

**В. К. Басенко<sup>1</sup>, І. М. Каденко<sup>1\*</sup>, М. Ф. Коломієць<sup>2</sup>, Г. І. Применко<sup>1</sup>,  
Ю. О. Седов<sup>1</sup>, В. К. Тараканов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

\*Відповідальний автор: imkadenko@univ.kiev.ua

### МІШЕНЬ ІЗ ВУГЛЕЦЮ ЯК ДЖЕРЕЛО НЕЙТРОНІВ ІЗ РЕАКЦІЙ $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ ТА $D(d, n)^3\text{He}$

Досліджено можливість використання вуглецю як матеріалу мішеней для генерації швидких нейтронів із реакції  $D(d, n)^3\text{He}$  та нейтронів проміжних енергій з реакції  $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ . У проведених експериментах було отримано результати, що характеризують абсорбцію дейтерія при набиванні вуглецевої мішені пучком прискорених іонів та десорбцію дейтерія з тієї ж мішені в залежності від її температури. Бомбардування вуглецевої мішені дейтронами з енергією 400 кеВ при струмі пучка дейтронів  $\sim 1$  мА призводило до ядерної реакції  $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ , що дає змогу генерувати нейтрони з енергіями в діапазоні (10...100) кеВ та зі щільністю потоку нейтронів біля мішені  $10^6 \div 10^7$  нейтрон/(см<sup>2</sup>·с).

*Ключові слова:* вуглецева мішень, генерація нейтронів, десорбція дейтерію.

#### Вступ

Джерело нейтронів – це високотехнологічна установка з унікальними фізичними та інженерними характеристиками, що відкриває широкі можливості вивільнення ядерної енергії та вивчення твердотільних структур, зміни елементного складу речовин тощо. З метою покращення вихідних характеристик низьковольтних прискорювачів як джерел швидких нейтронів та розширення діапазону енергій нейтронів, що генеруються, запропоновано та досліджено можливість використання мішені з вуглецю. Така мішень дає змогу за певних умов одержувати як швидкі нейтрони з енергією (2,5...15) Мев за рахунок сорбованих у матеріалі мішені важких ізотопів гідрогену – дейтерію або тритію, так і нейтрони проміжних енергій у діапазоні (10...160) кеВ із реакції  $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ , причому останні можуть бути використаними не лише в ядерно-фізичних дослідженнях, але і для формування пучків нейтронів зі швидкостями відповідно до розподілу Максвелла - Больцмана. Такі нейтронні пучки з відповідними розподілами є необхідними як для уточнення запропонованих сценаріїв нуклеосинтезу, так і для цілей нейтрон-поглинальної терапії.

#### Мішень з вуглецю – джерело нейтронів

Найбільш часто використаними в низьковольтних генераторах нейтронів є екзотермічні ядерні реакції прискорених іонів дейтерію з важкими ізотопами гідрогену – дейтерієм ( $D(d, n)^3\text{He}$ , DD-реакція) або тритієм ( $T(d, n)^4\text{He}$ , DT-реакція), що є сорбованими в металі-сорбенті (наприклад, титан, цирконій). На вихід нейтронів із мішені ( $\Phi$ ), що бомбардується

пучком прискорених до певної енергії іонів дейтерію, впливають два фактори, що пов'язані з мішенню: розподіл концентрації атомів сорбованих важких ізотопів гідрогену та довжина пробігу прискорених дейтронів у матеріалі мішені:

$$\Phi = \frac{I_d}{e} \int_0^R \sigma[E(x)] C_H(x) dx, \quad (1)$$

де  $I_d$  – сила струму пучка іонів дейтерію;  $e$  – заряд електрона;  $C_H(x)$  – функція розподілу концентрації важких ізотопів гідрогену по товщині активного шару мішені;  $\sigma[E(x)]$  – переріз DD(DT)-реакції як функція енергії дейтронів, що залежить від глибини проникнення дейтрона до активного шару мішені;  $R$  – довжина пробігу дейтронів у речовині мішені.

Звичайний коефіцієнт насичення ізотопами гідрогену матеріалу титану  $\sim 1,5$ , цирконію  $\sim 1,7$ . Насичення матеріалу мішені ізотопами гідрогену може відбуватися двома основними шляхами: насичення в атмосфері відповідного ізотопу гідрогену (оклюдовані мішені) або при набиванні мішені пучком прискорених дейтронів (набивні мішені). Кожен із цих способів має свої вади і переваги. Так, наприклад, зазвичай для оклюдованих мішеней коефіцієнт насичення є більшим і розподіл концентрації гідрогену в сорбенті наближається до рівномірного, проте час їхньої служби є відносно невеликим. У набивних мішенях час служби мішені визначається лише її фізичною стійкістю, проте коефіцієнт насичення мішені атомами гідрогену є зазвичай нижчим, ніж в оклюдованих мішеней. Залежність концентрації дейтерію по товщині мішені має максимум біля довжини пробігу дейтронів у матеріалі мішені, але, у загальному випадку, розподіл  $C_H(x)$  є невідомим.

© В. К. Басенко, І. М. Каденко, М. Ф. Коломієць,  
Г. І. Применко, Ю. О. Седов, В. К. Тараканов, 2018

Отже, як видно з формули (1), для зростання виходу нейтронів при заданій енергії прискорених дейтронів необхідно збільшити довжину пробігу дейтронів у мішені та максимально насичити матеріал мішені важкими ізотопами гідрогену. Менші енергетичні втрати і, відповідно, більший пробіг іони дейтерію мають у мішенях на основі матеріалів з невеликим зарядом ядра  $Z$ , тому елементи, масово легші за стандартні сорбенти – титан та цирконій, – і ті, що мають більше сорбованого гідрогену на одиницю маси сорбенту, представляються перспективними як основа матеріалів для виготовлення сорбенту і, відповідно, мішеней для одержання нейтронів у реакціях синтезу. Одним з таких матеріалів може бути вуглець [1].

### Експерименти з набивною мішенню з вуглецю

На нейтронному генераторі НГ-300/15 кафедри ядерної фізики Київського національного університету імені Тараса Шевченка (КНУ) нами було проведено дослідження вуглецевої набивної мішені, виготовленої з реакторного графіту. Мішень у вигляді пластинки товщиною близько 1 мм було наклеєно на підкладку з міді 45 мм, яка зі зворотного боку охолоджувалась проточною водою. Детектором нейтронів слугувала камера поділу НГД-4, розташована у сповільнювачі з органічного скла та попередньо відкалібрована з використанням методу радіоактивних індикаторів. При цьому як активаційні детектори використовувались тонкі фольги з натурального індію.

Перший експеримент полягав у вимірюванні виходу нейтронів з  $DD$ -реакції при пошаровому набиванні мішені. Як згадано вище, розподіл концентрації дейтерію при набиванні має максимум у довжині пробігу іонів з певною енергією, коли енергія дейтронів падаючого пучка після гальмування в матеріалі мішені є вже близькою до нуля і переріз  $DD$ -реакції стає малим. Цим експериментом ми мали на меті наситити дейтерієм шар мішені від її поверхні до глибини, що приблизно дорівнює довжині пробігу дейтронів з робочою (більшою) енергією. При цьому дейтрони пучка мають ще значну енергію, тож переріз реакції має бути прийнятним.

Мішень з вуглецю бомбардувалась пучком дейтронів з енергією (100÷150) кеВ, струм пучка був ~ 400 мкА. Потік дейтронів на мішень (струм пучка) вимірювався із застосуванням інтегратора струму, похибка вимірювання якого в діапазоні (10÷2000) мкА становила ~2,5 %. Фон нейтронів в експериментальній залі, що виникає внаслідок потрапляння пучка дейтронів на елементи кон-

струкції прискорювача, вимірювався в експериментах, коли мішенню слугував сталевий фланець. Із попередніх експериментів [2] було відомо, що при бомбардуванні дейтронами мішеней зі сталі або ковару вихід нейтронів є малим, тож його внеском до кількості нейтронів, що реєструються, можна знехтувати при аналізі результатів вимірювань. Інтенсивність фонових нейтронів може змінюватися залежно від робочої напруги прискорювача та умов фокусування пучка і при енергії дейтронів (200÷225) кеВ, за яких проводилися дослідження, становила  $(1\div1,5) \cdot 10^3$  нейтрон/мкКл. Сумарний заряд для набивання мішені для кожної енергії прискорених дейтронів становив ~1 Кл. Після завершення набивання протягом 100 с вимірювався вихід нейтронів при енергії пучка дейтронів 225 кеВ.

### Вихід нейтронів з $DD$ -реакції для енергії дейтронів 225 кеВ при пошаровому набиванні мішені дейтронами різних енергій

Енергія дейтронів при набиванні, кеВ	Вихід нейтронів, $10^5$ /мкКл
100	$2,31 \pm 0,16$
125	$2,66 \pm 0,24$
150	$3,8 \pm 0,3$

Після набивання мішені дейтронами в діапазоні енергій (100÷150) кеВ мішень бомбардувалась пучком дейтронів з енергією 75 кеВ при струмі пучка 320 мкА. Вимірний вихід нейтронів при енергії 225 кеВ був  $(4,3 \pm 0,4) \cdot 10^5$  нейтрон/мкКл, тобто у 1,14 раза більшим за попередній.

Вихід нейтронів із вуглецевої мішені також порівнювався з виходом нейтронів зі стандартної оклюдованої дейтерій-титанової мішені за тих самих параметрів прискорювача. Потік нейтронів з  $DD$ -реакції на вуглецевій мішені, набитої іонами дейтерію у діапазоні енергій (100÷150) кеВ, був у 1,5 рази меншим від потоку зі стандартної мішені. Зважаючи на те, що майже половина активного шару вуглецевої мішені, що відповідає пробігам дейтронів з енергіями (0...75) кеВ, не була заповненою дейтерієм, а саме ця частина шару є найбільш активною, при рівномірному заповненні всього активного шару вихід нейтронів може бути збільшеним у порівнянні зі стандартною дейтерій-титановою мішенню. Перевагою може бути також більш стабільний у часі вихід нейтронів із вуглецевої мішені порівняно зі стандартною. Експерименти проводились із використанням  $DD$ -реакції, проте результати можуть бути поширеними і на  $DT$ -реакцію, оскільки з точки зору сорбції дейтерію та тритію матеріали мішені поводять себе однаково.

У рамках другого експерименту було досліджено десорбцію ізотопів гідрогену із графітової мішені залежно від її температури. Цей експеримент проводився для того, щоб установити межі температурного режиму мішені при її використанні для генерації  $DD$ -нейтронів, а також умови для практичного виключення їхньої генерації при використанні реакції  $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$  для одержання нейтронів з енергією (10÷100) кеВ. Тому мішень із вуглецю набивалась іонами дейтерію з енергією 210 кеВ протягом 2 год, струм пучка при цьому становив 240 мкА. Далі мішень знімалася з генератора нейтронів та прогрівалась протягом 2 год у муфельній печі в умовах сталої температури, після чого знову встановлювалася до мішенного вузла генератора нейтронів, після чого вимірювався вихід нейтронів з  $DD$ -реакції при енергії пучка дейтронів 210 кеВ та струмі пучка ~200 мкА. При макротемпературі мішені, нижчої за 100 °С, зменшення концентрації дейтерію практично не спостерігалось.

*Результати дослідження десорбції дейтерію з вуглецевої мішені залежно від її температури*

Температура, °С	Вихід нейтронів, 10 <sup>3</sup> /мкКл
Перед нагріванням (до 20 °С)	58,1 ± 1,1
150	6,4 ± 0,5
200	3,8 ± 0,4
250	Фон
300	Фон

Як видно, при нагріванні до температури 150 °С вихід нейтронів зменшується на порядок і є практично відсутнім при температурі мішені, вищій за 250 °С. Відзначимо, що мішень із вуглецю може слугувати не тільки як джерело швидких моноенергетичних нейтронів із реакцій синтезу  $D(d,n)^3\text{He}$  та  $T(d,n)^4\text{He}$ , але й бути джерелом проміжних нейтронів в області (10...100) кеВ. Ідея використання мішені з вуглецю як джерела проміжних нейтронів полягає у використанні ендотермічної реакції  $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$ , що має поріг реакції 328 кеВ. Опромінюючи мішень із вуглецю дейтронами з енергією, більшою за поріг реакції, можна генерувати нейтрони в певному діапазоні енергій. Подібним чином в ядерній фізиці вико-

ристовується реакція  $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$ , але вона має високе значення порога реакції (1882 кеВ) і дає змогу генерувати нейтрони в передній напівсфері з енергіями, вищими за 30 кеВ [3], тоді як для реакції  $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$  мінімальне значення енергії нейтронів із даної реакції є 3,5 кеВ. Величини перерізів реакції  $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$  від порогових значень до 6 МеВ наведено в роботах [4 - 6]. Ясно, що для зменшення інтенсивності генерації нейтронів з  $DD$ -реакції мішень має підтримуватись та працювати за температури декілька сотень градусів (див. вищенаведені результати). Це означає, що мішень може бомбардуватись пучком дейтронів великої потужності, охолоджуючись, в основному, шляхом теплового випромінювання, не потребуючи складної системи охолодження робочої зони мішені (температура плавлення графіту становить близько 3600 °С). Оцінки показують, що інтегральний потік нейтронів у діапазоні проміжних енергій (20÷50) кеВ на один міліампер струму пучка іонів може становити не менше  $(1,5\div 2) \cdot 10^6$  нейтрон/с.

## Висновки

У роботі продемонстровано можливість використання вуглецю як сорбенту ізотопів гідрогену для виготовлення мішеней для генерації потоків нейтронів в ядерних реакціях синтезу  $D(d,n)^3\text{He}$  та  $T(d,n)^4\text{He}$ . Проведено експериментальні дослідження виходу  $DD$ -нейтронів за різних умов набивання мішені іонами дейтерію та вивчено температурну залежність десорбції ізотопів гідрогену з вуглецевої мішені. Показано, що за певних умов мішені з вуглецю можуть бути не гіршими, ніж стандартні на основі сорбенту – титану.

Також оцінено можливий внесок нейтронів з  $DD$ -реакції від набивання карбону дейтерієм та шляхи його зменшення при використанні ендотермічної реакції  $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$  для генерації нейтронів з енергією (10 - 100) кеВ на перспективній установці, що розробляється на кафедрі ядерної фізики фізичного факультету КНУ. Створено макет такого джерела нейтронів та підготовлено фізичний проект.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. В.И. Трефилов и др. *Фуллерены – основа материалов будущего* (К.: АДЕФ-Украина, 2001) 174 с.
2. В.К. Басенко и др. Динамика набивания дейтерием материалов подложек нейтронных мишеней. В кн.: *Материалы IV Всесоюз. совещ. по метрологии нейтронного излучения* (Москва, 1985) с. 76.
3. Н.А. Власов. *Нейтроны* (Москва: Наука, 1971) 522 с.
4. I.Ya. Barit, L.E. Kuzmin, A.M. Kazantsev. Determination of carbon in thin layers by means of the  $^{12}\text{C}(d,n)^{13}\text{N}$  nuclear reaction using a 2 MeV Van de Graaf accelerator. *Journal of Radioanalytical and*

- [Nuclear Chemistry 97 \(1986\) 97.](#)
- J.G. Brennan, J.J. Coyne. Energy Dependence of the D-D Reaction Cross Section at Low Energies. [Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry A 68\(6\) \(1964\) 675.](#)
  - R.W. Michelmann, J. Krauskopf, J.D. Meyer, K. Bethge. Excitation functions for the reactions  $^{10}\text{B}(d, n)^{11}\text{C}$  and  $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$  for charged particle activation analysis. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 51 \(1990\) 1.](#)

**В. К. Басенко<sup>1</sup>, И. Н. Каденко<sup>1\*</sup>, Н. Ф. Коломиец<sup>2</sup>, Г. И. Применко<sup>1</sup>,  
Ю. А. Седов<sup>1</sup>, В. К. Тараканов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, Украина*

<sup>2</sup> *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

\*Ответственный автор: imkadenko@univ.kiev.ua

### МИШЕНЬ ИЗ УГЛЕРОДА КАК ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ИЗ $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ И $D(d, n)^3\text{He}$ РЕАКЦИЙ

Исследовалась возможность использования углерода как материала мишеней для генерации быстрых нейтронов из реакции  $D(d, n)^3\text{He}$ . В проведенных экспериментах были получены результаты, которые характеризуют абсорбцию дейтерия при набивании углеродной мишени пучком ускоренных ионов и десорбцию дейтерия из той же мишени в зависимости от ее температуры. Облучение углеродной мишени дейтронами с энергией 400 кэВ при токе пучка дейтронов ~1 мА приводит к ядерной реакции  $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$  с возможностью генерации нейтронов с энергией (10÷100) кэВ с плотностью потока нейтронов около мишени ( $10^6 - 10^7$ ) нейтрон/(см<sup>2</sup>·с).

*Ключевые слова:* углеродная мишень, генерация нейтронов, десорбция дейтерия.

**V. K. Basenko<sup>1</sup>, I. M. Kadenko<sup>1\*</sup>, M. F. Kolomiets<sup>2</sup>, G. I. Primenko<sup>1</sup>,  
Yu. A. Sedov<sup>1</sup>, V. K. Tarakanov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine*

<sup>2</sup> *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: imkadenko@univ.kiev.ua

### CARBON TARGET AS NEUTRON SOURCE FROM $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ AND $D(d, n)^3\text{He}$ REACTIONS

Possibility to use carbon as a target material to generate fast neutrons from  $D(d, n)^3\text{He}$  nuclear reaction and intermediate energy neutrons from  $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$  nuclear reaction was studied. The experiment results were obtained to characterize an adsorption of the deuterium while stuffing the carbon target by beam of accelerated ions and a desorption of the deuterium from the same carbon target as the function of its temperature. Bombardment of carbon target with 400 keV deuteron beam of 1 mA current leads to the  $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$  nuclear reaction, allowing to generate neutrons of (10 ÷100) keV energy range with neutron flux density ( $10^6 - 10^7$ ) n/(cm<sup>2</sup>·s) near the carbon target.

*Keywords:* carbon target, neutron generation, deuterium desorption.

#### REFERENCES

- V.I. Trefilov et al. *Fullerenes - the Basis of Future Materials* (Kyiv: ADEF-Ukraine, 2001) 174 p. (Rus)
- V.K. Basenko et al. Dynamics of the deuterium stuffing of the materials of neutron target substrates. In: Proc. of the IV All-Union meeting on metrology of neutron radiation (Moskva, 1985) p. 76. (Rus)
- N.A. Vlasov. *Neutrons* (Moskva: Nauka, 1971) 522 p. (Rus)
- I.Ya. Barit, L.E. Kuzmin, A.M. Kazantsev. Determination of carbon in thin layers by means of the  $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$  nuclear reaction using a 2 MeV Van de Graaf accelerator. [Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 97 \(1986\) 97.](#)
- J.G. Brennan, J.J. Coyne. Energy Dependence of the D-D Reaction Cross Section at Low Energies. [Journal of Research of the National Bureau of Standards-A. Physics and Chemistry A 68\(6\) \(1964\) 675.](#)
- R.W. Michelmann, J. Krauskopf, J.D. Meyer, K. Bethge. Excitation functions for the reactions  $^{10}\text{B}(d, n)^{11}\text{C}$  and  $^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$  for charged particle activation analysis. [Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 51 \(1990\) 1.](#)

Надійшла 28.12.2017

Received 28.12.2017