

УДК 539.1.076

ПРИСКОРЕННЯ ІОНІВ АЗОТУ В ТАНДЕМІ ЕГП-10К*І.П. Дряпаченко, Л.П. Кацубо, Г.М. Козеряцка, Е.М. Можжухін
(ІЯД НАН України, м. Київ)*

В роботі наведені результати пошуку можливостей розширення «паспортних» характеристик електростатичного перезарядного прискорювача (тандема) ЕГП-10К з метою отримання та прискорення важких іонів. На сьогодні низькоенергетичні пучки різноманітних ядер (атомів, елементів) є підґрунтям цілих галузей високотехнологічного пошуку нових матеріалів, їх модифікації та різноманітних застосувань.

Вступ

Електростатичний перезарядний прискорювач (тандем) ЕГП-10К [1] став до ладу в Інституті ядерних досліджень НАНУ у 1989 р. і є єдиною прискорювальною установкою свого класу в Україні – з енергіями прискорених частинок в інтервалі 2–9 МеВ для однозарядних іонів. Робота такого прискорювача тільки з легкими іонами дещо звужує його можливості та, відповідно, експериментальні роботи, які проводяться на пучках. Тому була поставлена задача одержати прискорені пучки більш важких газових іонів, використовуючи наявне робоче джерело негативних іонів (дуоплазмотрон зі зміщеним анодом) та перевірити роботу прискорювача при проходженні важких іонів по тракту прискорення та перезарядки. Також треба було вивчити можливості ідентифікації та вимірювання прискорених важких іонів. Для початкового технологічного та методичного пошуку був обраний азот ^{14}N за рекомендаціями використання газових сумішей з воднем ^2H в плазмі джерела іонів. Після незначних технологічних доробок та модернізації вдалося отримати можливість роботи з такою газовою сумішшю – «азот-водень» – за різних пропорцій її складових. В результаті великого об'єму вимірювань та пошуку була доведена наявність іонів азоту у прискореному пучку в суміші з протонами (іонами водню ^1H) у відповідності із очікуваними при плануванні роботи інтенсивностями для подібної методики отримання іонів у джерелі прискорювача.

1 Стан проблеми

Однією з переваг електростатичних прискорювачів, як однокінцевих так і тандемів з перезарядкою, є можливість прискорення іонів у широкому діапазоні мас. При наявності відповідних джерел іонів (позитивних для однокінцевих та негативних для тандемів) на електростатичних прискорювачах можна одержувати високоенергетичні пучки іонів практично всієї періодичної системи (від водню до урану) як стабільних так і радіоактивних ізотопів. За різних величин енергії спорідненості до електронів для отримання різних негативних іонів з одного джерела (особливо для елементів із «критично» низькою енергією спорідненості) доцільно примусово змінювати енергетичний розподіл електронів в області відбору, для утворення в розряді підвищеної концентрації даного виду негативних іонів, наприклад, використовуючи суміші газів [2]. Робота джерела

негативних іонів на газових сумішах дозволяє варіювати густиною плазми та функцією розподілу електронів за енергією (за рахунок непружної взаємодії іонів із домішковим газом), що у деяких випадках сприяє збільшенню виходу негативних іонів. Так у роботі [3] за цією методикою було запропоновано отримання широкого спектру важких іонів достатньої технологічної інтенсивності (див. таблицю 1).

Оскільки в середовищі хімічно активних газів проблемою стають термін роботи підігрівного катоду та всього джерела негативних іонів (цей термін скорочується до декількох годин), було вирішено відмовитися від роботи із O, Cl, F та іншими газами з великими енергіями спорідненості до електронів, а значить й великими виходами негативних іонів.

Таблиця 1. Параметри газових сумішей та отриманих пучків іонів

Тип іону	Газова суміш	Струм пучка (мкА)
H ⁻	H ₂	80
(CH) ⁻	10% CH ₄ + H ₂	0,26 – ¹² C
(NH) ⁻	20% N ₂ + H ₂	2,0 – ¹⁴ N
O ⁻		5,0
F ⁻	2% Freon + H ₂	2,0
S ⁻	2% SF ₆ + H ₂	2,8
³⁵ Cl ⁻	2% Freon + H ₂	35
I ⁻	H ₂ + Iodine Crystals	5,0

В якості домішкового (баластного) газу було вирішено використовувати водень, хоча добре себе зарекомендували в цій якості аргон чи гелій. Дійсно, для аргону енергія електронів у дуговому розряді значно нижча ніж в розрядах на інших газах за рахунок малого потенціалу іонізації аргону. Як наслідок буде вище вірогідність дисоціативного захвату електронів молекулою азоту, а також утворення N⁻ в процесах потрійних зіткнень й т. ін. Однак термін роботи джерела негативних іонів на сумішах газів з важкими компонентами (Ar, Ne ...) обмежується (приблизно 10–20 годин) суттєвим розпиленням накаловального катоду важкими позитивними іонами. Що стосується використання у якості баластного газу гелію, то з-за високого потенціалу іонізації $E \sim 25$ eV гелій не може ефективно знизити середню температуру електронів у дуговому розряді. Знов-таки, пучок іонів He⁽⁺⁾ з-за низької енергії спорідненості $E \sim 0,08$ eV не може слугувати «реперною» складовою багатоконпонентного іонного пучка, на якій можна було б стабілізувати режими роботи прискорювача ЕПП-10К.

Використання у цій роботі в якості баластного газу водню обумовлено технологічною необхідністю введення тандема ЕПП-10К у робочий режим та його підтримання. Насамперед, щодо незмінності положення прискорених іонних пучків на фізичній мішені під час експозиції за рахунок прив'язки до сильнотривової компоненти – пучку H⁻. Априорі мається на увазі, що траєкторії пучків H⁽⁺⁾ та N⁽⁺⁾ в електростатичних пристроях ідентичні. З а використання наведеної нижче методики вони легко ідентифікуються, й крім того баластний

пучок N^+ при необхідності прибирався з фізичної мішені (при фактично незмінному положенні пучка N^+) невеличким магнітним полем аналізуючого магніту СП-88 (його додаткової обмотки).

На виході перезарядних електростатичних прискорювачів можливо отримати пучки іонів з енергією $E = e \cdot U_k(1+Z)$, де e – заряд електрону, U_k – потенціал кондуктору, Z – зарядовий стан іонів після проходження перезарядної мішені. Тому дуже цікаві у цьому випадку важкі негативні іони, оскільки їх зарядовий стан Z може бути доволі високим. Нами були розраховані величини середніх зарядів q та розподіл по зарядовим станам F_q для іонів азоту в діапазоні енергій 1–5 МеВ при їх проходженні крізь перезарядну вуглецеву мішень завтовшки 5–15 мкг/см², яка уявляє собою тонку, фактично прозору плівку напиленого вуглецю. Результати розрахунків наведені гістограмами на рисунку 1. Перезарядна мішень дає внесок в енергетичний розкид, який в основному залежить від товщини перезарядної мішені (стріпера).

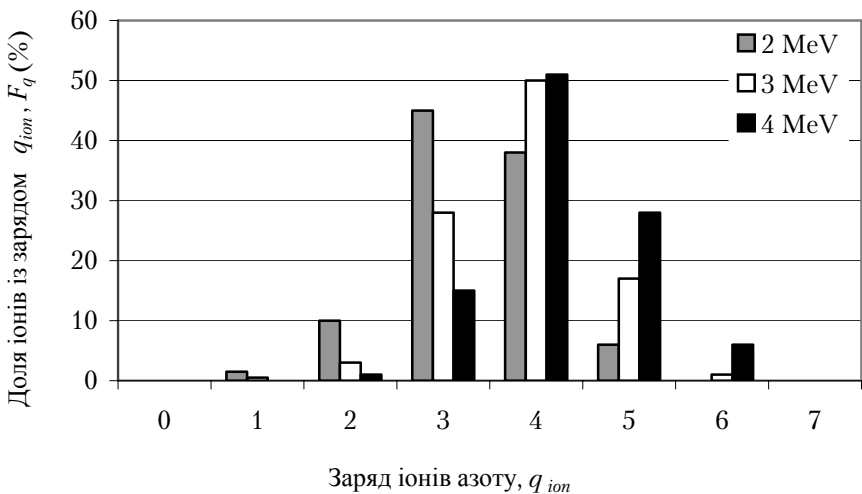


Рис. 1. Розподіл F_q по зарядовим станам для іонів азоту в діапазоні енергій 1–5 МеВ

Проходження іонів через стріпер супроводжується втратою енергії, збільшенням енергетичного розкиду, розсіюванням, нагріванням та розпиленням речовини стріпера.

2 Експериментальна частина

2.1 Інжектор джерела негативних іонів

Робота виконана на існуючому інжекторному комплексі електростатичного перезарядного прискорювача ЕПП-10К, який у деталях презентовано у роботах [4, 5]. Нами використовувався дуоплазмотрон із фіксованим зміщенням емісійного отвору, який був розроблений в НІЕФА ім. Єфремова для електростатичних перезарядних прискорювачів. Радіальне

зміщення (неспіввісність) проміжного електроду відносно емісійного отвору у конструкції джерела негативних іонів складало $\sim 1,2$ мм. В газовий проміжок джерела подається звичайний водень. Напуск робочого газу чи суміші газів здійснюється у джерелі крізь анодний фланець за використання діелектричного капіляру від двоканального натікача США-2. У якості емітера первинних електронів в джерелі негативних іонів використовується вольфрамовий катаний дріт діаметром 0,9 мм. За ініціації розряду в плазмі утворюються голі ядра водню, позитивні молекулярні іони H_2^+ , а на периферії плазми – негативні іони атомарного водню H^- . Саме тільки вони й витягуються із газового проміжку екстрагуючим електродом для подальшого двокаскадного прискорення у тандемі. Корегування положення ділянки із високим вмістом негативних іонів (та мінімальним виходом супутніх електронів) відносно емісійного отвору відбувається шляхом зміни струму крізь обмотку електромагніту джерела.

Оскільки основний внесок у процес руйнації негативних іонів вносять їх зіткнення із «швидкими» електронами з енергією $E_i \geq 5 \div 10$ eV, то для ефективного виводу із джерела утворених іонів необхідно звести до мінімуму час їх знаходження у плазмі, наблизити місце генерації негативних іонів до отвору відбору іонів із джерела. З цією метою було встановлено оптимальну відстань між анодною вставкою та проміжним електродом $\sim 0,8$ мм та обрано оптимального діаметра емісійного отвору в анодній танталовій вставці $\sim 0,6$ мм. При цьому газові витрати у джерелі негативних іонів не перевищували $5 \div 10$ см³/год. У цих умовах (оптимальних витрат робочого газу) на виході інжектора були отримані пучки іонів H^- з енергією іонів $15 \div 17$ кВ та струмом $5 \div 10$ мкА (за струму супутніх електронів менш за 0,5 мА) із задовільними оптичними (фазовими) характеристиками. Так діаметр пучка у першому кросвері (на відстані ~ 1 м від джерела іонів) не перевищував $2 \div 3$ мм.

2.2 Ідентифікація іонів азоту у прискореному пучку тандему ЕПП-10К

Задля ідентифікації змісту прискореного пучка було вирішено використати результати вимірювань продуктів пружного розсіяння його на бомбардованих мішенях різного елементного складу у відповідних кінематичних умовах. На рисунку 2 відтворена схема вимірювань в камері під прискорювачем за використання існуючої методики реєстрації продуктів ядерних реакцій, яка вже традиційно використовується на тандемі ЕПП-10К [6–10]. Треба зауважити про неможливість проведення очікуваних прискорених важких іонів з використанням аналізуючого магніту тандему у робочий експериментальний бокс за малого «штатного» магнітного поля. Було використане обладнання прямо під прискорювачем (див. вставку на рис. 2).

Вимірювання проводились для двох фіксованих значень (35° та 150°) кутів реєстрації заряджених частинок, які вилітають із бомбардованою пучком мішені. Треба зразу зауважити, що вимірювання проводились в декілька етапів з більшими чи меншими часовими перервами, які були обумовлені або «виробничими» умовами використання пучка прискорювача, або необхідністю чи бажанням методичних змін в роботі за темою. В таблиці 2 наведені результати кінематичних обрахунків енергії очікуваних продуктів пружного розсіяння на ці кути протонів та іонів азоту (^{14}N) на різних мішенях та для відповідних енергій прискорення. Наявність в таблиці значної кількості ядер-мішеней обумовлена бажанням та необхідністю врахування можливих процесів взаємодії пучка з

мішенню, які могли б замаскувати чи сфальшувати ідентифікацію наявності в пучку важких іонів.

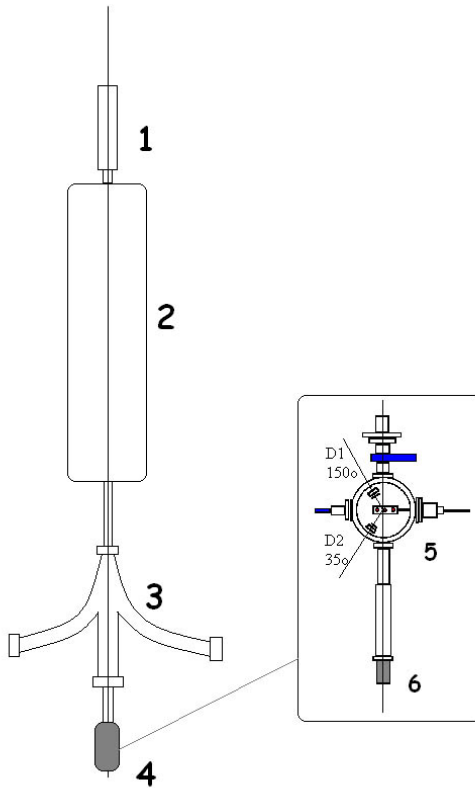


Рис. 2. Схема розташування обладнання та проведення вимірювань: 1 – інжектор та джерело іонів, 2 – бак прискорювача, 3 – аналізуючий магніт, 4 – вакуумна камера з детекторами та мішенню (див. вставку), 5 – камера для розміщення досліджуваних мішеней та детекторів, 6 – циліндр Фарадея

Як і передбачалось, для ідентифікації складу пучка іонів довелося використовувати більш важку мішень (наприклад, ^{192}Au), бо пошукувані іони азоту не розсіюються вуглецем на кут більший ніж $\theta = 59^\circ$ за даних кінематичних умов (див. табл.2).

Було також збільшено енергію пучка до 4,2 MeV ($Z = 1$), що надало додаткову перевірку енергетичної калібровки спектрів, а за більшої зміни енергії повинне суттєво збільшитися значення ефективного заряду, а відповідно і енергії іонів ($Z > 1$). Додаткові можливості ідентифікації та аналізу складу прискореного пучка надавала наявність корегуючої обмотки штатного аналізуючого магніту СП-88 з можливістю малої крокової зміни струму в ній від 0 до 300 мА, чого вистачало для повного відхилення пучка протонів з енергією 4÷5 MeV від оптимальної траєкторії бомбардування мішені.

Таблиця 2. Результати розрахунків кінематики енергії продуктів взаємодії прискореного пучка із бомбардованою мішенню

Енергія пучка	Досліджувана взаємодія	$\theta = 35^\circ$	$\theta = 150^\circ$
4 MeV	H(p,p)H	2,68 MeV	Max 90°!
	$^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$	3,879 MeV	2,92 MeV
	$^{16}\text{O}(p,p)^{16}\text{O}$	3,91 MeV	3,16 MeV
	$^{58}\text{Ni}(p,p)^{58}\text{Ni}$	3,974 MeV	3,747 MeV
	$^{192}\text{Au}(p,p)^{192}\text{Au}$	3,992 MeV	3,922 MeV
	$^{12}\text{C}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{N})^{12}\text{C}$	2,456 MeV	Max 59°!
	$^{16}\text{O}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{N})^{16}\text{O}$	2,842 MeV	0,023 MeV
	$^{58}\text{Ni}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{N})^{58}\text{Ni}$	3,664 MeV	1,592 MeV
	$^{192}\text{Au}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{N})^{192}\text{Au}$	3,896 MeV	3,045 MeV
4,52 MeB	H(p,p)H	3,031 MeB	Max 90°!
	$^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}$	4,394 MeB	3,30 MeB
	$^{16}\text{O}(p,p)^{16}\text{O}$	4,41 MeB	3,57 MeB
	$^{192}\text{Au}(p,p)^{192}\text{Au}$	4,511 MeB	4,432 MeB
	$^{192}\text{Au}(^{14}\text{N}, ^{14}\text{N})^{192}\text{Au}$	4,402 MeB	3,441 MeB
$E(^{14}\text{N}^{++}) = 6,78 \text{ MeB}$	$^{192}\text{Au}(^{14}\text{N}^{++}, ^{14}\text{N})^{192}\text{Au}$	6,603 MeB	5,162 MeB
$E(^{14}\text{N}^{++++}) = 9,04 \text{ MeB}$	$^{192}\text{Au}(^{14}\text{N}^{++++}, ^{14}\text{N})^{192}\text{Au}$	8,766 MeB	6,85 MeB

Не стільки очікувані, скільки отримані інтенсивності можливого пошукуваного ефекту від прискорених іонів газів (азоту) обумовили роботу з детектором заряджених частинок під кутом 35° . Детектор під великим кутом (150°) використовувався за необхідності контрольних вимірювань. З досить великої кількості накопичених даних для різних технологічних умов прискорення та виведення пучка нижче наведені результати, які були отримані при напрузі на високовольтному електроді 2,25 Мв, що відповідає енергії однозарядних іонів на мішені 4,5 MeB. Підсилення спектрометричного тракту не змінювалося й постійна ціна каналу в наведених нижче спектрах дорівнює 11 кеВ.

3 Результати вимірювань та висновки

На рисунку 3 наведені спектри заряджених частинок, які вилітають під кутом 35° із золотої мішені (^{192}Au), бомбардованої пучком газової суміші ($^1\text{H} + ^{14}\text{N}$) з вимкненою (спектр 28) та включеною додатковою обмоткою з максимальним струмом 280 мА (спектр 29). Кількісний склад газової суміші визначався по вакууму в об'ємі інжектора. Наприклад, із газовою сумішшю вакуум був $2,7 \cdot 10^{-6}$, а з перекритим воднем – $1,4 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. Піки біля 390 каналу в обох спектрах відповідають пружному розсіяню протонів,

прискорених до енергії 4,5 MeV, які логічно «зникають» за увімкненого магнітного поля (спектр 29). Оскільки мішень бомбардується «прямим» пучком із прискорювача, то в ньому можуть бути домішки різних частинок від нейтральних атомів до молекулярних пучків, пучків природних ізотопів водню й т. ін., які не відхиляються полем аналізуючого магніту. За малого магнітного поля «не зникатимуть» набагато важчі іони азоту, прояв яких ми очікуємо при більших енергіях (430, 600, 750 канали), що відповідає енергіям іонів азоту із $Z=2$ (6,75 MeV) та $Z=3$ (9 MeV). Невеличкий зсув груп в спектрах може бути викликаний малими змінами траєкторії пучка та кінематикою взаємодії при цьому.

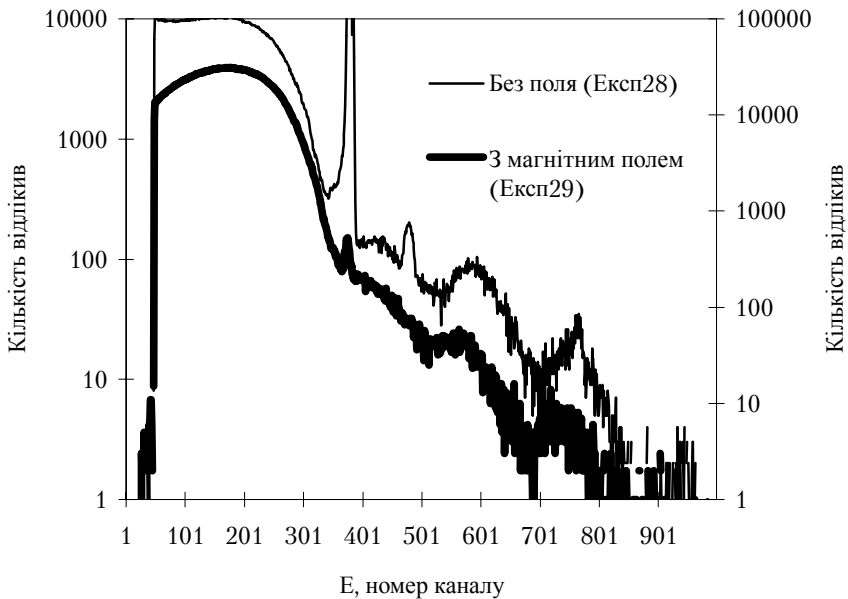


Рис. 3. Спектри пружного розсіяння заряджених частинок прискореного пучка. Мішень – ^{192}Au . Напруга на кондукторі – 2,5 МВ. Кут реєстрації – 35° . «Без поля» – спектр 28 (ліва вісь для кількості відліків) й «з магнітним полем» – спектр 29 (права вісь для кількості відліків)

Нарешті, на рисунку 4 наведені спектри «з азотом» (за напуску азоту в джерело вакуум змінився із $1,5$ до $2,7 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст.) – спектр 32 й «без азоту» – спектр 33. Напуск азоту призводить до зменшення загального струму пучка на діагностичних пристроях. Мабуть, це не дивно, бо вище наводилися (див. табл.1) дані про 80 мкА протонів та 2 мкА іонів азоту в пучку для їхньої суміші в джерелі.

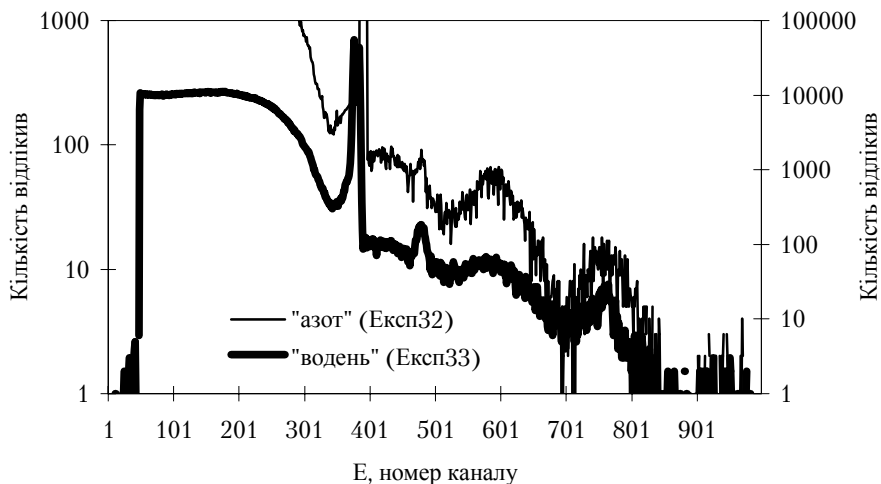


Рис. 4. Спектри розсіяних заряджених частинок за різного складу газової суміші в інжекторі: «з азотом» – спектр 32 (ліва вісь для кількості відліків) й «водень» (без азоту) – спектр 33 (права вісь для кількості відліків)

Це й проявляється у відносних інтенсивностях водневих пічків пружного розсіяння (380 канал).

Але, якщо розглянути саме ці ділянки двох спектрів (вище 400 каналу) з нормуванням по «пружному водню» (див. на рис. 5 ті ж спектри із лінійною шкалою), то стає наявною суттєва різниця інтенсивності у ділянках спектрів, які відповідають енергії двозарядних іонів азоту у 6,75 MeV (600 канал) та тризарядних іонів у 9 MeV (750 канал). Треба враховувати те, що газове середовище у джерелі не змінюється миттєво при напуску чи перекритті відповідного газу (цим й пояснюються лапки – «з азотом» чи «без азоту»). А тому й структура спектрів (треба пам'ятати про логарифмічну шкалу щодо інтенсивності) обумовлюється незначними змінами за малих виходів продуктів у тривалі проміжки часу. Що стосується кількісної оцінки отриманої інтенсивності ідентифікованих важких іонів, то вона відповідає проектним значенням роботи [3]: співвідношення струмів для іонів $H / {}^{14}N$ (80 мкА/2 мкА) як 40:1. За висхідної інтенсивності пучка протонів (водню) у наших експериментах у $\sim 1,5$ мкА було зафіксоване співвідношення сум в означених вище відповідних ділянках («водневій» та «азотній») спектрів як 17:1, що відповідає струму пучка негативних іонів азоту ~ 100 нА.

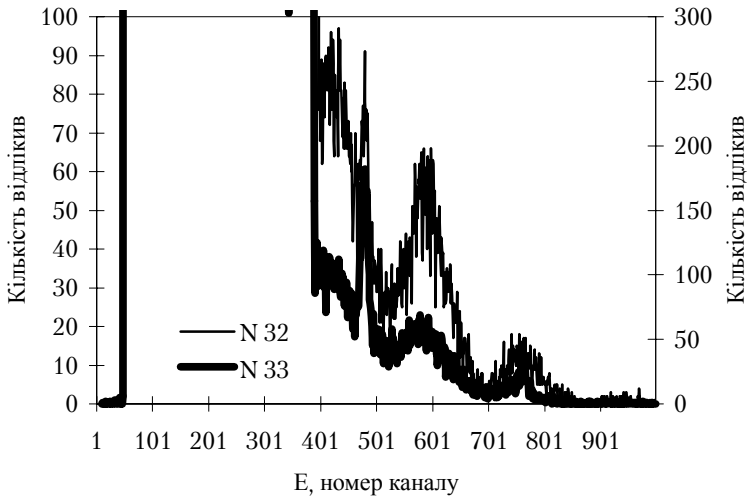


Рис. 5. Ділянки спектрів розсіяних заряджених частинок за різного складу газової суміші в інжекторі: «з азотом» – спектр 32 (ліва вісь для кількості відліків) й «без азоту» – спектр 33 (права вісь)

Таким чином, в роботі підтверджена можливість прискорення іонів азоту з використанням газової суміші «водень + азот» в джерелі негативних іонів інжектора тандемного прискорювача ЕПП-10К. Однак досягнуті «слідові» інтенсивності прискорених іонів не доводять можливості використання існуючого джерела негативних іонів для отримання пучків важких (газових) іонів для технологічних та експериментальних цілей. Тому надалі планується використати в інжекторі прискорювача ЕПП-10К джерело негативних іонів із «холодним» катодом з відповідною системою живлення, охолодження та діагностики.

ЛІТЕРАТУРА

1. Иванов А.С., Киршин Г.Ф., Латманов В.М., Лысов А.В., Михайлов В.Д., Рашаль Г.Я., Субботкин С.А. Электростатический ускоритель с перезарядкой типа ЭПП-10К-1 // Атомная энергия – т. 34, вып. 5 – 1973. – С. 401–403.
2. J.P.Martin, R.J.Leveague // Nucl.Instr.&Meth. – 80, 2. – 1970. – P. 229.
3. Proposal for 14 MV Tandem Facility // High Voltage Engineering Corporation Technical Report. – 1975.
4. Кацубо Л.П., Тоцкий Ю.И., Бойко Я.И., Руденко А.Я. Инжекторный комплекс электростатического перезарядного ускорителя ЭПП-10К // Материалы конференции ИЯИ НАН Украины. – Киев. – 1995. – С. 83–88.
5. Кацубо Л.П., Тоцкий Ю.И., Можжухин Э.Н., Худенко А.Я. Инжекторный комплекс ионов тандем-генератора ЭПП-10К // Труды XI Совещания по Электростатическим ускорителям. – Обнинск. – 1995. – С. 209–214.

6. Дряпаченко І.П., Жук В.В., Кацубо Л.П., Можжухин Е.М., Шведов А.А. Про можливість кінематично повних вимірювань взаємодії двох продуктів у кінцевому стані з розщеплення дейтрона протонами з енергією 5,5 МеВ // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. – №1(7). – 2002. – С. 40–45.
7. Горюнов О.Ю., Дряпаченко І.П., Можжухін Е.М., Ніколаєв В.І., Стрильчук М.В. Визначення абсолютного значення енергії частинок виведеного пучка тандема ЕГП-10К за допомогою γ -спектрометрії // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. – №1(9). – 2003. – С. 135–139.
8. Дряпаченко І.П., Можжухін Е.М. Розсіяння та реакції пучків протонів та дейтронів з енергією 1,6–7,3 МеВ Київського тандему ЕГП-10К // Ядерні та радіаційні технології. – т. 4, №2. – 2004. – С. 76–89.
9. Дряпаченко І.П., Жук В.В., Кацубо Л.П., Козерацька Г.М., Можжухин Е.М. Розширення діапазону параметрів пучка прискорених іонів ЕГП-10К // Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. – №1(12). – 2004. – С. 138–142.
10. Дряпаченко І.П., Кацубо Л.П., Можжухін Е.М. Нейтральні частинки в пучку тандема ЕГП-10К // Щорічна наукова конференція ІЯД (Київ, 25–28 січня 2005 р.). – Київ. – 2005.