

Л. В. Михайлов, А. І. Устінов, Л. Г. Макаренко, А. І. Піскар'єв, О. М. Ковальов

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ***ОПРОМІНЮВАЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ НАПРАЦЮВАННЯ ІЗОТОПІВ  $^{82}\text{Sr}$  НА ІЗОХРОННОМУ ЦИКЛОТРОНІ У-240**

Проведено дослідження для отримання ізотопів  $^{82}\text{Sr}$  при опроміненні мішеней внутрішнім пучком протонів циклотрона У-240. Створено установку, яка забезпечує тривале опромінення мішені  $\text{RbCl}$  внутрішнім пучком протонів з інтенсивністю до 150 мкА і енергією не менше 70 МеВ для отримання ізотопів  $^{82}\text{Sr}$ .

*Ключові слова:*  $^{82}\text{Sr}$ , мішень, циклотрон У-240, пучок протонів.

**Вступ**

Ізохронний циклотрон У-240 – базова установка Інституту ядерних досліджень НАН України і єдиний в Україні багатоцільовий прискорювач в області середніх енергій, який перекриває необхідний діапазон енергій для здійснення напрацювання практично всіх циклотронних радіонуклідів, які широко застосовуються в ядерній медицині. Розглядається можливість напрацювання  $^{82}\text{Sr}$  на внутрішньому пучку протонів використовуючи мішень, що обертається.

Зараз у медицині широко застосовується діагностичний метод позитронної томографії з використанням  $^{82}\text{Sr}$ .  $^{82}\text{Sr}$  з періодом піврозпаду 25,55 д (д - доба) використовують для виготовлення генераторів короткоживучого  $^{82}\text{Rb}$ , який застосовується при кардіологічних та онкологічних дослідженнях із використанням позитронно-емісійної томографії (ПЕТ). Короткоживучий  $^{82}\text{Rb}$  з періодом піврозпаду 75 с як позитронний емітер при використанні має мале радіаційне дозове навантаження на пацієнта.

**Вибір конструкції мішені**

Після виготовлення, монтажу та налагодження всіх систем, а також виготовлення мішеней були проведені експериментальні опромінення мішеней сіллю  $\text{RbCl}$  протонами з енергією 72 МеВ. У цих експериментах конструкція мішені здійснювала охолодження мішені водою тільки з боку підкладки. Результати експериментів показали, що навіть при струмах пучка протонів близько 30 мкА зняття тепла з опромінювальної поверхні мішені недостатнє, металева фольга прогорає і сіль випаровується. Такий результат пояснюється дуже поганою теплопровідністю ( $\sim 0,5$  Вт/м · град) солі  $\text{RbCl}$  у мішені. Для порівняння – теплопровідність міді дорівнює 413 Вт/м · град при 200 °С. Виходячи з експериментальних результатів, були зроблені два основні висновки: 1) необхідне двостороннє охоло-

дження оболонки водою, в якій знаходиться сіль  $\text{RbCl}$ ; 2) для зменшення питомого тепловиділення потрібно збільшити опромінювальну площу.

Другу вимогу задовольняє мішень, що обертається, при використанні якої питоме тепловиділення зменшується на порядок, а двостороннє охолодження повинна забезпечити конструкція мішені. Для одержання  $^{82}\text{Sr}$  на ізохронному циклотроні У-240 було розроблено установку з мішенню, що обертається.

Мішень, що обертається, має цілий ряд переваг у порівнянні з нерухомою мішенню. Опромінювальна поверхня суттєво збільшується (у 10÷15 разів) і тим самим значно зменшує питоме тепловиділення, час перебування окремих ділянок корпусу мішені під дією потужного протонного пучка скорочується (швидкість обертання мішені в нашій установці 40 об/хв), що зменшує ймовірність радіаційного руйнування корпусу. Усі ці фактори дають можливість опромінювати мішень прямим пучком, уникаючи втрат у стінках корпусу мішені.

Характеристики нової опромінювальної установки та конструкція мішені, що обертається, повинні забезпечити тривале опромінення мішені (до 7 д) пучком протонів з інтенсивністю до 150 мкА та енергією не менше 70 МеВ.

Найважливішою властивістю кінцевого продукту є його ізотопна чистота. Основними забруднювачами є радіоізотопи  $^{83}\text{Sr}$  з періодом піврозпаду 1,35 д і  $^{85}\text{Sr}$  з періодом піврозпаду 64,84 д. На рис. 1 (зі статей [1, 2]) для порівняння показано функції збудження  $^{82}\text{Sr}$  і забруднюючих ізотопів  $^{83}\text{Sr}$  і  $^{85}\text{Sr}$ .

Пік для  $^{82}\text{Sr}$  спостерігається в діапазоні енергій від 44 до 70 МеВ. У цьому енергетичному діапазоні також суттєвим є напрацювання  $^{83}\text{Sr}$ . Однак (через малий період піврозпаду радіонукліда  $^{83}\text{Sr}$ ) це не є серйозною проблемою, тому що протягом 10 - 15 д після закінчення опромінення активність  $^{83}\text{Sr}$  стає дуже малою. З рисунка видно, що функція збудження для  $^{85}\text{Sr}$  різко

© Л. В. Михайлов, А. І. Устінов, Л. Г. Макаренко, А. І. Піскар'єв, О. М. Ковальов, 2016

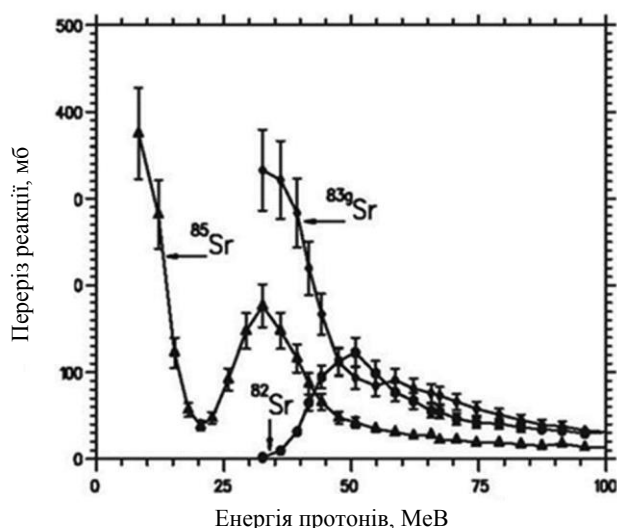


Рис. 1. Функції збудження для реакцій утворення  $^{82}\text{Sr}$ ,  $^{83}\text{Sr}$  і  $^{85}\text{Sr}$  [1, 2].

починає падати при енергії протонів більше 44 MeV. У роботі [2] наведено результати детальних вимірювань функції збудження інтегрального виходу цього нукліда при опроміненні протонами мішені  $\text{natRbCl}$ . Використовуючи відмінності в значеннях енергій для максимальних перерізів реакцій утворення всіх ізоотопів стронцію та часу періоду піврозпаду, діапазон втрат енергії протонів у матеріалі мішені повинен становити 44–75 MeV. Відповідно до цих енергетичних втрат у роботі [2] визначено необхідні параметри мішені. Для інтервалу енергії від  $E_{\text{min}} = 44$  MeV до  $E_{\text{max}} = 75$  MeV товщина мішені  $\text{RbCl}$  14,2 мм. Отримані розрахунки втрат енергії протонів при проходженні через мішень 14,2 мм, що охолоджується водою з усіх боків, повністю відповідають результатам, отриманим у роботі [3] при опроміненні мішені  $\text{RbCl}$  виведеним пучком протонів відповідної енергії Лос-Аламоського циклотрона США.

Для мішені, що обертається, та на яку пучок падає перпендикулярно, товщина прошарку солі в мішені повинна бути 14 мм. Загальна маса солі в мішені приблизно 70 г. Корпус мішені виготовлено з нержавіючої сталі. Направлення падіння пучка радіальне, тому радіальний розмір кільця солі вибрали з розрахунку, що втрати енергії протонів у солі матимуть місце до величини енергії 40–43 MeV.

У нашому випадку цей розмір 14 мм. Зовнішні стінки мішені, що містять сіль, мають товщину 0,5 мм. Висота осевого кільця визначається розміром пучка протонів у зоні опромінення. Принципова схема мішені, що обертається, схематично не відрізняється від мішені, наведеної на рис. 1 у статті [4]. Сконструйований дослідний зразок мішені, що обертається, показано на

рис. 2. Усі деталі мішені виготовлено з нержавіючої сталі. Деталі мішені зварені між собою електронно-променевим зварюванням. Вода, що охолоджує мішень, надходить через внутрішню трубку, потім омиває з усіх боків внутрішній корпус, капсули із сіллю і витікає у шток мішеневого пристрою. Герметичність з'єднання мішені на штоці забезпечується гумовими ущільненнями. Мета дослідження – забезпечити температурний режим, при якому максимальна температура шару солі  $\text{RbCl}$  у мішені не перевищує 700 °C. Заданий температурний режим здійснюється за допомогою зміни частоти обертання мішені (до 40 об/хв) та витратою охолоджувальної води до 60 л/хв, температура охолоджуваної води не повинна перевищувати 80 °C. Температура води на вході до мішені 20 °C.



Рис. 2. Дослідний зразок мішені, що обертається.

### Конструкція опромінювальної установки

Для опромінення мішені, що обертається, внутрішнім пучком протонів була створена опромінювальна установка для напрацювання ізоотопів  $^{82}\text{Sr}$ . Опромінювальна установка складається з декількох функціональних частин:

механічної частини, яка забезпечує кріплення мішені в мішеневому пристрої, доставку мішені в зону опромінення всередині прискорювальної камери, обертання мішені під час опромінення, повернення мішені в початковий стан після опромінення та скидання мішені до контейнера;

системи водоохолодження, яка забезпечує подачу води, контроль тиску та температури;

системи вакуумної відкачки шлюзу;

системи управління, яка включає засоби діагностики (вимірювання положення мішені, стру-

му поглиненого мішенню пучка, вакууму в шлюзі, температури охолоджуючої води на вході в систему охолодження, витрати води), засоби управління технологічними системами (водяні та повітряні електроклапани, електромагнітні натікачі, засувки та ін.), пристрої захисту та блокування. Для віддаленого моніторингу та управління виконуючими механізмами установки була розроблена програма "SIR" (SetupIRradiation).

Механічна частина установки складається з рельсового шляху, візка для переміщення мішені, систем обертання та знімання мішені. З камерою циклотрона опромінювальна установка з'єднується шлюзом та шибром. Мішень укріплюється на штоці, який може переміщатися вздовж радіуса циклотрона та обертати мішень усередині камери. На візку встановлено кілька окремих кінематичних систем, кожна зі своїм

електродвигуном. Перша система переміщує візок із початкового положення в положення, при якому мішень опиняється в шлюзі, та після опромінення повертається в початкове положення. Друга система доставляє мішень зі шлюзу до камери прискорювача на радіус опромінення та після опромінення повертає мішень до шлюзу. Третя система забезпечує обертання мішені в прискорювальній камері протягом усього процесу опромінення. Для контролю за положенням мішені, відносно центру циклотрона, на візку встановлено датчик положення – енкодер. Швидкість обертання мішені вимірюється розробленим індукційним тахометром. У випадку зупинки мішені, що обертається, під час опромінення датчик обертання повинен практично миттєво передати сигнал системі блокування для виключення пучка, щоб запобігти прогорянню мішені. На рис. 3 показано опромінювальну установку.



Рис. 3. Загальний вигляд опромінювальної установки.

Для того щоб тепло ефективно знімалося потоком води, необхідно, щоб потік води вздовж поверхні мав турбулентний характер. Був зроблений розрахунок параметрів струму води, який необхідний для охолодження. У результаті розрахунків були сформульовані вимоги до параметрів системи водоохолодження та розроблена відповідна автономна система водоохолодження з підвищеним тиском охолоджувальної води. Система водяного охолодження установки з мішенню, що обертається, повинна забезпечити достатнє охолодження опромінювальної мішені. Проведені розрахунки теплообміну в мішені показали, що для забезпечення необхідного зняття тепла потрібно забезпечити великі витрати води більше 60 л/хв. Установка складається з двох магістралей подачі води на мішень для охолодження, магістралі притоку та відтоку води після охолодження опромінювальної мішені, а

також системи подачі повітря для продувки води після закінчення опромінювання мішені. Обидві магістралі мають датчики контролю параметрів протікання води.

Автономна вакуумна система повинна забезпечити форвакуумне відкачування шлюзу. Система включає форвакуумний насос, електромагнітний вакуумний клапан, натікачі повітря та власну систему вимірювань.

Оскільки циклотронна зала є радіаційно-небезпечним приміщенням, то управління всіма виконавчими механізмами, двигунами, приладами вимірювання і контроль усіма параметрами повинні бути дистанційними. Була вибрана загальна схема управління: для налагодження та перевірки обладнання був створений місцевий пульт управління в циклотронній залі; для управління та контролю процесу опромінення створена комп'ютерна система з основним ком-

п'ютером, розташованим у пультовій циклотрона. Комп'ютер головного пульта оператора по каналу мережі Ezernet з'єднаний з промисловим контролером місцевого пульта управління (МПУ) в магнітній залі. Контролер включає в себе об'єднану плату для установки модулів уводу-виводу, яка закріплена на DIN і рейку в МПУ.

Програма "SIR" (SetupIRradiation) 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.

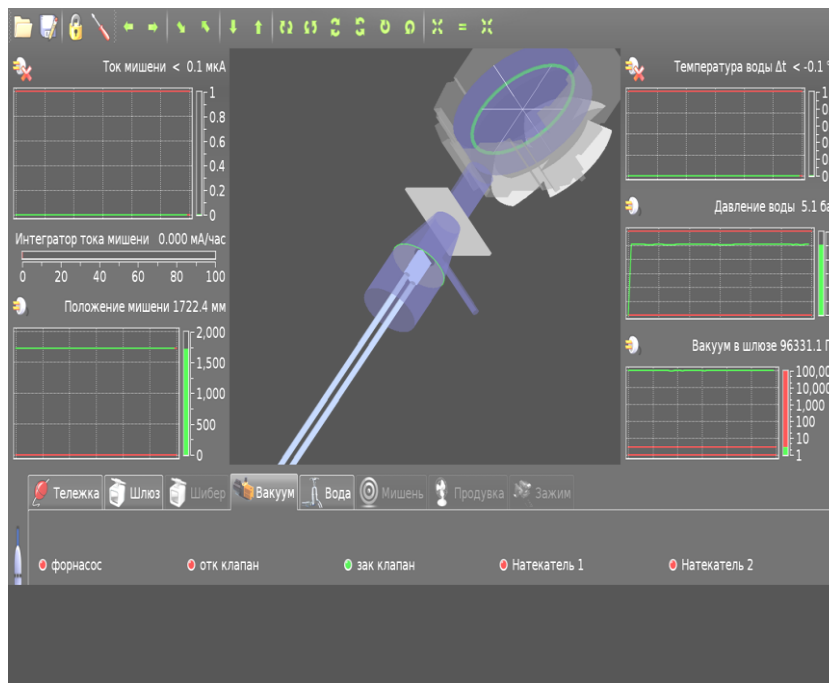


Рис. 4. Головне вікно локального інтерфейсу програми "SIR".

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. 4. У 1992 р. на внутрішньому пучку протонів з енергією 70 МеВ та струмом 75 мкА на циклотроні У-240, згідно з робочим журналом, було опромінено зроблену в НДЦ «Курчатовський інститут» експериментальну мішень, що обертається [4]. Опромінення здійснювалось протягом 35 год. Через 10 д після закінчення опромінення радіохімічним методом було зроблено виділення  $^{82}\text{Sr}$  з мішені. Вимірювана активність радіонуклідів стронцію та рубідію, отримана після поділу іонного обміну, виявилась кращою за стандартну чистоту радіонуклідів  $^{82}\text{Sr}$ . Цей експеримент показав можливість напрацю-

вання на внутрішньому пучку протонів циклотрона У-240 радіонуклідів  $^{82}\text{Sr}$  для одержання радіофармпрепаратів.

### Висновки

Враховуючи технічні характеристики циклотрона У-240, можливо отримувати різні радіонукліди, проте враховуючи енергетичний діапазон циклотрона У-240 та потреби ядерної медицини, найбільш оптимально отримувати на внутрішньому пучку протонів радіонукліди  $^{82}\text{Sr}$ . Тому було створено опромінювальну установку з мішенню, що обертається, яка забезпечує тривале опромінення мішені  $\text{RbCl}$  внутрішнім пучком протонів з інтенсивністю до 150 мкА та енергією не менше 70 МеВ. Установка дозволяє напрацювання радіонуклідів  $^{82}\text{Sr}$  на внутрішньому пучку протонів ізохронного циклотрона У-240.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Buthlezi E.Z., Nortier F.M., Schroeder I.W.* Excitation functions for the production of  $^{82}\text{Sr}$  by proton bombardment of  $^{nat}\text{Rb}$  at energies up to 100 MeV // *Appl. Radiat. Isot.* - 2006. - Vol. 64. - P. 915.
2. *Вальков А.Е., Михайлов Л.В.* Определение оптимальных параметров протонного пучка при производстве изотопа  $^{82}\text{Sr}$  на циклотроне У-240 // *Ядерная физика та энергетика.* - 2014. - Т. 15, № 3. - С. 312 - 314.
3. *Fassbender M.E., Phillips D.R., Nortier F.M. et al.* Radionuclide inventory management at the new 100 MeV isotope production facility at LANL // *Nuclear*

- Instruments and Methods in Physics Research. - 2013. - Vol. B299. - P. 32.
4. Zagryadskiy V.A., Prusakov V.N. Cyclotron  $^{82}\text{Sr}$  Production for Medical Purposes // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1993. - Vol. A334. - P. 246.

**Л. В. Михайлов, А. И. Устинов, Л. Г. Макаренко, А. И. Пискарев, А. М. Ковалев**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

**ОБЛУЧАТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ НАРАБОТКИ ИЗОТОПОВ  $^{82}\text{Sr}$   
НА ИЗОХРОННОМ ЦИКЛОТРОНЕ У-240**

Проведены исследования, которые позволяют получать изотопы  $^{82}\text{Sr}$  при облучении мишеней с RbCl внутренним пучком протонов на циклотроне У-240. Создана установка, обеспечивающая длительное облучение мишени RbCl внутренним пучком протонов с интенсивностью до 150 мкА и энергией не менее 70 МэВ.

*Ключевые слова:*  $^{82}\text{Sr}$ , мишень, циклотрон У-240, пучок протонов.

**L. V. Mikhailov, A. I. Ustinov, L. G. Makarenko, A. I. Piskarev, O. M. Kovalev**

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv*

**IRRADIATION FACILITY FOR PRODUCTION OF  $^{82}\text{Sr}$  ISOTOPES  
ON ISOCHRONOUS CYCLOTRON U-240**

Investigations allowing obtaining of  $^{82}\text{Sr}$  isotopes upon irradiation of target RbCl by internal proton beam in the cyclotron U-240 were performed. The facility, providing long exposure of the target RbCl upon internal proton beam with the intensity of 150 mA and with energy not less than 70 MeV, was constructed.

*Keywords:*  $^{82}\text{Sr}$ , target, cyclotron U-240, proton beam.

REFERENCES

1. Buthelezi E.Z., Nortier F.M., Schroeder I.W. Excitation functions for the production of  $^{82}\text{Sr}$  by proton bombardment of  $^{nat}\text{Rb}$  at energies up to 100 MeV // Appl. Radiat. Isot. - 2006. - Vol. 64. - P. 915.
2. Val'kov A.E., Mikhailov L.V. // Jaderna fizyka ta energetyka (Nucl. Phys. At. Energy). - 2014. - Vol. 15, No. 3. - P. 312 - 314. (Rus)
3. Fassbender M.E., Phillips D.R., Nortier F.M. et al. Radionuclide inventory management at the new 100 MeV isotope production facility at LANL // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 2013. - Vol. B299. - P. 32.
4. Zagryadskiy V.A., Prusakov V.N. Cyclotron  $^{82}\text{Sr}$  Production for Medical Purposes // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. - 1993. - Vol. A334. - P. 246.

Надійшла 12.10.2016

Received 12.10.2016