

ВИСНОВОК
про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації Якименка Івана Івановича
на тему «Дослідження механізмів взаємодії швидких нейtronів з
речовиною монокристалічних та композитних оксидних сцинтиляторів»
на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали
з галузі знань 10 – Природничі науки

1. Обґрунтування вибору теми дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт університету.

Вибір теми дисертаційної роботи «Дослідження механізмів взаємодії швидких нейtronів з речовиною монокристалічних та композитних оксидних сцинтиляторів» обумовлений необхідністю розробки нових високоефективних детекторів швидких нейtronів як для науково-дослідних цілей, так і для прикладного застосування в сферах контролю несанкціонованого поширення радіоактивних матеріалів та матеріалів поділу (^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu). Створення нових високоефективних детекторів швидких нейtronів є актуальною задачею як для науково-дослідних цілей та і прикладного застосування в контролюючих сферах народного господарства. Перш за все це обумовлено активною інтеграцією та не відворотним переходом на ядерні джерела живлення. Постає проблема безпечної роботи як з відпрацьованим так і новоствореним паливом. Контроль можливого незаконного поширення радіоактивних матеріалів вирішують встановленням радіаційних порталів, пішохідних моніторів, використанням особистих приладів дозиметрії. Сучасні інспекційні системи з використанням ^{3}He або ^{10}B лічильників швидких нейtronів мають незначну ефективність реєстрації $\sim 10\%$, обумовлену низькою ефективністю уповільнення швидких нейtronів. В цих системах ефективна чутливість детектора досягається саме за рахунок збільшення об'єму детектора так як збільшення товщини сповільнювача підвищує вірогідність уповільнення нейtronів високих енергій. Наприклад орієнтовна вага таких систем складає понад 100 кілограмів. Великі габаритні розміри, необхідність місткого супровідного обладнання створили передумови для пошуку шляхів створення ефективних детекторів швидких нейtronів, що матимуть менші габарити за порівняної або вищої ефективності реєстрації гамма-нейtronного випромінення.

Мета і завдання роботи:

1. Пошук взаємозв'язку механізмів взаємодії швидких нейtronів з ядрами сцинтиляторів з метою виявлення генетичного зв'язку продуктів реакцій для підвищення ефективності реєстрації.

2. Створення моделі відгуку сцинтилятора для цілей пошуку та розробки нових детекторів швидких нейtronів.
3. Розробка вимірювального тракту з метою реєстрації низькоенергетичних гамма-квантів із переходів, що збуджуються у реакціях взаємодії швидких нейtronів.
4. Виявлення найбільш продуктивних шляхів втрати енергії швидких нейtronів в детекторі.
5. Виявлення механізмів генерації каскадів гамма-квантів в реакціях $(n, n' \gamma)_{in}$, $(n, n' \gamma)_{res}$, $(n, \gamma)_{res}$ та вторинних нейtronів.

Об'єктом дослідження є:

1. Механізми взаємодії швидких нейtronів з ядрами сцинтиляторів, що містяться в основі ефективності реєстрації швидких нейtronів.
2. Гамма множинність N_γ з реакцій взаємодії швидких нейtronів.
3. Відгук детекторів при реєстрації швидких нейtronів.

Предметом дослідження:

1. Підвищення ефективності реєстрації швидких нейtronів сцинтиляторами $ZnWO_4$, $CdWO_4$, $Bi_4Ge_3O_{12}$, KDP: TL^+ , KDP: Ce^{3+} , UPS-923A, Gd_2SiO_5 , шляхом виділення імпульсного відгуку, що продукується механізмами у сцинтиляторах.
2. Зниження порогу виявлення джерела швидких нейtronів у неперервному режимі моніторингу порталевими системами.

Методи досліджень. Реєстрації ефективності сцинтиляційних детекторів у сферичної геометрії з використанням джерел ^{239}Pu -Be, ^{252}Cf , ^{137}Cs ; чисельні розрахунки відгуків детектора на основі розробленої моделі; варіація ізотопного складу сцинтилятора, використання детекторів різного об'єму; часова фільтрація імпульсів відгуку детектора (однофотонний 7 нс та спектрометрія 1 мкс); перевірка роботи детекторів вимірами порогу виявлення джерела швидких нейtronів в порталевому режимі. Аналіз гамма множинності в реакціях на швидких нейtronах.

Робота виконана на кафедрі фізики ядра та високих енергій імені О.І.Ахієзера ННІ «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна в рамках НДР, у виконанні яких здобувач безпосередньо приймав участь як виконавець:

1. № держреєстрації 0118U002031 «Індуковані електрослабкими взаємодіями рідкісні процеси і розпади та структурні ефекти в сильних і електромагнітних взаємодіях».

2. № держреєстрації 0119U002533 «Дослідження транспорту швидких частинок у мультиплікуючих середовищах та в інтенсивних зовнішніх полях» 2019 – 2020 рр.

3. № держреєстрації 0120U102294 «Енергетична залежність і рефракційні властивості взаємодії легких ядер з ядрами» 2020 р.

2. Формулювання наукового завдання, нове вирішення якого отримано в дисертації.

Дисертація **Якименко Івана Івановича** *пов'язана з вирішенням актуальної наукової задачі* – підвищенням ефективності реєстрації, пошуком нових детекторів швидких нейtronів через дослідження механізмів взаємодії швидких нейtronів з речовиною монокристалічних та композитних оксидних сцинтиляторів.

3. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна.

Наукова новизна результатів дослідження, отриманих особисто здобувачем, полягає у наступному:

Вперше:

1. Встановлено генетичний взаємозв'язок механізмів взаємодії швидких нейtronів з ядрами сцинтиляторів з апаратним відгуком сцинтилятора.
2. Виявлено найбільш продуктивні механізми втрати енергії швидких нейtronів в речовині сцинтиляторів та шляхи генерації каскадних гамма квантів.
3. Виявлено зв'язок механізмів генерації каскадів гамма-квантів в реакціях $(n, n' \gamma)_{in}$, $(n, n' \gamma)_{res}$, $(n, \gamma)_{res}$ та вторинних нейtronів, компаунд ядрами та кінцевими ядрами.
4. Вперше використано генетичний зв'язок каскадів продуктів реакцій непружного, резонансного розсіяння та захвату швидких нейtronів на ядрах сцинтилятора ZWO, підтверджено патентом України.
5. Вперше створено новий високоефективний детектор швидких нейtronів ZWO з використанням трьох механізмів $(n, n' \gamma)_{in}$, $(n, n' \gamma)_{res}$, $(n, \gamma)_{res}$.
6. Вперше створено новий детектор KDP з високою селективністю до швидких нейtronів у порівнянні з гамма квантами.
7. Розроблено та створено новий швидкодіючий широкополосний передпідсилювач для реєстрації відгуку сцинтилятора та виділення вкладів механізмів взаємодії в однофотонному режимі реєстрації.
8. Розроблено та створено швидкодіючий радіаційний монітор для виявлення у неперервному режимі порогу виявлення джерела швидких нейtronів для досліджуваного сцинтилятора.

Дістала подальшого розвитку модель відгуку сцинтилятора для цілей пошуку та розробки нових детекторів швидких нейтронів.

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

Достовірність наукових результатів, одержаних Якименко І. І., при проведенні досліджень за темою дисертаційної роботи, забезпечується використанням фундаментальних підходів і методів комп’ютерної і математичної фізики. Основні теоретичні та експериментальні результати опубліковані в індексованих журналах та доповідалися на наукових конференціях. Висновки дисертації є обґрунтованими.

5. Рівень теоретичної підготовки здобувача, його особистий внесок у розв'язання конкретного наукового завдання. Рівень обізнаності здобувача з результатами наукових досліджень інших учених.

Якименко І. І. показав себе як фізик-експериментатор, що має необхідні знання для роботи з ядерною електронікою, за час роботи показав, що самостійно може проектувати та впроваджувати супутнє обладнання для забезпечення експерименту. Обізнаний у сучасному рівні техніки в своїй галузі, здатен підібрати оснащення фізичної лабораторії для виконання наукової роботи. Може розробити план роботи та поставити завдання колективу, підготовлений до самостійної роботи.

Теоретичну основу дослідження складають фізика детекторів, комп’ютерна фізика та числові методи розрахунків.

Особистим внеском варто відзначити роботу з програмування мікроконтролерів та роботу з розробки друкованих плат, що знадобилися для виконання наукової роботи.

Аналіз вступу та першого розділу дисертаційної роботи вказує на високий рівень підготовки здобувача який ознайомлений результатами досліджень вітчизняних та закордонних фахівців за темою дисертації.

6. Наукове та практичне значення роботи.

Здобуті в процесі роботи експериментальні та теоретичні данні щодо механізмів взаємодії швидких нейтронів з речовиною монокристалічних та композитних оксидних сцинтиляторів можуть бути використані при конструюванні детекторів нейtronного випромінення. Результати експериментів щодо вимірювань ефективності реєстрації та розробленої моделі можуть бути використані для вибору матеріалів при проектуванні сцинтиляційного детектора, для створення апаратного забезпечення експериментів. Розроблена методика та обладнання є основою для продовження досліджень взаємодії швидких нейтронів з речовиною монокристалічних та композитних оксидних сцинтиляторів.

Розроблено програмно-апаратний комплекс оцінки відстані виявлення джерел радіаційного випромінення з заданою надійністю типу “Портал”, що працює за розробленою методикою реєстрації швидких нейtronів та є базою для експериментальної розробки систем моніторингу для контрольно-пропускних пунктів, контрольних радіаційних моніторів.

7. Використання результатів роботи.

Результати дисертаційної роботи Якименко І. І., як теоретичний матеріал так і розроблене обладнання використовуються кафедрі фізики ядра та високих енергій імені О. І. Ахієзера ННІ «Фізико-технічний факультет» Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна та були використані при виконанні вказаних вище НДР.

8. Повнота викладу матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок здобувача в публікації.

Матеріали дисертації опубліковано в 11 наукових працях, серед яких 5 публікацій в журналах, що входять до міжнародних наукометрических баз Scopus та Web of Science, 4 тези конференцій, 2 патенти України:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Наукові праці у наукових фахових виданнях України, та публікації, які входять до наукометричної бази Scopus, WoS:

1. Onyshchenko G., **Yakymenko I.**, Grynyov B., Ryzhikov V., Voronov O., Naydenov S. Counting Efficiency and Neutron/Gamma Ratio for KDP: TL⁺ and UPS-923A Scintillators in a Single Photon Detection Mode // East European Journal of Physics. 2020. No. 3. P. 54–61.
(Web of Science, Scopus)

(Особистий внесок здобувача: здійснював експериментальне визначення ефективності детектування швидких нейtronів сцинтиляторами KDP:TL⁺, пластиковим сцинтилятором типу UPS-923A, здійснив теоретичний аналіз значень ефективності KDP: TL⁺ та UPS-923A, налаштував вимірювальний тракт)

2. Onyshchenko G. M., Ryzhikov V. D., **Yakymenko I. I.**, Shchus' O. P. The Threshold of Detection of Fission Materials by ZnWO₄ and Bi₄Ge₃O₁₂ Scintillation Detectors // East European Journal of Physics. 2019. No. 4. P. 91–94. **(Web of Science)**

(Особистий внесок здобувача: здійснював експериментальне дослідження відгуку монокристалічних детекторів ZnWO₄, Bi₄Ge₃O₁₂ на опромінення швидкими нейtronами, створив широкосмуговий передпідсилювач для реєстрації відгуку детектора, брав участь в аналізі та обробці результатів,

налаштовував вимірювальний тракт, створив систему моніторингу для визначення порогу виявлення джерел радіаційного випромінення)

3. Onyshchenko G., Ryzhikov V., **Якуменко І.**, Khodusov V., Naydenov S., Opolonin A., Makhota S. The Investigation of Mechanisms of Fast Neutron Registration in Oxide Scintillators // East European Journal of Physics. 2019. No. 3. P. 54–62.
(Web of Science)

(Особистий внесок здобувача: брав участь в отриманні нових експериментальних даних щодо вкладів механізмів взаємодії швидких нейtronів з ядрами оксидних сцинтиляторів ZWO ($ZnWO_4$), CWO ($CdWO_4$), BGO ($Bi_4Ge_3O_{12}$) у ефективність реєстрації, розробив метод аналізу вкладів механізмів реєстрації швидких нейtronів у ефективність реєстрації, налаштовував вимірювальний тракт)

4. Ryzhikov V., Onyshchenko G., **Якуменко І.**, Naydenov S., Opolonin A., Makhota S. Research of the Single Crystal and Multilayer Composite Detectors Response Under Irradiation by Fast Neutrons // East European Journal of Physics. 2019. No. 2. P. 11–18.

(Web of Science)

(Особистий внесок здобувача: здійснював експериментальне дослідження відгуку монокристалічних та багатошарових детекторів ZWO ($ZnWO_4$), CWO ($CdWO_4$), BGO ($Bi_4Ge_3O_{12}$), брав участь в аналізі та обробці результатів, налаштовував вимірювальний тракт)

5. Воронов А. П., Найденов С. В., Притула И. М., Онищенко Г. М., Щусь А. Ф., **Якименко И. И.** Сцинтиляционные монокристаллы KDP:Tl и KDP:Ce активированные таллием и церием для селективного детектирования быстрых нейтронов // East European Journal of Physics. 2018. Vol. 5, No 3. P. 45–52.

(Web of Science)

(Особистий внесок здобувача: здійснював експериментальне визначення ефективності детектування швидких нейтронів сцинтиляторами KDP:Tl+, KDP:Ce3+, брав участь в аналізі та обробці результатів, налаштовував вимірювальний тракт)

Патенти:

6. Детектор нейтронів: пат. 127053 Україна. № у 2018 02276; заявл. 05.03.2018; опубл. 10.07.2018, Бюл. № 13

(Особистий внесок здобувача: автор I. I. Якименко 100%)

7. Спосіб реєстрації швидких нейтронів: пат. 145800 Україна. № у 2020 03892; заявл. 30.06.2020; опубл. 06.01.2021, Бюл. № 1

(Особистий внесок здобувача: розробка швидкодіючого передпідсилювача, співавтор в створенні способу реєстрації швидких нейтронів I. I. Якименко 34%, В. Д. Рижиков 33%, Г. М. Онищенко 33%)

Наукові праці апробаційного характеру:

8. Grinyov B. V., Ryzhikov V. D., Onyshchenko G. M., **Yakymenko I. I.**, Naydenov S. V, Opolonin O. D., Makhota S. V. The time analysis of the fast impulse response from composite detectors based on scintillators: ZWO, GSO, BGO to fast neutrons // Sixth International Conference: ENGINEERING OF SCINTILLATION MATERIALS AND RADIATION TECHNOLOGIES ISMART 2018, 9–12 October 2018. : abstr. Minsk, 2018. P. 46–47.
9. Рижиков В. Д., Онищенко Г. М., **Якименко І. І.**, Найденов С. В., Ополонин А. Д., Махота С. В. Отклик монокристаллических и многослойных детекторов при облучении быстрыми нейтронами // XVII КОНФЕРЕНЦИИ ПО ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ И ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ, 26–29 марта 2019 г. : тез. докл. Харьков, 2019. С. 96.
10. Рижиков В. Д., Онищенко Г. М., **Якименко І. І.**, Найденов С. В., Ополонін О. Д., Махота С. В. Вплив параметрів резонансної області ядер сцинтилятора на ефективність реєстрації швидких нейtronів // XV INTERNATIONAL SCIENTIFIC and TECHNICAL CONFERENCE YOUNG SCIENTISTS and SPECIALISTS: PROBLEMS OF MODERN NUCLEAR POWER, 13–15 november 2019. : abstr. Kharkiv, 2019. P. 25.
11. Ayzatskiy M. I., Vodin O. M., Deiev O. S., Dronov R. M., Korda L. P., Kushnir V. A., Mitrochenko V. V., Olejnik S. M., Repikhov O. A., Shramenko B. I., Bezshyyko O. A., Golinka-Bezshyyko L. J., Kadenko I. M., Korda V. Yu., **Yakimenko I. I.**, Vallerand C. Center for photonuclear research «gamma»: the main directions of research // XXVI International Conference on Charged Particle Accelerators, 23–27 September 2019. : abstr. Kharkov, 2019. P. 11–12.

Результати дисертаційної роботи повністю відображені в публікаціях.

На підставі вивчення тексту дисертації здобувача, наукових праць здобувача та Протоколу контролю оригінальності (перевірку наявності текстових запозичень виконано в антиплагіатній інтернет-системі [Strikeplagiarism.com](#)) встановлено, що дисертаційна робота виконана самостійно, текст дисертації не містить плагіату, а дисертація відповідає вимогам академічної добросусідності.

9. Апробація матеріалів дисертації.

Результати проведених досліджень представлялись на міжнародних та вітчизняних конференціях у формі доповідей та публікацій у збірниках тез:

- Sixth International Conference: ENGINEERING OF SCINTILLATION MATERIALS AND RADIATION TECHNOLOGIES ISMART (Minsk 9–12 October 2018)
- XVII Конференция по физике высоких энергий и ядерной физике (Харьков, 26-29 марта 2019)
- XXVI International Conference on Charged Particle Accelerators, (Kharkov 23–27 September 2019)

- XV Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених та фахівців «Проблеми сучасної ядерної енергетики» (Харків, 13-15 листопада 2019 р.)

10. Оцінка мови та стилю дисертації.

Матеріал дисертації викладено в логічній послідовності та доступно для сприйняття. Дисертація написана науковим стилем мовлення, структура дисертації відповідає алгоритму здійсненого автором дослідження. Зміст, структура, оформлення дисертації та кількість публікацій відповідають вимогам «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України від 06.03.2019 р. №167), наказу Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій».

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

За своїм фаховим спрямуванням, науковою новизною і практичною значимістю дисертаційна робота Якименко І. І. «Дослідження механізмів взаємодії швидких нейtronів з речовиною монокристалічних та композитних оксидних сцинтиляторів» повністю відповідає паспорту спеціальності 105 – прикладна фізика та наноматеріали. Здобувачем повністю виконано освітню та наукову складову третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти.

12. Рекомендація дисертації до захисту.

Дисертаційна робота Якименко І. І. «Дослідження механізмів взаємодії швидких нейtronів з речовиною монокристалічних та композитних оксидних сцинтиляторів» відповідає вимогам передбаченим пунктом 10 «Порядку проведення експерименту з присудження ступеня доктора філософії» (постанова Кабінету Міністрів України № 167 від 6 березня 2019 року зі змінами, внесеними згідно з постановою Кабінету Міністрів України від 21.10.2020 № 979)

Враховуючи високий рівень досліджень, актуальність, новизну, практичну цінність отриманих результатів та відповідність роботи спеціальності 105 – прикладна фізика та наноматеріали, дисертацію Якименко І. І. «Дослідження механізмів взаємодії швидких нейtronів з речовиною монокристалічних та композитних оксидних сцинтиляторів» рекомендовано до захисту на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – прикладна фізика та наноматеріали.

Рецензент

Доктор фізико-математичних наук,
професор, професора кафедри фізики ядра
та високих енергій імені О. І. Ахієзера,
ННІ «Фізико-технічний факультет»,
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна

Юрій БЕРЕЖНОЙ

Рецензент

Кандидат фізико-математичних наук,
провідний науковий співробітник кафедри
фізики ядра та високих енергій
імені О. І. Ахієзера,
ННІ «Фізико-технічний факультет»,
Харківського національного університету
імені В. Н. Каразіна

Сергій РАТКЕВИЧ

23.04.2021

