

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-1-55-62>

УДК 621.039.8

IAEA МЕДИЦИНАЛЫҚ ИЗОТОПТАРЫНЫҢ БРАУЗЕРІН ЙОД-123 ӨНДІРІСІН МОДЕЛЬДЕУ ҮШІН ПАЙДАЛАҢУ

С. Н. Мукашева*, Д. А. Мыңжасарова

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

*Байланыс үшін E-mail: snmukasheva@gmail.com

Бұл жұмыста Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттіктің медициналық изотоптар браузерін пайдалана отырып, медициналық изотоп өндірісін модельдеу нәтижелері келтірілген. Медициналық изотоптарды өндіруге арналған Web-қосымшасы пайдаланушының деректері негізінде ядролық реакция бойынша қажетті деректерді алуға мүмкіндік береді: нысаналық радионуклид, сәулелендіру бөлшегі немесе сәулелендіру сәулесі, энергия диапазоны, сәулелендіру және салқындату уақыты. Йод-123 изотопын теллур-124-тен алуды модельдеу негізінде кестелік мәндер және ядролық реакцияның көлденең қимасының суреттелген графиктері алынды; изотоптың ыдырау өнімдері ұсынылған. Модельдеу нәтижелерінде гамма-сәуле шығаратын йод-123 радионуклиді үшін берілген ядролық реакция бойынша IAEA ұсынған деректермен салыстыру жүргізілді. Гамма сәулелендіруші радионуклидиод-123 бір фотонды эмиссиялық компьютерлік томографияны жүргізу үшін ең ыңғайлы радионуклидтердің бірі болып табылады. Эксперименттік әдістер болмаған кезде компьютерлік модельдеудің заманауи технологиялары сол саладағы мамандарға проблемаларды шешу үшін әлемдік ғылым мен халықаралық мәліметтер базасының жетістіктерін пайдалануға мүмкіндік береді, бұл жағдайда медициналық изотоптар шығаруда қолдануға болады. Йод-123 өндірісін модельдеу тәсілдерін басқа медициналық изотоптарды алу үшін қолдану ұсынылады.

Түйін сөздер: йод-123, ядролық медицина, медициналық изотоп, көлденең қима, модельдеу.

КІРІСПЕ

Қазіргі заманда медициналық қызмет көрсету үшін радиациялық сәулелер мен радионуклидтерді қолдануға негізделген жоғары технологиялық әдістер қолданылады. Ядролық медицина әдістерін қолдану көптеген аурулардың алдын алудың, диагностикалаудың және емдеудің жаңа, тиімдірек әдістерінің пайда болуына ықпал етеді. Ядролық медицинада альфа, бета, гамма сәулелер шығаратын радионуклидтер көптеген арнайы медициналық зерттеулерде, диагностика және терапияда – жеке мүшелерді визуализациялауда қолданылады [1–4]. Бір фотонды эмиссиялық компьютерлік томографияны жүргізуге арналған ең ыңғайлы радионуклидтердің бірі 1969 жылдан бастап ядролық медицинада қолданылатын гамма-сәуле шығаратын радионуклид йод-123 болып саналады. Йод-123-те 83,4% жоғары өнімділігі бар 159 кэВ γ -сәулелену энергиясы салыстырмалы түрде аз және жартылай ыдырау периоды 13,31 сағ. сондай-ақ, йод-123 спектрде β -сәулеленудің болмауына байланысты йод-131-ге қарағанда қалқанша безді аз дәрежеде зақымдайтыны белгілі, нәтижесінде пациентке тіндердің дозалық жүктемесі де төмендейді. Судағы йод-123 γ -кванттарының жартылай сіңіру қабатының қалыңдығы 4,7 см құрайды, бұл радиометриялық өлшеулер жүргізуге мүмкіндік беретін дене тіндерінде сәулеленудің жақсы енуін қамтамасыз етеді [5–8].

Йод-123 радионуклидін тікелей ^{124}Te және сирек ^{122}Te немесе ^{123}Te нысандарын қолдану арқылы төмен энергиялы жоғары тоқты протон үдеткіштерінде алынады. Бұл ретте ^{123}I -тің радионуклидтік таза-

лығы~96%- дан аспайды, негізгі ластану ^{124}I ($T_{1/2} = 4,1$ сут, $E_{\gamma} = 603$ кэВ) береді. Алайда, жоғары байытылған нысандық материалдың қымбаттығына байланысты генераторлық әдісті ^{123}Xe ыдырау негізінде ^{123}I пайда болатын реакцияларда қолдану қолайлы. ^{123}I радионуклидінің жаппай өндірісі үшін кіші және орта өлшемдегі циклотрондарда жоғары байытылған ^{124}Xe -ті энергиясы 30 МэВ дейінгі протондарының нитенсивті сәулелерімен сәулелену әдісі ұсынылады: ($^{124}\text{Xe}\{(p,2n) + (p,pn)\}$). Генераторлық (жанама) әдістің артықшылығы алынған ^{123}I -тің жеткілікті жоғары радионуклидтік тазалыққа ие болуында ($\geq 99,5\%$; $^{125}\text{I} \leq 0,2\%$). Осының арқасында генераторлық препараттар ^{123}I қалқанша безінің ауруларын диагностикалауға ғана емес, сонымен қатар әртүрлі органдардың ауруларын диагностикалауда кеңінен қолдануға қолайлы [5, 9]. ^{124}Xe -тен жоғары таза ^{123}I алу үшін тағы бір әдіс мүмкін, атап айтқанда $^{124}\text{Xe}(\gamma, n)^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$ фотоядролық реакциясы. Бұл әдістің салыстырмалы түрде төмен өнімділігіне қарамастан, сызықтық электронды үдеткіштер пайдалану қымбатқа шығатын протондық циклотрондарымен бәсекелесе алады және жеке клиникалар мен аймақтардың қажеттіліктерін қамтамасыз ете алады [5, 9–10].

IAEA (International Atomic Energy Agency) ұйымдастырған зерттеу жобасы шеңберінде бірқатар ядролық реакцияларға зерттеулер жүргізілді, нәтижесінде диагностикалық гамма-сәуле шығаратын радионуклидтер пайда болады. Қозу функциялары түріндегі ядролық реакциялардың көлденең қимасының ұсынылған деректері, сондай-ақ олардың ауытқулары-

ның сандық бағалаулары алынды. Барлық бағаланған сандық нәтижелер мен оларға сәйкес ауытқулар онлайн режимінде www-nds.iaea.org/medical/gamma-emitters.html сайтында, сондай-ақ Атом энергиясы жөніндегі халықаралық агенттіктің/Ядролық деректер секциясының (IAEA-NDS) медициналық порталында www-nds.iaea.org/medportal қол жетімді [12].

Бұл жұмыста біз йод-123 изотопын алу үшін IAEA ұсынған ядролық реакциялар туралы мәліметтерді, сондай-ақ медициналық изотоптар браузерін пайдалана отырып, йод-123 медициналық изотопын өндіруді модельдеу нәтижелерін ұсынамыз (<https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html>).

ӘДІСТЕР

Бұл жұмыста радиофармацевтикалық зерттеулер мен өнеркәсіпте іргелі ядролық деректерді тікелей пайдалануға арналған IAEA медициналық изотоптарының браузері пайдаланылады [12–13]. Пайдаланушы деректеріне негізделген медициналық изотоптарды өндіруге арналған Web-қосымшасы www-nds.iaea.org/mib сілтемесі арқылы қол жетімді [14]. Йод-123 алудың әртүрлі ядролық реакциялары үшін біз Web-қосымшаның пайдаланушылары ретінде келесі деректерді көрсетеміз:

- нысандық радионуклид (target);
- сәулелендіру бөлшегі немесе сәулелендіру сәулесі (projectile);
- энергия диапазоны;
- сәулелену және салқындату уақыты.

Браузердің бағдарламалық жасақтамасы қажетті изотопты алу нәтижелерін көрнекі және анық түрде бірден шығарады, біздің жағдайда йод-123 изотопы, сондай-ақ қажетсіз жанама өнімдер бойынша алынған мәліметтер негізінде осы изотоптың өндірістік процесінің орындылығы туралы ұсыныстар дайындауға болады.

Браузердің бағдарламалық жасақтамасына енгізілген ядролық реакция нәтижесінде радиоактивті ядроның шығуын есептеу үшін формализмді қысқаша сипаттайық. Изотоптарды өндіруге арналған аналитикалық формулалар [13] келтірілген. Бұл жүйеде нақты жуықталулар қолданылады және олардың негізінде барлық кез-келген жағдайларға негізделген ең қарапайым теңдеулер алынады:

– біріншіден, сәулеленудің басында тек бір табиғи элементті қамтитын нысанды сәулелендірудің қарапайым жағдайы қарастырылады;

– таргеттік изотоп радиоактивті емес;

– пайда болған нуклидтер кос сәулеленуге ұшырамайды деп болжанады (сәулелену кезінде нысанның құрамы өзгермейді деп болжауға болады);

– тек негізгі күйге немесе изомерге дейінгі бета-ыдырау ескеріледі, альфа-ыдырау қарастырылмайды;

– протондардың бірнеше рет сәулеленуі нәтижесінде пайда болатын арналарда радиоактивті ыдырау ескерілмейді.

НӘТИЖЕЛЕР ЖӘНЕ ТАЛҚЫЛАУ

Йод-123 алынуын ядролық реакция арқылы модельдейміз:



Бұл үдетілген протондардың әсерінен байытылған теллур изотоптық нысандардан йод-123 алудың тікелей ядролық реакциясы. Мұндай реакциялар үшін орташа және төмен қуатты циклотрондарды қолдануға болады [15, 16].

Біз IAEA медициналық изотоптарының браузерін, Web-қосымшаны <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html> қолданамыз [14], Web-сайт парағының көрінісі 1-суретте көрсетілген.

Үдетілген протондардың әсерінен теллур-124 нысанынан йод-123 алу үшін берілген модельдік параметрлері төменде келтірілген:

- энергия (Incident energy) реттік 30,000 → 29,728 МэВ;
- максималды сәулелендіру уақыты (Maximal irradiation time): 1 күн;
- салқындату уақыты (Cooling time): 1 күн;
- ток күші (Beam current): 0,025 мА;
- материалдың тығыздығы (Target material density): 6,240 г/см³;
- облыс (Target area): 1,000 см²;
- нысанның эффективті қалыңдығы (Effective target thickness): 0,277 см;
- эффективті толық көлем (Effective target volume): 0,277 см³;
- нысанның эффективті массасы (Effective target mass): 1,731 г;

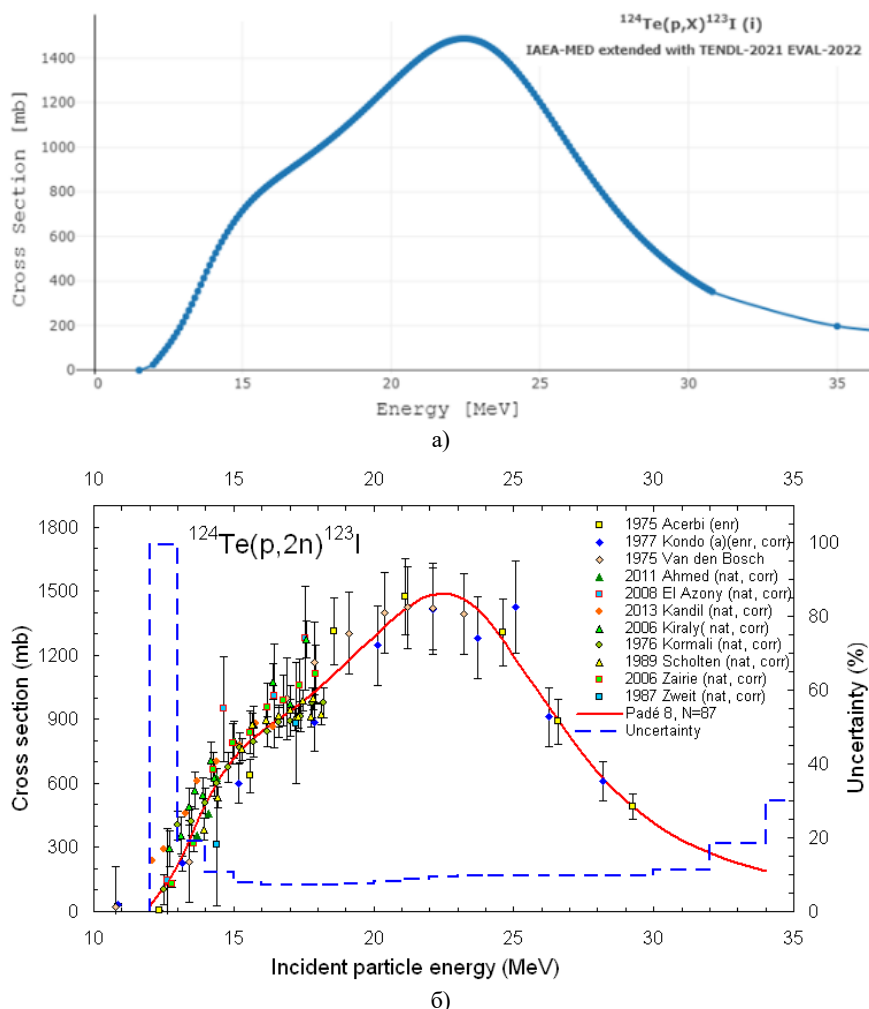
1-сурет. Пайдаланушы деректері негізінде медициналық изотоптарды өндіруге арналған IAEA медициналық изотоптары браузерінің web-парақшасының көрінісі

- нысандық атомдар саны (Number of target atoms): $8,40528 \cdot 10^{21}$;
- түсетін бөлшектердің саны (Number of incident particles): $1,56038 \cdot 10^{14} \text{ c}^{-1}$;
- нысанда бөлінетін жылу (Produced heat in target): 0,750 кВт.

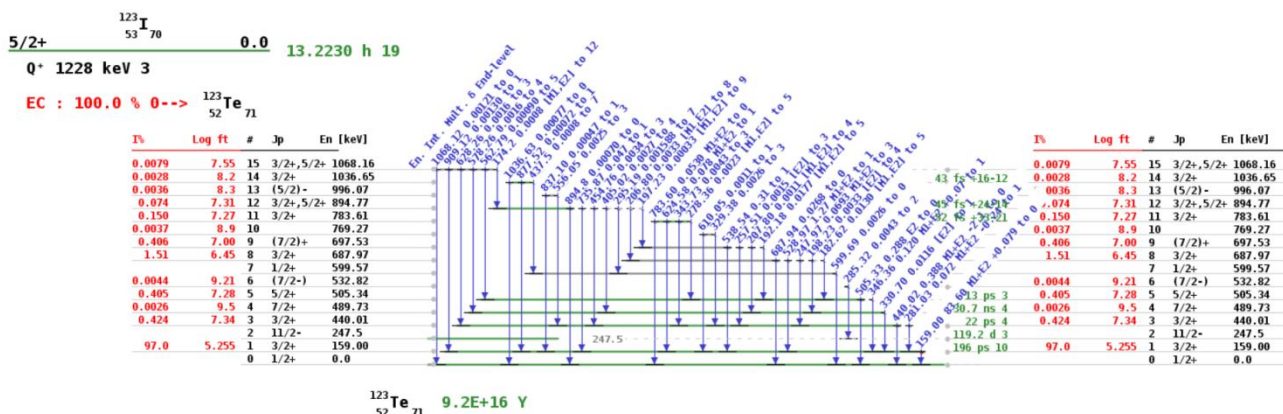
2-суретте IAEA жобасы шеңберінде алынған (а) модельдік және эксперименттік (б), реакция (1) бойынша теллурдан йод-123 алудың ядролық реакциясының көлденең қималар көрсетілген. Йод-123 ұсынылған көлденең қимасын алу үшін 12 жұмыста (2-суреттегі (б) қызыл сызық) 35 МэВ дейін түсетін бөлшектердің энергиялары үшін эксперименттік көлденең қима деректері қарастырылды [17–28]. Негұрлым дәйекті жиынтықты алу үшін негізінен байытылған нысандарында өлшенген көлденең қималардың мәндеріне сүйену туралы шешім қабылданды Acerbietal. (1975) [17], және табиғи нысандарда зерттеу Kandiletal. (2013) [24], Kiralyetal. (2006) [25]. 2-суреттегі (б) сол жақтағы ось ұсынылған қызыл сызыққа қатысты % ауытқуды көрсетеді. Қалған 11 деректер жиынтығы Pade-дің ең кіші квадраттарына

сәйкес келетін кіріс ретінде қарастырылды. 8 параметрі бар Pade функциялары $\chi^2=1,29$ таңдалған 87 деректер нүктесіне сәйкес келді және 28 МэВ-қа дейінгі энергия диапазонын қамтыды. Көрсетілген ауытқулар (4% жүйелі ауытқуларды қоса алғанда) реакция табалдырығына жақын 50%-дан асады, 13 МэВ-тен 25 МэВ-қа дейін 10%-дан төменге дейін тұрақты төмендейді, ал жоғары энергияларда қайтадан 40%-ға дейін артады [11].

2-суреттен (а) көріп отырғаныңыздай, йод-123 көлденең қимасының модельдік мәндері сандық мәндер бойынша 2-суреттегі (б) ұсынылған қызыл сызықпен сәйкес келеді, өйткені модельденген көлденең қима мәндерінің сенімділігі IAEA медициналық изотоптар кітапханасының дәлелденген реакция арналарымен толықтырылған TENDLтолық деректер кітапханасының арқасында анықталады. Медициналық изотоптарды өндіруге арналған Web-қосымша-сымен кез-келген изотоп өндірісін болжау үшін қолдана аламыз: ол кеңінен қолданылады және сапалық негізгі деңгейінде мұқият тексерілген. Модельдеу кезінде кестелік мәндерге де қол жетімді.

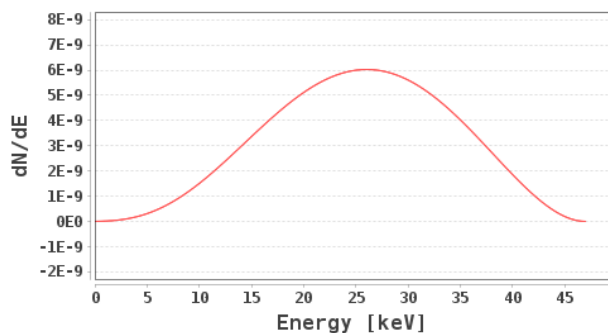


2-сурет. Модельдік (а) <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html> және эксперименттік (б) <https://www-nds.iaea.org/medical/te4p23i0.html>, IAEA жобасы шеңберінде алынған

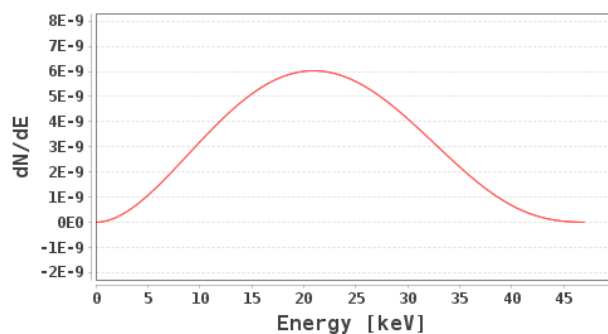


3-сурет. Йод-123 изотопының ыдырауының суреттелген көрінісі <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html>

Бұдан әрі веб-портал йод-123 радионуклид туралы иллюстрацияланған ақпарат береді, жартылай ыдырау периоды 13,2235 сағ көрсетіледі, одан соң гамма сәуле шығарумен жүретін 100% изотоп ядролық ыдырау нәтижесінде теллур-123 түзіледі, негізгі гамма энергиясы 158,97 кэВ (83,3%), 3-сурет.



а)



б)

4-сурет. Бета-спектр (а) мен нейтрино спектрінің (б) графикалық көрінісі

Сондай-ақ, көптеген ғылыми мәселелер үшін ыдырау бөлшектерінің спектрлері туралы түсінік болуы керек, бұл қарастырылып отырған жағдайда позитрон мен нейтриноның бөлінуімен жүретін бета-ыдырау. Модельдеу бета-спектр мен нейтрино спектрінің сандық және графикалық бейнелерін алуға мүмкіндік береді (4-сурет). Біздің жағдайда β^+ ыдырауы позитрон мен нейтрино пайда болған кезде

жүреді. 4-суреттен бета-плюс ыдырау спектрі мен нейтрино спектрі осы процесте энергия мен импульстің сақталу заңдарымен өзара байланысты. Ыдырау кезінде бөлінетін энергия позитрон мен нейтрино арасында бөлінеді. Бета плюс спектр графигі әртүрлі позитрондық энергиялардың ықтималдығын, ал нейтрино спектрінің графигі сәйкес нейтринолар үшін энергияның таралуын көрсетеді. Берілген бета ыдырауының энергетикалық сипаттамаларын зерттеу үшін спектрді де пайдалануға болады.

ҚОРЫТЫНДЫ

Радионуклидтік терапия көптеген жылдар бойы бүкіл әлемде онкологиялық аурулармен күресудің өзекті бағыттарының бірі болып табылады, ал Қазақстан Республикасы үшін бұл әдісті қолдану ерекше маңызды, өйткені бұл әдісті қолдану онкологиялық ауруларды емдеудің клиникалық практикасына енді ғана еніп жатқан себепті де маңызды болып табылады. Радионуклидті терапияның ерекшелігі жоғары спецификалық және тиімді әсер етуінде және жанама жағымсыз әсерлері минималды деңгейде. Кейбір жағдайларда радионуклидтік терапияның баламасы жоқ [29–30].

Қазіргі уақытта Қазақстан Республикасында ядролық медицинаның 7 орталығы мен бөлімшелері жұмыс істейді, олардың тек біреуінде ғана қалқанша безінің қатерлі ісігін емдеуде радионуклидті терапия қолданылады. Алматыда: Қазақ онкология және радиология ғылыми-зерттеу институты, кардиология және ішкі аурулар ғылыми-зерттеу институты, «Орхунмедикал» ЖШС, «Сұңқар» АҚ, «МедИнвестГрупп Қазақстан» ЖШС; Астана қаласында: Республикалық диагностикалық орталық, Президент Әкімшілігінің медициналық орталығының ауруханасы және Семей ядролық медицина және онкология орталығында [29–30].

Бұл жұмыста біз медициналық изотоптар браузерін қолдана отырып, йод-123 медициналық изотопының өндірісін модельдеу нәтижелерін ұсындық (<https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html>). Біз бұл браузердің мүмкіндіктерін көрсеттік және алынған нәтижелерді әдеби дереккөз-

дермен салыстырдык. Йод-123 изотопы бір фотонды эмиссиялық компьютерлік томографияны жүргізу үшін ең қолайлы радионуклидтердің бірі болып саналады. Сондай-ақ, судағы йод-123 γ -кванттарының жартылай сіңіру қабатының қалыңдығы 4,7 см болатыны белгілі, бұл радиометриялық өлшеулер жүргізуге мүмкіндік беретін дене тіндерінде жақсы сәулелену қабілетін қамтамасыз етеді.

Дамыған интернет ресурстардың заманауи мүмкіндіктері, атап айтқанда, ядролық медицина саласындағы ғалымдардың әлемдік қауымдастығы әзірлеген Web-қосымшалар радиофармацевтикалық зерттеулер мен өнеркәсіпте іргелі ядролық деректерді тікелей пайдалану үшін бірегей мүмкіндік береді.

Йод-123 өндірісін модельдеу тәсілдерін басқа медициналық изотоптарды алу үшін де қолдануға болады, ғылыми қызметкерлер мен мамандарға, сондай-ақ ядролық физика және ядролық медицина саласындағы дипломдық жұмыстарды жазуға ұсынылады.

Бұл жұмыс магистрлік диссертация аясында, 7М05311 Ядролық медицина білім беру бағдарламасы бойынша, әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, физика-техникалық факультеті, теориялық және ядролық физика кафедрасында орындалды.

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

1. Яверт Н. Излучения и радионуклиды в медицине // Бюллетень МАГАТЭ. –2014. – № 55-4. – С. 5–8. URL: www.iaea.org/bulletin
2. Мадсен М. А. Ясное представление о медицинской визуализации // Бюллетень МАГАТЭ. –2014. – № 55-4. – С. 14-15. URL: www.iaea.org/bulletin
3. Шаназаров Н.А., НалгиеваФ.Х. Основы лучевой терапии: Учеб. Пособие – Нур-Султан, 2021. –100 с.
4. Бажукова И. Н., Бажуков С. И., Баранова А. А. Технологии ядерной медицины: учеб. пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 104 с.
5. Дмитриев С.Н., Зайцева Н.Г. Радионуклиды для биомедицинских исследований. Ядерные данные и методы получения на ускорителях заряженных частиц // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 1996. – Т. 27. – Вып. 4. – С. 977–1042.
6. Кодина Г. Е. Химическая технология радиофармацевтических препаратов: учебное пособие / Г. Е. Кодина, М. А. Богородская. – М.: ФГУ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России, 2010. – С. 468–470.
7. Семенов А.С., Скуридин В.С., Головков В.М., Большаков А.М., Гарапацкий А.А., Слепченко Г.Б., Ильина Е.А., Нестеров А.А. Радиофармацевтические препараты на основе радионуклидов йода // Известия ВУЗов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 11/3. – С. 194–201.
8. Семенов А. С. Разработка методов получения радиофармацевтических лекарственных препаратов на основе ^{123}I для медицинской диагностики: дис. ... канд. техн. наук: 2.6.8 / Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск, 2022. – 165 с. URL: <https://www.dissercat.com/content/razrabotka-metodov-polucheniya-radiofarmatsetvicheskikh-lekarstvennykh-preparatov-na-osnove>
9. Вережкин А.А., Стервеедов Н.Г., Ковтун Г.П. Получение и применение короткоживущих и ультракороткоживущих изотопов в медицине // Вестник Харьковско-го университета. – 2006. –Т. 746, Вып. 4(32). – С. 54–64.
10. Кодина Г.Е., Красикова Р.Н. Методы получения радиофармацевтических препаратов и радионуклидных генераторов для ядерной медицины: учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 282 с.
11. Tarkanyi F. T. et al. Recommended nuclear data for medical radioisotope production: diagnostic gamma emitters // J. Radioanal. Nucl. Chem. –2019. –Vol. 319. – P. 487–531. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6142-4>
12. Medical Isotope Browser IAEA: Gamma Emitters. URL: https://www-nds.iaea.org/medical/gamma_emitters.html
13. Koning A. ISOTOPIA-1.0 Simulation of medical isotope production with accelerators. Manual of the software for simulation of medical isotope production with accelerators that runs the server side of the Medical Isotope Browser. – 2019. – 59 p. URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.pdf>
14. Medical Isotope Browser IAEA Nuclear Data Section. URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html> (дата обращения 2024-01-09).
15. Scholten B., QaimS.M., Stocklin G.J. Production of ^{123}I at a low-energy Cyclotron // Labell. Compounds and Radiopharm. – 1989. – No. 26. – P. 175–176.
16. Silvester D.J., Sugden J., Walson I.A. Preparation of Iodine-123 by Natural Antimony // Radiochem. Radioanal. Letters. – 1969. – Vol. 2. – No. 1. – P. 17–20.
17. Acerbi E., C. Birattari, M. Castiglioni, F. Resmini, VillaM. EXFOR A0266: Production of ^{123}I for medical purposes at the Milan AVF cyclotron // Int. J. Appl. Radiat. Isot. –1975. – Vol. 26.–P. 741–747.
18. Kondo K., Lambrecht R. M., Wolf A. P. EXFOR B0090: ^{123}I production for radiopharmaceuticals–XX: Excitation functions of the $^{124}\text{Te}(p,2n)^{123}\text{I}$ and $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ reactions and the effect of target enrichment on radionuclidic purity // Int. J. Appl. Radiat. Isot. – 1977. – Vol. 28. –P. 395–401.
19. Scholten B., Kovacs Z., Tarkanyi F. T., Qaim S. M. EXFOR D4019: Excitation functions of $^{124}\text{Te}(p,xn)^{123,124}\text{I}$ reactions from 6 to 31 MeV with special reference to the production of ^{124}I at a small cyclotron // App. Radiat. Isot. – 1995.– Vol. 46. – P. 255–259.
20. Van Den Bosch R., De Goeij J. J. M., Van Der Heide J. A., Tertoolen J. F. W., Theelen H. M. J., Zegers C. EXFOR B0167: A new approach to target chemistry for the iodine-123 production via the $\text{Te}(p,2n)$ reaction // Int. J. App. Radiat. Isot. – 1977.– Vol. 28. –P. 255–261.
21. Zweit J., Bakir M. A., Ott R. J., Sharma H. L., Cox M., Goodall R. EXFOR O1260: Excitation functions of proton induced reactions in natural tellurium-production of no-carrier added iodine-124 for PET-applications // 4th Int. Workshop on Targetry, Villigen, Switzerland. – 1991. – Vol.76. – P. 74.
22. Ahmed M., Hassan H. E., Hassan K. F., Khalaf A. M., Saleh Z. A. EXFOR D0647: Cross sections for the formation of radioiodine in proton bombardment of natural tellurium with particular reference to the validation of data for the production of ^{123}I //Radioch. Acta. – 2011. – Vol. 99. – P. 317–323.

23. El-Azony K. M., Suzuki K., Fukumura T., Szelecsenyi F., Kovacs Z. EXFOR D0502: Proton induced reactions on natural tellurium up to 63 MeV: Data validation and investigation of possibility of ^{124}I production // *Radioch. Acta.* – 2008. – Vol. 96. – P. 763–769.
 24. Kandil S. A and Al-Abyad M. EXFOR D0707: Cross section measurements and theoretical calculations of proton induced nuclear reactions on natural tellurium // *Radioch. Acta.* – 2013. – Vol. 101. – P. 67–72.
 25. Kiraly B., Tarkanyi F. T., Takacs S., Kovacs Z. EXFOR D4177: Excitation functions of proton induced nuclear reactions on natural tellurium up to 18 MeV for validation of isotopic cross sections // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2006. – Vol. 270. – P. 369–378.
 26. Scholten B., Qaim S. M., Stocklin G., EXFOR A0473: Excitation functions of proton induced nuclear reactions on natural tellurium and enriched ^{123}Te : Production of ^{123}I via the $^{123}\text{Te}(p,n)^{123}\text{I}$ -process at a low-energy cyclotron // *Int. J. Radiat. Appl. Instrum., Part A, Appl. Radiat. Isotop.* – 1989. – Vol. 40. – P. 127–132.
 27. Zarie K., Hammad N. A., Azzam A., EXFOR O1736: Excitation functions of (p,xn) reactions on natural tellurium at low energy cyclotron: relevance to the production of medical radioisotope I-123 // *J. Nucl. Radiat. Phys.* – 2006. – Vol. 1. – P. 93.
 28. Kormali S. M., Swindle D. L., Schweikert E. A., EXFOR D4073: Charged particle activation of medium Z elements. II. Proton excitation functions // *J. Radioanal. Chem.* – 1976. – Vol. 31. – P. 437–450.
 29. Гурина А. Н., Чакурова Е. Т., Медведева З. В., Солонинкина С. Г. Перспективы развития ядерной медицины в Республике Казахстан: реакторные изотопы редкоземельных элементов для терапии // *Вестник НЯЦ РК.* – 2022. – № 2. – С. 46–52. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-46-52>
 30. Тажединов И., Аманкулов Ж. М., Жалмукаш У. К., Хусаин Ш. К., Хан О. Г. Некоторые перспективные радионуклиды в ядерной медицине Казахстана // *Вестник НЯЦ РК.* – 2018. – № 1. – С. 31–35. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2018-1-31-35>
- ## REFERENCES
1. Yavert N. Izlucheniya i radionuklidy v meditsine // *Byulleten' MAGATE.* – 2014. – No. 55-4. – P. 5–8. URL: www.iaea.org/bulletin
 2. Madsen M. A. Yasnoe predstavlenie o meditsinskoj vizualizatsii // *Byulleten' MAGATE.* – 2014. – No. 55-4. – P. 14-15. URL: www.iaea.org/bulletin
 3. Shanazarov N. A., Nalgieva F. Kh. Osnovy luchevoj terapii: Ucheb. Posobie – Nur-Sultan, 2021. – 100 p.
 4. Bazhukova I. N., Bazhukov S. I., Baranova A. A. Tekhnologii yadernoy meditsiny: ucheb. posobie. – Ekaterinburg: Izd-vo Ural. un-ta, 2022. – 104 p.
 5. Dmitriev S. N., Zaytseva N. G. Radionuklidy dlya biomeditsinskikh issledovaniy. Yadernye dannye i metody polucheniya na uskoritelyakh zaryazhennykh chastits // *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra.* – 1996. – Vol. 27. – Issue 4. – P. 977–1042.
 6. Kodina G. E. Khimicheskaya tekhnologiya radiofarmatsevticheskikh preparatov: uchebnoe posobie / G. E. Kodina, M. A. Bogorodskaya. – M.: FGU FMBTs im. A. I. Burnazyana FMBA Rossii, 2010. – P. 468–470.
 7. Semenov A. S., Skuridin V. S., Golovkov V. M., Bol'shakov A. M., Garapatskiy A. A., Slepchenko G. B., Il'ina E. A., Nesterov A. A. Radiofarmatsevticheskie preparaty na osnove radionuklidov yoda // *Izvestiya VUZov. Fizika.* – 2013. – Vol. 56. – No. 11/3. – P. 194–201.
 8. Semenov A. S. Razrabotka metodov polucheniya radiofarmatsevticheskikh lekarstvennykh preparatov na osnove ^{123}I dlya meditsinskoy diagnostiki: dis. ... kand. tekhn. nauk: 2.6.8 / Natsional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politekhnicheskii universitet. – Tomsk, 2022. – 165 p. URL: <https://www.disscat.com/content/razrabotka-metodov-polucheniya-radiofarmatsevticheskikh-lekarstvennykh-preparatov-na-osnove>
 9. Verevkin A. A., Stervovodov N. G., Kovtun G. P. Poluchenie i primenenie korotkozhivushchikh i ul'trakorotkozhivushchikh izotopov v meditsine // *Vestnik Khar'kovskogo universiteta.* – 2006. – Vol. 746, Issue. 4(32). – P. 54–64.
 10. Kodina G. E., Krasikova R. N. Metody polucheniya radiofarmatsevticheskikh preparatov i radionuklidnykh generatov dlya yadernoy meditsiny: uchebnoe posobie dlya vuzov. – Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2014. – 282 p.
 11. Tarkanyi F. T. et al. Recommended nuclear data for medical radioisotope production: diagnostic gamma emitters // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2019. – Vol. 319. – P. 487–531. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6142-4>
 12. Medical Isotope Browser IAEA: Gamma Emitters. URL: https://www.nds.iaea.org/medical/gamma_emitters.html
 13. Koning A. ISOTOPIA-1.0 Simulation of medical isotope production with accelerators. Manual of the software for simulation of medical isotope production with accelerators that runs the server side of the Medical Isotope Browser. – 2019. – 59 p. URL: <https://www.nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.pdf>
 14. Medical Isotope Browser IAEA Nuclear Data Section. URL: <https://www.nds.iaea.org/relnsd/isotopia/isotopia.html> (data obrashcheniya 2024-01-09).
 15. Scholten B., Qaim S. M., Stocklin G. J. Production of ^{123}I at a low-energy Cyclotron // *Labell. Compounds and Radiopharm.* – 1989. – No. 26. – P. 175–176.
 16. Silvester D. J., Sugden J., Walson I. A. Preparation of Iodine-123 by Natural Antimony // *Radiochem. Radioanal. Letters.* – 1969. – Vol. 2. – No. 1. – P. 17–20.
 17. Acerbi E., C. Birattari, M. Castiglioni, F. Resmini, Villa M. EXFOR A0266: Production of ^{123}I for medical purposes at the Milan AVF cyclotron // *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* – 1975. – Vol. 26. – P. 741–747.
 18. Kondo K., Lambrecht R. M., Wolf A. P. EXFOR B0090: ^{123}I production for radiopharmaceuticals–XX: Excitation functions of the $^{124}\text{Te}(p,2n)^{123}\text{I}$ and $^{124}\text{Te}(p,n)^{124}\text{I}$ reactions and the effect of target enrichment on radionuclidic purity // *Int. J. Appl. Radiat. Isot.* – 1977. – Vol. 28. – P. 395–401.
 19. Scholten B., Kovacs Z., Tarkanyi F. T., Qaim S. M. EXFOR D4019: Excitation functions of $^{124}\text{Te}(p,xn)^{123,124}\text{I}$ reactions from 6 to 31 MeV with special reference to the production of ^{124}I at a small cyclotron // *App. Radiat. Isot.* – 1995. – Vol. 46. – P. 255–259.
 20. Van Den Bosch R., De Goeij J. J. M., Van Der Heide J. A., Tertoolen J. F. W., Theelen H. M. J., Zegers C. EXFOR B0167: A new approach to target chemistry for the iodine-123 production via the $\text{Te}(p,2n)$ reaction // *Int. J. App. Radiat. Isot.* – 1977. – Vol. 28. – P. 255–261.
 21. Zweit J., Bakir M. A., Ott R. J., Sharma H. L., Cox M., Goodall R. EXFOR O1260: Excitation functions of proton

- induced reactions in natural tellurium-production of no-carrier added iodine-124 for PET-applications // 4th Int. Workshop on Targetry, Villigen, Switzerland. – 1991. – Vol. 76. – P. 74.
22. Ahmed M., Hassan H. E., Hassan K. F., Khalaf A. M., Saleh Z. A. EXFOR D0647: Cross sections for the formation of radioiodine in proton bombardment of natural tellurium with particular reference to the validation of data for the production of ^{123}I // *Radioch. Acta.* – 2011. – Vol. 99 – P. 317–323.
23. El-Azony K. M., Suzuki K., Fukumura T., Szelecsenyi F., Kovacs Z. EXFOR D0502: Proton induced reactions on natural tellurium up to 63 MeV: Data validation and investigation of possibility of ^{124}I production // *Radioch. Acta.* – 2008. – Vol. 96. – P. 763–769.
24. Kandil S. A and Al-Abyad M. EXFOR D0707: Cross section measurements and theoretical calculations of proton induced nuclear reactions on natural tellurium // *Radioch. Acta.* – 2013. – Vol. 101. – P. 67–72.
25. Kiraly B., Tarkanyi F. T., Takacs S., Kovacs Z. EXFOR D4177: Excitation functions of proton induced nuclear reactions on natural tellurium up to 18 MeV for validation of isotopic cross sections // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2006. – Vol. 270. – P. 369–378.
26. Scholten B., Qaim S. M., Stocklin G., EXFOR A0473: Excitation functions of proton induced nuclear reactions on natural tellurium and enriched ^{123}Te : Production of ^{123}I via the $^{123}\text{Te}(p,n)^{123}\text{I}$ -process at a low-energy cyclotron // *Int. J. Radiat. Appl. Instrum., Part A, Appl. Radiat. Isotop.* – 1989. – Vol. 40. – P. 127–132.
27. Zarie K., Hammad N. A., Azzam A., EXFOR O1736: Excitation functions of (p,xn) reactions on natural tellurium at low energy cyclotron: relevance to the production of medical radioisotope I-123 // *J. Nucl. Radiat. Phys.* – 2006. – Vol. 1. – P. 93.
28. Kormali S. M., Swindle D. L., Schweikert E. A., EXFOR D4073: Charged particle activation of medium Z elements. II. Proton excitation functions // *J. Radioanal. Chem.* – 1976. – Vol. 31. – P. 437–450.
29. Gurin A. N., Chakrova E. T., Medvedeva Z. V., Soloninkina S. G. Perspektivy razvitiya yadernoy meditsiny v Respublike Kazakhstan: reaktornye izotopy redkozemel'nykh elementov dlya terapii // *Vestnik NYaTs RK.* – 2022. – No. 2. – P. 46–52. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2022-2-46-52>
30. Tazhedinov I., Amankulov Zh. M., Zhalmukash U. K., Khusain Sh. K., Khan O. G. Nekotorye perspektivnye radionuklidy v yadernoy meditsine Kazakhstana // *Vestnik NYaTs RK.* – 2018. – No. 1. – P. 31–35. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2018-1-31-35>

USING THE IAEA MEDICAL ISOTOPE BROWSER FOR SIMULATION THE PRODUCTION OF IODINE-123

S. N. Mukasheva*, D. A. Myngzhassarova

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

**E-mail for contacts: snmukasheva@gmail.com*

The paper presents the results of modeling the production of a medical isotope using the medical isotope browser of the International Atomic Energy Agency. A web application for the production of medical isotopes allows you to obtain the necessary data on a nuclear reaction based on user data: target radionuclide, irradiating particle or irradiating radiation, energy range, irradiation and cooling time. Tabular values and illustrated graphs of the cross section of the nuclear reaction are obtained based on modeling the production of the isotope iodine-123 from tellurium-124; The isotope decay products are presented. The simulation results were compared with the data recommended by the IAEA for this nuclear reaction for the gamma-emitting radionuclide iodine-123. It is shown that gamma-emitting radionuclide iodine-123 is one of the most convenient radionuclides for single-photon emission computed tomography. When experimental methods are not available, modern technologies in the field of computer modeling allow specialists in a narrow profile to use the achievements of world science to solve problems, in this case, for the production of medical isotopes. Modeling approaches for the production of iodine-123 are recommended for the production of other medical isotopes.

Keywords: *iodine-123, nuclear medicine, medical isotope, cross section, modeling.*

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БРАУЗЕРА МЕДИЦИНСКИХ ИЗОТОПОВ IAEA
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЙОД-123

С. Н. Мукашева*, Д. А. Мынжасарова

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

**E-mail для контактов: snmukasheva@gmail.com*

В работе представлены результаты моделирования производства медицинского изотопа с использованием браузера медицинских изотопов Международного агентства по атомной энергии. Web-приложение для производства медицинских изотопов позволяет получить необходимые данные по ядерной реакции на основе пользовательских данных: радионуклид мишени, облучающая частица или облучающее излучение, диапазон энергий, время облучения и охлаждения. На основе моделирования получения изотопа йод-123 из теллура-124 получены табличные значения и иллюстрированные графики поперечного сечения ядерной реакции; представлены продукты распада изотопа. Проведено сравнение результатов моделирования с рекомендуемыми IAEA данными по данной ядерной реакции для гамма излучающего радионуклида йод-123. Показано, что гамма-излучающий радионуклид йод-123 является одним из наиболее удобных радионуклидов для проведения однофотонной эмиссионной компьютерной томографии. Когда не доступны экспериментальные методы современные технологии в области компьютерного моделирования позволяют специалистам узкого профиля использовать достижения мировой науки для решения задач в данном случае для производства медицинских изотопов. Подходы по моделированию получения йод-123 рекомендуется использовать для получения и других медицинских изотопов.

Ключевые слова: йод-123, ядерная медицина, медицинский изотоп, поперечное сечение, моделирование.