

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
НАУКОВИЙ ЦЕНТР "ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ"

На правах рукопису

ДОЛІНСЬКИЙ ОЛЕКСІЙ ВІКТОРОВИЧ

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ПУЧКА У КОМПЛЕКСІ
"ІЗОХРОННИЙ ЦИКЛОТРОН У-240 - ПРИСКОРЮВАЛЬНО-
НАГРОМАДЖУВАЛЬНЕ КІЛЬЦЕ (ІЯД)"**

01.04.16 - фізика ядра та елементарних частинок

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 1997



00743053 (M)

Робота виконана в НЦ "Інститут ядерних досліджень" НАН України

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук
Вальков Олександр Євгенович

Офіційні опоненти: доктор технічних наук
Лінзов Олександр Федорович
(НЦ "Інститут ядерних досліджень", м.Київ)
кандидат фізико-математичних наук
Лещенко Борис Юхимович
(Київський державний університет, м.Київ)

Провідна установа: ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут",
м. Харків.

Захист дисертації відбудеться "26" *серпня* 1997
о *14¹⁵* год. на засіданні Спеціалізованої Ради Д 01.68.01
НЦ "Інститут ядерних досліджень" НАН України
за адресою: 252028, м.Київ, пр.Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці НЦ "Інститут ядерних
досліджень" НАН України.

Автореферат розіслано "25" травня 1997 р.

Вчений секретар
Спеціалізованої Ради
кандидат фізико-математичних наук

В.Д. Чеснокова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Відкриття метода електронного охолодження, яке дає можливість отримувати надхолодні пучки тяжких іонів, відкрило принципово нові можливості для досліджень у ядерній фізиці.

Охолодження пучків заряджених частинок дозволяє не тільки стискувати та монохроматизувати їх, а також проводити нагромадження частинок, додаючи у звільнені в процесі охолодження ділянки фазового простору нові порції частинок. Для цього необхідне створення спеціальних нагромаджувальних кілець з системою електронного охолодження. Розробки подібних нагромаджувальних кілець з середини 80-х років ведуться у 12 наукових центрах Західної Європи, США та Японії. Вирішення проблеми отримання охолоджених пучків та їх нагромадження у прискорювальному кільці, яке планується створити в НЦ ІЯД (Київ), принципово підвищить рівень прискорювальної бази НЦ ІЯД НАН України. Для вирішення даної проблеми необхідне детальне вивчення: динаміки пучка в нагромаджувальному кільці (тобто умови отримання стійкої замкненої орбіти); механізму нагромадження іонного пучка, охолодження, процесів взаємодії іонного пучка з атомами залишкового газу вакуумної камери, а також атомами надтонкої мішені та електронами системи охолодження.

Для розширення діапазону важких іонів, які можна буде використовувати в експериментах, в НЦ ІЯД створюється система зовнішньої інжекції циклотрону У-240. Вирішення проблеми транспортування пучків іонів від трьох зовнішніх іонних джерел (джерела поляризованих іонів, ЕЦР - джерела важких іонів, джерела легких іонів) потребує дослідження питань узгодження усіх елементів та вузлів системи.

Нагромаджувальне кільце з системою електронного охолодження, окрім нагромадження, охолодження, прискорювання та проведення фізичного експерименту на внутрішній мішені, може використовуватися ще як мас-спектрометр короткоживучих екзотичних ядер. Вирішення даної проблеми потребує дослідження динаміки іонного пучка у перебудованій магнітній оптиці кільця.

Мета роботи:

- 1) теоретичне дослідження магнітної структури нагромаджувального кільця та бустера-синхротрона;
- 2) розрахунки основних параметрів пучка, які можливо отримати у нагромаджувальному кільці;
- 3) дослідження динаміки електронного та іонного пучків та їх взаємодії в системі електронного охолодження;
- 4) дослідження взаємодії іонного пучка з атомами залишкового газу вакуума та атомами експериментальної мішені;
- 5) створення програми для розрахунку режимів роботи монохроматизуючого магніта (в системі транспортування ізохронного циклотрону У-240) з урахуванням абераційних спотворень другого порядку;
- 6) теоретичне та експериментальне дослідження ізохронної моди нагромаджувального кільця;
- 7) теоретичні розрахунки системи зовнішньої інжекції ізохронного циклотрону У-240;

Наукова новизна дисертаційної роботи відображається у тому, що вперше у нашій країні розробляється нагромаджувально-прискорювальний комплекс, який включає до себе унікальні установки, а саме: нагромаджувальне кільце з системою електронного охолодження; бустер-синхротрон; ЕЦР-джерело; джерело поляризованих частинок; існуючий ізохронний циклотрон У-240, а також монохроматизуючий магніт в системі транспортування циклотрону.

Проведено теоретичне дослідження магнітної структури нагромаджувального кільця з системою електронного охолодження та основних параметрів іонних пучків, які можливо отримати в кільці.

Запропоновано метод отримання перерізів перезарядних процесів іонного пучка на атомах залишкового газу вакууму нагромаджувального кільця для широкого діапазону енергії.

Вперше розроблена методика для отримання ізохронної моди на сильнфокусуєчому нагромаджувальному кільці, що дає можливість використовувати подібні кільця як мас-спектрометри короткоживучих ізотопів.

Теоретично розроблена система зовнішньої інжекції циклотрону У-240.

Практичне значення роботи.

Отримані теоретичні розрахунки знайдуть використання для створення прискорювально-нагромаджувального кільця з системою електронного охолодження в НЦ ІЯД та в інших установах, де буде проводитися створення подібних кілець. Методика розрахунків основних параметрів охолодженого пучка у кільці може бути використана багатьма ядерними центрами, де існує нагромаджувальне кільце з системою електронного охолодження. Робота нагромаджувального кільця у режимі ізохронної моди використовується на сильнофокусуєчому нагромаджувальному кільці, розташованому в ядерному центрі GSI (Дармштадт, Німеччина).

Автор вносить до захисту результати теоретичних, розрахункових та експериментальних досліджень, покладених в основу створення нагромаджувально-прискорювального комплексу:

- загальну схему нагромаджувального комплексу НЦ ІЯД;
- розрахунки магнітної структури нагромаджувача та бустеру-синхротронів;
- методи інжекції, які плануються використати у нагромаджувальному комплексі НЦ ІЯД;
- питання, пов'язані з системою електронного охолодження: визначення часу охолодження; результати розрахунків електронної гармати; рух електронного пучка у позовжньому магнітному полі системи охолодження;
- результати дослідження процесів взаємодії йонного пучка з атомами залишкового газу та експериментальної мішені;
- результати розрахунків основних параметрів йонного пучка, які можливо отримати у нагромаджувальному комплексі НЦ ІЯД;
- програмне забезпечення для вивчення поведінки йонного пучка в магнітному полі монохроматизуючого магніту з урахуванням абераційних ефектів другого порядку;
- результати теоретичного та експериментального дослідження ізохронного режиму роботи нагромаджувального кільця;

- результати розрахунків системи зовнішньої інжекції ізохронного циклотрону У-240.

ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

Дисертація складається із вступу, семи розділів, заключення та списку літератури. Дисертацію надруковано на 195 сторінках: на 36 сторінках розташовано 52 малюнки, на 21-сторінці - 26 таблиць, на 4 сторінках - список літератури із 60 найменувань.

У вступі обґрунтовано актуальність створення прискорювально-нагромаджувального кільця з системою електронного охолодження в Науковому Центрі "Інститут ядерних досліджень" НАН України. Приведено основні положення, що виносяться до захисту, а також коротко розкрито зміст дисертації.

Перший розділ дисертації присвячено розгляду можливих схем прискорювально-нагромаджувального комплексу (ПНК) НЦ ІЯД. Розглянуто різноманітні варіанти схем комплексу, їх переваги та недоліки. Найбільш доцільною схемою комплексу було обрано наступну схему: ізохронний циклотрон У-240 - проміжний прискорювач (бустер-синхротрон) - прискорювально-нагромаджувальне кільце. У цій схемі існує можливість роботи нагромаджувального кільця в автономному режимі з інжекцією як із проміжного прискорювального кільця, так із циклотрону У-240. Така схема є найбільш практичною, тому що проект може бути реалізований поетапно, тобто:

- на першому етапі проводиться пуск кільця у автономному режимі роботи з інжекцією іонів тільки від циклотрону У-240. При цьому експерименти можливо буде проводити тільки з легкими іонами ($A \leq 20$);

- на другому етапі експериментальне кільце доповниться бустером-синхротроном, що дає можливість розширити діапазон мас до $A \leq 130$, а також реалізувати неперервний режим експерименту на постійній енергії з періодичним живленням пучка від бустера. Згідно розрахункам, інтенсивність пучка легких іонів у нагромаджувальному кільці з використанням бустера буде вище, ніж при інжекції від циклотрону.

Проведено порівняння проєкта ПНК з аналогічними діючими у світі проєктами та проєктами, які знаходяться у стадії створення. Характерними рисами київського ПНК є: діапазон ядер $A=1\div 130$, максимальна енергія іонів з $A/Z=2$ 300 MeB/н. Крім цього проєкт володіє також гнучкістю та різноманітністю режимів роботи. Його конкурентноспроможність на початок досліджень визначається додатковою можливістю роботи з пучками поляризованих та радіоактивних ядер.

У другому розділі приведено розрахунки основних параметрів магнітної оптики нагромаджувача та бустера-синхротронів, а також детально проаналізовано усі види систем інжекції, які будуть використовуватися на прискорювально-нагромаджувальному кільці ПНД.

До складу комплексу крім нагромаджувального кільця та бустера-синхротрона також входять сепаруючий канал радіоактивних ядер, система імпульсного розгалуження пучка, магнітно-оптична система переносу пучка на другий поверх експериментального комплексу, канали розгалуження пучка від циклотрона до бустера та кільця, а також від бустера до кільця.

Нагромаджувальне кільце з системою електронного охолодження передбачено для іонів з магнітною жорсткістю 5.4 Т-м, що відповідає енергії 900 MeB для протонів, 300 MeB/н - для іонів з $A/Z=2$. Кільце поєднує функції нагромадження, охолодження, прискорення та фізичного експерименту. Периметр нагромаджувального кільця 99.16 м та складається з двох суперперіодів. Середній радіус кільця 15.61 м. Середнє значення бетатронної функції нагромаджувача 4.35 м у горизонтальній та 5.06 м у вертикальній площинах. Передбачається можливість роботи нагромаджувального кільця у двох режимах. Перший режим - немає мінімізації бетатронної функції на експериментальних мішенях; другий режим - існує можливість мінімізувати бетатронну функцію на мішені за допомогою включення двох трилетів квадруольних лінз (ЛК4-6), розташованих симетрично по відношенню до мішені (Т) (мал.1). Після включення цих трилетів не відбувається створення бетатронних функцій у кільці, окрім як у районі мішені. Мінімальне значення бетатронних функцій у цьому випадку стає рівним приблизно 0.5 м. Магнітна структура має ахроматичну структуру з нульовими значеннями дисперсійної функції у прямолінійних

проміжках, де розташовуються експериментальні мішені та система електронного охолодження. Середнє значення дисперсійної функції кільця 1.2 м та максимальне - 3.3 м.

Проведено дослідження впливу похибок в градієнті квадрупольних ліз нагромаджувального кільця на частоту бетатронних коливань. Для корекції хроматичності нагромаджувача використовується та обставина, що хроматичний доданок $\Delta v_{x,z}(\Delta p)$ до частот бетатронних коливань залежить від секступольної компоненти магнітного поля. Для отримання бажаної хроматичності $\zeta_{x,z}$ нагромаджувача у магнітну структуру вводяться два сімейства секступольних ліз (у кожній по 4. лізи) та розташованих в коротких прямолінійних проміжках між структурними квадрупольними лізами. Розраховані радіальна та вертикальна хроматичності нагромаджувального кільця мають значення відповідно -6.34 та -5.65. Для бустера-синхротрона хроматичність має майже нульові значення ($\zeta_x = -0.62, \zeta_z = -0.26$) і тому немає потреби встановлювати секступольні лізи.

Відповідно розрахункам, частоти бетатронних коливань іонів в нагромаджувальному кільці при вимкнених триплетах (1ЛК4, 1ЛК5, 1ЛК6) мають значення $\nu_x = 3.16, \nu_z = 2.43$ та при включених триплетах $\nu_x = 3.63, \nu_z = 3.21$.

Для інжекції іонів у нагромаджувальне кільце використовуються наступні методи:

- багаторазова однообертова інжекція для усього діапазону легких та важких іонів. Максимальна магнітна жорсткість, при якій можливо реалізувати таку інжекцію дорівнює 1.83 Т·м, а ефективний фізичний об'єм іонного пучка повинен бути не більше $\varepsilon_{x,z} = 30\pi$ мм·мрад та $\Delta p/p = \pm 3 \times 10^{-3}$. Інжекція виконується у прямолінійному проміжку між лізами 1ЛК3-3 та 1ЛК3-4 (мал.1);

- багатообертова інжекція з перезарядженням та охолодженням. Існує набір іонів ($^{12}\text{C}^{3+}, ^{14}\text{N}^{4+}, ^{16}\text{O}^{8+}, ^{20}\text{Ne}^{5+}$), які після прискорення їх в циклотроні до енергії 5-10 МеВ/и можуть бути переведені в повністю іонізований стан. Для цього необхідно застосувати стріпер, товщина якого повинна складати приблизно 20 мкг/см² (для С). Багаторазове проходження криїв цього повністю обідраних іонів з великою ймовірністю не

змінює їх зарядового стану (за винятком $^{20}\text{Ne}^{5+}$ та більш важких іонів). Ця особливість відкриває можливість проводити багатообертову інжекцію іонів в нагромаджувальне кільце з метою підвищення інтенсивності циркулюючого пучка.

Третій розділ присвячено дослідженню деяких питань пов'язаних з системою електронного охолодження. Тут приведено розрахунки параметрів іонного пучка, які отримують в результаті взаємодії заряджених частинок з охолоджуючим електронним пучком. Найбільш важливим питанням є визначення величини сили тертя, яку можливо отримати в кулері ІІД. У роботі проведено оціночні розрахунки сили тертя для іонних пучків ІІІК. Показано, що максимальна сила тертя для замагніченого іонного пучка може досягати величини порядку $F_{10}/Z_i^2 \approx 6$ еВ/м. Також найбільш важливою характеристикою нагромаджувача з системою електронного охолодження є час охолодження іонного пучка. У третьому розділі отримана формула (з урахуванням дії просторового заряду пучка), за допомогою якої можливо оцінювати час охолодження іонів у нагромаджувальному кільці:

$$\tau_{\text{cool}} = \frac{3^{0.5} A_i \varepsilon_{inj}^2 v}{4 Z_i^2 r_p L_c c \eta} \quad (1)$$

де A_i , Z_i - маса та заряд іона, L_c - кулонівський логарифм, c , v - швидкості світла та іона відповідно, ε_{inj} - емітанс інжектуючого пучка, η - відношення довжини проміжку охолодження до периметра нагромаджувача. Згідно з цією формулою час охолодження іонів (τ_{cool}) на максимальній енергії не буде перевищувати 0.6 нс. А для важких іонів ($Z_i > 10$) - $\tau_{\text{cool}} \ll 0.1$ с.

Показано, що метод електронного охолодження повністю подавляє багаторазове розсіяння іонів пучка після їх проходження крізь відносно товсту ($\approx 10^{14}$ см²) та важку мішень.

Розглянуто основні вимоги до електронного пучка при його формуванні у електронній гарматі. Гармата повинна забезпечити в проміжку охолодження доволі малий відносний кутовий розкид швидкостей електронів $\sim 10^{-3}$. Для досягнення цієї мети у третьому розділі приведено розрахунки електронних гармат різної геометрії, які найкращим чином виконують вимоги щодо отримання бажаного електронного пучка. Простежено

трансформації кутових характеристик та динаміка руху електронного пучка у цих гарматах.

В установці системи електронного охолодження пучок електронів формується у гарматі, зануреній в поздовжнє магнітне поле, яке необхідне для попередження електростатичного відштовхування електронів. Магнітне поле супроводжує електронний пучок з моменту народження та до повного його розсіяння у колекторі. Від того, наскільки це поле буде однорідним, залежить ефективність охолодження. У третьому розділі також розглянуто вплив різного роду неоднорідностей поздовжнього магнітного поля на відносний поперечний швидкісний розкид електронного пучка. Як показано, для того, щоб кутовий розкид електронного пучка залишався на рівні $\sim 10^{-3}$, відносна похибка магнітного поля повинна складати не більше $\Delta B/B < 10^{-4}$.

Під час проходження проміжка охолодження на іонний пучок діють різного роду збудження, викликані дією електронного пучка та поздовжнього магнітного поля. Показано, що просторовий заряд електронного пучка спричинює додатковий асув частот бетатронних коливань, рівний $\Delta\nu \approx 0.01$. Крім цього у поздовжньому магнітному полі соленоїда системи охолодження відбувається обертання іонного пучка. Оцінки показують, що воно буде рівним приблизно 0.52 рад. Також на вході та виході ділянки охолодження іони отримують удар у поперечному напрямі, який викликано дією поперечних компонент супроводжуючого магнітного поля тороїдів. При цьому відбувається спотворення замкненої орбіти іонного пучка у нагромаджувачі. Для корекції такого спотворення на вході та виході системи охолодження необхідно встановити по два дипольних магніта, як це показано в останьому пункті третього розділу.

У четвертому розділі проведено теоретичні розрахунки основних параметрів пучка, які можливо отримати в прискорювально-нагромаджувальному комплексі ЧЯД. Найбільш вагомим параметром, що характеризує ефективність нагромаджувального кільця з внутрішньою 'мішенню є його світність, яка визначається формулою:

$$L = f_e N_e I_e \quad (2)$$

де f_s - частота обертання іонів у кільці, t_i - товщина мішені, (см²), N - кількість нагромаджених іонів у кільці:

$$N = N_{\text{мг}} K_{\text{мг}} n_{\text{inj}} \eta_{ef} \xi_{\text{inj}}. \quad (3)$$

Тут: $N_{\text{мг}}$ - кількість іонів в одному мікрозгустку, $K_{\text{мг}}$ - число мікрозгустків на одному оберті нагромаджувача-синхротрона, n_{inj} - кратність інжекції. Для інжекції, яка буде проводитися методом перезарядки, у формулу (3) введено параметри: η_{ef} - ефективність зриву електронів, ξ_{inj} - ефективність нагромадження. Для інших методів інжекції ці параметри рівні одиниці. У четвертому розділі, усі ці параметри визначаються. Як показують розрахунки, максимальна світність, яка визначається формулою (2) для усього діапазону іонів ІІІК, лежить у межах $1.1 \times 10^{29} + 2.0 \times 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Але для практичних цілей, більш вагомим є не максимальна світність, а середня, яка визначається інтегруванням останньої по періоду одного циклу роботи нагромаджувача. Тепер став питання визначення часу одного періоду роботи кільця, який складатиметься з часів нагромадження, прискорення, проведення фізичного експерименту та приготування нового циклу роботи нагромаджувача. Час прискорення та приготування нового циклу відомі і дорівнюють 1 с. Час проведення фізичного експерименту з достатньою точністю можна визначити, оскільки він дорівнює часу життя нагромадженого пучка при його взаємодії (в основному лише однократним розсіянням) з атомами експериментальної мішені. Найбільш складною проблемою є визначення часу нагромадження іонів у кільці, оскільки він залежить від багатьох факторів, а саме: енергії інжекції; метода інжекції; часу життя іонного пучка, який в свою чергу залежить від перезарядних процесів та процесів розсіяння на атомах залишкового газу; часу охолодження; процесів рекомбінації іонів у системі охолодження. Як показано на енергії інжекції циклотрону, процеси перезарядки суттєво обмежують час життя важких ($A > 20$) іонів, що не дає можливості їх нагромаджувати. Тому виникає необхідність їх попереднього доприскорення (за допомогою бустера, мал.1) до проміжної енергії, при якій час життя буде у межах 10-100 с. Але при цьому необхідно брати до уваги той факт, що час охолодження також збільшується із збільшенням енергії.

Проведено оцінки максимально можливої інтенсивності іонного пучка, яку можливо отримати у нагромаджувальному кільці. Як показано, дія просторового заряду іонного пучка викликає додаковий від'ємний зсув частоти бетатронних коливань. Тому максимальна інтенсивність буде залежати від того, наскільки близько буде розташована "робоча точка" нагромаджувача до найближчого резонансу. Згідно розрахункам від'ємний зсув до найближчого резонансу складе $\Delta\nu=0.03$ та згідно з отриманою формулою максимальна інтенсивність іонів у нагромаджувальному кільці ІЯД буде у межах 10^9-10^{11} .

Для вивчення часу життя іонного пучка в нагромаджувальному кільці у четвертому розділі досліджуються процеси взаємодії іонів з атомами залишкового газу, а саме - з процесів перезарядки - електронне захоплення та електронний зрив, з процесів розсіяння - однокразове та багаторазове розсіяння. Як відомо, основна частка отриманих експериментальних даних перерізів для високозарядних важких іонів була вимірною на низькій енергії (10 кеВ/н - 10 МеВ/н). Але, у випадку проектування нагромаджувальних кілець, необхідно мати дані про перерізи перезарядних процесів іонів у широкому діапазоні енергії та при різних зарядових станах іонів та атомів газу. В роботі дається методика отримання ефективних перерізів перезарядних процесів для широкого діапазону іонів у випадку, коли залишковий газ має наступний атомарний склад: 90% - H, 9% - N, C, O, 1% - Ar.

Розглянуто ефекти, які обмежують отримання надхолодних пучків у нагромаджувальному кільці з системою електронного охолодження. Це кулонівська сила взаємодії іонів між собою, що спричинює послаблення фокусування пучка у поперечному напрямі та зсуву частот бетатронних коливань до небезпечних резонансів. Іншими ефектами, які обмежують охолодження пучка є: внутрішньопучкове розсіяння, що спричинює збільшення поперечної температури іонів за рахунок поперечної; флуктуації іонізаційних втрат на атомах мішені. Відповідно розрахункам відносний енергетичний розкид іонів у кільці буде складати $\Delta E/E \approx 10^{-5}$.

Досліджується методика отримання типу та величини товщини мішені для проведення ядерно-фізичних експериментів у нагромаджувальному кільці. У роботі розглядається умова, коли потужність дифузії іонного пучка

на атомах мішені не перевищує потужності охолодження, тобто електронне охолодження буде компенсувати середні енергетичні втрати та багаторазові процеси розсіяння на атомах внутрішньої мішені за час одного оберту пучка у нагромаджувачі.

У п'ятому розділі, з метою зменшення енергетичного розкиду пучка іонів циклотрону У-240, досліджується можливість компенсування абераційних спотворень другого порядку в монохроматизуючому магніті, розташованому у системі транспортування ізохронного циклотрону У-240.

Згідно розрахункам імпульсне розділення аналізатора складає $\Delta p/p = 4.2 \times 10^{-5}$. Але, як показано у п'ятому розділі, нелінійність магнітного поля монохроматора спричинює спотворення фазового об'єму пучка, що суттєво знижає роздільну силу монохроматора (приблизно у 10-12 разів). Для компенсації цих спотворень використовується той факт, що у рівнянні руху (де у правих частинах враховуються квадратичні члени) входять секступольні складові магнітного поля. Було розроблено програму TREK для розрахунків режимів роботи монохроматизуючого магніта, а також трансформації фазового об'єму у нелінійному магнітному полі монохроматора. Також за допомогою цієї програми для компенсації абераційних спотворень можна порахувати необхідні значення сил секступольних ліній, які розташовані на вході та виході монохроматора. Згідно розрахункам можна отримати такі значення градієнтів секступольних ліній, при яких спотворення стають мінімальними.

У шостому розділі досліджується так звана "ізохронна мода" роботи нагромаджувального кільця, яка дає можливість подібним синхротронам працювати як мас-спектрометри короткоживучих екзотичних ядер. Виходячи з релятивістського співвідношення для енергії можна отримати наступну формулу для визначення маси радіоактивного ядра:

$$\frac{\Delta m}{m} = \gamma^2 \frac{\Delta T}{T} + \gamma^2 \left\{ \frac{1}{\gamma^2} - \frac{1}{\gamma_r^2} \right\} \frac{\Delta p}{p}, \quad (4)$$

де m - маса ядра, T - період обертання іона у кільці, p - імпульс ядра, γ - релятивістський параметр, γ_r - константа, яка залежить тільки від настройки магнітної оптики нагромаджувального кільця. Якщо другий член в рівнянні (4) зробити настільки малою величиною, що ним можна буде

знехтувати, то отримуємо дуже просте співвідношення між масовим та часовим розділенням іонів у кільці. Існує два шляхи, за допомогою яких другий член у рівнянні (4) можна зробити майже нульовим. Використовуючи систему електронного охолодження імпульсне розділення ($\Delta p/p$) іонного пучка можна зменшити до величини $\approx 10^{-6}$. Але, як показано у четвертому розділі, час охолодження для більшості іонів з енергіями у межах 100-200 МеВ/н дорівнює приблизно одній секунді. Для короткоживучих ядер з часом життя порядку 1 нс такий метод не може бути застосовано. Існує інший шлях, коли другий член в рівнянні (4) може дорівнювати нулю. Для цього необхідно перебудувати магнітну оптику кільця таким чином, щоб параметр γ_c був рівним релятивістському параметру γ . Щоб цього досягти, як показано у шостому розділі, необхідно збільшувати середнє значення дисперсійної функції нагромаджувача.

Ізохронний режим роботи нагромаджувального кільця було експериментально досліджено на Дармштадському експериментально-нагромаджувальному кільці (інститут GSI, Німеччина). Відповідно, нагромаджувальне кільце ІЯД, крім функцій нагромадження, охолодження, прискорення, виконання фізичного експерименту на внутрішній мішені також може працювати як мас-спектрометр короткоживучих екзотичних ядер, що суттєво розширює спектр проведення ядерно-фізичних експериментів на прискорювально-нагромаджувальному комплексі ІЯД.

У цьому розділі приведено розрахунки системи зовнішньої інжекції циклотрону У-240. Для розширення діапазону іонів, які можна буде використовувати у ядерно-фізичних експериментах на прискорювально-нагромаджувальному кільці ІЯД, планується встановлення ряду додаткових джерел: ЕЦР-джерела тяжких іонів; джерела поляризованих іонів та джерела легких іонів. Ці джерела планується розташувати в окремому приміщенні, спеціально передбаченому для їх збору та запуску. Із цього приміщення іони, отримані у джерелах, будуть транспортуватися в медіанну площину циклотрону за допомогою горизонтального тракту транспортування та вертикального каналу інжекції. При розрахунках системи інжекції були враховані наступні вимоги:

- для інжекції іонів у циклотрон та захоплення їх у режим прискорення необхідна селекція бажаних іонів з певною енергією та відношенням заряду до маси (тобто необхідно встановлення аналізуючої системи). У нашому випадку енергія іонів, які отримують в ЕЦП-джерелі, становить 10 кеВ/н з A/Z від 2 до 5. Ці два параметри пучка дають магнітну жорсткість HR , яка буде визначати параметри оптичних елементів транспортної лінії. У нашому випадку величина HR знаходиться у межах $0.2+0.42$ Тл-м;

- необхідно узгодити параметри фазового простору пучка, який отримується в ЕЦП-джерелі з аксептансом аналізуючої системи;

- після аналізуючої системи відібрані іони від ЕЦП-джерела повинні будуть направлятися у загальний тракт транспортування, який також буде використовуватися для транспортування легких іонів, отриманих у джерелі легких іонів, а також іонів від джерела поляризованих іонів. Тому необхідно узгодити усі лінії, які ведуть іони від цих джерел з аксептансом загального горизонтального тракту транспортування;

- усі зовнішні джерела повинні розташуватися в окремому приміщенні поблизу залу, де знаходиться циклотрон У-240;

- загальний тракт транспортування повинен буде проходити крізь бетонну стіну товщиною приблизно 5 м.

У даному розділі приведено результати розрахунків горизонтального та вертикального трактів транспортування з урахуванням вищезгаданих вимог. Розрахунки проводилися за допомогою програми TRANSPORT.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. Зроблено аналіз ріноманітних схем нагромаджувально-прискорювального комплексу ІНЦ ІЯД НАН України, який дозволив обґрунтувати вибір основної схеми ІПК.

2. Розроблена структурна магнітна схема нагромаджувача та бустер-синхротронів. Розраховано бетатронні, дисперсійна функції синхротронів та інші основні параметри нагромаджувального комплексу.

3. Розглянуто різноманітні схеми інжекції іонного пучка, які використовуються в НПК.

4. Для проведення ефективного охолодження іонного пучка в кулері ІЯД досліджено процеси взаємодії іонного та електронного пучків. Отримана формула для визначення часу охолодження іонів.

5. Сформульовано вимоги до електронного пучка при його формуванні у електронній гарматі. Досліджена динаміка електронного пучка у електронних гарматах різної геометрії. Вивчено вплив різного роду похибок в поздовжньому магнітному полі на відносний кутовий розкид електронного пучка.

6. Розглянуто вплив поздовжнього магнітного поля та електронного пучка системи охолодження на замкнену орбіту іонного пучка.

7. Проведено теоретичне дослідження процесів взаємодії іонного пучка з атомами залишкового газу вакуумної камери нагромаджувача.

8. Обґрунтована необхідність створення допоміжного прискорювача-синхротрону (буестеру).

9. Розглянуто вимоги, виходячи із яких необхідно вибирати тип та товщину внутрішньої експериментальної мішені.

10. Показано, що енергетичний розкид охолодженого іонного пучка буде на рівні $\sim 10^{-5}$. При цьому електронне охолодження буде повністю подавлювати нагрів пучка, який виникає у мішені, за час одного оберту іонів у кільці, якщо товщина мішені не буде перевищувати величини $10^{14} \times (A/Z)^2 \text{ см}^{-2}$.

11. Розраховано основні параметри іонного пучка, які можна отримати в НПК ІЯД (світність, інтенсивність, час життя, енергетичний розкид та інше).

12. З метою зменшення енергетичного розкиду пучка іонів циклотрону У-240 розроблено програмне забезпечення для розрахунків режимів роботи монохроматизуючого магніту для вивчення поведінки іонного пучка в магнітному полі з урахуванням абераційних спотворень другого порядку. Розрахунки виконуються з урахуванням експериментально виміряного розподілу магнітного поля.

13. Проведено теоретичне дослідження ізохронної моди нагромаджувального кільця. Експериментальне дослідження цієї моди було проведено на Дармштадському експериментально-нагромаджувальному кільці, що підтверджує можливість роботи подібних кілець як мас-спектрометри для короткоживучих екзотичних ядер.

14. З метою покращення та розширення режимів роботи циклотрону У-240 розроблена система зовнішньої інжекції.

По темі дисертації надруковано наступні роботи:

1. Dolinskii A.V., Papash A.I., Pavlov S.N., Rudchik A.T., Valkov A.B., Vishnevskiy I.N., Zhmendak A.V. (INR, Kiev), Dikansky N.S., Kudelainen V.I., Pestrikov D.V., Sukhina V.N. (INP, Novosibirsk). The Ukrainian (INR, Kiev's) Storage Ring // Proc. of the 19th INS Symposium, Tokio, 1990, p.48-51.

2. Dolinskii A.V., Papash A.I., Pavlov S.N., Rudchik A.T., Valkov A.B., Vishnevskiy I.N., Zhmendak A.V. (INR, Kiev), Dikansky N.S., Kudelainen V.I., Pestrikov D.V., Sukhina V.N. (INP, Novosibirsk). The Ukrainian (INR, Kiev's) Storage Ring // Proc. of the first INR International Seminar on Accelerators, Kiev, 1990, p.121-128.

3. Dolinskii A.V., Papash A.I., Pavlov S.N., Rudchik A.T., Valkov A.B., Vishnevskiy I.N., Zhmendak A.V. Storage-Accelerating Complex Project Of The Institute For Nuclear Research, Kiev // Heavy ion Storage Rings with electron cooling (USSR proposal and project collections), Moscow, 1990. I.V. Kurchatov Institute of Atomic Energy, p.61-64.

4. Dolinskii A.V., Papash A.I., Pavlov S.N., Rudchik A.T., Valkov A.B., Vishnevskiy I.N., Zhmendak A.V. (INR, Kiev), Dikansky N.S., Kudelainen V.I., Pestrikov D.V., Sukhina V.N. (INP, Novosibirsk). Electron cooling system project of the storage ring at the Institute for Nuclear Research // Proc. of the Workshop of Electron Cooling and New Cooling Technique. Legnano (Italy), 1990, p.87-96.

5. Dolinskii A.V., Papash A.I., Pavlov S.N., Rudchik A.T., Valkov A.B., Vishnevskiy I.N., Zhmendak A.V. (INR, Kiev), Dikansky N.S., Kudelainen V.I., Pestrikov D.V., Sukhina V.N. (INP, Novosibirsk). The Main Parameters of the Institute For Nuclear Research, Kiev Storage Ring, Constructed on the Base of

the U-240 Cyclotron //Heavy ion Storage Rings with electron cooling (USSR proposal and project collections), Moscow, 1990. I.V.Kurchatov Institute of Atomik Energy, p.78-94.

6. *Dolinskii A.V., Papash A.I., Pavlov S.N., Rudchik A.T., Valkov A.E., Vishnevsky I.N., Zhmendak A.V.*(INR); *Belov V.P., Kokorin A.M., Makarov S.A., Severgin Yu.P., Shukeilo N.T.* (Efremov's Scientific Research Institute for Electric Physical, Petersburg). New Projekt of INR (Kiev's) Storage accelerating Complex//Proc. of the second INR International Seminar on Nuclear Physics, Kiev, 1991, p.92-108.

7. *Долинский А.В., Павлов С.Н. Вальков А.Е. Жмендак А.В.* Физический проект электронного охлаждения ускорительно-накопительного комплекса ИЯИ АН Украины//Вопр.атом. науки и техн. Сер. Ядер. -физ. Исслед. (Теория и эксперимент).(Харьков) 1991.-№3, с.10-15.

8. *Dolinskii A.V., Papash A.I., Rudchik A.T., Shvedov A.A., Valkov A.E., Vishnevsky* (INR); *Kapustin A.A., Kokorin A.M., Severgin Yu.P., Shukeilo N.T.* (Efremov's Scientific Research Institute for Electric Physical, Petersburg). The INR (Kiev's) Radioactive Ion Beam Separator//Proc. of the second INR International Seminar on Nuclear Physics, Kiev, 1991, p.21-27.

9. *Долинский А.В., Шведов А.А., Горюнов О.Ю., Осташко В.В., Урт В.И., Вальков А.Е., Папаш А.И., Бердиченко С.В., Барабаш Л.И.* Монохроматор СП-07, результаты первых экспериментов. Препринт КИЯИ-92-7, Киев, 1992.

10. *Dolinskii A.V., Papash A.I., Pavlov S.N., Rudchik A.T., Valkov A.E., Vishnevsky I.N., Zhmendak A.V.*(INR,Kiev); *Belov V.P., Kokorin A.M., Makarov S.A., Severgin Yu.P., Shukeilo N.T.* (Efremov's Scientific Research Institute for Electric Physical). New Projekt of INR (Kiev's) Storage accelerating Complex//Proc. of the 3-D EPAC, Berlin, 1992, p.1521-1523.

11. *Dolinskii A.V., Papash A.I., Rudchik A.T., Shvedov A.A., Valkov A.E., Vishnevsky I.N.* (INR); *Kapustin A.A., Kokorin A.M., Severgin Yu.P., Shukeilo N.T.* (Efremov's Scientific Research Institute for Electric Physical, Petersburg). The INR (Kiev's) Radioactive Ion Beam Separator//Proc. of the 3-D EPAC, Berlin, 1992, p.456-458.

12. *Dolinskii A.V., Papahs A.I., Pavlov S.N., Rudchik A.T., Valkov A.E., Vishnevsky I.N., Zhmendak A.V.*(INR); *Belov V.P., Kokorin A.M., Makarov S.A., Severgin Yu.P., Shukeilo N.T.* (Efremov's Scientific Research Institute for Electric Physical). Ion Storage Ring of the INR Storage accelerating Complex//Proc. of the PAC, Washington, 1993, p.3822-3824.
13. *Dolinskii A., Aushev V., Valkov A., Zaika N.*(INR, Kiev), *Efremov A., Kutner V.* (JINR, Dubna). External Sources and Beam Line for Isochronous Cyclotron U-240 //Have been reported on European Cyclotron Progress Meeting. Turku, Finland, 1993.
14. *Dolinskii A., Eickhoff H.* Injection of the ISR at the Transition Energy//GSI, Scientific report ,1995, p.244.
15. *Dolinskii A., Valkov A, Eickhov H. Franzke B, Franczak B.* Operation of the ESR (GSI, Darmstadt) at the transition energy//Proceedings of the EPAC-96, Barcelona, 1996, p.596-598.

Долинский А.В. Исследование динамики пучка в комплексе "Изохронный циклотрон У-240 - ускорительно-накопительное кольцо (ИЯИ)". Диссертация (рукопись) на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.16 - физика ядра и элементарных частиц. Научный центр "Институт ядерных исследований" НАН Украины, Киев, 1997.

Защищаются теоретические расчеты магнитной оптики ускорительно-накопительного комплекса ИЦ ИЯИ (г.Киев), основные параметры ионных пучков, которые возможно будет получить в данном комплексе, а также результаты экспериментального исследования изохронной моды накопительного кольца.

Dolinskii A.V. The investigation of the ion beam dynamic at the "Isochronous cyclotron U-240 - accelerate-storage ring (INR)" complex. The dissertation (manuscript) submitted to earn a Candidate of Phys.-Math. Sciences Degree on the specialty of 01.04.16 - Physics of Nucleus and Elementary Particles. The Scientific Center "Institute for Nuclear Research" of the Ukrainian National-Academy of Sciences, Kiev, 1997.

The theoretic calculations of the Accelerate-Storage Complex INR (Kiev) magnetic optic, the main parameters of the ion beam that are possible to obtain at this Complex and the results of the experimental investigation of the isochronous mode for storage ring are represented.

Ключові слова: іон, нагромаджувач-синхротрон, електронне охолодження, фазовий простір, інжекція, розсіяння, переріз.

Поддано к печати 06.05.97 г. Формат 60x84 1/16
Печать офсетная. Заказ 24 Тираж 100 экз. Усл.печ.1.5

СКТБ с ЭП Института ядерных исследований НАН Украины
252028, Киев-28, проспект Науки, 47

439300

AB 38.036