

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**БИРЛАШГАН ЯДРО ТАДҚИҚОТЛАРИ ИНСТИТУТИ
ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

ХУШВАҚТОВ ЖЎРАБЕК ҲАТАМОВИЧ

**ТАБИИЙ УРАНЛИ КВИНТА ЙИГИЛМАСИНИ 2, 4, 6 ВА 8 ГэВ
ЭНЕРГИЯЛИ ДЕЙТРОНЛАР ОҚИМИ БИЛАН НУРЛАНТИРИШДА
ҲОСИЛ БЎЛГАН ИККИЛАМЧИ НЕЙТРОНЛАРНИНГ ^{232}Th , ^{129}I ВА ^{127}I
ЯДРОЛАРИ БИЛАН ЎЗARO ТАЪСИРИНИ ЎРГАНИШ**

**01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси. Тезлаштирувчи
техника**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)

Contents of the abstract of dissertation of the doctor of philosophy (PhD)

Хушвақтов Жўрабек Ҳатамович

Табиий уранли “КВИНТА” йиғилмасини 2, 4, 6 ва 8 ГэВ энергияли дейтронлар оқими билан нурлантиришда ҳосил бўлган иккиламчи нейтронларнинг ^{232}Th , ^{129}I ва ^{127}I ядролари билан ўзаро таъсирини ўрганиш 3

Хушвақтов Журабек Хатамович

Изучение взаимодействия вторичных нейтронов с ядрами ^{232}Th , ^{129}I , и ^{127}I на урановой сборке «КВИНТА», облучаемой дейтронами с энергией 2, 4, 6, и 8 ГэВ 23

Khushvaktov Jurabek Hatamovich

Study of secondary neutron interactions with ^{232}Th , ^{129}I , and ^{127}I nuclei at the uranium assembly QUINTA irradiated by 2, 4, 6, and 8 GeV deuterons 43

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ

List of published works 49

**ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ, АСТРОНОМИЯ ИНСТИТУТИ,
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.27.06.2017.FM/T.33.01
РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

**БИРЛАШГАН ЯДРО ТАДҚИҚОТЛАРИ ИНСТИТУТИ
ЯДРО ФИЗИКАСИ ИНСТИТУТИ**

ХУШВАҚТОВ ЖЎРАБЕК ҲАТАМОВИЧ

**ТАБИИЙ УРАНЛИ КВИНТА ЙИГИЛМАСИНИ 2, 4, 6 ВА 8 ГэВ
ЭНЕРГИЯЛИ ДЕЙТРОНЛАР ОҚИМИ БИЛАН НУРЛАНТИРИШДА
ҲОСИЛ БЎЛГАН ИККИЛАМЧИ НЕЙТРОНЛАРНИНГ ^{232}Th , ^{129}I ВА ^{127}I
ЯДРОЛАРИ БИЛАН ЎЗARO ТАЪСИРИНИ ЎРГАНИШ**

**01.04.08 – Атом ядроси ва элементар заррачалар физикаси. Тезлаштирувчи
техника**

**ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ БЎЙИЧА ФАЛСАФА ДОКТОРИ (PhD)
ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ**

Тошкент – 2019

Фалсафа доктори (PhD) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси хузуридаги Олий аттестация комиссиясида В2018.1. PhD/FM186 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ядро физикаси институти ва Бирлашган ядро тадқиқотлари институтида (Дубна, Россия) бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасида (www.inp.uz) ва «Ziynet» Ахборот-таълим порталида (www.ziynet.uz) жойлаштирилган.

Илмий раҳбар:	Юлдашев Бехзод Садиқович физика-математика фанлари доктори, профессор, Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси академиги
Расмий оппонентлар:	Мўминов Толиб Мусаевич физика-математика фанлари доктори, академик Киевская Анна Ивановна физика-математика фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	«Курчатов Институти» Миллий тадқиқот маркази, А.И. Алиханов номидаги Экспериментал ва назарий физика институти, Москва, Россия

Диссертация химояси Ядро физикаси институти, Астрономия институти, Ўзбекистон Миллий университети хузуридаги DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2019 йил «__» _____ куни соат ____ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100214, Тошкент шаҳри Улуғбек кўрғони, ЯФИ; тел. (+99871)289-31-41; факс (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Диссертация билан Ядро физикаси институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин. (__ рақам билан рўйхатга олинган.) Манзил: 100214, Тошкент шаҳри Улуғбек кўрғони, ЯФИ; тел. (+99871)289-31-19.

Диссертация автореферати 2019 йил «__» _____ куни тарқатилди.
(2019 йил «__» _____ даги ____ рақамли реестр баённомаси.)

М.Ю. Ташметов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

Э.М. Турсунов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

И. Нуритдинов

Илмий даражалар берувчи Илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (фалсафа доктори (PhD) диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурияти. Дунёда бугунги кунда тезлатгич орқали бошқариладиган тизимлар (ADS) ядро чиқиндиларини трансмутация қилиш ва фойдаланилган ёқилғиларнинг радиоактив зарарини камайтириш учун истиқболли тизим сифатида эътироф этилмоқда. Бунинг асосий сабаби, ташқи манба сифатида тезлатгичдан фойдаланишга асосланган критикости ҳолатида ишлаши билан боғлиқ. Ташқи манбанинг мавжудлиги, бундай тизимларга, минор-актинидлар ва узоқ яшовчи бўлиниш маҳсулотларини ёқиш ёки бошқа барқарор изотопларга айлантириш учун хавфсиз шароитни таъминлаган ҳолда, критикости ҳолатида ишлаш имконини беради. Табиий уран ва торий тезлаштиргич орқали бошқариладиган тизимлар учун асосий ёқилғи материали ҳисобланади.

Жаҳонда кўп йиллардан буён ^{232}Th дан ядро ёқилғиси сифатида фойдаланишга катта қизиқиш билан қаралади, чунки торий Ер қобиғида уранга нисбатан 3–5 баробар кўп. Торийли реактор, нейтрон ютилиши натижасида ҳосил бўладиган ва бўлинадиган ядро ^{233}U га парчаланадиган ^{233}Th ҳисобига ишлаши мумкин. Бироқ муаммо шундаки, бўлиниш реакцияларини давом эттириш учун етарли бўлмаган микдорда нейтронлар ҳосил бўлади, шунинг учун қўшимча ёқилғи – плутоний ёки бойитилган уран талаб этилади. Худди шундай ҳолат табиий уранда ҳам кузатилади. Охирги икки ўн йилликда Бирлашган ядро тадқиқотлари институтидаги (Дубна шаҳри) илмий-тадқиқотлар тезлатгичларга асосланган чуқур критикости ҳолатидаги тизимнинг асл концепциясини тадқиқ қилишга қаратилган. Торий ёки табиий уран ўзакли ядро релятивистик технологияси (ЯРТ), сезиларли тез нейтронлар улуши мавжуд бўлган парчаловчи нейтронлар майдони ёрдамида, ишлатилган ядро ёқилғисини трансмутация қилиш ва ядро энергияси ишлаб чиқариш учун мўлжалланган.

Республикамызда ядро технологияларини фанга ва ишлаб чиқаришга татбиқ этиш, хавфсиз ядро энергетикаси ва радиоактив чиқиндиларни утилизация қилиш каби ядро фанининг устувор йўналишларига бағишланган фундаментал ва амалий тадқиқотларига катта эътибор қаратилмоқда. Мамлакатимизда фан тараққиёти учун аҳамиятли бўлган бундай фундаментал тадқиқот йўналишлари, ишланмалар ҳамда уларнинг амалиётга татбиқи, 2017-2021 йилларда Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегиясида акс эттирилган.¹

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7 февралдаги ПФ-4947-сон “Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида”, 2018 йил 19 июлдаги ПФ-5484-сон “Ўзбекистон Республикасида атом энергетикасини ривожлантириш чоратадбирлари тўғрисида”ги Фармонлари, 2018 йил 14 июлдаги ПҚ-3855-сон “Илмий ва илмий-техникавий фаолият натижаларини тижоратлаштириш

¹ Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2017 йил 7-февралдаги ПФ-4947 сон «Ўзбекистон Республикасини янада ривожлантириш бўйича Ҳаракатлар стратегияси тўғрисида»ги Фармони.

самарадорлигини ошириш бўйича кўшимча чора-тадбирлар тўғрисида” ва 2017 йил 1 ноябрдаги ПҚ-3365-сон “Илмий-тадқиқот муассасаларининг инфратузилмасини янада мустақкамлаш ва инновацион фаолиятини ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида”ги Қарорлари, шунингдек, шу соҳада қабул қилинган бошқа норматив-ҳуқуқий ҳужжатларда берилган вазифаларни амалга оширишга ушбу диссертация тадқиқоти муайян даражада хизмат қилади.

Тадқиқотнинг Ўзбекистон Республикаси фан ва технологиялар ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги. Мазкур тадқиқот республика фан ва технологиялари ривожланишининг II. «Энергетика, энергия ва ресурс тежамкорлиги» устувор йўналиши доирасида бажарилган.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Бугунги кунда дунёда тезлаткичлар орқали бошқариладиган критикости ядро тизимлари ва радиоактив чиқиндиларни трансмутация қилиш соҳасида кўплаб тадқиқот тажрибалари ўтказилган. Масалан, чехиялик (Адам И. ва бошқ.) ва россиялик (Пронских В.С., Солнишкин А.А., Цупко-Ситников В.М.) олимлар 0.66 ГэВ энергияли протонлар билан нурлантирилган оғир кўрғошин нишони “ГЕНЕРАТОР” (17 кг кўрғошин) да ҳосил бўлган иккиламчи нейтронларнинг ^{129}I ва ^{127}I ядролари билан таъсирлашувини ўрганишган. Навбатдаги илмий ишда чехиялик (Адам И., Катовский К.) ва россиялик (Кривопустов М.И., Солнишкин А.А., Цупко-Ситников В.М.) олимлар 0.7, 1, 1.5 ва 2 ГэВ энергияли протонлар билан нурлантирилган, атрофига табиий уранли цилиндрлар жойлаштирилган, оғир кўрғошин нишони “Энергия плюс трансмутация” (28.7 кг кўрғошин, 206.4 кг уран) да ^{129}I радионуклидини трансмутация қилиш имкониятини тадқиқ қилишган. Худди шу гуруҳ олимлари 1.6 ГэВ энергияли дейтронлар билан нурлантирилган “Энергия плюс трансмутация” нишонида ҳосил бўлган иккиламчи нейтронларнинг ^{232}Th ядроси билан таъсирлашувини ўрганган.

Чехиялик (Адам И., Катовский К.), ҳиндистонлик (Бхатия Ч., Кумар В.), белорусиялик (Хильманович А.М., Марцинкевич Б.А., Жук И.В., Потапенко А.С.) ва россиялик (Пронских В.С., Солнишкин А.А., Тютюнников С.И., Цупко-Ситников В.М.) олимлар томонидан 2.33 ГэВ дейтронлар билан нурлантирилган кўрғошин-графит нишони “ГАММА-3” (34 кг кўрғошин, 1230 кг графит) да ^{232}Th ядросида (n,f), (n, γ) ва (n,2n) реакциялари тезлиги ўлчанган. Австралиялик олимлар (Хашеми-Нежад Р.С., Асквит Н.Л.) томонидан 1.6 ГэВ дейтронлар билан нурлантирилган “ГАММА-3” нишонида $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$ ва $^{232}\text{Th}(n,f)$ реакциялар тезлиги ўлчанган.

2011 йилда илк бор 512 кг табиий урандан иборат “КВИНТА” критикости йиғилмаси билан тажрибалар ўтказилди. Аниқланишича юкорида кўрсатилган нишонларни нурлантиришда ҳосил бўлган нейтронларнинг энергетик спектри ва оқими, “КВИНТА” критикости йиғилмасидан бутунлай фарқ қилади, ҳамда юкорида санаб ўтилган тажрибаларда $^{127}\text{I}(n,xn)$ остона реакцияларидан фойдаланиб тез нейтронлар оқими аниқланмаган.

Диссертация тадқиқотининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертация иши Бирлашган ядро тадқиқотлари

институти илмий-тадқиқотлар режасининг 02-1-1107-2011/2019 рақамли “Нуклотроннинг оғир ионлар оқимида амалий тадқиқотлар ва радиотерапия учун комплекс прототипини яратиш ҳамда ишлаб чиқиш” (2011-2019) ва ЎзР ФА Ядро физикаси институти илмий-тадқиқотлар режасининг ФА-Атех-2018-166 “ЎзР ФА ЯФИ НГ-150 нейтрон генератори базасида критикости реактори асосини ишлаб чиқиш” (2018-2020) илмий лойиҳалари доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади табиий уранли “КВИНТА” йиғилмасини БЯТИ Нуклотронида тезлаштирилган 2, 4, 6 ва 8 ГэВ энергияли дейтронлар оқими билан нурлантиришда ҳосил бўлган иккиламчи нейтронларнинг ^{232}Th , ^{129}I ва ^{127}I ядролари билан таъсирлашувидаги қолдиқ ядролар учун реакция тезлигини аниқлашдан иборат.

Тадқиқотнинг вазифалари:

тезлаштиргич орқали бошқариладиган тизимлар бўйича илгари бажарилган ва ҳозирги кунда амалга оширилаётган замонавий тадқиқот лойиҳаларни тавсифлаш;

парчаланиш (spallation) нишонини 2, 4, 6 ва 8 ГэВ энергияли дейтронлар билан нурлантириш бўйича илмий тажрибаларни ўтказиш ва уларга тайёргарлик кўриш ишларини бажариш;

ярим ўтказгичли детекторлар ёрдамида гамма-спектрометрия усулидан фойдаланиб, нурлантирилган намуналарни ўлчаш ишларини амалга ошириш;

ўлчанган гамма спектрларни таҳлил қилиш, идентификация қилинган радионуклидлар учун реакция тезлигини аниқлаш;

Монте-Карло усули орқали моделлаштиришни ўрганиш ва ўлчанаётган намуналар ҳамда нишонда ҳосил бўлган изотоплар, бўлиниш реакциялари микдори, иккиламчи заррачалар оқимини аниқлаш учун ҳисоблашларни бажариш;

^{127}I намуналарида остона (n,xn) реакцияларидан фойдаланиб нейтронлар оқимини аниқлаш;

узоқ вақт яшовчи ^{129}I радионуклидини трансмутация қилиш имкониятини тажрибада баҳолаш;

олинган тажриба натижаларни Монте-Карло усули орқали моделлаштириш натижалари билан солиштириш.

Тадқиқот объекти сифатида табиий уранли “КВИНТА” йиғилмаси, торий ва йод намуналари олинган.

Тадқиқот предмети бўлиб нейтронларнинг ^{232}Th , ^{129}I ва ^{127}I ядролари, релятивистик дейтронларнинг ^{238}U ядроси билан таъсирлашуви ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертацияда нейтрон активацион таҳлил, гамма-спектрометрия, Монте-Карло усули орқали моделлаштириш каби тадқиқот ва таҳлил усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

$^{127}\text{I}(n,xn)$ остона реакцияларидан фойдаланиб тез нейтронлар оқимини аниқлаш усули ишлаб чиқилган;

илк бор ^{127}I намуналарида остона (n,xn) реакцияларидан фойдаланиб 10-120 МэВ энергия оралиғидаги нейтронлар оқими аниқланган;

Монте-Карло моделлаштириши натижалари бўйича “КВИНТА” установакиси 298 та табиий уранли цилиндрларининг ҳар биридаги бўлиниш реакциялари микдори ҳақида батафсил маълумот олинган;

“КВИНТА” қурилмасида $^{129}\text{I}(n,\gamma)$ реакцияси орқали трансмутация қилиш имкониятини тажрибада баҳолаш учун, ҳосил бўлган ^{130}I массасининг ^{129}I массасига нисбати аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижалари қуйидагилардан иборат:

илк бор 298 та табиий уранли цилиндрлардан иборат бўлган чуқур критикости ҳолатидаги “КВИНТА” йиғилмасини 2, 4, 6 ва 8 ГэВ энергияли дейтронлар оқими билан нурлантиш бўйича тажриба тадқиқотлари ўтказилган;

активлаштирилган ^{232}Th , ^{129}I , ^{127}I намуналаридан чиқадиган гамма нурлар спектри таҳлил қилинди ва идентификация қилинган қолдиқ ядроларнинг ҳар бири учун ядро реакцияси тезлиги аниқланган;

^{232}Th намуналарида олинган тажриба натижалари моделлаштириш натижалари билан солиштирилган ҳамда қолдиқ ядролар ^{233}Pa , ^{231}Th ва ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , ^{115}Cd , ^{128}Sb , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce каби бўлиниш реакцияси маҳсулотлари учун тажриба ва моделлаштириш натижаларининг мослиги топилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги тадқиқотларнинг юқори сифатли тажрибаларда бажарилганлиги, ишончли ўлчаш ва тажриба натижаларига ишлов бериш усулларида фойдаланилганлиги, Монте-Карло моделлаштиришлари FLUKA, MCNPX-2.7, MARS-15 ва Geant4 каби замонавий дастурлардан фойдаланиб бажарилганлиги, тажрибада олинган натижаларнинг моделлаштириш натижалари билан мос келганлиги билан асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқот натижаларининг илмий аҳамияти тез нейтронли реакторлар ва тезлаштиргич орқали бошқариладиган келажак тизимларида тез нейтронлар оқимини аниқлашда остона $^{127}\text{I}(n,xn)$ реакцияларидан фойдаланиб нейтронлар оқимини аниқлаш усулидан фойдаланиш имкони мавжудлиги билан изоҳланади.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, узоқ вақт яшовчи ^{129}I радионуклидини трансмутация қилиш имкониятини тажрибада баҳолаш натижаларидан ва ^{233}Pa , ^{231}Th , ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , ^{115}Cd , ^{128}Sb , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce каби қолдиқ ядроларнинг чиқишидан, радиоактив чиқиндиларни трансмутация қилиш учун қуриладиган, тезлатгич орқали бошқариладиган саноат тизимларини лойиҳалаштиришда фойдаланиш мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Табиий уранли “КВИНТА” йиғилмасини 2, 4, 6 ва 8 ГэВ энергияли дейтронлар оқими билан нурлантиришда ҳосил бўлган иккиламчи нейтронларнинг ^{232}Th , ^{129}I ва ^{127}I ядролари билан ўзаро таъсирини ўрганиш бўйича олинган илмий натижалар асосида:

ишлаб чиқилган остона $^{127}\text{I}(n,xn)$ реакцияларидан фойдаланиб нейтронлар оқимини аниқлаш усули 10 МэВдан 120 МэВгача энергияли нейтронлар оқимини тажрибада аниқлаш учун “Энергия ва радиоактив чиқиндилар трансмутацияси” халқаро ҳамкорлик дастури доирасида (2012-2015) фойдаланилган. (Бирлашган ядро тадқиқотлари институти Юқори энергиялар физикаси лабораториясининг 2019-йил 5-мартдаги 100-26/83 рақамли маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши Монте-Карло усули билан бажарилган моделлаштириш натижаларини текшириш имконини берган;

“КВИНТА” йиғилмасида ўлчанган $^{129}\text{I}(n,\gamma)^{130}\text{I}$ реакцияси тезлиги массив кўрғошин нишонини 660 МэВ энергияли протонлар оқими билан нурлантириш бўйича БЯТИ Фазотронидида ўтказилган тажрибаларда фойдаланилган (Бирлашган ядро тадқиқотлари институти Юқори энергиялар физикаси лабораториясининг 2019-йил 5-мартдаги 100-26/83 рақамли маълумотномаси). Илмий натижаларининг қўлланилиши ^{129}I радионуклидини трансмутация қилиш имкониятини олдиндан баҳолаш имконини берган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Мазкур тадқиқот натижалари 7 та халқаро миқёсидаги илмий амалий анжуманларда муҳокамадан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 12 та илмий иш нашр қилинган, шулардан 5 та илмий мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссиясининг PhD диссертациялари асосий илмий натижаларини чоп этиш учун тавсия этилган хорижий журналларда нашр этилган.

Диссертациянинг тузилиши ва ҳажми. Диссертация таркиби кириш, тўртта боб, хулоса, иккита илова ва фойдаланилган адабиётлар рўйхатидан иборат. Диссертациянинг ҳажми 108 бетни ташкил этади.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида ўтказилган тадқиқотларнинг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг мақсади ва вазибалари, объект ва предметлари тавсифланган, республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг илмий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларини амалиётга жорий қилиш, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг **“Тезлатгич орқали бошқариладиган тизимлар”** деб номланган биринчи бобида тезлатгич орқали бошқариладиган келажак тизимларининг радиоактив чиқиндилар трансмутацияси ва ташқи нейтронлар манбаининг интенсивлиги каби имконият ва муаммолари тавсифланган. Тезлатгич орқали бошқариладиган тизим (ADS), кинетик характеристикалари оддий (критик) ядро реакторларидан тубдан фарқ қилувчи, ташқи нейтронлар манбаи орқали бошқариладиган критикости ҳолатида ишлайдиган реактор ҳисобланади. Критик иш ҳолати бўлиниш реакцияси орқали нейтронлар ҳосил қилиш тезлиги ва системада нейтронларнинг йўқолиш тезлиги орасидаги нозик балансдан иборат ва бу икки катталиқ орасидаги баланснинг нисбатан кичик ўзгариши ҳам тизим қувватида катта ўзгаришга олиб келиши мумкин. Аксинча критикости ҳолатида ишлайдиган реактор ўз табиатига кўра ташқи нейтрон манбаидаги ёки критикости ҳолатидаги зона реактивлигининг ўзгаришларига чидамли.

Тезлатгич орқали бошқариладиган тизимдан оддий ядро реакторларида ишлатилган ёқилғи таркибида ҳосил бўлган оғир изотопларни хусусан актинидларни бартараф қилиш учун фойдаланиш мумкин. Шунингдек тезлаштиргич орқали бошқариладиган тизимдан ^{99}Tc ва ^{129}I (ярим емирилиш даврлари мос ҳолда 213 минг ва 16 миллион йил) каби узок яшовчи бўлиниш маҳсулотларини бартараф қилишда ҳам фойдаланиш мумкин. Бу изотоплар нейтронларни ютиб мос ҳолда жуда қисқа вақт яшовчи ^{100}Tc ва ^{130}I изотопларига, улар эса бетта-парчаланиш орқали барқарор ^{100}Ru ва ^{130}Xe изотопларга айланиши мумкин.

Диссертациянинг **“Монте-Карло усули билан моделлаштириш”** деб номланган иккинчи бобида FLUKA ва Geant4 моделлаштириш кодларида фойдаланиладиган баъзи назарий ифодалашлар, адрон ва нуклонларнинг ўзаро таъсирлашув моделлари (Бертини ядро ичидаги каскадлар модели), иккилик каскад модели, INCL++ (the liège intranuclear cascade model) ва физик ўзаро таъсирларни параметрлаш (кичик энергияли нейтронлар таъсирлашуви) тавсифланган.

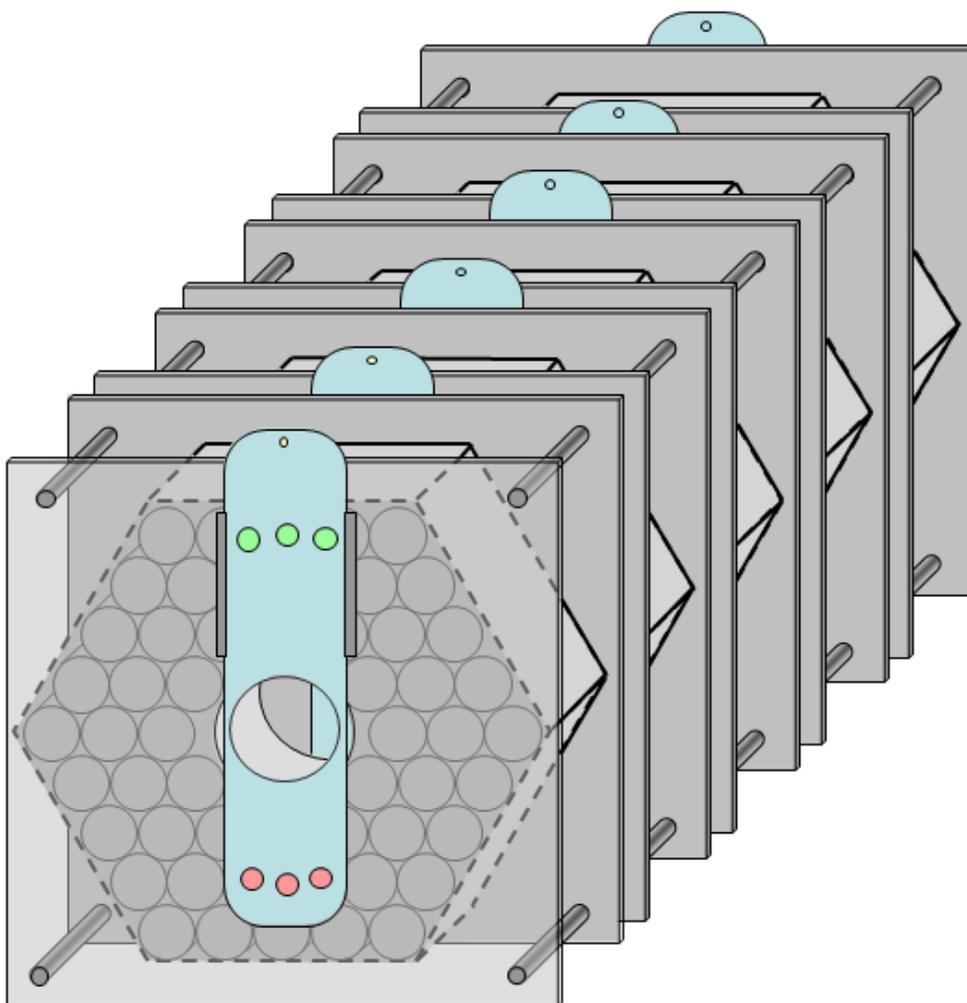
FLUKA протон ва электрон тезлаткичларида нишонгача бўлган ҳимоя қатламларини лойиҳалаштириш, калориметрия, активацион таҳлил, дозиметрия, детекторларни лойиҳалаштириш, тезлаткичлар орқали бошқариладиган тизимлар, космик нурлар, нейтрино физикаси, радиотерапия ва ҳ.к. каби кенг қўлланиш диапазонини қамраб олувчи, зарарчаларнинг

муҳитда кўчишини ва моддалар билан ўзаро таъсирлашувини ҳисоблаш учун универсал код ҳисобланади. FLUKA юқори аниқлик билан 60 га яқин турли заррачаларнинг жумладан 1 кэВ дан минг ТэВ гача энергияли фотонлар ва электронлар, 20 ТэВ гача энергияли нейтрино ва мюонлар, (FLUKA ни DPMJET код билан боғлаб 10 ПэВ гача) энергияли адронлар ва мос ҳолда барча антизаррачалар, иссиқ нейтронларгача нейтронлар ва оғир ионларнинг моддаларда кўчиши ва таъсирлашувини моделлаштириши мумкин. Дастур оптик фотонлар ва қутбланган фотонларнинг (масалан, синхротрон нурланишлари) ҳам кўчишини ҳисоблаши мумкин. Вақт бўйича эволюция ва нобарқарор ядролар чиқараётган нурланишларни кузатиш онлайн режимда бажарилиши мумкин. FLUKA Комбинаториал Геометрия (CG) пакетининг янги версиясидан фойдаланиб жуда мураккаб геометрик формаларни ҳам тайёрлаши мумкин. FLUKA CG пакети зарядланган заррачаларни (хатто электр ёки магнит майдонлар мавжудлигида ҳам) тўғри кузатиш учун кузатиш учун ишлаб чиқилган.

Geant4 заррачаларнинг моддалар орқали ўтишини моделлаштириш учун код ҳисобланади. У кузатиш, геометрия, физик моделлар ва хитларни (физик таъсирлашув вақтидаги оний тасвир) ўз ичига олган функцияларнинг тўлиқ мажмуасидан иборат. Ундаги физик жараёнлар кенг диапазонни қамраб олади шу жумладан электромагнетик, адроник ва оптик жараёнлар, кенг энергия диапазонидаги (баъзи ҳолларда 250 эВ дан ва айримларида ТэВ энергиягача кенгайтирилган) узоқ яшовчи заррачалар, материаллар ва элементларнинг катта тўпламини қамраб олган. Код фойдаланилаётган физик моделларни синаб кўриш, ҳамда мураккаб геометрик шаклларни тайёрлаш ва уларнинг турли дастурлар тўпламида қулай фойдаланишга мослашишини таъминлаш учун лойиҳалаштирилган ва тузилган. Код бутун дунё физиклар ва муҳандис-дастурчилар ҳамкорлиги натижаси ҳисобланади. У объект-йўналтирилган технология ва дастурий таъминотдан фойдаланиб яратилган ва C++ дастурлаш тилида амалга оширилган. Код элементар заррачалар физикаси, ядро физикаси, тезлаткичларни лойиҳалаштириш, космик техника ва тиббиёт физикасидаги ҳисоблашларда фойдаланилади.

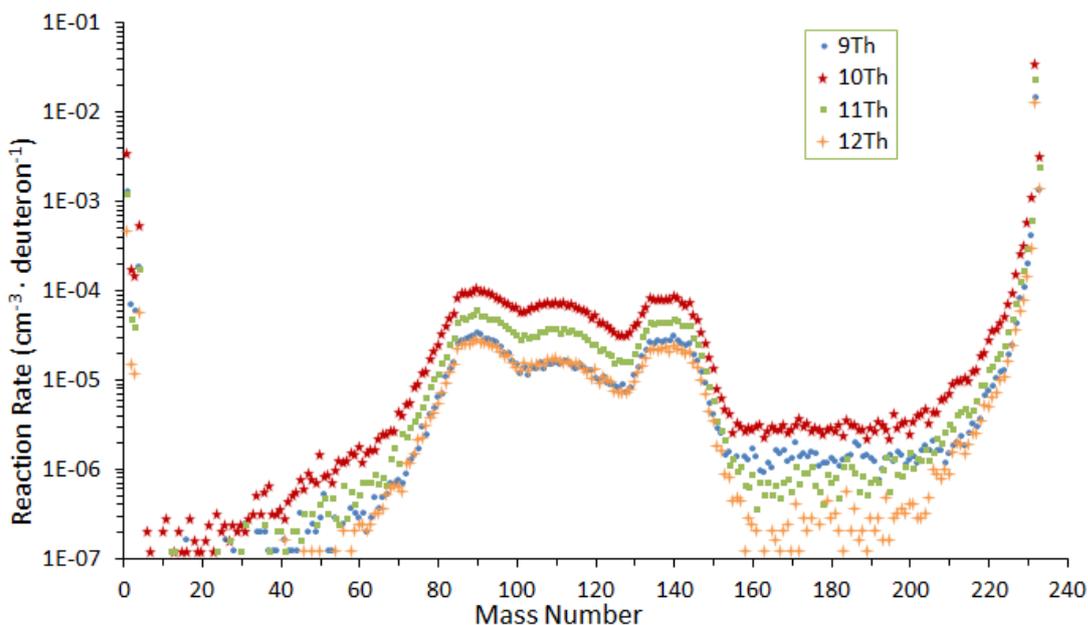
Диссертациянинг **“Табиий уранли йиғилма билан тажриба”** деб номланган учинчи бобда “КВИНТА” қурилмаси 6 ГэВ энергияли дейтронлар билан нурлантирилганда ҳосил бўлган иккиламчи нейтронларнинг торий намуналари билан таъсирлашувини ўрганиш бўйича тажриба натижалари ва ушбу тажрибани FLUKA коди ёрдамида моделлаштириш натижалари келтирилган. Табиий уранли “КВИНТА” йиғилмасининг умумий кўриниши 1-расмда келтирилган. Нурлантириш вақтида тўртта торий намуналари қурилманинг марказий ўқи бўйлаб жойлаштирилган ва шартли равишда 9Th , 10Th , 11Th ва 12Th каби белгиланган. Активлаштирилган намуналар чиқараётган гамма-квантлар спектрига ишлов берилган, таҳлил қилинган ва бунда юздан ортиқ ҳосил бўлган ядролар идентификация қилинган. Бу ядроларнинг ҳар бири учун реакция тезлиги аниқланган. Натижаларнинг кўрсатиши бўйича реакция реакция тезлигининг энг катта қиймати деярли барча қолдиқ ядролар учун

^{10}Th намунасига, энг кичик қиймати эса ^{12}Th намунасига тегишли. Идентификация қилинганлар орасида ^{233}Pa ядроси $^{232}\text{Th}(n,\gamma)^{233}\text{Th}$ (β^- decay, $T_{1/2}=22.3$ min.) \rightarrow ^{233}Pa (β^- decay, $T_{1/2}=26.967$ day \rightarrow ^{233}U) реакциясида ҳосил бўлади. Ҳосил бўлган ^{233}U массасининг ^{232}Th массасига нисбати ^9Th намунаси учун $1.39(4)\text{E-}12$ га, ^{10}Th учун $3.51(10)\text{E-}12$ га, ^{11}Th учун $2.39(8)\text{E-}12$ га ва ^{12}Th учун $1.48(4)\text{E-}12$ га тенг. Олинган тажриба натижалари FLUKA коди ёрдамида бажарилган Монте-Карло моделлаштириши натижалари билан солиштирилган. Реакция тезлигининг тажриба ва ҳисобланган қийматлари нисбати ^{233}Pa қолдиқ ядроси учун ^9Th намунасида $1.64(5)$ ни, ^{10}Th да $1.75(5)$ ни, ^{11}Th да $1.70(5)$ ни ва ^{12}Th да эса $1.78(5)$ ни ташкил қилади. Реакция тезлигининг тажриба ва ҳисобланган қийматлари нисбати ^{231}Th қолдиқ ядроси учун эса ^9Th намунасида $1.68(19)$ га, ^{10}Th да $1.95(7)$ га, ^{11}Th да $2.32(14)$ га ва ^{12}Th намунасида $2.50(18)$ га тенг. Кумулятив реакция тезлигининг тажриба ва ҳисобланган қийматлари нисбати ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{97}Zr , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , ^{115}Cd , ^{128}Sb , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce каби бўлиниш реакцияси қолдиқ ядролари учун $1.4 - 2.8$ ораликда, ^{96}Nb , ^{99}Mo , ^{113}Ag , ^{122}Sb , ^{124}Sb , ^{130}I , ^{135}Ce , ^{141}Ce каби бошқа қолдиқ ядролар учун эса $3.4 - 6.6$ ораликда ётади, тахминимизча бу нисбатлар юқори энергияли заррачалар билан бўлиниш реакцияларида изотопларнинг чиқишига боғлиқ. Бўлиниш реакцияси умумий тезлигининг тажриба ва ҳисобланган қийматлари нисбати ^9Th намунаси учун $2.69(39)$ ни, ^{10}Th учун $1.29(15)$ ни, ^{11}Th учун $1.78(19)$ ни ва ^{12}Th учун $1.87(21)$ ни ташкил қилади. Тажриба натижалари бўйича бўлиниш реакцияси $\text{R}(n,f)$ тезлигини ҳисоблаш қуйидагича амалга оширилган. 14 МэВ энергияли нейтронлар билан ^{232}Th ядросининг бўлиниш маҳсулотлари кумулятив чиқиши Y , TENDL-2011 ядро маълумотлари базасидан олинган. Қуйидаги ядролар учун: $^{85\text{m}}\text{Kr}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Y , ^{92}Sr , ^{93}Y , ^{95}Zr , ^{96}Nb , ^{97}Zr , ^{129}Sb , ^{131}I , ^{132}Te , ^{132}I , ^{132}Cs , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{142}La ва ^{143}Ce , бўлиниш маҳсулотлари R/Y нисбатининг ўртача қиймати ^9Th намунаси учун $5.57(80)\text{E-}26$ га, ^{10}Th учун $9.8(11)\text{E-}26$ га, ^{11}Th учун $6.91(73)\text{E-}26$ га ва ^{12}Th учун $3.50(39)\text{E-}26$ га тенг. Бу қийматлар ^{232}Th ядроси учун $\text{R}(n,f)$ бўлиниш реакцияси тезлигини ифодалайди.



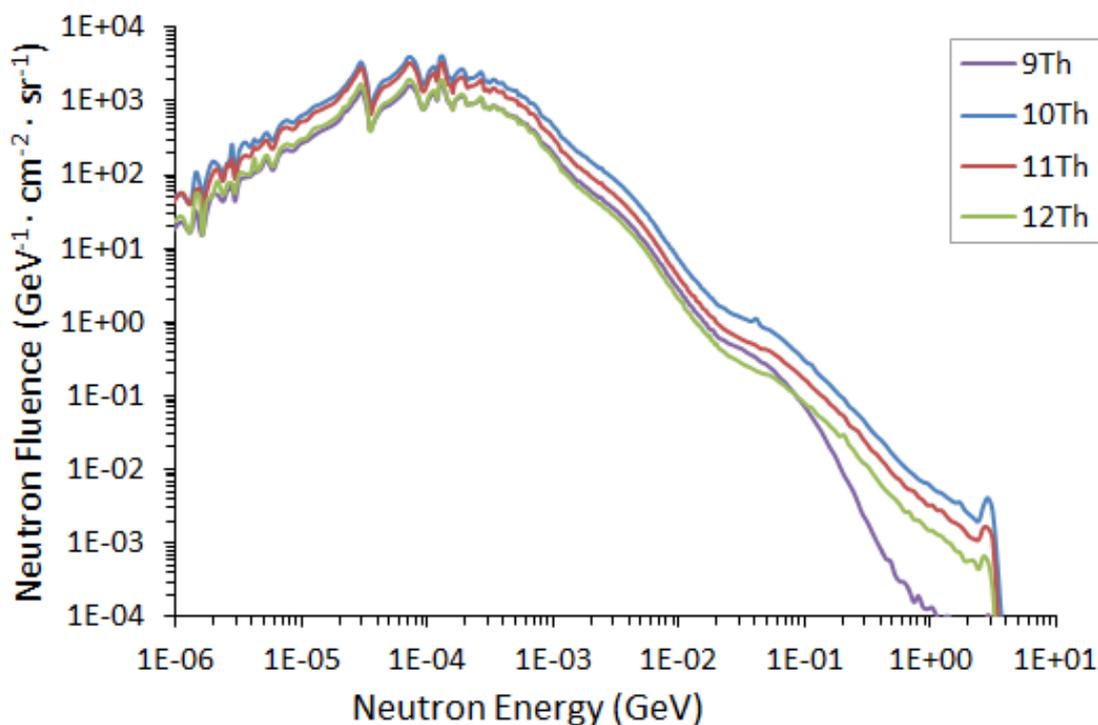
1-расм. “КВИНТА” қурилмасининг умумий кўриниши

9Th, 10Th, 11Th ва 12Th намуналарида, моделлаштириш натижасида олинган, реакция тезлигининг ҳосил бўлган ядролар массаларига боғлиқлиги 2-расмда ядро/см³·дейтрон бирлигида кўрсатилган. 2-расмдан торий намуналарида бўғланиш реакцияси, фрагментация, бўлиниш реакцияси (кичик ва юқори энергияли заррачалар билан), парчаланиш реакцияси (spallation) ва квазиэластик реакциялар маҳсулотларини кўриш мумкин.



2-расм. 9Th, 10Th, 11Th ва 12Th намуналарида реакция тезлигининг ҳосил бўлган ядролар массасига боғлиқлиги

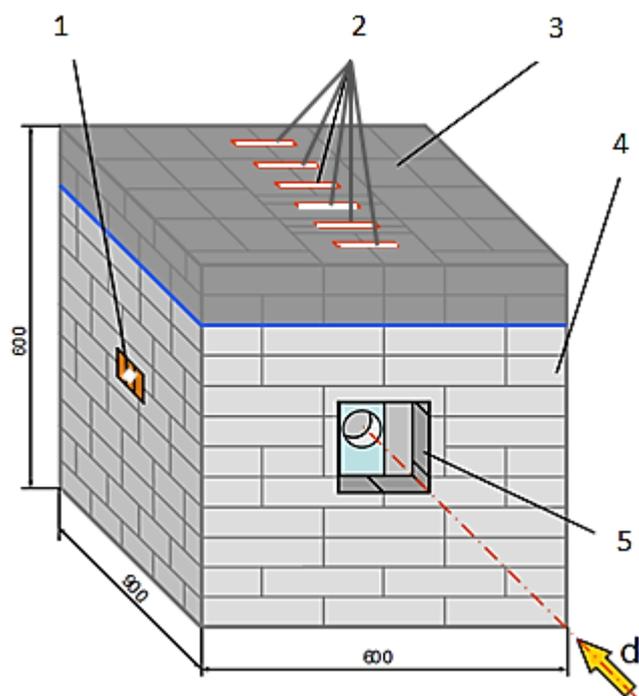
Торий намуналари учун иккиламчи нейтронларнинг иккинчи тартибли дифференциал флюенси 3-расмда кўрсатилган. Расмдан кўриниб турганидек нейтронлар флюенсиининг энг катта қиймати 10Th намунаси учун, энг кичик қиймати эса 10 МэВ дан кичик энергияларда 9Th ва 12Th намуналари учун, 10 МэВ дан катта энергияларда эса фақат 9Th намунаси учун нейтронлар флюенсиининг энг кичик қиймати.



3-расм. 9Th, 10Th, 11Th ва 12Th намуналари учун иккиламчи нейтронларнинг иккинчи тартибли дифференциал флюенси

Моделлаштириш натижаларида “КВИНТА” қурилмаси ҳар бир уран цилиндри учун бўлиниш реакциялари миқдори ҳақида батафсил маълумот олинган. Қурилмада битта 6 ГэВ энергияли дейтрон таъсирида содир бўладиган бўлиниш реакцияларининг тўлиқ сони 51.3 ни ташкил қилади, ундан 14.9 бўлиниш юқори энергияли заррачалар ($E > 20$ МэВ) билан содир бўлади. Юқори энергияли заррачалар ($E > 20$ МэВ) билан бўлинишлардан 0.34 бўлиниш дейтронлар билан, 1.7 бўлиниш протонлар билан, 11.3 бўлиниш нейтронлар билан, 0.37 бўлиниш мусбат пионлар билан ва 1.22 бўлиниш манфий пионлар билан содир бўлади. Қурилманинг биринчи секциясидаги бўлиниш реакциялари тўлиқ сони 2.7 ни, иккинчи секциясида 16.4 ни, учинчи секциясида 16.0 ни, тўртинчи секциясида 10.7 ни ва бешинчи секциясида 5.6 ни ташкил қилади. Юқори энергияли заррачалар ($E > 20$ МэВ) билан бўлиниш реакциялари сони биринчи секцияда 0.52 га, иккинчи секцияда 4.96 га, учинчи секцияда 4.66 га, тўртинчи секцияда 3.08 га ва бешинчи секцияда 1.72 га тенг.

Диссертациянинг **“Қўрғошин ҳимоя ичига жойлаштирилган табиий уранли йиғилма билан тажрибалар”** деб номланган тўртинчи бобида Нуклотрон тезлаткичида тезлаштирилган 2, 4 ва 8 ГэВ энергияли дейтронлар оқими билан “КВИНТА” йиғилмасини нурлантиришда ҳосил бўлган иккиламчи нейтронларнинг ^{232}Th , ^{129}I ва ^{127}I ядролари билан ўзаро таъсирлашувини ўрганиш жараёнида олинган тажриба натижалари ва уларни ҳисоблашлар билан солиштиришлар кўрсатилган. Энергия ва радиоактив чиқиндилар трансмутацияси коллаборациясида ишлаб чиқилган “КВИНТА” қурилмаси тезлаткичлар орқали бошқариладиган тизимларнинг радиоактив материалларни трансмутация қилиш, ҳамда парчаланиш (spallation) ва бўлиниш реакцияларига алоқадор турли фундаментал жиҳатларини ўрганиш учун фойдаланилган. Қўрғошин ҳимоя ичига жойлаштирилган табиий уранли “КВИНТА” йиғилмаси 4-расмда кўрсатилган. Илмий тажрибалар вақтида ^{232}Th , ^{129}I ва ^{127}I намуналари установканинг чап томонидаги дарча ичига жойлаштирилган. Активлаштирилган ^{232}Th , ^{129}I ва ^{127}I намуналари чиқараётган гамма нурлар спектрига ишлов берилган, таҳлил қилинган ва бунда бир неча ўнлаб ҳосил бўлган ядролар идентификация қилинган. Бу ядроларнинг ҳар бири учун нейтронлар келтириб чиқарувчи реакциялар тезлиги аниқланган. Натижаларнинг кўрсатишича, дейтронлар энергиясининг ортиши билан барча ҳосил бўлган ядролар учун реакция тезлигининг қиймати ҳам ортади. Афтидан бу ўсиш дейтронлар энергияси ортганда иккиламчи нейтронлар оқимининг ортиши билан боғлиқ.

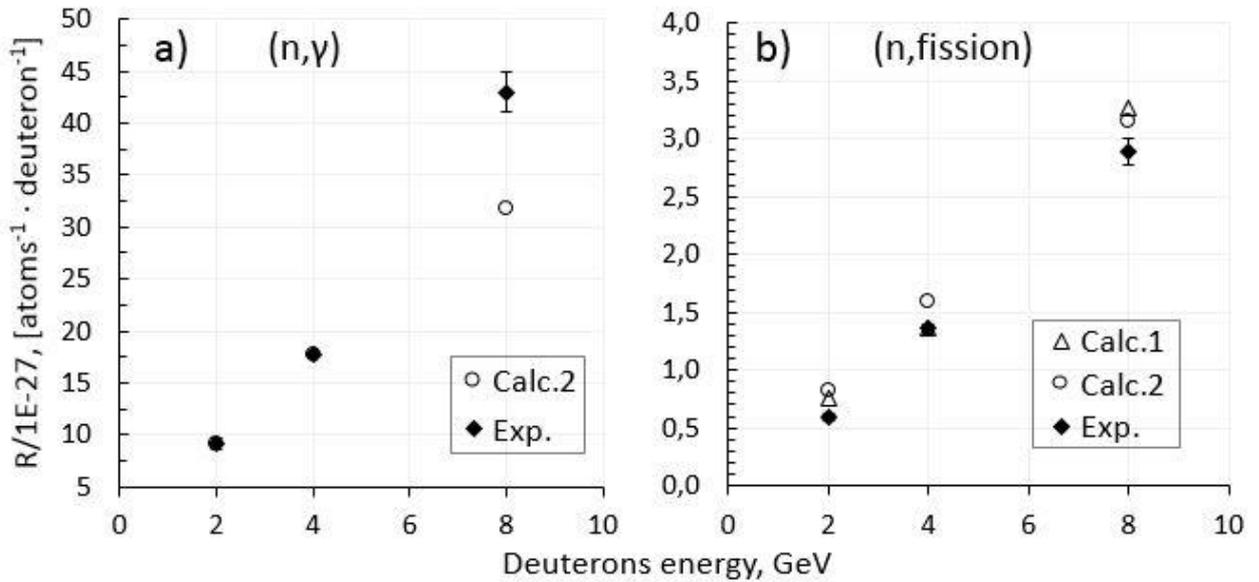


4-расм. “КВИНТА” қурилмасининг умумий кўриниши, бу ерда 1 – намуналарни жойлаштириб нурлантириш учун дарча, 2 – уран йиғилмаси секциялари орасига намуналарни ўрнатиш ва олиш учун туйнуқлар, 3 – йиғилманинг кўрғошин қопқоғи, 4 – кўрғошин химояси, 5 – дейтронлар оқими кириши учун 15x15-см² юзали дарча

Нейтронлар флюенсини (Calc.2) ҳисоблаш MCNPX-2.7 коди билан INCL4 (ядро ичидаги каскадлар модели) ва ABLA (буғланиш-бўлиниш модели) моделларидан фойдаланиб бажарилган. ²³²Th ядросида (n,γ) реакция учун реакция кесимлари TALYS1.6 дастури билан ҳисобланган, (n,бўлиниш) учун эса реакция кесимлари TENDL-2009 ядро маълумотлари базасидан олинган. 20 МэВ энергиягача ¹²⁹I ядросида (n,γ), (n,4n) ва (n,6n) реакциялар учун реакция кесимлари ENDF/B-VII базасидан олинган, 20 дан 1000 МэВ энергиягача эса TALYS1.6 дастури билан ҳисобланган. Шунингдек 20 МэВ энергиягача ¹²⁷I ядросида (n,γ), (n,2n) ва (n,4n) реакциялар учун кесимлар ҳам ENDF/B-VII ядро маълумотлари базасидан олинган, 20 дан 1000 МэВ энергиягача TALYS1.6 дастури ёрдамида ҳисобланган.

Олинган тажриба натижалари орқали R(n,f) бўлиниш реакцияси тезлигини ҳисоблашда қуйидаги ядролардан фойдаланилган: ^{85m}Kr, ⁸⁷Kr, ⁸⁸Kr, ^{91m}Y, ⁹¹Sr, ⁹²Y, ⁹²Sr, ⁹³Y, ⁹⁷Nb, ⁹⁷Zr, ¹³³I, ¹³⁴I, ¹³⁵I, ¹³⁵Xe, ¹³⁸Cs, ¹⁴²La ва ¹⁴³Ce. ²³²Th ядроси учун бўлиниш реакцияси тезлиги R(n,f) 2 ГэВ энергияда 0.59(3)E-27 ни, 4 ГэВ да 1.36(4)E-27 ни ва 8 ГэВ да эса 2.89(12)E-27 ни ташкил қилади. 5-расмда (n,γ) ва (n,f) бўлиниш реакциялари тезлигининг дейтронлар энергиясига боғлиқлиги бўйича тажриба ҳамда Calc.1 (MARS) ва Calc.2 (MCNPX) ҳисоблашлар натижалари кўрсатилган. Иккала ҳолатда ҳам дейтронлар энергияси ортиши билан реакция тезлиги қийматининг чизиқли ўсиши кузатилган. Турли энергияли нейтронлар учун (n,γ)/(n,f) нисбат 2 ГэВ да 15.5(23) ни, 4 ГэВ да 13.1(20) ни ва 8 ГэВ да 14.9(22) ни ташкил қилади. Бу

нисбатларнинг (Calc.2.) ҳисобланган қийматлари эса 12.3 (2 ГэВ), 12.2 (4 ГэВ) ва 11.2 (8 ГэВ) ларга тенг.



5-расм. а) иккиламчи нейтронларнинг ^{232}Th ядроси билан ўзаро таъсирлашувида (n, γ) реакцияси тезлигининг дейтронлар энергиясига боғлиқлиги бўйича тажриба ва ҳисоблаш натижаларини солиштириш (2 ва 4 ГэВ да ҳисоблаш натижалари тажриба натижалари билан тўсиб қолинган); б) иккиламчи нейтронларнинг ^{232}Th ядроси билан ўзаро таъсирлашувида (n,f) бўлиниш реакцияси тезлигининг дейтронлар энергиясига боғлиқлиги бўйича тажриба ва ҳисоблаш натижаларини солиштириш (4 ГэВ да Calc.1 ҳисоблаш натижаси тажриба натижаси билан тўсиб қолинган)

^{129}I намуналарида ^{127}I барқарор изотопидан аралашма мавжуд. Ҳосил бўладиган реакциялар маҳсулотларида ^{127}I ядросининг улушини топиш учун ^{129}I намуналари тоза ^{127}I намуналари билан биргаликда нурлантирилган. ^{129}I намунасида идентификация қилинган қолдиқ ядролар орасида ^{22}Na бир вақтда қуйидаги иккита реакцияда ҳосил бўлади: $^{27}\text{Al}(n,\alpha 2n)^{22}\text{Na}$ ($E_{\text{thr}}=23.35$ МэВ) ва $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$ ($E_{\text{thr}}=12.96$ МэВ). Шунингдек ^{24}Na ҳам $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ ($E_{\text{thr}}=3.25$ МэВ) ва $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$ реакцияларида ҳосил бўлади. ^{24}Na нинг (n, γ) реакциясида ҳосил бўлган улуши 2 ГэВ энергияли дейтронлар билан тадрибада 2.1% ни, 4 ГэВ да 0.9% ни ва 8 ГэВ да 0.6% ни ташкил қилади. ^{22}Na ва ^{24}Na изотоплари, намунада ^{27}Al изотопининг миқдори кўплиги сабабли асосан ундан ҳосил бўлади. ^{24}Na изотопининг ^{23}Na дан ҳосил бўлган улуши ^{127}I намунасида ҳосил бўлган ^{24}Na изотопи учун реакция тезлигининг қийматидан фойдаланиб ҳисобланган. Тахминимизга кўра ^{82}Br изотопи $^{81}\text{Br}(n,\gamma)^{82}\text{Br}$ реакциясида ҳосил бўлади яъни ^{129}I намунаси таркибида ^{81}Br изотопидан аралашма мавжуд. Ҳисоблашимиз (Calc.2) бўйича ^{129}I намунасида таркибида ^{81}Br изотопининг миқдори 1.5(5)% дан кичик. ^{82}Br изотопи ^{127}I намунасида кузатилмади. ^{123}I , ^{124}I ва ^{126}I изотоплари мос ҳолда (n,7n), (n,6n) ва (n,4n) реакцияларининг маҳсулотлари ҳисобланади. ^{130}I изотопи эса (n, γ) реакцияси маҳсулоти ҳисобланади.

^{127}I намунасида идентификация қилинган қолдиқ ядролар орасида ^{22}Na ва ^{24}Na изотоплари ^{23}Na ядросида (n,2n) ва (n, γ) реакцияларида ҳосил бўлади.

^{118m}Sb , ^{120m}Sb ва ^{122}Sb изотоплари мос ҳолда $(n,\alpha 6n)$ ($E_{\text{thr}}=44.11$ МэВ), $(n,\alpha 4n)$ ($E_{\text{thr}}=27.42$ МэВ) ва $(n,\alpha 2n)$ ($E_{\text{thr}}=11.23$ МэВ) реакцияларининг маҳсулотлари ҳисобланади. ^{119}Te , ^{121}Te ва ^{123m}Te радионуклидлари мос ҳолда $(n,t6n)$ ($E_{\text{thr}}=57.56$ МэВ), $(n,t4n)$ ($E_{\text{thr}}=39.92$ МэВ) ва $(n,t2n)$ ($E_{\text{thr}}=23.01$ МэВ) реакцияларида ҳосил бўлади. ^{120}I , ^{121}I , ^{123}I , ^{124}I ва ^{126}I изотоплари эса мос ҳолда $(n,8n)$ ($E_{\text{thr}}=62.18$ МэВ), $(n,7n)$ ($E_{\text{thr}}=51.53$ МэВ), $(n,5n)$ ($E_{\text{thr}}=33.59$ МэВ), $(n,4n)$ ($E_{\text{thr}}=26.04$ МэВ) ва $(n,2n)$ ($E_{\text{thr}}=9.22$ МэВ) реакциялари маҳсулотлари ҳисобланади. ^{128}I изотопи (n,γ) реакция яъни нейтрон ютилиши натижасида ҳосил бўлади. 1-жадвалда ^{127}I ва ^{129}I намуналари учун тажриба ва ҳисоблашлар (Calc.1 ва Calc.2) натижаларини солиштиришнинг айрим қийматлари келтирилган.

1-жадвал

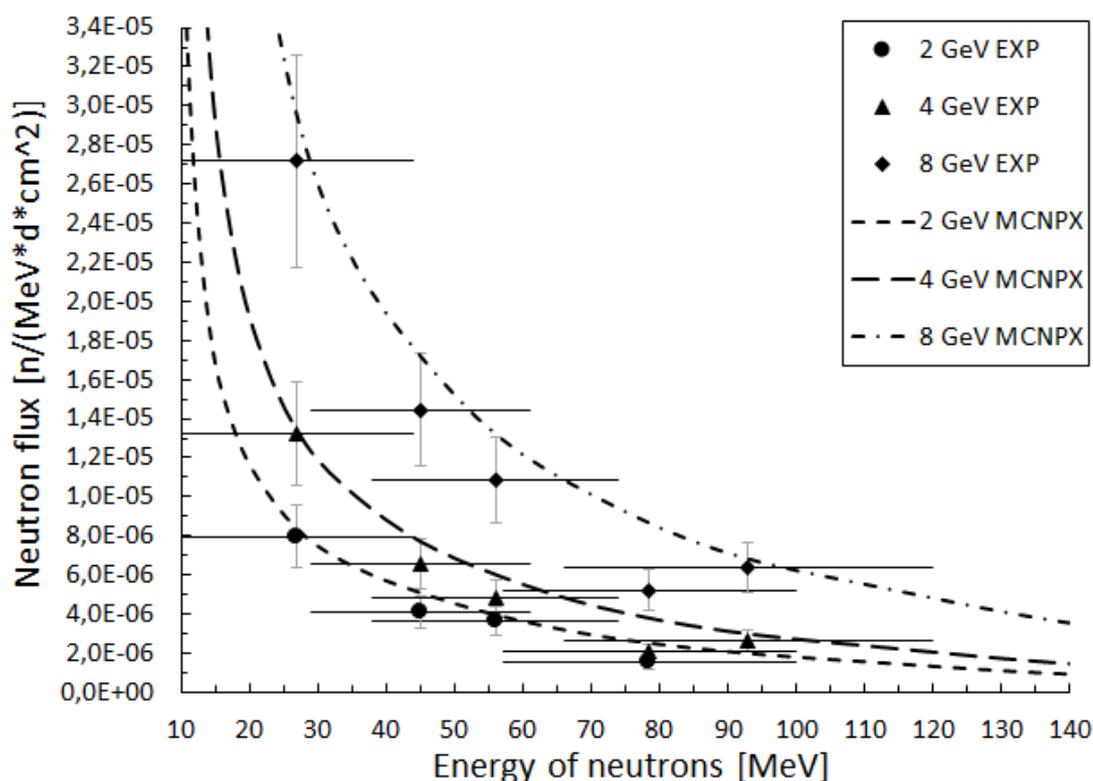
^{127}I ва ^{129}I намуналари учун тажриба ва ҳисоблашлар натижаларини солиштириш

Nuclear reactions on ^{127}I and ^{129}I samples	2 GeV		4 GeV		8 GeV	
	Exp/Calc.1	Exp/Calc.2	Exp/Calc.1	Exp/Calc.2	Exp/Calc.1	Exp/Calc.2
$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$		0.45(2)		0.59(2)		0.68(3)
$^{127}\text{I}(n,2n)^{126}\text{I}$	0.99(3)	0.59(2)	0.88(2)	0.59(2)	0.72(2)	0.54(2)
$^{127}\text{I}(n,4n)^{124}\text{I}$	1.17(5)	0.68(3)	1.00(8)	0.71(6)	0.90(5)	0.71(4)
$^{129}\text{I}(n,\gamma)^{130}\text{I}$		0.50(1)		0.58(1)		0.57(1)
$^{129}\text{I}(n,4n)^{126}\text{I}$	1.44(5)	0.73(3)	2.27(6)	1.48(4)	1.63(9)	1.23(7)
$^{129}\text{I}(n,6n)^{124}\text{I}$	1.98(20)	0.79(8)	2.38(17)	1.29(9)	1.35(24)	0.80(14)

Нейтронлар флюенсини тажрибада аниқлаш учун реакция тезликларининг тажриба қийматининг 80% дан фойдаланилди, чунки ҳисоблаш (Calc.2) натижаларининг кўрсатишича, ΔE энергия оралиғидаги нейтронлар йиғинди реакция тезлигига 80(5)% улуш беради. Нейтронлар флюенси (1) тенгламани ечиш орқали топилади. ΔE энергия оралиғи учун реакция кесимларининг ўртачалаштирилган қиймати TALYS1.6 дастури билан бажарилган ҳисоблаш натижаларидан олинган.

$$R(A_r, Z_r) = \int_{E_{\text{thr}}(A_r, Z_r)}^{E_{\text{max}}} \sigma(A_r, Z_r, E_n) \varphi(E_n) dE_n \quad (1)$$

бу ерда $\sigma(A_r, Z_r, E_n)$ реакция кесими ва $\varphi(E_n)$ нейтронлар флюенси. 6-расмда 10-120 МэВ энергия оралиғи учун ^{127}I намунасидаги нейтронлар флюенси кўрсатилган. Флюенс $^{127}\text{I}(n,xn)$ реакциялари бўйича тажриба натижалардан фойдаланиб аниқланган ва MCNPX-2.7 коди ёрдамида моделлаштириш натижалари билан солиштирилган.



6-расм. Нейтронлар флюенсининг тажрибада аниқланган ва ҳисобланган (MCNPX-2.7) қийматлари

^{129}I радионуклидини $^{129}\text{I}(n,\gamma)$ реакцияси ёрдамида трансмутация қилиш имкониятини тажрибада баҳолаш учун ҳосил бўлган ^{130}I изотопининг ^{129}I га нисбатини аниқладик. Бу нисбат ҳозирги илмий тажрибалар ҳолатида 2 ГэВ энергияли дейтронлар билан $1.40(3)\text{E}-13$ ни, 4 ГэВ да $2.94(6)\text{E}-13$ ни ва 8 ГэВ да эса $1.69(4)\text{E}-13$ ни ташкил қилади. Дейтронлар оқимининг интенсивлиги 2 ГэВ да $1.29(3)\text{E}+09$ ни, 4 ГэВ да $7.81(24)\text{E}+08$ ни ва 8 ГэВ да $1.51(7)\text{E}+08$ дейтрон/с ни ташкил қилади. Агар трансмутация миқдорини 10 мА ток ва 30 кун давомида нурлантириш ҳолатига ҳисобласак, 2 ГэВ да $0.082(2)\%$ га, 4 ГэВ да $0.190(4)\%$ га ва 8 ГэВ да $0.330(7)\%$ га тенг. Бу ҳисоблашлар катта ток ва кўп нурлантириш вақтлари учун трансмутация қилиш даражасини баҳолаш имконини беради. Ҳисоблашлар (Calc.1) ва тажриба натижалари бўйича дейтронларнинг учала энергиясида (2, 4, 8 ГэВ) ҳам ^{129}I изотопида содир бўладиган барча реакцияларнинг асосий 90(5)% қисмини (n, γ) реакцияси ташкил қилади.

Иловаларда ^{232}Th , ^{129}I ва ^{127}I намуналарида ҳосил бўлган қолдиқ ядролар учун реакция тезлигининг тажрибада олинган кумулятив қийматлари жадвалларда келтирилган.

ХУЛОСА

“Табиий уранли “КВИНТА” йиғилмасини 2, 4, 6 ва 8 ГэВ энергияли дейтронлар оқими билан нурлантиришда ҳосил бўлган иккиламчи нейтронларнинг ^{232}Th , ^{129}I ва ^{127}I ядролари билан ўзаро таъсирини ўрганиш” мавзусидаги физика-математика фанлари бўйича фалсафа доктори (PhD) диссертацияси бўйича ўтказилган тадқиқотлар асосида қуйидагиларни хулоса қилиш мумкин:

1. Илк бор табиий уранли йиғилма 6 ГэВ энергияли дейтронлар оқими билан нурлантирилган. Торий намуналари йиғилмада ҳосил бўлган иккиламчи нейтронлар билан нурлантирилган. Олинган тажриба натижалари FLUKA коди ёрдамида моделлаштириш натижалари билан солиштирилган. Бунда ^{233}Pa ва ^{231}Th қолдиқ ядролар, ҳамда ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , ^{115}Cd , ^{128}Sb , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce каби бир қанча бўлиниш реакциялари маҳсулотлари учун тажриба ва ҳисоблашлар натижаларининг мос келишлиги топилган. Бўлиниш реакциясининг бошқа маҳсулотлари учун кумулятив реакция тезлигининг тажриба ва ҳисоблаш қийматлари нисбати 3 дан катта. Тахминимизча, бу фарқлар юқори энергияли заррачалар билан содир бўладиган бўлиниш реакцияларида изотопларнинг чиқиши билан боғлиқ. Торий намуналари учун умумий бўлиниш реакцияси тезлигининг тажриба ва ҳисоблаш қийматлари нисбати 1.29-2.69 оралиқда жойлашган.
2. Моделлаштиришлар натижасида “КВИНТА” қурилмасининг ҳар бир уран цилиндридаги бўлиниш реакциялари миқдори ҳақида батафсил маълумот олинган. Битта 6 ГэВ энергияли дейтрон таъсирида қурилмада содир бўлган бўлиниш реакцияларининг йиғинди сони 51.3 га тенг ва ундан 14.9 бўлиниш юқори энергияли заррачалар ($E > 20$ МэВ) билан содир бўлади.
3. Илк бор кўрғошин ҳимоя билан ўралган табиий уранли йиғилма 2, 4 ва 8 ГэВ энергияли дейтронлар оқими билан нурлантирилган. Илмий тажрибалар вақтида ^{232}Th , ^{129}I ва ^{127}I намуналари “КВИНТА” установада чап ёнидаги дарча ичига жойлаштирилган. 2, 4 ва 8 ГэВ энергияли дейтронлар таъсирида қурилмада ҳосил бўлган иккиламчи нейтронлар билан нурлантирилган ^{232}Th , ^{129}I ва ^{127}I намуналарида ўлчанган барча қолдиқ ядролар учун реакция тезлигининг қиймати тажрибада аниқланган. Натижаларнинг кўрсатишича дейтронлар энергияси ортганда деярли барча ҳосил бўлган ядролар учун реакция тезлигининг қиймати ҳам ортади. Афтидан бу ўсиш дейтронлар энергияси ортганда иккиламчи нейтронлар оқимининг ҳам ортиши билан боғлиқ.
4. ^{232}Th Намуналарида (n,γ), (n,бўлиниш) реакциялари учун тажрибада олинган қийматларнинг ҳисоблашлар натижаларига нисбати 0.72-1.36 оралиқда, ^{129}I ва ^{127}I намуналарида (n,γ), (n,xn) реакциялари учун эса 0.45-2.38 оралиқда топилган.
5. Илк бор 10-120 МэВ энергия оралиғидаги нейтронлар флюенси ^{127}I намуналарида (n,xn) остона реакцияларидан фойдаланиб аниқланган.

Олинган тажриба натижалари моделлаштириш натижалари билан етарлича мос келади.

6. ^{129}I радионуклидини $^{129}\text{I}(n,\gamma)^{130}\text{I}$ реакцияси ёрдамида трансмутация қилиш имкониятини тажрибада баҳолаш учун ҳосил бўлган ^{130}I изотопи миқдорининг ^{129}I миқдorigа нисбати аниқланган. Олинган маълумотларнинг кўрсатишича, ҳозирда мавжуд тезлаткичларда бўлиниш маҳсулотларини трансмутация қилиш орқали бартараф этиш имконсиз.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.27.06.2017.FM/Т.33.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ,
АСТРОНОМИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ, НАЦИОНАЛЬНОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ**

ХУШВАКТОВ ЖУРАБЕК ХАТАМОВИЧ

**ИЗУЧЕНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВТОРИЧНЫХ НЕЙТРОНОВ С
ЯДРАМИ ^{232}Th , ^{129}I , И ^{127}I НА УРАНОВОЙ СБОРКЕ «КВИНТА»,
ОБЛУЧАЕМОЙ ДЕЙТРОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 2, 4, 6, И 8 ГэВ**

**01.04.08 – Физика атомного ядра и элементарных частиц. Ускорительная
техника**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)
ПО ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент – 2019

Тема диссертации доктора философии (PhD) зарегистрирована под номером B2018.1. PhD/FM186 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан

Диссертация выполнена в Институте ядерной физики АН РУз и Объединенном институте ядерных исследований (Дубна, Россия).

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.inp.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель: **Юлдашев Бехзод Садыкович**
доктор физико-математических наук, профессор,
академик Академии наук Республики Узбекистан

Официальные оппоненты: **Муминов Толиб Мусаевич**
доктор физико-математических наук, академик
Киевицкая Анна Ивановна
доктор физико-математических наук, профессор

Ведущая организация: **Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский Институт», Москва, Россия**

Защита диссертации состоится «__» _____ 2019 года в ____ часов на заседании Научного совета DSc.27.06.2017.FM/Г.33.01 при Институте ядерной физики, Астрономическом институте, Национальном университете Узбекистана (Адрес: 100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, ИЯФ; тел.: (+99871)289-31-41; факс: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

Диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Института ядерной физики (регистрационный номер ____), с диссертацией можно ознакомиться в ИРЦ (Адрес: 100214, г. Ташкент, поселок Улугбек, НУУз. Тел. (+99871) 289–31–19).

Автореферат диссертации разослан «__» _____ 2019 г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2019 г.)

М.Ю. Ташметов
Председатель научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., профессор

Э.М.Турсунов
Ученый секретарь научного совета по присуждению
ученых степеней, д.ф.-м.н., старший научный сотрудник

И. Нуритдинов
Председатель научного семинара при научном
совете по присуждению ученых степеней,
д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и востребованность темы диссертации. В настоящее время в мире электроядерные системы (Accelerator Driven System) признаны в качестве перспективных систем для трансмутации ядерных отходов и минимизации радиотоксичности отработанного топлива. Основная причина связана с их работой в подкритическом режиме, основанном на применении ускорителя в качестве внешнего источника. Наличие внешнего источника позволяет такой установке работать в подкритическом режиме, тем самым, обеспечивая более безопасные условия для трансмутации или выжигания долгоживущих продуктов деления и минор-актинидов. Природный уран и торий могут использоваться в качестве топливных материалов для электроядерных систем.

На протяжении многих лет в мире существует интерес к использованию ^{232}Th в качестве ядерного топлива, поскольку его в три-пять раз больше, чем натурального урана в земной коре. Ториевый реактор может работать за счёт деления ^{233}U , который образуется в результате поглощения нейтрона ядром ^{233}Th . Проблема состоит в том, что при использовании природного тория образуется недостаточное количество нейтронов для поддержания реакции деления, и поэтому необходимо обогащенное топливо (путем добавления плутония или ^{235}U). Такая же ситуация и с естественным ураном. В последние два десятилетия научные усилия в Объединенном институте ядерных исследований (г. Дубна) были сосредоточены на исследовании оригинальной концепции глубоко подкритических систем, основанных на ускорителях. Ядерные релятивистские технологии (ЯРТ) с сердечником из природного урана или тория предназначены для производства ядерной энергии и трансмутации отработанного ядерного топлива с использованием вторичного нейтронного поля с существенным вкладом быстрых нейтронов.

В нашей республике большое внимание уделяется фундаментальным и прикладным исследованиям в области таких приоритетных направлений ядерной науки, как внедрение ядерных технологий в науку и производство, безопасная ядерная энергетика и проблема утилизации радиоактивных отходов. Направления этих фундаментальных исследований и разработок, имеющих большое значение для развития науки нашей страны и их практического применения, отражены в Стратегии¹ действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017 – 2021 годы.

Исследования, проведенные в данной диссертационной работе, соответствуют задачам, предусмотренным в Указах Президента Республики Узбекистан УП-4947 от 2 февраля 2017 года «О стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан на 2017–2021 годы», УП-5484 от 19 июля 2018 года «О мерах по развитию атомной энергетике в Республике Узбекистан», Постановлениях Президента Республики

¹ Указ Президента Республики Узбекистан № УП-4947 «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан» от 07 февраля 2017 г.

Узбекистан ПП–3855 от 14 июля 2018 года «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов научной и научно-технической деятельности» и ПП-3365 от 1 ноября 2017 года «О мерах по дальнейшему укреплению инфраструктуры научно-исследовательских учреждений и развитию инновационной деятельности», а также в других нормативно-правовых документах, принятых в данной сфере.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Диссертационное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий в Республике Узбекистан II. «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение».

Степень изученности проблемы. На сегодняшний день ведущими учеными международных научных центров проведен большой объем экспериментальных исследований в области управляемых ускорителями подкритических ядерных систем и в области трансмутации радиоактивных отходов, например, чешские (Адам И. и др.) и российские (Пронских В.С., Солнышкин А.А., Цупко-Ситников В.М.) ученые изучили взаимодействия вторичных нейтронов с ядрами ^{129}I и ^{127}I на массивной свинцовой мишени «ГЕНЕРАТОР» (17 кг свинца) при облучении протонами энергией 0.66 ГэВ. В последующем этой группой ученых выполнено исследование о возможности трансмутации радионуклида ^{129}I на массивной свинцовой мишени, окруженной урановым бланкетом «Энергия плюс трансмутация» (28.7 кг свинца, 206.4 кг урана) при облучении 0.7, 1, 1.5 и 2-ГэВными протонами. Этой же группой исследователей изучено взаимодействие вторичных нейтронов с ядрами ^{232}Th на мишени «Энергия плюс трансмутация» при облучении 1.6-ГэВ дейтронами.

Чешскими (Адам И., Катовский К.), индийскими (Бхатия Ч., Кумар В.), белорусскими (Хильманович А.М., Марцынкевич Б.А., Жук И.В., Потапенко А.С.) и российскими (Пронских В.С., Солнышкин А.А., Тютюнников С.И., Цупко-Ситников В.М.) учеными были измерены скорости реакций (n,f), (n, γ) и (n,2n) в ^{232}Th на свинцово-графитовой мишени «ГАММА-3» (34 кг свинца, 1230 кг графита) при облучении 2.33-ГэВными дейтронами. Австралийские ученые (Хашеми-Нежад Р.С., Асквит Н.Л.) измерили скорости $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$ и $^{232}\text{Th}(n,f)$ реакций на этой мишени при облучении 1.6 ГэВными дейтронами.

Начиная с 2011 года впервые были проведены эксперименты с подкритической сборкой «КВИНТА», содержащей 512 кг природного урана. Было выяснено, что энергетический спектр и поток генерируемых нейтронов на подкритической сборке «КВИНТА» существенно отличается от энергетического спектра и потока нейтронов, генерируемых на указанных выше мишенях, и на перечисленных выше экспериментах не был определен поток быстрых нейтронов с использованием пороговых реакций $^{127}\text{I}(n,xn)$.

Связь темы диссертации с научно-исследовательскими работами научно-исследовательского учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнена в рамках проблемно-тематических планов и международного сотрудничества Объединенного института

ядерных исследований 02-1-1107-2011/2019 «Разработка и создание прототипа комплекса для радиотерапии и прикладных исследований на пучках тяжелых ионов Нуклотрона-М» (2011-2019) и научного проекта Института ядерной физики АН РУз ФА-Атех-2018-166 «Разработка основ подкритичного реактора на базе нейтронного генератора НГ-150 ИЯФ АН РУз» (2018-2019).

Целью исследования является определение скорости реакций на остаточных ядрах при взаимодействии вторичных нейтронов с ядрами ^{232}Th , ^{129}I и ^{127}I на урановой сборке «КВИНТА» при энергиях пучков дейтронов 2, 4, 6 и 8 ГэВ Нуклотрона ОИЯИ.

Задачи исследования:

выполнить критический обзор как ранее проведенных, так и современных экспериментов в рамках проектов по электроядерным системам;

принять участие в подготовке и проведении экспериментов с мишенью расщепления (spallation) на пучках дейтронов при энергиях 2, 4, 6 и 8 ГэВ;

провести измерения спектров гамма-излучения от облученных образцов методом спектрометрии с использованием HPGe детектора;

обработать и проанализировать полученные спектры, вычислить скорость реакции для идентифицированных радионуклидов;

освоить пакеты программ FLUKA и Geant4, выполнить моделирование флюенса вторичных частиц, количества реакций деления и количества произведенных изотопов в мишени и в измеряемых образцах методом Монте-Карло;

определить флюенс нейтронов с использованием пороговых (n,xn) реакций в образцах ^{127}I ;

экспериментально оценить возможность трансмутации долгоживущего радионуклида ^{129}I ;

сравнить экспериментальные результаты с результатами моделирования методом Монте-Карло.

Объектом исследования является сборка «КВИНТА» из природного урана, образцы тория и йода.

Предметом исследования является взаимодействие релятивистских дейтронов с ядром ^{238}U и нейтронов с ядрами ^{232}Th , ^{129}I и ^{127}I .

Метод исследования. Нейтронно-активационный метод анализа, гамма-спектрометрия, моделирование методом Монте-Карло.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработан метод для определения флюенса быстрых нейтронов с использованием пороговых реакций $^{127}\text{I}(n,xn)$;

впервые определен флюенс нейтронов с энергиями от 10 до 120 МэВ путем использования пороговых (n,xn) реакций в образцах ^{127}I ;

по результатам Монте-Карло моделирования получена подробная информация о количестве реакций делений в каждом из 298 природных урановых цилиндров установки «КВИНТА»;

определено отношение массы образованного ^{130}I к массе ^{129}I для экспериментальной оценки возможности трансмутации с помощью реакции $^{129}\text{I}(n,\gamma)$ в установке «КВИНТА».

Практические результаты исследования заключаются в следующем:

впервые проведены экспериментальные исследования по облучению глубокоподкритической сборки «КВИНТА», включающей в себя набор из 298 цилиндров природного урана, пучками дейтронов с энергиями 2, 4, 6 и 8 ГэВ;

из анализа спектров гамма-лучей, испускаемых активированными образцами ^{232}Th , ^{129}I и ^{127}I , для каждого из идентифицированных остаточных ядер установлены скорости реакций;

в результате выполненного сравнения полученных экспериментальных данных для ^{232}Th образцов с результатами моделирования получено хорошее согласие для остаточных ядер ^{233}Pa , ^{231}Th и для ряда продуктов реакций деления, в том числе ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , ^{115}Cd , ^{128}Sb , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce .

Достоверность результатов исследования обосновывается высоким экспериментальным уровнем выполнения работы, использованием надежных методов измерений, обработки экспериментальных данных и современных кодов для моделирования с методом Монте-Карло, таких как FLUKA, MCNPX-2.7, MARS-15 и Geant4, хорошим согласием полученных результатов моделирования с экспериментальными данными.

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов исследования определяется установлением возможности определения флюенса быстрых нейтронов в будущих электроядерных системах и быстрых реакторах, основываясь на методе определения флюенса нейтронов с использованием пороговых реакций $^{127}\text{I}(n,xn)$, разработанном в ходе выполнения диссертационной работы.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что экспериментальные оценки возможности трансмутации долгоживущего радионуклида ^{129}I и выходов целого ряда остаточных ядер, таких как ^{233}Pa , ^{231}Th , ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , ^{115}Cd , ^{128}Sb , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce могут быть использованы при проектировании промышленных электроядерных систем для трансмутации радиоактивных отходов.

Внедрение результатов исследования. На основе полученных результатов по изучению взаимодействия вторичных нейтронов с ядрами ^{232}Th , ^{129}I , и ^{127}I на урановой сборке «КВИНТА», облучаемой дейтронами с энергией 2, 4, 6, и 8 ГэВ:

разработанный метод для определения плотности потока нейтронов с использованием пороговых реакций $^{127}\text{I}(n,xn)$, был использован в рамках программы международного сотрудничества Объединенного института ядерных исследований «Энергия и трансмутация радиоактивных отходов» (2012-2015) (письмо Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ № 100-

26/83 от 5 марта 2019 г.). Использование данного метода позволило экспериментально определить плотности потока нейтронов с энергией от 10 до 120 МэВ и дало возможность проверки результатов моделирования с помощью метода Монте-Карло;

измеренная скорость $^{129}\text{I}(n,\gamma)^{130}\text{I}$ реакции в установке «КВИНТА» позволила предварительно оценить возможности трансмутации радионуклида ^{129}I для экспериментов, которые проведены на Фазотроне ОИЯИ по облучению массивной свинцовой мишени с протонами 660 МэВ (письмо Лаборатории физики высоких энергий ОИЯИ № 100-26/83 от 5 марта 2019 г.).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы обсуждены на 7 международных научно-практических конференциях.

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 12 научные работы, из них 5 научных статей в зарубежных журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов диссертаций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, двух приложений и библиографии. Размер диссертации составляет 108 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их научная и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также о структуре диссертации.

В первой главе диссертации «**Электроядерные системы**» описываются проблемы и возможности будущих электроядерных систем, такие как интенсивности внешнего источника нейтронов и трансмутация радиоактивных отходов. ADS является подкритическим реактором, управляемым внешним источником нейтронов, кинетические характеристики которого существенно отличаются от обычных (критических) ядерных реакторов. Критическое рабочее состояние представляет собой чувствительный баланс между скоростью производства нейтронов за счет деления и скоростью потерь нейтронов, а относительно небольшое небалансовое соотношение в этих двух величинах может привести к большим отклонениям в мощности. Напротив, подкритический реактор по своей природе устойчив к изменениям реактивности в подкритической зоне или к изменениям внешнего источника нейтронов.

Электроядерные системы можно использовать для выжигания долгоживущих изотопов, содержащихся в используемом топливе из обычного ядерного реактора, в частности актинидов. Также, электроядерные системы могут быть использованы для выжигания долгоживущих продуктов деления, таких как ^{99}Tc и ^{129}I (периоды полураспада 213 тысяч и 16 миллионов лет, соответственно). Эти изотопы могут захватить нейтроны и превратиться в ^{100}Tc и ^{130}I соответственно, которые очень короткоживущие и бета-распадаются в стабильные ^{100}Ru и ^{130}Xe .

Во второй главе диссертации «**Моделирование методом Монте-Карло**» описываются некоторые теоретические формулировки, модели взаимодействия адронов и нуклонов (модель внутриядерного каскада Бертини, бинарная каскадная модель, INCL++: the liège intranuclear cascade model) и параметризация физических взаимодействий (взаимодействия низкоэнергетических нейтронов), включенных в коды моделирования FLUKA и Geant4.

FLUKA - это универсальный код для расчетов транспортировки частиц и взаимодействия с веществом, охватывающий обширный диапазон применений, таких как проектирование защиты для мишеней на протонных и электронных ускорителях, калориметрия, активационный анализ, дозиметрия, проектирование детекторов, электроядерных систем, космических лучей и нейтринная физика, радиотерапия и т.д. FLUKA может с высокой точностью моделировать взаимодействие и транспортировку в

веществе около 60 различных частиц, включая фотоны и электроны от 1 кэВ до тысячи ТэВ, нейтрино, мюоны и адроны до энергии 20 ТэВ (до 10 ПэВ, связав FLUKA с кодом DPMJET) и все соответствующие античастицы, нейтроны до тепловых энергий и тяжелые ионы. Программа также может транспортировать поляризованные фотоны (например, синхротронное излучение) и оптические фотоны. Временная эволюция и отслеживание испускаемого излучения от неустойчивых остаточных ядер могут быть выполнены онлайн. FLUKA может обрабатывать даже очень сложные геометрические формы, используя улучшенную версию известного пакета Комбинаторная Геометрия (CG). FLUKA CG был разработан, чтобы отследить правильно и заряженные частицы (даже в присутствии магнитных или электрических полей).

Geant4 - это код для моделирования прохождения частиц через вещество. Он включает в себя полный спектр функций, включая отслеживание, геометрию, физические модели и хиты. Предлагаемые физические процессы охватывают широкий диапазон, в том числе электромагнитные, адронные и оптические процессы, большой набор долгоживущих частиц, материалов и элементов в широком диапазоне энергий, в некоторых случаях от 250 эВ и расширяется в других до энергетического диапазона ТэВ. Код был спроектирован и сконструирован таким образом, чтобы выявлять используемые физические модели, обрабатывать сложные геометрии и обеспечивать его легкую адаптацию для оптимального использования в различных наборах приложений. Код является результатом всемирного сотрудничества физиков и инженеров-программистов. Он был создан с использованием программного обеспечения и объектно-ориентированной технологии и реализован на языке программирования C++. Он используется в приложениях, в физике элементарных частиц, ядерной физике, проектировании ускорителей, космической технике и медицинской физике.

В третьей главе диссертации «Эксперимент на сборке из природного урана» представлены экспериментальные результаты исследования взаимодействий вторичных частиц с образцами тория на установке «КВИНТА», облученной дейтронами с энергией 6 ГэВ, а также результаты моделирования с помощью кода FLUKA для этого эксперимента. Сборка из природного урана показана на Рис.1. Во время облучения четыре образца тория были размещены на центральной оси установки и образцы были условно обозначены как 9Th, 10Th, 11Th и 12Th. Спектры гамма-квантов, испускаемые активированными образцами, были обработаны и проанализированы, при этом были идентифицированы более ста образующихся ядер продуктов. Для каждого из этих продуктов были определены скорости реакций. Результаты показывают, что для образца 10Th наибольшие значения скорости реакции для почти всех остаточных ядер и наименьшие значения скоростей реакций для образца 12Th. Среди идентифицированных ядер ^{233}Pa образуется в реакции $^{232}\text{Th}(n,\gamma)^{233}\text{Th}$ (β^- decay, $T_{1/2}=22.3$ min.) \rightarrow ^{233}Pa (β^- decay, $T_{1/2}=26.967$ day \rightarrow ^{233}U). Отношение

массы произведенного ^{233}U к массе ^{232}Th для образца 9Th составляет $1.39(4)\text{E}-12$, для 10Th - $3.51(10)\text{E}-12$, для 11Th - $2.39(8)\text{E}-12$ и для 12Th равно $1.48(4)\text{E}-12$. Полученные экспериментальные результаты были сравнены с результатами Монте-Карло моделирования, выполненными по коду FLUKA. Отношение экспериментальных и рассчитанных скоростей реакций для остаточных ядер ^{233}Pa для образца 9Th составляет $1.64(5)$, для 10Th - $1.75(5)$, для 11Th - $1.70(5)$, а для 12Th равно $1.78(5)$. Для остаточных ядер ^{231}Th отношение экспериментальных и рассчитанных скоростей реакций для образца 9Th составляет $1.68(19)$, для 10Th - $1.95(7)$, для 11Th - $2.32(14)$ и для 12Th равно $2.50(18)$. Отношение экспериментальных и расчетных кумулятивных скоростей реакций для остаточных ядер реакций деления, таких как ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{97}Zr , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , ^{115}Cd , ^{128}Sb , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce находятся в интервале $1.4 - 2.8$, для таких остаточных ядер, как ^{96}Nb , ^{99}Mo , ^{113}Ag , ^{122}Sb , ^{124}Sb , ^{130}I , ^{135}Ce , ^{141}Ce находятся в интервале $3.4 - 6.6$, и мы полагаем, что эти отношения зависят от выхода изотопов в реакциях деления, вызванных частицами высоких энергий. Отношение экспериментальной и расчетной общей скорости реакции деления для образца 9Th составляет $2.69(39)$, для 10Th - $1.29(15)$, для 11Th - $1.78(19)$ и для 12Th составляет $1.87(21)$. Расчеты скорости реакции деления $R(n,f)$ по экспериментальным данным, выполнены следующим образом. Кумулятивные выходы Y продуктов деления ^{232}Th при энергии нейтронов 14 МэВ были взяты из библиотеки TENDL-2011. Средние значения отношений R/Y продуктов деления для следующих ядер: ^{85m}Kr , ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Y , ^{92}Sr , ^{93}Y , ^{95}Zr , ^{96}Nb , ^{97}Zr , ^{129}Sb , ^{131}I , ^{132}Te , ^{132}I , ^{132}Cs , ^{133}I , ^{134}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{141}Ce , ^{142}La и ^{143}Ce оказались $5.57(80)\text{E}-26$ для образца 9Th, $9.8(11)\text{E}-26$ для 10Th, $6.91(73)\text{E}-26$ для 11Th, и $3.50(39)\text{E}-26$ для образца 12Th. Эти числа представляют собой скорости реакции деления $R(n,f)$ для ^{232}Th .

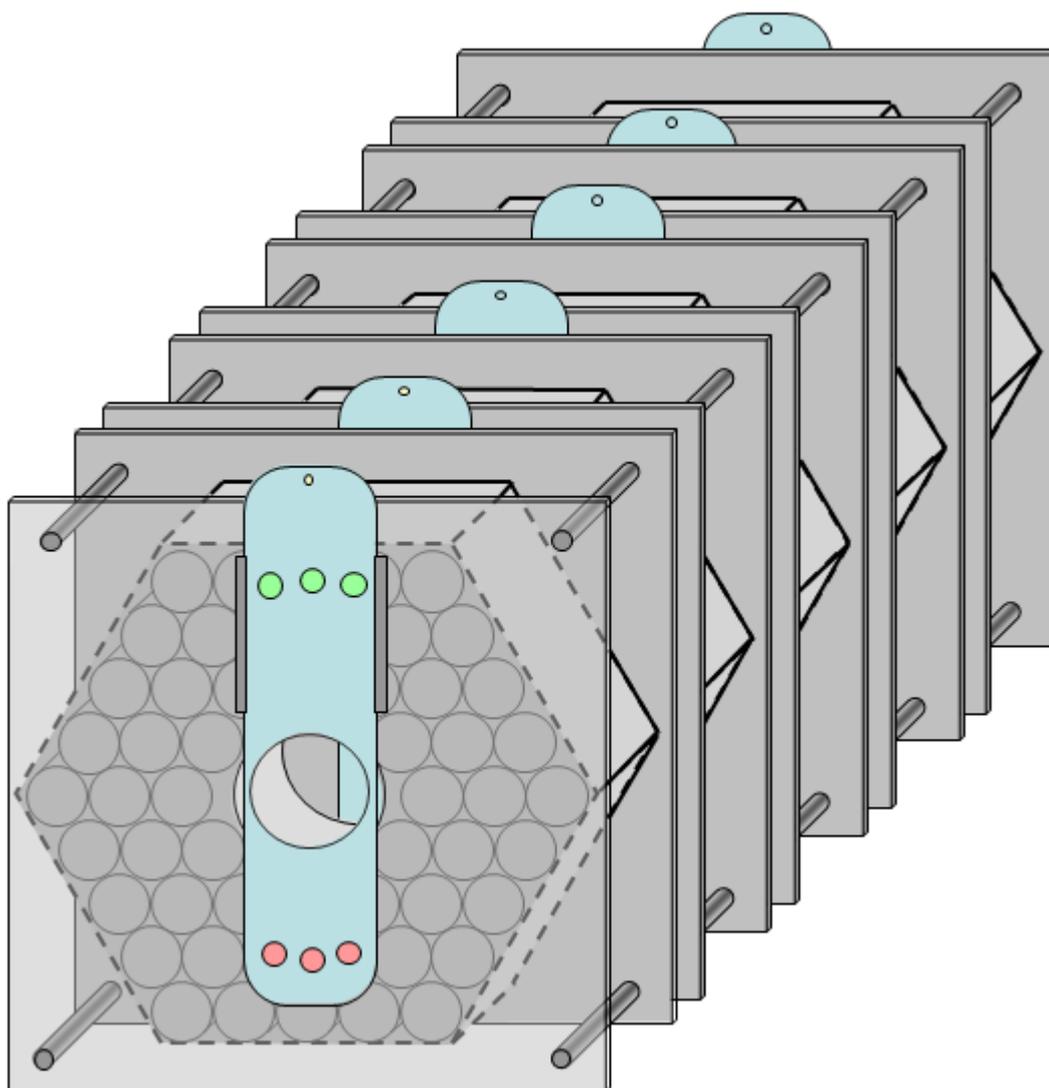


Рис.1. Общий вид установки «КВИНТА»

Зависимость скорости реакции от массы остаточных изотопов для образцов ${}^9\text{Th}$, ${}^{10}\text{Th}$, ${}^{11}\text{Th}$ и ${}^{12}\text{Th}$, полученных в моделированиях, показана на Рис.2 в единицах ядер/ $\text{см}^3 \cdot \text{дейтрон}$. Также на Рис.2 представлены продукты реакции испарения, фрагментации, деления (с частицами с низкой и высокой энергией), расщепления (spallation) и квазиупругих реакций в образцах тория.

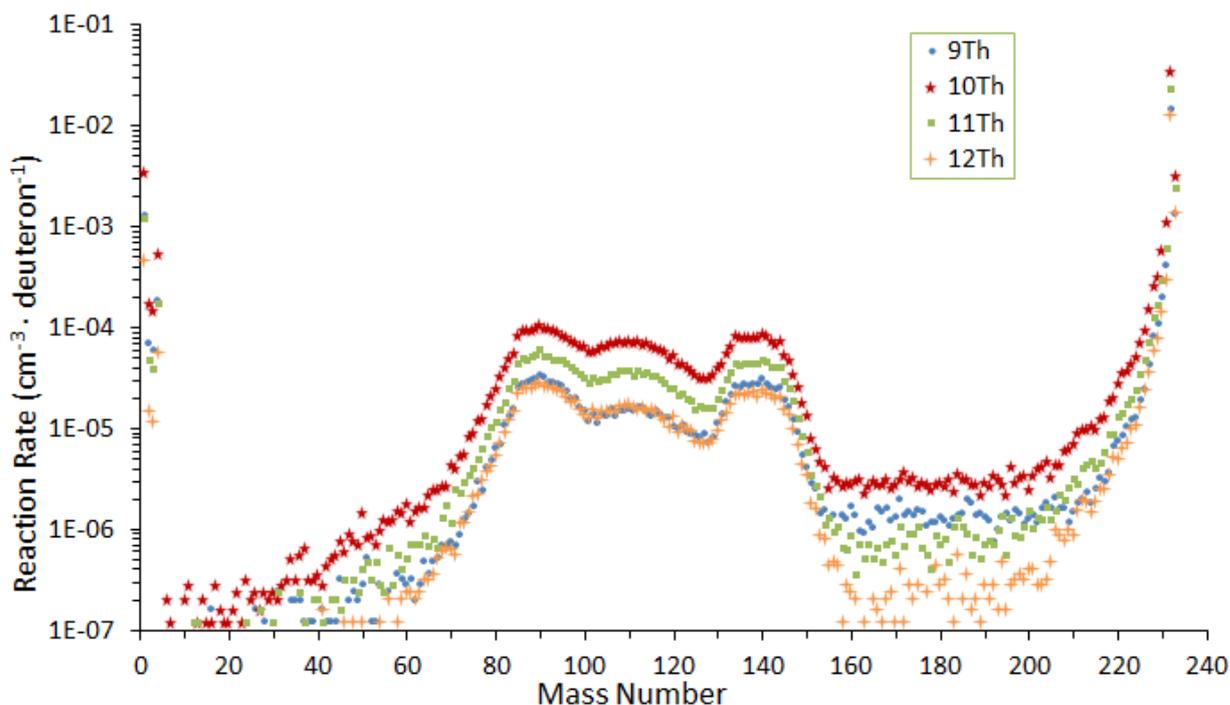


Рис.2. Зависимость скорости реакции от массы остаточных ядер для образцов 9Th, 10Th, 11Th и 12Th

На Рис.3 представлен расчетный двойной дифференциальный флюенс вторичных нейтронов для положения образцов тория. Как видно из рисунка, наибольший флюенс нейтронов для образца 10Th и наименьший флюенс для образцов 9Th и 12Th при энергиях ниже 10 МэВ, а при энергиях выше 10 МэВ наименьший флюенс только для образца 9Th.

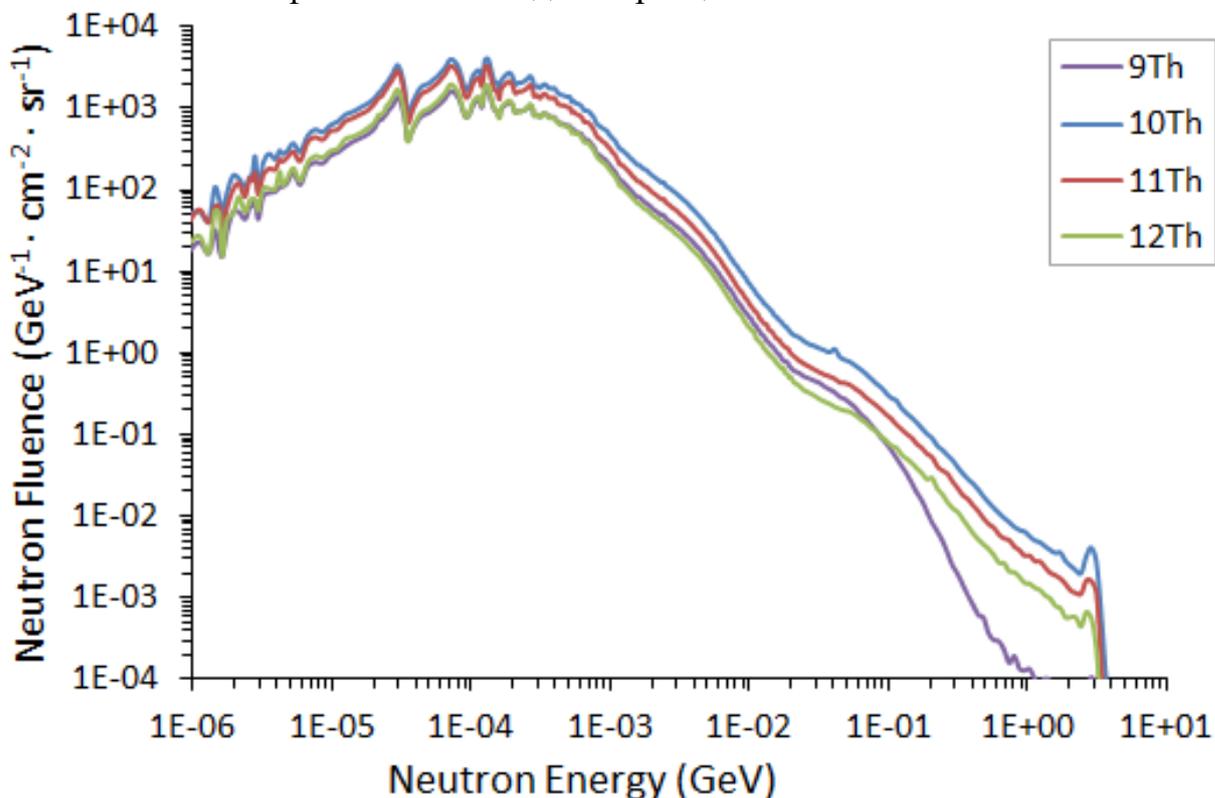


Рис.3. Двойной дифференциальный флюенс вторичных нейтронов для положения образцов 9Th, 10Th, 11Th и 12Th.

По результатам моделирования получена подробная информация о количестве делений в каждом урановом цилиндре установки «КВИНТА». Общее количество делений в установке, генерируемое одним дейтроном с энергией 6 ГэВ, составляет 51.3 и 14.9 делений из них, генерируются с помощью частиц с высокой энергией ($E > 20$ МэВ). От делений с высокоэнергетическими частицами ($E > 20$ МэВ), 0.34 деления генерируются дейтронами, 1.7 деления протонами, 11.3 деления нейтронами, 0.37 деления положительными пионами и 1.22 деления генерируются отрицательными пионами. Общее количество делений в 1-й секции составляет 2.7, во 2-й секции – 16.4, в 3-й – 16.0, в 4-й – 10.7, и в 5-й секции – 5.6. Количество делений с высокоэнергетическими частицами ($E > 20$ МэВ) в 1-й секции составляет 0.52, во 2-й секции - 4.96, в 3-й секции - 4.66, в 4-й секции - 3.08, и в 5-й секции - 1.72.

В четвертой главе диссертации «Эксперименты на сборке из природного урана со свинцовой защитой» представлены экспериментальные результаты и сравнение с расчетами, выполненными в ходе исследований взаимодействий ^{232}Th , ^{129}I и ^{127}I со вторичными нейтронами с использованием сборки мишени «КВИНТА» на пучках дейтронов с энергиями 2, 4 и 8 ГэВ от ускорителя Нуклотрон. Установка «КВИНТА», разработанная в сотрудничестве «Энергия и трансмутация радиоактивных отходов», использовалась для исследования различных фундаментальных аспектов электроядерных систем, в отношении реакций расщепления (spallation) и деления и трансмутации радиоактивных материалов. Природная урановая сборка со свинцовой защитой показана на Рис.4. Во время экспериментов образцы ^{232}Th , ^{129}I и ^{127}I были размещены внутри окна на левой стороне установки. Спектры гамма-лучей, излучаемых активированными образцами ^{232}Th , ^{129}I и ^{127}I , были обработаны и проанализированы при этом идентифицированы несколько десятков ядер продуктов. Для каждого из этих продуктов были определены скорости нейтронно-индуцированных реакций. Результаты показывают, что при увеличении энергии дейтронов также возрастают значения скоростей реакций практически для всех ядер продуктов. По-видимому, этот рост связан с увеличением потока вторичных нейтронов с увеличением энергии дейтронов.

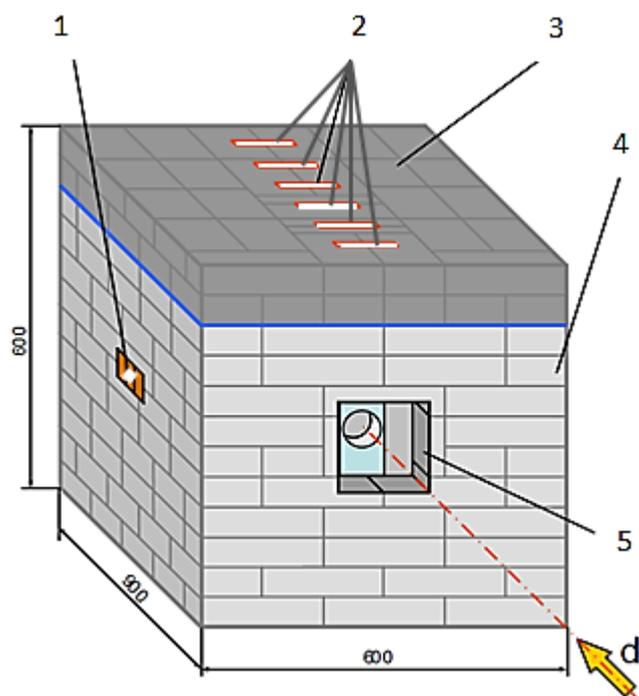


Рис.4. Общий вид установки «КВИНТА», где 1 – окно для размещения трансмутационных образцов, 2 – люки для установки образцов внутри урановыхборок между секциями, 3 – свинцовая крышка сборки, 4 – свинцовая защита, 5 – окно с размерами 15x15-см² для ввода пучка

Расчет флюенса нейтронов (Calc.2) выполнены с MCNPX-2.7 кодом с использованием моделей INCL4 (модель внутриядерного каскада) и ABLA (модель деления-испарения). Для реакции (n, γ) в ²³²Th сечения реакции были рассчитаны программой TALYS1.6, а для реакции (n,деление) были взяты из библиотеки ядерных данных TENDL-2009. Сечения реакции для реакций (n, γ), (n,4n) и (n,6n) в ¹²⁹I до 20 МэВ были взяты из библиотеки ENDF/B-VII, от 20 до 1000 МэВ, расчеты выполнены с использованием программы TALYS1.6. Сечения для (n, γ), (n,2n) и (n,4n) реакций в ¹²⁷I до 20 МэВ были взяты из библиотеки ENDF/B-VI, для энергии от 20 до 1000 МэВ рассчитывались с помощью программы TALYS1.6.

В расчетах деления скоростей реакций R(n,f) из экспериментальных данных использовались из следующих ядер: ^{85m}Kr, ⁸⁷Kr, ⁸⁸Kr, ^{91m}Y, ⁹¹Sr, ⁹²Y, ⁹²Sr, ⁹³Y, ⁹⁷Nb, ⁹⁷Zr, ¹³³I, ¹³⁴I, ¹³⁵I, ¹³⁵Xe, ¹³⁸Cs, ¹⁴²La и ¹⁴³Ce. Скорости реакции деления R(n,f) для ²³²Th составляют 0.59(3)E-27 при 2 ГэВ, 1.36(4)E-27 при 4 ГэВ, и 2.89(12)E-27 при 8 ГэВ. На Рис.5 приведены экспериментальные значения скоростей реакции (n, γ) и деления (n,f) в зависимости от энергии дейтрона в сравнениях с расчетами Calc.1 (MARS) и Calc.2 (MCNPX). В обоих случаях наблюдается линейный рост значений скорости реакции с увеличением энергии дейтрона. Отношение (n, γ)/(n,f) для разных энергий дейтронов составляет 15.5(23) при 2 ГэВ, 13.1(20) при 4 ГэВ и 14.9(22) при 8 ГэВ. Рассчитанные значения (Calc.2.) для этих отношений составляют 12.3 (2 ГэВ), 12.2 (4 ГэВ) и 11.2 (8 ГэВ).

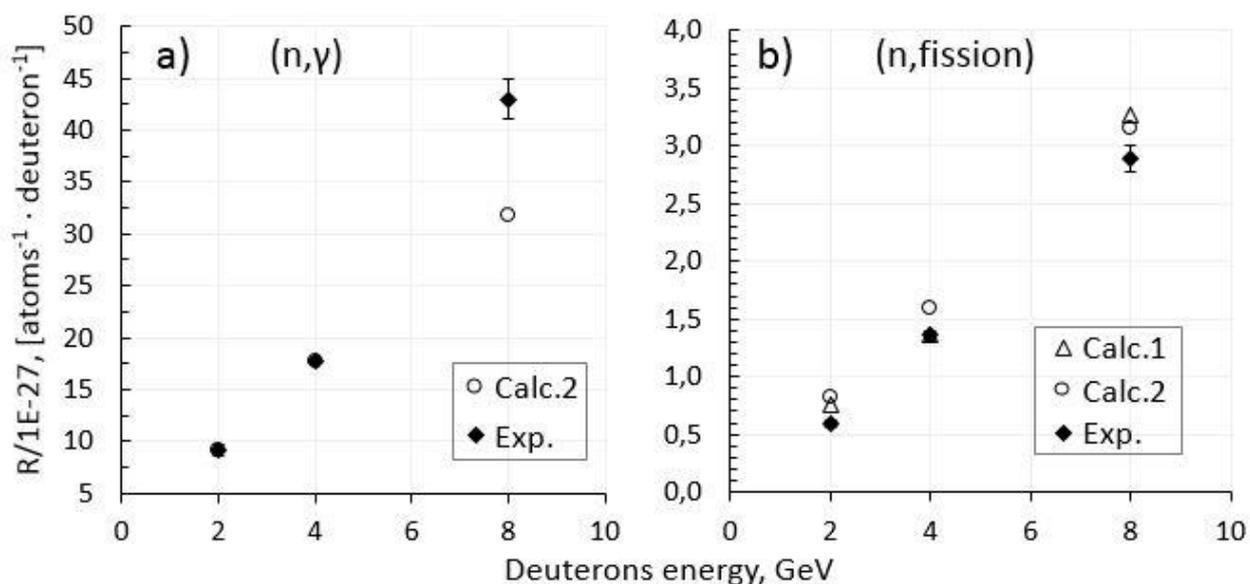


Рис.5. а) Сравнение экспериментальных и расчетных значений скоростей реакций (n,γ) в ^{232}Th при взаимодействиях со вторичными нейтронами, в зависимости от энергии дейтронов (расчетные данные при 2 и 4 ГэВ, перекрыты экспериментальными данными); б) Сравнение экспериментальных и расчетных значений скоростей реакций деления (n,f) при взаимодействии ^{232}Th со вторичными нейтронами, в зависимости от энергии дейтронов (расчетные данные Calc.1 при 4 ГэВ перекрыты экспериментальными данными)

В образцах ^{129}I присутствовала примесь стабильного изотопа ^{127}I . Для учета вклада ^{127}I , образцы ^{129}I облучались одновременно с чистыми ^{127}I образцами. Среди идентифицированных остаточных ядер ^{22}Na образуется одновременно в двух реакциях: $^{27}\text{Al}(n,\alpha 2n)^{22}\text{Na}$ ($E_{\text{thr}}=23.35$ МэВ) и $^{23}\text{Na}(n,2n)^{22}\text{Na}$ ($E_{\text{thr}}=12.96$ МэВ). ^{24}Na также образуется в реакциях $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ ($E_{\text{thr}}=3.25$ MeV) и $^{23}\text{Na}(n,\gamma)^{24}\text{Na}$. Доля ^{24}Na , образующегося в реакции (n,γ) при энергии дейтрона 2 ГэВ составляет 2.1%, 0.9% при 4 ГэВ и 0.6% при 8 ГэВ. Изотопы ^{22}Na и ^{24}Na образуются в основном из ^{27}Al из-за его большого количества. Вклад ^{24}Na , образующегося из ^{23}Na , был рассчитан с использованием значений скоростей реакций для ^{24}Na в образце ^{127}I . Мы предполагаем, что ^{82}Br является продуктом реакции $^{81}\text{Br}(n,\gamma)^{82}\text{Br}$ и примеси ^{81}Br присутствует в составе образца ^{129}I . Согласно нашим оценкам (Calc.2), примесь ^{81}Br может составлять не более 1.5(5)% в образце ^{129}I . ^{82}Br не наблюдалось в образцах ^{127}I . ^{123}I , ^{124}I и ^{126}I являются продуктами (n,7n), (n,6n) и (n,4n) реакций. ^{130}I является продуктом (n,γ) реакции. Среди идентифицированных остаточных ядер в образцах ^{127}I , ^{22}Na и ^{24}Na образуются в реакциях (n,2n) и (n,γ) на ^{23}Na . $^{118\text{m}}\text{Sb}$, $^{120\text{m}}\text{Sb}$ и ^{122}Sb являются продуктами (n,α6n) ($E_{\text{thr}}=44.11$ МэВ), (n,α4n) ($E_{\text{thr}}=27.42$ МэВ) и (n,α2n) ($E_{\text{thr}}=11.23$ МэВ) реакций. Радионуклиды ^{119}Te , ^{121}Te и $^{123\text{m}}\text{Te}$ являются продуктами реакций (n,t6n) ($E_{\text{thr}}=57.56$ МэВ), (n,t4n) ($E_{\text{thr}}=39.92$ МэВ) и (n,t2n) ($E_{\text{thr}}=23.01$ МэВ), соответственно. ^{120}I , ^{121}I , ^{123}I , ^{124}I и ^{126}I являются продуктами (n,8n) ($E_{\text{thr}}=62.18$ МэВ), (n,7n) ($E_{\text{thr}}=51.53$ МэВ), (n,5n) ($E_{\text{thr}}=33.59$ МэВ), (n,4n) ($E_{\text{thr}}=26.04$ МэВ), и (n,2n) ($E_{\text{thr}}=9.22$ МэВ) реакций. ^{128}I является продуктом

реакции (n,γ). В Таблице 1 приведены некоторые результаты сравнения экспериментальных и расчетных (Calc.1 и Calc.2) данных для ^{127}I и ^{129}I .

Таблица 1

Сравнение экспериментальных данных для ^{127}I и ^{129}I с расчетами

Nuclear reactions on ^{127}I and ^{129}I samples	2 GeV		4 GeV		8 GeV	
	Exp/Calc.1	Exp/Calc.2	Exp/Calc.1	Exp/Calc.2	Exp/Calc.1	Exp/Calc.2
$^{127}\text{I}(n,\gamma)^{128}\text{I}$		0.45(2)		0.59(2)		0.68(3)
$^{127}\text{I}(n,2n)^{126}\text{I}$	0.99(3)	0.59(2)	0.88(2)	0.59(2)	0.72(2)	0.54(2)
$^{127}\text{I}(n,4n)^{124}\text{I}$	1.17(5)	0.68(3)	1.00(8)	0.71(6)	0.90(5)	0.71(4)
$^{129}\text{I}(n,\gamma)^{130}\text{I}$		0.50(1)		0.58(1)		0.57(1)
$^{129}\text{I}(n,4n)^{126}\text{I}$	1.44(5)	0.73(3)	2.27(6)	1.48(4)	1.63(9)	1.23(7)
$^{129}\text{I}(n,6n)^{124}\text{I}$	1.98(20)	0.79(8)	2.38(17)	1.29(9)	1.35(24)	0.80(14)

Для экспериментального определения плотности нейтронов мы использовали 80% экспериментальных значений скоростей реакций, поскольку результаты расчетов (Calc.2) показывают, что нейтроны в интервале энергий ΔE добавляют вклад 80(5)% в скорость реакции. Флюенс нейтронов определяется решением уравнения (1). Усредненные значения сечений для энергетического интервала ΔE получены из результатов расчета по программе TALYS1.6.

$$R(A_r, Z_r) = \int_{E_{thr}(A_r, Z_r)}^{E_{max}} \sigma(A_r, Z_r, E_n) \varphi(E_n) dE_n \quad (1)$$

где $\sigma(A_r, Z_r, E_n)$ сечение реакции и $\varphi(E_n)$ флюенс нейтронов. На Рис.6 показан флюенс нейтронов в образце ^{127}I для энергетического интервала 10-120 МэВ. Флюенс определен с использованием экспериментальных результатов по реакциям $^{127}\text{I}(n, xn)$ и результатов моделирования с помощью MCNPX-2.7.

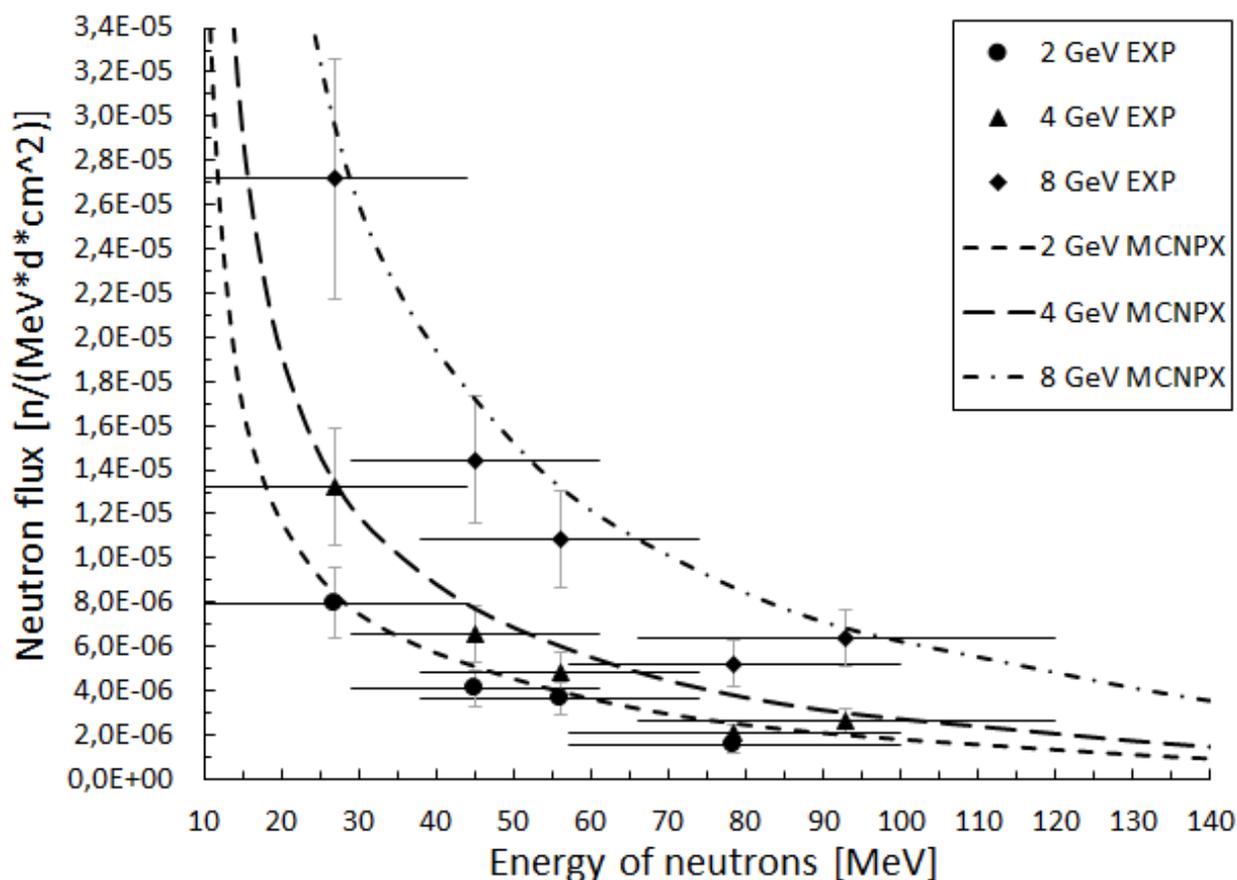


Рис.6. Экспериментальные и расчетные (MCNPX-2.7) значения нейтронного флюенса

Определено отношение массы образующего ^{130}I к массе ^{129}I для экспериментальной оценки возможности трансмутации с помощью реакции $^{129}\text{I}(n,\gamma)$. Это отношение в условиях настоящего эксперимента при энергии 2 ГэВ составляет $1.40(3)\text{E-}13$, при 4 ГэВ равно $2.94(6)\text{E-}13$ и при 8 ГэВ составляет $1.69(4)\text{E-}13$. Интенсивность пучков дейтронов при энергии 2 ГэВ составляет $1.29(3)\text{E+}09$, при энергии 4 ГэВ - $7.81(24)\text{E+}08$ и при энергии 8 ГэВ составляет $1.51(7)\text{E+}08$ дейтрон/с. Если вычислить проценты реакций трансмутации для условий: ток 10 мА и облучение в течение 30 дней, то они составят: при энергии 2 ГэВ - $0.082(2)\%$; при энергии 4 ГэВ - $0.190(4)\%$ и при энергии 8 ГэВ - $0.330(7)\%$. Эти расчеты позволяют оценить степень трансмутации при больших токах и временах облучения. По Calc.1 и по данным эксперимента основным вкладом $90(5)\%$ в трансмутацию ^{129}I является (n,γ) реакция при всех трех энергиях дейтронов (2, 4, 8 ГэВ).

В приложениях приведены таблицы с экспериментальными кумулятивными скоростями реакций для остаточных радионуклидов в образцах ^{232}Th , ^{129}I и ^{127}I .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам исследований, проведенных по теме диссертации «Изучение взаимодействия вторичных нейтронов с ядрами ^{232}Th , ^{129}I , и ^{127}I на урановой сборке «КВИНТА», облучаемой дейтронами с энергией 2, 4, 6, и 8 ГэВ», представлены следующие выводы:

1. Впервые сборка из естественного урана облучалась дейтронами с энергией 6 ГэВ. Образцы тория облучались вторичными нейтронами, генерируемыми в сборке. Полученные экспериментальные результаты сравнивались с результатами моделирования по коду FLUKA. Получено хорошее согласие экспериментальных и расчетных данных по образованию остаточных ядер ^{233}Pa , ^{231}Th и некоторых продуктов реакций деления, таких как ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , ^{115}Cd , ^{128}Sb , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce . Установлено что, для других продуктов реакций деления соотношения экспериментальных и расчетных кумулятивных скоростей реакций отличаются более чем в 3 раза. Выдвинуто предположение, что эти различия зависят от выхода изотопов в реакциях деления, вызванных частицами высоких энергий. Отношение экспериментальных и расчетных скоростей реакций деления для образцов тория находится в диапазоне 1.29-2.69.
2. По результатам моделирования получена подробная информация о количестве делений в каждом урановом стержне установки «КВИНТА». Общее количество делений в установке, генерируемое одним дейтроном с энергией 6 ГэВ, составляет 51.3 и 14.9 делений из них, генерируемых с помощью частиц с высокой энергией ($E > 20$ МэВ).
3. Впервые природная урановая сборка со свинцовой защитой облучалась пучками дейтронов с энергиями 2, 4 и 8 ГэВ. Во время эксперимента образцы ^{232}Th , ^{129}I и ^{127}I были размещены внутри окна на левой стороне установки «КВИНТА». Получены экспериментальные значения скорости реакции для образования всех измеренных ядер в образцах ^{232}Th , ^{129}I и ^{127}I , облученных вторичными нейтронами при энергиях дейтронов 2, 4 и 8 ГэВ. Результаты показывают, что при увеличении энергии дейтрона также возрастает значение скорости реакции для почти всех ядер продуктов. По-видимому, этот рост связан с увеличением потока вторичных нейтронов при увеличении энергии дейтронов.
4. Отношение экспериментальных значений скоростей реакций к расчетным для реакций (n,γ) , (n,f) в образцах ^{232}Th находится в интервале 0.72-1.36, а для реакций (n,γ) , (n,xn) в образцах ^{129}I и ^{127}I в интервале 0.45-2.38.
5. Впервые флюенсы нейтронов в интервале энергии 10-120 МэВ определены с использованием пороговых (n,xn) реакций в ^{127}I образцах. Расчетные и экспериментальные данные достаточно хорошо согласуются.
6. Определено отношение массы образующегося ^{130}I к массе ^{129}I с целью экспериментальной оценки возможности трансмутации ^{129}I с помощью реакции $^{129}\text{I}(n,\gamma)^{130}\text{I}$. Полученные данные показывают, что уничтожить

продукты реакций деления путем трансмутации с нынешними ускорителями нереально.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSC.27.06.2017.FM/T.33.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS,
ASTRONOMICAL INSTITUTE, NATIONAL UNIVERSITY OF
UZBEKISTAN**

**JOINT INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH
INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS**

KHUSHVAKTOV JURABEK HATAMOVICH

**STUDY OF SECONDARY NEUTRON INTERACTIONS WITH ^{232}Th , ^{129}I ,
AND ^{127}I NUCLEI AT THE URANIUM ASSEMBLY QUINTA
IRRADIATED BY 2, 4, 6, AND 8 GeV DEUTERONS**

01.04.08 - Physics of atomic nuclei and elementary particles, accelerator technics

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF THE DOCTOR OF
PHILOSOPHY (PhD) ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent – 2019

The subject of the PhD dissertation is registered by the Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2018.1. PhD/FM186.

The PhD dissertation has been carried out at the Institute of Nuclear Physics and Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia).

The abstract of the dissertation in three languages (uzbek, russian, english (resume)) is posted on the web page at the address of www.inp.uz and Information-educational portal "Ziyonet" (www.ziyonet.uz).

Scientific supervisor: **Yuldashev Bekhzod Sadykovich**
doctor of sciences in physics and mathematics, professor,
academician of Uzbekistan Academy of Sciences

Official opponents: **Muminov Tolib Musaevich**
doctor of sciences in physics and mathematics, academician

Kiyavitskaya Hanna Ivanovna
doctor of sciences in physics and mathematics, professor

Leading organization: **Institute for Theoretical and Experimental Physics named by
A.I. Alikhanov of National Research Centre «Kurchatov
Institute», Moscow, Russia**

Defense will take place «_____» _____2019 at _____ at the meeting of Scientific Council No. DSc.27.06.2017.FM/T.33.01 at the Institute of Nuclear Physics, Astronomical Institute, National University of Uzbekistan (Address: INP, Ulugbek, Tashkent, tel.: (+99871)289-31-41; fax: (+99871)289-36-65; e-mail: info@inp.uz).

The PhD dissertation is registered at Information-resource center of Institute of Nuclear Physics, number _____. Its possible to review it in the IRC (100214, INP, Ulugbek, Tashkent, tel.: (+99871)289-31-19).

Abstract of dissertation sent out on «_____» _____2019 year
(Mailing report № _____ dated _____2019)

M.Yu. Tashmetov
Chairman of scientific council on award of scientific
degree of doctor of sciences, D.Ph.M.S., professor

E.M. Tursunov
Scientific secretary of scientific council on award of
scientific degree of doctor of sciences,
D.Ph.M.S.

I. Nuritdinov
Chairman of scientific seminar under scientific council on
award of scientific degree of doctor of sciences,
D.Ph.M.S., professor

INTRODUCTION (abstract of PhD thesis)

Topicality and demand of the theme of dissertation. The accelerator-driven system (ADS) is recognized as a promising system for the purpose of nuclear waste transmutation and minimization of spent fuel radiotoxicity. The main reason is related to their work in sub-critical mode, based on the use of an accelerator as an external source. The presence of an external source allows such setup to operate in the subcritical mode, thereby providing safer conditions for transmutation or burning out of long-lived fission products and minor actinides. Natural uranium and thorium can be used as fuel materials for accelerator-driven system.

For many years there has been interest in utilizing ^{232}Th as a nuclear fuel since it is three to five times as abundant in the Earth's crust as uranium. A thorium reactor can be work due to the fission of ^{233}U , which is formed as a result of neutron capture by the ^{232}Th nucleus. The problem is that at the use of natural thorium produces an insufficient neutrons to sustain the fission reaction, and therefore enriched fuel is needed (by adding plutonium or ^{235}U). The same situation with natural uranium. In the last two decades, scientific efforts at Joint Institute for Nuclear Research (Dubna) have been concentrated on investigation of an original concept of deep sub-critical accelerator-driven systems. The Relativistic Nuclear Technology (RNT) with a core made of natural uranium or thorium is intended for nuclear energy production and transmutation of spent nuclear fuel employing spallation neutron field with a substantial contribution of fast neutrons.

In our republic, much attention is paid to fundamental and applied research in the field of such priority areas of nuclear science as the introduction of nuclear technologies in science and production, safe nuclear energy and the problem of radioactive waste disposal. The directions of these fundamental research and design, which are of great importance for the development of science in our country and their practical application, are reflected in the strategy of further development of the Republic of Uzbekistan in 2017-2021¹.

The studies conducted in this dissertation work correspond to the tasks stipulated in the Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan DP-4947 of February 2, 2017 "The strategy of further development of the Republic of Uzbekistan in 2017-2021", DP-5484 of July 19, 2018 "On measures for the development of nuclear energy in the Republic of Uzbekistan", in the Resolutions of the President RP-3855 of July 14, 2018 "About additional measures to increase the efficiency of commercialization of the results of scientific and scientific-technical activities" and RP-3365 of November 1, 2017 "On measures to further strengthen the infrastructure of scientific-research institutions and the development of innovation", as well as other legal acts adopted in this field.

¹ The Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan DP-4947 of February 2, 2017 "The strategy of further development of the Republic of Uzbekistan"

Conformity of research to priority directions of development of science and technologies of the Republic of Uzbekistan. The dissertation research was carried out in accordance with the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan: II. “Power, energy and resource saving”.

Degree of study of the problem. To date, the leading international researchers conducted a number of experimental studies in the field of accelerator-driven subcritical systems and in the field of radioactive waste transmutation. Czech (Adam J. et al.) and Russian (Pronskikh V.S., Solnyshkin A.A., Tsoupko-Sitnikov V.M.) scientists studied the interaction of secondary neutrons with the ^{129}I and ^{127}I nuclei on the massive lead target “GENERATOR” (17 kg lead) irradiated with 0.66 GeV protons. At the following work, Czech (Adam J., Katovsky K.) and Russian (Krivopustov M.I., Solnyshkin A.A., Tsoupko-Sitnikov V.M.) scientists have investigated the possibility of transmuting the radionuclide ^{129}I on a massive lead target surrounded by a uranium blanket “Energy plus transmutation” (28.7 kg lead, 206.4 kg uranium) irradiated with 0.7, 1, 1.5 and 2 GeV protons. The same group of scientists studied the interaction of secondary neutrons with ^{232}Th nuclei on the “Energy plus transmutation” target irradiated with 1.6 GeV deuterons.

With a group of scientists from Czech Republic (Adam J., Katovsky K.), India (Bhatia Ch., Kumar V.), Belarus (Khilmanovich A.M., Marcinkevich B.A., Zhuk I.V., Potapenko A.S.) and Russia (Pronskikh V.S., Solnyshkin A.A., Tyutyunnikov S.I., Tsoupko-Sitnikov V.M.) were measured the rates of (n,f), (n, γ) and (n,2n) reactions in ^{232}Th on the lead-graphite target “GAMMA-3” (34 kg lead, 1230 kg graphite) irradiated with 2.33 GeV deuterons. Australian researchers (Hashemi-Nezhad R.S., Asquith N.L.) measured the rates of $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$ and $^{232}\text{Th}(n,f)$ reactions on the target “GAMMA-3” irradiated with 1.6 GeV deuterons.

Beginning in 2011, experiments with the 512 kg subcritical natural uranium assembly QUINTA were conducted for the first time. It was found that upon irradiation of above targets, the energy spectrum and the flux of generated neutrons substantially differ from the subcritical assembly QUINTA and in the above experiments have not been determined the fast neutron fluences using the threshold $^{127}\text{I}(n,xn)$ reactions.

Connection of dissertational research with the plans of scientific-research works. The dissertational work was carried out within the framework of problem-thematic plans and international cooperation of the Joint Institute for Nuclear Research on the topic 02-1-1107-2011/2019 “Development and creation of the prototype of a complex for radiotherapy and applied researches on beams of heavy ion on the Nuclotron-M” and the research project of the Institute of Nuclear Physics ASRU on the theme of FA-Atech-2018-166 “Development of the fundamentals of a subcritical reactor based on the NG-150 neutron generator of INP”.

The aim of the research is the determination of reaction rate for residual nuclei in the interaction of secondary neutrons with ^{232}Th , ^{129}I , and ^{127}I nuclei on the natural uranium assembly QUINTA irradiated with 2, 4, 6, and 8 GeV deuteron beams of Nuclotron accelerator.

The tasks of the research:

to describe both past and state-of-the-art research projects on accelerator-driven systems;

to take part in preparation and realization of an experiment with a spallation target and the beam of deuterons with an energies 2, 4, 6 and 8 GeV;

to carry out measurements of irradiated samples employing methods of gamma-ray spectrometry with HPGe detectors;

to analyze the acquired spectra, determine of reaction rate for the identified radionuclides;

to learn and perform Monte Carlo simulations using FLUKA and Geant4 codes for determine the fluence of secondary particles, the number of fission reactions, and the number of produced isotopes in the spallation target, and in the measuring samples;

to determine the fluence of neutrons using the threshold (n,xn) reactions in the ^{127}I samples;

to experimentally assess the possibility of transmutation of the long lived radionuclide ^{129}I ;

to compare the experimental results with the results of Monte Carlo simulations.

The objects of the research are the natural uranium assembly QUINTA, thorium and iodine samples.

The subjects of the research are interactions of relativistic deuterons with ^{238}U nuclei and neutrons with ^{232}Th , ^{129}I and ^{127}I nuclei.

The methods of the research. Neutron-activation method of analysis, gamma-ray spectrometry, Monte Carlo simulations.

The scientific novelty of the research is the follows:

a method to determine of neutron fluences using the threshold $^{127}\text{I}(n,xn)$ reactions was developed;

for the first time, the fluences of neutrons with energies from 10 to 120 MeV were determined using the threshold (n,xn) reactions in the ^{127}I samples;

at the results of Monte Carlo simulations are taken detailed information about the number of fission reactions in the each 298 natural uranium cylinders of QUINTA setup;

the ratio of the mass of the produced ^{130}I to the mass of ^{129}I was determined, in order to experimentally assess the possibility of transmutation by means of the $^{129}\text{I}(n,\gamma)$ reaction in the QUINTA setup.

Practical results of the research are as follows:

for the first time, experimental studies have been carried out on the irradiation of deep subcritical assembly QUINTA by deuteron beams with energies of 2, 4, 6, and 8 GeV. The subcritical assembly QUINTA consists of 298 cylinders of natural uranium;

the spectra of gamma rays emitted by the activated ^{232}Th , ^{129}I , and ^{127}I samples have been analyzed. For each of identified residual nuclei, reaction rates have been determined;

obtained experimental results for ^{232}Th samples were compared with the results of simulations. On comparisons were found of good agreements for residual nuclei ^{233}Pa , ^{231}Th and for several products of fission reactions such as ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , ^{115}Cd , ^{128}Sb , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce .

Reliability of the research results is justified by the high experimental level of performance, using reliable methods to measurement and processing experimental data, using modern codes to Monte Carlo simulation, such as FLUKA, MCNPX-2.7, MARS-15 and Geant4, good agreement between the simulation results and obtained experimental data.

Scientific and practical significance of the research results. The scientific significance of the research results is determined by the ability of method to determine the fluence of neutrons using $^{127}\text{I}(n,xn)$ threshold reactions to use to determine the fluence of fast neutrons in the future accelerator driven systems and fast reactors.

The practical significance of the results of research lies in the fact that the results of experimentally assess the possibility of transmutation of long lived radionuclide ^{129}I and yield of residual nuclei ^{233}Pa , ^{231}Th and of several products of fission reactions such as ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{91}Sr , ^{92}Sr , ^{92}Y , ^{93}Y , ^{97}Zr , ^{99}Mo , ^{103}Ru , ^{105}Ru , ^{105}Rh , ^{115}Cd , ^{128}Sb , ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{133}I , ^{135}I , ^{135}Xe , ^{140}Ba , ^{142}La , ^{143}Ce can be used in the design of industrial accelerator driven systems for the transmutation of radioactive waste.

Application of the research results. Based on the results of studying of secondary neutron interactions with ^{232}Th , ^{129}I , and ^{127}I nuclei at the uranium assembly QUINTA irradiated by 2, 4, 6, and 8 GeV deuterons:

developed method to determine fluence of neutrons using $^{127}\text{I}(n,xn)$ threshold reactions, has been used in the experiments of international collaboration Energy and Transmutation of Radioactive Waste, which were held at the Joint Institute for Nuclear Research (Dubna, Russia) in 2012-2015 (letter from the Laboratory of High Energy Physics of JINR No. 100-26/83 dated March 5, 2019). Using this method allowed to determine of neutron fluences with energies from 10 to 120 MeV and to benchmark the results of Monte Carlo simulations;

measured rate of $^{129}\text{I}(n,\gamma)^{130}\text{I}$ reaction in the QUINTA setup allowed to preliminary assess the possibility of transmutation of the long lived radionuclide ^{129}I for experiments on irradiating a massive lead target with 660 MeV protons, which were carried out at the Phasotron JINR.

Approbation of the work. The research results were reported in the form of reports and tested at 7 international scientific conferences.

Publication of results. On the dissertation theme there were published 12 scientific works, including 5 scientific papers in international scientific journals recommended by the Supreme Attestation Commission of the Republic of Uzbekistan for publishing basic scientific results of dissertation theses.

Structure and volume of dissertation. The dissertation consists of an introduction, four chapters, conclusion, two appendixes and a bibliography. The size of the dissertation is 108 pages.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (1 часть; part 1)

1. Balabekyan A.R., Demekhina N.A., Karapetyan G.S., Drnoyan D.R., Zhemelik V.I., Adam J., Zavorka L., Solnyshkin A.A., Tsoupko-Sitnikov V.M., Khushvaktov J., Karayan L., Guimarães V., Deppman A., Garcia F. Target residues formed in the 4.4 GeV deuteron-induced reaction on gold //Physical Review C. - American Physical Society (USA), 2014. - vol. 90. - id. 054612 (№3, Scopus, IF=3.30)
2. Adam J., Baldin A.A., Chilap V., Furman W., Katovsky K., Khushvaktov J., Kumar V., Pronskikh V., Mar'in I., Solnyshkin A., Suchopar M., Tsupko-Sitnikov V., Tyutyunnikov S., Vrzalova J., Wagner V., Zavorka L. Measurement of the high energy neutron flux on the surface of the natural uranium target assembly QUINTA irradiated by deuterons of 4 and 8 GeV energy //Physics Procedia.- Elsevier, 2015. - vol.80. - pp. 94-97 (№3, Scopus, IF=0.64)
3. Khushvaktov J., Adam J., Baldin A.A., Chilap V.V., Furman V.I., Sagimbaeva F., Solnyshkin A.A., Stegailov V.I., Tichy P., Tsoupko-Sitnikov V.M., Tyutyunnikov S.I., Vespalec R., Vrzalova J., Yuldashev B.S., Wagner V., Zavorka L., Zeman M. Interactions of secondary particles with thorium samples in the setup QUINTA irradiated with 6 GeV deuterons //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. - Elsevier, 2016. - vol.381. - pp. 84-89 (№3, Scopus, IF=1.32)
4. Adam J., Chilap V.V., Furman V.I., Kadykov M.G., Khushvaktov J., Pronskikh V.S., Solnyshkin A.A., Stegailov V.I., Suchopar M., Tsoupko-Sitnikov V.M., Tyutyunnikov S.I., Vrzalova J., Wagner V., Zavorka L. Study of secondary neutron interactions with ^{232}Th , ^{129}I , and ^{127}I nuclei with the uranium assembly "QUINTA" at 2, 4, and 8 GeV deuteron beams of the JINR Nuclotron accelerator //Applied Radiation and Isotopes. - Elsevier, 2016. - vol.107. - pp. 225-233 (№3, Scopus, IF=1.12)
5. Khushvaktov J.H., Adam J., Baldin A.A., Furman W.I., Gustov S.A., Kish Yu.V., Solnyshkin A.A., Stegailov V.I., Svoboda J., Tichy P., Tsoupko-Sitnikov V.M., Tyutyunnikov S.I., Vespalec R., Vrzalova J., Wagner V., Yuldashev B.S., Zavorka L., Zeman M. Monte Carlo simulations and experimental results on neutron production in the uranium spallation target QUINTA irradiated with 660 MeV protons //Applied Radiation and Isotopes. - Elsevier, 2018. - vol.137. - pp. 102-107 (№3, Scopus, IF=1.12)

II бўлим (2 часть; part 2)

6. Адам И., Врзалова И., Гайсак И., Заворка Л., Киш Ю., Корнеев С.В., Максим М., Марцынкевич Б.А., Мухаммедов С., Солнышкин А.А., Стегайлов В.И., Хильманович А.М., Хушвактов Ж.Х., Цупко-Ситников В.М. Восстановление спектра вторичных нейтронов на свинцовой мишени

- при облучении её протонами 660 МэВ //XVII молодежная научная конференция Объединения молодых ученых и специалистов (ОМУС). - Дубна (Россия), 2013.- С. 149-154
7. Adam J., Chilap V.V., Furman V.I., Khushvaktov J., Pronskikh V.S., Solnyshkin A.A., Stegailov V.I., Suchopar M., Tsoupko-Sitnikov V.M., Tyutyunnikov S.I., Vrzalova J., Wagner V., Zavorka L. Study of secondary neutron interactions with nuclei ^{232}Th , ^{129}I , ^{127}I on the uranium assembly "QUINTA" Nuclotron JINR on deuterons beam with energy 2, 4, 8 GeV //22nd International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-22): "Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics". - Dubna (Russia), 2014. - pp. 22
 8. Adam J., Chilap V.V., Furman V.I., Khushvaktov J., Kish Yu., Pronskikh V.S., Solnyshkin A.A., Stegailov V.I., Suchopar M., Tsoupko-Sitnikov V.M., Tyutyunnikov S.I., Vespalec R., Vrzalova J., Wagner V., Yuldashev B.S., Zavorka L., Zeman M. Study of secondary neutron interactions with ^{232}Th , ^{129}I , and ^{127}I nuclei with the uranium assembly "QUINTA" at 2, 4, and 8 GeV deuteron beams of the JINR Nuclotron accelerator //23rd International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-23): "Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics". - Dubna (Russia), 2015. - pp. 19
 9. Adam J., Chilap V.V., Furman V.I., Khushvaktov J., Kish Yu., Pronskikh V.S., Solnyshkin A.A., Stegailov V.I., Suchopar M., Tsoupko-Sitnikov V.M., Tyutyunnikov S.I., Vespalec R., Vrzalova J., Wagner V., Yuldashev B.S., Zavorka L., Zeman M. Study of secondary neutron interactions with ^{232}Th , ^{129}I , and ^{127}I nuclei with the uranium assembly "QUINTA" at 2, 4, and 8 GeV deuteron beams of the JINR Nuclotron accelerator //The XIX International Scientific Conference of Young Scientists and Specialists (AYSS-2015). - Dubna (Russia), 2015. - pp. 23
 10. Adam J., Chilap V.V., Furman V.I., Khushvaktov J., Kish Yu., Pronskikh V.S., Solnyshkin A.A., Stegailov V.I., Suchopar M., Tsoupko-Sitnikov V.M., Tyutyunnikov S.I., Vespalec R., Vrzalova J., Wagner V., Yuldashev B.S., Zavorka L., Zeman M. Study of secondary neutron interactions with ^{232}Th , ^{129}I , and ^{127}I nuclei with the uranium assembly "QUINTA" at 2, 4, and 8 GeV deuteron beams of the JINR Nuclotron accelerator //IV Annual Conference of Young Scientists and Specialists "Neutron and Neutrinos: Fundamental Properties, Experiments and Applied Research" (Alushta, 2015). - Alushta (Russia), 2015.- pp. 25
 11. Khushvaktov J., Adam J., Baldin A.A., Chilap V.V., Furman V.I., Khabipov N., Sagimbaeva F., Solnyshkin A.A., Stegailov V.I., Tichy P., Tsoupko-Sitnikov V.M., Tyutyunnikov S.I., Vespalec R., Vrzalova J., Yuldashev B.S., Wagner V., Zavorka L., Zeman M. Interaction of secondary particles with the thorium samples in the QUINTA setup irradiated with 6 GeV deuterons //24th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-24): "Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics". - Dubna (Russia), 2016. - pp. 57

12. Khushvaktov J.H., Adam J., Baldin A.A., Furman W.I., Gustov S.A., Kish Yu.V., Solnyshkin A.A., Stegailov V.I., Svoboda J., Tichy P., Tsoupko-Sitnikov V.M., Tyutyunnikov S.I., Vespalec R., Vrzalova J., Wagner V., Yuldashev B.S., Zavoroka L., Zeman M. Monte Carlo simulations and experimental results on neutron production in the spallation target QUINTA irradiated with 660 MeV protons //25th International Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei (ISINN-25): "Fundamental Interactions & Neutrons, Nuclear Structure, Ultracold Neutrons, Related Topics". - Dubna (Russia), 2017. - pp. 65

Авторефератнинг ўзбек, рус ва инглиз тилларидаги нусхалари
« Тил ва адабиёт таълими » таҳририясида таҳрирдан ўтказилди.
(10.06.2019 йил)