см², а з використанням азотної пастки цей параметр зменшується до 1 мг год/см², що дозволяє ствержувати про високу ефективність даного рішення.

Найбільш ефективним засобом удосконалення вакуумної системи на базі дифузійного насоса є його заміна на криогенний безмасляний високовакуумний насос [140,141]. Тут можливі три варіанти рішення - використовувати турбомолекулярний, криогенно-адсорбційний або магніторозрядний насоси. Робота магніторозрядного насосу може вносити перешкоди в роботу діагностичного обладнання прискорювача. Слід зазначити, що даний тип насосів активно використовується в системах, де необхідно отримувати високий і надвисокий вакуум (до 10⁻⁸ Па) і утримувати його тривалий час. Однак вони погано справляються з відкачуванням парів води. Турбомолекулярний насос (ТМН) - кращий варіант заміни дифузійного насоса, який може працювати протягом тривалого часу при відкачці великих потоків газу, аналогічно дифузійному насосу. Сучасні ТМН з магнітним підвісом ротора мають високу надійність і мають ресурс безперервної роботи до 100000 годин. Ще одна перевага їх застосування - висока ступінь автоматизації, різні блокування не дозволяють експлуатувати насос в неприпустимих для нього режимах. Встановлювати сучасні ТМН на вакуумній камері можна в будь-якому положенні - а дифузійний насос можна підключити тільки у вертикальному положенні. Основним недоліком цих насосів є чутливість до проривів атмосфери. А в прискорювачах РЕП прорив атмосфери - це штатна ситуація, тому що має місце руйнування матеріалу мішені пучком. Іншим обмеженням використання ТМН в якості заміни дифузійного насоса є відсутність моделей з вхідним патрубком понад 320 мм. Суттєвим обмеженням використання ТМН є його вартість. Це одне з найдорожчих рішень, особливо в діапазоні насосів з вхідним патрубком починаючи з 200 мм.

Криогенні адсорбційні вакуумні насоси мають ряд переваг по відношенню до ТМН з точки зору отримання безмасляної відкачки. Швидкість відкачки цих насосів вище, ніж у ТМН з аналогічним прохідним перетином, швидкість

відкачування водяної пари так само, вище. Як і ТМН, він може встановлюватися на вакуумній камері в будь-якому положенні та має високий ступінь автоматизації. Прорив атмосфери ніколи не виведе даний насос з ладу. Кріогенні адсорбційні насоси набагато дешевше, ніж ТМН. Одним обмеженням є кінцева ємність адсорбційного матеріалу і, пов'язаний з цим, циклічний характер роботи - після відкачування певного обсягу газу їм потрібна регенерація [142]. У вакуумних системах, які працюють в циклічному режимі, кріогенні адсорбційні насоси є оптимальним вибором. Для великих систем з наплення, аерокосмічних установок альтернативи кріогенним адсорбційним вакуумним насосам немає. Існують кріогенні насоси з вхідним патрубком до 1200 мм і продуктивністю до 60000 л/с по азоту. Таким чином, в діапазоні Ду від 160 мм кріогенні адсорбційні вакуумні насоси є, мабуть, найбільш ефективною заміною дифузійних насосів.

1.5. Обґрунтування досліджень

Для збільшення потужності радіаційно-пучкового технологічного комплексу на базі імпульсних сильнострумів прискорювачів РЕП потрібно розв'язати ряд наукових та експериментальних завдань, а саме:

1. Збільшити потужність РЕП та ГРВ на прискорювачі можна удосконаливши його окремі вузли. Для цього потрібно розробити комплексний метод збільшення потужності РЕП та ГРВ при незмінному енергетичному запасі.

2. Щоб отримати потужні РЕП треба провести узгодження магнітного та електричного поля у вакуумному діоді прискорювача. Для цього методами математичного і фізичного моделювання електричного та магнітного поля потрібно розробити оптимальну конструкцію елементів вакуумного діода прискорювача.

3. Недостатня напруженість магнітного поля приводить до втрат інтенсивності РЕП. Для зменшення втрат інтенсивності РЕП потрібно розробити магнітну систему для формування та транспортування РЕП.

4. Наявність парів масла в об'ємі вакуумного діода приводить до зменшення тривалості та потужності РЕП. Для їх збільшення потрібно розробити безмасляну кріогенну вакуумну систему прискорювача РЕП з можливістю отримання робочого тиску залишкових газів у ньому на рівні $1 \cdot 10^{-4}$ Па.

5. Інтенсивність виходу ГРВ залежить від конструкції джерела ГРВ. Необхідно збільшувати час життя конверторів та рівень виходу з них ГРВ. Для цього потрібно розробити конструкцію потужного генератора ГРВ. Дослідити просторово-кутовий розподіл інтенсивності ГРВ в залежності від сили струму, енергії та геометрії РЕП.

1.6. Висновки

Представлений огляд літератури дозволяє оцінити і проаналізувати результати, отримані в інших роботах. Аналіз цих робіт дозволяє зробити висновки про напрямки, які мало вивчені та не опубліковані в спеціальній літературі. Отримання потужних релятивістських електронних пучків і розробка потужного джерела гальмівного рентгенівського випромінювання не радіаційного типу на їх базі визначає напрямки досліджень.

Для збільшення потужності концентрованих потоків енергії та гальмівного рентгенівського випромінювання на прискорювачах РЕП при незмінному енергетичному запасі необхідно розробити метод, що полягає у комплексному застосуванні: розроблених конструкцій елементів вакуумного діода в області формування та транспортування РЕП, застосуванні комбінованої магнітної системи з підвищеною напруженістю магнітного поля, використанні безмасляної кріогенної вакуумної системи, розроблених конструкцій генераторів ГРВ.

РОЗДІЛ 2. ОТРИМАННЯ, ФОКУСУВАННЯ, ТРАНСПОРТУВАННЯ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ

У даному розділі представлено результати досліджень з розробки комплексного методу збільшення потужності РЕП при незмінному енергетичному запасі. На основі проведеного числового моделювання визначено вплив форми анодних вставок та розміру катод-анодного проміжку на формування РЕП, показано, що доцільно використовувати анодні 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 тривалості та інтенсивності сильнострумівих РЕП в залежності від рівня залишкових газів в прискорювачі. Удосконалено систему безмасляної кріогенної вакуумної відкачки прискорювача РЕП «Темп-Б» при використанні розробленого форвакуумного кріогенного конденсаційно-адсорбційного насосу. Також у даному розділі представлено опис експериментального устаткування, розробленого комплексу вимірювальних елементів, методів дослідження.

2.1. Сильнострумівий прискорювач електронів «Темп-А»

Для вирішення завдань з отримання сильнострумівих РЕП і гальмівного рентгенівського випромінювання був використаний сильнострумівий прискорювач електронів, що працює в наносекундному та мікросекундному діапазонах (до 3 мкс), енергія пучка - до 0,6 МеВ і повна потужність в пучку складає 5 кДж. Як джерело високої напруги було використано восьмикаскадний генератор імпульсної напруги (ГІН), зібраний за схемою Аркадьєва-Маркса. Схема управління комутацією ГІНа, а також зовнішня частина прискорювальної колонки з вакуумним діодом, для підвищення електричної міцності, розміщені в

сталевому корпусі заповненому трансформаторним маслом. Діаметр бака 1,2 м, довжина ~ 4 м. Для заповнення всього обсягу бака необхідно близько 5 т трансформаторного масла. Застосування масляної ізоляції бака дозволяє підвищити стійкість роботи ГІНа від впливу зовнішнього середовища, а використання в якості зворотнього струмопроводу стінок бака значно зменшує рівень впливу перешкод і на багато знижує індуктивність ГІНа. Електрична схема прискорювача «Темп-А» приведена на рис. 2.1.

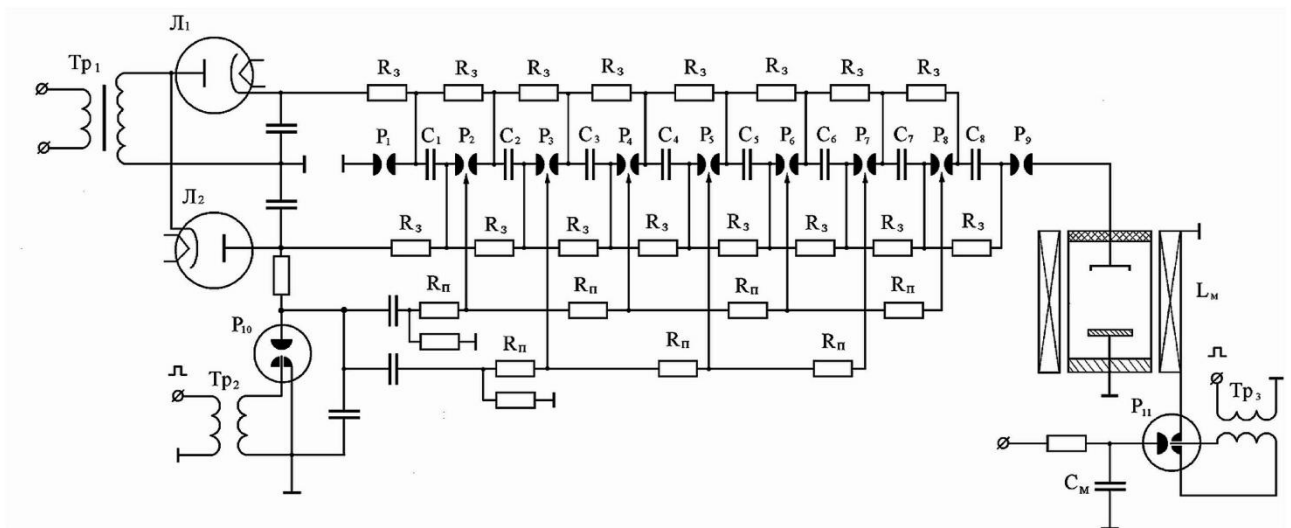


Рис. 2.1. Електрична схема прискорювача «Темп-А»: Tr_1 -підвищувальний трансформатор; Tr_2 -повітряний трансформатор запуску розрядників ГІНа; Tr_3 -повітряний трансформатор запуску конденсаторів батареї магнітного поля; L_1, L_2 -випрямні діоди; R_3 - зарядні опори; R_n - опори підпалу; P_{1-9} - розрядники ГІНа; C_{1-9} -конденсатори ГІНа; L_M -соленоїд магнітного поля; C_M -конденсатори батареї магнітного поля; P_{10} -розрядник включення розрядників ГІНа; P_{11} - розрядник включення магнітного поля.

Каскади ГІНа, в електричній схемі на рис. 2.1, набрані з конденсаторів типу КК-100-0.25, які заряджаються через рідинні опори величиною ~ 180 кОм. Опори виконані з вініпластових труб діаметром 5 см, заповнених розчином NaCl.

Енергетичний запас ГІНа при зарядній напрузі 100 кВ становить 50 кДж. Комутація каскадів ГІНа здійснюється за допомогою трьохелектродних

розрядників [95], заповнених азотом під тиском $5 \cdot 10^2$ Па. Ці розрядники мають найкращі показники за величиною розкиду і часу запуску в порівнянні з іншими конструкціями. Корпуси розрядників виготовлені з капролону. За допомогою фланцевих з'єднань розрядники з'єднуються послідовно один з одним, утворюючи моноблок з оптичним зв'язком розрядних проміжків для поліпшення запуску взаємним опроміненням.

Електроди розрядників виконані у вигляді напівсфер діаметром 2 см з нержавіючої сталі та кріпляться в корпусі на алюмінієвих конічних утримувачах. Розрядний проміжок першого розрядника ГІНа, що працює при половинній зарядній напрузі, дорівнює 8 мм. У наступних розрядниках зазори збільшуються до 15 мм в останньому розряднику, що в поєднанні з ультрафіолетовим підсвічуванням забезпечує послідовну комутацію каскадів ГІНа. Для захисту внутрішньої поверхні розрядників і збільшення терміну їх роботи, в них встановлені знімні циліндричні вставки з органічного скла. Блок з восьми розрядників випробувано при тиску 8...10 Па і показав високу надійність герметичності з'єднань.

Запуск ГІНа здійснюється подачею на керуючі електроди другого і третього розрядників імпульсу напруги позитивної полярності з амплітудою, що дорівнює половині зарядної напруги одного каскаду ГІНа і тривалістю переднього фронту $4 \cdot 10^{-8}$ с. Електроди наступних розрядників ГІНа мають примусовий омичний зв'язок ($R = 30$ кОм) і набрані з керамічних мало індуктивних об'ємних опорів.

Одним з основних елементів у прискорювачі є ізолятор прискорювальної колонки, що відокремлює вакуумну частину діода від ізоляційного середовища (трансформаторне масло) ГІНа. В якості високовольтного ізолятора прискорювальної колонки була обрана найбільш поширена циліндрична конструкція, що забезпечує максимальну міцність. Вона складалася з 14 циліндричних кілець з епоксидного компаунда з наповнювачем з оксиду алюмінію. Внутрішній діаметр прискорювальної колонки дорівнює 500 мм, а довжина 750 мм. Кільця, внутрішня поверхня яких нахилена під кутом 45° , чергуються з проміжними металевими (нержавіюча сталь) кільцями товщиною

5 мм і склеювалися епоксидною смолою. Розподіл потенціалу між високовольтними і градієнтними електродами в прискорювальній колонці встановлюється омичним дільником, який виконаний з ніхромового дроту, що має зовнішню біфілярну намотку, що межує з масляною ізоляцією, поверхні ізолятора. Загальний опір дільника ~ 2 кОм.

Джерелом сильнотривового електронного пучка в прискорювачі є магнітоізолюваний діод із катодом вибухової емісії. Схема діода показана на рис. 2.2.

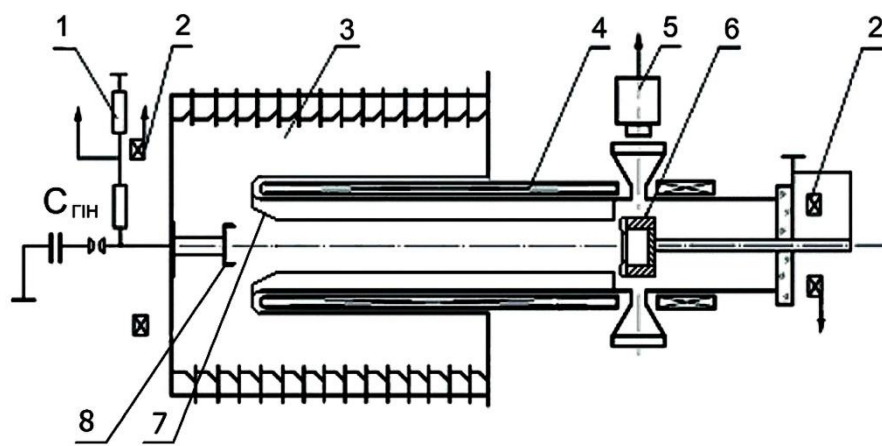


Рис. 2.2. Схема магнітоізолюваного діода: 1 - омичний дільник напруги; 2 - пояс Роговського; 3 - прискорювальна колонка; 4 - соленоїд; 5 - ФЕУ; 6 - колектор; 7 - анодна вставка; 8 – катод

У представленому на рис. 2.2 магнітоізолюваному діоді в якості емітера електронів використовуються циліндричні катоди (8) різних діаметрів з гострою кромкою, які кріпляться на стрижні (тримачі катода), приєднаному до високовольтного електроду прискорювальної колонки. Катоди виготовлені з нержавіючої сталі (X18H10T) і з графіту. Для кращого узгодження діода з джерелом живлення, а також для отримання однорідної емісії з шару катодної плазми, вигідно вибирати катоди з мінімальним часом затримки емісії.

У магнітоізолюваному діоді, що зібрано за схемою [115], анодом (7) є тонкостінний металевий кожух соленоїда з внутрішнім діаметром 15 см і зовнішнім діаметром 26 см. Торць кожуха соленоїда (4) розташовано на відстані

15 см від площини високовольтного електрода прискорювальної колонки. Циліндричний кожух соленоїда виготовлений з нержавіючої сталі (X18H10T) товщиною 1,5 мм і є «прозорим» для ізолюючого магнітного поля. Магнітна ізоляція такого зверненого діода здійснюється крайовим магнітним полем соленоїда (4).

Поряд зі збільшенням струму і тривалістю пучка важливим завданням є і підвищення густини струму електронного пучка. Для цього конфігурація діода, в якому анодом служила внутрішня поверхня кожуха соленоїда, була змінена за допомогою анодних вставок (7), що відповідає плоскому безплівковому діоду, що дозволяє отримувати потік електронів майже паралельний однорідному зовнішньому магнітному полю в камері дрейфу, що важливо для транспортування і фокусування пучка [102].

Кромку емісії електронів циліндричного катода (8) з радіусом 4 см розташовано в області наростаючого до анода магнітного поля соленоїда, де пробкове співвідношення, $\frac{H_0}{H_k} = 4$ (H_0 – напруженість магнітного поля в центрі соленоїда (А/м), H_k - напруженість магнітного поля в області кромки катода). Скорочення зазору між пучком і стінками трубчастих вставок, при зменшенні їх діаметра, має приводити до збільшення струму, що знімається, тобто до зниження імпедансу діода, а подовження вставки дозволяє збільшити довжину транспортування з мінімальними втратами струму пучка без зміни його геометрії [101]. Для створення поздовжнього ізолюючого і основного магнітного поля використано соленоїд (4), який розташований на зовнішній стінці камери транспортування пучка. Обмотка соленоїда двошарова з кількістю витків $N=230$. Середній діаметр обмотки соленоїда дорівнює 16 см, довжина 100 см, індуктивність $L = 0,8 \cdot 10^{-3}$ Гн. Використання обмотки соленоїда з двох шарів обумовлено тією обставиною, що використання одношарової обмотки створює азимутальне магнітне поле навколо довгих підвідних проводів, розташованих паралельно осі соленоїда, і само це впливає на однорідність розподілу магнітного поля по перерізу всередині камери дрейфу, що приводить до еліпсності пучка.

Соленоїд з'єднано з конденсаторною батареєю, утвореною з включених паралельно 50 конденсаторів типу К41І-7, які комутуються розрядником. Енергетичний запас батареї з ємністю 5000 мкФ, при зарядній напрузі 5 кВ, складає 62,5 кДж, що дозволяє створити імпульсне магнітне поле з напруженістю в центрі соленоїда до $0,5 \cdot 10^6$ А/м. Внутрішня поверхня кожуха соленоїда, що служить анодом діода, одночасно є і камерою транспортування РЕП до колектора або конвертора. Камера транспортування пучка оснащена бічними діагностичними віконцями і шлюзовим пристроєм для зміни конверторів, що опромінюються без порушення високого вакууму в об'ємі прискорювальної колонки, який підтримується двома магніторозрядними насосами НОРД-250 на рівні $8 \cdot 10^{-4}$ Па.

2.2. Сильнострумовий прискорювач релятивістських електронних пучків «Темп-Б» з низьким імпедансом

Для генерації потужних РЕП і жорсткого ГРВ було удосконалено прискорювач РЕП «Темп-Б», на якому були розроблені наступні вузли та системи: генератор імпульсних напруг, магнітноізолюваний вакуумний діод з магнітною системою, блок управління і синхронізації для формування і транспортування РЕП, вакуумна система, а також діагностичний комплекс.

Модернізація сильнострумового прискорювача «Темп-Б» проводилася на основі наявних даних з проектування та налагодження сильнострумового прискорювача електронів «Темп-А» [114-116].

Блок-схема прискорювача «Темп-Б» аналогічна описаній в попередньому пункті і складається з наступних основних елементів: генератора імпульсних напруг (ГІНа), магніт ізолюваного вакуумного діода, камери транспортування РЕП і камери для взаємодії РЕП з конвертером, приладів для реєстрації параметрів прискорювача. Таке поєднання елементів найбільш часто використовується в сильнострумових прискорювачах РЕП [118,121].

Блок-схема прискорювача «Темп-Б» приведена на рис. 2.3.

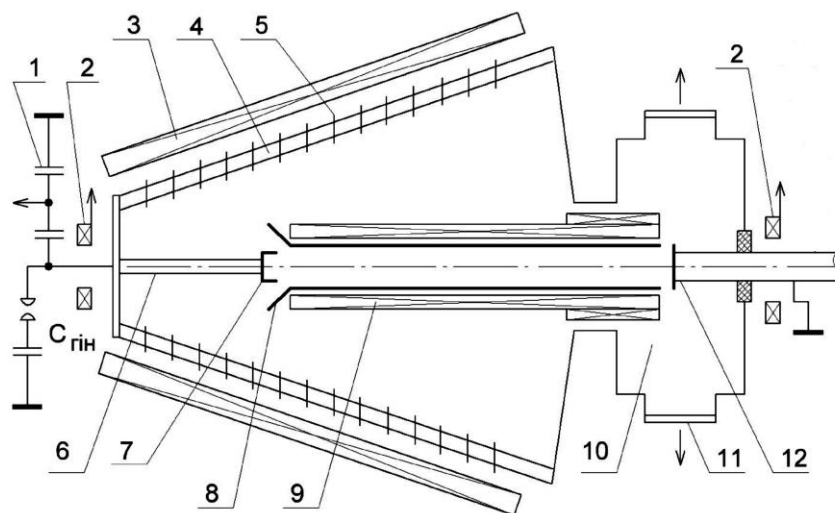


Рис. 2.3. Блок-схема прискорювача «Темп-Б», де:

- 1 – діляник напруги; 2 – пояс Роговського; 3 – конусний соленоїд зовнішнього магнітного поля; 4 – ізолятори прискорювальної колони;
 5 – градієнтні кільця прискорювальної колони; 6 – тримач катода; 7 – катод;
 8 – анодна вставка; 9 – соленоїд внутрішнього магнітного поля; 10 – камера взаємодії; 11 – діагностичні вікна; 12 – конвертер.

Одним з основних елементів прискорювача РЕП рис. 2.3 є ізолятор прискорювальної колони (4) вакуумного діода, що відокремлений від решти елементів діоду трансформаторним маслом. Оскільки електрична міцність поверхні ізолятора, що знаходиться в маслі, вище електричної міцності поверхні в вакуумі, то допустима прискорююча напруга для даної конструкції прискорювальної колони, в основному, визначається електричною міцністю поверхні ізоляції у вакуумі. Для усунення цього впливу необхідно добиватися оптимального кута між поверхнею ізолятора і силовими лініями електричного поля ($\alpha_{\text{опт}} = 45^\circ$) [97]. Збільшенню міцності високовольтного проміжку сприяє також його секціювання - розподіл на ряд ділянок меншої довжини, що усуває розвиток лавинних процесів уздовж вакуумної поверхні ізолятора прискорювальної колони. Ізолятор прискорювальної колони було обрано у формі конуса. Колонна складається з 14 циліндричних кілець з епоксидного компаунда з наповнювачем з оксиду алюмінію. Внутрішній діаметр прискорювальної колони з

меншої сторони становить 300 мм, а з більшої - 650 мм, а довжина - 900мм. Кільця з епоксидного компаунда з внутрішньою поверхнею, нахиленою під кутом 45° , чергувалися з градієнтними кільцями (5) з нержавіючої сталі (X18H10T) товщиною 3 мм. Кільця з'єднані між собою епоксидним компаундом. Розподіл потенціалу між високовольтними і градієнтними електродами в прискорювальній колоні вакуумного діода встановлюється омичним дільником, як і на прискорювачі «Темп-А» (див. підрозділ 2.1.). Джерелом сильнотривового РЕП в прискорювачі служить магніт ізольований вакуумний діод із катодом вибухової емісії. В якості джерела електронів використовувалися: кромкові циліндричні катоди (7) різних діаметрів з нержавіючої сталі, конусні катоди з нержавіючої сталі (X18H10T) та графіту. Графітові катоди мали спеціальне покриття з оксиду бору, яке збільшувало вихід електронів з поверхні. При роботі графітового катода на стінках прискорювальної колонки і стінках камери дрейфу став з'являтися струмопровідний шар. У зв'язку з цим довелося відмовитися від роботи з графітовим катодом.

Конструкція вакуумного діода з магнітною ізоляцією зібрана за схемою, в якій анодом є тонкостінний металевий кожух з немагнітної сталі (X18H10T) з внутрішнім діаметром 148 мм. Магнітна ізоляція такого діода здійснюється крайовим магнітним полем соленоїда (3). Для збільшення густини електронного пучка застосовувалися анодні вставки. Результати експериментів з використання анодних вставок різної форми та їх аналіз будуть представлені нижче в підрозділі 2.2.2. Використання анодної вставки (8) дозволяє отримати потік електронів майже паралельний однорідному зовнішньому магнітному полю в камері дрейфу, що важливо для фокусування і транспортування РЕП [102].

Гостра кромка циліндричного катода з радіусом $R_k = 37$ мм розташована в області наростаючого до анода магнітного поля соленоїда (9).

При оптимальному узгодженні магнітного поля і електричного поля у прискорювачі, зменшення радіуса трубчастого пучка буде проходити без збільшення товщини стінки пучка, а тому, густина струму пучка буде підвищуватися [101].

Скорочення довжини проміжку між пучком і стінками трубчастих вставок при зменшенні діаметра пучка повинно призводити до збільшення значення знятого струму, тобто до зниження імпедансу діода, а збільшення довжини анодної вставки повинно збільшувати довжину транспортування РЕП без зміни його геометрії [114].

2.2.1. Генератор імпульсної напруги прискорювача релятивістських електронних пучків «Темп-Б»

Переведення зарядних ланцюгів ГІНа на сучасну елементну базу, дозволило підвищити надійність роботи прискорювача в цілому, а також дозволило отримати зменшення витоків і пробоїв при роботі прискорювача.

ГІН складається з чотирьох каскадів. У кожному каскаді розташовано двадцять накопичувальних конденсаторів ІК-100-0,4 (0,4 мкФ), всього їх 80. Кожен каскад розділений на позитивну і негативну зарядку. Зарядка здійснюється за допомогою високовольтного трансформатора. Вихідна напруга з вторинної обмотки через випрямну систему подається для зарядки накопичувальних конденсаторів через зарядні опори, що виконані у вигляді вінілпластових трубок, заповнених дистильованою водою з розчином NaCl. Опір електродів ~ 200 кОм.

Вузли керування комутацією ГІНа, а також вся елементна база розміщується в металевому баці, заповненому трансформаторним маслом. Для заповнення всього обсягу необхідно близько 30 тонн трансформаторного масла. Спостереження за зарядкою плеча (+ і -) здійснюється через мікроамперметр, який розташовано на пульті управління. Розрядники ГІНа є трьохпроміжковими з двома електродами та електродом підпалу. Усі розрядники (крім пускового, він розташований окремо) приєднані паралельно та заповнені сухим азотом.

На рис. 2.4. представлена удосконалена схема джерела високої напруги - чотирьохкаскадного генератора імпульсної напруги (ГІНа), зібраного за схемою Аркадьєва-Маркса.

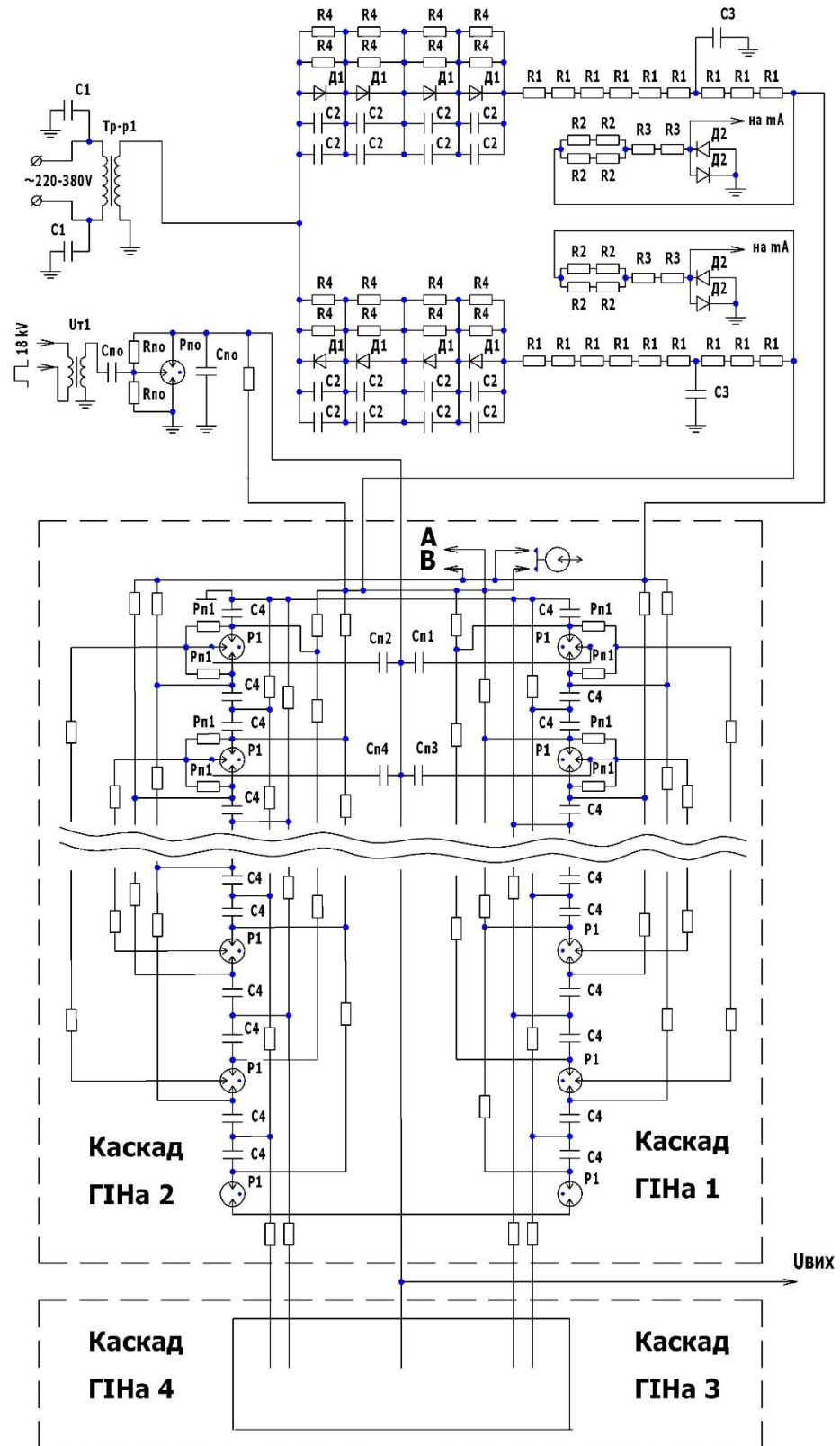


Рис. 2.4. Принципова електрична схема ГІНа прискорювача РЕП «Темп-Б»

В електричній схемі прискорювача «Темп-Б» на рис. 2.4 прийняті наступні позначення: $Tr-p1$ - підвищувальний трансформатор; U_{T1} -високовольтний

імпульсний трансформатор; С1 - фільтруючі конденсатори ГІНа по мережі живлення; С2 - конденсатори випрямляча; С_{по} - конденсатори розділові; С3 - конденсатори ГІНа по високій стороні; С4 - конденсатори ГІНа; С_{п1-8} - конденсатори підпалу; R_{по} - випрямні опори; R4 - резистори випрямляча; R1 - резистори зарядного ланцюга; R2-3 - резистори дільника; Д1-діодна збірка; Д2-діоди подільника; Р1-9- розрядники ГІНа; Р_{по}-розрядники підпалу; Р1-розрядники ГІНа; Р_{п1}- випрямний опір; А, Б-виходи аварійного відключення.

Запуск здійснюється з пристрою, що ініціює імпульс ГІНа, який знаходиться за межами корпусу прискорювача (із зовнішнього боку бака).

Величина С_г ємності ГІНа забезпечується використанням конденсаторів ІК-0,4-100 (С_о=0,4×10⁻⁶ф; L_о = 0,15 × 10⁻⁶ Гн; U_о = 100 кВ). Оскільки максимальна величина вихідної напруги ГІНа, що визначається параметрами електронного пучка, становить U_{вих} = 2 × 10⁶ В, то умови забезпечення в генераторі заданих значень С_г і U_{вих} по суті й визначають конструкцію ГІНа. Генератор міг би складатися з 20 каскадів з включенням по 4 конденсатори в каскад. Однак, таке компанування конденсаторів неприйнятно з наступних причин:

1) необхідні спеціальні заходи для створення рівномірного розподілу струмів і напруг на конденсаторах в каскаді, при цьому габарити одного каскаду зростають, що призводить до збільшення розмірів генератора і підвищення його індуктивності;

2) оскільки каскади генератора з'єднуються між собою розрядниками, то в цьому випадку зростає струмове навантаження на електроди розрядників, що потребує додаткових заходів зі зміцнення поверхні електродів.

З огляду на це, була запропонована конструкція ГІНа, що складається з 4-х паралельно працюючих генераторів, які розміщуються в одному баку. При цьому, струмове навантаження на розрядник зменшується в 4 рази, а загальна індуктивність ГІНа стає в 1,5 рази менше (за рахунок зменшення розмірів одного генератора і зменшення індуктивності замкнутого контуру ГІНа). Для зменшення загального числа розрядників в 2 рази запропоновано використовувати двополярну систему зарядки конденсаторів (± 100 кВ натомість однополярної

системи зарядки на 100 кВ) з послідовним включенням 2-х конденсаторів в каскад.

Основною проблемою, що виникає при паралельній роботі декількох генераторів, є досягнення одночасного включення генераторів на загальне навантаження. Одночасність включення може бути досягнута при виконанні наступних умов:

а) синхронна подача на генератори пускових імпульсів зі швидкістю росту напруги на фронті $dU/dt = 5 \cdot 10^{12}$ В/с;

б) наявність зв'язків між каскадами 4-х генераторів, що забезпечує синхронне з'єднання каскадів в усіх генераторах;

з) отримання високих перенапруг на кожному наступному розряднику генератора після спрацьовування попереднього розрядника; величини перенапруг порядку (2 ~ 3) U_0 забезпечують необхідну для синхронізації малу тимчасову затримку спрацьовування розрядників (де U_0 - напруга зарядки одного конденсатора).

Перераховані умови виконуються в конструкції ГІНа прискорювача «Темп-Б». В якості додаткових заходів, що поліпшують синхронність включення 4-х генераторів, прийняті наступні:

а) ультрафіолетове підсвічування всіх розрядників ГІНа;

б) подача запускаючої напруги на усі розрядники.

Спеціально розроблений для прискорювача «Темп-Б», 3-х електродний розрядник ГІНа дозволяє здійснити:

а) ультрафіолетову підсвітку електродів від прилеглих до нього розрядників генератора;

б) керованість розрядника при подачі на пусковий електрод імпульсної напруги;

в) поліпшення електричної міцності ГІНа за рахунок неметалічної сполуки розрядників.

Трьохелектродний розрядник ГІНа представлено на рис. 2.5.

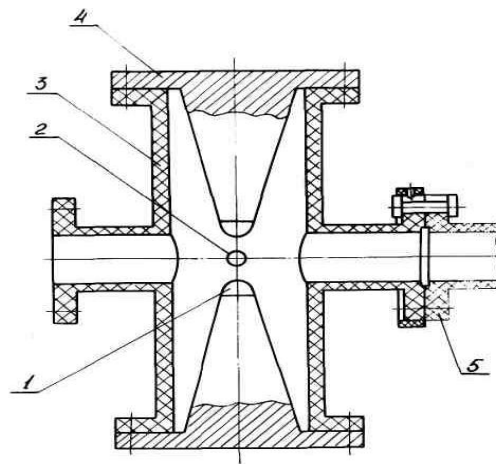


Рис. 2.5. Трьохелектродний розрядник ГІНа. 1 - наконечник електрода розрядника; 2 - керуючий запускаючий електрод; 3 - корпус розрядника; 4 - основний електрод розрядника; 5 - вузол неметалічної сполуки розрядників

Кероване пробивне розрядження одного з розрядників призводить до запуску інших розрядників тільки за рахунок ультрафіолетового випромінювання від іскри першого розрядника. Так, при атмосферному тиску азоту в блоці розрядників після пробою керованого розрядника, пробій інших розрядників відбувається при напрузі в 2 рази меншій, ніж статична пробивна напруга. Конденсатори, розрядники та зарядні опори розміщені на горизонтальній ізолюючій підставці, що встановлено на опорних стержнях з текстоліту висотою 600 мм. При цьому, середня імпульсна напруженість електричного поля по поверхні текстоліту не перевищує 30 кВ/см. З урахуванням негативної полярності напруги на виході ГІНа при мікросекундній тривалості, а також наявних бар'єрів, вінілпластовий кожух конденсатора, текстолитова підставка товщиною $\delta = 20$ мм - робоча напруга генератора може бути вища ніж 2 МВ. За оцінками електричної міцності масляних зазорів напруження ГІНа може бути ще більшим. Мінімальна відстань від стінки корпусу до струмопровідних елементів конструкції ГІНа становить ~ 400 мм. При цьому, середня напруженість електричного поля в трансформаторному маслі становить всього 50 кВ/см (при тривалості в кілька мікросекунд). Отже, наявний запас по імпульсній міцності, як в

трансформаторному маслі, так і по поверхні діелектрика в маслі, дозволить перевищити вихідну напругу ГІНа в $1,3 \div 1,8$ рази.

Заряджання конденсаторів ГІНа відбувається за допомогою високовольтного джерела з максимальною напругою на виході ± 100 кВ. Для підвищення напруги силового трансформатора, в високовольтному джерелі зарядної напруги використовується схема з подвоєнням напруги. В якості випрямлячів використано два ланцюжки високовольтних діодів Д1008 (по 30 штук в кожній). Для вирівнювання постійної напруги на діодах, а також для захисту діодів від імпульсних наводок, кожен з діодів шунтується конденсатором і резистором. Для усунення наведень від ГІНа підключення джерела напруги до ГІНу здійснено через (RL) фільтри.

Максимальна величина середньої напруженості електричного поля в режимі зарядки від джерела не перевищує 7 кВ/см. Ця величина напруженості електричного поля еквівалентна проміжку в маслі між округленими головками болтів в розряднику, що знаходяться на відстані 300 мм один від одного. При цьому, середня напруженість електричного поля по зовнішній поверхні розрядника в маслі не перевищує 5 кВ/см. Таких низьких значень напруженостей електричних полів для режиму зарядки від джерела при нарузі 100 кВ вдалося досягти завдяки тому, що два поруч розташованих конденсатора, які відносяться до різних каскадів, мають однакову полярність зарядної напруги. При цьому, мінімальна відстань між конденсаторами (прийнята рівною 50 мм) визначається тільки імпульсною міцністю трансформаторного масла, яка при тривалості імпульсу $\sim 10^{-6}$ с. може досягати значення ~ 200 кВ/см. Завдяки такому компануванню конденсаторів довжина кожного з чотирьох каскадів ГІНа вдалось зменшити до $2,1$ м. Ця відстань і визначає контурну індуктивність всього ГІНа. У конструкції ГІНа прискорювача «Темп-Б» конденсатори безпосередньо закріплені на фланцях електродів розрядників без сполучних шин. Як відомо, шини, що з'єднують електроди розрядників з конденсаторами, в залежності від їх розмірів, вносять істотну добавку в індуктивність ГІНа.

Розташування конденсаторів в кожному з чотирьох каскадів ГІНа створює міжкаскадні ємності, які забезпечують 2-х кратне перенапруження на кожному наступному розряднику генератора, після спрацьовування попереднього розрядника. При цьому, за допомогою зарядних опорів, додатково введено в схему гальванічний зв'язок "через каскад", що сприяє її роботі в режимі дворазового перенапруження. У порівнянні зі звичайною схемою, схема з 2-х кратним перенапруженням на розрядниках вимагає збільшення в 2 рази загального числа зарядних опорів ГІНа. Саме ця обставина ускладнює реалізацію схем з трьох-чотирьох-кратним перенапруженням, в яких реалізується стабільна робота розрядників в широкому діапазоні керування зарядної напруги генератора (при одному й тому ж тиску газу в розрядниках). Ланцюжок конденсаторів, що відноситься до першого генератора, утворює "спіраль". Другий генератор утворює аналогічну "спіраль", розміщену між "витками" першої "спіралі". При цьому розташовані розрядники належать різним генераторам. Отже, якщо допустити передчасний пробій розрядників першого генератора, розрядники другого генератора будуть підсвічуватися по обидва боки ультрафіолетовим випромінюванням від іскор розрядників першого генератора. Це забезпечить мінімальну затримку в спрацьовуванні розрядників другого генератора і, тим самим, призведе до вирівнювання часу спрацьовування всіх розрядників першого і другого генератора. Крім цього, в разі передчасного спрацьовування розрядників першого генератора, на конденсаторах другого генератора, через значний ємнісний зв'язок з конденсаторами першого генератора, з'являється перенапруження, що передається до розрядників другого генератора, що, спільно з ультрафіолетовим опроміненням, призводить до ще більшого зниження затримки пробою розрядників другого генератора.

Описаний спосіб вирівнювання часу комутації двох паралельно працюючих генераторів дає змогу компенсувати тимчасовий розкид в спрацьовуванні перших розрядників генераторів, що запускаються і, тим самим, отримати мінімальний розкид за часом спрацьовування 2-х генераторів. Аналогічно працює 3-й і 4-й генератори, при чому розрядники цієї пари генераторів мають зв'язок по

ультрафіолетовому випромінюванню з розрядниками першої пари. Крім цього, електричний зв'язок між парами генераторів здійснюється через зарядні опори, що знаходяться під нульовим потенціалом. Зазначені види зв'язків, а також мінімальний розкид у часі спрацьовування кожної пари, дають змогу забезпечити одночасну комутацію всіх чотирьох каскадів ГНа.

2.2.2. Числове моделювання процесів генерації і транспортування релятивістських електронних пучків на прискорювачі «Темп-Б»

Одним з важливих завдань, що необхідно вирішити при транспортуванні пучка електронів, є його фокусування [85, 120]. Можливості для фокусування пучка досить різноманітні. Однак, найбільшого поширення набули методи магнітного фокусування. Неминучий вплив на траєкторію руху електронів мають наступні фактори: розсіювання на залишкових газах, спотворення силових ліній магнітного поля, пов'язані з наявністю скін-ефекту, які навіть, якщо і незначні, можуть істотно перешкодити руху частинок при транспортуванні в камері дрейфу. В даному підрозділі вирішено задачу зі створення ефективної лінії для генерації і транспортування РЕП до мішені для отримання потужного гальмівного рентгенівського випромінювання.

Використання прискорювача «Темп-Б» дає змогу отримати релятивістські електронні пучки з такими параметрами: енергія прискорених релятивістських пучків $E_n \approx (0,5 \dots 1,0) \text{ MeV}$; тривалість імпульсу струму пучка $t_n \approx (1,5 \dots 2,5) \text{ мкс}$; струм пучка $I_n \approx (10 \dots 25) \text{ кА}$. Такий пучок при взаємодії з конвертером (мішенню) дає змогу генерувати наджорстке ГРВ в межах $400 < \gamma < 750 \text{ кеВ}$.

Транспортування сильнострумового електронного пучка вимагає застосування фокусуєчого поздовжнього магнітного поля досить високої напруженості, при якій ларморівський радіус електронів пучка, що рухається в такому полі, істотно менше його діаметра (поперечних розмірів пучка). При наявності поперечної енергії електронів пучка, яка може досягати декількох кеВ і

поперечному розмірі пучка від 50 до 70 мм напруженість поздовжнього фокусуєчого магнітного поля повинна становити $4,5 \cdot 10^5$ А/м. Для оцінки величини магнітного поля в експериментальній установці і подальшого застосування розподілу магнітного поля за допомогою числових розрахунків визначено його профіль на осі соленоїда. Напруженість магнітного поля розраховано як суперпозиція напруженостей від всіх витків соленоїда [148]. Параметри спроектованого і виготовленого магнітного соленоїда такі [6]:

- довжина камери дрейфу, на яку намотана секція нового соленоїда, становить $L_0 = 330$ мм, її зовнішній діаметр дорівнює 210 мм;
- загальна кількість витків становить $N=220$ (в обмотці соленоїда магнітного поля використовувався мідний дріт діаметром 5 мм);
- індуктивність соленоїда $L = 2,887$ мГн і повний опір соленоїда $R = 9,41$ Ом.

Поздовжній профіль магнітного поля, використаний при моделюванні, відповідав експериментально виміряному. Максимальне значення напруженості магнітного поля в однорідній частині дорівнювало $4,5 \cdot 10^5$ А/м.

Для ефективного розсіювання тепла в магнітній системі виконано наступні умови:

- а) тепловий опір між каркасом магнітного поля і обмоткою соленоїда зробили досить низьким, тобто застосована ізоляція не перешкоджає відведенню тепла;
- б) частота імпульсів була такою, що соленоїд встигав охолонути.

Нижче представлено розрахунок параметрів РЕП для різних форм анодних вставок, які передбачалося використовувати в прискорювачі. Для числового моделювання використовувався модуль CST Particle Studio [145,146], який є складовою частиною CST Studio Suite 2010. Основною метою цих розрахунків є визначення величини струму пучка на колекторі в залежності від розмірів катода і його відстані від входу в камеру дрейфу.

Першою розглядалась Т-образна анодна вставка. Електронний пучок формувався в вакуумному діоді з магнітною ізоляцією і через анодну вставку інжектувався в у камеру дрейфу. Приклад траєкторного чисельного аналізу

генерації і транспортування електронного пучка в камері дрейфу з циліндричною анодною вставкою представлено на рис. 2.6.

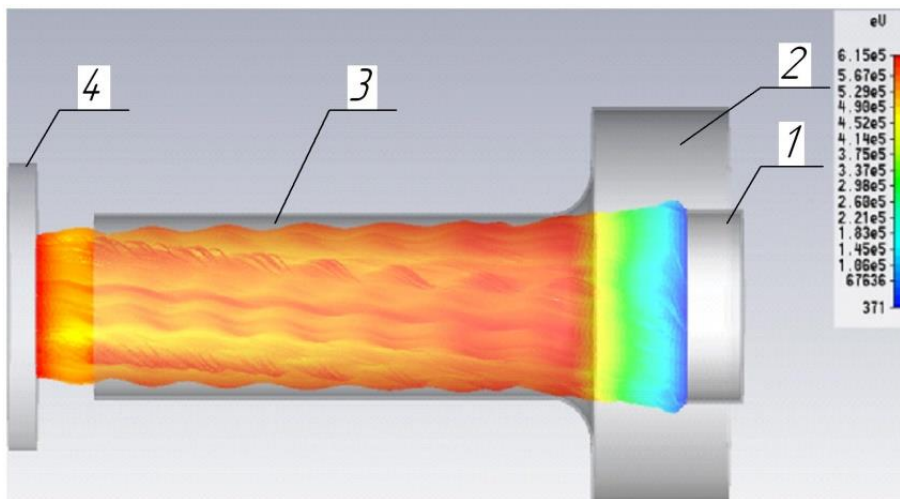


Рис. 2.6. Приклад числового моделювання руху РЕП в прискорювачі з циліндричною анодною вставкою. 1 - кромковий катод, 2 - анодна вставка, 3 - камера дрейфу, 4 - колектор

Електрони емітувалися циліндричним кромковим катодом (1) діаметром 54 мм, висотою кромки 20 мм і товщиною кромки 1 мм. Катод розміщувався в області наростаючої ділянки напруженості поздовжнього магнітного поля, в 40 ... 60% від його максимуму. Довжина анодної вставки (2) і радіус отвору в ній становили 47 і 26 мм, відповідно. Довжина камери дрейфу (3) в експериментах складала 175 мм і значно перевищувала її радіус у 26 мм. Відстань від вихідного кінця камери дрейфу до колектора 4 дорівнювала 20мм. У якості колектора використано сталевий диск діаметром 80мм і товщиною 2 мм. Для розрахунків використовувався обчислювач Particle Tracking Solver [147]. В якості емісійної моделі була обрана модель з емісією, обмеженою просторовим зарядом. Електрони, що емітувалися, не мали початкової швидкості і кутового або теплового розкиду. Для результату розрахунку, наведеного на рис. 2.6, відстань від кромки катода до камери дрейфу (катод - анодний проміжок) дорівнювала 22 мм. При цьому, до катода була докладена напруга у 630 кВ, анод і колектор знаходилися під нульовим потенціалом. В якості граничних умов для чисельного

модельовання застосовувалися електричні граничні умови (звернення в нуль тангенціальної компоненти електричного поля), що встановлюються на поверхнях паралелепіпеда, який обмежує розрахункову область. Відстань від цих поверхонь до елементів структури вибиралася такою, щоб вони не чинили істотного впливу на розподіл електростатичних полів. Мінімальна відстань від катода до цієї поверхні становила 50 мм, а від анода до такої поверхні - 20 мм.

На рис. 2.7 показані траєкторії електронів (вид збоку), інжектуємих з торця катода. Різні кольори траєкторій відповідають різним енергіям електронів у системі. Максимальна енергія електронів дорівнювала ~ 615 кеВ, причому вона досягається вже на вході в канал дрейфу. Розрахунок показав, що при зазначеному анод - катодному проміжку 22 мм вдається стійко (як впливає з рис.2.6) транспортувати електронний пучок із струмом 7,55 кА. Були також виконані числові розрахунки емісії та транспортування пучка для різних довжин анод-катодного проміжку. У таблиці 1 представлені значення струму пучка, що емітується з катода і стійко транспортується на колектор, для трьох значень анод-катодного проміжку. Ми бачимо, що оптимальний анод-катодний проміжок дорівнює 22 мм, але при цьому, є втрати струму на стінки анодної вставки і камери дрейфу. У таблиці 1 прийняті наступні позначення: Z (мм) - відстань між торцем кромкового катода і анодним кільцем, $I_{\text{ТП}}$ (кА) - струм пучка, що прийшов на колектор, $I_{\text{ТС}}$ (кА) - струм пучка, що висадився на анодну вставку.

Таблиця 1.

Розрахунки струму РЕП та його втрат при різних довжинах анод-катодного проміжку з циліндричною анодною вставкою у діоді

Z (мм)	$I_{\text{ТП}}$ (кА)	$I_{\text{ТС}}$ (кА)
22	7,55	0,7
27	6,805	0,36
32	6,456	0

Видно, що оптимальним анод-катодним проміжком є проміжок довжиною 22 мм, але при цьому, присутні втрати струму на стінки анодної вставки і камери дрейфу.

Досліджено також характеристики діода з конусоподібною анодною вставкою. Кут розкриття конусної вставки складає 51° . Електрони емітувались циліндричним кромковим катодом з діаметром 74,5 мм, з шириною кромки 15 мм і її товщиною 1 мм. Довжина анодної вставки складає 40 мм, отвір $\varnothing 70$ мм, довжина камери дрейфу 170 мм. Відстань від вихідного кінця камери дрейфу до колектора дорівнює 20 мм. У якості колектора використано сталевий диск $\varnothing 80$ мм і товщиною 2 мм. Струм в діоді варіювався зміною відстані між анодом і катодом, або діаметром катода.

Приклад одного з розрахунків траєкторного аналізу генерації і транспортування електронного пучка в камері дрейфу з конусною анодною вставкою представлено на рис. 2.7.

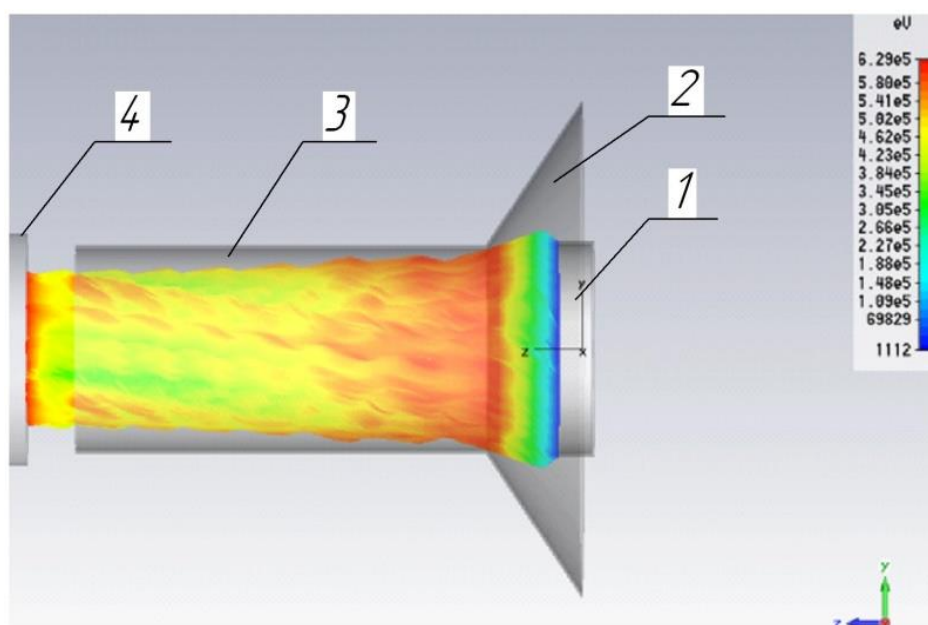


Рис. 2.7. Приклад числового моделювання руху РЕП в прискорювачі з конусною анодною вставкою.

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

В якості емісійної моделі була обрана модель з емісією, обмеженою просторовим зарядом. Граничні умови і розподіл магнітного поля уздовж осі прискорювача використовувалися такі ж, як в попередньому випадку. Для наведеного малюнка відстань від кромки катода до камери дрейфу (катод - анодний проміжок) дорівнював 15 мм. При цьому, до катода (1) була докладена

напруга у 630 кВ, анодна вставка (2) перебувала під нульовим потенціалом. Для зазначеного анод-катодного проміжку струм емісії дорівнював 17,14 кА, який стійко транспортувався через камеру дрейфу (3) довжиною 170 мм і досягав колектора (4).

На рис. 2.7 зображено траєкторії периферійних електронів, інжекттованих з торця катода. Різні кольори траєкторій відповідають різним енергіям електронів у системі. Максимальна енергія електронів складає ~ 630 кеВ. Слід зазначити, що поперечні розміри пучка спочатку перевершують діаметр камери дрейфу, але потім, внаслідок наростаючого поздовжнього профілю магнітного поля, пучок фокусується зовнішнім магнітним полем і входить в камеру дрейфу з незначними втратами струму. При цьому, в числовому розрахунку передбачається, що електрони, які емітуються, не мали початкової швидкості (в тому числі поперечної) і кутового або теплового розкиду. Були проведені чисельні розрахунки емісії та транспортування пучка при зміні величини анод-катодного проміжку. У таблиці 2 представлені значення струму пучка, що емітується з катода і стійко транспортується на колектор, для значень анод-катодного проміжку від 10 мм до 35 мм.

Таблиця 2.

Розрахунки струму РЕП та його втрат при різних довжинах анод-катодного проміжку з циліндричною анодною вставкою у діоді

Z (мм)	$I_{\text{П}}$ (кА)	$I_{\text{ТС}}$ (кА)
35	13,08	0
30	15,1	1,4
25	14,8	0,86
15	17,14	0,52
10	17,17	0,42

Як видно з таблиці 2. для випадку анод-катодного проміжку з довжиною 10 мм вдається стійко транспортувати електронний пучок із струмом 17,17 кА. На рис. 2.8 представлено поперечний переріз з боку колектора траєкторій для випадку рис. 2.8.

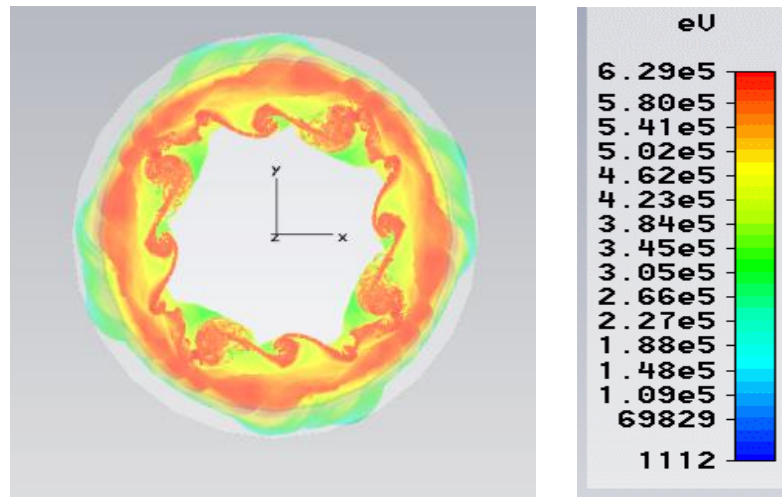


Рис. 2.8. Розрахована форма відбитку пучка на колекторі

Результати траєкторного чисельного аналізу генерації і транспортування повного струму в камері дрейфу з конусною анодною вставкою для різних значень діаметра катода і анод – катодних проміжків при збільшеній напруженості магнітного поля наведені в таблиці 3.

Таблиця 3.

Розрахунки струму РЕП для різних значень діаметра катода і анод – катодних проміжків при збільшеній напруженості магнітного поля з конусною анодною вставкою

Z (мм)	R _{кат.} (мм)	I _{пт} (кА)
30	36	21,4
40	36	11,88
40	40	16,48
50	40	10,27
40	32	8,8
40	28	6,62

У ній прийняті такі позначення: I_{пт} (кА) - повний струм пучка; R_{кат}- радіус трубчастого катода; Z (мм) – відстань між кромкою катода і анодною вставкою.

Пучок на колекторі має трубчасту форму із середньою товщиною ~ 15 мм. Азимутальна неоднорідність форми пучка, скоріше всього, пов'язана з діокотронною нестабільністю трубчастого пучка [148] (на рис. 2.8 чітко видно

порушення азимутальної моди $l = 4$). Але це питання вимагає окремого теоретичного аналізу та експериментального підтвердження.

Для представлених у таблиці розрахунків відстань від кромки катода до камери дрейфу (катод - анодний проміжок) змінювалася від 30 до 50 мм. При цьому, до катода була прикладена напруга 630 кВ, анод знаходився під нульовим потенціалом. Напруженість магнітного поля, використаного при даних розрахунках, була збільшена у два рази і дорівнювала $1,7 \cdot 10^6$ А/м. Для зазначених анод - катодних проміжків з радіусами кромки катодів від 28 до 40 мм, вдається отримати максимальний повний струм пучка 21,4 кА.

З представлених вище результатів числового моделювання можна зробити висновок, що необхідно використовувати анодні вставки конічного профілю, тому що їх використання забезпечує отримання істотно більших значень струму на колекторі в порівнянні з анодними вставками циліндричного профілю, та необхідно збільшувати напруженість магнітного поля.

2.2.3. Магнітна система для генерації і транспортування релятивістських електронних пучків

В результаті експлуатації прискорювача з'ясувалося, що ізоляція котушки соленоїда магнітного поля не витримує тривалих навантажень. Рішенням є створення магнітної системи для формування та транспортування РЕП за межі корпусу прискорювача. У цьому підрозділі представлено результати випробовування розрахованої, спроектованої та виготовленої магнітної системи, що має головні та коригувальні секції.

Отримані експериментальні характеристики соленоїда добре узгоджуються з розрахунковими, що дозволяє використовувати його для роботи в сильнотрумових прискорювачах РЕП. Розроблена методика управління магнітним полем може бути запропонованою для використання її на інших сильнотрумових прискорювачах.

На відомих працюючих прискорювачах [128] використовуються імпульсні магнітні поля, соленоїди яких живляться від імпульсних джерел постійного струму і створюють ряд проблем при їх експлуатації, тому що мають у своїй конфігурації накопичувачі, баластні опори, розрядники, трансформатори і комутуючі лінії.

Для транспортування РЕП потрібна наявність фокусуєчого поздовжнього магнітного поля досить високої напруженості. Цього можна добитися, використовуючи джерело живлення соленоїда, що має велике число витків і споживає менший струм. Таке рішення значною мірою послаблює вимоги, що пред'являються до ізоляції обмоток соленоїда, та істотно зменшує пондеромоторні сили, що діють на провідники, через які здійснюється підвід струму до соленоїда, що знаходиться всередині камери прискорювача. Схема розташування головних і коригувальних секцій магнітної системи представлена на рис. 2.9 (а), а схема їх підключення - на рис. 2.9 (б).

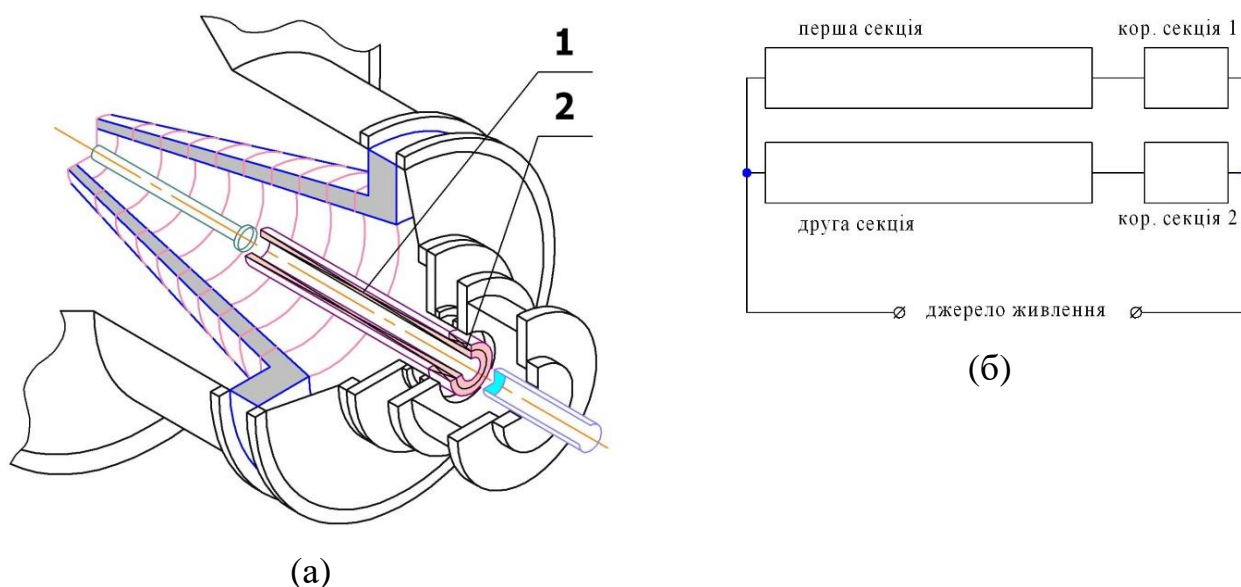


Рис. 2.9. Вакуумний діод з магнітною системою, що містить головні (1) та коригувальні (2) секції соленоїда. а – схема розташування головних і коригувальних секцій, б – схема підключення секцій

В обмотках соленоїда магнітного поля використано емальований мідний дріт $\varnothing 1,2$ мм. Довжина камери дрейфу, на яку намотані секції соленоїда,

становить $L_0 = 750$ мм, її зовнішній діаметр дорівнює 76 мм. Загальна кількість витків основних і коригувальних секцій становить $N = 2640$. Для зменшення струму в дроті обмотки соленоїда і зменшення повного опору соленоїда головні секції (1) і (2) (рис. 2.9.) з'єднані паралельно. Коригувальні секції (3) і (4) з'єднані послідовно з основними секціями (1) і (2), відповідно.

Комутацією основних і коригувальних секцій соленоїда, а також зміною довжини коригувальних секцій, вдалося отримати збільшення напруженості магнітного поля в два рази, що дає можливість покращити умови транспортування пучка до камери взаємодії.

Порядок роботи прискорювача з запропонованою магнітною системою наступний:

1. Зарядка генератора імпульсних напруг (ГІН).
2. Включення системи запуску магнітного поля. При цьому фронт наростання струму в магнітній системі становить $(4...5) \cdot 10^{-3}$ с.

3. Включення розряду ГІНа після досягнення стабілізації струму в магнітному полі до потрібного значення через $(4...5) \cdot 10^{-3}$ с. Загальний час роботи джерела живлення становить $(5...100) \cdot 10^{-3}$ с, залежно від умов експлуатації. Для випрямлення напруги використовувалася схема Ларіонова. Схема управління роботою магнітної системи представлена на рис. 2.10.

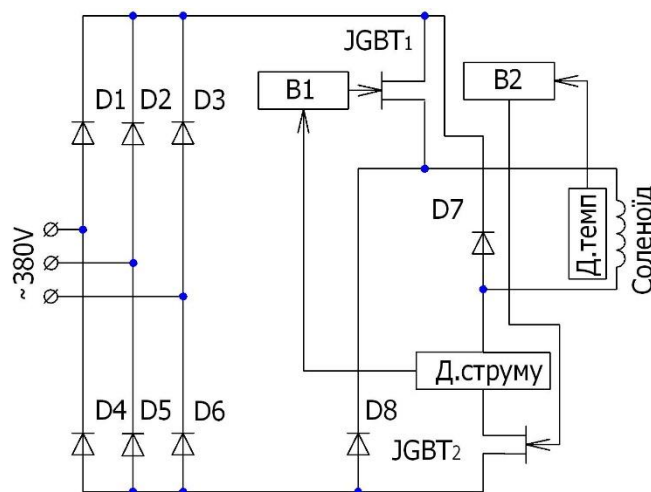


Рис. 2.10. Схема управління магнітною системою

Блок управління В1 включає транзистор $JGBT_1$ з постійною частотою і змінною тривалістю. Блок В2 подає напругу на затвор транзистора $JGBT_2$ і по

соленоїду тече струм. Амплітуда струму в соленоїді регулюється блоком управління В2 транзистора JGBT₂ при наявності діода D8.

Тривалість імпульсу струму в соленоїді регулюється блоком управління В1 і транзистором JGBT₁. Блок управління В1 регулюється за допомогою датчика струму. При наявності діода D7 час, протягом якого струм в соленоїді з робочого режиму спадає до нуля, визначається величиною L / R . Індуктивність соленоїда $L = 10,3$ мГ, а його опір $R = 3,3$ Ом.

Для визначення нагріву магнітної системи за імпульс струму використовуємо рівняння теплового балансу:

$$Q = I^2 \times R \times t = c \times m \times T, \quad (2.1)$$

де Q - кількість виділеного тепла, $I = 180$ А - струм в соленоїді, $R = 3,3$ Ом - опір обмотки соленоїда, $m = 3,4$ кг - маса дроту соленоїда, $t = 50 \cdot 10^{-3}$ сек - час роботи магнітного поля, c - теплоємність міді, T °С - температура.

$$T = \frac{I^2 R t}{c m}, \quad (2.2)$$

За такий час імпульсу струму в соленоїді обмотка нагрівається на 7 °С.

При нагріванні соленоїда до 100 °С блок керування магнітної системи відключає її від джерела живлення. Її охолодження при цьому здійснюється протягом часу, який необхідний для підготовки вакуумної системи до роботи.

Напруженість магнітного поля розраховано, як суперпозицію напруженостей від усіх витків соленоїда.

Напруженість магнітного поля розраховувалася, як суперпозиція напруженостей від усіх витків соленоїда. Напруженість магнітного поля в центрі витка соленоїда визначено за формулою:

$$H = \frac{0.4\pi \cdot I \cdot r_{cp}^2}{(r_{cp}^2 + Z^2)^{3/2}}, \quad (2.3)$$

де $I = 180$ А - струм в соленоїді, $r_{cp} = 39$ мм - середній радіус основних секцій соленоїда, $r_{cp1} = 60$ мм - середній радіус коригувальних секцій соленоїда,

$r_{cp2} = 70$ мм - середній радіус коригувальних секцій соленоїда, Z - довжина від центру витка до розрахункової точки.

$$H_n = \sum H_i, \quad (2.4)$$

де H_n - напруженість в n -ой точці, H_i - напруженість від кожного витка соленоїда.

Напруженість у місці взаємодії РЕП та конвертера дорівнює $H = 4,5 \cdot 10^5$ А/м.

На рис. 2.11 представлено розподіл напруженості магнітного поля утвореного основними секціями (по 2400 витків) і коригувальними секціями (по 240 витків), довжиною 80 мм і радіусом $r_{cp1} = 50$ мм, отриманих експериментально (залежність 1) і розрахованих (залежність 2).

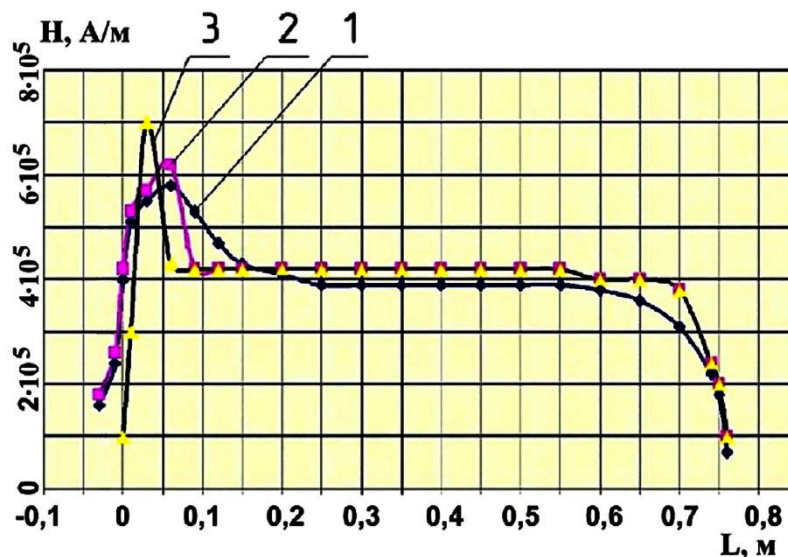


Рис. 2.11. Розподіл напруженості магнітного поля.

1 - експеримент з коригувальною секцією 1 - 80 мм,

2- розрахунок з коригувальною секцією 1 - 80 мм,

3- розрахунок з коригувальною секцією 1 - 40 мм

Залежність (3) відображає результати розрахунку напруженості магнітного поля основних секцій (по 2400 витків) і коригувальних секцій (по 240 витків), довжиною 40 мм і радіусом $r_{cp2} = 56$ мм.

З результатів розрахунку та експерименту видно, що оптимальна довжина коригувальних секцій - 80 мм. При коротких коригувальних секціях силові лінії магнітного поля мають крутий спад. Індуктивність соленоїда та опір соленоїда при частоті 50 Гц близькі до розрахункових.

Магнітна система, що транспортує РЕП до місця взаємодії та працює із змінною частотою проходження імпульсів без використання накопичувачів, розрядників, трансформаторів, баластних опорів є перспективною, але для фокусування і транспортування РЕП з ще більшим струмом необхідно збільшувати напруженість магнітного поля. А це, в свою чергу, вимагає примусового охолодження розробленого соленоїда. Тому, в наступному підрозділі представлено результати з розробки та випробування комбінованої магнітної системи, яка дозволяє транспортувати потужні пучки РЕП із струмом у десятки кА.

2.2.4. Комбінована імпульсна магнітна система прискорювача релятивістських електронних пучків «Темп-Б»

У даному підрозділі представлені результати з розробки, виготовлення та випробування комбінованої магнітної системи для фокусування та транспортування потужних РЕП.

Магнітна система в прискорювачах електронів є його невід'ємною частиною і виконує функцію з фокусування і транспортування РЕП. Щоб підвести необхідну енергію до мішені у вигляді сформованого потужного РЕП потрібно мати велику напруженість магнітного поля. Параметри пучка безпосередньо залежать від втрат енергії на елементах конструкції діода. У конструкціях діода з довгим утримувачем катода спостерігається бомбардування вакуумної поверхні ізолятора прискорювальної колони електронами. Це призводить до збільшення кількості розрядів по поверхні ізолятора і зменшенню часу комутації діода. Виходячи з вищесказаного, було вирішено використовувати на прискорювачі «Темп-Б» магнітну ізоляцію прискорюючої колони та для формування і транспортування РЕП застосувати метод магнітного фокусування. Схема комбінованої магнітної системи наведена на рис. 2.12.

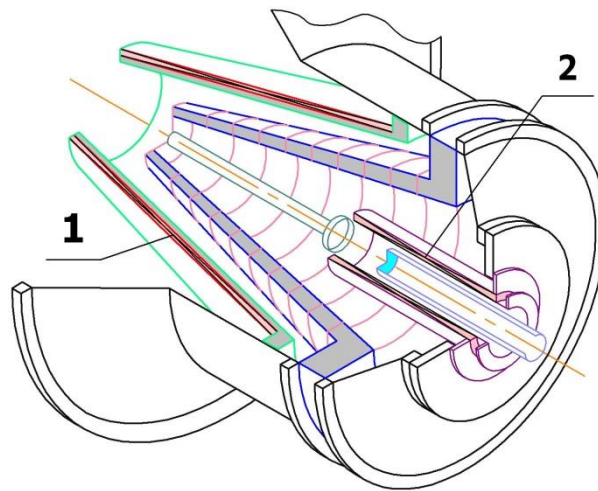


Рис. 2.12. Схема прискорювача з комбінованою магнітною системою.

1 - конічний соленоїд, 2 - циліндричний соленоїд

Магнітна система (рис. 2.13) складається з двох соленоїдів. Магнітне поле першого соленоїда -1 створює магнітну ізоляцію прискорюючої колони, а магнітне поле соленоїда -2 формує і транспортує РЕП. Магнітні поля цих соленоїдів синфазні і вмикаються в задані моменти часу за допомогою синхронізатору. Магнітне поле створюється струмом імпульсного розряду накопичувального конденсатора через котушку соленоїда. Напруженість магнітного поля визначено за формулою:

$$H = H_J \left[\frac{h_1}{b-a} \ln \frac{b + \sqrt{b^2 + h_1^2}}{a + \sqrt{a^2 + h_1^2}} + \frac{h_2}{b-a} \ln \frac{b + \sqrt{b^2 + h_2^2}}{a + \sqrt{a^2 + h_2^2}} \right], \quad (2.5)$$

де h -довжина соленоїда, h_1 , h_2 -відстань від торців соленоїда до місця вимірювання, a і b -внутрішній та зовнішній радіуси соленоїда,

$$H_J = \frac{0,4\pi \cdot NI}{h} \quad (2.6)$$

де N - кількість витків, I - струм в соленоїді [113].

Циліндричний соленоїд, призначений для фокусування і транспортування РЕП. живиться від батареї з 40 конденсаторів типу К41І-7, ємністю по 100 мкФ кожний. Його розташовано всередині прискорювальної колони. Торець кожуха соленоїда розташований на відстані 700 мм від торця високовольтного електрода, де кріпиться ніжка утримувача катода. Довжина соленоїда, розташованого в

корпусі з нержавіючої сталі (X18H10T), становить 510 мм. Соленоїд має 150 витків. Індуктивність соленоїда 0,9 мГн. При розряді батареї конденсаторів, зарядженої до 2 кВ, по соленоїду тече струм 3 кА, який створює напруженість $1,3 \cdot 10^6$ А/м. Нагрівання обмотки за одне спрацьовування становить 6,8 °С.

Конусний соленоїд, призначений для створення магнітної ізоляції діода, живиться від батареї з 40 конденсаторів типу ІМ2-5-140У4, ємністю по 140 мкФ кожний. Індуктивність соленоїда 30 мГн. Опір 0,5 Ом. Він розташований зверху прискорювальної колони у діелектрику (трансформаторне масло). Довжина соленоїда становить 830 мм. Соленоїд має 208 витків. При розряді конденсаторної батареї, зарядженої до 2,5 кВ, по соленоїду тече струм, який створює магнітне поле напруженістю $0,25 \cdot 10^6$ А/м у місці формування РЕП. Соленоїди магнітних полів включалися таким чином, щоб максимальні значення напруженостей збігалися за часом, що забезпечувалося вибором відповідної затримки запуску другого соленоїда на синхронізуючій стійці.

Розроблена магнітна система, що складається з циліндричного і конусного поля, з напруженістю $1,7 \cdot 10^6$ А/м, дає можливість отримати струм пучка 20 кА. В експериментах конденсаторна батарея заряджалась не повністю, тому є можливість збільшити напруженість у соленоїдах магнітного поля. Запропонована конструкція магнітної системи повністю вирішує задачу, яка була поставлена в дисертаційній роботі по фокусуванню і транспортуванню РЕП до місця взаємодії.

2.3. Діагностика елементів, вузлів прискорювачів релятивістських електронних пучків та параметрів релятивістських електронних пучків

У даному розділі наведено результати досліджень та розробки для діагностування елементів, вузлів прискорювачів релятивістських електронних пучків та параметрів релятивістських електронних пучків. Приведена розроблена схема управління прискорювачем, вимірювальні методики та елементи діагностики магнітної системи прискорювача релятивістських електронних пучків

«Темп-Б». Приведено розроблений діагностичний модуль та вимірювач зарядної напруги у генераторі імпульсної напруги. Приведено метод вимірювання високих напруг і імпульсних струмів на радіаційно пучковому комплексі.

2.3.1. Схема управління, вимірювальні методики та елементи діагностики магнітної системи прискорювача РЕП «Темп-Б»

У сучасних фізичних установках виникає необхідність з проведення моніторингу магнітного поля в умовах реального експерименту при високих радіаційних навантаженнях на прискорювачі. Для стабільної роботи прискорювача потрібно проводити постійний контроль напруженості магнітного поля в режимі реального часу. Як правило, магнітне поле вимірюється поза прискорювачем. Вимірювання напруженостей магнітних полів в прискорювальній колоні дозволяє вибрати оптимальне розташування катода, анода і мішені. Напруженість магнітного поля до $0,1 \cdot 10^5$ А/м виміряно за допомогою датчика Холла. При більш високих напруженостях магнітного поля характеристики датчика знаходяться в нелінійній області, тому подальші вимірювання проводилися за допомогою вимірювальної котушки. Котушка містить 2000 витків мідного дроту $\varnothing 0,1$ мм, намотаних на діелектричному каркасі, діаметром 20 мм, з пасивним інтегратором. Постійна часу інтегрування складає 1 сек. Сигнал з вимірювальної котушки дорівнює:

$$U_k = \frac{1}{RC} \int_0^t E_{\text{інд}} \cdot dt \quad (2.7)$$

де $E_{\text{інд}}$ - ЕРС індукції, що наводиться в котушці; R і C - параметри інтегруючого ланцюжка. Ця формула справедлива при $t \ll RC$. Напівперіод коливання струму в конусному соленоїді дорівнює 40 мс. В даному випадку ця умова виконується. На рис. 2.13 представлена схема вимірювання напруженостей магнітних полів прискорювача.

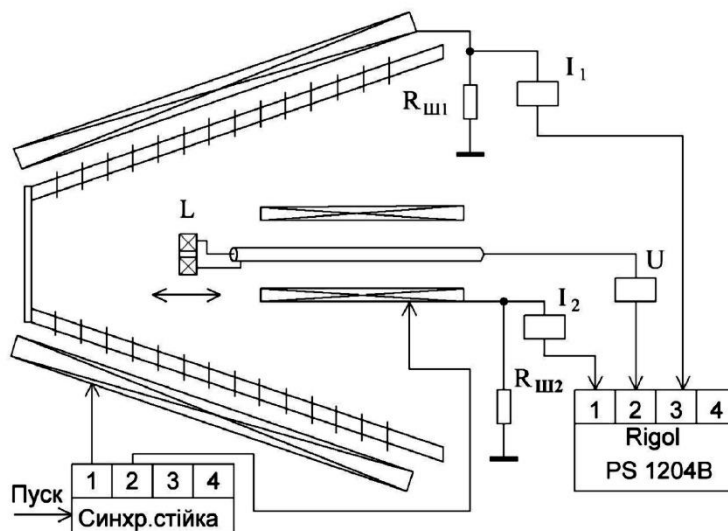


Рис. 2.13. Схема вимірювання напруженостей магнітних полів прискорювача. $R_{ш1}$, $R_{ш2}$ - шунти; I_1 , I_2 - струми соленоїдів; U - напруга, відповідна напруженості магнітних полів

Для контролю величини і форми струмів соленоїдів I_1 , I_2 знімалися сигнали з шунтів $R_{ш1}$ і $R_{ш2}$. В якості реєстратора використовувався чотирьоканальний цифровий осцилограф Rigol PS 1204B. Графіки розподілу напруженості магнітного поля у прискорювальній колоні представлені нижче.

На рис. 2.14. зображено розподіл напруженості магнітного поля по довжині прискорювальної колони, яка створювалась соленоїдами конусного і циліндричного магнітних полів.

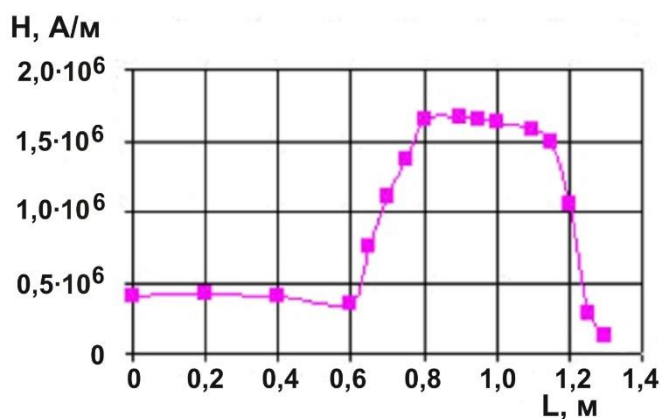


Рис. 2.14. Розподілення напруженості магнітного поля по осі прискорювача, де L —довжина колони прискорювача, H —напруженість магнітного поля на осі прискорювача

Соленоїди вмикались послідовно. Циліндричний соленоїд магнітного поля включався в максимумі напруженості, що утворювалась конусним соленоїдом магнітного поля. Під час досліджень конвертери було розміщено на відстані 900 - 1100 мм від високовольтного входу вакуумного діоду.

На рис. 2.15 представлено розподіл напруженості магнітного поля по радіусу анодної вставки, розміщеної всередині циліндричного соленоїда.

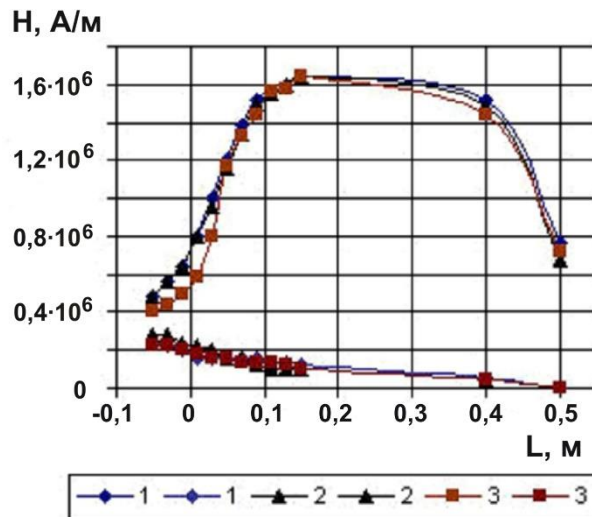


Рис. 2.15. Розподіл напруженості магнітних полів по радіусу анодної вставки, розміщеної всередині циліндричного соленоїда

Верхні три залежності на рис. 2.15. відповідають показанням вимірювальної котушки при включенні магнітного поля з циліндричним соленоїдом, нижні три залежності - показники вимірювальної котушки при включенні конусного соленоїда магнітного поля. Де: 1 розподіл напруженості магнітного поля на відстані 70 мм від осі соленоїда, 2 розподіл напруженості магнітного поля на відстані 37 мм від осі соленоїда, 3 розподіл напруженості магнітного поля на осі соленоїда.

Для контролю струму, що тече по соленоїду, використано пояс Роговського, що дозволяє проводити вимірювання з гальванічною розв'язкою. Для калібрування цього пояса було виготовлено стенд. Стенд рис. 2.16 дозволяє отримувати прямокутні імпульси струму порядку 80 А і тривалістю кілька мікросекунд. Комутація струму проводиться ключем, виконаним на IGBT

транзисторі GA200SA60S, який керується драйвером HP3120 з оптичною розв'язкою. Сигнал з шунта ($R_{ш}$) і пояса Роговського передається на осцилограф.

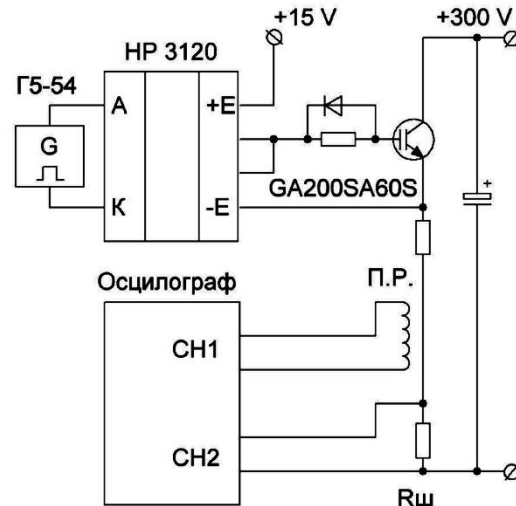


Рис. 2.16. Схема стенду для калібрування пояса Роговського

На рис. 2.17 верхній промінь - сигнал з шунта, нижній - сигнал з пояса Роговського, отримані при включенні соленоїда магнітного поля.

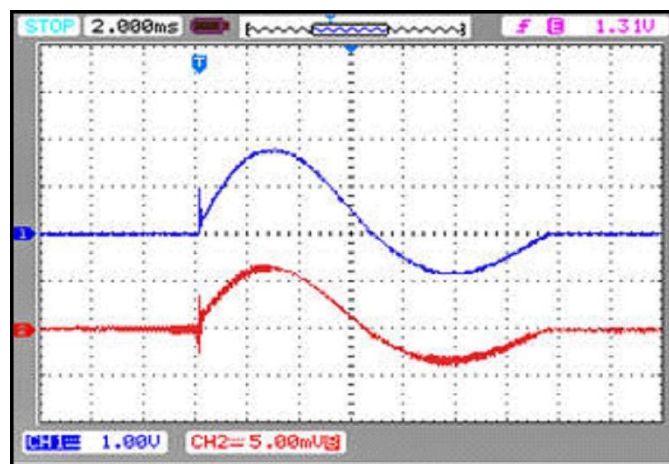


Рис. 2.17. Осцилограми струму в соленоїді магнітного поля

Сигнал з пояса Роговського відповідає сигналу з шунта з коефіцієнтом 0,34 кА/мВ.

Магнітне поле соленоїдів виникає внаслідок протікання імпульсного струму розряду конденсаторної батареї. Для моніторингу напруженості магнітного поля, працюючого від мережі змінного струму, необхідно контролювати струм, що протікає по соленоїду. Вимірювання струму проводилося за допомогою

безконтактного вимірювача струму на основі датчика Холла CSNR151. Схема вимірювання струму наведена на рис. 2.18.

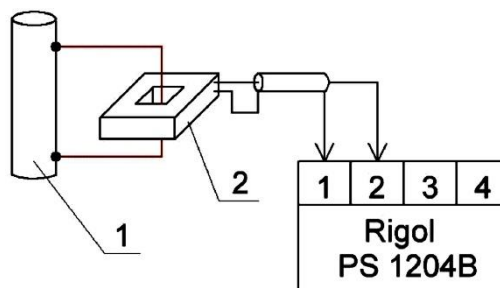


Рис. 2.18. Схема вимірювання струму датчиком Холла:

1 - основний провідник струму, 2 - додатковий провідник з датчиком Холла

Діапазон вимірювання датчика ± 200 А. Для збільшення межі вимірювання струму, датчик включався за допомогою додаткового провідника, як показано на рис. 2.18. В умовах реального експерименту при високих рівнях випромінюваних перешкод і гальмівного рентгенівського випромінювання, датчик істотно спотворює реальні значення струму. Тому дана методика застосовується на прискорювачі «Темп-Б» при проведенні регламентних робіт. В подальшому вимірювання проводилися поясом Роговського.

На штатній синхронізуючій стійці не можна було вибрати короткі інтервали затримки імпульсів, а також існував гальванічний зв'язок синхронізуючої стійки з прискорювачем. Для усунення цих недоліків була розроблена нова синхронізуюча стійка.

Блок запуску побудований на основі логічних ТТЛ схем. Він дозволяє провести запуск, як у ручному режимі, так і зовнішнім позитивним імпульсом з амплітудою до 50 В.

Блок затримок побудований на двійково-десятичних лічильниках. На вхід лічильників подається тактова частота імпульсів з генератора з кварцовою стабілізацією частоти. Стан лічильників СТ1-СТ5 дешифрується відповідними дешифраторами DC1-DC5 і дозволяє встановити затримку імпульсів від 1 мкс до

1000 мс. Необхідна затримка для кожного каналу встановлюється дешифраторами каналів DC_{k1} - DC_{k4} . Блок-схема синхронізуючої стійки представлена на рис. 2.19.

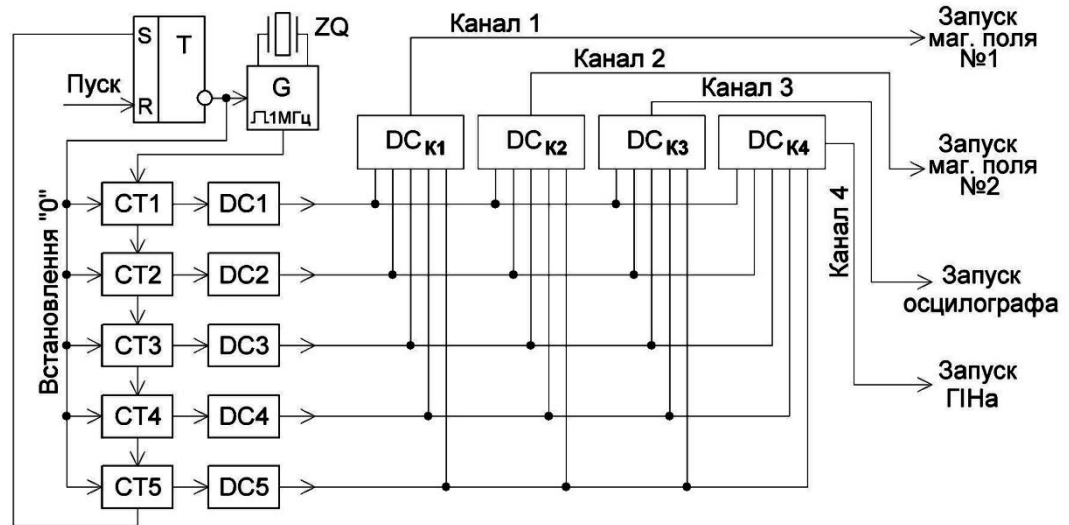


Рис. 2.19. Блок-схема синхронізуючої стійки, де:

T-тригер, G-кварцевий генератор, СТ-двійково-десятковий лічильник, DC-десятичний дешифратор, DC_k -дешифратор каналів.

Канал № 1 забезпечує запуск соленоїда першого магнітного поля без затримки. Канал № 2 забезпечує запуск соленоїда другого магнітного поля з затримкою 20 мс, яка регулюється з кроком 0,2 мс до 20 мс. Канал № 3 запускається від каналу № 2 і забезпечує запуск осцилографа з затримкою 5 мс і регулюванням 0,1 мс до 10 мс. Канал № 4 запускається від каналу № 3 і забезпечує запуск генератора імпульсної напруги (ГІНа) із затримкою 100 мкс з регулюванням 10 мкс до 100 мкс.

Розроблена для прискорювача РЕП «Темп-Б» синхронізуюча стійка дозволяє встановлювати затримки імпульсів у діапазоні від 1 мкс до десятків мілісекунд завдяки використанню генератора з кварцевою стабілізацією частоти імпульсів, що йдуть на двійковий лічильник, з подальшою дешифрацією пускового імпульсу. Проведені з використанням розробленої синхронізуючої стійки експерименти показали, що розроблений пристрій вирішує завдання по покращенню керованості прискорювача РЕП «Темп-Б».

2.3.2. Діагностичний модуль та вимірювач зарядної напруги у генераторі імпульсної напруги

Для налагодження модернізованих і нових елементів РПтК було розроблено, виготовлено та випробувано діагностичний модуль. Він дозволяє імітувати процеси, що протікають в прискорювачі РЕП, а також має всі необхідні прилади та елементи для керування ним.

Існуючий метод зарядки високовольтних конденсаторів ГІНа з контролем вхідної зарядної напруги не дозволяє отримати достовірну інформацію про заряд ГІНа через втрати і витоки напруги на елементах конструкції прискорювача. В процесі експлуатації прискорювачів РЕП з'явилася необхідність проведення контролю зарядної напруги конденсаторів ГІНа. Контроль напруги на кінцевих конденсаторах чотирьохканального ГІНа дозволяє керувати процесом зарядки і отримати інформацію про зарядну напругу в кожному каскаді ГІНа.

Для розробки методів діагностичних вимірів було виготовлено силовий модуль, що складається з вхідного високовольтного трансформатора УРС-70, ЛАТРа РНО250 - 5, блоку тиратронного запуску розрядника і, власне, самого розрядника. Керування діагностичним модулем здійснюється за допомогою розробленої для прискорювача РЕП «Темп-Б» синхронізуючої стійки. Блок-схема діагностичного модуля представлена на рис. 2.20.

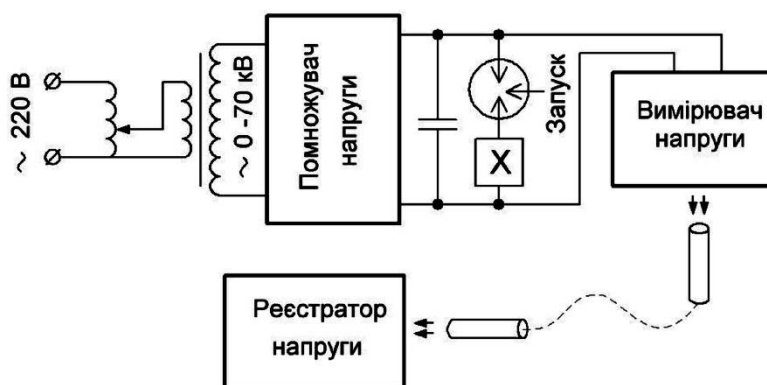


Рис. 2.20. Блок-схема діагностичного модуля

Тіратронна схема запуску формує короткий імпульс з напругою 15 кВ, що викликає спрацьовування розрядника конденсаторної батареї. Конструктивне виконання розрядника дозволяє йому стабільно працювати в діапазоні зарядних напруг від 5 до 90 кВ. Проміжок між електродами становить 8 мм, а між основним електродом і керуючим електродом – 2 мм. Електрод керування виготовлено з нержавіючої сталі товщиною 1,5 мм у вигляді диска з отвором в центральній області. Зменшення довжини проміжку між електродами дозволяє зменшити індуктивність розрядника і тим самим зменшити фронт наростання струму. Максимальні значення параметрів модуля такі: зарядна напруга до 90 кВ; струм розряду до 50 кА; фронт наростання струму – 600 нс.

На РПтК необхідно отримувати сильнотрумові пучки зі струмом в десятки кА і енергією частинок ~ 1 МеВ. Такі параметри досягаються застосуванням ГНУ, який має чотири каскади [153, 154]. Кожен каскад містить 19 високовольтних конденсаторів, зарядні опори і відповідні розрядники. В процесі зарядки конденсаторів спостерігається флуктуація значень зарядних опорів, що пов'язано зі зміною температури і хімічної чистоти розчину. Це призводить до різного часу зарядки каскадів ГНУ. Вимірювання зарядної напруги кінцевих конденсаторів кожного з каскадів дозволяє контролювати процес зарядки. Вимірювання високої постійної напруги зазвичай проводиться за допомогою високоомного подільника, виконаного відповідно до вимог високовольтної техніки.

Робота РПтК пов'язана з наявністю стрибків напруги високої амплітуди і, як наслідок, наявністю швидкозмінних струмів відповідно. В результаті, біля експериментальної установки утворюються електромагнітні поля, які можуть створювати в вимірювальній апаратурі перешкоди, що значно перевищують вимірюваний сигнал. Це викликає необхідність в розміщенні на значній відстані від прискорювача вимірювальної апаратури та екранування її. При наявності значних змінних магнітних полів серйозну проблему для ліній зв'язку у вигляді екранованих коаксіальних дротів представляють «петлі заземлення». Зміна магнітного поля може індуктувати в таких контурах значні напруги. Схема розробленого вимірювача високої напруги представлена на рис. 2.21.

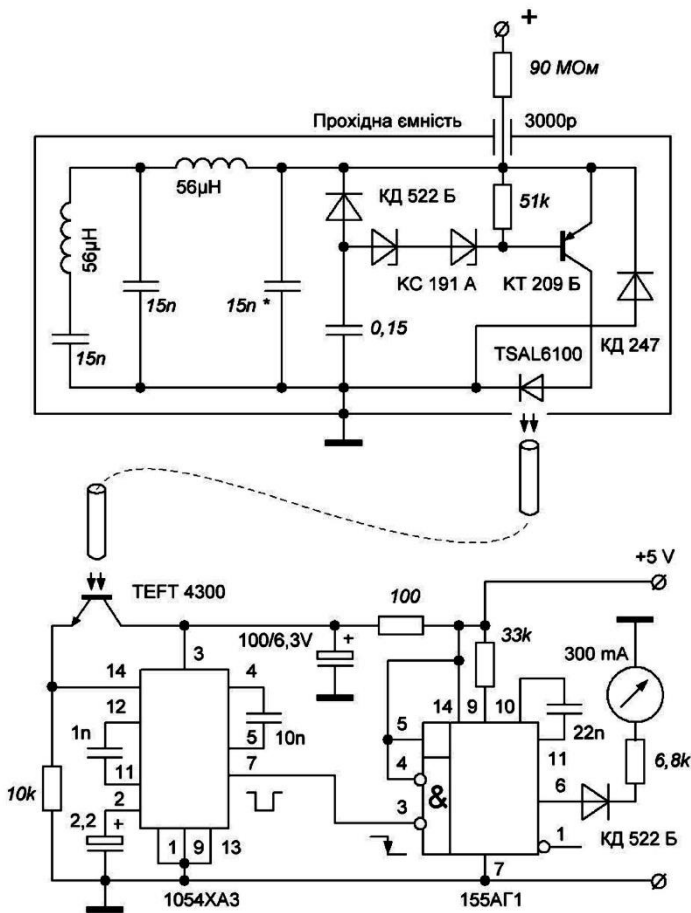


Рис. 2.21 Схема вимірювача високої напруги

Вимірювач високої напруги виконано на основі релаксаційного генератора на транзисторі застосованому у лавинному режимі, що дозволяє досить просто перетворити сигнал значення напруги в частоту проходження імпульсів. Така схема дозволяє отримати точність перетворення вимірювань порядку десятих часток відсотка. Стабільність роботи схеми досягається автоматичною стабілізацією різниці порогових напруг. Для формування прямокутного імпульсу струму, що проходить через оптичний діод, застосовується накопичувальна LC-лінія, що дозволяє отримати імпульс струму $\sim 120 \mu\text{A}$ з тривалістю $\sim 5 \mu\text{s}$. Приймач оптичних сигналів виконаний на фототранзисторі та спеціалізованій мікросхемі 1054 ХА3, яка формує стандартний прямокутний імпульс. Цей імпульс запускає перетворювач частоти проходження імпульсів в напругу. Перетворювач частоти реалізований на одновібраторі 155АГ1 і вимірювальній голівці зі струмом

повного відхилення 300 мкА. Така схема дозволяє вимірювати напруги до 80 кВ на конденсаторі. Використання в якості лінії зв'язку оптичного каналу дозволяє значно збільшити перешкодозахищеність і безпеку персоналу при роботі з високою напругою.

2.3.3. Вимірювання високих напруг і імпульсних струмів на радіаційно пучковому комплексі

В якості первинних перетворювачів струму на РПТК використано магнітоіндукційні перетворювачі (пояса Роговського) і перетворювачі напруги - резистивний дільник і ємнісний дільник. Для контролю загального струму й напруги ГІНа була розроблена конструкція комбінованого вимірника, яка дозволяє вимірювати струм і напругу в одній точці та без тимчасового зсуву. Комбінований вимірювач складається з магнітоіндукційного перетворювача (пояс Роговського) і ємнісного дільника, які розташовані на високовольтному виході ГІНа.

Вимірювання напруги ГІНа ($U_{ГІН}$) проводилося за допомогою декількох методик. Перша методика - при використанні омичного дільника. Високовольтна частина подільника утворена стовпом водного розчину сульфату міді (електрична провідність 85 Ом/см), а низьковольтна частина виконана на базі керамічних малоіндукційних об'ємних резисторів. Вибір розчину $CuSO_4$ визначався його здатністю витримувати великі електричні поля та відновлювати свої властивості у випадку пробою. Дільник виконаний у вигляді вінілової труби, довжиною 170 см, заповненої розчином $CuSO_4$.

На структурній схемі прискорювача «Темп-Б», наведеної на рис. 2.22, відображено розміщення первинних перетворювачів діагностичного комплексу.

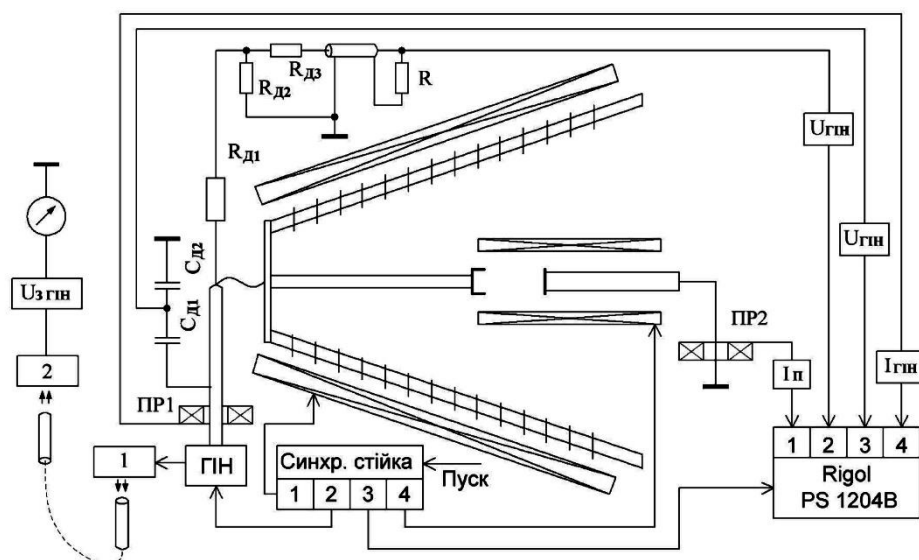


Рис. 2.22. Структурна схема діагностичного комплексу «Темп-Б»

ГІН - генератор імпульсної напруги; ПР 1, ПР 2 - пояса Роговського;

$R_{д1}$, $R_{д2}$, $R_{дз}$ - опори резистивного дільника; $C_{д1}$, $C_{д2}$ -ємності подільника;

1,2 - перетворювачі сигналу

В процесі вимірювань виявилася зміна коефіцієнта ділення подільника від зміни температури і хімічної чистоти розчину, що призводило до великих похибок при вимірюванні напруги. Більш точні вимірювання вдалося провести за допомогою дільника, високовольтна частина якого була виконана у вигляді біфілярної обмотки ніхромовим дротом на корпусі з діелектрика. Опір цієї частині подільника становив 13500 Ом, а низьковольтної частини - 3 Ом (тобто коефіцієнт ділення складає 4500). Вибір таких малих величин опорів зумовлений тим, що такий дільник має меншу сприйнятливність до ємнісних наведень, ніж високоомний дільник. Подальше зниження опорів обмежене зростаючим струмом і як наслідок зростанням його втрат. Для зменшення втрат у вимірювальному ланцюгу і більш коректного вимірювання напруги ГІНа необхідно проводити вимірювання з використанням ємнісного дільника напруги. При проведенні експериментів виникла необхідність гальванічної розв'язки вимірювального пристрою, так як в процесі розряду ГІНа в мережі ~ 220 В спостерігалися короткі високочастотні імпульси з амплітудою близько 17 кВ.

Гальванічна розв'язка сигналів із синхронізуючої стійки, що керує роботою установки «Темп-Б», здійснюється за допомогою розділових трансформаторів, а осцилограф підключено через джерело безперебійного живлення. Гальванічна розв'язка вимірювальних сигналів була виконана на лінійній оптичній парі HCNR200. Сигнальні кабелі заходять в діагностичну кімнату через фільтри, що представляють собою 20 витків кабелю на феритових кільцях.

Вимірювання струму пучка електронів проводилося за допомогою пояса Роговського, який забезпечує безконтактне вимірювання і гальванічну розв'язку вимірювального приладу. Форма й величина вихідного сигналу з пояса Роговського залежать від часових параметрів досліджуваного імпульсу, конструкції поясу та характеристик підключаємого навантаження. Для того, щоб отримати сигнал з пояса Роговського, пропорційний вимірюваному току, необхідно виконати умову

$$\tau_{\text{ізм}} \ll \tau = \frac{L}{(R_H + r)}, \quad (2.8)$$

де $\tau_{\text{ізм}}$ - тривалість вимірюваного імпульсу, τ - власний час інтегрування поясу з навантаженням R_H . Нехай для оцінки $\tau_{\text{вим}} = 1/\omega$ і задавшись величиною

$$N = \frac{\omega L}{((R_H + r))}, \quad (2.9)$$

визначаємо мінімальне число витків поясу. Калібрування виготовленого поясу Роговського проводилася на стенді, який дозволяє отримати імпульс струму близько 100 А з тривалістю в кілька мікросекунд. Для вимірювання енергії РЕП було виготовлено графітовий калориметр. Маса калориметру та початкова температура вибиралися таким чином, щоб зміна опору терморезистора КМТ-1, що використано в якості датчика температури, при попаданні пучка на калориметр, і його нагрівання доводилося на лінійну ділянку. Підтримка необхідної початкової температури калориметра, а також його калібрування, проводилися шляхом пропусканням заданого струму від зовнішнього джерела

через ніхромовий дріт, розміщений з тильного боку тіла калориметра. Чутливість калориметра масою 400 гр., при початковому опорі терморезистора 15 кОм в лінійній області, дорівнює 1,9 Ом/Дж. Повний струм пучка вимірювався за допомогою циліндра Фарадея.

2.4. Дослідження залежності параметрів релятивістських електронних пучків від рівня тиску залишкових газів в вакуумному діоді прискорювача

Наявність парів масла в об'ємі вакуумного діода приводить до зменшення тривалості та потужності РЕП. Для їх збільшення розроблено безмасляну кріогенну вакуумну систему прискорювача РЕП з можливістю отримання робочого тиску залишкових газів у ньому на рівні $P=1 \cdot 10^{-4}$ Па. Приведені дослідження залежності параметрів релятивістських електронних пучків від рівня тиску залишкових газів в вакуумному діоді прискорювача. Розглянуто вплив тиску залишкових газів на тривалість розряду прискорювача релятивістських електронних пучків.

2.4.1. Модифікована схема вакуумної відкачки прискорювача релятивістських електронних пучків

У підрозділі досліджено можливість отримання високого вакууму за допомогою використання кріогенних конденсаційно-адсорбційних насосів. Розміщення їх в прискорювачі має бути таким, щоб вони стали додатковим засобом захисту об'єму вакуумної камери від проникнення вуглеводнів з боку робочих засобів відкачування. Це дозволить, з одного боку, значно поліпшити початкові вакуумні умови в робочому обсязі, а з іншого боку - скоротити час підготовки камери вакуумного діода до роботи. На основі проведених досліджень розроблено основні напрями і методи створення високого вакууму в прискорювачах РЕП. При модернізації вакуумної системи прискорювача РЕП

«Темп-Б» для збільшення граничного струму РЕП було вирішено три завдання. Перше - завадити проникненню парів масла в вакуумний діод прискорювача, друге - ефективно відкачувати водяні пари і вуглеводні, які погано відкачуються магніторозрядними насосами, і третє - це швидко виходити на робочий режим тиску у вакуумній камері прискорювача. Оскільки всі експерименти з отримання, транспортування РЕП і їх взаємодії з мішенню, пов'язані з чітким контролем енергетичного балансу пучка в середовищі, то обов'язковою умовою є підтримка робочого тиску в вакуумному діоді на рівні $P=1 \div 5 \cdot 10^{-4}$ Па.

Система вакуумної відкачки до модернізації мала в своєму складі масляні форвакуумні насоси з азотними пастками для отримання низького вакууму і магніторозрядні насоси для отримання високого вакууму. Дана конфігурація забезпечувала відкачування камери вакуумного діода, але робочі поверхні магніторозрядних насосів дуже швидко виходили з ладу через вплив на них проривів атмосфери та погано відкачуваних парів води, що призводило до частих зупинок прискорювача. Це пов'язано з тим, що форвакуумні насоси погано відкачують воду і кисневі сполуки.

Модернізувати вакуумну систему було вирішено за допомогою використання криогенних засобів відкачування. Для вакуумної системи відкачування розроблено, виготовлено та випробувано вакуумний конденсаційно-адсорбційний насос, на який було отримано деклараційний патент на винахід [3]. Насос призначено для отримання чистого вакууму в діапазоні тисків від $P=1 \cdot 10^2$ Па до $P=1 \cdot 10^{-7}$ Па. Його рекомендовано для відкачки сильнотимових імпульсних прискорювачів, тому що він забезпечує відкачку об'єму без вібрацій, а також, без створення електричного і магнітного полів, які роблять перешкоди для діагностики. Криогенні засоби відкачки є одним з небагатьох засобів, які при своїй роботі не вносять забруднень в відкачуваний об'єм. Криогенні насоси слід застосовувати не тільки для отримання високого вакууму [139], а й для реалізації безмасляного режиму форвакуумної відкачки. При цьому, на перший план виходять питання економічної роботи насосів. Розроблений та встановлений для прискорювача насос запропонованої конструкції працює на одному холодоагенті з

ефективним використанням відхідних парів, що збільшує його ресурс роботи без регенерації. Слід зазначити, що вакуум порядку $P=1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^{-7}$ Па можна було б отримати, використовуючи два окремих насоса - конденсаційний і адсорбційний, які охолоджуються рідким холодоагентом. Але при цьому витрати холодоагенту були би більшими. Вакуумна установка з двома окремими насосами має складнощі в експлуатації. На прискорювачі кріогенних насос (рис. 2.23) використовується для отримання чистого безмасляного вакууму в об'ємі $0,8 \text{ м}^3$ з відкачкою до $P=1 \cdot 10^{-4}$ Па залишкового тиску.

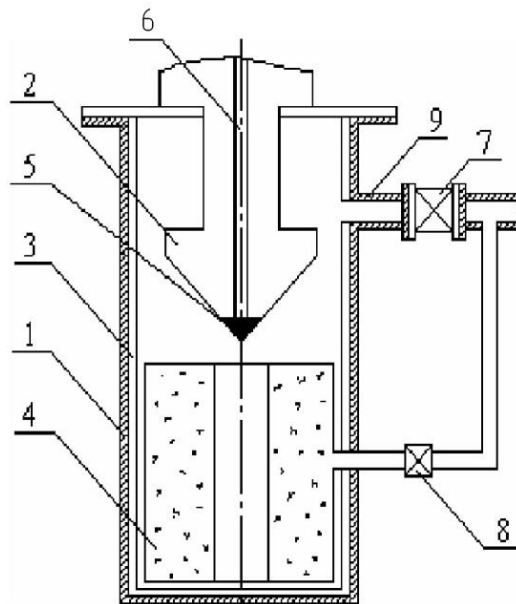


Рис. 2.23. Схема форвакуумного конденсаційно - адсорбційного насоса:

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

Представлений на рис. 2.23 насос складається з корпусу (1) із розміщеним в ньому охолоджуванім конденсаційним елементом (2) з порожниною для холодоагенту. У нижній частині насоса під конденсаційним елементом знаходиться збірник конденсату (3), в якому встановлено адсорбційний патрон (4). Вентиль, що встановлено в порожнині елемента, виготовлено у формі запірного конусу (5), з направляючим стрижнем (6), керування яким виведено назовні корпусу (1). Насос підключається до відкачуваного об'єму через вакуумпровід (9). Порядок роботи насоса наступний. Спочатку клапани (7) і (8) закриті, адсорбційний насос (4) попередньо відрегеновано. Конденсаційний

елемент (2) охолоджується азотом з одночасним відкачуванням його парів механічним насосом. Атмосферне повітря, яке перебуває у внутрішньому обсязі порожнини корпусу (1) і збірника конденсату (3), конденсується на елементі (5). Отриманий рідкий конденсат потрапляє до збірника. Далі відкривається клапан (7), і газ із відкачуваного об'єму, який проходить по вакуумопроводу (9), конденсується на елементі (2). Отриманий рідкий конденсат також стікає в збірник (3). Після зниження тиску у відкачуваному об'ємі до тиску потрібної точки, закінчується стікання конденсату з конденсаційного елемента (2). Після чого клапан (7) закривається і відкривається вентиль (5), встановлений в порожнині конденсаційного елемента. Холодоагент потрапляє в збірник конденсату (3), забезпечуючи повне охолодження адсорбційного патрону (4). Як тільки тиск закінчує зростати в об'ємі корпусу (1), вентиль (5) слід закрити і продовжити відкачування парів з конденсаційного елемента (2). Після чого відкривається вентиль (7). При цьому, одночасно зменшується тиск в відкачуваному об'ємі та зменшується температура адсорбційного патрону. Наявність суміші конденсату і холодоагенту дозволяє охолоджувати адсорбент в адсорбційному патроні без від'єднання від об'єму корпусу збірника конденсату. При цьому циркуляція конденсату між збірником і конденсаційним елементом зведена до мінімуму. Якщо в якості холодоагенту використовувати рідкий азот, температура якого знижена за допомогою механічного насоса, то швидкість відкачування парів з об'єму насоса значно знижується. При досягненні тиску $P=1 \cdot 10^{-1}$ Па в робочому об'ємі закривається клапан (7) і відкривається клапан (8). Запуск адсорбційного патрона, що охолоджується рідким конденсатом і холодоагентом, дозволяє знизити тиск у робочому об'ємі до $P=1 \div 5 \cdot 10^{-4}$ Па.

Випробування насоса проводилися на стенді, обладнаному системою попередньої відкачки і напуску відкачуваного газу, а також, вакуумметричними пристроями. Для вивчення залишкової атмосфери використовувався омеготронний мас-спектрометр (ПДО-2). Отримано типові маспектри для вакуумних систем без прогріву. Спектри представлені в таблиці 4, де 1 - тиск $P=1,2 \cdot 10^{-6}$ Па, 2 - тиск $P=1,8 \cdot 10^{-7}$ Па.

Таблиця 4.

Результати вивчення залишкової атмосфери при використанні форвакуумного конденсаційно - адсорбційного насосу

№	Вміст газів, %							
	H ₂	CH ₄	H ₂ O	N ₂	O ₂	A ₂	CO ₂	ΣC _n H _n
1	44,5	4,5	7,8	25	2,8	4,3	7,1	4
2	56	3,1	12,4	16	2,1	3,2	5	2

Модернізована вакуумна система була скомпонована виходячи з того, щоб забезпечити оптимальну роботу прискорювача. Її схема наведена на рис. 2.24.

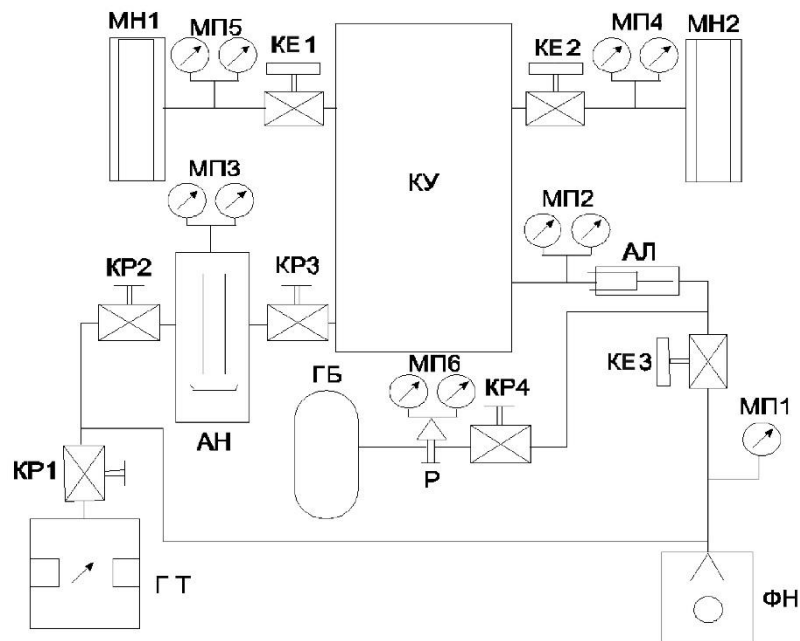


Рис. 2.24. Схема системи вакуумної відкачки прискорювача «Темп-Б»: ФН - форвакуумний насос; АН - конденсаційно-адсорбційний насос; МН1, МН2 - магніторозрядний насос; ГТ - гелієвий течешукач; Р - редуктор; КР1 – КР4 - клапани з ручним приводом; КЕ1 - КЕ3 - клапани з електромеханічним приводом; АЛ - азотна пастка; КУ - камера прискорювача; ГБ - газовий балон; МП1 - МП6 - манометричні перетворювачі.

Вакуумна камера діоду має систему вакуумної відкачки та систему регульованої подачі газоподібного азоту в вакуумну камеру. Це дозволяє

промивати камеру азотом шляхом його напуску і подальшої відкачки. Система вакуумної відкачки складається з: лінії форвакуумної відкачки, лінії високовакуумної відкачки, лінії напуску азоту, а також діагностичного модуля. Лінія форвакуумної відкачки призначена для відкачування вакуумної камери прискорювача і магніторозрядних насосів з атмосферного тиску до $P \sim 7 \cdot 10^{-1}$ Па. Форвакуумна відкачка проводиться форвакуумним насосом АВЗ-20 через відкритий клапан з електромеханічним приводом КЕЗ і, заповненою азотом, азотною пасткою ЛАФ-32. Тиск в лінії та робочій камері контролюється за допомогою манометричних перетворювачів МП1 і МП2. Лінія напуску та тонкого регулювання тиску азоту включає в себе балон з азотом, що знаходиться під тиском $150 \cdot 10^5$ Па, редуктор, що знижує тиск у ньому до $0,1 \cdot 10^5$ Па, клапан з ручним керуванням КР4. Лінія високовакуумного відкачування складається з конденсаційно-адсорбційного насосу АН з манометричним перетворювачем МП3, що з'єднується з КУ через клапан з ручним приводом КР3, двох МН1 і МН2, що відкачують камеру прискорювача через клапани з електромеханічним приводом КЕ1 і КЕ2. Магніторозрядні насоси забезпечені манометричними перетворювачами МП4 і МП5.

У зв'язку зі складним компонуванням вакуумної системи і особливостями конструкцій КУ, усі елементи регулярно перевірялися гелієвим течешукачем ГТ, підключеним до установки через клапан з ручним приводом КР1.

Схема роботи вакуумної системи:

При відкритих клапанах КЕ1, КЕ2, КЕЗ, КР3 відбувається відкачка камери прискорювача форвакуумним насосом АВЗ-20 через заповнену рідким азотом азотну пастку ЛАФ-32 до тиску $P=7 \cdot 10^{-1}$ Па, що є перехідним режимом між вязкостним і молекулярним режимом течії газу. Після чого перекривається клапан КЕЗ і вимикається форвакуумний насос. При закритому клапані КР3 і заливається азот в конденсаційно-адсорбційний насос АН. Після запуску АН необхідно відкрити КР3 і відкачати систему до тиску $P=3 \cdot 10^{-3}$ Па. Після закриття клапанів КЕ1 і КЕ2 і відбувається запуск магніторозрядних насосів МН1 і МН2 до виходу їх на робочий режим. При тиску $P=2 \cdot 10^{-5}$ Па необхідно відкрити насоси МН1 і

МН2 для відкачки камери прискорювача. Виконання представленої процедури дозволяє отримувати та підтримувати робочий тиск в прискорювачі на рівні $P=1 \cdot 10^{-4}$ Па. Запропонована вакуумна система дозволяє отримати умовно безмасляний вакуум, а також, при перекомутації насосів, безмасляний вакуум. Під безмасляним вакуумом розуміється вакуум, який отримано без роботи форвакуумних насосів, що працюють на маслі. В результаті роботи цих насосів, пари масла проникають в робочий об'єм навіть через азотні пастки. Система криогенної вакуумної відкачки дозволяє швидко виходити на робочий режим $P=1 \cdot 10^{-4}$ Па, підтримувати установку в відкачаному стані тривалий час і значно скоротити час підготовки вакуумної камери між імпульсами.

2.4.2. Вплив тиску залишкових газів на тривалість розряду прискорювача релятивістських електронних пучків

Виконання вакуумних умов при роботі імпульсних сильнострумівих прискорювачів релятивістських електронних пучків дуже важливо, особливо при роботі прискорювачів мікросекундної тривалості. Пучок з енергією в декілька десятків кілоджоулів взаємодіє з мішенню, або висаджується на стінку камери дрейфу. В результаті утворюється газополум'яний факел, який призводить до скорочення тривалості високовольтної частини розряду, та скорочення терміну служби основних вузлів прискорювача, магніторазрядних насосів і т.д. В результаті роботи прискорювача РЕП на осцилограмі може спостерігатися однополярний сигнал значної тривалості, що перевищує час високовольтної частини розряду, під час якої формується РЕП. Це пов'язано, в першу чергу, з тим, що в результаті імпульсу зриваються сконденсовані гази і вуглеводневі сполуки з елементів вакуумного діода, що призводить до пробую анод - катодного проміжку. Осцилограма струму РЕП, що отримана при тиску залишкових газів $P \geq 1 \cdot 10^{-1}$ Па в вакуумному діоді прискорювача РЕП приведена на рис. 2.25.

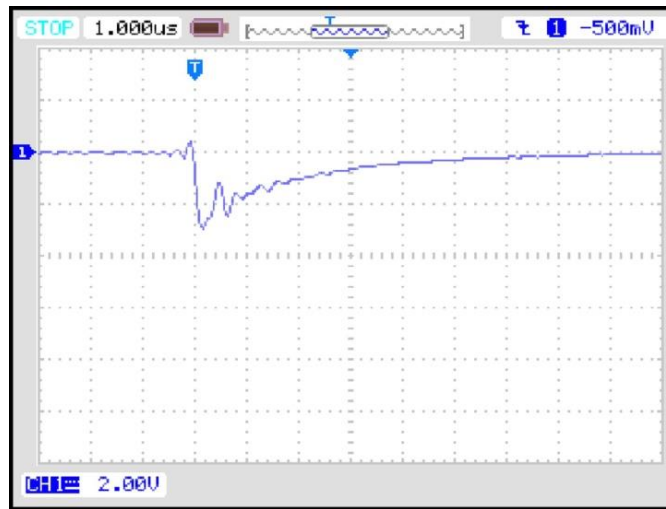


Рис. 2.25. Осцилограма струму РЕП прискорювача при тиску залишкових газів у вакуумному діоді $P \geq 1 \cdot 10^{-1}$ Па

На осцилограмі (рис. 2.25) струм РЕП складає близько $I_{\text{П}} \approx 2$ кА, при тривалості імпульсу порядку $\tau \approx 4$ мкс. Зарядна напруга ГНа становила $U_3 \approx 400$ кВ. Тривалість імпульсу рентгенівського випромінювання становила $\tau \approx 1$ мкс відповідно. Можна припустити, що джерелом електронів в даному випадку служить електронна компонента газового розряду.

Відомо, що в прискорювачах РЕП основними залишковими газами є атмосферна газова суміш. При опроміненні досліджуваних мішеней з різних матеріалів спостерігається значне підвищення в вакуумному обсязі рівня вуглеводнів, водяної пари і водню. Тому, очевидно, що для поліпшення вакуумних умов прискорювача РЕП необхідне застосування насосів, які б дозволяли реалізовувати велику швидкість відкачки як основних залишкових газів, так і тих, що з'являються в вакуумному об'ємі після імпульсу РЕП. Модернізована вакуумна система дозволяє працювати прискорювачу в циклічному режимі. Однак, в запропонованій вакуумній системі відсутня можливість проводити нагрів системи для дегазації внутрішніх поверхонь робочих елементів. Відомо, що при дуже низьких тисках, переважна частина газу знаходиться на стінках в адсорбованому стані. В процесі відкачування газу з порожнини, в нього потрапляє газ, що десорбується зі стінок. Прогрів системи

збільшує час десорбції, що веде до очищення камери від домішок, головним чином, молекул органічних сполук. При опроміненні поверхні адсорбовані шари поверхні можуть руйнуватися аж до виділення елементарного вуглецю. Але в реалізованих умовах прогрівати прискорювальну колону вакуумного діода не слід. Ізолятори колони зроблені з компаунду на основі епоксидної смоли, яка при нагріванні розм'якшується. А вклеєні градієнтні кільця з сталі (X18H10T) ще більше розм'якшують місця склеювання, що призводить до руйнування прискорювальної колони.

Застосування криогенних засобів відкачування залишкових газів (конденсаційно-адсорбційного насоса) в схемі відкачування залишкових газів на прискорювачі РЕП «Темп-Б» дозволило збільшити тривалість імпульсу струму РЕП. На рис. 2.26 приведені осцилограми струму і напруги РЕП отримані на прискорювачі «Темп-Б» до та після модернізації вакуумної системи.

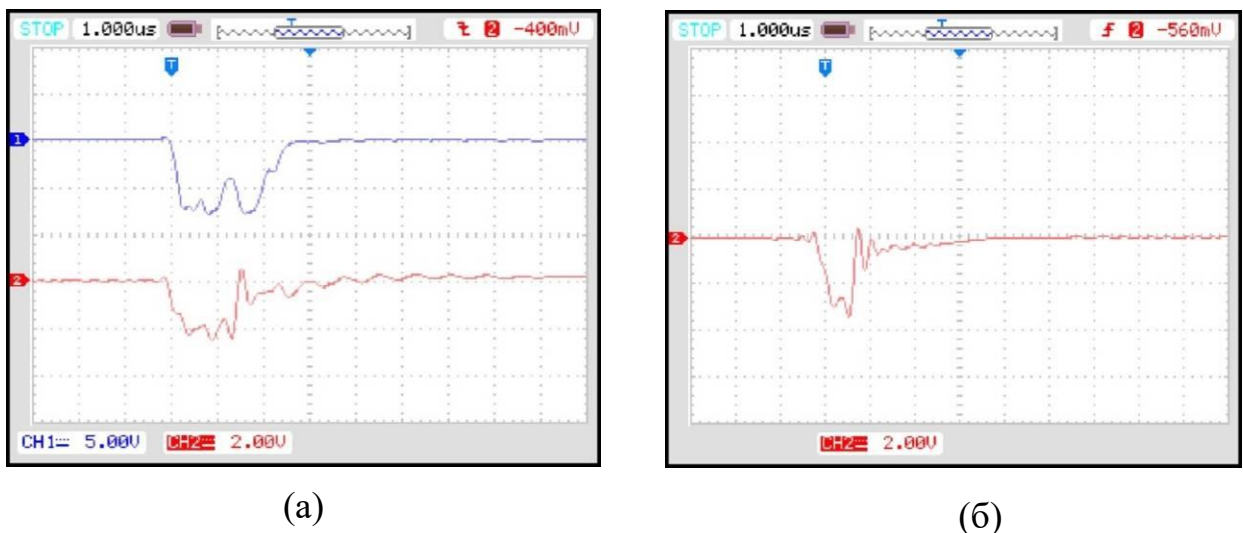


Рис. 2.26. Осцилограми струму і напруги РЕП, отримані на прискорювачі РЕП «Темп-Б»:

а - з модернізованою системою відкачування залишкових газів $P \geq 1 \cdot 10^{-4}$ Па,

б - з штатною системою відкачування залишкових газів $P \geq 1 \cdot 10^{-2}$ Па

На рис. 2.26-(а) наведені осцилограми напруги (промінь 1) і струму (промінь 2) РЕП, що отримані на прискорювачі «Темп-Б» з модернізованою магнітною системою та криогенною системою відкачування залишкових газів.

Протягом 1,5 мкс виникає газовий розряд, напруга падає, а струм РЕП зростає до 20 кА. Зарядна напруга ГІНа становить $U_3 \approx 750$ кВ.

На рис. 2.26-(б) наведена осцилограма струму РЕП, що отримана на прискорювачі «Темп-Б» до модернізації вакуумної системи та магнітної системи. Протягом 1 мкс виникає газовий розряд, напруга падає, а струм РЕП зростає до 11 кА. Зарядна напруга ГІНа становить $U_3 \approx 750$ кВ.

Таким чином, з вище преведеного слідує, що однією з причин втрат енергетичного запасу РЕП, при його проходженні до мішені, є гальмування РЕП на молекулах органічних сполук, а також сконденсованих газів з відходом частини РЕП на стінки камери дрейфу.

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

2.5. Висновки

Для збільшення потужності концентрованих потоків енергії на прискорювачах РЕП при незмінному енергетичному запасі розроблено метод, що полягає у комплексному застосуванні: розроблених конструкцій елементів вакуумного діоду в області формування та транспортування РЕП, застосуванні комбінованої магнітної системи з підвищеною напруженістю магнітного поля, використанні безмасляної криогенної вакуумної системи.

Таким чином, результати, отримані в даному розділі, зводяться до наступного:

1. На підставі проведеного числового моделювання визначено вплив форми анодних вставок та розміру катод-анодного проміжку на формування РЕП, показано, що доцільно використовувати анодні вставки конічного профілю, тому що вони дозволяють отримати істотно більші струми на колекторі в порівнянні з анодними вставками циліндричного профілю.

2. Представлено результати досліджень з розробки магнітної системи для транспортування РЕП до місця взаємодії. Розроблена і апробована магнітна

система, що працює зі змінною частотою проходження імпульсів без використання накопичувачів, розрядників, трансформаторів, баластних опорів. Напруженість магнітного поля в місці взаємодії РЕП та конвертера складає $H = 4,5 \cdot 10^5$ А/м.

3. Встановлено, що магнітна система, що складається з двох соленоїдів з напруженістю магнітного поля $1,7 \cdot 10^6$ А/м, дає можливість сформувати і провести РЕП з струмом більше 20 кА. Запропонована конструкція магнітної системи повністю вирішує задачу по фокусуванню і транспортуванню РЕП до камери взаємодії для отримання максимальних доз ГРВ.

4. Удосконалена кріогенна вакуумна система дозволяє працювати прискорювачу в циклічному режимі й отримувати безмасляний вакуум. Для модернізації вакуумної системи прискорювача РЕП «Темп-Б» було використано азотний конденсаційно-адсорбційний насос, який дозволяє швидко виходити на робочий режим $P=1 \cdot 10^{-4}$ Па та значно скоротити час підготовки вакуумної камери прискорювача між імпульсами. Експериментально встановлено, що однією з причин втрат енергетичного запасу РЕП, при його проходженні до мішені, є гальмування РЕП на молекулах органічних сполук, а також сконденсованих газів з відходом частини РЕП на стінки камери дрейфу.

5. Розроблено методику, яка дозволила вимірювати струми в соленоїдах магнітних полів до 1000кА датчиком Холла с межами вимірювань ± 200 А. Розроблена для прискорювача РЕП «Темп-Б» синхронізуюча стійка дозволяє встановлювати затримки імпульсів у діапазоні від 1 мкс до десятків мілісекунд завдяки використанню генератора з кварцевою стабілізацією частоти імпульсів, що йдуть на двійковий лічильник, з подальшою дешифрацією запускаючого імпульсу. Представлено розроблений і виготовлений стенд для калібрування поясів Роговського, за допомогою якого вимірюється струм РЕП, а також струм в котушках соленоїдів магнітних полів. Розроблена конструкція комбінованого вимірника струму і напруги на виході ГІНа дозволяє вимірювати ці параметри в одній точці і без тимчасового зсуву. На прискорювачі «Темп-Б» розроблена методика по вимірюванню заряду останнього конденсатора в кожному каскаді

ГІНа. Інформація про заряд конденсаторів передається на реєструючий пристрій через оптичний кабель.

6. Розроблено і зібрано діагностичний модуль з параметрами: зарядна напруга до 90 кВ, струм розряду до 50 кА, фронт наростання струму 600 нс, він дозволяє моделювати роботу прискорювача. Розроблений високовольтний розрядник для діагностичного модуля дозволяє працювати в діапазоні напруг від 5 до 90 кВ.

7. Розроблено радіаційно-пучковий технологічний комплекс на базі імпульсних сильнострумівих прискорювачів «Темп - А» з енергією РЕП $E_{\pi} \approx 350$ кеВ та «Темп - Б» з енергією РЕП $E_{\pi} \approx 750$ кеВ.

РОЗДІЛ 3. ГЕНЕРАТОРИ ГАЛЬМІВНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА БАЗІ ІМПУЛЬСНИХ СИЛЬНОСТРУМОВИХ ПРИСКОРЮВАЧІВ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ

Удосконалення радіаційно-пучкового методу - один з важливих напрямків експериментальних досліджень, що забезпечує ефективне використання сильнострумової прискорювальної техніки. Необхідність цих досліджень викликана широким спектром робіт з вивчення фізико-механічних властивостей конструкційних матеріалів, металів і сплавів за допомогою РЕП [150]. Інший напрямок - це вивчення радіаційного впливу на матеріали, використовувані в ядерній енергетиці, моделювання умов реакторної зони, вивчення поведінки і стійкості існуючих і розроблюваних матеріалів для ядерної енергетики. Генерація ГРВ здійснювалася на двох сильнострумових прискорювачах РЕП «Темп-А» і «Темп-Б» [151], дослідження яких розглядалось в другому розділі.

В даному 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 опромінюваних матеріалів та діагностичної апаратури було розроблено вакуумні рентгенівські вводи з комбінованими конвертерами.

3.1. Розрахунок основних параметрів генератора гальмівного рентгенівського випромінювання на радіаційно-пучковому комплексі

В даному підрозділі наведено оцінний розрахунок параметрів ГРВ на прискорювачі «Темп-Б» ($E \approx 0,5 - 0,75$ MeV, $I \approx 10 - 25$ кА, $\tau \approx 1,5$ мкс) і

прискорювачі «Темп-А» ($E \approx 0,3 - 0,5$ МеВ, $I \approx 2 - 3$ кА, $\tau \approx 4$ мкс). Розрахунок дозових величини для суцільного РЕП проведено за спрощеними емпіричними формулами

$$D = 0,8 \cdot 10^{-3} \frac{W_e}{R^2} \cdot T_e^{1,7} \cdot \sqrt{\frac{Z_M}{13}}, [P] \quad (3.1)$$

$$\dot{D} = 0,8 \cdot 10^3 \frac{i_e}{R^2} \cdot T_e^{2,7} \cdot \sqrt{\frac{Z_M}{13}}, [P/c], \quad (3.2)$$

де: W_e - енергія пучка електронів (Дж), T_e - енергія електронів (МеВ), R - відстань від мішені (м), i_e - струм пучка (А), Z_M - атомний номер матеріалу мішені. Результати розрахунків експозиційної дози D і її потужності \dot{D} на різних відстанях R від танталової мішені ($Z_M = 73$) для різних енергій пучка наведені в таблиці 5.

Таблиця 5.

Результати розрахунків експозиційної дози D та її потужності \dot{D} на різних відстанях R від конвертора для прискорювачів РЕП «Темп - Б» та «Темп - А»

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

При взаємодії потоку жорстких фотонів з речовиною здійснюється ослаблення ГРВ. При цьому, поглинене випромінювання призводить до певних змін в самій речовині [64]. При цьому характер взаємодії істотно залежить від інтенсивності випромінювання. Інтенсивність гальмівного випромінювання для

мішеней з речовини, що має порядковий номер Z , в яких електрони повністю гальмуються при енергії до 1 МеВ, приблизно дорівнює [66]:

$$I_{\text{гальм}} = 3 \times 10^{-6} \times i \times Z \times U^{1.75}, \quad (3.3)$$

де i - струм пучка мА, U - прискорююча напруга, кВ. Відносний інтегральний енергетичний вихід гальмівного випромінювання при повному гальмуванні електронів в мішенях з матеріалів з атомним номером Z , згідно [68], дорівнює:

$$\eta = \frac{I_{\text{гальм}}}{i \times U} = 3 \times 10^{-6} \times Z \times U^{0.75}, \quad (3.4)$$

Товщина мішені-конвертера має суттєвий вплив на інтенсивність ГРВ. Оптимальна товщина мішені залежить від глибини проникнення електронів в речовину [70], а саме:

$$\delta = \frac{10^{-5} \times E^{3/2}}{\rho}, \quad (3.5)$$

де E - енергія електронів (кеВ), ρ - густина речовини (г/см³).

Результати розрахунку інтенсивності гальмівного випромінювання $-J_{\text{гальм}}$, відносного енергетичного виходу $-\eta$, величини проникнення електронів в речовину $-\delta$, для мішеней з вольфраму ($Z = 74$), танталу ($Z = 73$) і молібдену ($Z = 42$) при різних значеннях потенціалу на катоді U кВ представлені в таблиці 6.

Таблиця 6.

Залежність інтенсивності, відносного енергетичного виходу ГРВ при максимальній величини проникнення електронів у речовину для конвертерів з W,

Та, Мо від потенціалу на катоді

Параметри	Матеріал конвертера					
	вольфрам		тантал		молібден	
U , кВ	350	750	350	750	350	750
$J_{\text{гальм}}$, Вт	$4,8 \cdot 10^7$	$4,44 \cdot 10^8$	$2,72 \cdot 10^7$	$4,44 \cdot 10^8$	$2,72 \cdot 10^7$	$2,52 \cdot 10^8$
η	0,016	0,030	0,009	0,0298	0,009	0,017
δ , мкм	27	96,2	31,2	110	50,8	180

Експериментально визначене значення максимального відносного енергетичного виходу ГРВ складає $\sim 1,6\%$, так як враховано тільки частина випромінювання, що відповідає напрямку транспортування пучка.

Зі збільшенням атомного номера речовини зменшується глибина проникнення електронів вглиб мішені, але збільшується інтенсивність ГРВ. Тому при виборі матеріалу конвертера треба обирати його товщину враховуючи технічне завдання.

3.2. Обґрунтування вибору матеріалу конвертера для отримання гальмівного рентгенівського випромінювання

Використання гальмівного випромінювання дозволяє проводити дослідження матеріалів, що мають значну товщину. Однак, при використанні сучасних потужних прискорювачів, у гальмівне випромінювання перетворюється всього лише 4-6% енергії електронів. Характеристики ГРВ визначаються параметрами електронного пучка, конструкцією і матеріалом конвертера. В результаті термічного впливу потужного РЕП на матеріал конвертера відбувається його викривлення, розтріскування, часткове або повне проплавлення, або руйнування, що вимагає повної заміни даного вузла і подовжує час проведення експериментальних досліджень. Таким чином, з огляду на результати розрахунку ефективності перетворення енергії електронів в γ - випромінювання [152], вибір конструкції конвертера зводиться до вибору матеріалу, який при мінімальній товщині не руйнується при впливі РЕП після ряду пусків прискорювача. Основним критерієм до вибору конструкції конвертера є його механічні та теплофізичні властивості, які повинні забезпечувати високу стійкість і довговічність під впливом екстремально високих імпульсних теплових навантажень, яким матеріал піддається при опроміненні сильнотумовими релятивістськими електронними пучками. У меншій мірі вибір матеріалу конвертера залежить від його ефективності перетворювати енергію електронного пучка в гальмівне випромінювання.

Вибираючи матеріал для мішені, приймають зазвичай до уваги не тільки інтенсивність ГРВ, яка зростає квадратично зі збільшенням заряду ядер речовини, але також розповсюдженість та коштовність матеріалу і його фізичних властивостей, головним з яких є температура плавлення. Оскільки велика частина енергії електронів (75% і більше) при взаємодії з мішенню перетворюється в тепло, то, як правило, з міркувань теплостійкості, в якості матеріалів мішені використовують тантал с $Z = 73$ або вольфрам с $Z = 74$. Температура плавлення вольфраму становить 3380°K , в той час як відповідні значення для золота ($Z = 79$): 1063°K , а урану ($Z = 92$): 1133°K .

При визначенні товщини конвертеру слід враховувати два конкуруючих чинники: по-перше, чим товстіший конвертер, тим більша частка кінетичної енергії електронів перетворюється в енергію ГРВ; по-друге, при збільшенні товщини збільшується вплив поглинання ГРВ в матеріалі конвертеру. Тому, залежність інтенсивності ГРВ від товщини конвертера носить екстремальний характер[152]. Оптимальна товщина конвертера для танталу дорівнює, приблизно, 0,3 - 1 мм. Оцінюючи інтенсивність ГРВ, зазвичай вважають, що конвертер має оптимальну товщину, тобто забезпечує максимальний вихід ГРВ.

3.3. Генератори гальмівного рентгенівського випромінювання

Важливою величиною, що характеризує гальмівне рентгенівське випромінювання, є інтенсивність J . Експериментально встановлено, що інтенсивність гальмівного рентгенівського випромінювання дорівнює квадрату напруги помноженому на струм РЕП. Потік енергії випромінювання виражається:

$$P = k_0 IU^2, \quad (3.6)$$

де, k_0 - коефіцієнт пропорційності, U -напруга, I - струм пучка.

Інтенсивність ГРВ при взаємодії пучка електронів з мішенню залежить від чотирьох основних чинників: струму електронів, їх енергії, матеріалу мішені та її товщини. В експериментах всі зазначені вище методи підвищення інтенсивності

ГРВ були реалізовані. Подальше підвищення інтенсивності ГРВ було отримано за рахунок використання на прискорювачах кромкових катодів. На рис. 3.1 представлено відбиток трубчастого РЕП на конвертері з нержавіючої сталі, що було отримано на прискорювачі «Темп-Б» при використанні кромкового катоду.



Рис. 3.1. Відбиток трубчастого РЕП на конвертері з нержавіючої сталі

Як видно з рис. 3.1 сталь не варто використовувати в якості конвертера, вона дуже швидко руйнується після потрапляння на неї РЕП. До пропалювання 2 мм. конвертера було зроблено 5 імпульсів на прискорювачі «Темп-Б». Діаметр відбитку трубчастого РЕП, наведеного на рис. 3.1, складає 55 мм, струм пучка – 21 кА, енергія електронів – 0,75 МеВ.

Для зручності проведення експериментів розроблені та створені вакуумні рентгенівські канали, які дозволяють змінювати зразки для опромінення, не порушуючи вакуумних умов роботи прискорювача, а також одночасно, проводити вимірювання параметрів γ - випромінювання. Для прискорювачів було спроектовано та виготовлено кілька джерел ГРВ довжиною від 390 мм до 600 мм з корисною площею опромінення до 700 мм².

Кріплення конвертера на вакуумному ввіді здійснюється за допомогою накидної гайки. Вакуумну ізоляцію забезпечує кільцева прокладка з вакуумної гуми. Перше джерело ГРВ було виготовлено на базі кромкового і конусного катодів, що працюють в парі з конусною анодною вставкою. Схеми джерел ГРВ представлені на рис. 3.2.

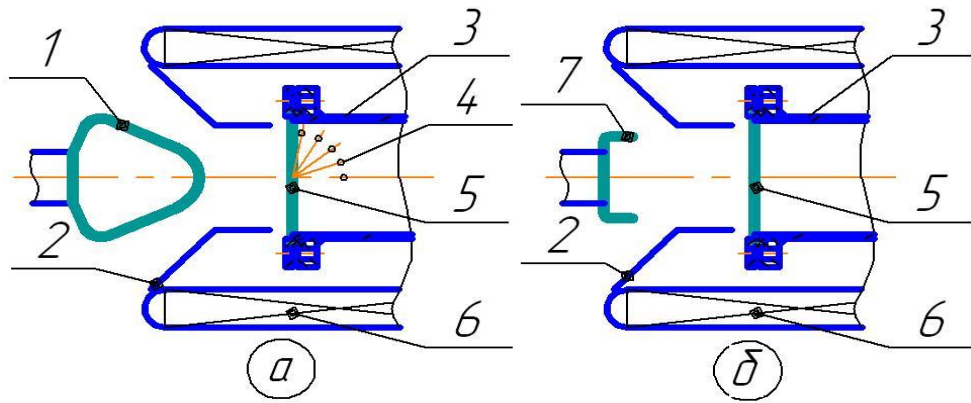


Рис. 3.2. Схеми джерел ГРВ:

- а – суцільний РЕП: 1 - конусний катод; 2 - анодна вставка; 3 - вакуумний канал;
 4 - рентгенівські датчики; 5 - конвертер; 6 - соленоїд магнітного поля;
 б - трубчастий РЕП: 2 - анодна вставка; 3 – вакуумний канал; 5 - конвертер;
 6 - соленоїд магнітного поля; 7 - кромковий катод

Схема експерименту, що представлена на рис. 3.2 (б), використана для отримання трубчастих РЕП. Анодна вставка (2) являє собою конус з кутом розкриття 90° і довжиною 37 мм. Електрони емітували вибухоемісійним циліндричним кромковим катодом, діаметром 76 мм з висотою кромки 17 мм та товщиною кромки 1 мм. Відстань від кромки катода до анодної вставки (катод - анодний проміжок) дорівнювала 30 мм. Камера дрейфу має довжину 200 мм.

Для отримання суцільного РЕП використано конусний графітовий катод, який забезпечує необхідну рівномірність розподілу густини пучка. Друге джерело для отримання максимальної дози ГРВ на «Темп-Б» було розроблено на базі кромчастого катода. Схема експерименту представлена на рис 3.3.

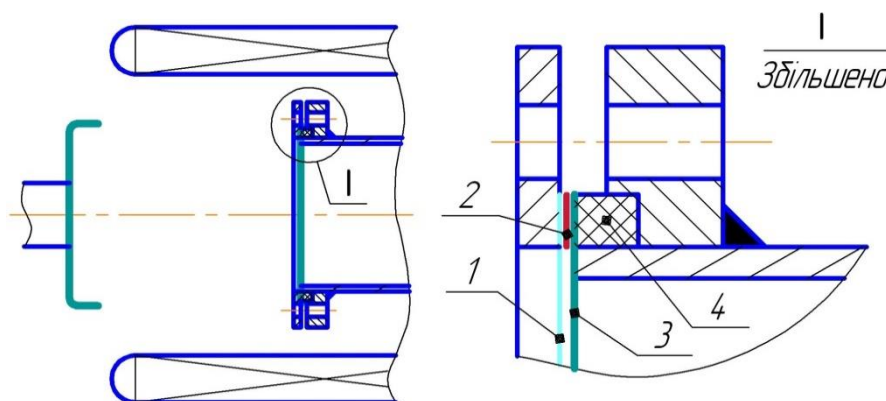


Рис. 3.3. Джерело для отримання ГРВ з комбінованим конвертером

Для цього використано циліндричний кромковий катод діаметром 96 мм з шириною кромки 15 мм і товщиною кромки 1 мм. Катод - анодний проміжок становить 30 мм. Для отримання максимальних доз ГРВ на цьому джерелі було розроблено та виготовлено комбінований конвертер. Всі струмопровідні елементи комбінованого конвертера електрично пов'язані між собою та знаходяться під одним потенціалом. Комбінований конвертер складається з:

1. Титанової пластини, товщиною 30-50 мкм, що виконує наступні функції: захисного екрану, який приймає на себе ударну хвилю, фільтра пучка (низькоенергетичні електрони та іони катодної плазми осідають на пластині і їх енергія відводиться на землю), уловлювача і демпфера викидів з колектора, спрямованих в зворотному напрямку.

2. Мідної шайби, товщиною 200 мкм, яка забезпечує необхідну відстань між екраном і конвертером, відіграючи роль демпфера, а також для зняття теплового навантаження.

3. Конвертера, виконаного з танталу товщиною від 50 до 500 мкм, в якому відбувається основний процес перетворення енергії пучка електронів в теплову енергію і гальмівне випромінювання.

4. Прокладки з вакуумної гуми, товщиною 4 мм, яка виконує роль кільцевого амортизатора і вакуумного ізолятора.

В цілому, така конструкція зменшує енергетичне навантаження на конвертер, що дозволяє збільшити його ресурс на 30%. При цьому підвищується ефективність конвертера, як перетворювача. Здійснюване захисним екраном фокусування РЕП підвищує як інтенсивність виходу ГРВ в напрямку транспортування пучка, так і коефіцієнт використання ГРВ при опроміненні зразків. Опромінення матеріалів проходило наступним чином: електронний пучок, сформований в вакуумному діоді з магнітною ізоляцією, транспортувався по камері дрейфу на конвертер і генерував жорстке ГРВ. Вихід жорсткого ГРВ реєструвався в напрямку інжекції пучка за конвертером.

3.4. Експериментальне дослідження просторово-кутового розподілу інтенсивності гальмівного рентгенівського випромінювання

Вимірювання іонізуючого випромінювання являє собою реєстрацію процесу взаємодії потоку іонізуючого випромінювання з фізичним середовищем детектора випромінювання, і в перетворенні актів взаємодії в електричні сигнали, які можуть бути зареєстровані осцилографом. Процес вимірювання реалізується тільки в тому випадку, якщо взаємодія випромінювання з речовиною детектора супроводжується процесом перетворення енергії випромінювання в інший вид енергії, зручний для реєстрації. Найбільш проникаючу дію мають γ -випромінювання з більшою довжиною пробігу квантів, в зв'язку з чим для вимірювання використовуються напівпровідникові детектори, ефективність реєстрації яких тим більше, чим більше їх густина, геометричні розміри і ефективний атомний номер речовини детектора. Робота напівпровідникового детектора схожа на реєстрацію випромінювання газовим іонізаційним приладом. При проходженні зарядженої частинки через напівпровідник створюється пара електрон - дірка. Найменшу питому енергію утворення однієї пари носіїв заряду (електрон - дірка) мають напівпровідникові детектори від 2,9 еВ до 3,7 еВ, що забезпечує їм найкращу енергетичну роздільну здатність з усіх типів детекторів. Сигнал з напівпровідникового детектора пропорційний поглиненій у ньому енергії та дорівнює

$$\phi = E \times \frac{e}{\varepsilon}, \quad (3.7)$$

де: ϕ - заряд, утворений в детекторі, Кулон, E - поглинена енергія (еВ), e - заряд електрона ($1,6 \cdot 10^{-19}$ К), ε - середня енергія, необхідна для утворення пари електрон - дірка (еВ). Сигналом з виходу напівпровідникового детектора є струм, що виникає в результаті іонізації в детекторі, який лінійно по відношенню до потужності дози, незалежно від температури. Для реєстрації сигналу з напівпровідникового детектора було виготовлено підсилювач струму на основі

малешумливого операційного підсилювача з низьким значенням вхідного струму рис. 3.4.

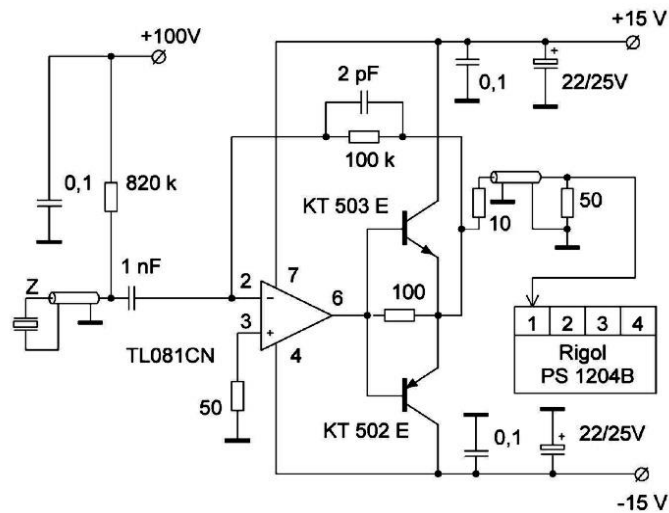


Рис. 3.4. Схема підсилювача сигналу з напівпровідникового детектора

Зсув напруги напівпровідникового датчика становить 100 В. Також, для вимірювання рентгенівського випромінювання застосовано детектор на основі сульфідно - кадмієвого фоторезистора, який дозволяв вимірювати потужність до 0,5 Р/год, що відповідає 3,6 А/кг в системі СІ. Вимірювання поглиненої дози проводилося також термолюмінесцентним універсальним дозиметром ДТУ-01, призначеним для вимірювання поглинених доз рентгенівського і γ - випромінювання з енергією вище 10 кеВ. При відповідних градуваннях можливий вимір доз заряджених частинок в широкому енергетичному інтервалі. Комплект може бути застосовано для реєстрації безперервного і імпульсного випромінювання в діапазоні вимірюваних доз $10^{-4} \div 10^2$ Гр. Дозиметр термолюмінесцентний універсальний ДТУ-01 включає в себе: а). полікристалічні детектори на основі Li ($d = 3,5$ мм, $h = 2$ мм, $S = 10$ мм², $\rho = 1,17$ г/см³), активовані Са, Mg і Ti; б). пульт управління з блоками термоподсвічення і повторної термообробки; с). індивідуальні касети для детекторів.

Щоб отримати інформацію про поля ГРВ в просторі за конвертером прискорювача необхідно знати розміри пучка електронів, його розбіжність на конвертері і, крім того, кутовий розподіл утвореного ГРВ. При гальмуванні в конвертері електронів з енергією до 0,2 МеВ максимальна інтенсивність

випромінювання спостерігається в напрямку, перпендикулярному руху пучка.

З ростом енергії випромінювання стає все більш спрямованим вперед за напрямком руху пучка. В реальних умовах присутнє розсіяне випромінювання, а також випромінювання, відбите від елементів конструкції прискорювача. Тому, діаграма спрямованості розподілу доз ГРВ буде змінюватися.

Вимірювання доз ГРВ проводилися за допомогою термолюмінесцентних датчиків. Термолюмінесцентні датчики на основі LiF розташовувалися безпосередньо за конвертером на різних відстанях для визначення просторового розподілу ГРВ. Кожне значення дози отримано в результаті усереднення серії вимірювань з п'яти імпульсів прискорювача. Для визначення кутового розподілу ГРВ, отриманого взаємодією суцільного електронного пучка з конвертером, застосовувався напівпровідниковий детектор [156]. Габаритні розміри датчика - $5 \times 5 \times 15$ мм, його опір складає $\sim 10^9$ Ом. Сигналом з виходу напівпровідникового детектора є струм, що виникає в результаті іонізації в детекторі, який має лінійну характеристику по відношенню до потужності дози і не залежить від температури. Напівпровідниковий датчик було встановлено безпосередньо за конвертером під різними кутами (0° , 20° , 40° , 60° , 80°) по радіусу ~ 30 мм (рис. 3.2(a)). У таблиці 7 представлено результати вимірювань амплітуди ГРВ в вольтах.

Таблиця 7.

Кутове розподілення ГРВ від суцільних РЕП

РЕП з E=350 кеВ		РЕП з E=750 кеВ	
Кут, °	Амплітуда, В	Кут, °	Амплітуда, В
0	3,5	0	12
20	2,6	20	8,4
40	2	40	6,1
60	1,6	60	4,8
80	1,5	80	3,4

Виміри проводилися при енергіях пучка 350 кеВ і 750 кеВ. Для отримання суцільного РЕП використано графітовий катод.

Діаграма кутового розподілу ГРВ, побудованого за результатами вимірювань в частках інтенсивності випромінювання в прямому напрямку, наведена на рис. 3.5.

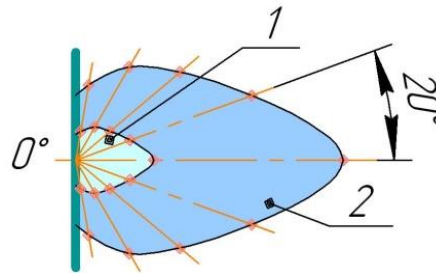


Рис. 3.5. Діаграма кутового розподілу ГРВ від суцільного РЕП з енергією електронів: 1 - 350 кеВ, 2 - 750 кеВ

Отриманий кутовий розподіл ГРВ використано для побудови діаграм спрямованості ГРВ трубчастого РЕП.

На рис. 3.6 представлені залежності розподілу як розрахункових - лівий графік, так і вимірних - правий графік доз D, P ГРВ від суцільного РЕП з енергією 0,75 МеВ - «Темп-Б» і 0,35 МеВ - «Темп-А».

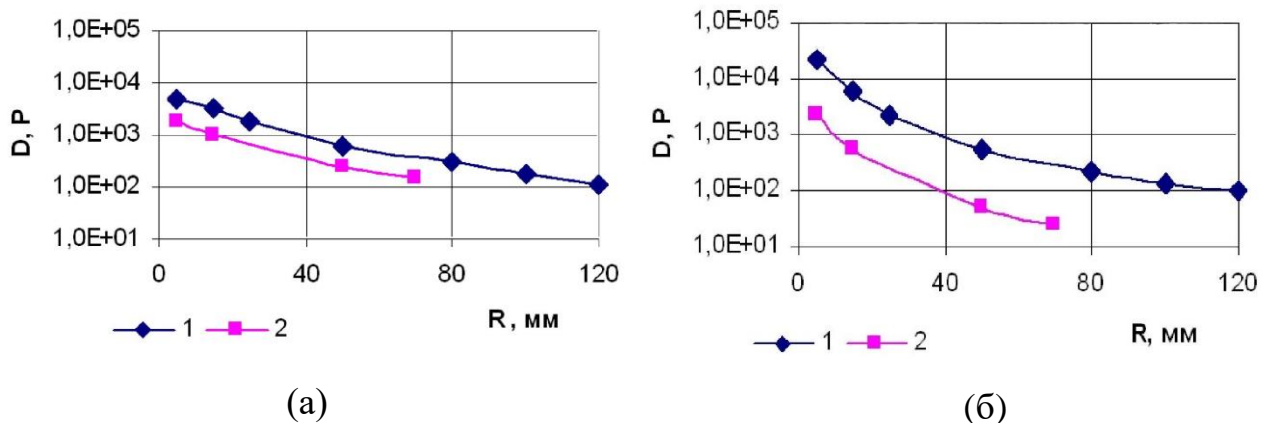


Рис. 3.6. Розподіл доз ГРВ від суцільного РЕП на прискорювачах:
а – експериментальні дані, б – розрахункові дані.
1 - «Темп-Б » (0,75 МеВ) 2 - «Темп-А» (0,35 МеВ)

Термомлюмінесцентні датчики і напівпровідниковий детектор розташовувалися на осі пучка на різних відстанях R від конвертера. Використовуючи за основу кутовий розподіл ГРВ для суцільного циліндричного

електронного пучка, були виміряні діаграми спрямованості ГРВ для трубчастих пучків для двох прискорювачів РЕП.

Для отримання трубчастого пучка на прискорювачі «Темп-А» рис. 3.7. (а) використано циліндричний катод з кромкою діаметром \varnothing 55 мм, яка має ширину 15 мм та товщину – 1 мм. Довжина катод - анодного проміжку – 25 мм. Діаметр відбитку пучка на мішені – \varnothing 45 мм. Параметри пучка: $I = 4$ кА, $E = 350$ кеВ, тривалість імпульсу 5 мкс.

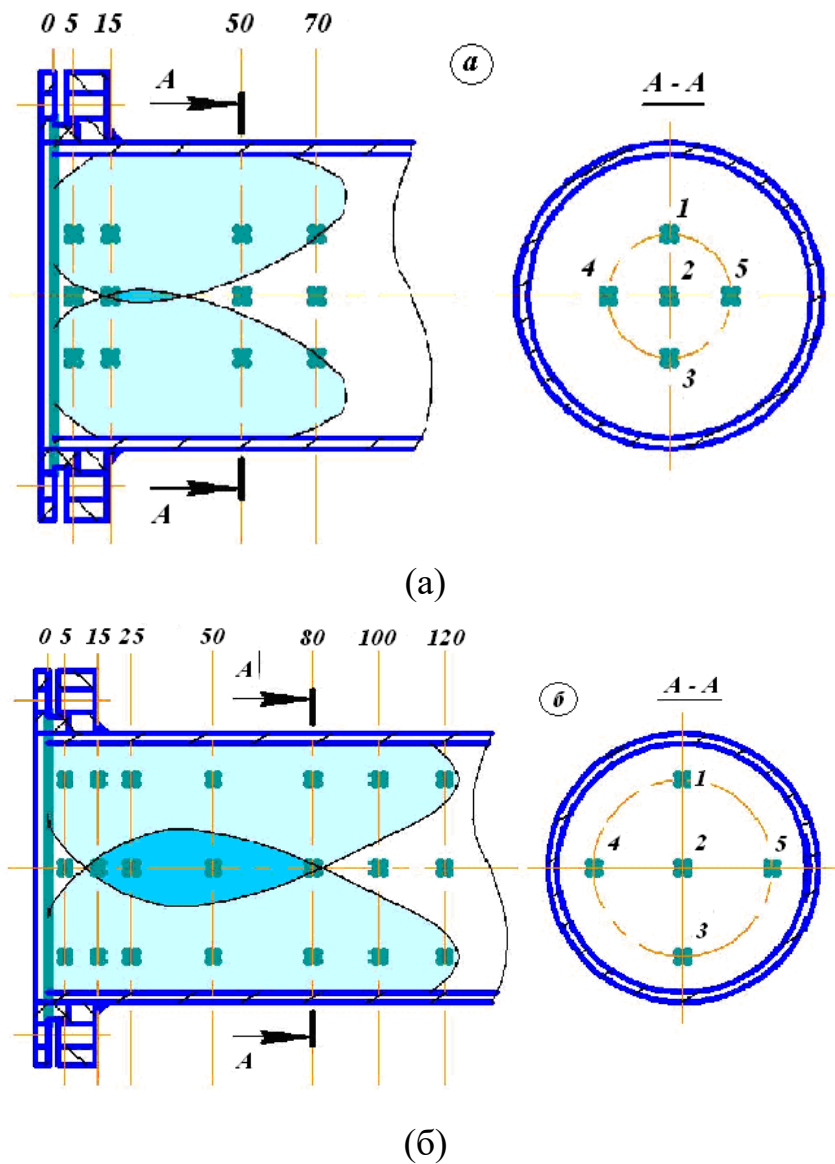


Рис. 3.7. Розташування датчиків та діаграма напрямку дії ГРВ на РПК.
а - Прискорювач «Темп-А» (0,35 МеВ), б - прискорювач «Темп-Б» (0,75 МеВ)

Для отримання трубчастого пучка на прискорювачі «Темп-Б» (рис. 3.7. (б)) використано циліндричний кромковий катод з нержавіючої сталі діаметром \varnothing 96 мм, який має ширину кромки 15 мм та товщину 1 мм. Довжина катод - анодного проміжку складає 25 мм. Діаметр відбитка пучка на конвертері з Та становить \varnothing 54 мм. Параметри пучка: струм $I = 21,5$ кА, енергія $E = 750$ кеВ, тривалість імпульсу 1,5 мкс.

Результати вимірювань експозиційних доз ГРВ, отриманих від трубчастого РЕП з енергією $E \approx 350$ кеВ на прискорювачі «Темп-А» з датчиків, розташованих на різних відстанях за конвертером, представлені в таблиці 8.

Таблиця 8.

Експозиційні дози ГРВ, що отримані від трубчастого РЕП з енергією $E \approx 350$ кеВ на прискорювачі «Темп-А» з датчиків, розташованих на різних відстанях за конвертером

№ Датчика	Відстань від конвертера, мм			
	5	15	25	70
Датчик №1, доза, Р	$6,610^3$	$4,810^2$	$3,310^2$	$2,510^2$
Датчик №2, доза, Р	$2,910^2$	$9,610^2$	$2,110^2$	$1,110^2$
Датчик №3, доза, Р	$6,010^3$	$4,410^2$	$3,510^2$	$2,610^2$
Датчик №4, доза, Р	$6,310^3$	$5,110^2$	$2,910^2$	$2,010^2$
Датчик №5, доза, Р	$5,910^3$	$4,0 \cdot 10^2$	$3,010^2$	$2,810^2$

Як видно з таблиці 8 для датчиків №2, що знаходяться на вісі прискорювача РЕП «Темп-А», на відстані 15 мм від конвертера спостерігається збільшення дози ГРВ за рахунок кільцевої геометрії пучка.

Результати вимірювань експозиційних доз ГРВ, отриманих від трубчастого РЕП з енергією $E \approx 750$ кеВ, на прискорювачі «Темп-Б» з датчиків, розташованих на різних відстанях за конвертером, представлені в таблиці 9.

Таблиця 9.

Експозиційні дози ГРВ, що отримано від трубчастого РЕП з енергією $E \approx 750$ кеВ, на прискорювачі «Темп-Б» з датчиків, розташованих на різних відстанях за конвертером

Відстань від конвертера, мм	5	15	25	50	80	100	120
Датчик №1, доза, Р	$9,1 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	$8,4 \cdot 10^2$	$6,1 \cdot 10^2$	$3,5 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^2$
Датчик №2, доза, Р	$6,2 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^3$	$9,5 \cdot 10^2$	$6,1 \cdot 10^1$	$2,3 \cdot 10^1$
Датчик №3, доза, Р	$9,9 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	$8,0 \cdot 10^2$	$5,8 \cdot 10^2$	$4,2 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^2$
Датчик №4, доза, Р	$8,8 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	$7,9 \cdot 10^2$	$6,3 \cdot 10^2$	$3,7 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^2$
Датчик №5, доза, Р	$9,4 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^2$	$6,8 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^2$

Як видно з таблиці 9 для датчиків №2, що знаходяться на осі прискорювача РЕП «Темп-Б», на відстані 15 мм від конвертера спостерігається збільшення дози ГРВ на 70% - за рахунок кільцевої геометрії пучка, а також за рахунок збільшення вкладеної в РЕП енергії в порівнянні з даними датчиків №2, що знаходяться на осі прискорювача РЕП «Темп-А».

На графіку розподілу доз ГРВ рис. 3.8, побудованого за даними таблиць 8 і 9, криві 1 відповідають розподілу доз ГРВ по усереднених значеннях показників датчиків № 1, № 3-5 на радіусі пучка, а криві 2 - за значеннями доз ГРВ з датчиків № 2, розташованих по осі прискорювача.

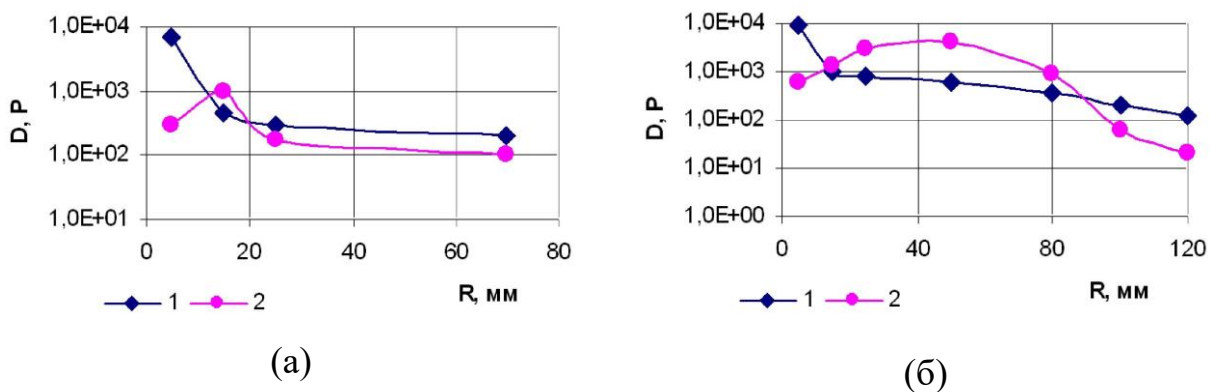


Рис. 3.8. Залежність розподілу доз ГРВ від трубчастого РЕП на прискорювачах: а - РЕП з енергією 0,35 МеВ, б - РЕП з енергією 0,75 МеВ

З представлених залежностей на рис. 3.6 та рис. 3.8 слідує, що зони та області підвищеної дози ГРВ для трубчастого пучка істотно залежать від енергії електронів, а також від форми катоду.

Отримані результати дозволили удосконалити та реалізувати методику опромінювання ГРВ конструкційних матеріалів стійких до радіаційного навантаження на радіаційно-пучковому технологічному комплексі, який було використано, як експериментально - дослідницька база для виконання проектів № Х-815 та № Х-5-527. На, що було отримано акт про впровадження матеріалів дисертації [додаток Б].

3.5. Дослідження впливу гальмівного рентгенівського випромінювання на конструкційні матеріали, перехідні метали Ti, Cr, Hf, Ni і сплав Хастеллой

Проведено дослідження зміни властивостей перспективних сплавів на основі перехідних металів Ti, Cr, Hf, Ni, що були розроблені для реакторів нового покоління, після впливу імпульсних ГРВ великої потужності. На рис. 3.9 представлено фотографії зразків конструкційних матеріалів, що опромінювалися ГРВ на РПК «ТЕМП».

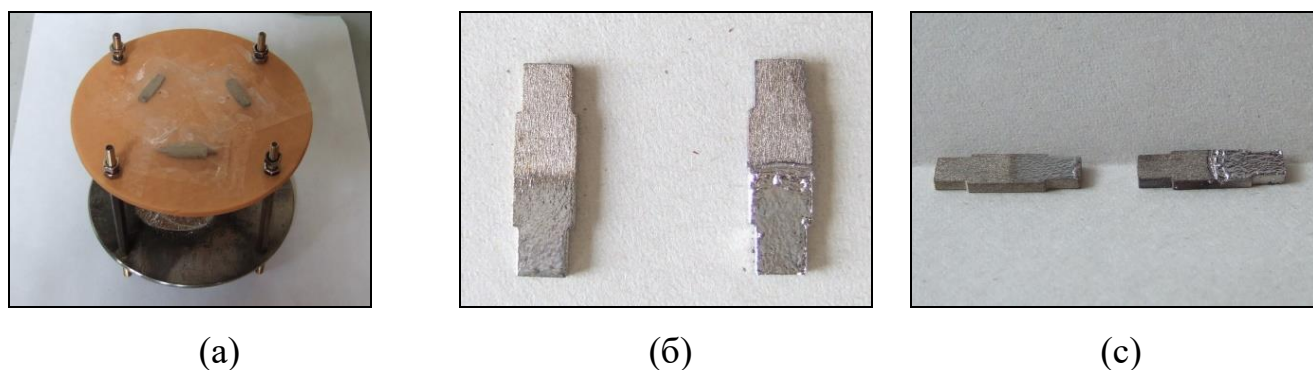


Рис. 3.9. Опромінювані зразки конструкційних матеріалів:

- а - зразки сплаву Хастеллой і детектори ТЛД перед імпульсом ГРВ,
- б - зразки сплаву Хастеллой після 1 імпульсу ГРВ,
- с - зразки сплаву Хастеллой після 2 імпульсів ГРВ

Ефективні поглинені дози при цьому становили до 5685 рад. На РПК такі дози набиралися за кілька пострілів, що істотно прискорює час проведення досліджень.

Основні параметри ГРВ створювалися при бомбардуванні конверторів РЕП із струмом $4 \div 21$ кА, енергією $350 \div 750$ кеВ, при тривалості імпульсу $1.5 \cdot 10^{-6}$ с. Матеріалами конвертера були молибден, вольфрам або тантал. Основні експерименти проведені з молибденовими ($\delta = 500$ мкм) і танталовими ($\delta = 200$ мкм) конвертерами. швидкість наростання γ - випромінювання, тобто $d\gamma / dt$ дорівнювала $3,5 \div 5 \cdot 10^8$ рад/с. "Доза" γ - опромінення набирає за рахунок повтору імпульсів.

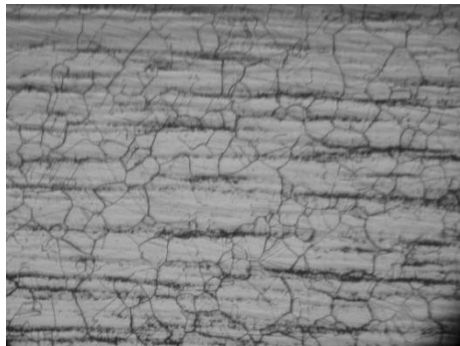
Дані по опроміненню на РПК зразків сплаву типу Хастеллой і матеріалів на основі Hf, Ni, Zr наведені в табл.10.

Таблиця 10.

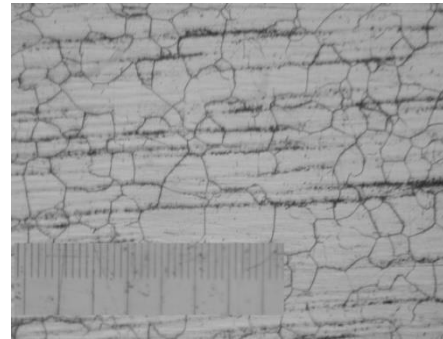
Режими опромінення на РПК зразків сплаву типу Хастеллой і матеріалів на основі Hf, Ni, Zr

№№ п/п	Матеріал	Доза, рад	$d\gamma/dt$, рад/с
1	41,5Ti+41,5Hf+17Ni	1060	$3,5 \cdot 10^8$
	41,5Ti+41,5Hf+17Ni	3910	—
	41,5Ti+41,5Hf+17Ni	4400	—
	41,5Ti+41,5Hf+17Ni	5685	$5.5 \cdot 10^8$
2	41,5Ti+41,5Zr+17Ni	1381	$3,5 \cdot 10^8$
	41,5Ti+41,5Zr+17Ni	3550	—
	41,5Ti+41,5Zr+17Ni	5685	$5.5 \cdot 10^8$
3	сплав Хастеллой	5685	$5.5 \cdot 10^8$
4	сплав Хастеллой	1 імпульс	
5	сплав Хастеллой	2 імпульсу	

Зразки піддавалися опроміненню при кімнатній температурі дозами від 360 до 5685 рад. На зразках проводилось вимірювання значень акустичної емісії (АЕ). Плоскі зразки товщиною 2 мм деформували вдавлюючи індентор (кульку діаметром 2,5 мм) при навантаженні 200 кг. На рис. 3.10 наведена структура сплавів типу Хастеллой в початковому стані (рис. 3.10 (а)) і після опромінення дозою 5685 рад (рис. 3.10 (б)).



(а)



(б)

Рис. 3.10. Структура сплавів типу Хастеллой:

а - в початковому стані, б - після опромінення дозою 5685 рад

Як видно, з рис. 3.10, структура зразків сплаву типу Хастеллой після опромінення практично однакова. Мікротвердість всіх зразків, як опромінених, так і вихідних однакова і становить 1920 МПа.

На рис. 3.11 і 3.12 представлена залежність активності і загальної суми імпульсів АЕ від часу деформації для зразків з різною дозою опромінення (крива 1 - вихідний, 2 - 360 рад 3 - 3670 рад, 4 - 5685 рад.).

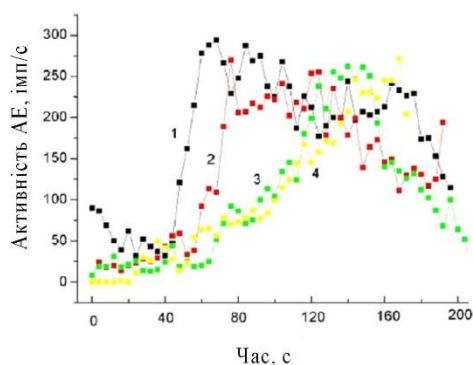


Рис. 3.11 Активність АЕ

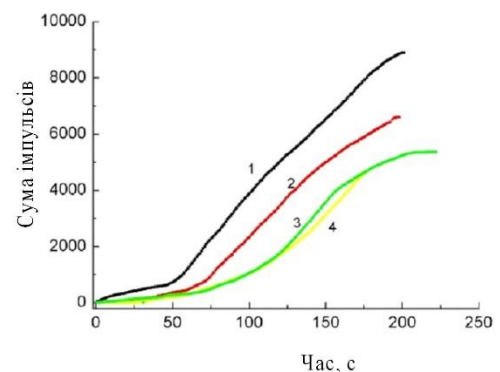


Рис. 3.12 Сума імпульсів АЕ

Видно, що загальна кількість зареєстрованих імпульсів АЕ зі збільшенням дози опромінення падає і максимум кривої активності АЕ зміщується в область високих навантажень (великих значень часу). Аналіз амплітудного розподілу сигналів АЕ та середньої амплітуди імпульсу показав, що при деформації зразків основний внесок в загальну суму імпульсів дають дислокації, і в процесі деформації цей механізм не змінюється. За рахунок більш сильного закріплення дислокацій в опромінених зразках їх рух починається при більш високих напругах, призводить до зміщення піку активності АЕ і зниження загальної кількості зареєстрованих імпульсів.

Дослідження механічних і акустичних характеристик на зразках сплаву типу Хастеллой показало, що у вихідних і в опромінених зразках активність акустичної емісії значно відрізняється.

Загальна кількість зареєстрованих імпульсів АЕ зі збільшенням дози опромінення падає і максимум кривої активності АЕ зміщується в область високих навантажень (великих значень часу).

Виходячи з експериментальних даних, накопичення вторинних радіаційних дефектів спостерігається при великих дозах опромінення.

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

3.6. Висновки

1. На базі наносекундного і мікросекундного прискорювачів РЕП з енергією електронів $0,35 < E < 0,75$ MeV створені джерела ГРВ з експозиційною дозою до 9100 Р за імпульс без наведеної активності з площею поперечного перерізу $12 < S_{\gamma} < 700$ мм². При цьому, поглинену дозу можна змінювати від 10^2 Гр до 10^5 Гр. за імпульс струму прискорювача. За рахунок використання кільцевої геометрії РЕП підвищена доза ГРВ на 70% по осі прискорювача.

2. Експериментально встановлено, що для сильнострумівих РЕП з енергією $E \approx 0,75$ MeV необхідно використовувати конвертери з Та.

3. Розроблено вакуумні рентгенівські вводи з корисною площею опромінення до 700 мм^2 та комбінованими конвертерами, які дозволяють проводити дослідження конструкційних матеріалів стійких до радіаційного навантаження без пошкодження вакуумних умов прискорювача. На РПК різними дозами ГРВ опромінювались зразки сплаву типу Хастеллой і матеріали на основі Hf, Ni, Zr. Показано, що мікроструктура сплавів до і після опромінення практично не відрізняється.

4. Визначено величини доз жорсткого ГРВ за один імпульс РЕП для сильнострумівих прискорювачів «Темп-А» і «Темп-Б». Отримано просторово-кутовий розподіл інтенсивності ГРВ в залежності від сили струму, енергії та геометрії РЕП.

5. В Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства й технологій ННЦ «ХФТІ» були використані імпульсні сильноструміві прискорювачі РЕП та розроблені на їх базі генератори гальмівного рентгенівського випромінювання, як експериментально-дослідницька база для виконання проекту № Х-815 «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», та проекту Х-5-527 «Дослідження зміни структури й властивостей конструкційних матеріалів ядерних реакторів під впливом імпульсних пучків електронів ». Акт про впровадження матеріалів дисертації додається [додаток Б].

РОЗДІЛ 4. ОПРОМІНЕННЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ СИЛЬНОСТРУМОВИМИ РЕЛЯТИВІСТСЬКИМИ ЕЛЕКТРОННИМИ ПУЧКАМИ

У даному розділі представлено результати досліджень з впливу потужних РЕП на матеріали конвертерів та конструкційних матеріалів стійких до радіаційного навантаження. Опромінювалися 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 впливі трубчастих РЕП мікросекундної тривалості з енергією до 750 кеВ на поверхню мішені.

4.1. Особливості впливу сильнострумових релятивістських електронних пучків на конвертери з конструкційних матеріалів

Для розуміння технологічних перспектив використання РЕП в матеріалознавстві доцільно порівняти фізичні процеси, властиві альтернативним технологічним підходам, з тими, які супроводжують взаємодію РЕП з конвертерами. Як приклад, розглянемо перелік основних процесів, які лежать в основі технологій отримання композиційних матеріалів. До цих процесів належать: локальний розігрів, динамічний тиск, активація атомів поверхонь, що з'єднуються і, як результат, отримання біметалічного з'єднання з унікальними властивостями. Ближчим за фізичним принципом є електронно-променевий перепплав з рафінуванням, що дозволяє домогтися подрібнення зернистої структури на поверхні, видалення домішок, сегрегації легуючих елементів на границях зерен. Відомо, що взаємодія РЕП з мішенню супроводжується дією ряду факторів: радіаційного, теплового, механічного, електромагнітного. Особливості формування поля дії кожного з цих факторів визначаються параметрами пучка: енергією частинок, струмом, густиною струму, тривалістю імпульсу. Ймовірно, що довжина пробігу частинок в мішені, а отже, і глибина модифікованого шару

визначається енергією пучка. Середня довжина пробігу електронів визначається з виразу [154]

$$d = 6.67 \times 10^{-11} \frac{E^{5/3}}{\rho}, \quad (4.1)$$

де E - енергія частинок, ρ - щільність речовини конвертера.

Якщо густина потоку випромінювання перевищує значення 10^{10} Вт/см², то опромінення призводить до розплаву поверхневого шару металу і викиду абляційної плазми. Причому, взаємодія пучка з плазмою приводить до зміни розподілу поглиненої дози в об'єкті опромінення. В цьому відношенні РЕП мають ту особливість, що товщина модифікованого шару може складати близько 100 мкм - достатньо для технологій дистанційного наплавлення, зміцнення пар тертя, виготовлення ріжучого інструменту.

Для опромінення РЕП характерно те, що в ряді випадків область радіаційно-стимульованих перетворень, які перебувають в зміні зернистості структури, зміні щільності і орієнтації дислокацій і ін., перевищує глибину плавлення конвертера і, в ряді випадків, глибину зони температурного впливу, що отримало назву ефекту дальньої дії. Фізична природа даного ефекту пояснюється формуванням пружних і ударних хвиль в об'ємі конвертера.

Як зазначалося вище, РЕП використовуються для впливів з метою модифікації. При цьому, ці впливи дають змогу проводити пряме опромінення поверхонь матеріалів, вплив на проміжний конвертер з метою дистанційного наплавлення, опромінення конвертера з метою конденсації зворотньорозсіяних продуктів випаровування на підкладку.

У зв'язку з цим було проведено опромінення ряду матеріалів, які можуть використовуватися в ядерно-енергетичних установках в умовах інтенсивних радіаційних і температурних навантажень. Проведено опромінювання конвертерів з вольфраму, товщиною 2,5 мм на прискорювачі РЕП «ТЕМП-Б» (струм електронів -5 кА, з енергією 0,5 МеВ, тривалість імпульсу - 1,5 мкс). Фрактографічне дослідження проводили з використанням растрових електронних

мікроскопів РЕМ-10, металографічні дослідження проводили з використанням мікроскопа МІМ-10. На рис. 4.1. показано фотографії конвертера після опромінення.

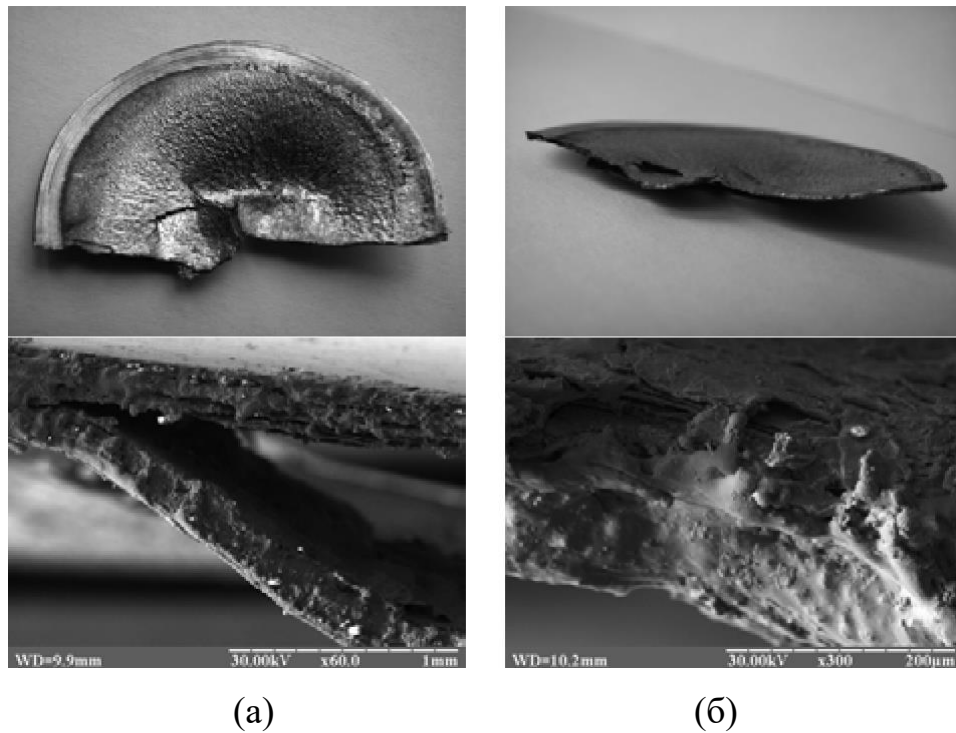


Рис. 4.1. Конвертер з вольфраму після опромінення РЕП

Вгорі на рис. 4.1 (а, б) фотографії загального вигляду конвертеру після опромінення, внизу такий же само конвертер, тільки зі збільшеною областю руйнування. Як бачимо, у результаті опромінення відбувається руйнування конвертеру, в той же час з фрактограмм видно, що переплавлений опроміненням шар має більш суцільну структуру, тоді як вихідний має характерну для вольфраму шарувату структуру.

Наплавлення є одним із способів модифікування властивостей поверхні металевих виробів, що використовуються в якості ріжучого інструменту, що експлуатуються в умовах кавітаційного зносу, піддається ударним навантаженням і ін. Використання для наплавлення матеріалу імпульсних РЕП дозволяє, в перспективі, досягти ряд позитивних ефектів. Це обумовлено тим, що при впливі імпульсного РЕП відбувається послідовність технологічних процесів:

розплавлення матеріалу, що наноситься, надання розплаву імпульсу руху в напрямку підкладки та активація електронної та іонної систем в умовах високих тиску і температур. Зазначений метод поєднує елементи процесу електронно-променевого наплавлення, наплавлення вибухом, плазмового і індукційного наплавлення.

З огляду на імпульсний характер впливу, такі традиційно проблемні етапи наплавлення, як вибіркоче випаровування легкоплавких елементів, що викликає виникнення шлакових включень в перехідній області покриття-підкладка, утворення тріщин і інші, вимагають окремого вивчення. Проведені дослідження наплавлення алюмінію на вольфрамові підкладки представляють практичний інтерес для отримання в приповерхневої області сплаву вольфраму з алюмінієм, що відрізняється жаростійкістю і стійкістю до окислення. Враховуючи різницю в температурі плавлення обох матеріалів слідує, що механізмом виникнення контакту є дифузійне проникнення розплаву алюмінію в поверхневу область вольфраму. При переміщенні в кавітаційне поле покриття легко відшаровується від поверхні, як і при низькотемпературному зламі. Разом з тим, більш детальний розгляд дозволяє побачити, що покриття з алюмінію має однорідну дрібнозернисту структуру. Досягти сплаву можна при дуплексній обробці, що полягає в повторному опроміненні поверхневого покриття, як видно з рис. 4.2.

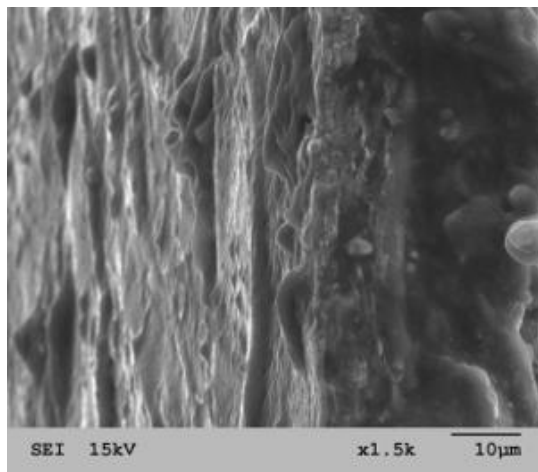


Рис. 4.2. Злам поверхні конвертору з вольфраму з наплавленим шаром алюмінію

Достатньо висока адгезія спостерігалась при наплавленні танталу на сталь 45. Ці покриття досліджувалися більш детально. Покриття, що наносились, характеризувалися острівцевим характером контакту з підкладкою, а також присутністю шлакових включень, обумовлених більш високою летючістю легкоплавких елементів при випаровуванні РЕП та їх осадженні на виробі. З метою визначення питомого значення площі ефективного з'єднання з підкладкою, покриття, що були нанесені, випробували в умовах кавітаційного впливу. Даний вид впливу був обраний як тестовий в силу забезпечення ним переважного видалення шлакових включень, а також тих фрагментів покриття, які, конденсуючись, не мали достатньої енергії для створення адгезійного зв'язку. Як уже зазначалося, даний метод наплавлення має спільні ознаки з електронно-променевою і інш. методами наплавлення. Для отримання якісних оцінок технологічного процесу необхідно визначити коефіцієнт форми, що має вигляд

$$\chi = \frac{S_o}{h_n}, \quad (4.2)$$

де S_o - площа суцільного (не видаляється в процесі кавітаційної обробки) контакту покриття з підкладкою, h_n - глибина проникнення в підкладку. Зазначені величини отримано шляхом порівняння вихідних наплавлених поверхонь (рис. 4.3 (а)) з поверхнями після кавітаційної обробки (рис. 4.3 (б)).

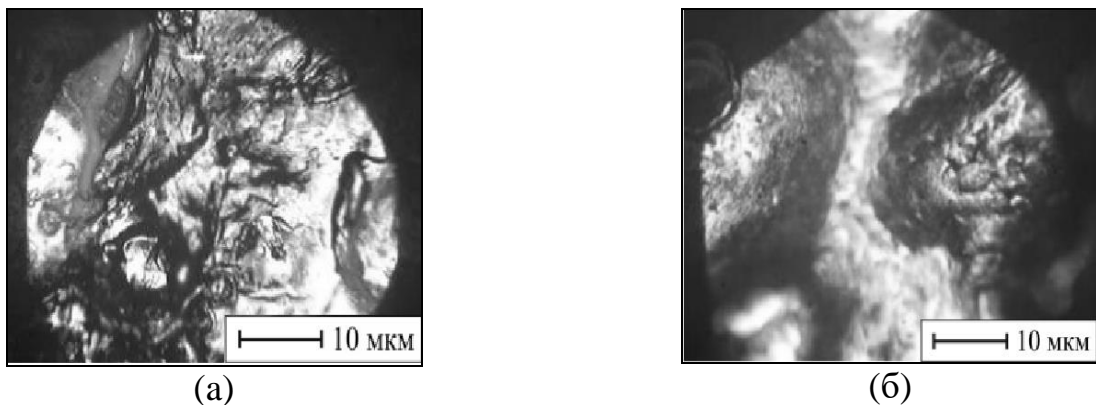


Рис. 4.3. Поверхні Ст 45 з наплавленим шаром танталу: а – вихідна поверхня, б – поверхня після кавітаційної обробки

Глибину проплавлення визначали шляхом виготовлення шліфів перпендикулярно нанесеному шару і вимірювання глибини проникнення матеріалу. Такий режим плавлення забезпечує максимальне прискорення частинок розплаву і, відповідно, можливість утворення досить суцільного покриття. В якості ще одного очевидного критерію, за яким слід проводити оптимізацію технології наплавлення з використанням сильнострумів РЕР, є коефіцієнт використання матеріалу

$$\alpha = \frac{d_f}{d_s}, \quad (4.3)$$

що визначається як відношення товщини матеріалу шару плівки $-d_f$, який випаровується до товщині одержуваного покриття $-d_s$. Даний параметр дозволяє дати оцінку ефективності використання матеріалу, що наноситься, обґрунтувати вибору товщини фольги, відстані від фольги до підкладки. Слід зауважити, що в разі тонкої фольги, товщина якої дорівнює середній довжині пробігу електронів, характер випаровування матеріалу істотно залежить від просторового розподілу поглиненої дози.

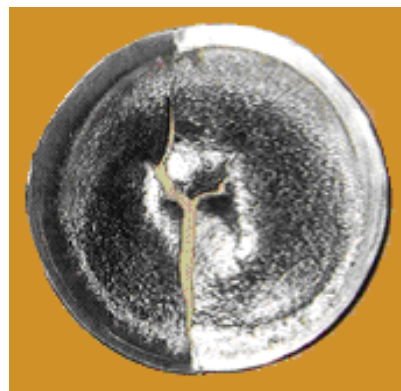
4.2. Дослідження механізмів радіаційного впливу імпульсних релятивістських електронних пучків на конструкційні матеріали

При взаємодії сильнострумів РЕР з конвертерами, внаслідок великої об'ємної густини енергії, що виділилася в тонкому шарі конвертера, відбувається вибух його поверхні, формування газоплазмового факела (ГПФ) і виникнення ударної хвилі. Ударна хвиля рухаючись всередину мішені стискає і розігріває її.

Вплив трубчастого РЕР на конвертери за короткий час призводить до ряду процесів: зміни густини та об'єму речовини, підвищенню температури, деформації, оборотним і необоротним фазовим, структурним і хімічним перетворенням. Методом зважування визначено втрати маси конвертерів після впливу на них РЕР. Втрата маси конвертерів з алюмінієвого сплаву В-16 і сталі (Х18Н10Т) за час імпульсу РЕР склала, відповідно, 0,27 г/см² і 0,17 г/см² за

імпульс струму. При проходженні ударної хвилі, коли відбуваються великі пластичні деформації, можуть істотно підвищуватися густина дислокацій, що призводить до зростання пружної енергії взаємодії (латентної енергії) дислокаційного скупчення - ансамблю дислокацій. Рух різних груп дислокацій ансамблю призводить до виникнення потоку дефектів, які здійснюють перенесення латентної енергії. Концентрація енергії в місцях максимальних градієнтів пластичної деформації призводить до релаксації, наслідком якої є перебудова дислокаційної структури.

При опроміненні сплаву В-16 суцільними РЕП, при щільності потужності $\sim 10^7$ Вт/см², режим абляції змінюється на режим оплавлення приповерхневого шару. Охолодження розплавленого шару в умовах великого градієнта температур і високого тиску призводить до спрямованої кристалізації розплаву, отримання дрібнокристалічних і аморфних структур (при швидкості охолодження > 3000 К/с). У поверхневому шарі відбувається загартування вакансій і утворюються тріщини на поверхні опроміненого сплаву. При цьому можна очікувати деякого розподілу компонентів сплаву, що і спостерігалось в експерименті. На рис. 4.4. показано загальний вигляд конвертерів з конструкційних матеріалів після опромінення сильнотрумовими РЕП на прискорювачі «Темп-А».



(а)



(б)

Рис. 4.4. Стан конвертерів після опромінення сильнотрумовими РЕП на прискорювачі «Темп-А»: а - мішень з W ($\delta = 100$ мкм, 2 імпульсу),

б - мішень з Та ($\delta = 200$ мкм, 6 імпульсів)

Параметри сильноточових РЕП на прискорювачі «Темп-А» такі: струм $I \sim 3$ кА, енергія $E \sim 0,35$ МеВ, тривалість імпульсу $\tau \sim 5$ мкс. Як видно з (рис. 4.4 (а)) , що конвертер з W розтріскується, а з Та (рис. 4.4(б)) поверхня конвертера лише прогинається і оплавляється.

На прискорювачі «Темп-А» випробувано конвертери, що створені за принципом теплової труби, яка, як відомо, є найбільш ефективною системою тепловідведення [153]. Для конверторів з молібдену і танталу отримано позитивний ефект, тобто збільшилася кількість пусків прискорювача до пропалювання матеріалу конверторів.

На прискорювачі «Темп-Б» аналогічні пошкодження конвертерів отримані при більшій енергії сильноточових РЕП. Так, на рис. 4.5 представлено зовнішній вигляд конвертерів після опромінення сильноточовими РЕП з такими параметрами: струм ~ 20 кА, енергія $\sim 0,75$ МеВ, тривалість імпульсу $\sim 1,5$ мкс.



Рис. 4.5. Зовнішній вигляд після опромінення сильноточовими РЕП прискорювача «Темп-Б»:

а - мішень з Та ($\delta = 200$ мкм, 2 імп.),

б - мішень з Мо ($\delta = 100$ мкм, 2 імп.),

в - мішень з W ($\delta = 100$ мкм, 2 імп.)

Видно, що конвертер з W розтріскується, а конвертер з Та має більшу стійкість. Конвертер з молібдену проплавляються. Конвертери з вольфраму дуже

крихкі, однак, їх можна використовувати в якості конвертерів товщиною $\geq 0,5$ мм. Можливим шляхом збільшення ресурсу конвертерів є їх охолодження або використання комбінованих конвертерів. Для кожного дослідження конструкцію конвертера необхідно розробляти виходячи з технічного завдання на експеримент.

Проведені експерименти показали, що в якості конвертера на РПК необхідно використовувати Та [8].

4.3. Методи опромінення матеріалів електронними пучками на радіаційно-пучковому комплексі

В даний час велика увага приділяють роботам з розробки та впровадження пучково-плазмових методів модифікації поверхневих властивостей матеріалів. Важливою обставиною є також і те, що плазменно-пучкова обробка дозволяє отримати такі структурно-фазові стани матеріалів, які при традиційних методах обробки не можна отримати.

Модифікація поверхневих властивостей матеріалів за допомогою потужних імпульсних РЕП є одним з методів, що швидко розвиваються. При впливі такого пучка на матеріал, його поверхневий шар, який дорівнює довжині пробігу частинок в даному матеріалі, дуже швидко може бути нагрітий до температур фазових переходів. Швидкість нагріву і охолодження залежить від властивостей матеріалу і параметрів пучка. Швидкість нагріву сягає 3000-4000 К/с. Все це реалізовано в так званому адіабатичному режимі опромінення, при якому енергія, принесена пучком в матеріал, за час дії пучка залишається в межах поверхневого шару, тобто не поширюється всередину матеріалу за рахунок теплопровідності. Після закінчення імпульсу РЕП відбувається швидке охолодження обробленого шару за рахунок теплопровідності всередину матеріалу.

При виборі методів модифікації конструкційних матеріалів із застосуванням сильнотимових РЕП необхідно ефективно використовувати енергію пучка. Сильнотимові РЕП повинні відповідати певним енергетичним і геометричним вимогам, а також переводити поверхню опромінених матеріалів в метастабільний

стан. Остання обставина особливо важлива для створення умов щодо впровадження на поверхні матеріалів різних присадок з метою поліпшення зносостійкості, антикорозійних і інших властивостей поверхні матеріалів.

З метою підвищення густини енергії, що виділяється на поверхні, сформовано трубчастий РЕП, діаметр якого становив 60-70 мм, а товщина стінки пучка - 2 мм. В такому випадку густина енергії, що виділяється на поверхні опромінюваної мішені становить ~ 1 кДж/см², а інтенсивність опромінення $\sim 10^9$ Вт/см². Виконано опромінення конвертерів з вольфраму, танталу, міді, алюмінію, молібдену. При дослідженні процесів, що відбуваються при формування і поширенні ГПФ при впливі трубчастих РЕП з енергією до $E_{\text{п}} \approx 0,75$ MeV на поверхню твердого тіла, отримав подальший розвиток метод з нанесення покриттів на підкладку. Суть цієї пропозиції полягає в наступному. Речовина випаровується під дією трубчастого РЕП. Диск, діаметром до 80 мм (рис. 4.6), розташовується на колекторному фланці, а підкладку, також у вигляді диска, розміщено всередині кромкового циліндричного катода, діаметром 96 мм, на глибині 10 мм.

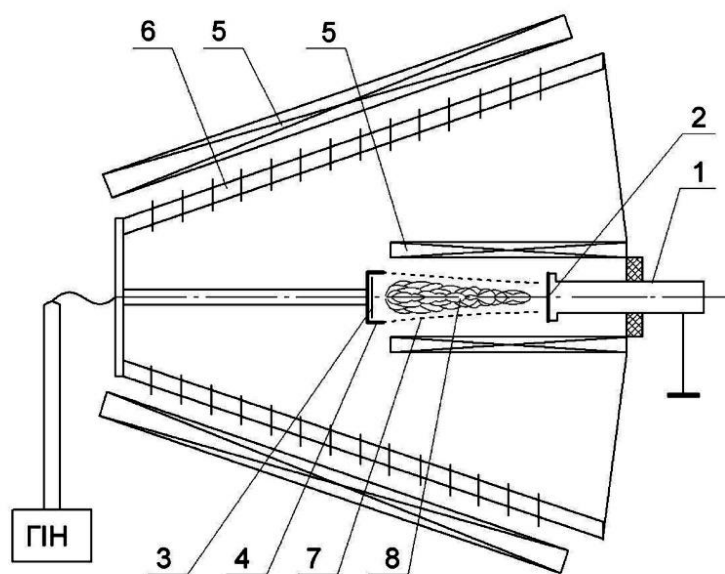


Рис. 4.6. Схема нанесення покриттів: 1 - колектор; 2 - мішень; 3 - підкладка; 4 - катод; 5 - соленоїди магнітного поля; 6 - прискорювальна колона; 7 - трубчастий РЕП; 8 - фокус ГПФ

Головною особливістю такого способу нанесення покриттів є висока ступінь іонізації частинок ГПФ, що зосереджені в його осьовому фокусі. В цьому випадку фокус ГПФ є концентратором густини частинок речовини $\approx 10^{21} \text{ см}^{-3}$, що випаровуються під дією РЕП з поверхні мішені при рівні потужності $q \approx (10^9 \dots 10^{10}) \text{ Вт/см}^2$. Наявність потужного електричного поля між катодом і анодом прискорювача забезпечує прискорення частини іонізованих частинок і вкорінення їх в підкладку, що сприяє більш міцному зчепленню покриття з нею.

При такому осадженні ГПФ не відбувається істотного нагрівання підкладки, а утворюване покриття буде остигати за рахунок дифузії тепла вглиб підкладки. Швидкість охолодження конденсату $\sim 4000 \text{ К/с}$. Така висока швидкість охолодження металевого розплаву може призводити до утворення метастабільних фаз, в тому числі і аморфних.

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

4.4 Висновки

Використання сильнострумівих прискорювачів РЕП для нанесення покриттів розширює можливості для розв'язання прикладних задач при одержанні покриттів широкого спектра застосування.

Дослідження, що проведені у даному розділі, дозволяють зробити висновок про наступне:

1. Застосування сильнострумівих прискорювачів РЕП для нанесення покриттів на поверхню твердого тіла трубчастими РЕП з енергією до $E_{\text{п}} \approx 0,75 \text{ MeV}$ дало подальший розвиток методу нанесення покриттів ГПФ.

2. Застосуванням дуплексної обробки при опроміненні РЕП, яка полягає в повторному опроміненні покриття, нанесеного на поверхню, можна досягти хорошого сплаву матеріалу покриття та підкладки.

3. Вивчено вплив сильнострумових РЕП з енергією $E_{\pi} = 0,35 \dots 0,75 \text{ MeV}$ на конвертери з конструкційних матеріалів. Зроблено вибір матеріалу конвертера для генерації потужного ГРВ на РПК.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-технічна задача зі створення та експериментального дослідження радіаційно-пучкового технологічного комплексу на основі імпульсних сильнострумів 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 $0,35 < E_{\text{п}} < 0,75$ МеВ та струмом до $I_{\text{п}} \approx 21$ 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 сильнострумів РЕП з енергією $E \approx 0,75$ МеВ 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 криогенний 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 криогенного насосу [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 $E_n \approx 750$ кеВ і $I_n \approx 21,5$ 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 $E_n \approx 750$ кеВ мікросекундної тривалості.

В Інституті фізики твердого тіла, матеріалознавства та технологій ННЦ «ХФТІ» були використані імпульсні сильнотрумові 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.

В заключенні автор висловлює глибоку подяку науковим керівникам: член-кореспонденту Національної академії наук України, доктору фізико-математичних наук, старшому науковому співробітнику, Заступнику Генерального Директора ННЦ ХФТІ

Єгорову Олексію Михайловичу

і доктору технічних наук, старшому науковому співробітнику, начальнику відділу релятивістських потужнострумових технологій Лоніну Юрію Федоровичу за увагу та підтримку в ході виконання дисертаційної роботи і її написання.

Дослідження, на яких базується дисертація, виконані в співавторстві з кандидатом фізико-математичних наук н.с. нач. лаб. Пономарьовим Анатолієм Григоровичем, доктором фізико-математичних наук нач. відділу старшим науковим співробітником Сотниковим Геннадієм Васильовичем, провідним інженером - дослідником Федотовим Сергієм Івановичем.

Автор висловлює подяку усім співавторам робіт, що увійшли в дисертацію, за плідну співпрацю.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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. Криогенний конденсаційно-адсорбційний 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., Чушиков П.Т. Магнитная система для транспортировки сильнооточного 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. Series: 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 влияния сильноточных 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.

17. Клепиков В.Ф., Прохоренко Е.М., Литвиненко В.В., Донец С.Е., Робук В.Н., Прохоренко Т.Г., Уваров В.Т., Пономарев А.Г., Лонин Ю.Ф. Применение высокоэнергетических релятивистских электронных пучков для изучения воздействия ионизирующего излучения на материалы хранилищ РАО // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (107). 2016. №2(102). С. 72–77.

18. Амбрамян Е.А., Вассерман С.Б., Долгушин В.М. Генератор мощных импульсов электронных пучков и рентгеновского излучения (РИУС-5) // Докл. АН СССР. 1970. Т. 192. N. 1. С. 76.

19. Гридасов А.П., Плехов Н.К., Цукерман В.А. Высокоэнергетический источник коротких импульсов электронов и тормозного излучения // Приборы и техника эксперимента, 1977. N. 1. С. 184 – 186.

20. Мелькер А.И., Токмаков И.Л. Разрушение твердых тел при облучении электронами // Физика и химия для обработки материалов. 1977. № 5. С. 62 – 65.
21. Бацанов С.С., Демидов Б.А., Рудаков Л.И. Использование сильноточного РЭП для осуществления структурных и химических превращений // Письма в Журн. эксперим. и теорет. Физики. 1979. Т. 30, В. 9. С. 611–613.
22. Клепиков В.Ф., Пономарев А.Г., Скачек Г.В., Толстолицкий А.Г., Уваров В.В. Особенности воздействия сильноточных трубчатых релятивистских пучков на твердое тело // Вісник Харківського університету. Серія фізична: «Ядра, частинки, поля». 2000. № 469, В 1. С. 56 – 60.
23. Кузьмин А.А., Мещеров Р.А., Рыбалко В.С., Ходатаев К.В. Перспективы развития коллективных ускорителей. Коллективные методы ускорения и пучково-плазменные взаимодействия // М.: РИАН СССР. 1982. №4. С. 10.
24. Ковалёв Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения потоком релятивистских электронов // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 1973. Т.18, №4. С. 232–235.
25. Vishnyakov V.A., Grishayev I.A., Pierce J.R. et al. Theory and Design of Electron Beams D // Preprint. Van Nostrand Company. New York. 1954. P. 39.
26. Bossamykin V.S., Gordeev V.S., Pavlovskii A.I. et al. STRAUS-2 Electron Pulsed Accelerator // Proc. 9th Int. Pulsed Power Conf., Albuquerque. NM. 1993. P. 910 – 912.
27. Bossamykin V.S., Gordeev V.S., Pavlovskii A.I. et al. Pulsed Power Electron Accelerators with the Forming Systems Based on Stepped Transmission Lines // Proc. 9th Int. Conf. on High Power Particle Beams (BEAMS-92). Washington. DC. 1992. vol. 1. P. 505 – 510.
28. Kim G.N. Proposed Neutron Facility Using 100-MeV Electron Linac at Pohang Accelerator Laboratory // Conf. Proc. Nuclear Data for Science and Technology. Trieste. 1997. P. 556.
29. Vikulov V.F., Vinogradov K.A., Milovanov O.S. Accelerators // Moscow. Atomizdat Publ. 1968. V. 10. P. 181.

30. Бурцев В.А., Василевский М.А, Гусев О.А. и др. Ускоритель сильноточных электронных пучков микросекундной длительности // Приборы и техника эксперимента. 1979. № 5. С. 32.

31. Федущак С.А., Чайковский С.В. др. Установка МИГ – универсальный рентгеновский источник // Вопросы атомной науки и техники, Москва. 2001. Вып 3, № 4. С. 149.

32. Chen P., Dawson J.M., Huff R., Katsouleas T. Acceleration of electrons by the interaction of a bunched electron beam with plasma // Physical review letters. 1985. V. 54, №7. P. 692–695.

33. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Интенсивные электронные и ионные пучки. М.: Энергия. 1972. 271 С.

34. Hori T., Miyade H., Myrata H. Beam test of compact SR ring “AURORA-2S” for X-ray lithography Particle Accelerator // 26-th IEEE International conference on plasma science: New York, 1999. Vol. 4. P. 2403 – 2405.

35. Ramirez J. J. et al. The Hermes-III // Program Proceedings of the 6th IEEE Pulsed Power Conference. Arlington, VA, 1987. P. 294 – 299.

36. Ramirez J. J. et al. Hermes III – A 16 TW, Short Pulse, Gamma-Ray Simulation // Proceedings of the 7th International Conference on High-Power Particle Beams. Karlsruhe, Germany, 1988. P. 148 – 157.

37. Champney P., Spence P. PULSERAD 1480, 9 MV Pulsed Electron Accelerator with an Intensely Focused Beam // IEEE Trans. Nucl. Science. 1975. Vol. 22, №. 3. P. 311.

38. Gordeev V.S., Bossamykin V.S., Pavlovskii A.I. et all. Linear Induction Accelerator LIA-10M // Proc. 9th. Int. Pulsed Power Conf. Albuquerque, NM, 1993. P. 905 – 907.

39. Majorov Ju.K., Zavyalov N.V., Khokhlov Yu.A. et all. Particle dynamics in LU-50 accelerator and determination of the possibility of increasing the intensity of accelerated beam // XI All-Union Workshop on Linear Accelerators of Charged Particles, 1989. P. 43.

40. Beloglasov V.I., Biller E.Z., Vishnyakov V.A., et. all. Electron guns for technological linear accelerators // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-физические исследования (35). 1999. № 4. С. 29-31.

41. Dovbnya A.N., Ayzatssky M.I., Biller Ye.Z. et all. Electron-LINAC-based radiation facilities of the Ukrainian National Science Centre // Particle accelerator conference, May 12–16 1997, Vancouver, BC, Canada: proceedings, V.3, Vancouver, BC, Canada, 1997. P. 3810-3812.

42. Aizatsky N.I., Akchurin Yu.I., Gurin V.A. et all. KUT-industrial technological accelerator // Acta of XIV Workshop on charged particles accelerators, Protvino, 1994. P. 259 – 263.

43. Aizatsky N.I., Biller E.Z., Dovbnya A.N. et all. Main Systems Development of K-band Linac // Problems of Atomic Science and Techn. Series: Nuclear Physics Researches (34). 1999. №. 3. P. 26.

44. Aizatskyi M.I., Boriskin V.N., Dovbnya A.M., Kushnir V.A et all. The NSC KIPT electron linacs - R&D // Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Nuclear Physics Investigations (41). 2003. № 2. P. 19 – 25.

45. Айзацкий Н.И., Белоглазов В.И., Борискин В.Н., и др. Состояние и перспективы линейного ускорителя ядерно-физического комплекса с энергией электронов до 100 МэВ // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-физические исследования (62). 2014. №3(91). С. 60 – 63.

46. Aizatskyi N.I., Beloglazov V.I., Bozhko V.P., et all., Electron 100 MeV linac based facility to nuclearphysical experimental investigation // Problems of Atomic Science and Technology. Ser.: Nuclear Physics Investigations (53). 2010. № 2 (66). P. 18 – 22.

47. Пикаев А.К. Радиационная химия и технология на рубеже веков // Химия высоких энергий. 2001. Т. 35, № 6. С. 403 – 426.

48. Ворогушин М.Ф, Гавриш Ю.Н., Демский М.И., Свиньин М.П. Современное состояние разработки ускорителей электронов для радиационных технологий // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техническая физика и автоматизация. М.: ЦНИИАтоминформ. 2004. Вып. 58. С. 72 – 76.

49. Ауслендер В.Л., Безуглов В.В., Брызгин А.А. и др. Ускорители электронов серии ИЛУ и их использование в радиационно-технологических процессах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Техническая физика и автоматизация. М.: ЦНИИАтоминформ. 2004. Вып. 58. С. 78 – 85.

50. Боцанов С.С., Демидов Б.А., Рудаков Л.И. Использование сильноточного РЭП для осуществления структурных и химических превращений // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1979. Т.30, И 9. С. 611 – 613.

51. Вейс М.Э., Голубенко Ю.И., Куксанов Н.К. и др. Ускорители серии ЭЛВ и их применение в радиационно-технологических процессах // Вестник «Радтех-Евразия», Москва – Новосибирск. 2002. №1, (11). С. 4 – 7.

52. Никифоров В.И., Уваров В.Л. Метод анализа и оптимизации выходных устройств ускорителя электронов в режиме генерации тормозного излучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-физические исследования (58). 2012. №3 (79). С. 207 – 210.

53. Пак В.С., Усов Ю.П., Цветков В.И., Шатанов А.А. О работе сильноточной электронной пушки микросекундного диапазона // Приборы и техника эксперимента. 1978. № 5. С 34 – 36.

54. Альтеркоп Б.А., Кулешов Д.Ю. Интенсивные электронные пучки. М.: Энергоатомиздат, 1984. 231 С.

55. Мельникова Т.В., Полякова Л.П., Козьмин Г.В. Исследование стабильности модельных растворов хлорорганических пестицидов под влиянием гамма-излучения // Радиационная биология и Радиоэкология. 2001. Т. 41(6). С. 683 – 687.

56. Мельникова Т.В., Полякова Л.П., Козьмин Г.В. Экологические проблемы радиационно-биологической технологии подготовки пищевых продуктов и сельскохозяйственного сырья // Известия Калужского общества изучения природы, Книга седьмая. (Сб. научных трудов) Под ред. С.К. Алексева и В.Е. Кузьмичева Калуга: КГПУ им. К.Э. Циолковского. 2006. С. 60 – 66.

57. Gałezowska A., Trojanowicz M. Decomposition of pesticide chlorfenvinphos in aqueous solutions by gamma-irradiation // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2010. P. 215 – 221.

58. Da Silva M.P., Vieira M. Degradation of alachlor herbicide by gamma radiation from cobalt-60 in aqueous and alcohol solution // J. Radioanal Nucl. Chem. 2009. P. 323 – 327.

59. Никифоров В.И., Помацалюк Р.И., Тенишев А.Э., Уваров В.Л., Шевченко В.А., Шляхов И.Н., Ванжа С.А. Стенд для радиационных испытаний с использованием тормозного излучения // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-физические исследования (59). 2012. №4(80). С.167 – 170.

60. Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д., Месяц Г.А. О стабильности работы вакуумных диодов ускорителей сильноточных релятивистских электронных пучков // Журнал технической физики.1981. Т.51, вып.5. С. 1005 – 1007.

61. Эльяш С.Л. и др. Малогабаритные высокопроизводительные ускорители АРСА для оперативных испытаний на радиационную стойкость ЭКБ // XIV Харитоновские тематические научные чтения: мощная импульсная электрофизика, Сб. докл. междунар. конф., Саров, 2012. С. 117 – 121.

62. Машкович В.П., Кудрявцева А.В. Защита от ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1995. 495 С.

63. Баранов В.Ф. Дозиметрия электронного излучения. М.: Атомиздат, 1974. 229 С.

64. Немец О.Ф., Гофман Ю.В. Справочник по ядерной физике. Киев: Наукова думка, 1975. 415 С.

65. Голубев Б.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 461 С.

66. Гусев Н.Г., Климанов В.А., Машкович В.П., Суворов А.П. Защита от ионизирующих излучений. Т.1. Физические основы защиты. М.: Энергоатомиздат, 1989. 512 С.

67. Завьялов Н. В. и др. О перспективах генерации мощных импульсов ТРИ на установке «ГАММА» // XIV Харитоновские тематические научные чтения: мощная импульсная электрофизика, сб. докл. междунар. конф., Саров, 2012. С. 153 – 160.

68. Гоголев А.С., Черепенников Ю.М. Определение оптимальных параметров источника рентгеновского излучения на базе малогабаритного ускорителя электронов // Изв. ТПУ. 2012. Т. 320, № 2. С. 35 – 38.

69. Стародубцев С. В., Романов А. М. Взаимодействие гамма-излучения с веществом. Ташкент: Наука, 1964. 249 С.

70. Блохин М.А. Физика рентгеновских лучей. Изд. 2-е, перераб. М.: Гос. изд-во технико-теорет. лит., 1957. 518 С.

71. Шпольский Э. В. Атомная физика: учебное пособие: в 2-х т. М.: Наука, 1963. 575 С.

72. Dabagov S.B., Kumakhov M.A., Nikitina S.V. et all. Observation of Interference Effects at the Focus of an X-ray Lens // J. Synchrotron Rad. 1995. Vol. 2. P. 132 – 135.

73. Байер В.Н., Катков В.М., Фадин В.С. Излучение релятивистских электронов. М.: Атомиздат, 1973. 375 С.

74. Косьянов П.М. Комптоновское рассеянное излучение в рентгеновском анализе вещества // Прикладная физика. Москва. 2012. № 4. С. 15 – 23.

75. Косьянов П.М. Новый метод экспериментальной оценки, достоверности теории взаимодействия фотонов с электронами атомов // Инженерная физика. Москва. 2014. № 9. С. 17 – 23.

76. Косьянов П.М. Новый метод экспериментального обоснования теории взаимодействия фотонов с электронами атомов // Материалы XIII межрегиональной студенческой научно-практической конференции «Инновационные процессы в науке и технике XXI века». Тюмень. 2015. С. 2–9.

77. Оцуки Ё.Х. Взаимодействие заряженных частиц с твёрдыми телами. М.: Мир. 1985. 280 С.

78. Камышан А.С., Пилько В.В., Серов А.В., Францкевич А.В. Взаимодействие излучений с твёрдым телом // Тезисы докладов 1-й междунар. Конференции. Минск, 1995. С. 77.

79. Давыдов Л.Н., Шляхов И.Н., Кутний В.Е., Рыбка А.В., Абызов А.С., Карасев С.П. Исследование радиационной стойкости CdTe и CdZnTe детекторов для спектрометрии гамма-излучения // 16 международная конференция по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению XVI-ICPRP, г. Алушта: тезисы докладов ННЦ «ХФТИ». Харьков, 2004. С. 37.

80. Давыдов Л.Н., Борисенко В.Н., Захарченко А.А., Кутний В.Е., Шляхов И.Н. и др. Влияние облучения электронами и гамма-квантами на электрофизические свойства полупроводниковых детекторов из CdTe и CdZnTe // XVII международная конференция по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению XVII-ICPRP, г. Алушта: тезисы докладов ННЦ «ХФТИ». Харьков, 2006. С. 287 – 288.

81. Достанко А.П., Голосов Д.А., Мельников С.Н. Увеличение коэффициента использования материала мишени при магнетронном распылении // 11-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом»: сентябрь 2015 г., Минск, Беларусь: тезисы докладов. 2015. С. 398 – 400.

82. Тетельбаум Д.И., Курильчик Е.В., Менделева Ю.А. Эффект дальнего действия при малоинтенсивном облучении твердых тел // Поверхность. Рентгеновские синхротронные и нейтронные исследования. 2009. №3. С. 94 – 103.

83. Косьянов П.М. Новый метод определения отношения числа электронов отдачи к числу фотоэлектронов // Контроль, диагностика. 2015. № 11. С. 28 – 33.

84. Файнберг Я.Б. Некоторые вопросы плазменной электроники // Физика плазмы. 1985. Т.11, №1. С. 1398 – 1410.

85. Ковалёв Н.Ф., Петелин М.И., Райзер М.Д. и др. Генерация мощных импульсов электромагнитного излучения потоком релятивистских электронов // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. 1973. Т.18, №4. С. 232 – 235.

86. Зеленский В.Ф., Неклюдов И.М., Черняева Т.П. Радиационные дефекты и набухание металлов. Киев.: Наук. думка, 1988. 296 С.
87. Каур И., Густ В. Диффузия по границам зерен и фаз / Под ред. Л.С. Швиндлермана. М.: Машиностроение, 1991. 445 С.
88. Старостенков М.Д., Медведев Н.Н., Полетаев Г.М., Пожидаева О.В. Компьютерное моделирование пар Френкеля в металлах при низких температурах // Материалы Всероссийской научно - практич. конф. «Фундаментальные науки и образование». Бийск, 2006. С. 105 – 108.
89. Fainberg Y.V. The use of plasma waveguides as acceleratting structure // Proc. Symp. CERN, 8 - 20 August 1955, Geneva / CERN. Geneva, 1955. P. 84 – 92.
90. Демидов Б.А, Ивкин М.В., Петров В.А., Фанченко С.Д. Получение и исследование сильноточного пучка релятивистских электронов микросекундной длительности // Журнал технической физики. 1975. Т. 45, № 12. С. 2568 – 2573.
91. Иремашвили Д.В., Осепашвили Т.А., Какучая П.И. Формирование высокоинтенсивных микросекундных электронных пучков // Письма в Журнал технической физики. 1975. Т. 1, № 11. С. 508 – 511.
92. Ройфе И.М., Стекольников Б.А., Энгелько В.И. Получение и исследование сильноточного электронного пучка микросекундной длительности // Журнал технической физики. 1976. Т. 46, № 12. С. 2563 – 2576.
93. Агафонов А.В., Воронин В.С., Лебедев А.Н., Пазин К.Н. Транспортировка сильноточного электронного пучка магнитным полем // Журнал технической физики. 1974. Т.44, № 9. С. 1909 – 1916.
94. Рошаль А.С. Моделирование заряженных пучков. М.: Атомиздат, 1979. 224 С.
95. Уваров В.Т., Ткач Ю.В., Гадецкий Н.П., Скачек Г.В., Пономарев А.Г., Кившик В.Ф., Гапоненко Н.И., Козачек А.С., Прасол Е.А. Получение сильноточных пучков микросекундной длительности с высоким к.п.д.: Препринт ХФТИ 84 – 30. М.: ЦНИИАтоминформ, 1984. 13 С.

96. Бакшаев Ю.Л., Блинов П.И, Долгачев Г.И. и др. Методы увеличения энергии РЭП микросекундной длительности // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез. 1983. В. 3 (13). С. 37 – 40.

97. Богданкевич Л.С., Рухадзе А.А. Устойчивость релятивистских электронных пучков в плазме и проблема критических токов // Успехи физических наук. 1971. Т. 103, № 4. С. 609 – 640.

98. Thode L.E., Godfrey B.B., Shanaha W.R. Vacuum propagation of solid relativistic electron beams // Physics of fluids. 1979. V. 22, № 4. P. 747 – 763.

99. Uhm H.S. A theory of space-charge limiting current for a relativistic electron beam // Physics of fluids. B.: Plasma physics. 1993. V. 5, № 6. P. 1919 – 1921.

100. Мхеидзе Г.П. Предельный ток некомпенсированного релятивистского электронного пучка // Журнал технической физики. 1972. Т. 63, № 1. С. 104-106.

101. Genoni T.C., Miller R.B. Limiting currents in shielded source configurations // Physics of fluids. 1981. V. 24, № 7. P. 1397 – 1398.

102. Пономарёв А.Г. Генерация акустических колебаний сильноточными релятивистскими электронными пучками: Диссертация кандидата физ. мат. наук по специальности. 01.04.20. Харьков, 2006. 119 С.

103. Friedman M., Ury M. Microsecond Duration Intense Relativistic Electron Beams // Rev. scient. Instrum. 1972. Vol. 43, № 11. P. 1659 – 1661.

104. Бурцев В.А., Василевский М.А., Гусев О.А., Ройфе И.М., Середенко Е.В., Энгелько В.И. Использование взрывоэмиссионных катодов для получения сильноточных электронных пучков большой длительности // Доклады Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов Л.: 1977. Т. 2. С. 120 – 127.

105. Бугаев С.П., Ким А.А. и др. Процессы в диодах с магнитной изоляцией, использующих взрывную эмиссию электронов. Горький: ИПФ АН СССР, 1981. С. 36 – 61.

106. Василевский М.А., Никонов А.Г., Ройфе И.М. и др. Получение трубчатого электронного пучка длительностью 10^{-4} с использованием

многоострийного взрывоэмиссионного катода // Письма в Журнал технической физики. 1983. Т. 9, В.1. С. 26 – 30.

107. Артамонов В.И., Дубовой Л.В., Дувидсон В.М., Смилга В.И. Предельная длительность импульсного тока оптимизированного инжектора электронов с взрывной эмиссией и магнитной изоляцией // Письма в Журнал технической физики. 1983. Т. 6, В. 23. С. 1422 – 1427.

108. Бакшт Р.Б., Бугаев С.П., Кошелев В.И., Месяц Г.А. и др. О свойствах катодной плазмы в диоде с магнитной изоляцией // Письма в Журнал технической физики. 1977. Т. 3, № 13. С. 593 – 597.

109. Гаркуша О.В. Влияние остаточного газа в коаксиальном диоде с магнитной изоляцией на формирование микросекундных СЭП. М.: Сб. н. тр. «Научная сессия МИФИ-99». 1999. Том 4. С. 100 – 101.

110. Ельчанинов А.С., Загулов Ф.Я., Коровин С.Д., Месяц Г.А. О стабильности работы вакуумных диодов ускорителей сильноточных релятивистских электронных пучков // Журнал технической физики. 1981. Т. 51. Вып. 5. С. 1005 – 1007.

111. Альтеркоп Б.А., Сокулин А.Ю., Тараканов В.П. Транспортировка электронного пучка со сверхпредельным током // Физика плазмы. 1989. Т. 15. Вып. 8. С. 974 – 980.

112 Бугаев С.П., Кассиров Г.М., Ковальчук Б.М. Получение интенсивных микросекундных релятивистских электронных пучков // Письма в Журнал технической физики. 1973. Т. 18, № 2. С. 82 – 86.

113. Ройфе И.М., Бурцев В.А., Василевский М.А., Энгелько В.И. Экспериментальное исследование диода с магнитной изоляцией при длительности импульса $\leq 10^{-5}$ с // Журнал технической физики. 1980. Т. 50. В. 5. С. 944 – 956.

114. Ткач Ю.В., Уваров В.Т, Гадецкий Н.П., Пономарев А.Г., Гапоненко Н.И., Скачек Г.В., Лемберг Е.А. Исследование сильноточного диода с магнитной изоляцией микросекундной длительности // VIII Всесоюзный семинар по линейным ускорителям, июнь 1983, Харьков: тезисы докладов / ННЦ ХФТИ. Харьков, 1983. С. 107.

115. Уваров В.Т., Ткач Ю.В., Гадецкий Н.П., Скачек Г.В., Пономарев А.Г., Кившик В.Ф., Гапоненко Н.И., Козачек А.С. Высокоэффективный сильноточный диод микросекундной длительности // V Всесоюзный симпозиум по сильноточной электронике, 1984г., Томск: Тезисы докладов, Томск, 1984. С. 106 – 108.

116. Уваров В.Т., Ткач Ю.В., Толстолуцкий А.Г., Скачек Г.В., Пономарев А.Г., Поддубко Н.С. Увеличение плотности тока и яркости сильноточного трубчатого РЭП магнитной компрессией // Всесоюзный семинар «Плазменная электроника», 1988, Харьков: тезисы докладов / ННЦ ХФТИ. Харьков, 1988. С. 106 – 107.

117. Никонов А.Г., Ройфе И.М, Савельев Ю.М., Энгелько В.И. О работе диода с магнитной изоляцией при большой длительности импульса // Журнал технической физики. 1983. Т. 53, № 4. С. 618 – 626.

118. Гаркуша О.В., Степнов В.В., Тимофеев В.Ф. Генерация СЭП микросекундной длительности со взрывоэмиссионного катода // Тез. докл. VIII Симпозиума по сильноточной электронике. Свердловск: ИЭФ УрО АН СССР, 1990. С. 79 – 81.

119. Глейзер И.З. Исследование формирования и транспортировки сильноточных трубчатых РЭП // Автореф. Дис. Томск: ТПИ, 1977. 26 С.

120. Диденко А.Н., Григорьев В.П., Усов Ю.П. Мощные электронные пучки и их применение. М.: Атомиздат, 1977. 280 С.

121. Василевский М.А., Ройфе И.М, Энгелько В.И. Релятивистская высокочастотная электроника. М.: Атомиздат, 1983. С. 184 – 203.

122. Коляда Ю.Е. Мощные микросекундные пучки заряженных частиц и их взаимодействие с плазмой и конденсированными средами: Диссертация доктора физ. мат. наук по специальности. 01.04.20. Харьков, 2003. 329 С.

123. Остудін Б., Романенко А. Розрахунок руху пучка заряджених частинок в електростатичному полі з урахуванням просторового заряду // Теоретична електротехніка. 2002. Вып. 56. С. 87 – 103.

124. Миллер Р. Введение в физику сильноточных пучков заряженных частиц. М.: Мир, 1984. 432 С.
125. Кошелев В.И. О разлете катодной плазмы в поперечном магнитном поле // Физика плазмы. 1979. Т.5, Вып. 3. С. 698 – 701.
126. Зайцев Н.И., Кораблев Г.С., Шемякин Б.П. Элементы динамики катодной и коллекторной плазмы в диоде с магнитной изоляцией // Физика плазмы. 1981. Т.7, Вып. 3. С. 560 – 563.
127. Бугаев С.П., Зайцев Н.И., Ким А.А., Кошелев В.И. Экспериментальное исследование характера движения катодной плазмы поперек магнитного поля в диодах с магнитной изоляцией // Физика плазмы. 1983. Т.9, Вып. 6. С. 1287 – 1291.
128. Рудаков Л.И., Бабыкин Н.В., Гордеев А.В., Демидов Б.А., Королёв Э.З., Тарумов В.Д. Генерация и фокусировка сильноточных релятивистских электронных пучков. М.: Энергоатомиздат, 1990. 280 С.
129. Morrov D.L., Phillips J.D., Bennett W.H. et.all. Concentration and guidance of intense relativistic electron beams // Appl. Phus. Lett. 1971. Vol. 19, № 11. P. 441 - 443.
130. Goldstein S.A., Swain D.W., Hadley G.R., Mix I.P. Anode plasma and focusing in REB diodes // 1-st Intern. Topic Conf. High Power Electron Beam Res. and Technol. Albuquerque. 1975. Vol. 1. P. 262–283.
131. Poukey J.W., Freeman J.R., Jonas G. Simulation of Relativistic Electron Beam Diodes // Physics of plasma. 1995. Vol. 10, №. 6. P. 954 – 958.
132. Blaugrund A.E., Cooperstein G., Goldstein S.A. Processes governing pinch formation in diodes // Proc.1-st Intern. Topic. Conf. High Power Electron Beam Res. and Techn., Albuquerque. 1975. Vol. 1. P. 233 – 246.
133. Goldstein S.A, Davidson R.C., Lee R., Siambis J.G. Theory of electron and ion flow in relativistic diodes // Proc. Intern. Topic. Conf. Electron Beam Res. And Techn., Albuquerque. 1975. Vol. 1. P. 218 – 232.
134. Spense P., Triebes K., Gennario R., Pellinen D. REB Focusing in high aspect ratio diodes // Ibid. Vol. 10, № 7. P. 346 – 364.

135. Breizman B.N, Ryutov D.D. Powerful relativistic electron beams in a plasma and a vacuum (theory) // Nuclear Fusion. 1974. Vol. 14, № 6, P. 873 – 907.
- 136 Пирс Д. Теория и расчет электронных пучков. М.: Советское Радио, 1956. 217 С.
137. Веркин. Б.И. Криогенная техника. Киев: Наукова думка, 1985. 184 С.
138. Холод Ю.В., Юферов В.Б. О режимах работы конденсационных азотных насосов // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Общая и ядерная физика. 1982. Вып.3 (2). С. 33 – 39.
139. Холод Ю.В., Сороковой Л.Г., Юферов В.Б. Криогенные форвакуумные насосы // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Общая и ядерная физика. 1978. Вып.2(2). С. 30 – 37.
140. Хафер Р. Криовакуумная техника. М.: Энергоатомиздат, 1983. .272 С.
141. Стрельников В.П. Форвакуумный криогенный насос // Приборы и техника эксперимента. 1976. № 6. С.23 – 25.
142. Малков М.П. Справочник по физико-техническим основам криогеники. М.: Энергоатомиздат, 1985. 431 С.
143. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер К. Электронно-лучевая технология. Киев: Наукова думка, 1980. 152 С.
144. Кнопфель. Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: «Мир», 1972. 392 С.
145. CST- computer Simulation Technology
<https://www.cst.com/Products/CSTPS/>
146. Курушин А.А., Пластиков А. Н. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio. М.: Издательство МЭИ, 2010. 160 С.
147. CST particle studio – stationary particle tracking solver
<https://www.cst.com/products/cstps/Solvers/StationaryParticleTrackingSolver>
148. Девидсон Р. Терия заряженной плазмы. М.: Издательство Мир, 1978. 21 С.

149. Пащенко А.В., Пономарев А.Г., Уваров В.Т. и др. Дистанционное нанесение покрытий сильноточными релятивистскими электронными пучками // Физика и химия обработки материалов. 2006, № 3. С. 24 – 28.

150. Лонин Ю.Ф., Литвиненко В.В., Уваров В.Т. и др. Использование сильноточного РЕП микросекундной длительности для формирования упрочняющих покрытий // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-физические исследования (50). 2008. № 5. С. 91 – 95.

151. Лонин Ю.Ф., Магда И.И. Сильноточные релятивистские ускорители ИПЭНМУ ННЦ ХФТИ и их применение // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-физические исследования (50). 2008. № 5. С. 85 – 90.

152. Lazurik V.T., Lazurik V.M., Popov G.F., Rogov Yu.V. RT-Office for Optimization of Industrial EB and X-Ray Processing // Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear Physics Investigations (43). 2004. № 2. P. 186 – 189.

153. Залеский Ю.Г., Кривоносов Г.А., Онищенко И.Н., Пономарев А.Г. Применение тепловых труб в ускорительной технике // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Плазменная электроника и новые методы ускорения (7). 2010. № 4(68). С. 360 – 364.

154. Калинин Б.А. Радиационно-пучковые технологии обработки конструкционных материалов // Физика и химия обработки материалов. 2001. В.4. С. 5 – 16.

155. Погребняк А.Д., Кульментьева О.П. Структурно-фазовые превращения в поверхностных слоях и свойства металлических материалов после импульсного воздействия пучков частиц // ФИП. 2003. Т.1, В.2. С. 108 – 136.

156. Рыбка А.В., Прохорец И.М., Шляхов И.Н., Захарченко А.А., Блинкин А.А. и др. Дозиметрические характеристики детекторов рентгеновского и гамма-излучения на основе (CdZnTe) // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (78). 2000. № 4. С. 208 – 211.

ДОДАТОК А. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Список публікацій, у яких опубліковано основні результати 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. Кріогенний конденсаційно-адсорбційний 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., Чушиков П.Т. Магнитная система для транспортировки сильнооточного 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.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

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, (участь в обговоренні).

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, (участь в обговоренні).

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 влияния 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, (участь в обговоренні).

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, (доповідач).

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, (доповідач).

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, (доповідач).

ДОДАТОК Б. АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ МАТЕРІАЛІВ ДИСЕРТАЦІЇ

”ЗАТВЕРДЖУЮ ”
 Директор інституту фізики твердого тіла,
 матеріалознавства і технологій
 член-кореспондент НАН України
 Воеводін В.М.

АКТ

про впровадження матеріалів дисертації
 Батракова Олексія Борисовича

Комісія у складі: голови комісії - начальника лабораторії ІФТТМТ, доктора технічних наук, Пилипенко М.М.; членів комісії: начальника відділу ІФТТМТ, доктора технічних наук Б.М. Широкова та начальника відділу ІФТТМТ, доктора фізико-математичних наук В.В. Левенця, склала цей акт у тому, що радіаційно-пучковий комплекс «ТЕМП» - експериментально - дослідна база, засоби генерування гальмівного рентгенівського випромінювання та методи вимірювання ЕМ випромінювань, які є результатами дисертаційної роботи Батракова Олексія Борисовича були впроваджені в науково-дослідну роботу при виконанні проектів № Х-518 «Експериментальне та теоретичне дослідження ядерних матеріалів з нано- та квазикристалічною структурою на основі перехідних металів Ti, Zr, Hf, Ni під впливом потужного імпульсного тормозного рентгенівського випромінювання» та проекту № Х-5-527 «Дослідження зміни структури і властивостей конструкційних матеріалів ядерних реакторів під впливом імпульсних пучків електронів і рентгенівського випромінювання великої потужності» в наслідок чого було виявлені акустичні дефекти під впливом дії імпульсного потужного рентгенівського випромінювання.

Голова комісії :

начальник лабораторії ІФТТМТ,
 доктор технічних, наук

Пилипенко М.М.

члени комісії:

начальник відділу ІФТТМТ
 доктор технічних наук

Широков Б.М.

начальник відділу ІФТТМТ,
 доктор фіз.-мат. наук, проф.

Левенець В.В.