

Л. В. Михайлов<sup>1,\*</sup>, М. В. Маковський<sup>1</sup>, А. І. Піскар'юв<sup>1</sup>, В. М. Шевель<sup>1</sup>,  
Ю. В. Фальченко<sup>2</sup>, Л. В. Петрушинець<sup>2</sup>, В. Є. Федорчук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, Україна

\*Відповідальний автор: leomix@kinr.kiev.ua

### ОТРИМАННЯ ІЗОТОПУ <sup>22</sup>Na, ЗАСТОСОВУЮЧИ ПРИСТРІЙ, РОЗРОБЛЕНИЙ ДЛЯ ОПРОМІНЮВАННЯ МІШЕНІ ВНУТРІШНІМ ПУЧКОМ ПРОТОНІВ ЦИКЛОТРОНА У-240

Розроблено пристрій для отримання ізоотопів, використовуючи інтенсивний внутрішній пучок протонів циклотрона У-240. Сконструйовано мішень для отримання ізоотопу <sup>22</sup>Na у складних умовах теплових та радіаційних навантажень в обмеженому просторі прискорювальної камери циклотрона. Проведено радіохімічне виділення ізоотопу <sup>22</sup>Na.

*Ключові слова:* радіонуклід, протони, мішень, опромінення, період напіврозпаду, енергія гамма-квантів, методи дифузійного зварювання та радіаційної хімії.

Ізотопи <sup>22</sup>Na широко застосовується в різних галузях науки, у сільському господарстві, медицині.

У роботі [1] розглядається отримання ізоотопу <sup>22</sup>Na в результаті ядерних реакцій при взаємодії прискорених заряджених частинок (протонів енергією до 30 МеВ, дейтронів енергією до 25 МеВ та альфа-частинок енергією до 50 МеВ) з ядрами мішені. Метою роботи є визначення оптимальних умов напрацювання радіоактивного ізоотопу <sup>22</sup>Na на внутрішньому пучку циклотрона У-150 М Інституту ядерної фізики (м. Алмати, Казахстан). У 1992 р. внутрішнім пучком протонів з енергією 70 МеВ та струмом 75 мкА на циклотроні У-240 ІЯД НАН України було опромінено експериментальну мішень RbCl, що обертається. Опромінення здійснювалося протягом 35 год. Через 10 діб після закінчення опромінення радіохімічним методом було виділено з мішені <sup>82</sup>Sr [2].

Цей експеримент, враховуючи технічні характеристики циклотрона У-240, показав можливість напрацювання на внутрішньому пучку протонів циклотрона різних радіонуклідів.

Ізохронний циклотрон У-240 ІЯД НАН України – єдиний діючий прискорювач, який перекриває необхідний діапазон енергій і на якому можна здійснювати напрацювання практично усіх циклотронних радіонуклідів. На циклотроні У-240 інтенсивність внутрішнього пучка протонів може досягати 100 мкА та більше. Така інтенсивність пучка протонів дає змогу ефективно напрацьовувати багато різних циклотронних радіонуклідів. Складність полягає в розробці

мішеневих пристроїв, які б працювали в екстремальних умовах теплових і радіаційних навантажень в обмеженому просторі прискорювальної камери циклотрона та мали спроможність протягом всього часу опромінення (до кількох діб) витримувати ці навантаження без руйнації. Для напрацювання циклотронних радіонуклідів було застосовано пристрій, розроблений для опромінювання мішеней внутрішнім пучком циклотрона. Детальний опис конструкції даного пристрою наведено у роботі [3].

Пристрій складається із декількох функціональних частин:

механічної частини, що забезпечує кріплення мішені в мішеневому пристрої, доставку мішені в зону опромінення усередині прискорювальної камери, повернення мішені в початковий стан після опромінення та скидання мішені до контейнера;

системи водоохолодження, що забезпечує подачу води і контроль тиску, витрат води та температури;

системи вакуумного відкачування шлюзу;

системи управління, що включає засоби діагностики (вимірювання положення мішені, струму поглиненого мішенню пучка, вакууму в шлюзі, температури охолоджуючої води на вході в систему охолодження, витрат води), засобів управління технологічними системами (водяні та повітряні електроклапани, електромагнітні натікачі, засувки тощо), пристрої захисту та блокування. Для віддаленого моніторингу та управління виконуючими механізмами установки була розроблена програма “SIR” (SetupIRradiation).

© Л. В. Михайлов, М. В. Маковський, А. І. Піскар'юв, В. М. Шевель,  
Ю. В. Фальченко, Л. В. Петрушинець, В. Є. Федорчук, 2024

Оскільки циклотронна зала є радіаційно-небезпечним приміщенням, то управління всіма виконавчими механізмами, двигунами, приладами, вимірювання і контроль за усіма параметрами повинні бути дистанційними. Була вибрана загальна схема управління для налаштування, налагодження та перевірки обладнання. Було створено місцевий пульт управління (МПУ) в циклотронній залі для управління та контролю за процесом опромінення і створено комп'ютерну систему з основним комп'ютером, розташованим у пультівій кімнаті циклотрона.

Комп'ютер головного пульта оператора по каналу мережі Ethernet з'єднано з промисловим контролером МПУ в магнітній залі. Контролер включає в себе об'єднану плату для установки

модулів уводу - виводу, яка закріплена на DIN рейку в МПУ.

Програма "SIR" була розроблена для віддаленого моніторингу та управління виконуючими механізмами установки. Програма призначена для роботи на ПК під управлінням операційної системи Linux. Максимальна «дружність» та ефективність досягається при використанні сенсорного монітора великого розміру.

Головне вікно програми розділене на три частини: область поточних параметрів установки (датчики), 3D модель установки та зона елементів управління. Загальний вигляд головного вікна локального інтерфейсу програми "SIR" зображено на рис. 1.

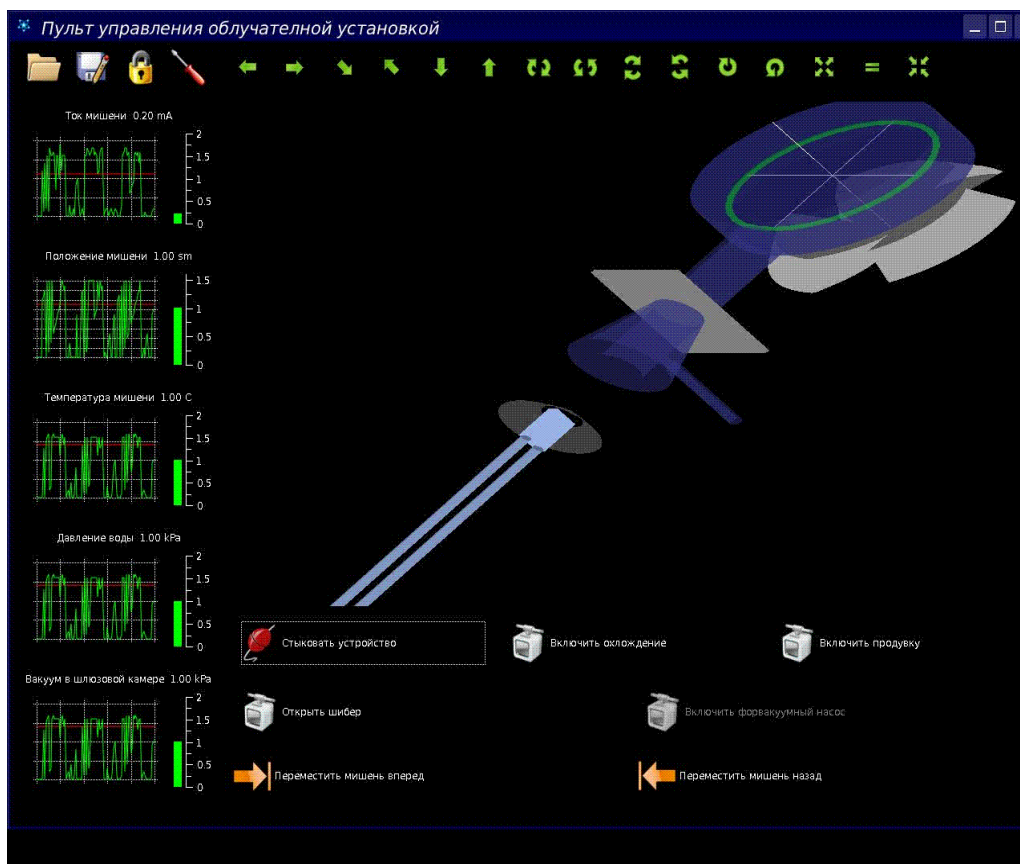


Рис. 1. Головне вікно локального інтерфейсу програми "SIR".  
(Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Розроблений пристрій для опромінювання мішеней внутрішнім пучком циклотрона було застосовано для напрацювання радіонукліда  $^{22}\text{Na}$ .

Характеристика радіонукліда  $^{22}\text{Na}$ : період напіврозпаду  $T_{1/2}$  – 2,6 роки, енергія гамма-квантів  $E_\gamma$  – 1274 кеВ, енергія позитронів  $E_{\beta^+}$  – 511 кеВ. Відомі 23 ізотопи натрію з масовим числом від 17 до 39 і з числом нейтронів в ядрі від 6 до 28. Єдиний стабільний ізотоп –  $^{23}\text{Na}$ . У

більшості ізотопів період напіврозпаду менше 1 хв, лише один радіоактивний ізотоп ( $^{22}\text{Na}$ ) має період напіврозпаду більше 1 року, і ще один ( $^{24}\text{Na}$ ) більше 1 год.  $^{22}\text{Na}$  використовують як джерело позитронів у наукових дослідженнях.  $^{24}\text{Na}$ , з періодом напіврозпаду по каналу  $\beta$ -розпаду 15 год, використовується в медицині для діагностики та для лікування деяких форм лейкемії.

Для напрацювання радіонуклідів  $^{22}\text{Na}$  з ядерної реакції  $^{24}\text{Mg}(p, ^3\text{He})^{22}\text{Na}$  сконструйовано

зварну мішень для опромінювання пучком протонів. Аналіз супутніх ядерних реакцій показав, що найбільший вихід радіонукліда  $^{22}\text{Na}$  буде при опроміненні магнію протонами.

Було проаналізовано підбір енергії протонів для оптимального виходу радіонуклідів  $^{22}\text{Na}$ . Виходи  $^{22}\text{Na}$  з реакції  $^{12}\text{Mg}(p)^{22}\text{Na}$  наведено у таблиці [4].

Енергія протонів, МеВ	Вихід радіонукліда, МБк/(мкА·год)
60	$89,7 \cdot 10^{-2}$
64	$10,5 \cdot 10^{-1}$
68	$11,9 \cdot 10^{-1}$
76	$14,9 \cdot 10^{-1}$
84	$17,8 \cdot 10^{-1}$
92	$20,8 \cdot 10^{-1}$
100	$23,8 \cdot 10^{-1}$

Для одержання  $^{22}\text{Na}$  з періодом напіврозпаду  $T_{1/2} = 2,6$  роки, активністю 10 мкКі застосовано режим опромінення протонами з енергією  $E = 72$  МеВ, струмом  $I = 30$  мкА, часом опромінення на циклотроні У-240 близько 30 хв. Згідно з цим режимом опромінення була сконструйована мішень.

У роботі вперше успішно застосовано розроблений метод зварювання магнію з алюмінієм [5]. Мішень складається з опромінюваної протонами смужки магнію (99,9%), привареної до охолоджуваного водою корпусу зі сплаву алюмінію. Був застосований метод дифузійного зварювання чистого магнію МГ1 зі сплавом алюмінію (Д16, система Al-Cu-Mg), що проводили в умовах вакууму з використанням установки дифузійного зварювання П115, яка має радіаційну систему нагрівання. Два молібденових нагрівачі для рівномірності теплового потоку у вигляді півкільця знаходяться навколо деталі, що підлягає зварюванню. Тиск зварювання забезпечують за допомогою пневмогідралічного циліндра.

З урахуванням того, що в системі «магній - алюміній» в температурному інтервалі 438 - 453 °С спостерігається декілька евтектичних реакцій з плавленням компонентів, то зварювання проводили при температурі 420 - 430 °С.

Для локалізації пластичної деформації та забезпечення утворення фізичного контакту між магнієм та алюмінієм використовували перфоровані прошарки з чистого алюмінію, товщиною 1 мм. У прошарку робили отвори діаметром 1,5 мм із кроком  $1,5 \times 1,5$  мм.

Зварювання деталей проводили на масивній сталевій опорі, на якій для контролю температури процесу закріплювали термопару хромель-алюмель. Після зварювання охолодження деталі

до кімнатної температури відбувалось у вакуумі разом з установкою,  $^{22}\text{Na}$  виділявся після опромінення методами радіаційної хімії. Одержання  $^{22}\text{Na}$  з опроміненої протонами мішені, що складається з металевого магнію, включає процес із семи етапів (рис. 2).

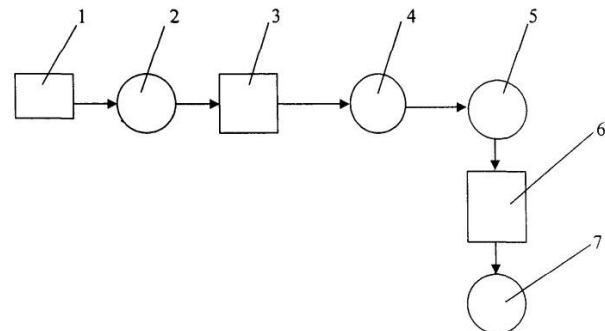


Рис. 2. Процес одержання  $^{22}\text{Na}$  з опроміненої протонами мішені. 1 – опромінення мішені з магнію на У-240; 2 – витримка мішені до розпаду короткоживучих радіонуклідів; 3 – вирізання центральної частини мішені в «гарячих» камерах реактора; 4 – вимірювання активності вирізаної частини мішені з визначенням радіонуклідного складу мішені з магнію; 5 – центральна частина мішені з магнію, яка опромінена протонами; 6 – упарювання розчину до мінімального об'єму; 7 – нанесення упареного розчину на підкладку джерела, герметизація джерела, вимірювання його параметрів та розробка технічної документації.

Спосіб отримання  $^{22}\text{Na}$  з опроміненої протонами мішені з магнію включає розчинення опроміненої магнієвої мішені в концентрованій соляній кислоті, осадження частини іонів магнію та домішкових важких металів з розчину мішені з магнію у вигляді гідратів оксидів на розчин Dowex 50w та десорбцію  $^{22}\text{Na}$  з катіонообмінної смоли Dowex 50w. Винахід дає змогу спростити технологію виділення ізоотопу  $^{22}\text{Na}$ .

У результаті отримано 10 мл розчину хлориду  $^{22}\text{Na}$  ( $^{22}\text{NaCl}$ ) активністю 10 мкКі.

Сконструйована зварна мішень дасть можливість напрацьовувати радіонукліди  $^{22}\text{Na}$  в екстремальних умовах теплових і радіаційних навантажень в обмеженому просторі прискорювальної камери циклотрона та буде спроможна протягом всього часу опромінення (до кількох годин) витримувати ці навантаження без руйнації.

Завдяки описаному вище пристрою з'явилася можливість напрацювання різних радіонуклідів після опромінювання мішеней інтенсивним внутрішнім пучком протонів циклотрона У-240.

Автори висловлюють подяку всьому колективу циклотрона У-240 за співпрацю та створення належних умов при виконанні даної роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Б.А. Прмантаева и др. Разработка технологии эффективного производства изотопа  $^{22}\text{Na}$ . *Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева* 6 (2011) 86.
2. Yu.I. Vereshchagin, V.A. Zagryadskiy, V.N. Prusakov. Cyclotron  $^{82}\text{Sr}$  production for medical applications. *Nucl. Instr. Meth. A* 334 (1993) 246.
3. Л.В. Михайлов та ін. Опромінювальна установка для напрацювання ізотопів  $^{82}\text{Sr}$  на ізохронному циклотроні У-240. *Ядерна фізика та енергетика* 17(4) (2016) 425.
4. П.П. Дмитриев. Выход радионуклидов в реакциях с протонами, дейтронами, альфа-частицами и гелием-3. Справочник (Москва: Энергоатомиздат, 1986) с. 52.
5. Г.К. Харченко и др. Диффузионная сварка в вакууме хрома с медью. *Автоматическая сварка* 7 (2002) 41.

L. V. Mykhailov<sup>1,\*</sup>, M. V. Makovsky<sup>1</sup>, A. I. Piskarev<sup>1</sup>, V. M. Shevel<sup>1</sup>,  
Yu. V. Falchenko<sup>2</sup>, L. V. Petrushynets<sup>2</sup>, V. E. Fedorchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> E. O. Paton Electric Welding Institute, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

\*Corresponding author: leomix@kinr.kiev.ua

**PRODUCTION OF  $^{22}\text{Na}$  ISOTOPE USING A DEVICE DESIGNED TO IRRADIATE  
A TARGET WITH THE INTERNAL PROTON BEAM OF THE U-240 CYCLOTRON**

An installation for obtaining isotopes using the intense internal beam of protons on the U-240 cyclotron has been developed. A target was designed to produce the  $^{22}\text{Na}$  isotope under difficult conditions of thermal and radiation loads in a limited space of the cyclotron accelerator chamber. Radiochemical isolation of the  $^{22}\text{Na}$  isotope was carried out.

*Keywords:* radionuclide, protons, target, irradiation, half-life period, gamma-ray energy, diffusion welding and radiation chemistry methods.

REFERENCES

1. B.A. Prmantayeva et al. Development of technology for efficient production of  $^{22}\text{Na}$  isotope. *Vestnik Yevraziyskogo Natsionalnogo Universiteta imeni L. N. Gumileva* 6 (2011) 86. (Rus)
2. Yu.I. Vereshchagin, V.A. Zagryadskiy, V.N. Prusakov. Cyclotron  $^{82}\text{Sr}$  production for medical applications. *Nucl. Instr. Meth. A* 334 (1993) 246.
3. L.V. Mikhailov et al. Irradiation facility for production of  $^{82}\text{Sr}$  isotope on isochronous cyclotron U-240. *Nucl. Phys. At. Energy* 17(4) (2016) 425. (Ukr)
4. P.P. Dmitriev. Radionuclide yields in reactions with protons, deuterons, alpha particles and helium-3. Reference book (Moskva: Energoatomizdat, 1986) p. 52. (Rus)
5. G.K. Kharchenko et al. Vacuum diffusion bonding of chromium to copper. *Avtomaticeskaya Svarka* 7 (2002) 41. (Rus)

Надійшла/Received 11.09.2023