

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

**XXV ЩОРІЧНА
НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ
ІНСТИТУТУ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
НАН УКРАЇНИ**

(Київ, 16 - 20 квітня 2018 року)

Тези доповідей

Київ 2018

УДК [539.1/2+533.9+577.3+621.039](477)(042.5)

Д 22

Укладач: О. М. Пугач

Програмно-організаційний комітет конференції:

В. М. Павлович – голова комітету (атомна енергетика)

Члени:

- Ф. О. Іванюк – теоретична ядерна фізика
О. М. Поворозник – експериментальна ядерна фізика
В. Й. Сугаков – радіаційна фізика та радіаційне матеріалознавство
Я. І. Колесниченко – фізика плазми та керований термоядерний синтез
А. І. Липська – радіобіологія та радіоекологія
Н. Л. Дорошко – учений секретар ІЯД НАН України
Ю. М. Степаненко – голова ради молодих учених ІЯД НАН України
В. В. Луценко – розробник Web-сторінки
О. Д. Григоренко – видання тез

Секретарі:

О. С. Бурдо, С. В. Лук'янов, В. В. Михайловський, О. М. Пугач, О. А. Сова,
Ю. М. Степаненко

Друкується за рішенням вченої ради інституту від 06.02.18.

Д 22 **XXV** щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 16 - 20 квітня 2018 року) : тези доповідей. - Київ : Ін-т ядерних дослідж., 2018. - 242 с.

ISBN 978-966-02-8479-1

У збірнику опубліковано тези конференції, що є підбиттям підсумків наукової діяльності інституту за 2017 р. Представлено тези з основних напрямків роботи Інституту, а саме: ядерної фізики, атомної енергетики, радіаційної фізики та радіаційного матеріалознавства, фізики плазми та теорії ядерного синтезу, радіоекології та радіобіології.

Наукове видання буде корисним для наукових працівників, аспірантів, інженерів, а також для викладачів та студентів старших курсів вузів.

УДК [539.1/2+533.9+577.3+621.039](477)(042.5)

ISBN 978-966-02-8479-1

© Інститут ядерних досліджень
НАН України, 2018

ЗМІСТ

Секція 1. Ядерна фізика

Кінетична теорія формування низькоенергетичного ізоскалярного дипольного резонансу у важких ядрах <i>В. І. Абросімов, О. І. Давидовська</i>	19
Енергія взаємодії двох рівномірно заряджених сфероїдів. Деформовані ядра <i>С. Я. Горощенко, О. В. Нестеров, В. О. Нестеров</i>	19
Оболонкові поправки до енергії та моменту інерції колективного обертання ядер <i>Д. В. Горпинченко, О. Г. Магнер, Дж. Бартел</i>	21
Ядерно-ядерний потенціал, перерізи пружного розсіяння та підбар'єрного злиття для системи $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ <i>О. І. Давидовська, В. Ю. Денисов, В. О. Нестеров</i>	22
Про роль функції асиметрії розподілу заряду в дейтроні при його дифракційному розщепленні на ядрах <i>В. В. Давидовський, А. Д. Фурса</i>	23
Залежність ширини масового розподілу осколків поділу в простому статистичному наближенні <i>В. Ю. Денисов, О. А. Беляновська, К. М. Сухий, В. П. Хоменков</i>	24
Поляризаційні характеристики процесів за участю дейтрона <i>В. І. Жаба</i>	25
Перерізи (γ, n)-реакції на ізотопах індію <i>В. І. Жаба, М. М. Лазорка</i>	26
Залежність енергії збудження від маси уламку поділу <i>Ф. О. Іванюк, С. Чіба, М. Усанг, Ч. Ішізука</i>	27
Полуаналитические подходы в теории развала легких ядер <i>А. П. Ильин, О. А. Понкратенко, Ю. Н. Степаненко, В. В. Улещенко</i>	29
Аналитическая оценка амплитуды многочастичного кулоновского развала в ядерных реакциях <i>А. П. Ильин</i>	30
Коефіцієнт поверхневого натягу в ядрах, віддалених від основного стану <i>В. М. Коломісць, С. В. Лук'янов, А. І. Санжур</i>	32
Статистична густина рівнів у самоузгодженому середньому полі ядра <i>В. М. Коломісць, А. І. Санжур</i>	33
Рівняння стану багатоконпонентного адронного газу у великому канонічному ансамблі <i>Я. Д. Кривенко-Еметов</i>	34

Ослабление слабых сил в ядрах <i>А. А. Куртева</i>	36
Статистичний аналіз колективних станів в ядрах актинидів <i>О. І. Левон, О. Г. Магнер, С. В. Радіонов</i>	37
Посилення оболонкової структури ядра при поновленні симетрії в потенціалах з дифузним краєм <i>О. Г. Магнер, К. Аріта</i>	38
Швидкість та поглинання ультразвукових хвиль у газах частинок при високих температурах <i>О. Г. Магнер, М. І. Горенштейн, У. В. Григор'єв</i>	39
Дослідження внутрішньої структури протона при його розсіянні на ядрах методами гальмівного випромінювання фотонів <i>С. П. Майданюк</i>	41
Про фазові переходи 2-го роду при поділі атомних ядер: ^{237}Np , ^{241}Am <i>В. Т. Маслюк, О. О. Парлаг, М. І. Романюк, О. І. Лендєл</i>	42
Поляризація та потенціал ядерно-ядерної взаємодії <i>В. О. Нестеров</i>	43
Пошуки Калуца - Клейн частинок на LHC <i>Т. В. Обіход, Е. О. Петренко</i>	43
V-tagging як засіб пошуку нової фізики на LHC <i>Т. В. Обіход, Е. О. Петренко</i>	44
Корректирующая фаза в приближении пространственно-временного анализа при учете интерференции в столкновениях тяжелых ионов <i>С. А. Омельченко, В. С. Ольховский</i>	46
Характеристики гігантських дипольних резонансів в атомних ядрах <i>В. А. Плюйко, О. М. Горбаченко, К. М. Солодовник, Р. Капоте, П. Дімітріу</i>	47
Аналітичні вирази для опису E1 фотонних силових функцій для атомних ядер <i>В. А. Плюйко, О. М. Горбаченко, К. М. Солодовник</i>	48
Поправки к волновым функциям атомных электронов в потенциале Томаса - Ферми <i>С. Н. Федоткин</i>	49
Випробування прототипу компактного електромагнітного калориметра LumiCal <i>Х. Абрамович, Я. Бенхамму, О. Борисов, М. Борисова, А. Леві, І. Леві</i>	51

Ізомерні відношення для продукту фотоядерної реакції (γ, 3п) на ^{55}Mn	
<i>О. А. Безиийко, О. М. Водін, Л. О. Голінка-Безиийко, А. М. Довбня, І. М. Каденко, В. А. Кушнір, В. В. Мітроченко, С. М. Олійник, С. А. Пережогін, С. В. Лубинець, А. В. Котенко</i>	51
Модельовання в пакеті Geant4 мюонного телескопу для локалізації паливовмісних матеріалів об'єкта «Укриття»	
<i>А. Ш. Георгадзе</i>	52
Стохастичне Palmer охолодження на циклічних прискорювачах	
<i>Н. Л. Дорошко, М. Е. Долінська</i>	53
Вимірювання енергії γ-переходів у ^{181}Ta	
<i>С. С. Драпей, В. О. Желтоножський, Д. Москаленко, М. В. Стрільчук</i>	54
Збудження $^{177}\text{Lu}^m$ в (γ, α)-реакції на ядрах танталу	
<i>В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов</i>	54
Ізомерні відношення в ядрах $^{133,135}\text{Xe}$ при фотоділенні ^{238}U	
<i>В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов, Є. П. Ровенських, М. В. Желтоножська</i>	55
Ізомерні відношення для ядер $^{179}\text{Hf}^{m2,g}$ та $^{174}\text{Lu}^{m,g}$	
<i>В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов</i>	56
Исследование эффектов проникновения во внутривротационных M1-переходах	
<i>В. А. Желтоножский, Д. Ю. Москаленко, В. П. Хоменков</i>	57
Оценка температуры ядер в фотоделении	
<i>В. И. Жеменик, В. А. Желтоножский, Дж. Дрноюн, А. Н. Саврасов, В. П. Хоменков, Г. В. Мышинский</i>	57
Компьютерное моделирование систем ускорительного комплекса с совмещенными пучками протонов и электронов с энергией 30 - 200 кэВ для комплексного имитатора факторов космоса (КИФК)	
<i>Г. Г. Заикин, А. Ф. Шаров</i>	59
Измерение неоднородности поля облучения мишени заряженными частицами в комплексном имитаторе факторов космического пространства (КИФК)	
<i>Г. Г. Заикин, А. Ф. Шаров, В. В. Абраимов, Н. И. Величко, В. А. Лотоцкая</i>	60
Новий тип ядерних реакцій з формуванням зв'язаного динейтрона у вихідному каналі	
<i>І. М. Каденко</i>	61
Перший результат вимірювань 2β-розпаду ^{150}Nd на 0_1^+ збуджений стан ^{150}Sm у підземній лабораторії Гран Сассо	
<i>Д. В. Касперович, О. С. Барабаши, П. Беллі, Р. Бернабей, Р. С. Бойко, Ф. А. Даневич, А. Інчікитті, Ф. Каппелла, В. Караччіоло, В. В. Кобичев, Р. В. Кобичев, С. І. Коновалов, М. Лаубенштейн, Д. В. Пода, О. Г. Поліщук, В. І. Третьак, В. І. Уматов, Р. Черуллі</i>	62

Розробка радіоактивно чистих кристалів $ZnWO_4$ для експерименту з пошуку добових модуляцій потоків темної матерії	
<i>Д. В. Касперович, П. Беллі, Р. Бернабей, Я. В. Васильєв, Ф. А. Даневич, А. Інчіккітті, В. В. Кобичев, Ф. Каппелла, В. Караччіоло, М. Лаубенштейн, О. Г. Полищук, В. І. Третьак, Р. Черулі, В. М. Шлегель</i>	63
Датчик обертання мішені	
<i>О. М. Ковальов, О. О. Гаврилов, А. П. Войтер, М. І. Доронін, Л. Г. Макаренко</i>	64
Програмоване джерело постійного струму	
<i>О. М. Ковальов, О. О. Гаврилов, А. П. Войтер, М. І. Доронін, Л. Г. Макаренко</i>	65
Спрощений лінійний прийомопередавач	
<i>О. М. Ковальов, О. О. Гаврилов, А. П. Войтер, М. І. Доронін, О. М. Семенюк</i>	66
Реакції д্বонейтронної передачі та статистична міра квантового хаосу в ядерних спектрах	
<i>О. І. Левон, О. Г. Магнер</i>	67
До питання про ізомерне відношення, одержане в реакції $^{142}\text{Nd}(\gamma, n)^{141\text{m,g}}\text{Nd}$ в інтервалі енергій гігантського Е1-резонансу	
<i>В. М. Мазур, З. М. Біган, П. С. Деречкей</i>	68
Механізми реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ та взаємодія ядер $^{12}\text{B} + ^{12}\text{C}$ при енергії 45 МеВ	
<i>С. Ю. Межевич, А. Т. Рудчик, К. Русек, К. В. Кемпер, А. А. Рудчик, О. А. Понкратенко, С. Б. Сакута</i>	69
Оптимальные условия получения различными методами изотопов ^{82}Sr на циклотроне У-240 ИЯИ НАН Украины и в различных лабораториях	
<i>Л. В. Михайлов, Т. П. Руденко, А. П. Чепурнов</i>	70
Дослідження радіаційної стійкості двосторонніх мікροстріпових сенсорів для кремнієвої трекової системи експерименту СВМ	
<i>Є. Л. Момот, М. А. Теклішин, А. В. Чаус, В. О. Кива</i>	71
Система оцінки якості мікροстріпових сенсорів для кремнієвого трекера експерименту СВМ	
<i>Я. В. Панасенко, В. О. Кива, В. М. Пугач, Й. М. Хойзер, Х. Р. Шмідт</i>	72
Порівняльний аналіз дифракційного розсіяння легких ядер на ядрах вуглецю ^{12}C	
<i>О. А. Понкратенко, Є. І. Коцый, Вал. М. Пірнак, А. А. Рудчик, А. Т. Рудчик, К. Русек, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма</i>	72

Енергетична залежність диференційних перерізів пружного розсіяння легких ядер на ^{12}C в дифракційній області	
<i>О. А. Понкратенко, Є. І. Коций, Вал. М. Пірнак, А. А. Рудчик, А. Т. Рудчик, К. Русек, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, Ю. О. Ширма</i>	73
Використання статистичних випробувань у задачах ядерного датування: Метод стандартних множин	
<i>О. М. Поп, В. Т. Маслюк, М. І. Тільняк</i>	74
Реконструкція треків у рамках алгоритму кліткового автомату для форвардної трекової системи експерименту Panda	
<i>М. В. Пугач, І. Кісель, М. Зизак, І. Живко</i>	75
Розробка та характеристика детекторизованого фантома для досліджень у галузі просторово фракціонованої радіаційної терапії	
<i>Д. М. Рамазанов, В. М. Пугач, Д. Сторожик, О. Ковальчук, А. Чаус, В. Кива, С. Форостенко</i>	76
Реакція $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії іонів ^{15}N 81 MeV та взаємодія ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$	
<i>А. Т. Рудчик, К. Русек, О. Е. Куцик, А. А. Рудчик, Вал. М. Пірнак, О. А. Понкратенко, Е. П'ясецькі, А. Столяж, А. Тжціньска, І. Строек, Є. І. Коций, Р. Сюдак, С. Б. Сакута, В. А. Плюйко, Ю. М. Степаненко, В. В. Улещенко, А. П. Ільїн, Ю. О. Ширма</i>	77
Аналіз довготривалих вимірювань гамма-фону в Чорнобильській зоні відчуження	
<i>А. Д. Скорбун, А. І. Спирін, Б. М. Сплошной</i>	78
Приведение к одной энергетической шкале спектров, получаемых при оценке обогащения урана	
<i>А. М. Соколов</i>	79
Відновлення діелектричної поверхні кристала гамма-детектора з особливо чистого германію	
<i>Р. Ю. Чаплинський, С. С. Погуляй, Е. Є. Петросян</i>	80
Тест радіаційної стійкості кремнієвих сенсорів у реалістичних умовах на прискоювачі Ван-де-Граф в університеті Тюбінгена	
<i>А. В. Чаус, В. М. Пугач, Д. Рамазанов, Е. Фріске, Х. Р. Шмідт</i>	81
Дослідження мікростріпових кремнієвих сенсорів та коротких гнучких мікрокаблів для експерименту СВМ	
<i>В. М. Міліція, В. М. Добішук, В. О. Кива, О. С. Ковальчук, Д. І. Сторожик, В. М. Пугач, А. В. Чаус, Й. Хойзер</i>	82
Секція 2. Атомна енергетика	
Формування принципів і критеріїв безпеки в процесі продовження терміну експлуатації СВЯП-1	
<i>С. І. Азаров, В. М. Євланов, О. С. Задунай</i>	84

Joint analysis exercise on uranium pellets	
<i>M. Wallenius, Z. Varga, K. Mayer, A. Berlizov, S. Bulyha, M. Peñkin, K. Knight, R. Williams, K. Schorzman, R. Lindvall, V. Tryshyn, I. Maliuk</i>	85
Прогноз динаміки нейтронної активності в зоні локалізації потенціально ядерно-небезпечного скоплення топлivosодержащих матеріалів всередині нового безпечного конфайнмента	
<i>Є. Д. Висотський, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко</i>	86
Двадцять років на службі фізичної ядерної безпеки: Наробки та перспективи	
<i>В. І. Гаврилюк, А. В. Гаврилюк-Буракова, С. С. Драпей, В. І. Киришчук, О. О. Левіна, В. В. Пархоменко, О. П. Романова, А. В. Самсоненко</i>	87
Відновлення поля енерговиділення в активній зоні реактора ВВЕР-1000	
<i>В. В. Гальченко, В. І. Гулик, І. І. Шлапак, Д. В. Будік</i>	88
Оценка уровня ядерной безопасности топлivosодержащих матеріалів всередині нового безпечного конфайнмента	
<i>Р. Л. Годун</i>	88
Дослідження в'язкості руйнування опромінених корпусних матеріалів в області надпроектних флюенсів	
<i>М. Г. Голяк, В. М. Ревка, Л. І. Чирко, Ю. В. Чайковський</i>	90
Застосування нейронних мереж для вирішення задач діагностики ДПЗ за даними СВРК	
<i>В. В. Горанчук, В. І. Борисенко</i>	91
Особливості визначення температури крихко-в'язкого переходу для повторно опроміненого після відпалу металу зварного шва корпусу реактора ВВЕР-440	
<i>Г. П. Гринченко, О. В. Тригубенко, В. М. Ревка, Ю. В. Чайковський, Л. І. Чирко</i>	92
Использование монте-карло кода Serpent для моделювання захисних характеристик от нейтронного излучения в бетонных композитных материалах	
<i>В. І. Гулик, І. М. Романенко, М. І. Голюк, А. В. Носовський, Т. С. Власенко</i>	93
Разработка модели активной зоны реактора ВВЭР-1000 с помощью Монте-Карло кода Serpent для нейтронно-физических расчетов	
<i>В. І. Гулик, В. В. Гальченко, І. І. Шлапак, Д. В. Будік</i>	94
Аналіз змін нейтронної активності після початку експлуатації нового безпечного конфайнмента	
<i>А. О. Дорошенко, А. Д. Скорбун, Р. Л. Годун</i>	95

Напрацювання ⁹⁹Mo на дослідницькому ядерному реакторі ВВР-М <i>О. П. Жуков, В. М. Макаровський, Ю. П. Малерс, І. А. Малюк, В. І. Слісенко, В. В. Тришин</i>	96
Щодо безпеки експлуатації мокрого сховища відпрацьованого ядерного палива <i>О. С. Задунай, С. І. Азаров</i>	96
Оновлення даних про джерела нейтронів для програмних засобів MСРV і MСSS <i>В. В. Ількович, О. В. Гриценко, В. Л. Дем'яохін, В. М. Буканов</i>	98
Застосування статистичних методів для перевірки працездатності технічних засобів системи фізичного захисту <i>Б. В. Кайдик, Т. В. Бібік, В. І. Гаврилюк, С. С. Драпей</i>	99
Вплив нового безпечного конфайнмента на радіоактивні аерозолі в ближній зоні ЧАЕС <i>В. О. Каптур, О. А. Свирид, Г. Г. Скоряк, В. К. Шинкаренко</i>	100
Міжнародні гарантії ядерної безпеки України: Проблеми реалізації <i>Р. О. Коцюба</i>	101
Застосування збідненого урану, як захисного матеріалу при зберіганні радіоактивних відходів в контейнерах <i>С. В. Купріянчук</i>	102
Вплив розміру зерна феритної сталі SUH 409L на температуру максимального прояву рідкометалевого окрихчення під дією розплаву свинцю <i>І. С. Кухар, В. М. Федірко, Х. Р. Мельник</i>	103
Ядерно-опасные скопления в балансе аварийного топлива, локализованного внутри НБК-ОУ ЧАЭС в составе топливосодержащих масс <i>А. В. Михайлов</i>	104
Порівняння результатів формування сигналу ДПЗ у кодах Serpent та MСNP <i>Ю. Ф. Піонтковський, В. І. Борисенко</i>	105
Исследование условий облучения образцов-свидетелей в реакторе ВВЭР-440 энергоблока № 1 Ривненской АЭС <i>С. М. Пугач, В. Н. Буканов, А. В. Гриценко</i>	106
Исследование композитного материала на основе сверхтяжелых бетонов и базальтовой фибры для радиационной защиты от гамма-излучения <i>И. М. Романенко, М. И. Голюк, А. В. Носовский, Т. С. Власенко, В. И. Гулик</i>	107
Порівняльний аналіз флуктуацій температур у петлях першого контуру ВВЕР-1000 <i>А. Д. Скорбун, С. М. Стадник, В. Г. Котеленець</i>	108

Восстановление параметров источника радиоактивных выбросов по данным радиационного мониторинга с помощью фильтра Калмана	
<i>Н. Н. Талерко, Д. В. Жигинас, А. Г. Кузьменко</i>	109
Применение расчетного кода Serpent для моделирования подкритической системы киотского университета Куса	
<i>А. Р. Трофименко, А. В. Носовский, В. И. Гулик</i>	111
Порівняння стохастичного та нечіткого методів оцінки надійності енергетичного обладнання АЕС	
<i>О. М. Харабет, О. Є. Зотсєв, О. О. Чулкін, В. О. Зотсєв</i>	112
Нова технологія виготовлення циліндричних зразків з опромінених заготовок для випробувань на розтяг	
<i>Ю. В. Чайковський, В. М. Рєвка, Л. І. Чирко, О. В. Шкапяк</i>	113
Розрахунок процесу трансмутації плутонію та мінорних актинідів у двозонному дослідницькому підкритичному реакторі	
<i>Д. О. Шеляговський, А. В. Носовський, В. М. Павлович, В. І. Гулік</i>	114
До питання про похибки визначення β-активності «гарячих» частинок методом авторадіографії	
<i>В. К. Шинкаренко</i>	116
Дослідження зразків-свідків комплектів ІА-ЛК-3 та ЛК-5 першого блоку Рівненської АЕС методом статичного розтягу	
<i>О. В. Шкапяк, Л. І. Чирко, В. М. Рєвка, Ю. В. Чайковський</i>	118
Выбор шага расчетной сетки конечно-разностного метода решения уравнения диффузии для активной зоны ВВЭР-1000	
<i>И. И. Шлапак, В. В. Гальченко, В. И. Гулик, Д. В. Будик</i>	118

**Секція 3. Радіаційна фізика
та радіаційне матеріалознавство**

Порівняння структури монокристалічного кремнію, опроміненого значними флюенсами високоенергетичних легких іонів	
<i>В. І. Варніна, Г. П. Гайдар, М. Б. Пінковська, М. І. Старчик</i>	120
Дослідження впливу малих концентрацій поліетиленгліколей на дифузію молекул води	
<i>О. А. Василькевич, В. І. Слісенко</i>	121
Моделювання просторових структур нестабільних частинок на дискретній ґратці методом Монте-Карло	
<i>І. Ю. Голіней</i>	122
Зміна спектра розсіяння світла при деформації діелектричного середовища зі сферичними металічними частинками	
<i>І. Ю. Голіней, Є. В. Онукієнко</i>	123
Дифракція нейтронів та γ-квантів в кристалах	
<i>О. Я. Дзюблик, В. В. Михайловський, В. Ю. Співак</i>	123

Положение уровня Ферми в Ge, облученного γ-Co⁶⁰	
<i>А. П. Долголенко</i>	125
Використання високоенергетичного опромінення для визначення властивостей захисних модулів з SiC	
<i>М. А. Заболотний, Ю. Є. Грабовський, Л. І. Асламова</i>	126
Коефіцієнти радіаційних змін параметрів світлодіодів GaP та GaAsP	
<i>М. В. Завада, М. Б. Пінковська, В. М. Попов, О. І. Радкевич, В. П. Тартачник</i>	127
Модернізація радіаційної установки СРТ для медико-біологічних досліджень <i>in-vivo</i>	
<i>Ю. В. Іванов, В. І. Сахно, Т. В. Ковалінська, О. А. Жернов, А. Г. Зелінський, Л. О. Сахно, В. Г. Ніколаєв</i>	128
Самодифузія молекул води після контакту з кремнійвмісними сполуками	
<i>Т. В. Кармазіна, В. І. Слісенко, О. А. Василькевич, Н. І. Мазіна</i>	130
Вплив електронного опромінення на електричні властивості <i>n</i>-InSe	
<i>З. Д. Ковалюк, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела, І. В. Мінтянський, П. І. Савицький</i>	131
Вплив високопровідних включень на електричні властивості опромінених електронами монокристалів германію	
<i>С. В. Луньов, А. І. Зіміч, В. Т. Маслюк, І. Г. Мегела</i>	132
Вплив УЗ-навантаження на електролюмінесцентні характеристики світлодіодів ультрафіолетового випромінювання	
<i>Є. В. Малий, В. П. Велецук, І. В. Петренко, В. П. Тартачник, О. І. Власенко, З. К. Власенко, М. П. Киселюк</i>	134
Вода – квантова система	
<i>Л. С. Мариенюк</i>	135
Дослідження можливості використання персональних дозиметрів ДГТ-4 для клінічної та технологічної дозиметрії радіаційних полів прискорених на мікротроні М-30 електронів у супроводі гальмівних фотонів	
<i>І. Г. Мегела, В. Т. Маслюк, Т. О. Вієру-Василиця, Й. Й. Гайніш, Г. Ф. Пітченко, О. М. Турховський</i>	136
Управление параметрами генерации экситонных конденсированных фаз в полупроводниковых квантовых ямах	
<i>В. В. Михайловский, В. И. Сугаков</i>	137
Вплив радіаційних дефектів на електролюмінесценцію GaAs_{1-x}P_x	
<i>І. В. Петренко, В. П. Велецук, М. В. Завада, О. В. Конорева, П. Г. Литовченко, В. П. Тартачник</i>	138
Уравнение состояния и распределение размеров частиц в гиббсовской системе	
<i>В. В. Рязанов</i>	139

Дослідження шляхів експлуатації потужного промислового прискорювача при низьких і наднизьких струмах пучка <i>В. І. Сахно, Ю. В. Іванов, Т. В. Ковалінська, О. А. Жернов, А. Г. Зелінський</i>	140
Острівці електронно-діркової рідини у 2D кремній-германієвих структурах <i>В. Й. Сугаков, А. А. Чернюк</i>	141
Влияние оксидирования циркониевого сплава Zr-1 %Nb на длительную прочность при температуре $T = 380$ °C <i>В. С. Труш, М. И. Тихоновський, В. Н. Федирко, О. Г. Лукьяненко, П. И. Стоев</i>	143
Про обмеження у використанні класичних моделей Маркуса та Міллера – Абрахамса в органічних напівпровідниках <i>І. І. Фіщук</i>	144
Принцип визначення спектра протонів, отриманих на лазерних прискорювачах за допомогою кремнієвих р-і-п діодів <i>І. С. Анохін, А. Б. Розенфельд</i>	145

**Секція 4. Фізика плазми
та керований термоядерний синтез**

Особливості запалювання несамостійного дугового розряду в парах танталу <i>А. Г. Борисенко, Е. Г. Костін, О. А. Рокицький, О. А. Федорович</i>	147
Оптическая спектроскопия термичної багатокомпонентної плазми з домішками парів міді та нікелю <i>А. М. Веклич, М. М. Клешич, С. О. Фесенко, Л. О. Крячко, В. Ф. Борецький</i>	148
Вплив неоднорідного магнітного поля на геліконний розряд, збуджуваний різними антенами <i>В. Ф. Вірко, Ю. В. Вірко</i>	150
Залежність напруги автозміщення від роду газу та параметрів ВЧ розряду на планарному ПХР з керованим магнітним полем <i>В. В. Гладковський, Б. П. Полозов, О. А. Рокицький, О. А. Федорович</i>	151
Мас-спектрометричні дослідження складу плазми вч розряду в метані на планарному ПХР з керованим магнітним полем <i>В. В. Гладковський, Б. П. Полозов, О. А. Рокицький, О. А. Федорович</i>	152
Модельювання розподілів швидких іонів на пластині сцинтиляційного детектора в токамаці JET <i>В. Я. Голобородько, К. Шопф</i>	153
Задача Мілна – для плазми <i>В. В. Горин</i>	154

Алгоритм Рунге - Кутта для інтегрування стохастичних рівнянь неокласичної дифузії іонів	
<i>А. А. Гурич</i>	156
Landau damping of Alfvénic modes in stellarators	
<i>Ya. I. Kolesnichenko, A. Könies, A. V. Tykhyu</i>	156
Аналіз можливого покращення характеристик плазми у токамаці JET завдяки направленому всередину просторовому каналуванню енергії швидких іонів	
<i>Я. І. Колесниченко, В. В. Луценко, М. Г. Тищенко, Г. Вейсен, Ю. В. Яковенко</i>	157
Temperature gradient driven Alfvén instability producing inward energy flux in stellarators	
<i>Ya. I. Kolesnichenko, A. V. Tykhyu</i>	158
Нелінійна теорія модуляційної нестійкості на іон-іон гібридному резонансі в плазмі з двома сортами іонів	
<i>В. М. Лашкін</i>	158
Нелінійна теорія повздовжних плазмових хвиль у кварк-глюонній плазмі	
<i>В. М. Лашкін</i>	159
Визначення параметрів пилчастих коливань з даних електронно-циклотронного випромінювання токамака JET	
<i>Б. С. Лепявко, Ю. В. Яковенко</i>	160
Гібридна модель плазмового прискорювача із замкненим дрейфом електронів та відкритими стінками	
<i>І. В. Літовко, О. А. Гончаров, А. М. Добровольський, І. В. Найко, Л. В. Найко</i>	162
Нетепловий вплив нагрівання на електронному циклотронному резонансі на альфвенові власні моди	
<i>В. С. Марченко, С. Н. Резник</i>	163
Випромінювання із плазми при параметричному збудженні конвективних комірок	
<i>В. Г. Панченко</i>	164
Особливості транспортних властивостей плазми електричної дуги з плавкими сталевими електродами	
<i>П. В. Порицький</i>	164
Spatial energy transfer by fast magnetoacoustic modes in a one-fluid model	
<i>М. Н. Tyshchenko, Ya. I. Kolesnichenko, V. V. Lutsenko, Yu. V. Yakovenko</i>	165
Про вплив плазми ВЧ розряду у водні на поверхню конструкційних матеріалів ядерної енергетики	
<i>О. А. Федорович, В. В. Гладковський, Л. М. Войтенко, Є. Г. Костін, Б. П. Полозов, В. О. Петряков, О. А. Рокицький, В. М. Шевель, О. С. Оберемок</i>	167

Про вплив іонів водню та нагрівання на конструкційні матеріали ядерної енергетики

*О. А. Федорович, В. В. Гладковський, Л. М. Войтенко,
Є. Г. Костін, Б. П. Полозов, В. О. Петряков, О. А. Рокицький,
В. М. Шевель, О. С. Оберемок, В. В. Бурдін.....* 168

Використання плазми мікророзряду для обробки живих організмів

*В. Я. Черняк, О. В. Коломієць, В. В. Юхименко,
Д. Л. Чернолуцький, А. М. Горячко, В. В. Лендеєл,
Ю. М. Самченко, А. К. Трохимчук, О. В. Легенчук.....* 169

Числові моделювання перерозподілу швидких іонів пилчастими коливаннями в токамаках JET та ITER

Ю. В. Яковенко, В. В. Луценко, Б. С. Лепякко, Я. І. Колесниченко..... 171

Секція 5. Радіобіологія та радіоекологія

Оцінка ефективності дії хвильового «Пристрою» на біологічний об'єкт («Патент» № 53568) для зниження магнітного заряду з магнітовмісних елементів та їхніх сполук у опроміненіх тварин з метою унеможливлення утворення активних форм кисню і розвитку радіаційно-індукованих хвороб та їхніх ускладнень

В. Г. Бебешко, І. В. Гомоляко, В. В. Гринчишин..... 173

Моделювання умов опромінення *in vitro* крові людини ізотопом ¹³⁷Cs від зовнішнього джерела та радіонуклідного забруднення

*Л. К. Бездробна, І. П. Дрозд, В. І. Федорченко, В. А. Курочкіна,
В. М. Шевель, В. В. Давиденко, І. А. Хоміч.....* 174

Радіобіологічні ефекти опромінення *in utero* радіоізотопом ¹³¹I у ссимиеті тиреоїдної гормональної регуляції щурів Вістар

*О. А. Бойко, Є. М. Прохорова, Н. П. Атаманюк, О. Я. Плєскач,
І. П. Дрозд, А. І. Липська, Г. Й. Лавренчук, В. В. Талько.....* 175

Реакція системи кровотворення на додаткове опромінення у сублетальній дозі щурів, батьки яких зазнали впливу інкорпорованого ¹³¹I

О. Б. Ганжа, Н. М. Рябченко, А. І. Липська, В. В. Талько..... 176

Вільнорадикальні процеси у крові щурів за дії на організм інкорпорованих радіонуклідів різної тропності

*Ю. П. Гриневич, А. І. Липська, І. П. Дрозд,
С. В. Телецька, Л. І. Маковецька.....* 177

Аеробний енергетический метаболізм миокарда – мишень інкорпорованого ¹³⁷Cs

А. И. Грищук, А. Н. Коваль, Н. А. Грищук, В. Т. Свєргун..... 179

Концентрація прозапальних цитокінів (ФНП-α та ІЛ-6) у крові, рівень адипонектину та глюкозний гомеостаз у учасників ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС, які захворіли на цукровий діабет 2 типу

Н. С. Домбровська..... 180

Комплексний підхід для визначення біомаркерів індивідуальної радіочутливості людини	
<i>М. О. Дружина, Л. І. Маковецька, В. М. Михайленко, Е. А. Дьоміна, О. А. Главін, Т. В. Семиглазова</i>	181
Модифікація водорозчинних протипухлинних препаратів радіаційним опроміненням	
<i>М. А. Заболотний, Г. І. Довбешко, Г. І. Соляник, О. П. Гнатюк, В. Е. Орел</i>	182
Метаболізм ¹³⁷Cs в організмі срібляного карася (<i>Carassius Gibelio</i>) при низькій температурі води	
<i>О. В. Каушарова, С. Е. Левчук, В. П. Процак, В. С. Павленко, І. Н. Гудков, В. О. Каушаров</i>	184
Морфологічний стан проліферуючих клітин <i>in vitro</i> в умовах поєднаного впливу фотосенсибілізатора та світла оптичного діапазону (630 нм)	
<i>І. В. Козловська, Г. Й. Лавренчук</i>	185
Влияние фотодинамической терапии на заживление лучевой язвы кожи, инфицированной <i>Pseudomonas Aeruginosa</i>	
<i>Н. В. Красносельский, Л. И. Симонова, В. З. Гертман, Е. С. Пушкарь</i>	187
Dynamics of radioecological and cytogenetic changes in the populations of <i>Myodes Glareolus</i> inhabiting the Chernobyl exclusion zone	
<i>A. I. Lypska, O. O. Burdo, N. N. Ryabchenko, V. A. Shytuk, V. I. Nikolaev</i>	188
Вплив 2-меркаптобензотіазолу на морфологічні показники клітин <i>in vitro</i>	
<i>Х. М. Литвинчук, Г. Й. Лавренчук, Д. Д. Гапеєнко</i>	189
Клініко-психофізіологічний стан персоналу об'єкта «Укриття», після опромінення в малих дозах	
<i>К. М. Логановський, І. В. Перчук</i>	191
Дослідження змін маркерів оксидативних та нітрозативних пошкоджень за тривалого впливу малих доз радіації та оксидів азоту	
<i>Л. І. Маковецька, О. А. Главін, М. О. Дружина, В. М. Михайленко</i>	192
Експериментальне дослідження мутагенного впливу інкорпорованого ¹³¹I <i>in utero</i>	
<i>Л. В. Неумержицька, Є. М. Прохорова, Н. П. Атаманюк, О. С. Ватліцова, І. Р. Дмитрієва, Ж. С. Ярошенко, І. П. Дрозд, А. І. Липська, В. В. Талько</i>	193
Гемопоетичні клітини-попередники щурів Wistar при довготривалому внутрішньому опроміненні ⁹⁰Sr	
<i>І. З. Руссу, Д. І. Білько, Н. К. Родіонова, Н. М. Білько</i>	195

Сучасні підходи до характеристики відносної біологічної ефективності адронної (протонної) терапії	
<i>Н. М. Рябченко, О. Б. Ганжа, А. І. Липська</i>	196
Особливості змін в лейкоцитарній формулі у <i>Myodes Glareolus</i> із зони радіоактивного забруднення ЧАЕС	
<i>О. А. Сова, О. О. Бурдо, А. І. Липська, О. Б. Ганжа, В. А. Шитюк</i>	197
Експериментально-клінічне визначення впливу пренатального опромінення ¹³¹I на нейрогенез та розвиток когнітивних і емоційно-поведінкових розладів	
<i>В. В. Талько, К. М. Логановський, А. А. Чумак, Л. М. Овсяннікова, Т. К. Логановська, Є. В. Тукаленко, Н. П. Атаманюк, І. П. Дрозд, А. І. Липська, Г. Й. Лавренчук, М. І. Лісяний, Б. С. Ісаєв, О. С. Ватліцова, І. Р. Дмитрієва, С. М. Альохіна, Л. В. Бельська, І. І. Лушнікова, Є. М. Прохорова, О. А. Бойко, Д. Д. Гапєєнко, О. Я. Плєскач, О. М. Литвинєць</i>	198
Розробка програми контролю санітарно-гігієнічних умов виробництва радіофармацевтичних препаратів в Інституті ядерних досліджень НАН України	
<i>В. В. Тришин, Л. К. Бездробна, Т. В. Циганок</i>	199
Дослідження профілів метилювання геному <i>Aspergillus Versicolor</i> за дії хронічного опромінення	
<i>Т. І. Тугай, Л. Б. Зелена, А. В. Тугай, О. Б. Поліщук</i>	200
Функціонування прооксидантної та антиоксидантної систем у пострадіаційних генерацій <i>Aspergillus Versicolor</i> за росту на різних за вмістом джерел вуглецю середовищах	
<i>А. В. Тугай, Т. І. Тугай, В. О. Желтоножський, М. В. Желтоножська, Л. В. Садовніков, Л. Б. Зелена, О. Б. Поліщук</i>	201
Лінійні показники паростків насіння очерету звичайного з водойм чорнобильської зони відчуження за умов додаткового гострого опромінення	
<i>А. А. Явніюк, Н. Л. Шевцова, Д. І. Гудков</i>	202
Стан здоров'я нащадків першого покоління учасників ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС 1986 - 1987 рр.	
<i>Ж. С. Ярошенко</i>	204
Роль вищих водних рослин в біотрансформации ¹³⁷Cs в екосистемі Київського водохранилища	
<i>В. В. Бєляєв, Е. Н. Волкова, С. П. Пришляк, А. А. Пархоменко</i>	205
Исследование миграции радионуклидов в 30-км зоне ЧАЭС	
<i>Д. М. Бондарьков, М. В. Желтоножская, Н. В. Кулич, А. И. Липская, В. И. Николаев</i>	206
Очистка радиактивно загрязненной воды фосфорнокислым катионитом на основе модифицированного растительного сырья	
<i>А. М. Валяев, В. Ю. Коровин, Т. В. Лаврова</i>	207

Радіаційний моніторинг об'єктів навколишнього природного середовища в зоні впливу дослідницького ядерного реактора ВВР-М Інституту ядерних досліджень НАН України (2012 - 2017 рр.)	
<i>О. В. Гайдар, О. В. Сваричевська, В. В. Тришин, А. Д. Саженьюк, І. А. Малюк, І. О. Павленко, О. В. Святун</i>	208
Розробка ядерно-криміналістичних баз даних у рамках міжнародного навчання «Galaxy Serpent»	
<i>О. В. Гайдар, В. В. Тришин, В. К. Вітюк, Я. А. Деюн, Г. А. Прокопюк</i>	209
Фізико-хімічні форми ^{90}Sr та ^{137}Cs у донних відкладах водойми-охолоджувача ЧАЕС	
<i>Х. Д. Ганжса, С. П. Пришляк, О. О. Пархоменко, Д. І. Гудков, О. Є. Каглян</i>	211
Розподіл питомої активності ^{90}Sr у стовбурній деревині сосни звичайної у ближній зоні випадень ЧАЕС	
<i>Д. М. Голяка, В. О. Кашипаров, С. Є. Левчук, В. П. Процак, Л. В. Йоценко</i>	212
До проблеми управління ризиком у галузях атомної індустрії України	
<i>І. П. Дрозд</i>	213
Спектроскопія ^{241}Am в об'ємних пробах	
<i>М. В. Желтоножская, Н. В. Кулич, Д. Ю. Москаленко, Д. Е. Мызников</i>	214
Дослідження впливу мікроміцетів на паливовмісні матеріали	
<i>В. О. Желтоножський, М. В. Желтоножська, Л. В. Садовніков, А. В. Тугай, Т. І. Тугай</i>	215
Особливості взаємодії НТО з каоліном	
<i>О. В. Коваленко, О. О. Кряжич</i>	216
Применение идей и методов радиэкологии и радиобиологии при моделировании и оценке надежности биосистем	
<i>Ю. А. Кутлахмедов, И. В. Матвеева</i>	217
Геоинформационная технология формирования сети мониторинга территорий, загрязненных вследствие радиационной аварии с учетом степени радиэкологической критичности	
<i>Т. Д. Лев, Б. С. Пристер, В. Д. Виноградская</i>	219
Вплив витяжок з лісового опадку на вилугування радіонуклідів з ґрунтів зони ЧАЕС	
<i>А. І. Липська, В. І. Ніколаєв, В. А. Шитюк</i>	220
Сорбція ^{137}Cs з водних розчинів золю торфів та деревини	
<i>І. М. Малоштан, С. В. Поліщук</i>	220
Обґрунтування можливості використанням радіоактивно забрудненої після Чорнобильської аварії паливної деревини	
<i>Л. М. Отрешко, Л. В. Йоценко, Д. М. Голяка, О. В. Косарчук</i>	222

Вміст ^{137}Cs в торф'яному ґрунті Черногорського масиву Карпат <i>Л. С. Пірнач, Г. В. Лантєв, Е. С. Тодосієнко</i>	223
Зміни лейкоцитарної формули та патоморфологічні порушення еритроцитів плітки звичайної у водоймах Чорнобильської зони відчуження <i>Н. А. Поморцева, Д. І. Гудков</i>	224
Аналіз спектра гідролізатів радіаційної технології модифікації медичних розчинів <i>В. І. Сахно, О. А. Жернов, Т. В. Ковалінська, Л. О. Сахно, В. Г. Ніколаєв, Ю. В. Іванов</i>	225
Статистичні закономірності поширення наземних радіонуклідів у зразках намулів та ґрунтів гірських районів Закарпаття <i>Н. І. Сватюк, О. І. Симканич, В. Т. Маслюк</i>	227
Вдосконалення аналізу екологічного стану в процесі експлуатації АЕС <i>В. Л. Сидоренко, С. І. Азаров, О. С. Задунай</i>	228
Акредитація лабораторії ядерної криміналістики Центру екологічних проблем атомної енергетики Інституту ядерних досліджень НАН України. Технічні вимоги <i>В. В. Тришин, О. В. Божок, І. А. Малюк, О. Ф. Рудик, О. П. Жуков</i>	229
Акредитація лабораторії ядерної криміналістики Центру екологічних проблем атомної енергетики Інституту ядерних досліджень НАН України. Вимоги до управління <i>В. В. Тришин, О. В. Божок, Г. Я. Мінчук</i>	231
Модернізація комплексу низькофонових камер УМФ-1500 <i>В. В. Тришин, І. О. Махньов, О. І. Махньов</i>	232
Морфологические изменения жаберного аппарата рыб в условиях водоемов Чернобыльской зоны отчуждения <i>В. В. Шукалевич, Б. В. Борисевич, Д. И. Гудков, А. Е. Каглян</i>	233
Авторський покажчик	236

Тези доповідей з ядерної фізики

КІНЕТИЧНА ТЕОРІЯ ФОРМУВАННЯ НИЗЬКОЕНЕРГЕТИЧНОГО ІЗОСКАЛЯРНОГО ДИПОЛЬНОГО РЕЗОНАНСУ У ВАЖКИХ ЯДРАХ

В. І. Абросімов, О. І. Давидовська

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Кінетична теорія колективних збуджень скінченої фермі-системи відтворює ізоскалярні колективні збудження у важких ядрах, зокрема, низькоенергетичний дипольний резонанс [1, 2]. Досліджено механізм формування низькоенергетичної ізоскалярної дипольної моди в ядрах. Для цього розглянуто наближення, в якому зміни функції розподілу в фазовому просторі обумовлені тільки динамікою поверхневої області ядра. Отримано аналітичні вирази та проведено чисельні розрахунки силової функції та локальних динамічних величин, які описують зміни функції розподілу в імпульсному просторі (поле швидкостей і тензор густини потоку імпульсу). Знайдено, що поле швидкостей виявляє вихровий характер, а тензор густини потоку імпульсу має недіагональну компоненту та різні за величиною діагональні компоненти. Таким чином, в роботі показано, що низькоенергетичний ізоскалярний дипольний резонанс у важких ядрах являє собою поверхневу моду, яка формується завдяки динамічній деформації фермі-поверхні.

1. V.I. Abrosimov, A. Dellafiore, F. Matera. Physics of Particles and Nuclei. 36 (2005) 699.
2. V.I. Abrosimov, O.I. Davidovskaya. Ukr. J. Phys. 61 (2016) 563.

ЕНЕРГІЯ ВЗАЄМОДІЇ ДВОХ РІВНОМІРНО ЗАРЯДЖЕНИХ СФЕРОЇДІВ. ДЕФОРМОВАНІ ЯДРА

С. Я. Горощенко¹, О. В. Нестеров¹, В. О. Нестеров²

¹ *Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, Київ, Україна*

² *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

Ядерно-ядерний потенціал включає до себе ядерну та кулонівську частини. При взаємодії ядер сферичної форми складові ядерно-ядерного потенціалу можна вважати функціями лише однієї змінної – відстані між центрами ядер. Але навіть у цьому найпростішому випадку розрахунки компонент ядерно-ядерного потенціалу з реальними фермівськими розподілами густини нуклонів є дуже складною проблемою, особливо для достатньо важких ядер. Стосується

це, зокрема, і кулонівської взаємодії, яка є предметом розгляду даної роботи. При розгляді сферичних ядер кулонівська взаємодія зазвичай апроксимується взаємодією двох рівномірно заряджених куль. Але насправді багато ядер є деформованими і мають форму, наближену до сфероїдальної. У такому випадку логічним є використання наближення взаємодії двох рівномірно заряджених сфероїдів. При цьому потенційна енергія взаємодії ядер вже буде залежати не лише від відстані між ними, а й від їхньої взаємної орієнтації.

У розгляді використовується стандартний вираз для енергії взаємодії двох об'ємних зарядів

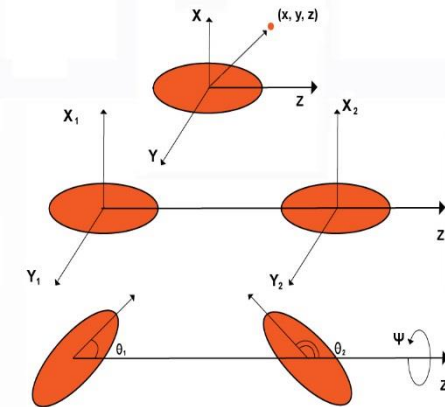
$$E_{Coul} = \int \Phi(\vec{r})\rho(\vec{r})d\vec{r},$$

який містить потенціал Φ , що створює у просторі один із сфероїдів, та густину заряду ρ в іншому сфероїді (з різкою границею та напівосями a та b)

$$\rho = \frac{Ze}{V} \theta \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{a^2} - \frac{z^2}{b^2} \right).$$

Об'ємні заряди можуть бути як просторово розділеними, так і перетинатися. Потенціал Φ використано із залученням явних форм наведених в монографія [1, 2].

У ході виконання роботи було програмно реалізовано як загальний випадок взаємодії двох довільно орієнтованих сфероїдів, так і всі можливі окремі випадки. У доповіді увагу буде сконцентровано на взаємодії точкового заряду з рівномірно зарядженим сфероїдом, що може бути цікавим з точки зору розгляду зсуву протонних рівнів відносно нейтронних у деформованих ядрах; випадку двох соосних сфероїдів – ситуація взаємної поляризації ядер в процесі їхньої взаємодії; загальний випадок взаємного розташування ядер. Для наочності взаємне розташування ядер у вказаних випадках проілюстровано на рисунку.



1. Л.Н. Сретенский. *Теория ньютоновского потенциала* (Москва-Ленинград: ОГИЗ-Гостехиздат, 1946) 346 с.
2. С. Чандрасекар. *Эллипсоидальные фигуры равновесия* (Москва: Мир, 1973) 288 с.

ОБОЛОНКОВІ ПОПРАВКИ ДО ЕНЕРГІЇ ТА МОМЕНТУ ІНЕРЦІЇ КОЛЕКТИВНОГО ОБЕРТАННЯ ЯДЕР

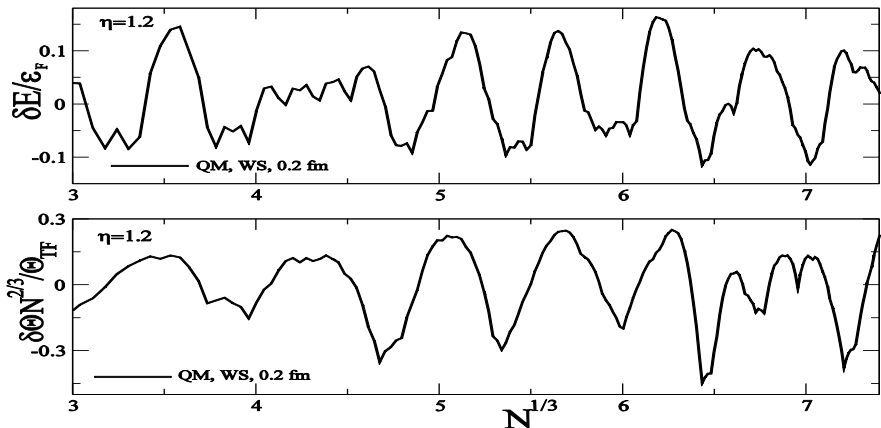
Д. В. Горпинченко¹, О. Г. Магнер¹, Дж. Бартел²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Університет Страсбурга, Страсбург, Франція

Моменти інерції (МІ) колективного обертання деформованих ядер традиційно аналізуються в експериментальних і теоретичних дослідженнях сучасної ядерної фізики. Для значного спрощення цієї задачі багатьох сильно взаємодіючих нуклонів використовується модель примусового руху та метод оболонкової поправки. Для розуміння природи колективного обертального руху була розвинута квазікласична теорія періодичних орбіт. Зокрема, було показано, що оболонкові поправки до моменту інерції та вільної енергії ядра є пропорційними з квазікласичною точністю, $\delta\Theta \propto \delta E$. В даній роботі проведені квантово-механічні (QM) розрахунки оболонкових компонентів МІ $\delta\Theta$ та енергії δE колективного обертання ядер для перевірки їхнього квазікласичного співвідношення. Середнє поле розглядається у наближенні деформованого потенціалу Вудса-Саксона (Woods-Saxon, WS). Колективне статистично рівноважне обертання розглядається як узагальнений твердотільний момент інерції, що дає змогу вийти за межі формули Інгліса наближення теорії збурень.

Оболонкові поправки до МІ $\delta\Theta$ та енергії δE деформованого ядра розраховувались за допомогою усереднення чисел заповнення густини частинок за методом оболонкової поправки. Власні хвильові функції WS гамільтоніана обчислювалися за допомогою їхнього розкладу за базисом гармонічного осцилятора. Для розрахунків матриці перетворення від власних функцій потенціалу WS до базисних, які залучені в процедуру діагоналізації гамільтоніана, було використано точний та ефективний чисельний алгоритм.



На рисунку квантові чисельні розрахунки $M \delta \Theta$ (QM лінії в одиницях значення моделі Томаса-Фермі Θ_{TF}) як функції числа нейтронів $N^{1/3}$ для великої глибини потенціалу WS (-200 MeV) з малим параметром дифузності (0.2 фм) та сфероїдальною поверхнею порівнюються з оболонковими поправками δE (в одиницях енергії Фермі ϵ_F) при типовій деформації, що визначається як відношення напівосей сфероїда $\eta = 1, 2$. Показано, що ці квантові оболонкові поправки до M та енергії приблизно пропорційні, що підтверджує результати квазікласичного підходу.

1. A.G. Magner, D.V. Gorpichenko, J. Bartel. Phys. At. Nucl. 80 (2017) 122.

ЯДЕРНО-ЯДЕРНИЙ ПОТЕНЦІАЛ, ПЕРЕРІЗИ ПРУЖНОГО РОЗСІЯННЯ ТА ПІДБАР'ЄРНОГО ЗЛИТТЯ ДЛЯ СИСТЕМИ $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$

О. І. Давидовська, В. Ю. Денисов, В. О. Нестеров

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Для розрахунків перерізів ядерних реакцій необхідно знати потенціальну енергію взаємодії між ядрами. Причому принципово важливими є величина та радіальна залежність потенціалу взаємодії ядер між ними. В даній роботі досліджується ефективний ядерно-ядерний потенціал в рамках методу подвійної згортки, в якому додатково враховується внесок кінетичної енергії нуклонів, який є дуже важливим на малих відстанях між ядрами. Даний внесок було розраховано, використовуючи модифікований метод Томаса-Фермі з урахуванням \hbar^2 поправок. Одержаний ядерно-ядерний потенціал взаємодії з урахуванням та без урахування внеску кінетичної енергії апроксимували відповідним потенціалом Вудса-Саксона.

Проведено розрахунки перерізів підбар'єрного злиття та пружного розсіяння для реакції $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$, використовуючи потенціал Вудса - Саксона, який отримано за допомогою мікроскопічного ядерно-ядерного потенціалу з урахуванням внеску кінетичної енергії нуклонів. Показано, що знайдені перерізи добре узгоджуються з експериментальними даними.

Для порівняння проведено розрахунки перерізів підбар'єрного злиття та пружного розсіяння для звичайного потенціалу подвійної згортки. Знайдено, що в даному випадку отримані перерізи гірше описують експериментальні дані, зокрема, переріз злиття значно переоцінює величини перерізу у підбар'єрній області.

Отже, показано, врахування внеску кінетичної енергії в потенціал призводить до кращого опису експериментальних перерізів підбар'єрного злиття та пружного розсіяння, причому обидві реакції описано одночасно за допомогою цього потенціалу.

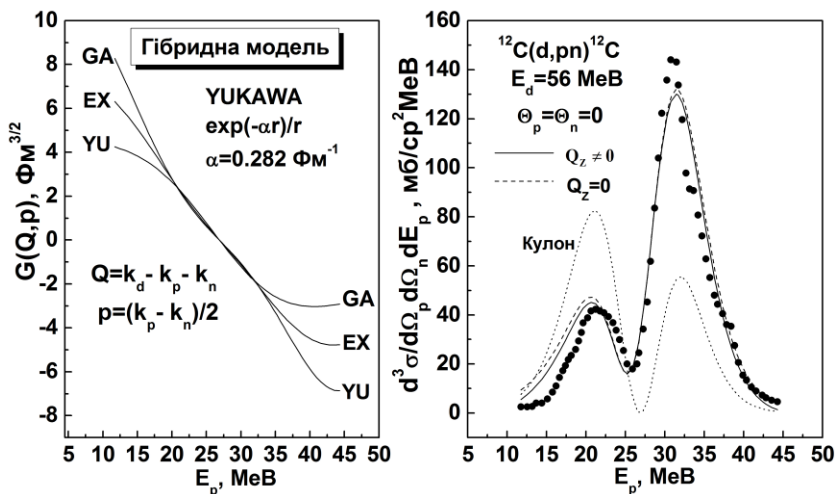
ПРО РОЛЬ ФУНКЦІЇ АСИМЕТРІЇ РОЗПОДІЛУ ЗАРЯДУ В ДЕЙТРОНІ ПРИ ЙОГО ДИФРАКЦІЙНОМУ РОЗЩЕПЛЕННІ НА ЯДРАХ

В. В. Давидовський, А. Д. Фурса

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Виконано побудову модельних хвильових функцій (n,p) - пар, що утворюються в результаті розвалу дейтрона при його розсіянні в ядерно-кулоновому полі ядра. За основу побудови взяті три типи функцій дейтрона в основному стані: гаусової (GA), експонентної (EX) та юкавської (YU) форм. Функції безперервного спектру (n,p) моделювалися так, щоб на нескінченності для відносного руху виходила сферична хвиля, що сходиться, і щоб вона була ортогональною відповідним функціям основного стану, що необхідно для виключення нефізичних внесків в переріз розвалу при малих переданих імпульсах Q.

За допомогою побудованих функцій обчислено фактори, що характеризують асиметрію заряду в дейтроні відносно його центра ваги. Останні є невід'ємною частиною амплітуди кулонового розвалу дейтрона. Показано, що ці функції відіграють вирішальну роль у формуванні двогорбої структури перерізів. На рисунку ліворуч наведено приклад поведінки розрахованої функції для трьох моделей, а на правому – порівняння теорії [1,2] з експериментальним енергетичним спектром протонів для однієї з моделей.



1. V.V. Davydovskyy, A.D. Foursat. Reaction $^{12}\text{C}(d, pn)^{12}\text{C}$ at 56 MeV in the diffraction approximation. In: Proc. of the 4-th Intern. Conf. "Current Problems

in Nuclear Physics and Atomic Energy”, Sept. 3 - 7, 2012, Kyiv, Ukraine (Kyiv, 2013) 136.

- В.В. Давидовский, А.Д. Фурса. Энергетические спектры протонов в дифракционном расщеплении дейтронов ядрами ^{12}C и ^{40}Ca при средних энергиях. Ядерная физика та енергетика 17(2) (2016) 111.

ЗАЛЕЖНІСТЬ ШИРИНИ МАСОВОГО РОЗПОДІЛУ ОСКОЛКІВ ПОДІЛУ В ПРОСТОМУ СТАТИСТИЧНОМУ НАБЛИЖЕННІ

В. Ю. Денисов¹, О. А. Беляновська², К. М. Сухий², В. П. Хоменков¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна

Масовий розподіл осколків є дуже важливою характеристикою процесу поділу. Часто розподіл осколків поділу описується феноменологічно за допомогою гаусіанів з відповідною шириною.

Ми розглянули ширину масового розподілу осколків при середніх та високих енергіях збудження подільної системи в статистичному наближенні. Було взято до уваги не тільки об'ємну, а й поверхневу складові параметра густини рівнів. Одержано простий вираз для температурної залежності ширини масового розподілу при високих енергіях

$$\sigma^2 = \frac{2A^2T}{C + 2\kappa A^{\frac{2}{3}}T^{\frac{2}{3}}},$$

де C – параметр жорсткості потенціалу; κ – параметр, пов'язаний з поверхневим внеском в густину рівнів; A – число нуклонів подільного ядра; T – його температура.

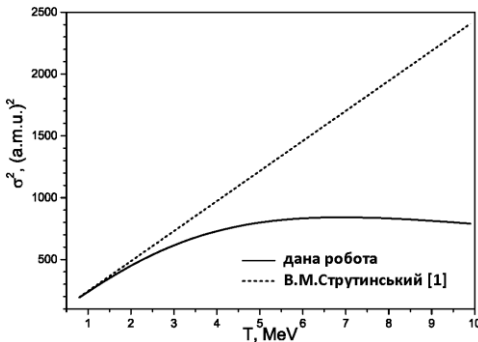


Рис. 1. Оцінка температурної залежності ширини розподілу осколків поділу для ^{213}At .

При низьких енергіях він збігається з результатом, одержаним В. М. Струтинським [1]:

$$\sigma^2 = \frac{2A^2T}{C}$$

Внесок поверхневого члена параметра густини рівнів стає суттєвим при температурі ≥ 1 MeV (рис. 1). Його врахування зменшує ширину розподілу при зростанні температури ядра і краще описує експериментальні дані.

- В.М. Струтинский. ЖЭТФ 45(5) (1964) 1891.

ПОЛЯРИЗАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕСІВ ЗА УЧАСТЮ ДЕЙТРОНА

В. І. Жаба

Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

Дейтрон - найпростіше ядро, яке складається з двох елементарних частинок - протона і нейтрона. Простота та наочність будови дейтрона слугує зручною лабораторією для моделювання і аналізу нуклон-нуклонних сил. Незважаючи на детальне теоретичне і експериментальне дослідження, на сьогодні дейтрон викликає значний інтерес із-за певних теоретичних неузгодженостей. Зокрема згідно з оглядом [1] у ряді робіт хвильова функція дейтрона (ХФД) в координатному представленні має вузли поблизу початку координат. Існування таких вузлів основного і єдиного стану дейтрона свідчить про неузгодженості і неточності в реалізації чисельних алгоритмів при розв'язанні подібних задач або ж про особливості потенціальних моделей дейтрона. В огляді [1] систематизовано статичні параметри дейтрона, одержані по ХФД для різних потенціальних моделей, і проведено огляд аналітичних форм ХФД в координатному представленні. Також наведено як аналітичні форми, так і параметризації ХФД, необхідні для подальших розрахунків характеристик процесів за участю дейтрона. Крім цього, зазначено, що у такій зручній формі ХФД необхідні при застосуванні для розрахунків поляризаційних характеристик дейтрона, а також для оцінки теоретичних значень спінових спостережуваних др- розсіювання. Зрештою ХФД можна використати і для розрахунків параметрів і характеристик реакцій типу (d, d') . В 2000-х рр. були також запропоновані нові аналітичні ХФД. До них належать такі, як параметризації Дубовиченка і Бережного-Корди-Гаха, а також аналітична форма у такому простому загальному виді [2]

$$\begin{cases} u(r) = r^A \sum_{i=1}^N A_i \exp(-a_i r^{a_i}), \\ w(r) = r^B \sum_{i=1}^N B_i \exp(-b_i r^{b_i}). \end{cases} \quad (1)$$

Використовуючи попередні ХФД в координатному представленні для потенціалу Reid93 у роботі [3] представлені результати як кутової асиметрії для векторних t_{10} , t_{11} і тензорних t_{20} , t_{21} , t_{22} дейтронних поляризацій, так й імпульсної асиметрії для векторних t_{1i} поляризацій. Досліджено вплив чотирьох апроксимацій ХФД на розрахунки тензорної поляризації t_{20} . У рамках методу інваріантної амплітуди одержано тензорну аналізуючу здатність T_{20} і поляризаційну передачу κ_0 , які є спіновими спостережуваними в пружному др- розсіюванні назад. Порівнюються t_{20} , κ_0 та кореляції κ_0 - T_{20} з експериментальними да-

ними провідних колаборацій та оглядів. Відносно кута 90° спостерігається чітка симетрія аналізуючих здатностей T_{20} і T_{22} , які характеризують фотонародження негативного π^- мезона в реакції $\gamma(d, \pi^-)pp$.

По отриманим раніше коефіцієнтам аналітичної форми ХФД для нуклон-нуклонного потенціалів Reid93 та Argonne v18 [4] розраховані поляризаційні спостережувані в $A(d, d')X$ -реакціях. Обчислені величини тензорної A_{yy} і векторної A_y аналізуючих здатностей порівнюються з експериментальними даними в t -масштабуванні. В моделі імпульсного наближення також оцінені теоретичні значення тензор-тензорної K_{yy} та вектор-векторної K_y передач поляризації.

1. V.I. Zhaba. arXiv:1706.08306 [nucl-th].
2. V.I. Zhaba. J. Phys. Stud. 20 (2016) 3101.
3. V.I. Zhaba. J. Phys. Stud. 21 (2017) 4101.
4. V.I. Zhaba. Mod. Phys. Lett. A 31 (2016) 1650139.

ПЕРЕРІЗИ (γ, n) -РЕАКЦІЇ НА ІЗОТОПАХ ІНДІО

В. І. Жаба, М. М. Лазорка

Ужгородський національний університет, Ужгород, Україна

Використовуючи результати експериментального дослідження ізомерних відношень виходів Y та інтегральних перерізів σ_{int} реакції $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m,g}}\text{In}$ [1, 2], відтворено енергетичну залежність перерізу фотоядерної реакції $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m}}\text{In}$ у утворення ізомеру з період напіврозпаду $T_{1/2} = 20,9$ хв. Енергетичний хід перерізу реакції $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m}}\text{In}$ має характерну форму гігантського дипольного резонансу в районі 16 МеВ.

На рис. 1, *a* наведено переріз реакції $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m}}\text{In}$, отриманий [2] методами Пенфольда - Лейсса та регуляризації Тіхонова (відповідні позначення як PL і T) по відомим ізомерним відношенням виходів [1].

Для моделі густини рівнів нукліда (модель Фермі-газу) в інтервалі енергій 10 - 25 МеВ з кроком 0,1 МеВ розрахований в TALYS-1.8 [3] переріз реакції $^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112\text{m}}\text{In}$ у максимумі лежить дещо нижче даних, одержаних методами Пенфольда - Лейсса й Тіхонова. Якщо ж у теоретичних розрахунках врахувати повний переріз $(\gamma, 2n)$ -реакції, то експериментальні і теоретичні дані перерізу збігаються в більш широкому інтервалі. Також порівнюються одержані величини перерізу з експериментальними даними до 18 МеВ [4].

Аналогічні розрахунки проведено для одержання ефективного перерізу реакції $^{115}\text{In}(\gamma, n)^{114\text{m}}\text{In}$ (див. рис. 1, *б*). Причому розрахунки отримано для ізомерів $T_{1/2}(^{114\text{m}}\text{In}) = 43$ мс та $T_{1/2}(^{113\text{m}}\text{In}) = 5,969 \cdot 10^3$ с.

За допомогою функцій Брейта - Вігнера та Гауса оброблено і експериментальні, і теоретичні дані енергетичної залежності перерізів (γ, n) -реакції на ізо-

топах індію ^{113}In та ^{115}In . Розраховано величину χ^2 , що припадає на степінь ві-
 льності функції, а також площу S під піком в $\text{MeV} \cdot \text{мбн}$ та ширину Γ піка на
 напіввисоті.

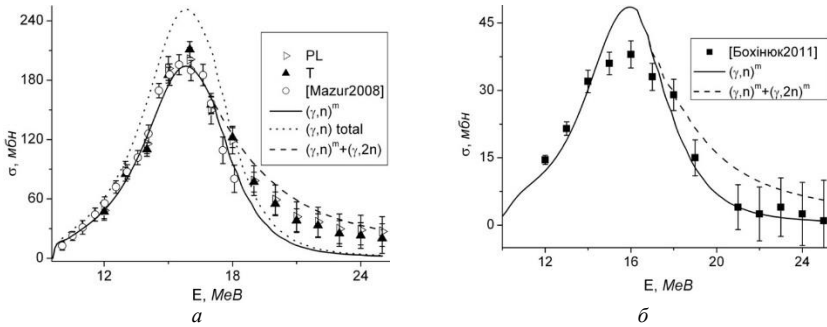


Рис. 1. Перерізи реакцій: $a - ^{113}\text{In}(\gamma, n)^{112m}\text{In}$; $b - ^{115}\text{In}(\gamma, n)^{114m}\text{In}$

1. В.С. Бохінюк та ін. Наук. вісник Ужг. унів. Сер. Фізика, 30 (2011) 154.
2. V.I. Zhaba et al. arXiv:1801.07917 [nucl-ex].
3. TALYS. Home: // www.talys.eu
4. V.M. Mazur et al. Phys. Particl. and Nucl. Lett. 5 (2008) 374.

ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕНЕРГІЇ ЗБУДЖЕННЯ ВІД МАСИ УЛАМКУ ПОДІЛУ

Ф. О. Іванюк¹, С. Чіба², М. Усанг², Ч. Ішізук²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Токійський технологічний інститут, Токіо, Японія

Ми описуємо процес поділу ядра ^{235}U нейтронами в рамках двоцентрової мо-
 делі оболонки та чотиривимірного Ланжевнівського підходу [1]. У рамках цього
 підходу ми розраховали залежність енергії збудження уламків поділу від їхньої
 маси. Для цього підігнали форму ядра в точці розриву, отриману як розв'язок
 рівнянь Ланжевнена, двома розділеними уламками (рис. 1), та акуратно розраху-
 вали енергію збудження та енергію деформації кожного уламку окремо врахо-
 вуючи оболонкові ефекти, ефекти спарювання та їхню залежність від енергії
 збудження та маси уламку поділу [2]. Для більш адекватного опису енергій од-
 ночастинкових станів традиційний для двоцентрової моделі оболонки потенціал
 Нільсона було замінено деформованим потенціалом Вудса - Саксона.

Для розподілу енергії збудження між уламками поділу ми користувалися
 найбільш простим та надійним наближенням – температура кожного уламку
 поділу зразу після розриву така ж сама, якою була температура материнського
 ядра безпосередньо перед точкою розриву.

Розрахована енергія збудження уламків поділу ясно демонструє пилоподібну залежність енергії збудження від маси уламку поділу (рис. 2). Ця залежність є прямим наслідком оболонкових ефектів в енергії збудження та в енергії деформації ядра при невеликих енергіях збудження та використання чотиривимірної параметризації форми поверхні ядра в процесі поділу. Чотиривимірна параметризація (параметри деформації важкого та легкого уламків поділу є незалежними динамічними змінними) дає змогу описати конфігурацію в точці розриву, при якій форма одного уламку близька до сферичної, а іншого – сильно видовжена. Розрахована залежність якісно узгоджується з експериментальними даними [3].

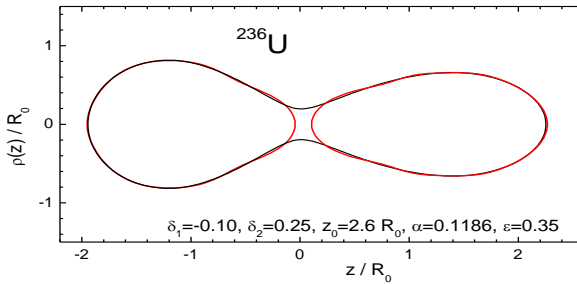


Рис. 1. Форма ядра ^{236}U в точці поділу та її наближення двома розділеними фрагментами.

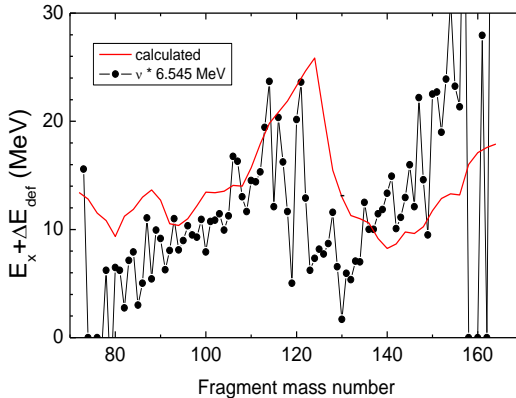


Рис. 2. Залежність енергії збудження уламку поділу від його маси.

1. C. Ishizuka et al. Phys. Rev. C 96 (2017) 064616.
2. F.A. Ivanyuk et al. EPJ Web of Conferences 169 (2018) 00005.
3. R. Muller et al. Phys. Rev. C 29 (1984) 885.

ПОЛУАНАЛИТИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ В ТЕОРИИ РАЗВАЛА ЛЕГКИХ ЯДЕР

А. П. Ильиц, О. А. Понкратенко, Ю. Н. Степаненко, В. В. Улешенко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

В последние годы в связи с развитием техники корреляционного эксперимента и необходимостью уточнения астрофизических S -факторов, которые связаны с асимптотическими нормировочными коэффициентами, появились новые работы по исследованию около- и подбарьерного развала слабосвязанных легких ядер на средних и тяжелых ядрах. Для теоретической интерпретации применяются современные программы CDCC (связанных каналов с дискретизацией континуума) и XCDCC, которая учитывает возбуждение кора налетающего ядра в процессе развала, если последнее имеет структуру: кор + нуклон.

Как известно, расчеты по методу CDCC для реакции двухчастичного развала требуют большой, но ограниченной области конфигурационного пространства $(L \otimes R \otimes l \otimes r)$. В данной работе предлагается уменьшить эту область численных расчетов, разделив бесконечную область интегрирования по пространству вектора \mathbf{R} при вычислении матрицы реакции на внутреннюю и внешнюю область, в которой учитывается только кулоновское взаимодействие между частицами и ядерное взаимодействие между фрагментами развала. Во внутренней области, радиус r ограничивается радиусом достаточного спада квадратично интегрируемых функций, на которых производится дискретизация функций непрерывного спектра относительного движения фрагментов. Максимальные значения l и L ограничиваются благодаря свойствам функций непрерывного спектра. При определении матрицы перехода для реакции кулоновского развала во внешней области используем адиабатическое приближении искаженных волн.

$$\mathbf{T}_{c:ab}^+ = \langle \Psi_{\mathbf{r}_a}^{(-)}(\eta_a, \mathbf{r}_a) \Psi_{\mathbf{q}_b}^{(-)}(\eta_b, \mathbf{R}_b) \Big| f_{\text{out}}(R - R_{\text{in}}) (V_{ab}(\mathbf{r}) + V_{\text{pol}}^c(\mathbf{r}, \mathbf{R})) \Big| \Psi_{\mathbf{p}_c}^{(+)}(\eta_c, \mathbf{R}) \Phi_{\text{cl}}(\mathbf{r}, \mathbf{R}; \varepsilon_c(R_{\text{in}})) \rangle$$

Здесь $\Psi_{\mathbf{p}}^{(\pm)}$ – волновые функции рассеяния частицы с импульсом \mathbf{p} в кулоновском поле ядра-мишени; $f_{\text{out}}(R - R_{\text{in}})$ – функция плавной ступеньки, $f_{\text{out}}(x) \rightarrow 1$ при $x > 0$; $V_{ab}(\mathbf{r})$ – взаимодействие между фрагментами; $V_{\text{pol}}^c(\mathbf{r}, \mathbf{R})$ – полярирующий кулоновский потенциал, возникающий из-за отличия якобиевского вектора \mathbf{R}_b (в уравнении) и вектора \mathbf{r}_b (к частице b в полном гамильтониане). Эти взаимодействия исключены из гамильтониана конечного состояния.

$\Phi_{c1}(\mathbf{r}, \mathbf{R}; \varepsilon_c(R_{in})) = \sum_{\beta} C(c; a, b, \beta) \phi_{\beta}(\mathbf{r}, \mathbf{R}; \varepsilon_c(R_{in}))$ – трехмерный адиабатический кластерный формфактор, $C(c; a, b, \beta)$ – спектроскопические амплитуды парциальных состояний $\phi_{\beta}(\dots)$ адиабатической деформации налетающего ядра ‘ c ’. Поскольку максимальное значение r ограничивается экспоненциальным убыванием слабосвязанных состояний $\phi_{\beta}(\dots)$, то все функции, входящие в $\mathbf{T}_{c,ab}^+$, можно разложить во внешней области по степеням отношения r/R . После замены выражений для градиентов по \mathbf{R} волновых функций $\Psi_{\mathbf{k}_a}^{(-)}$ и $\Psi_{\mathbf{q}_b}^{(-)}$ на выражения этих функций через градиенты по соответствующим импульсам и замены скалярных произведений $(\mathbf{r} \cdot \mathbf{R})$ на скалярные произведения операторов градиентов по импульсам, действующих на произведение плоских волн, шестимерный интеграл для $\mathbf{T}_{c,ab}^+$ факторизуется на конечную сумму сверток двух тензоров. Первый представляет многократный градиент по относительному импульсу фрагментов от фурье преобразования компонентов формфактора развала, второй выражается через многократные градиенты по импульсам \mathbf{k}_a , \mathbf{q}_b , \mathbf{p}_c от интеграла перекрытия трех функций типа $\Psi_{\mathbf{p}}^{(\pm)}$. В работе показано, что такие интегралы аппроксимируются суммой интегралов, для которых известны аналитические выражения.

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АМПЛИТУДЫ МНОГОЧАСТИЧНОГО КУЛОНОВСКОГО РАЗВАЛА В ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЯХ

А. П. Ильин

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Для оценки вклада прямого кулоновского многочастичного расщепления атомных ядер в ядерные реакции в рамках метода искаженных волн используется приближение взаимодействия нулевого радиуса для слабосвязанного многокластерного ядра. В этом приближении амплитуда реакции выражается через производную от интеграла перекрытия X_{ω} по параметру сходимости $\omega \rightarrow 0$ экспоненциальной регуляризующей функции. Интеграл X_{ω} содержит произведение полной волновой функции $\Psi^+(\vec{r}_c, \vec{R})$ налетающей частицы в кулоновском поле тяжелого ядра-мишени на аналогичные функции $\Psi^-(\vec{k}_j, \vec{R})^*$ трех вылетающих частиц. Используя интегральное представление вырожденных гипергеометрических функций, входящих в волновые функции кулоновского рассеяния, приводим X_{ω} к трехкратному интегралу по однотипным кон-

турам в комплексных плоскостях. Далее такой интеграл X_ω обобщаем на случай подобного ему четырехкратного интеграла, через который должна выражаться амплитуда кулоновского развала на четыре заряженные частицы. Это было сделано, чтобы уяснить структуру выражений, к которым должны быть приведены многочлены, полученные в результате дробно-линейных преобразований со свободным параметром α_j для каждой переменной интегрирования $j = 1, \dots, 4$. Подробности выкладок опускаются ввиду необходимости экономии. Приводятся только окончательные выражения в виде подстановок пакета Wolfram Mathematica. Далее посредством биномиальных разложений выполняется разложение многочленов в основаниях двух подынтегральных комплексных степеней по функциям $(1 - \alpha_j)^{-1}$ в предположении, что $\alpha_j \rightarrow -\infty$. В результате X_ω представляется в виде шестикратной бесконечной суммы, содержащей 16-кратную конечную сумму, в которую входят четыре однократных контурных интеграла и сингулярные коэффициенты в комплексных степенях. После выделения сингулярных множителей каждый интеграл затем преобразуем в гипергеометрическую функцию Гаусса и все результаты подставляем обратно в суммы. Оказывается, что теперь функции Гаусса выносятся из-под знаков сумм, и в результате суммирования получаем произведение алгебраических выражений. Далее в результате приведения сомножителей, содержащих одинаковые показатели степеней, получаем полное сокращение всех сингулярных параметров $(1 - \alpha_j)$. Окончательно получаем X_ω в виде произведения шестикратного ряда, содержащего произведение четырех гипергеометрических функций Гаусса с целыми степенями рациональных коэффициентов с исходными параметрами, на коэффициент в виде произведения комплексных степеней рациональных функций. В результате редукции, то есть обнуления введенных ранее параметров, получаем аналогичное выражение X_ω для развала на три заряженные частицы.

В результате анализа этого выражения были найдены следующие свойства дифференциальных угловых распределений вылетающих частиц: 1) при увеличении числа вылетающих частиц сечение уменьшается в основном за счет дополнительного зоммерфельдовского коэффициента; 2) распределения на углах более 90° относительно падающего пучка должны иметь резкие спады вследствие появления дополнительного множителя $e^{-2\pi\eta_c}$ (η_c – параметр Зоммерфельда во входном канале).

После обобщения выражения для X_ω на случай 6-кратного контурного интеграла автор сразу записал финальное выражение, которое соответствует развалу на пять заряженных частиц.

КОЕФІЦІЄНТ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ В ЯДРАХ, ВІДДАЛЕНИХ ВІД ОСНОВНОГО СТАНУ

В. М. Коломієць, С. В. Лук'янов, А. І. Санжур

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Поверхневий натяг атомних ядер σ відіграє ключову роль при дослідженнях енергії зв'язку і поведінки ядер при деформації, наприклад, при формуванні бар'єрів ядерного поділу. В практичних розрахунках знання величини σ необхідне при рівноважній густині нуклонів ρ_0 в основному стані ядер. Однак, дослідження рівняння стану ядер і поведінки ядер за межами стабільності потребує функціональної залежності поверхневого натягу $\sigma(\rho)$ при довільних густинах нуклонів $\rho \neq \rho_0$.

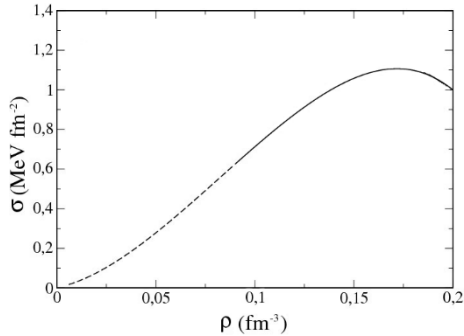
У роботі [1] нами було побудовано рівняння стану $P = P(\rho)$ для сферичної краплини ядерної матерії з ефективною нуклон-нуклонною взаємодією у вигляді сил Скірма. При дослідженні цього рівняння отримані парціальні внески в загальний тиск від різних джерел, зокрема, поверхневий (капілярний) тиск $P_{surf}(\rho) \sim A^{-1/3}$. Поверхневий тиск $P_{surf}(\rho)$ пов'язаний з коефіцієнтом поверхневого натягу $\sigma(\rho)$ узагальненим рівнянням Лапласа

$$\frac{d\sigma}{d\rho} - \frac{2}{3\rho}\sigma - \frac{R}{3\rho}P_{surf}(\rho) = 0, \quad (1)$$

де R – радіус ядра. Розв'язок рівняння (1) має вигляд

$$\sigma(\rho) = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{2/3} \sigma_0 + \frac{1}{3}R\rho \int_{\rho_0}^{\rho} \frac{P_{surf}(\rho')}{\rho'^2} d\rho'. \quad (2)$$

Використовуючи отриманий в роботі [1] парціальний тиск $P_{surf}(\rho)$ та вираз (2), нами обрхована залежність $\sigma(\rho)$ для ядра ^{208}Pb . Ця залежність представлена на Рис. 1. Як видно з рисунка, $\sigma(\rho)$ є немонотонною функцією густини ρ , та досягає максимуму при рівноважному значенні $\rho = \rho_0$. Останнє узгоджується з результатами роботи [2]. При зменшенні густини ρ поверхневий натяг прямує до нуля. Проте, при значеннях густини $\rho \leq 0,09 \text{ фм}^{-3}$ ядро досягає області спінодальної нестійкості. В цій області модуль стиснення ядра є від'ємним і тому екстраполяція $\sigma(\rho)$ тут є суто формальною. Цей факт відображено на рисунку пунктирною лінією.



Залежність поверхневого натягу від густини нуклонів для ядра ^{208}Pb з використанням ефективних сил Скірма SkM*.
Рівноважне значення густини: $\rho_0 = 0,17 \text{ фм}^{-3}$.

1. V.M. Kolomietz, S.V. Lukyanov, A.I. Sanzhur, S. Shlomo. Phys. Rev. C 95 (2017) 054305.
2. W.D. Myers, W.J. Swiatecki. Ann. Phys. (NY) 55 (1969) 395.

СТАТИСТИЧНА ГУСТИНА РІВНІВ У САМОУЗГОДЖЕНОМУ СЕРЕДНЬОМУ ПОЛІ ЯДРА

В. М. Коломієць, А. І. Санжур

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Для обчислення статистичної густини рівнів сферичних ядер застосовано варіаційний підхід з використанням самоузгодженого середнього поля із ефективною нуклон-нуклонною взаємодією. Такий підхід успішно описує як основні властивості ядра в моделі рідкої краплі, так і одночастинкові характеристики, що формуються середнім полем ядра $V(r)$. Статистична густина рівнів $\rho(E_{\text{ex}}) \propto \exp S(E_{\text{ex}})$ при енергії збудження ядра E_{ex} пов'язана з ентропією $S(E_{\text{ex}})$ і може бути розрахована методом Дарвіна – Фаулера

$$\rho(E_{\text{ex}}) \propto \exp S(E_{\text{ex}}) = \exp\left(2\sqrt{aE_{\text{ex}}}\right) = \exp(2aT), \quad (1)$$

де α параметр статистичної густини рівнів, T – температура ядра. При відносно невеликих температурах $T \ll \varepsilon_F$ (ε_F – енергія Фермі), параметр α із задовільною точністю може бути виражений через одночастинкову густину рівнів $g(\varepsilon)$ в середньому полі ядра.

Для обчислення середнього поля ядра $V(r)$ і густини рівнів $g(\varepsilon)$ в роботі використано узагальнене наближення Томаса-Фермі із силами Скірма SkM* і

KDE0v1. Досліджуючи температурну залежність густини рівнів $\rho(E_{ex})$ ми скористались також концепцією квазічастинок Ландау і ввели ефективну масу нуклонів $m^*(r)$.

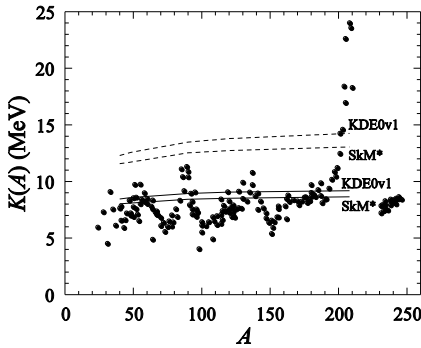


Рис. 1. Залежність параметра K від масового числа. Точки – експериментальні дані, суцільні лінії представляють розрахунки з ефективною масою $m^* \neq m$, штрихові лінії – для випадку $m^* = m$. Розрахунки виконано для сил Скірма SkM* і KDE0v1.

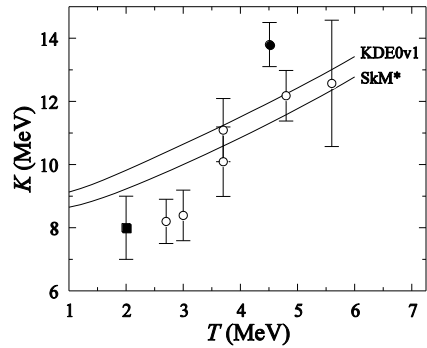


Рис. 2. Температурна залежність параметра K . Символи відповідають експериментальним значенням для $A \approx 160$. Суцільні криві показують розрахунки з урахуванням ефективної маси та вилученням внеску суцільного спектру. Відповідні сили вказано поруч з кривими.

На рис. 1 і 2 наведено результати розрахунків оберненого коефіцієнта статистичної густини рівнів $K = A/a$ залежно від масового числа A і температури T . Зазначимо, що на температурну залежність параметра K на рис. 2 суттєво впливає коректне урахування ефективної маси нуклона і суцільного спектру рівнів в одночастинковій густині рівнів $g(\varepsilon)$.

РІВНЯННЯ СТАНУ БАГАТОКОМПОНЕНТНОГО АДРОННОГО ГАЗУ У ВЕЛИКОМУ КАНОНІЧНОМУ АНСАМБЛІ

Я. Д. Кривенко-Еметов^{1,2}

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Національний технічний університет «КПІ ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна

Статистичні моделі адронного газу активно використовуються при описі даних про вихід частинок в ядро-ядерних ($A + A$) зіткненнях при значних енергіях ($\sqrt{s_{NN}} > 1$ TeV,) та температурах $T > 100$ MeV. Модель Ван-дер-Ваальсу (ВдВ) виявилась ефективним інструментом для опису адронних відштов-

хувань на малих відстанях. Врахування цього ефекту приводить до запобігання небажано великих значень густин числа частинок. Різні версії моделей ВдВ використовувались та використовуються для підгонки експериментальних даних про співвідношення числа частинок в А + А зіткненнях при високих енергіях. Однак модель ВдВ не була належним чином розроблена у випадку, коли між частинками існують сили притягання. Це допомогло б описати описати більш тонкі ефекти в залежності тиску адронного газу від щільності.

У роботі проведено узагальнення моделі на випадок сил притягання у випадку двокомпонентного адронного газу. Розрахунки проведені у канонічному та великому канонічному ансамблі для системи частинок декількох компонентів, які взаємодіють з потенціалами твердого кора та відносно коротко-діючими потенціалами притягання (радіусів притягання). Результати отримані для великого канонічного ансамблю та включають рівняння стану для тиску та густини частинок залежно від температури та хімічних потенціалів. Останні визначаються системою пов'язаних трансцендентних рівнянь. Модель може бути застосована для аналізу експериментальних даних для відносної кількості виходу частинок різних сортів в релятивістських ядро-ядерних зіткненнях.

$$P(\mu_1, \mu_2, T) \approx T(\xi_1 + \xi_2);$$

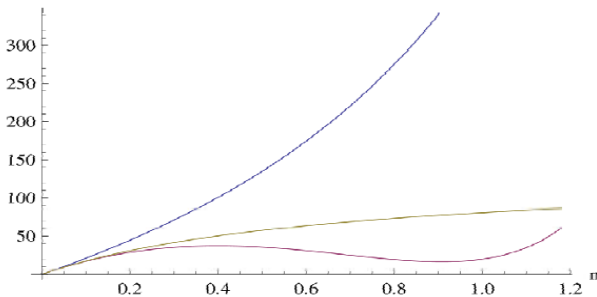
$$\xi_1 \approx \frac{m_1 T}{2\pi^2} K_2(m_1, T) \exp(\mu_1 / T - B_{11}\xi_1 - \tilde{B}_{12}\xi_2);$$

$$\xi_2 \approx \frac{m_2 T}{2\pi^2} K_2(m_2, T) \exp(\mu_2 / T - B_{22}\xi_2 - \tilde{B}_{21}\xi_1)$$

$$P(n_1, n_2, T) \approx T(\xi_1 + \xi_2) \approx T \left(\frac{n_1}{1 - n_1 B_{11} - n_2 \tilde{B}_{21}} + \frac{n_2}{1 - n_2 B_{22} - n_1 \tilde{B}_{12}} \right);$$

$$B_{ij} = b_{ij} - \Delta_{ij} / T$$

$P(T=100, n)$, MeV/fm³



Залежність тиску від густини, порахована за стандартною формулою ВдВ без притягання (синя), з притяганням (фіолетова) та модифікована формула на великі густини.

1. M.I. Gorenstein, A.P. Kostyuk, Ya.D. Krivenko. J. Phys. G 25 (1999) 75.
2. Я.Д. Кривенко-Еметов. Врахування міжчастинкових сил притягання багатоконпонентного адронного газу у великому канонічному ансамблі. В кн. XXIV Щорічна наук. конф. Ін-ту ядерних дослідж. НАН України (Київ, 10 - 13 квітня 2017 року). Тези доп. (Київ, 2017) 39.

ОСЛАБЛЕНИЕ СЛАБЫХ СИЛ В ЯДРАХ

А. А. Куртева

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Более 30 лет считали, что перенормировка констант слабого взаимодействия в ядрах происходит из-за влияния фермиевского и гамов-теллеровского резонансов, следовательно, она должна быть различной для разных ядер из-за различия их поверхностей Ферми. Наши расчеты бета-распада ядер для $31 < A < 231$ показали, что в случае удовлетворительного описания спектров и спектроскопических характеристик дочерних ядер, получается хорошее описание приведенных вероятностей бета-переходов на их возбужденные состояния с одной и той же перенормировкой констант слабого взаимодействия. Для бета-переходов с интенсивностью более 10% рассчитанные значения $lg ft$ (t - парциальный период полураспада) отличаются от экспериментальных не более, чем на 0,4. Следовательно, она не зависит от поверхностей Ферми ядер, а значит и от фермиевского и гамов-теллеровского резонансов.

Расчеты проводились в рамках динамической коллективной модели, в использованном методе [1] учитывались квазичастичные и многофононные (до десяти фононов) состояния основной полосы четно-четного остова, а также вакуумные флуктуации квазичастиц. В той же работе описан способ выбора перенормировки констант слабого взаимодействия

$$\frac{g_A}{g_V} = 0,343 \left[\frac{g_A}{g_V} \right]^{free},$$

где $[g_A / g_V]^{free}$ означает отношение аксиально-векторной и векторной констант для бета-распада свободного нейтрона.

В качестве примера приводим результаты расчета β^- -распада $^{231}\text{Th} \rightarrow ^{231}\text{Pa}$. Бета-распад идет с основного $5/1_1^+$ -состояния ^{231}Th , в которое дают вклад почти все подоболочки с четными орбитальными моментами из заполняемой оболочки. С максимальной интенсивностью и вероятностью бета-переходы идут на $5/2_1^+$ - и $7/2_1^+$ -состояния ^{231}Pa , образованные связью однокваркватичного состояния $13/2_1^+$ с фононными состояниями остова с полными

моментами $R = 4, 6, 8, 10$. В таблиці приведено порівняння розрахованих $\lg ft$ з експериментальними, в першій рядку вказані спини состоянь, на які йдуть переходи, во другій – експериментальні енергії цих состоянь, в третій – інтенсивності бета-переходів.

I^π	$5 / 2_1^+$	$7 / 2_1^+$	$3 / 2_1^+$	$5 / 2_2^+$
E, кэВ	84,2	101,4	102,3	183,5
I , %	35	37	12	12,8
$\lg ft$, експеримент	6,0	5,9	6,4	5,9
$\lg ft$, расчет	6,2	5,8	6,4	6,2

1. И.Н. Вишневикий, А.А. Куртева, В.Е. Митрошин и др. Вероятности бета-переходов и структура ядер. ЯФ. 57(1) (1994) 17.

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ КОЛЕКТИВНИХ СТАНІВ В ЯДРАХ АКТИНИДІВ

О. І. Левон, О. Г. Магнер, С. В. Радіонов

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Теорія колективних збуджень деформованих ядер є дуже складною задачею багатьох сильновзаємодіючих частинок. Тому набувають особливого значення прості статистичні моделі опису розподілів колективних станів цих ядер в залежності від інтервалів між ними.

У данній роботі досліджується спектральний розподіл колективних збуджень в деформованих ядрах актинидів.

Обчислено густину розподілу $p(s)$ відстаней s між сусідніми рівнями при різних значеннях повного кутового моменту ядра J . На рисунку показано роз-

поділ $p(s) = g(s) \exp(-\int_0^s g(s') ds')$ колективних збуджень при значеннях

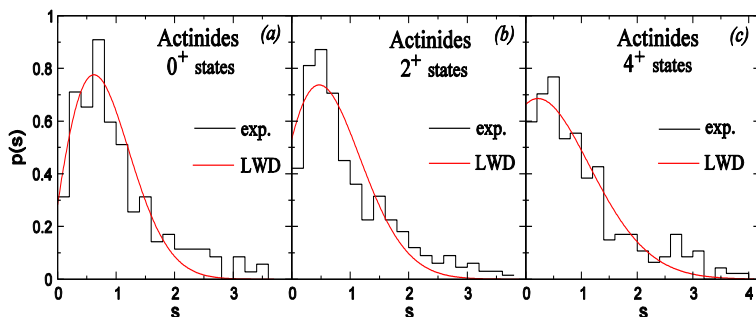
$J = 0$ (а), $J = 2$ (б) та $J = 4$ (с). Суцільна лінія (LWD) на рисунку відповідає лінійному наближенню для густини $g(s)$ відштовхування рівнів,

$g(s) = a + b \cdot s$. При значеннях параметрів $a = 1, b = 0$ отримуємо розподіл Пуасона $\exp(-s)$, тоді як при $a = 0, b = \pi/2$ маємо розподіл Вігнера

$\frac{\pi}{2} s \cdot \exp(-\frac{\pi}{4} s^2)$. Із збільшенням повного кутового моменту ядра J гістограма

експериментального розподілу (а) - (с) наближається до розподілу Пуасона $\exp(-s)$. Це вказує на більш впорядковане (регулярне) розташування рівнів

колективних збуджень в ядрах актинидів при зростанні кутового моменту J також, як і при збільшенні інтервалу s енергій, але на відміну від одночастинкових спектрів.



Як перспективний, плануємо розглянути більш простий однопараметричний розподіл $p(s)$ в рамках лінійної густини розштовхування рівнів $g(s)$, в якому параметри $a = a(q) \propto q \exp(q^2) \operatorname{erfc}(q)$ та $b = b(q) \propto a^2 / q^2$ виражаються через один параметр q , для більш систематичного вивчення статистичних властивостей збуджених колективних станів в широкому діапазоні деформованих ядер.

1. A.I. Levon, A.G. Magner, S.V. Radionov, arXiv:1711.01848v2, submitted to Phys. Rev. C (2017).

ПОСИЛЕННЯ ОБОЛОНКОВОЇ СТРУКТУРИ ЯДРА ПРИ ПОНОВЛЕННІ СИМЕТРІЇ В ПОТЕНЦІАЛАХ З ДИФУЗНИМ КРАЄМ

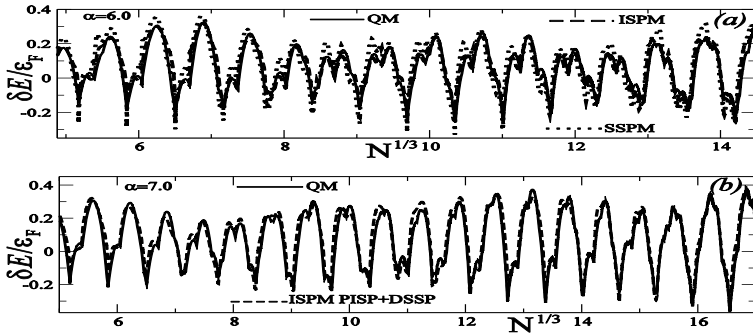
О. Г. Магнер¹, К. Аріта²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Фізичний факультет Інституту технології Нагойї, Нагойя, Японія

Теорія періодичних орбіт успішно використовувалась для дослідження оболонкової структури ядер. При локальному поновленні симетрії потенціалу (зростанні числа однозначних інтегралів руху К, крім енергії) залежно від його параметрів амплітуда оболонкових поправок до густини одочастинкових рівнів $\delta g(e)$ і енергії δE зростає по порядку квазікласичного параметра $(S/\hbar)^{1/2}$, де S – класична дія вздовж найкоротших орбіт, займаючих найбільший об'єм фазового простору. У даній роботі розраховано квазікласичні оболонкові компоненти $\delta g(e)$, усереднені по одночастинковим енергіям e , і δE , як сум по періодичним орбітам для радіальних ступеневих потенціалів $V(r) = -V_0 + V_0(r/R)^\alpha / 2$, близьких до реалістичного потенціалу Вудса - Саксона, де V_0 – глибина потенціальної ями та R – її ефективний радіус. Досліджена залежність цих компонентів від параметра дифузності α близько її значення локального поновлення симетрії (біфуркації) в рамках покращеного методу стаціонарної фази (improved stationary phase method, ISPM).

На рисунку показано оболонкові поправки до енергії δE (в одиницях енергії Фермі) залежно від числа частинок $N^{1/3}$ для двох типових значень параметра дифузності $\alpha = 7$ в точці біфуркації та $\alpha = 6$ далеко від неї. Видно добре узгодження квазікласичних ISPM і квантових QM розрахунків оболонкових енергій δE навіть при біфуркації $\alpha = 7$ (b), де стандартний метод (standard SPM, SSPM) дає нескінченно розбіжні амплітуди.



При $\alpha = 6$ (a) маємо добре узгодження обох квазікласичних наближень ISPM та SSPM з квантовим QM розрахунком. При зростанні $\alpha \rightarrow 7$ до точки біфуркації простих круглих (C) орбіт з параметром симетрії $K = 2$ в більш вроджені плоскі орбіти з $K = 3$ (PISP) та такі ж круглі орбіти C, домінуючими в δE є $K = 3$ короткі орбіти PISP. Відносно малий вклад діаметрів (DSSP) можна врахувати за допомогою SSPM. Показано, що на краю фазового простору, доступного для класичного руху, вклад орбіт C в усереднені $\delta g(e)$ і точні δE зникає тому, що перетворюється в більш потужне $K = 3$ сімейство плоских орбіт при $\alpha \rightarrow 7$. Наведені приклади біфуркацій в деформованих потенціалах з дифузним краєм.

1. A.G. Magner, K. Arita. Phys. Rev. E 96 (2017) 042206.

ШВИДКІСТЬ ТА ПОГЛИНАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ У ГАЗАХ ЧАСТИНОК ПРИ ВИСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

О. Г. Магнер¹, М. І. Горенштейн², У. В. Григор`єв³

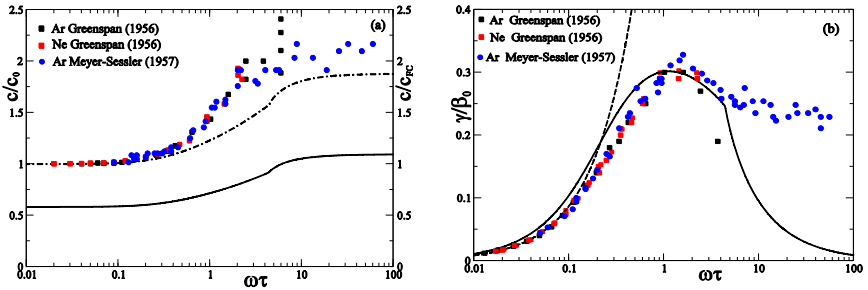
¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Інститут теоретичної фізики імені М. М. Боголюбова НАН України, Київ, Україна

³ Київський Національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Швидкість та коефіцієнт поглинання плоских звукових хвиль в класичному газі знайдено через розв'язок кінетичного рівняння Больцмана з інтегралом зіткнень у наближенні часу релаксації τ . Реакція одностинкової функції розподілу $f(\mathbf{r}, \mathbf{p}, t)$ як функції координат \mathbf{r} , імпульсу \mathbf{p} та часу t на зовнішнє

періодичне поле з частотою ω визначається за допомогою теорії лінійного відгуку. Без застосування теорії збурень для всіх параметрів Кнудсена $\omega\tau$ від малих (режим частих зіткнень, РЧЗ) до великих (режим рідкісних зіткнень, РРЗ) чисельно отримано швидкість звуку $w = \omega/kv_T = c + iw_i$, як розв'язок дисперсійного рівняння $D(w, \omega\tau) = 0$, де $v_T = (2T/m)^{1/2}$, T – температура системи, m – маса частинки, $k = \beta + i\gamma$ – хвильове число, γ – коефіцієнт поглинання хвиль. На рисунку показано універсальну залежність швидкості звуку c (а) відносно адиабатичної $c_0 = (c_p T / c_v m)^{1/2}$ (суцільною) та ізотермічної $c_{FC} = (8/9\pi)^{1/2} v_T$ (штрих-пунктирною лінією) швидкості звуку в РЧЗ і коефіцієнт поглинання γ (b) відносно адиабатичного хвильового числа $\beta_0 = \omega/c_0$ як функцій параметра Кнудсена $\omega\tau$ (c_p та c_v - питомі теплоємності при постійних тиску та об'єму газу). Штрихова лінія (b) – аналітично отриманий коефіцієнт поглинання $\gamma/\beta_0 = 7\omega\tau/8$ за формулою Стокса в РЧЗ. Інші теоретичні лінії – чисельно точний розв'язок дисперсійного рівняння відносно швидкості $w = w(\omega\tau)$ з $\gamma = -w_i/c$. Показано, що швидкість звуку $c(\omega\tau)$ різко збільшується та коефіцієнт поглинання $\gamma(\omega\tau)/\beta_0$ має максимум в області переходу від РЧЗ до РРЗ при $\omega\tau \sim 1$ у доброму узгодженні з експериментальними даними. Розбіжності з результатами експериментів при ще більших $\omega\tau$ є сигналом необхідності врахування теплопровідності та інших механізмів поглинання звукової хвилі.



Наші результати можуть бути використані для кінетичного та гідродинамічного вивчення ядерної матерії, яка утворюється в ядро-ядерних зіткненнях при великих енергіях збудження та при її фазових перетвореннях.

1. A.G. Magner, M.I. Gorenstein, U.V. Grygoriev. Phys. Rev. E 96 (2017) 062142. arXiv:1803.03426.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОЇ СТРУКТУРИ ПРОТОНА ПРИ ЙОГО РОЗСІЯННІ НА ЯДРАХ МЕТОДАМИ ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ФОТОНІВ

С. П. Майданюк

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Гальмівні фотони є потужним засобом експериментального дослідження розподілу електромагнітної речовини. Відповідно до основних положень квантової електродинаміки, припущення у тому, що протон (що взаємодіє з ядром та розсіюється на ньому) містить не точковий розподіл електричного заряду та магнітного моменту, принципово може бути перевірено (визначено).

Ми вивчаємо розсіяння протонів на легких, середніх та важких ядрах-мішенях при енергіях пучків протонів від білянульової до 1 ГеВ. У доповіді буде представлено результати перших досліджень внутрішньої структури протона при його розсіянні на ядрах на основі аналізу гальмівних фотонів, що випромінюються під час таких реакцій. Ще одною мотивацією нашого дослідження є мета описати (пояснити) аномальний магнітний момент протона при його взаємодії з ядром (на основі реалістичних моделей таких взаємодій).

Формалізм нового підходу побудовано на основі поєднання теорії глибоко непружних зіткнень (ГНЗ) [1] та раніше розвинутої нами теорії гальмівного випромінювання, застосованої для протон-ядерного розсіяння [2]. Як наслідок такого формалізму, спектри випромінювання виявляються чутливими до параметра Q^2 віртуальних фотонів (такі фотони є квантами обміну електромагнітної взаємодії між розсіяним протоном та одним з нуклонів ядра-мішені). З іншого боку, цей параметр пов'язаний з розподілом електромагнітного заряду у розсіяному протоні.

У роботі ми представляємо наші перші оцінки (передбачення та аналіз властивостей) випромінювання гальмівних фотонів для розсіювання протонів на ядрах ^{12}Be , $^{42,44,48}\text{Ca}$, ^{54}Fe , ^{208}Pb (саме такі ядра вибрано тому, що для них існують експериментальні дані гальмівного випромінювання, але без дослідження структури протона).

1. W. Greiner, E. Stein, S. Schramm. *Quantum chromodynamics*. 2-nd ed. (Springer, 2002).
2. S.P. Maydanyuk. Phys. Rev. C 86 (2012) 014618; S.P. Maydanyuk, P.-M. Zhang. Phys. Rev. C 91 (2015) 024605.

ПРО ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ 2-ГО РОДУ ПРИ ПОДІЛІ АТОМНИХ ЯДЕР: ^{237}Np , ^{241}Am

В. Т. Маслюк, О. О. Парлаг, М. І. Романюк, О. І. Лендєл

Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, Україна

Термодинамічний підхід відноситься до нових напрямків теорії поділу атомного ядра. Він полягає у трактуванні ядер як особливого виду конденсованого стану речовини, який може бути описаний відомими термодинамічними параметрами (P , V , T) та функціями стану, чи потенціалами. І хоч відомою є умовність такого підходу для систем, що мають 100 - 300 частинок, отримані в рамках нього результати є важливими, наприклад, у задачах систематизації уламків поділу атомних ядер. Найбільш ефективно термодинамічний метод може бути застосований в рамках SPY (Scission Point Yields) моделі, яка дає змогу вивчати виходи уламків поділу із аналізу статистичних ядерних конфігурацій, що реалізуються у точці розділення вихідного ядра. У наших роботах, див. [1], предметом дослідження був ансамбль постійного тиску, що містить всі двауламкові фрагменти поділу ядра та процеси його температурного упорядкування. Запропонована для цього «кольорова» статистика дає змогу трактувати як статистично нееквівалентні нуклони, що містяться у різних уламках та нейтрони поділу. В рамках цього підходу масові/зарядові спектри уламків поділу, а також характеристики нейтронної множинності отримуються із умови мінімуму термодинамічного потенціалу Гіббса такого ансамблю двоуламкових кластерів. Є також можливість дослідити його температурну еволюцію та енергетику процесу поділу.

Термодинамічний підхід дає змогу розглядати поділ ядра, а також процеси його мультифрагментації як фазовий перехід 1-го роду, що супроводжується виділенням /поглинанням енергії. Останнім часом дослідженню фазових переходів типу мультифрагментації, чи випаровування, що ініціюються в пучках високоенергетичних радіоактивних іонів приділяється значна увага.

У даній роботі на прикладі дослідження температурної еволюції масових/зарядових спектрів уламків та енергетики поділу важких ядер ^{237}Np , ^{241}Am показана можливість симетричних фазових переходів, що супроводжуються аномаліями термодинамічних функцій. У фізиці твердого тіла такі переходи називаються 2-го роду і також пов'язуються із зміною симетрії речовини. Розрахунок показує можливість аномалії термодинамічних параметрів, зокрема, теплоємності $C(T)$ ансамблів уламків поділу ядер ^{237}Np , ^{241}Am в діапазоні ядерних температур 1 - 2 MeV. Вказана особливість обумовлена втратою статистичної нееквівалентності нуклонів у різних уламках, що пов'язано із ослабленням впливу заповнених ядерних оболонок та квантових поправок у формуванні їхньої енергії зв'язку при високих температурах. На макрорівні це проявляється зміною топології виходів уламків поділу таких ядер у вказаному температурному діапазоні від асиметричної (2-х горбової) до симетричної, або

одногорбової, коли ядро ділиться як рідка капля. Обговорюються умови експерименту по поділу ядра для підтвердження можливості проявлення фазового переходу 2-го роду при «нагріванні» його в області 1 - 2 MeV.

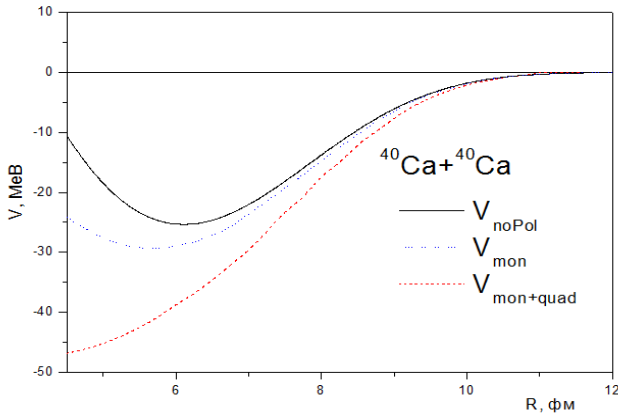
1. V.T. Maslyuk et al. Europhysics Letters 119 (2017) 12001.

ПОЛЯРИЗАЦІЯ ТА ПОТЕНЦІАЛ ЯДЕРНО-ЯДЕРНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

В. О. Нестеров

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Явище поляризації атомних ядер вивчалися в рамках підходу густини енергії. Для отримання густини розподілу нуклонів та енергії системи $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ використовується двоцентрова оболонкова модель.



Ядерна частина потенціалу взаємодії системи $^{40}\text{Ca} + ^{40}\text{Ca}$ в рамках двоцентрової оболонкової моделі без поляризації (V_{noPol}), з урахуванням лише монополярної поляризації (V_{mon}), з урахуванням монополярної та квадрулярної поляризацій ($V_{mon+quad}$).

Розрахунки в рамках підходу густини енергії та двоцентрової моделі оболонок показали, що урахування явища поляризації суттєво впливає на форму як ядерної, так і кулонівської частин потенціалу взаємодії. Зазначимо, що остання враховувалася у формі взаємодії двох рівномірно заряджених еліпсоїдів.

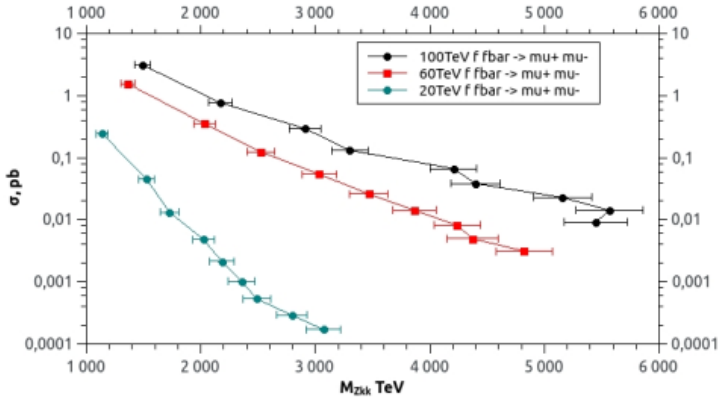
ПОШУКИ КАЛУЦА-КЛЕЙН ЧАСТИНОК НА LHC

Т. В. Обіход, Е. О. Петренко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Проблеми Стандартної моделі призводять до нових альтернативних теорій додаткових вимірювань: модель Рендалла - Сундрума, Аркані - Хамед - Димопулос - Двалі модель і модель TeV^{-1} . У рамках цих моделей за допомогою

комп'ютерної програми Pythia8.2 було розраховано перерізи утворення Калуца - Клейн (КК) частинок при різних енергіях на LHC.



Перерізи утворення КК частинок TeV^{-1} моделі як функція маси калібрувальних бозонів при енергіях на LHC: 20, 60 та 100 TeV.

Розглянуто генерацію одноджетових подій від розпаду скалярних гравітонів за кількістю додаткових вимірювань $n = 2, 4, 6$ при енергії в системі центра мас 14 TeV на LHC. Вивчено процеси утворення гравітону через глюон-глюон, кварк-глюон і кварк-кварк процеси злиття і знайдено періодичність у поведінці масового спектру гравітону. В межах сценарію Рендалл-Судрум були розраховані $\sigma \times \text{Br}$ для процесу утворення масивного гравітону, $gg \rightarrow G^*$, і найбільш імовірних процесів розпаду гравітону при 13, 14 та 100 TeV на FCC.

1. T.V. Obikhod, I.A. Petrenko. Computer modeling of properties of Kaluza-Klein particles and their searches at the LHC. arXiv:1801.03803 [hep-ph].
2. Yu.A. Kubyshin. Models with Extra Dimensions and Their Phenomenology. arXiv:hep-ph/0111027v2 17 Nov 2001.
3. N. Arkani-Hamed et al. The Hierarchy Problem and New Dimensions at a Millimeter. Phys. Lett. B 429 (1998) 263.
4. L. Randall, R. Sundrum. A large mass hierarchy from a small extra dimension. Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 33703373.
5. L. Randall, R. Sundrum. An alternative to compactification. Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 46904693.

В-TAGGING ЯК ЗАСІБ ПОШУКУ НОВОЇ ФІЗИКИ НА LHC

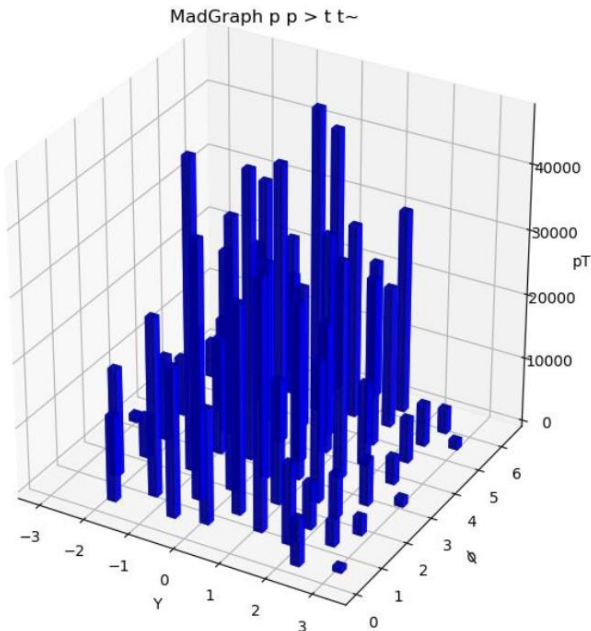
Т. В. Обіход, Е. О. Петренко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

V-tagging, який використовується в сучасних експериментах з фізики високих енергій для ідентифікації струменів, що походять з b-кварків, є важливим

інструментом з пошуку порушення CP, суперчастинок, Калуца-Клейн частинок, мікроскопічних чорних дір, а також бозонів Хігса. Оскільки b-кварки мають порівняно великий час життя і є масивними, продукти їхнього розпаду мають вищий поперечний імпульс за інші частинки протон-протонної взаємодії. Такі реакції характеризуються великою множинністю, інваріантною масою і наявністю низько енергетичного лептону перпендикулярного до струму.

Для ідентифікації b-струменів використовуються кінематичні обмеження по поперечному імпульсу, p_T , і кутових розподілів, $\Delta R = \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta\eta)^2}$, η . Для найбільш поширеної реакції пошуку нової фізики, $pp \rightarrow t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}b\bar{b}$, за допомогою MADGRAPH програми із використанням сучасної партонної функції розподілу, NNPDF31_nnlo_as_0124 PDF, нами отримано розподіли по p_T , η і енергії кварків. За допомогою FastFet3.0 комп'ютерної програми нами отримано тривимірну діаграму розподілу джетів по p_T , u , ϕ .



Діаграма розподілу джетів по поперечному імпульсу, p_T , полярному і азимутальному кутам, u , ϕ .

Для ідентифікації b-кварків використовується Secondary vertex і Impact parameter ідентифікація. Для цієї цілі нами застосована комп'ютерна програма Pythia8, яка є об'єднаною із програмою JETSET ідентифікації Impact parameter. Відповідно до останніх експериментальних даних з пошуку бозонів Хігса нами отримано нові кінематичні обмеження для пошуків нової фізики на LHC.

1. CMS Collaboration, Identification of b-quark jets with the CMS experiment. JINST 8 (2013) P04013.
2. The ATLAS Collaboration. Search for pair production of Higgs bosons in the bbbb final state using proton–proton collisions at $s = 13$ TeV with the ATLAS detector. ATLAS-CONF-2016-049.

**КОРРЕКТИРУЮЩАЯ ФАЗА В ПРИБЛИЖЕНИИ
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ПРИ УЧЕТЕ
ИНТЕРФЕРЕНЦИИ В СТОЛКНОВЕНИЯХ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ**

С. А. Омельченко, В. С. Ольховский

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

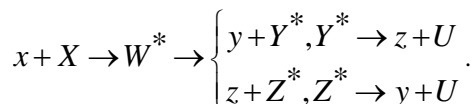
Предложено расширение приближения пространственно-временного анализа, рассматривавшегося ранее для бинарных реакций упругого рассеяния нуклонов на ядрах [1, 2] и для реакций рассеяния легких ионов [3], на когерентные эффекты в тяжело-ионных столкновениях с тремя частицами в конечном канале реакции, две из которых детектируются. Введено понятие корректирующей фазы $\Delta\varphi$, отражающей пространственно-временной подход при анализе столкновительного процесса. Показано, что в приближении случайной фазы учет интерференционных явлений разнится в зависимости от степени перекрытия компаунд-резонансов в конечном канале реакции.

Интерференционные эффекты в конечных состояниях реакций при столкновениях тяжелых ионов всегда представляли научный интерес (см., например, [4]).

В некоторых более ранних работах (см., например, [3]) было развито общее приближение для исследования интерференционных явлений в реакциях с легкими ионами. В данной работе указано на возможность распространения такого приближения для описания интерференционных явлений в столкновительных реакциях тяжелых ионов.

Предложены общие выражения для расчетов амплитуды реакции и интенсивности скорости совпадений. Представлены выводы и будущие перспективы развития метода.

Рассмотренная схема процесса столкновения, учитывающая возможную когерентность (отражающую экспериментальную неразличимость двух альтернативных процессов) при рассеянии тяжелых ионов с образованием и распадом промежуточных компаунд-ядер, имеет вид:



1. В.С. Ольховский, С.А. Омельченко Влияние движения составного ядра на интерференцию прямой и компаунд-ядерной амплитуд при рассеянии нейтронов атомными ядрами. Ядерна фізика та енергетика 17(2) (2016) 130.
2. V.S. Olkhovsky, M.E. Dolinska, S.A. Omelchenko. On scattering cross sections and durations near an isolated compound-resonance, distorted by the non-resonant background in the center-of-mass and laboratory systems. arXiv.1101.5541v1 [nucl-th], Jan. 2011; Appl. Phys. Let. 99 (2011) 244103.
3. V.S. Olkhovsky, S.A. Omelchenko. On the space-time description of interference phenomena in nuclear reactions with three particles in the final channel. The Open Nuclear and Particle Physics Journal 4 (2011) 27.
4. G. Fazio, G. Giardina, V.S. Olkhovsky, S.A. Omelchenko. On interference effects in heavy-ion collision with emission of two particles. In: Proc. Int. Symp. on "Large-Scale Collective Motion of Atomic Nuclei" (Brolo) (Singapore: World Scientific, 1997) 425.

ХАРАКТЕРИСТИКИ ГІГАНТСЬКИХ ДИПОЛЬНИХ РЕЗОНАНСІВ В АТОМНИХ ЯДРАХ

**В. А. Плюйко¹, О. М. Горбаченко¹, К. М. Солодовник¹,
Р. Капоте², П. Дімітріу²**

¹ *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна*

² *Секція ядерних даних, Міжнародне агентство з атомної енергії,
Відень, Австрія*

Характеристики гігантських дипольних резонансів (ГДР) є важливими для надійного моделювання Е1 гамма-переходів у високозбуджених станах атомних ядер, для дослідження механізмів ядерних реакцій, а також для перевірки різних теоретичних підходів для опису ГДР та інших характеристик структури ядер (деформацій, внесок сил, що залежать від швидкості, переходи між різними формами ядер тощо).

В даній роботі отримані оновлені значення параметрів ГДР (енергії, ширини та сили резонансів та їхні похибки) для 144 ізотопів від Li-6 до Pu-239 [1]. Нова база даних розширює та уточнює всі раніш опубліковані дані [2 - 6].

Для знаходження параметрів ГДР використано всі наявні експериментальні значення по перерізам фотопоглинання з бібліотеки EXFOR. Аналіз здійснювався методом найменших квадратів із параметрами ГДР, що розглядалися як параметри підгонки теоретичних виразів для перерізів до експериментальних даних. Теоретичні значення перерізів фотопоглинання використовувались у вигляді суми компонентів, які відповідають збудженню ГДР та розвалу квазі-дейтрона. В якості теоретичного виразу для внеску у фотопоглинання від збудження ГДР застосовувалися моделі: стандартного Лоренціану (SLO) та спрощеної версії модифікованого Лоренціану (SMLO) [4 - 6]. Усі деформовані ядра

вважалися аксіальними з двома нормальними модами збудження ГДР. Обговорюються можливі систематичні похибки отриманих результатів.

Дана робота частково підтримана МАГАТЕ (IAEA, Vienna) у рамках дослідницького проекту "Updating the Photonuclear Data Library and generating a Reference Database for Photon Strength Functions" (IAEA CRP No.F41032).

1. V.A. Plujko, O.M. Gorbachenko, R. Capote, P. Dimitriou. At. Data Nucl. Data Tables (in press, 2018).
2. S.S. Dietrich, B.L. Berman. At. Data Nucl. Data Tables 38 (1988) 99.
3. M.B. Chadwick et al. *Handbook on photonuclear data for applications: Cross sections and spectra* (IAEA-TECDOC-1178, Vienna, 2000).
4. T. Belgya et al. *Handbook for calculations of nuclear reaction data: Reference Input Parameter Library-2* (IAEA-TECDOC-1506, IAEA, Vienna, 2006).
5. R. Capote et al. Nuclear Data Sheets 110 (2009) 3107.
6. V.A. Plujko, R. Capote, O.M. Gorbachenko. At. Data Nucl. Data Tables 97 (2011) 567.

АНАЛІТИЧНІ ВИРАЗИ ДЛЯ ОПИСУ Е1 ФОТОННИХ СИЛОВИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ АТОМНИХ ЯДЕР

В. А. Плюйко, О. М. Горбаченко, К. М. Солодовник

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Проведено порівняння різних моделей опису фотонних силових функцій (ФСФ) при поглинанні електричних дипольних (E1) гамма-квантів. Використано моделі стандартного Лоренціану (SLO), спрощеного модифікованого Лоренціану (SMLO) [1,2], а також спрощеного модифікованого Лоренціану зі сталою шириною вище енергії гігантського дипольного резонансу (ГДР) (SMLOc). Використовувалося наближення аксіально-деформованих ядер. Характеристики ГДР визначалися згідно з оновленою базою даних [3]. Виконано порівняння з розрахунками в наближенні тривісних ядер, реалізованим в моделі потрійного Лоренціану (TLO) [4,5].

Якість опису експериментальних перерізів фотопоглинання аналізувалась із використанням критерію найменших квадратів (χ^2) в області енергій до 30 МеВ. А саме використовувалась величина відношення середніх арифметичних значень величин χ^2 досліджуваної моделі α до моделі SLO, тобто $R_\alpha = \langle \chi^2_\alpha \rangle / \langle \chi^2_{SLO} \rangle$. Усереднення проводилося по сферичним та аксіально-деформованим ядрам. Були отримані такі значення $R_{SMLO} = 0,73$, $R_{SMLOc} = 0,83$, $R_{TLO} = 10,15$. Видно, що модель SMLO є найкращою для опису перерізів фотопоглинання в області енергій до 30 МеВ. Проте, в даній моделі енергетично-звжене правило сум (ЕЗПС) не виконується через стале зростання ширини зі

збільшенням енергії. Запропонована модель SMLOc з модифікованою шириною, що узгоджується з ЕЗПС. Новий підхід є найкращим претендентом для моделювання Е1 ФСФ у області енергій вищих за значення енергій ГДР.

Дана робота частково підтримана МАГАТЕ (ІАЕА, Vienna) в рамках дослідницького проекту "Updating the Photonuclear Data Library and generating a Reference Database for Photon Strength Functions" (ІАЕА CRP No.F41032).

1. R. Capote et al. Nuclear Data Sheets 110 (2009) 3107.
2. V.A. Plujko, R. Capote, O.M. Gorbachenko. At. Data Nucl. Data Tables 97 (2011) 567.
3. V.A. Plujko, O.M. Gorbachenko, R. Capote, P. Dimitriou. At. Data Nucl. Data Tables (in press, 2018).
4. Y. Alhassid, B.Bush, S. Levit. Phys. Rev. Lett. 61 (1988) 1926.
5. A.R. Junghans et al. Phys. Lett. B 670 (2008) 200.

ПОПРАВКИ К ВОЛНОВЫМ ФУНКЦИЯМ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В ПОТЕНЦИАЛЕ ТОМАСА - ФЕРМИ

С. Н. Федоткин

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

В работе [1] в потенциале Томаса - Ферми, используя приближения Тайтца [2], аналитически вычислялись поправки к энергиям связи электронов для водородоподобного атома. В некоторых случаях, кроме энергий, требуется знание более точной по сравнению с водородоподобной волновой функции электронов. Например, для сравнения коэффициентов конверсии α_i , вычисленных в разных приближениях, используют следующую оценку: $\alpha_1 / \alpha_2 \approx \approx \lim_{r \rightarrow 0} |\Psi_1(r) / \Psi_2(r)|^2$, где $\Psi_i(r)$ -состояния, из которых совершается конверсионный переход, вычисленные в соответствующих приближениях [3].

Вычисление поправок к волновым функциям в кулоновском поле производится по теории возмущений. В качестве возмущения служит разность $\Delta V(r)$ между полной потенциальной энергией в подходе Томаса - Ферми и кулоновской энергией в поле ядра с зарядом Z [1]

$$\Delta V(r) = \alpha \frac{(Z-1)}{r} [1 - \varphi(x)],$$

где α - постоянная тонкой структуры; $\varphi(x)$ - функция Томаса - Ферми;

$x=0,6057\alpha(Z-1)^{1/3}mr$; m - масса электрона ($\hbar=c=1$). За счет возмущения $\Delta V(r)$ поправка первого порядка к невозмущенной волновой функции $\Psi_{n0}(r)$ s - состояния имеет вид $\sum_{k \neq n} a_{nk} \Psi_{k0}(r)$, где $a_{nk} = \langle k | \Delta V(r) | n \rangle (E_n - E_k)^{-1}$.

Поскольку возмущение $\Delta V(r)$ сферически симметрично, то суммирование производится только по s - состояниям $\Psi_{k0}(r)$. Используя выражения для волновых функций в кулоновском поле ядра и приближение Тейтца для функция Томаса - Ферми $\varphi(x)$ можно получить аналитические выражения для коэффициентов a_{nk} при любых значениях индексов k и n .

Для волновой функции основного состояния $\Psi_{10}(r)$ эти коэффициенты имеют следующий вид:

$$a_{1k} = \frac{8(Z-1)}{Z} \frac{\sqrt{k}}{(k+1)^3(k-1)!} J_{1k},$$

$$J_{1k} = \int_0^\infty dy y e^{-y} L_k^1\left(\frac{2y}{k+1}\right) \left[1 - \left(1 + \frac{2\gamma k}{k+1}y\right)^{-2}\right],$$

где $\gamma = 0,30285(Z-1)^{1/3}/Z$, а $L_k^1(z)$ - обобщенные полиномы Лагерра. Интеграл J_{1k} можно вычислить аналитически, но результат имеет громоздкий вид. Коэффициенты a_{1k} быстро убывают с ростом k . Вычисляя более точную волновую функцию $\Psi_{10}^{TF}(r)$, используя выражения для коэффициентов a_{1k} , находим что $\lim_{r \rightarrow 0} |\Psi_{10}^{TF}(r) / \Psi_{10}(r)|^2 \approx 0,98$ для зарядов вблизи $Z = 25$, что согласуется с результатами расчета коэффициентов конверсии для К- оболочки с учетом и без учета экранирования [3]. Для L и M – оболочек эффект экранирования значительно сильнее.

1. С.Н. Федоткин. Ядерна фізика та енергетика 18 (2017) 215.
2. T. Tietz Zs. Naturforsch. 23a (1968) 191.
3. М.А. Листенгартен. Гамма-лучи. Внутренняя конверсия гамма-лучей. (1961) 271.

ВИПРОБУВАННЯ ПРОТОТИПУ КОМПАКТНОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО КАЛОРИМЕТРА LUMICAL

**Х. Абрамович¹, Я. Бенхамму¹, О. Борисов¹,
М. Борисова², А. Леві¹, І. Леві¹**

¹ Тель-Авівський університет, Тель-Авів, Ізраїль

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Електромагнітний калориметр LumiCal - це компактний люмінометр, що розробляється для майбутніх електрон-позитронних колайдерів. Прототип цього калориметра, що складається з 8 модулів кремнієвих детекторів, вставлених в щілини 1 мм між вольфрамовими поглиначами, було протестовано на прискорювачі DESY з електронними пучками 1 - 6 ГеВ.

Метою цього випробування було продемонструвати можливість роботи компактного прототипу вольфрамо-кремнієвого калориметра з пів-міліметровими чутливими площинами, а також, вивчення розвитку електромагнітного каскаду та порівняння його з МС моделюванням. Встановлено, що прототип демонструє лінійний відгук на енергію пучка. Добре узгодження було знайдено між даними та моделюванням у Geant4.

Попередній результат розрахунку радіусу Мольєра для енергії електронів 5 ГеВ, отриманий за допомогою параметризації поперечної форми електромагнітного каскаду, менший за 10 мм. Це значення узгоджується з розрахунками за формулою для композитного матеріалу. Подальша робота спрямована на вдосконалення калібрування та проведення вимірювань для інших енергій.

ІЗОМЕРНІ ВІДНОШЕННЯ ДЛЯ ПРОДУКТУ ФОТОЯДЕРНОЇ РЕАКЦІЇ (γ , 3n) НА ^{55}Mn

**О. А. Безшийко¹, О. М. Водін², Л. О. Голінка-Безшийко¹, А. М. Довбня²,
І. М. Каденко¹, В. А. Кушнір², В. В. Мітроченко², С. М. Олійник²,
С. А. Пережогін², С. В. Лубинець¹, А. В. Котенко¹**

¹ Київський Національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

² НДК «Прискорювач» ННЦ ХФТИ, Харків, Україна

Отримання нових експериментальних даних із взаємодії гамма-квантів з ядрами в діапазоні енергій (30÷100) МеВ дає можливість перевірки теоретичних та модельних підходів при дослідженні фотоядерних реакцій в області енергій вище гігантського дипольного резонансу та більш глибокого розуміння процесів взаємодії гамма-квантів з ядрами в цьому діапазоні енергій.

Було проведено вимірювання ізомерних відношень для ядра ^{52}Mn , що утворюється в результаті реакції з вильотом трьох нейтронів на зразках ^{55}Mn при опроміненні гальмівними гамма-квантами з граничними енергіями в діапазоні

32 - 45 MeВ. Опромінення проводилося γ -квантами гальмівного спектру лінійного прискорювача електронів НДК «Прискорювач» ННЦ ХФТІ ЛУ-40 з танталовою мішенню товщиною 1,05 мм. Енергетична роздільна здатність пучка електронів була не гірше 1 % при середньому струмі до 5 мкА. Для вимірювання наведеної активності зразків використовувалась спектрометр на базі напівпровідникового HPGe-детектору з відносною ефективністю 20 % та енергетичною роздільною здатністю 1,9 кеВ для лінії 1332 кеВ ^{60}Co . Калібровку по ефективності детектора було проведено на всіх відстанях «зразок - детектор», для яких проводився набір апаратурних гамма-спектрів опромінених зразків. Для калібровки використовувалися джерела з набору ОСГІ. Відхилення калібрувальних значень від лінійної залежності в подвійному логарифмічному масштабі не перевищувало 2 %.

Проведено порівняння експериментально виміряних значень ізомерних відношень з теоретично розрахованими величинами, отриманими з використанням коду TALYS [1]. Ізмерні відношення розраховувалися з урахуванням як статистичних механізмів перебігу фотоядерних реакцій, так і передрівноважних процесів.

1. A.J. Koning, S. Hilaire, M.C. Duijvestijn. TALYS: Comprehensive nuclear reaction modeling. AIP Conf. Proc. Vol. 769. - P. 1154. <http://www.talys.eu>.

МОДЕЛЮВАННЯ В ПАКЕТІ GEANT4 МІООННОГО ТЕЛЕСКОПУ ДЛЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПАЛИВОВІСНИХ МАТЕРІАЛІВ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ»

А. Ш. Георгадзе

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Згідно із «Стратегією перетворення об'єкта «Укриття» на екологічно безпечну систему, затвердженої рішенням Міжвідомчої комісії з комплексного вирішення проблем Чорнобильської АЕС від 12 березня 2001 р., передбачено проведення підготовчих інженерно-технічних робіт, спрямованих на розроблення технологій вилучення з ОУ паливовмісних матеріалів (ПВМ) та в наступному вилучення з ОУ паливовмісних мас, ядерних матеріалів і довгоіснуючих радіоактивних відходів (РАВ), їх кондиціонування з подальшим їхнім зберіганням і захороненням у сховищах РАВ відповідно до діючих стандартів МАГАТЕ.

Проте, для актуалізації розробки технологій вилучення паливовмісних матеріалів та планування процесу їхнього вилучення необхідною є детальна інформація щодо локалізації паливовмісних матеріалів з концентрацією паливних матеріалів вищою ніж 50 відсотків та фрагментів активної зони. У зв'язку з високою радіаційними полями доступ до шахти реактора є обмеженим, а тому інформація щодо локалізації ПВМ є наближеною.

Для локалізації паливовмісних матеріалів в зруйнованих реакторах атомної електростанції Фукусіма було використано метод радіографії за допомогою

мюонів космічних променів [1 - 6]. Зазначена методика може бути використана для здійснення локалізації паливовмісних матеріалів в ОУ шляхом створення тривимірного томографічного зображення розташування паливовмісних матеріалів з високою концентрацією палива. Окрім того, ця методика дозволить здійснювати облік ядерних матеріалів згідно з вимогами МАГАТЕ.

Для здійснення томографування ОУ розроблено мюонний телескоп годоскопічного типу, який складається з сцинтиляційних стрипів трикутної форми зі спектрозміщувачами волоконнами, виготовлених з екструзійного полістиролу.

В роботі представлено моделювання в пакеті Geant4 мюонного телескопу на основі сцинтиляційних стрипів трикутної форми. Розглянуто різні геометричні конфігурації детектору та форми сцинтиляційних стрипів з метою оптимізації просторової роздільної здатності детектора, а також зменшення випадкових збігів, що можуть спричинитись радіаційними полями ОУ. Показано можливість досягнення просторової роздільної здатності 2 - 3 см на відстані ~20 м. Згідно із попередніми оцінками в разі проведення вимірювань потоку мюонів з різних позицій протягом року можливо отримати попередні результати щодо локалізації ПВМ з концентрацією палива більше 50 % та фрагментів активної зони.

1. K.N. Borozdin et al. Nature 422 (2003) 277.
2. K. Borozdin et al. Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 152501.
3. H. Miyadera et al. AIP Advances 3 (2013) 052133
4. P. Baesso et al. JINST 8 (2013) P08006.
5. C. Thomay et al. JINST 8 (2013) P10013.
6. D. Cussans et al. JINST 8 (2013) C03003.

СТОХАСТИЧНЕ PALMER ОХОЛОДЖЕННЯ НА ЦИКЛІЧНИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ

Н. Л. Дорошко, М. Е. Долінська

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Для стохастичного охолодження пучків важких іонів запропоновано використання Palmer методу, який може застосовуватися на циклічних прискорювачах заряджених частинок. Представлено унікальний чисельний алгоритм для розрахунків параметрів стохастичної системи та фізичних параметрів важкоіонних пучків. Розроблена методика, що дає змогу дослідити системи подовжного та поперечного охолодження не тільки шляхом підбору відстані між пік-ап та кікер магнітами, як у роботах Херевальда [1, 2], а і шляхом чисельних симуляцій. На основі запропонованої методики розроблено програму для розрахунків параметрів охолодження. Наведено деякі результати комп'ютерних розрахунків із застосуванням «time domain» методики.

1. D. Möhl. *Stochastic cooling of particle beams* (Ceneva: Springer-Verlag, 2013).

2. H.G. Hereward. Statistical phenomena-theory In: Proc. 1st Course of Intern. School of Particle Accelerators, Geneva, CERN. 77/13 (1976) 281.

ВИМІРЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ γ -ПЕРЕХОДІВ У ^{181}Ta

С. С. Драпей, В. О. Желтоножський, Д. Москаленко, М. В. Стрільчук

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

При взаємодії К-електронів з магнітним моментом ядра в умовах нестатистичної заселеності компонентів відбувається зміщення енергії K_{α} -переходів, які утворюються при внутрішній конверсії γ -променів.

У роботі Булгакова В.В. та ін., 1988 р. з високою точністю виміряно різницю енергій конверсійних переходів γ_{136} і $\gamma_{137\text{keV}}$, які рівні $606,2 \pm 0,3$ еВ. Вимірювання з високою точністю енергій цих γ -переходів дає змогу визначити зміщення K_{α} -ліній.

Для дослідження використовувалось джерело ^{181}Hf , напрацьоване в (n, γ)-реакції на реакторі ВВР-М. Вимірювання проводились на HPGe-спектрометрі з енергетичної роздільною здатністю 630 еВ на γ -лінії з енергією 133 кеВ. В результаті проведених досліджень була виміряна різниця енергій відповідних γ -ліній, яка рівна 601 ± 1 еВ. З отриманих результатів спостерігається зміщення K_{α} -переходів на 5 ± 1 еВ. Для чистих М1-переходів теоретичні оцінки даної величини дорівнюють 2,5 еВ. Проводиться обговорення отриманих результатів.

ЗБУДЖЕННЯ $^{177}\text{Lu}^m$ В (γ , α)-РЕАКЦІЇ НА ЯДРАХ ТАНТАЛУ

В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

На сьогоднішній день недостатньо досліджені (γ , α)-реакції з гальмівними γ -квантами при значній різниці спінів ізомерного та основного станів залишкового ядра. При цьому можуть збуджуватись стани, часто недоступні для (γ , n)-каналу. Вивчаючи заселення високоспінових К-ізомерів можна отримати додаткову інформацію про структуру збуджених рівнів та механізми протікання ядерних реакцій. Одним з таких ізомерів є $^{177}\text{Lu}^m$ – триквазічастинковий ізомерний стан ($E^* = 0,97$ МеВ, $T_{1/2} = 160,4$ д., $J^{\pi} = 23/2^-$), і тому метою нашої роботи являється дослідження перерізу напрацювання $^{177}\text{Lu}^m$ в (γ , α)-реакції.

Опромінення проводились на лінійному прискорювачі електронів ЛУЕ-40 Харківського фізико-технологічного інституту при граничній енергії гальмівних γ -квантів 37 МеВ. Вимірювання активностей здійснювалось в окремій низькофоновій лабораторії за допомогою γ -спектрометрів, зібраних на базі HPGe-детекторів з енергетичною роздільною здатністю 1,8 - 2 кеВ на гамма-лініях ^{60}Co та ефективністю реєстрації 15 - 40 % порівняно з NaI(Tl)-детектором розмірами $3'' \times 3''$. В спектрах надійно виділені γ -переходи з розпаду $^{177}\text{Lu}^m$. Спектр гальмівних γ -квантів моделювався в рамках програмних кодів

Geant4 та MCNP. Форми модельованих гальмівних спектрів для обох кодів узгоджуються між собою. Отримана величина інтегрального перерізу становить $\sigma^{int} = (9,7 \pm 0,7) \cdot 10^{-30} \text{ см}^2$.

Проведено моделювання інтегрального перерізу напрацювання $^{177}\text{Lu}^m$ в рамках програмних кодів TALYS-1.6 та EMPIRE-3.2. Хоча результати, розраховані в EMPIRE-3.2 значно ближчі до експериментальних величин при використанні параметрів за умовчанням проте не знайдено повного узгодження теорії та експерименту. Це може свідчити про значний внесок в переріз заселення ізомерного стану прямих та напівпрямих процесів, які не враховуються у висезгаданих кодах.

Проводиться обговорення отриманих результатів.

ІЗОМЕРНІ ВІДНОШЕННЯ В ЯДРАХ $^{133,135}\text{Xe}$ ПРИ ФОТОДІЛЕННІ ^{238}U

**В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов,
Є. П. Ровенських, М. В. Желтоножська**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

З ізомерних відношень виходів уламків фотоділення можна отримати корисну інформацію про конфігурацію ядерної системи ділення біля точки розриву, динаміку процесу ділення, де ще залишається багато невирішених питань. Абсолютні значення величин ізомерних відношень можуть бути критичними при виборі між різними механізмами формування системи, що ділиться. Необхідно відзначити, що такі експериментальні дані дуже нечисленні, а їхня достовірність в ряді випадків викликає великий сумнів.

Проведені вимірювання ізомерних відношень виходів Y_h/Y_l для фрагментів фотоділення ^{238}U при опроміненні мішені зі збідненого урану гальмівними γ -квантами на мікротороні М-30 Ужгородського інституту електронної фізики. В експериментах використовувались потоки гальмівних γ -квантів з наступними граничними величинами енергії: 6,25 та 12,5 MeV при яких іде лише реакція (γ, f) ; 14,5 MeV - мають місце реакції $((\gamma, f) + (\gamma, nf))$ та 18 MeV – енергетично дозволені реакції $((\gamma, f) + (\gamma, nf) + (\gamma, 2nf))$. Набір γ -спектрів здійснювався після опромінення в окремій низькофонової лабораторії за допомогою спектрометрів зібраних на базі надчистих германієвих детекторів. Вимірювання проводились без радіохімічного виділення з метою контролю внеску материнських ядер.

У результаті проведених вимірювань отримані дані про ізомерні відношення виходів наведені в таблиці.

E_{γ}, MeV	^{133}Xe	^{135}Xe
6,25	$0,08 \pm 0,02$	$0,032 \pm 0,005$
12,5	$0,34 \pm 0,06$ [1]	$0,064 \pm 0,008$
14,5	$0,16 \pm 0,03$	$0,073 \pm 0,008$
18	$0,46 \pm 0,16$	$0,069 \pm 0,007$ [2]

Проводиться обговорення отриманих даних.

1. В.А. Желтоножский та ін. У кн.: Тези доп. XXIV щоріч. наук. конф. ІЯД НАН України (Київ, 10 - 13 квітня, 2017 р.) (Київ, 2017) 66.
2. І.М. Вишневецький та ін. У кн.: Тези доп. XXII щоріч. наук. конф. ІЯД НАН України (Київ, 26 - 30 січня, 2015 р.) (Київ, 2015) 30.

ІЗОМЕРНІ ВІДНОШЕННЯ ДЛЯ ЯДЕР $^{179}\text{Hf}^{m2,g}$ ТА $^{174}\text{Lu}^{m,g}$

В. О. Желтоножський, А. М. Саврасов

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Проведено вимірювання ізомерних відношень виходів та перерізів при збудженні довго живучого К-ізомеру $^{179}\text{Hf}^{m2}$ ($T_{1/2} = 25$ д., $J^\pi = 25/2^-$, $E^* = 1,1$ МеВ) як гальмівними γ -квантами з граничною енергією 37 МеВ на мішенях гафнію чи танталу природного ізотопного складу, так і нейтронами реакторного енергетичного спектру на мішені порошкоподібного $^{178}\text{HfO}_2$ (збагачення $^{178}\text{Hf} - 92,4\%$). Опромінення проводились на лінійному прискорювачі електронів ЛУЕ-40 Харківського фізико-технологічного інституту та реакторі ВВЕР-10 інституту ядерних досліджень. Вимірювання активностей здійснювалось в окремій низькофоновій лабораторії за допомогою γ -спектрометрів, зібраних на базі HPGe-детекторів з енергетичною роздільною здатністю 1,8 - 2 кеВ на γ -лініях ^{60}Co та ефективністю реєстрації 15 - 40 % порівняно з NaI(Tl)-детектором розмірами $3'' \times 3''$. В спектрах надійно виділені γ -переходи з розпаду $^{179}\text{Hf}^{m2}$. Оскільки основний стан ^{179}Hf стабільний то розрахунки перерізу чи виходів його заселення проводились з використанням їхніх табличних значень згорнутих з модельованими спектрами гальмівних γ -квантів чи реакторних нейтронів. Отримані результати наведено в таблиці.

Реакція	$^{178}\text{Hf}(n, \gamma)^{179}\text{Hf}^{m2,g}$	$^{181}\text{Ta}(\gamma, pn(d))^{179}\text{Hf}^{m2,g}$	$^{180}\text{Hf}(\gamma, n)^{179}\text{Hf}^{m2,g}$		
E, MeV	реак.	37	37	15,1 [1]	17,5 [1]
E*	15	24,9	28,5	6,6	9
$\sigma^{m2}/\sigma^g, \gamma^{m2}/\gamma^g$	$(1,2 \pm 2) \cdot 10^{-7}$	$(1,7 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$	$(4,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-5}$	$(6,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-6}$	$(3,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-6}$

E^* - енергія збудження залишкового ядра.

Проведено вимірювання ізомерних відношень виходів в реакції $^{175}\text{Lu}(\gamma, n)^{174}\text{Lu}^{m,g}$ при опроміненні гальмівними γ -квантами з граничною енер-

гією 37 MeV мішені лютетію природного ізотопного складу. Отримана величина $Y^m/Y^g = 0,14(1)$.

Виконано моделювання ізомерних відношень в рамках програмних кодів TALYS-1.6 та EMPIRE-3.2. При використанні параметрів за умовчанням узгодження теорії та експерименту знайдено лише для ізомерного відношення в реакції $^{175}\text{Lu}(\gamma, n)$ в обох кодах. Це свідчить про значний внесок в перерізи/виходи заселення ізомерного стану гафнію прямих та напівпрямих процесів, які не враховуються у вищезгаданих кодах.

Проводиться обговорення отриманих результатів.

1. I.N. Vishnevsky, V.A. Zheltonozhsky, A.N. Savrasov, V.M. Mazur. Phys. Atom. Nuc. 79 (2016) 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТОВ ПРОНИКНОВЕНИЯ ВО ВНУТРИРОТАЦИОННЫХ М1-ПЕРЕХОДАХ

В. А. Желтоножский, Д. Ю. Москаленко, В. П. Хоменков

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Проведены измерения коэффициентов внутренней конверсии (КВК) γ -лучей для заторможенных по одночастичным оценкам М1-переходов в ядрах ^{175}Lu , ^{181}Ta и ^{185}Re .

Источники нарабатывались на реакторе ВВР-10 ИЯИ НАН Украины.

Проводились измерения одиночных K_{χ} - и γ -спектров, спектров совпадений и спектров пиков суммирования. Из этих спектров с точностью около 1% получены КВК на К-оболочках (α_K) и полный КВК (α_{tot}) для γ 136 кэВ в ^{181}Ta . В таблице приведены полученные КВК и параметры проникновения (λ) для этих переходов.

ядро	E_{γ} , кэВ	α_K	$\lambda_{\text{эксп}}$	$\lambda_{\text{теор}}$
^{175}Lu	114	$1,85 \pm 0,02$	$0,95 \pm 0,35$	-0,07
^{181}Ta	136	$1,417 \pm 0,007$	$-0,65 \pm 0,16$	0,10
^{185}Re	125	$2,06 \pm 0,11$	$2,0 \pm 1,3$	0,98

$$\alpha_{\text{tot}}(^{181}\text{Ta}) = 1,772 \pm 0,025.$$

Проводится обсуждение полученных данных.

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ ЯДЕР В ФОТОДЕЛЕНИИ

**В. И. Жеменик¹, В. А. Желтоножский², Дж. Дрноюн¹,
А. Н. Саврасов², В. П. Хоменков², Г. В. Мышинский¹**

¹ Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

² Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Изоскейлинг – экспоненциальная зависимость отношения выходов R изотопов с одинаковым количеством нейтронов N и протонов и Z из двух различных мишеней 1 и 2:

$$R(N, Z) = Y_1(N, Z)/Y_2(N, Z) = C \cdot \exp(\alpha N + \beta Z),$$

где C – нормировочный коэффициент, α - и β -параметры изоскейлинга.

Предпринятая нами ранее попытка извлечения информации о температуре делящейся ядерной системы из параметров изоскейлинга в выходах Kr и Xe из фотоделения ядер в области легких актинидов [1] показала бесперспективность использования жидкокапельной модели без учета оболочечных поправок для описания изучаемых процессов при низких энергиях возбуждения, по крайней мере, в области ассиметричных пиков в массовом распределении продуктов деления, возникающих под влиянием нейтронных оболочек – сферической $N = 82$ и деформированной $N = 88$.

В данной работе мы попытались получить значения температуры без использования модельных представлений о массе ядра и влиянии на нее оболочечной структуры, воспользовавшись тем, что массы всех изотопов Kr и Xe , выходы которых измерены нами, и почти всех сопряженных с ними осколков известны из экспериментов, а несколько оставшихся вычислены с хорошей точностью [2].

Использование табличных данных не позволяет получить аналитическое выражение для зависимости коэффициентов изоскейлинга от температуры делящегося ядра и затем с помощью фитирования экспериментальных результатов вычислить температуру, при которой они описываются этим выражением наилучшим образом. Поэтому мы рассчитали значение $R_{\text{теор}}(N, Z)$ для ряда температур, что позволило при сравнении с экспериментальным $R_{\text{exp}}(N, Z)$ получить оценку температуры делящихся ядер. Следует отметить, что качественно поведение $R_{\text{теор}}(N, Z)$ соответствует поведению $R_{\text{exp}}(N, Z)$, а количественные несовпадения можно объяснить как тем, что в эксперименте измерены выходы не первичных осколков, а осколков после испарения нейтронов, так и тем, что, из-за использования в качестве источника фотонов тормозного спектра электронов, часть ядер имеет энергию возбуждения достаточную для испарения одного или двух нейтронов еще до деления, и таким образом делятся ядра с разным количеством нейтронов.

1. Дж.Р. Дрноюян, В.И. Жеменик, Г.В. Мышинский. Изоскейлинг и моды деления в выходах изотопов Kr и Xe в фотоделении актинидов. Письма в ЭЧАЯ 13(3) (2016) 543.
2. Meng Wang et al. The Ame2016 atomic mass evaluation (II). Tables, graphs and references. Chinese Phys C 41(3) (2017) 030003.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА С СОВМЕЩЕННЫМИ ПУЧКАМИ ПРОТОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЕЙ 30 - 200 кэВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИМИТАТОРА ФАКТОРОВ КОСМОСА (КИФК)

Г. Г. Закин, А. Ф. Шаров

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Ускорительный комплекс с совмещенными пучками протонов и электронов разрабатывался и был построен в 1994 - 1996 гг. в СКТБ с ЭП ИЯИ НАН Украины для КИФК ФТИНТ НАНУ (г. Харьков) по заданию Национального космического агентства Украины. КИФК - комплексный имитатор для наземной ускоренной имитации воздействия шести факторов космического пространства: 1) излучение Солнца в интервале $\lambda\lambda$ 200 - 2500 нм; 2) вакуумное ультрафиолетовое (ВУФ) излучение ($\lambda\lambda$ 5 - 200 нм); 3) потоки протонов и 4) электронов радиационных поясов Земли с энергией 50 - 200 кэВ; 5) вакуум 10^{-5} Па; 6) термоциклирование в интервале 4,2 - 400 [1]. КИФК используется для проведения исследований в областях космической техники, материаловедения, физики твердого тела, биологии и медицины.

В 1997 г. комплекс был установлен в ФТИНТ и введен в эксплуатацию. В 2010 - 2014 гг. проводилась модернизация блоков питания ускорителей с переходом на современные электронные компоненты. Это повысило надежность работы блоков в условиях электрических разрядов и повышенной температуры.

В связи с постановкой новых задач при исследовании материалов космической техники и биологических объектов появились новые дополнительные требования к качеству протонного пучка, долговременной стабильной работе комплекса и неоднородности поля облучения на мишени.

С целью получения полной информации о работе систем и узлов комплекса были выполнены расчеты ионной оптики протонного ускорителя, высоковольтной структуры ускорителей и системы развертки пучков на исследуемой мишени. Исследовано влияние системы экстракции пучка из ионного источника Пеннинга, одиночной электростатической линзы и ускорительной трубки с предускорителем на формирование протонного пучка. Определено значение эмиттанса ионного источника. По результатам измерений рассчитан профиль пучка и оценено разрешение анализирующего магнита протонного ускорителя. Определены слабые места в высоковольтной структуре протонного ускорителя. Выполнены расчеты траектории движения релятивистского электронного пучка в однородном электрическом поле.

1. В.В. Абраимов, А.А. Негода, А.П. Завалишин, Л.К. Колыбаев Комплексная имитация факторов космического пространства. Космическая техника и технология 1(1) (1995) 76.

ИЗМЕРЕНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЯ ОБЛУЧЕНИЯ МИШЕНИ ЗАРЯЖЕННЫМИ ЧАСТИЦАМИ В КОМПЛЕКСНОМ ИМИТАТОРЕ ФАКТОРОВ КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА (КИФК)

Г. Г. Заикин¹, А. Ф. Шаров¹, В. В. Абраимов²,
Н. И. Величко³, В. А. Лотоцкая³

¹ *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина*

² *Харбинский политехнический институт, Харбин, КНР*

³ *ФТИНТ НАН Украины, Харьков, Украина*

Ускорительный комплекс с совмещенными пучками протонов и электронов, изготовленный в СКТБ с ЭП ИЯИ НАН Украины в 1996 г. для комплексного имитатора факторов космического пространства (КИФК) [1], позволяет производить облучение мишеней размером $100 \times 100 \text{ мм}^2$ в вакуумной камере с величиной неоднородности потока частиц $\pm 10 \%$. Для развертки пучков по поверхности мишени применена традиционная схема электрической развертки с двумя парами плоскопараллельных пластин (X и Y), расположенных под 90° друг к другу на одинаковом расстоянии от мишени. Нетрадиционным является то, что на пластины подаются переменные напряжения треугольной формы с близкими частотами примерно 3 кГц. Разность между значениями частот составляет 100 - 200 Гц. При этом требуется высокая стабильность частот. За счет их дрейфа улучшается однородность потока облучения. Примененная схема отличается простотой и высокой надежностью и выгодно отличается от традиционной схемы телевизионной развертки [2].

В связи с постановкой новых задач при исследовании материалов космической техники и биологических объектов появились новые дополнительные требования к качеству пучков и неоднородности поля облучения на мишени. Были проведены измерения неоднородности поля облучения с помощью стрип-детектора. 9 элементов детектора из фольгированного стеклотекстолита размером $100 \times 6,5 \text{ мм}^2$ расположены с шагом 12 мм на пластине из фольгированного стеклотекстолита $100 \times 100 \text{ мм}^2$. Детектор использовался для измерения неоднородности поля по осям X и Y. Для этого необходимо было поворачивать детектор на 90° . Точность измерения $\pm 2,5 \%$ включала точность изготовления элементов детектора и разброс величины сопротивления резисторов. При токе электронов на мишень 5 мкА при величине сопротивления резисторов 0,3 М на элементе создается потенциал $\sim 80 \text{ мВ}$, который легко измеряется с высокой точностью цифровым вольтметром. При облучении электронами 105 кэВ коэффициент неоднородности распределения составил 1,14 на поверхности $100 \times 100 \text{ мм}^2$. Наблюдалось увеличение значений потенциала на краях мишени. Это можно объяснить некоторой нелинейностью напряжения развертки. В центральной части мишени размером $60 \times 60 \text{ мм}^2$ неоднородность в пределах ошибки измерения.

1. В.В. Абраимов, А.А. Негода, А.П. Завалишин, Л.К. Колыбаев. Комплексная имитация факторов космического пространства. Космическая техника и технология 1(1) (1995) 76.
2. А.И. Глотов и др. Ускорительный комплекс со смешанными пучками электронов и протонов низких энергий ФЭИ-2389. (Обнинск, 1994) 14 с.

НОВИЙ ТИП ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ З ФОРМУВАННЯМ ЗВ'ЯЗАНОГО ДИНЕЙТРОНА У ВИХІДНОМУ КАНАЛІ

І. М. Каденко

*Міжнародний Центр ядерної безпеки, кафедра ядерної фізики,
фізичний факультет*

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Предметом даного дослідження є розгляд нового типу ядерних реакцій на ^{159}Tb з формуванням у вихідному каналі частинки, що складається з двох нейтронів у зв'язаному стані. Динейтрон як одна частинка, що містить тільки два нейтрони у зв'язаному стані, була предметом пошуку у ядерній фізиці протягом понад 70 років з дати найпершої публікації статті Colby and Little у журналі Phys. Rev. у 1946 р. Десятиліттями ядро з двох нейтронів вважалося таким, що не може фізично існувати на підставі принципу Паулі та неможливості формування такого зв'язаного стану внаслідок протилежно орієнтованих спінів двох нейтронів. У даній роботі представлено результати експериментальних досліджень, у т.ч. першого статистично значущого спостереження екзотичного стану нуклонів, або довгошуканого динейтрона, з обґрунтуванням того, що виліт динейтрона з ядра у проміжному стані під час перебігу ядерних реакцій ($p, ^2n + n$) та ($n, ^2n$) на ^{159}Tb представляє новий тип ядерної реакції у вихідному каналі. Обґрунтування даних експериментальних результатів та можливості існування динейтрона у зв'язаному стані ґрунтується на теоретичній роботі акад. АН СРСР А.Б. Мігдала, опублікованій у журналі ЯФ у 1972 р. Саме у цій статті йдеться про теоретичне передбачення існування динейтрона як одночастинкового зв'язаного стану двох нейтронів, що формується біля поверхні, але за межами важких ядер, серед яких є ^{157}Dy або ^{158}Tb . Таке формування динейтрона у зв'язаному стані є можливим під впливом сильної взаємодії, що дає змогу утримувати два нейтрони у зв'язаному стані протягом деякого часу. Оскільки динейтрон є непротистим ядром щодо його генерації та прямого детектування, тому проблему його ідентифікації було вирішено шляхом детектування гамма-квантів з ядра-продукту відповідної ядерної реакції у її вихідному каналі. У роботі обговорюються експериментальні особливості проведення спостережень та однозначного обґрунтування формування динейтрона, а також ефекти, що можуть мати місце внаслідок розпаду динейтрона на дейтрон, електрон та електронне антинейтрино. Динейтрон може бути лише першим свідченням того, що й інші малонуклонні зв'язані системи, що складаються з двох, або навіть трьох однотипних нуклонів, можуть бути сформованими схожим чином у вихідному каналі деяких ядерних реакцій.

**ПЕРШИЙ РЕЗУЛЬТАТ ВИМІРЮВАНЬ 2 β -РОЗПАДУ ^{150}Nd
НА 0 $^{+}$ ЗБУДЖЕНИЙ СТАН ^{150}Sm У ПІДЗЕМНІЙ ЛАБОРАТОРІЇ
ГРАН САССО**

**Д. В. Касперович¹, О. С. Барабаш², П. Беллі^{3,4}, Р. Бернабей^{3,4},
Р. С. Бойко^{1,5}, Ф. А. Даневич^{1,6}, А. Інчікіті^{7,8}, Ф. Капелла⁷,
В. Карачіоло⁹, В. В. Кобичев¹, Р. В. Кобичев¹, С. І. Коновалов²,
М. Лаубенштейн⁹, Д. В. Пода^{1,6}, О. Г. Поліщук¹, В. І. Третьяк¹,
В. І. Уматов², Р. Черулі^{3,4}**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Інститут теоретичної і експериментальної фізики ім. А.І. Аліханова
НДЦ «Курчатовський інститут», Москва, Росія*

³ *НІЯФ, відділення у Римі «Тор Вергата», Рим, Італія*

⁴ *Римський університет «Тор Вергата», Рим, Італія*

⁵ *Національний університет біоресурсів і природокористування України,
Київ, Україна*

⁶ *Центр ядерної фізики та матеріалознавства, Орсе, Франція*

⁷ *НІЯФ, відділення у Римі, Рим, Італія*

⁸ *Римський університет «Ла Сапієнца», Рим, Італія*

⁹ *Національна лабораторія Гран-Сассо, Ассерджі, Італія*

Процес подвійного бета-розпаду (2 β) має велике значення для сучасної фізики елементарних частинок. Спостереження безнейтринної моди цього процесу, забороненої у стандартній моделі елементарних частинок (СМ), може дати важливу інформацію про природу нейтрино (частинка Дірака або Майорани), його масу та схеми масових станів, порушення лептонного числа, а також перевірити численні розширення СМ. Дослідження двонейтринного 2 β -розпаду на основний і збуджені стани дочірніх ядер дозволяють перевіряти і вдосконалювати теоретичні розрахунки 2 β -процесів. Ядро ^{150}Nd є одним з найбільш перспективних для дослідження 2 β -розпаду завдяки великій енергії розпаду $Q_{2\beta} = 3371,38(20)$ кеВ та порівняно високому вмісту ізотопу у природній суміші ізотопів неодиму $\delta = 5,638$ %. Для цього ядра вже було спостережено двонейтринний 2 β -розпад на основний стан дочірнього ядра ^{150}Sm . Крім того є повідомлення про спостереження розпаду на перший 0 $^{+}$ збуджений стан ^{150}Sm [1, 2], перевірка і уточнення яких є метою даної роботи. Заселення цього збудження стану призводить до випромінювання двох гамма-квантів 334,0 кеВ та 406,5 кеВ. Вимірювання проводяться зі зразком глибоко очищеного оксиду неодиму природного ізотопного складу (Nd_2O_3 , 2,381 кг) у підземній лабораторії Гран-Сассо (Італія) з використанням чотирьох детекторів із надчистого германію (об'ємом близько 225 см³ кожен), захищених пасивним захистом (мідь, свинець) з неперервним продуванням високочистим азотом для витіснення радону. В сумарних одновимірних спектрах, отриманих впродовж 16375 год вимірювань, шукані гамма-піки з енергіями 334,0 кеВ та 406,5 кеВ

не спостерігаються. У спектрах збігів між різними парами детекторів ідентифіковано піки, площа яких відповідає шуканому процесу з періодом напіврозпаду $(0,84_{-0.22}^{+0.47}) \cdot 10^{20}$ років, що узгоджується з попередніми спостереженнями. На даний час експеримент продовжується з метою досягнення вищої статистичної точності отриманого результату.

1. A.S. Barabash et al. Investigation of $\beta\beta$ decay in ^{150}Nd and ^{148}Nd to the excited states of daughter nuclei. Phys. Rev. C 79 (2009) 045501.
2. M.F. Kidd et al. Two-neutrino double- β decay of ^{150}Nd to excited final states in ^{150}Sm . Phys. Rev. C 90 (2015) 055501.

РОЗРОБКА РАДІОАКТИВНО ЧИСТИХ КРИСТАЛІВ ZnWO_4 ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ З ПОШУКУ ДОБОВИХ МОДУЛЯЦІЙ ПОТОКІВ ТЕМНОЇ МАТЕРІЇ

Д. В. Касперович¹, П. Беллі^{2,3}, Р. Бернабей^{2,3}, Я. В. Васильєв⁴, Ф. А. Даневич^{1,5}, А. Інчіккіті^{6,7}, В. В. Кобичев¹, Ф. Каппелла⁶, В. Караччіоло⁸, М. Лаубенштейн⁸, О. Г. Поліщук¹, В. І. Третяк¹, Р. Черулі^{2,3}, В. М. Шлегель⁴

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Римський університет «Тор Вергата», Рим, Італія

³ НІЯФ, відділення у Римі «Тор Вергата», Рим, Італія

⁴ Інститут неорганічної хімії ім. А.В. Ніколаєва, Новосибірськ, Росія

⁵ Науковий центр ядерної фізики та матеріалознавства, Орсе, Франція

⁶ НІЯФ, відділення у Римі, Рим, Італія

⁷ Римський університет «Ла Сапієнца», Рим, Італія

⁸ Національна лабораторія Гран-Сассо, Ассерджі, Італія

На можливість дослідження темної матерії за допомогою анізотропних скінтіляційних кристалів було вперше вказано в роботі [1]. Методика таких досліджень ґрунтується на анізотропії відгуку скінтілятора до проходження через нього важких частинок (протонів, альфа-частинок, ядер віддачі). Таким чином можна спробувати зареєструвати добові модуляції сигналів від взаємодії частинок темної матерії з речовиною. У роботі [2] було вперше запропоновано використовувати для таких експериментів скінтіляційні кристали вольфрамату цинку (ZnWO_4), ця ідея була у подальшому розроблена у [3]. Скінтілятори ZnWO_4 перспективні для пошуків темної матерії, оскільки мають високий рівень радіоактивної чистоти, яка може бути далі покращена за допомогою перекристалізації методом Чохральського з низьким градієнтом температури. Вимірювання радіоактивної чистоти зразків кристалів ZnWO_4 після першої і другої кристалізації проводяться в установці DAMA/R&D у підземній лабораторії Гран-Сассо (Італія). Кожен з чотирьох кристалів вольфрамату цинку розмірами $\varnothing 50 \times 50$ мм, загальною масою 2,76 кг, проглядається низькофононим

фотоелектронним помножувачем через світловод з кварцу високої чистоти розмірами $\varnothing 70 \times 200$ мм. Установка захищена шарами радіоактивно чистої міді (15 см), свинцю (15 см), кадмію (1.5 мм) і парафіну (4 - 10 см), а також постійно продувається високочистим азотом для видалення радону. Загальна забрудненість кристалів альфа-активними дочірніми урану і торію, виміряна протягом 5660 годин, становить близько 2 мБк/кг, 0,4 мБк/кг, 0,1 мБк/кг, 0,2 мБк/кг. Кристали, що були додатково перекристалізовані, мають значно вищий рівень радіоактивної забрудненості, що є доволі неочікуваним результатом. Подальший аналіз експерименту дозволить виконати кількісні і якісні оцінки забруднень та джерел їхнього походження, що допоможе вдосконалити методику очистки виділених матеріалів для росту кристалів та виробництва скінтіляторів.

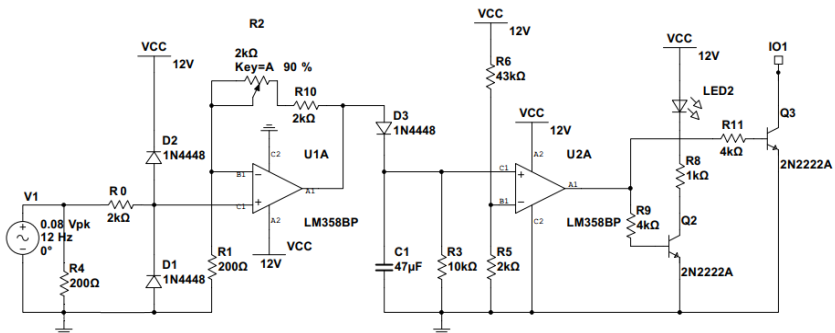
1. P. Belli et al. Identifying a “dark matter” signal by nonisotropic scintillation detector. *Nuovo Cimento C* 15 (1992) 475.
2. F.A. Danevich et al. $ZnWO_4$ crystals as detectors for 2β decay and dark matter experiments. *Nucl. Instr. Meth. A* 544 (2005) 553.
3. F. Cappella et al. On the potentiality of the $ZnWO_4$ anisotropic detectors to measure the directionality of Dark Matter. *Eur. Phys. J. C.* 28 (2003) 203.

ДАТЧИК ОБЕРТАННЯ МІШЕНІ

**О. М. Ковальов, О. О. Гаврилов, А. П. Войгер,
М. І. Доронін, Л. Г. Макаренко**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Одним з параметрів, які контролюються при роботі установки для направлення радіонуклідів на ізохронному циклотроні У-240 є швидкість обертання мішені. Для цього створено датчик обертання мішені, який дистанційно здійснює контроль цього параметра та передає відповідний сигнал до комп'ютера на пульті управління циклотроном.



В якості детектора обертання мішені застосовано котушку від реле РС22, для збудження якої використовуються шість неодимових магнітів. Магніти запресовані в алюмінієвий диск, встановлений на шток тримача мішені. При проходженні магніту в безпосередній близькості від сердечника, на котушці виникає ЕРС амплітудою до 80 мВ і тривалістю позитивного періоду 10 мс. Котушка при цьому навантажена резистором R4 200 Ом з якого здійснюється зняття сигналу. Частота проходження імпульсів при нормальному обертанні штока становить близько 12 Гц.

Захист вхідної частини підсилювача U1A здійснюється діодами D1, D2 і резистором R0. У нормальному режимі роботи діоди зміщені у зворотному напрямку, та відкриваються коли вхідна напруга стає вищою за позитивну напругу живлення, або нижчою за негативну напруги живлення. Коли ж діод зміщується в прямому напрямі, струм тече через входи підсилювача до відповідних шини живлення. Резистор на вході обмежує струм через діоди. Операційний підсилювач U1A забезпечує пряме посилення сигналу з котушки детектора. Коефіцієнт посилення каскаду регулюється резистором R2. Далі імпульси, через діод D3, надходять на ланцюжок C1, R3 на якому формується певний рівень постійної напруги. Чим вище частота обертання, тим вище рівень. Отримана таким чином напруга порівнюється компаратором U2A з наперед заданим значенням (R5, R6). Після досягнення цього рівня компаратор спрацьовує, відкриваючи тим самим транзистори Q2 і Q3. Транзистор Q2 включає візуальну індикацію нормальної швидкості обертання мішені (світлодіод LED2), а сигнал з колектора Q3 надходить на комп'ютер управління установкою ІСР І-883, який забезпечує також інтерактивний зв'язок з комп'ютером оператора на пульті управління циклотрона.

ПРОГРАМОВАНЕ ДЖЕРЕЛО ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**О. М. Ковальов, О. О. Гаврилов, А. П. Войтер,
М. І. Доронін, Л. Г. Макаренко**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

У процесі модернізації вимірювальної частини технологічної установки для напрацювання радіонуклідів на циклотроні У-240 виникла необхідність в емуляції струму, що стікає з мішені. Значення цього струму знаходяться в діапазоні 5 - 100 мкА. Змінання струму з мішені здійснюється коаксіальним кабелем, один кінець якого має безпосередній контакт з мішенню технологічної установки, а інший тягнеться до вимірювального центру на відстань більше 200 м. Протягом усього з'єднання є комутаційні коробки. Як наслідок, виникають множинні витoki струму, які необхідно виявити і охарактеризувати. Також бажано знати витік струму по воді, адже мішень в процесі опромінення охолоджується. Ця обставина і призвела до необхідності створення спеціалізованого приладу, який би міг емулювати стабілізований постійний стікаючий з мішені струм.

В основу схеми приладу покладено програмоване джерело постійного струму LM334 компанії Texas Instruments Inc. Для генерації двох значень струмів схема LM334 доповнена комутатором резистивних дільників, штатний діод термостабілізації замінено на діод 1N4148, що забезпечило більш стабільну роботу приладу та генерацію стабілізованих струмів 8мкА і 45мкА.

Прилад має автономне живлення від двох стандартних батарейок формату AAA по 1.5 В.

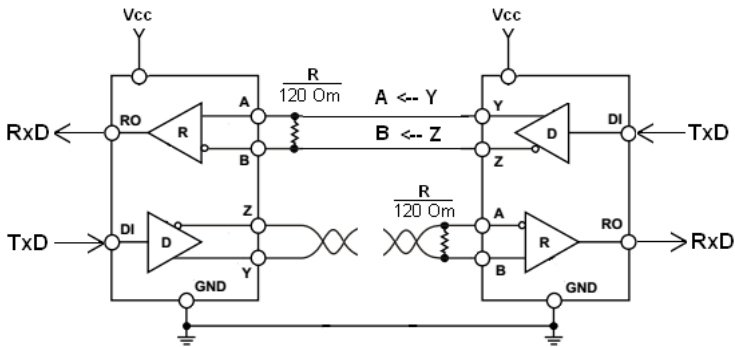
СПРОЩЕНИЙ ЛІНІЙНИЙ ПРИЙОМОПЕРЕДАВАЧ

**О. М. Ковальов, О. О. Гаврилов, А. П. Войтер,
М. І. Доронін, О. М. Семенюк**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

При виконанні робіт з дистанційного управління рухомими елементами механічних конструкцій реакційної камери Д циклотрона У-120 виникла необхідність передачі керуючих сигналів на значну відстань. Основними критеріями рішення даного завдання були простота і дешевизна реалізації.

В якості лінії зв'язку було обрано кабель UTP-5, що широко використовується для прокладки Ethernet з'єднань. Природним в даній ситуації був і вибір стандарту передачі EIA485 який зокрема визначає з'єднання між передавачем і приймаючими пристроями за допомогою трьох проводів: провід з даними, провід з інвертованими даними і нульовий провід заземлення. Два проводи з даними є витою парою, яка укладена в металевий екран нульового проводу. Використання такого кабелю дає змогу зменшити вплив завад і шумів.



D (driver) - передавач; R (receiver) - приймач; DI (driver input) - цифровий вхід передавача; RO (receiver output) - цифровий вихід приймача; А - прямий диференціальний вхід/вихід; В - інверсний диференціальний вхід/вихід; Y - прямий диференціальний вихід; Z - інверсний диференціальний вихід.

Прийомпередатчик реалізовано на дешевих мікросхемах SN75179В, а програмно апаратне з'єднання, RxD і TxD на мікросхемах USB-UART FTDI FT232RL.

Проведені випробовування показали надійну роботу прийомпередатчиків навіть на відстані 300 м, що значно перевищує необхідну.

РЕАКЦІЇ ДВОНЕЙТРОННОЇ ПЕРЕДАЧІ ТА СТАТИСТИЧНА МІРА КВАНТОВОГО ХАОСУ В ЯДЕРНИХ СПЕКТРАХ

О. І. Левон, О. Г. Магнер

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Кількість енергетичних рівнів навіть при відносно невисоких збудженнях настільки велика і структура багаточастинкових станів настільки складна, що навіть в принципі неможливо сформулювати мікроскопічну теорію, яка б змогла достатньо просто і точно описати властивості таких станів. Але існує можливість спростити реальну багаточастинкову проблему і збагатити її розуміння, якщо використати статистично усереднені властивості розподілу дискретних квантових рівнів. Саме на цьому базувалась ідея Вігнера, який запропонував теорію випадкових матриць (random matrix theory, RMT) для опису високозбуджених станів ядер в реакціях резонансного захоплення нейтронів.

Для проведення статистичного аналізу розподілу енергетичних інтервалів відповідні послідовності ядерних рівнів мають задовольняти декільком умовам. Вони мають бути повні (немає пропущених або неправильно визначених рівнів) і чисті (повинні мати однакові спіни і парності, та інші квантові числа). Цим умовам відповідають послідовності, одержані нещодавно [1], див. там цитування публікацій в попередні роки, при аналізі експериментальних даних реакцій двонейтронної передачі. Статистичний аналіз був виконаний для цих даних, а також отриманих в останній рік. У доповіді наводяться характеристики таких послідовностей з акцентом на їхній статистичний аналіз.

Коротко дистанційні флуктуації в експериментальних спектрах можна проаналізувати через розподіли інтервалів між найближчими сусідами (nearest-neighbor spacing distribution, NNSD). Для кількісної оцінки ступеня хаотичності часто використовується статистична ймовірність розподілу $p(s)$ відстаней s між найближчими сусідніми рівнями. Широкого застосування набула евристична однопараметрична формула Броді. В першій короткій публікації [2] використана саме ця формула. Більш послідовним і новим в подальшому аналізі [3] є те, що в загальному підході Вігнера - Дайсона

$$p(s) = g(s) \exp\left(-\int_0^s g(s') ds'\right)$$

для густини відштовхування рівнів $g(s)$ використана лінійна двопараметрична апроксимація, $g(s) = a + bs$. Це дає більш точні відомості про окремі внески граничних випадків розподілів Пуассона (порядок при $a = 1, b = 0$) і Вігнера (хаос при $a = 0, b = \pi/2$).

Висновки статистичного аналізу наступні. Отримано проміжну структуру між розподілами Пуассона і Вігнера для експериментальних спектрів ізотопів рідкісних земель і актинідів, оцінюючи їхні окремі внески a та b . NNSD для

відносно низьких енергій краще описуються розподілом Вігнера з максимумом при інтервалах, близькими до $s = 1$. Максимум NNSD для розширеного інтервалу енергій колективних збуджень зсувається в напрямку малих інтервалів s до розподілу Пуассона, на відміну від протилежної тенденції в одночастинкових збудженнях. Але добре узгодження з результатами квазічастично-фононної моделі обґрунтовує колективність збуджених станів. Виявляється, що внесок Вігнера b домінує в NNSD для 0^+ станів, а внесок Пуассона a збільшується при зростанні кутового моменту колективних станів. Остання особливість пояснюється тим, що послідовності цих станів I^+ , відмінних від 0^+ , мають змішану симетрію відносно проекції кутового моменту на вісь симетрії ядра. Така поведінка передбачалася в RMT для змішаних симетрій.

1. A.I. Levon et al. Phys. Rev. C 92(6) (2016) 064319.
2. A.I. Levon. Ukr. J. Phys. 62(7) (2017) 565.
3. A.I. Levon, A.G. Magner, S.V. Radionov. arXiv:1711.01848 (2017) submitted to Phys.Rev. C.

**ДО ПИТАННЯ ПРО ІЗОМЕРНЕ ВІДНОШЕННЯ,
ОДЕРЖАНЕ В РЕАКЦІЇ $^{142}\text{Nd}(\gamma, n)^{141m,g}\text{Nd}$ В ІНТЕРВАЛІ ЕНЕРГІЙ
ГІГАНТСЬКОГО Е1-РЕЗОНАНСУ**

В. М. Мазур, З. М. Біган, П. С. Деречкей

Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, Україна

Дане дослідження присвячене вивченню процесів збудження ізомерного стану $11/2^-$ ізотопу ^{141m}Nd в реакції (γ, n) в області енергій 11 - 18 МеВ. Вимірювання проводилися методом ізомерних відношень. Ізмерний рівень ядра ^{141}Nd формується дірковим станом з $J^\pi = 11/2^-$. При цьому ядро ^{142}Nd – магічне з числом нейтронів $N = 82$.

Експерименти проводилися на пучку гальмівних гамма-квантів мікротрону М-30 ІЕФ НАН УКРАЇНИ з кроком $\Delta E = 0,5$ МеВ. При вимірюванні використовувалась активаційна методика. В результаті досліджень одержана залежність ізомерних відношень виходів $d = Y_m/Y_g$ від максимальної енергії гальмівного спектра $E_{\gamma\text{max}}$. (Тут Y_m, Y_g – виходи заселення ізомерного і основного станів відповідно). Експериментальна залежність ізомерних відношень виходів від енергії гамма-квантів $d = f(E_{\gamma\text{max}})$ зростає від порогу і в області вище 18.0 МеВ виходить на насичення.

Одержана крива $d = f(E_{\gamma\text{max}})$ апроксимувалась методом найменших квадратів сигмоїдною кривою Больцмана:

$$d = A + (B - A) / \{1 + \exp[(E - E_0)/\Delta E_1]\},$$

де A, B, E, E_0 і ΔE_1 – параметри. У результаті були одержані наступні їхні значення:

$A = 0,05162 \pm 0,0171$, $B = -0,0395 \pm 0,010$, $E_0 = 12,28 \pm 0,33$ (MeV), $\Delta E_1 = 2,08 \pm 0,32$ (MeV).

Ізомерне відношення одержане в реакції $^{142}\text{Nd}(\gamma, n)^{141\text{m.g}}\text{Nd}$ більш ніж в два рази менше ніж d для сусіднього ядра церію-139 [1], одержаного раніше в реакції $^{140}\text{Ce}(\gamma, n)^{139\text{m.g}}\text{Ce}$ на магічному ядрі церій-140. Така суттєва різниця ізомерних відношень скоріш за все зв'язана з різними розгалуженнями гамма-каскаду при заселенні низьколежачих рівнів, з яких безпосередньо заселяється ізомерний стан.

Нами проведені розрахунки перерізу реакції $^{142}\text{Nd}(\gamma, n)^{141\text{m.g}}\text{Nd}$ за допомогою програмного пакета TALYS–1.6. Проведено порівняння розрахованого перерізу з експериментальним, одержаним методом ізомерних відношень.

1. В.М. Мазур, З.М. Біган, П.С. Деречкей. В кн.: Тези доп. XXIV щоріч. наук. конф. Ін-ту ядерних дослідж. НАН України (Київ, 2017) 77.

МЕХАНІЗМИ РЕАКЦІЇ $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ ТА ВЗАЄМОДІЯ ЯДЕР $^{12}\text{B} + ^{12}\text{C}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ 45 MeV

**С. Ю. Межевич¹, А. Т. Рудчик¹, К. Русек², К. В. Кемпер³,
А. А. Рудчик¹, О. А. Понкратенко¹, С. Б. Сакута⁴**

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

³ Фізичний факультет Національного університету Флориди, США

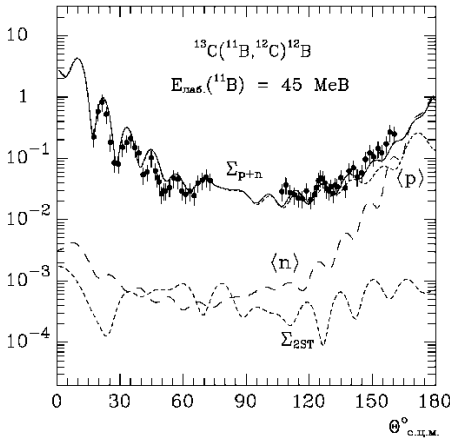
⁴ НДЦ «Курчатовський інститут», Москва, Росія

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ у повному кутовому діапазоні для основних та збуджених станів ядер ^{12}B і ^{12}C при енергії $E_{\text{лаб}}(^{11}\text{B}) = 45$ MeV. Кутові розподіли продуктів реакцій $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, X)$ вимірювались на Варшавському циклотроні U-200P з використанням ΔE - E -методики. Експериментальна методика забезпечувала добре розділення продуктів реакцій за зарядами $Z = 3 - 8$.

Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) для одно- і двоступінчастих передач нуклонів і кластерів. У МЗКР-розрахунках для вхідного каналу реакції використано оптичний потенціал, отриманий з аналізу даних пружного розсіяння ядер $^{11}\text{B} + ^{13}\text{C}$ [1], та спектроскопічні амплітуди нуклонів і кластерів в ядрах, обчислені в рамках оболонкової моделі. Визначено параметри оптичного потенціалу взаємодії ядер $^{12}\text{B} + ^{12}\text{C}$ методом підгонки МЗКР-перерізів до експериментальних даних реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ та досліджено роль одно- й двоступінчастих механізмів передач нуклонів і кластерів у цій реакції: на рис. 1 показано передачу протона (крива $\langle r \rangle$), нейтрона (крива $\langle n \rangle$), та їхню когерентну суму (суцільна крива Σ_{p+n}), а також когерентну суму двоступінчастих реакцій передач: $d + p$, $d + n$, $t + d$, $^3\text{He} + d$, $\alpha + ^3\text{He}$, $\alpha + t$ (крива $\Sigma_{2\text{ST}}$). Встановлено, що основну роль для

реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ відіграє передача протона, передача нейтрона дає невеликий вклад на задніх кутах. Вклад інших двоступінчатих процесів у перерізи даної реакції виявився мізерним.

$d\sigma/d\Omega$, мб/ср



Диференціальні перерізи реакції $^{13}\text{C}(^{11}\text{B}, ^{12}\text{C})^{12}\text{B}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{11}\text{B}) = 45$ МеВ для переходів в основні стани ядер ^{12}C та ^{12}B . Криві – МЗКР-перерізи для різних процесів.

1. S.Yu. Mezhevych et al. Nucl. Phys. A 724 (2003) 29.

ОПТИМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ПОЛУЧЕНИЯ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ ИЗОТОПОВ ^{82}Sr НА ЦИКЛОТРОНЕ У-240 ИИЯ НАН УКРАИНЫ И В РАЗЛИЧНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ

Л. В. Михайлов, Т. П. Руденко, А. П. Чепурнов

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Подавляющее количество изотопов для медико-биологического использования производится на циклотронах с энергией протонов до 40 МеВ. Однако, существует ряд изотопов, которые нужны медицине в больших количествах (например ^{82}Sr), для производства которых нужны энергии протонов до 80 МеВ. Таких ускорительных установок в мире действует лишь 3-4.

Уникальность циклотрона У- 240 ИЯД НАН Украины заключается в том, что конечную энергию ускоренных протонных пучков есть возможность регулировать в широком диапазоне от 50МеВ и выше. Это обстоятельство дает возможность производить изотопы ^{82}Sr на циклотроне У- 240. Практическое применение нашел метод получения ^{82}Sr на ускорителях протонов с энергией ≥ 70 МэВ в реакции $\text{Rb}(p, xn)^{82}\text{Sr}$.

В качестве материала мишеней используют, как правило, металлический рубидий или твердотельную мишень из соли RbCl . Во многих лабораториях были проведены работы по получению ^{82}Sr различными методами. В этих

исследованиях получение ^{82}Sr осуществлялось выведенным из циклотрона пучком протонов достаточной интенсивности. Сравнительные результаты различных методов получения ^{82}Sr в разных лабораториях и на циклотроне У-240 приведены в статье. На циклотроне У-240 интенсивность внутреннего пучка протонов может достигать 100 и больше микроампер. Интенсивность выведенного пучка протонов на порядок ниже. Поэтому только интенсивность внутреннего пучка протонов позволяет эффективно нарабатывать ^{82}Sr . Сложность заключается в разработке мишеных устройств, которые бы работали в экстремальных условиях тепловых и радиационных нагрузок в ограниченном пространстве ускорительной камеры циклотрона и могли бы на протяжении всего времени облучения (до нескольких суток) выдерживать без разрушения эти нагрузки. На циклотроне У-240 была разработана установка, позволяющая получать ^{82}Sr при облучении мишени RbCl внутренним пучком протонов.

ДОСЛІЖЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ СТІЙКОСТІ ДВОСТОРОННІХ МІКРОСТРІПОВИХ СЕНСОРІВ ДЛЯ КРЕМНІСВОЇ ТРЕКОВОЇ СИСТЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТУ СВМ

Є. Л. Момот^{1,2}, М. А. Теклішин^{1,3}, А. В. Чаус¹, В. О. Кива¹

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

² *Goethe University, Frankfurt*

³ *Facility for Antiproton and Ion Research, Darmstadt*

Двосторонні кремнієві мікростріпові сенсори призначені для роботи в умовах значного радіаційного навантаження. Загальний флюенс в центральній частині детектора STS (Silicon Tracking Station) в експерименті СВМ (Compressed Baryonic Matter) очікується на рівні 10^{13} $1 \text{ MeV n}_{\text{eq}} \text{ cm}^{-2}$ (при роботі прискорювача SIS 100) та 10^{14} $1 \text{ MeV n}_{\text{eq}} \text{ cm}^{-2}$ (при роботі прискорювача SIS 300) [1]. В результаті опромінення в середині кристала кремнію утворюються зарядові пастки, що призводить до зменшення ефективності збору заряду. В свою чергу це погіршує відношення сигналу до шуму, що негативно впливає на ефективність реконструкції треків для заряджених частинок та визначення їхніх імпульсів. Для дослідження цього ефекту ми опромінювали та вивчали 36 сенсорів різних форм-факторів від різних виробників. У результаті вимірювань було визначено, що при низьких дозах 10^{13} $1 \text{ MeV n}_{\text{eq}} \text{ cm}^{-2}$ немає помітних зарядових втрат, при 10^{14} $1 \text{ MeV n}_{\text{eq}} \text{ cm}^{-2}$ р-сторона має ефективність порядку 90 - 95 % , а n-сторона – 85 - 90 %. Для подвійної дози втрати заряду становлять ~ 20 % на обох сторонах сенсорів.

Детальні результати вимірювань по ефективності збору заряду в опроміненних сенсорах будуть представлені на стендовій доповіді.

1. J. Heuser et al. GSI Report 2013-4.

СИСТЕМА ОЦІНКИ ЯКОСТІ МІКРОСТРІПОВИХ СЕНСОРІВ ДЛЯ КРЕМНІЄВОГО ТРЕКЕРА ЕКСПЕРИМЕНТУ СВМ

Я. В. Панасенко^{1,2}, В. О. Кива¹, В. М. Пугач¹, Й. М. Хойзер³, Х. Р. Шмідт²

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Physikalisches Institut, Universität Tübingen*

³ *GSI, Darmstadt*

СВМ експеримент буде досліджувати властивості ядерної матерії в екстремальних умовах, що будуть створені в ультрарелятивістських зіткненнях важких іонів при енергіях 2 - 14 А ГеВ. Його ключовий детектор – Кремнієва Трекова Система (КТС) – буде реконструювати треки частинок з роздільною здатністю по імпульсу $\approx 1,8\%$. Множинність заряджених частинок досягає до 800 в апертурі детектора (покриває полярний кут $2,5^0 - 25^0$). Висока густина треків та строгі вимоги до роздільної здатності по імпульсу вимагають наявності системи з великою кількістю каналів та малою кількістю матеріалу. КТС буде побудована з 896 двосторонніх кремнієвих мікростріпових сенсорів, загальною площею ~ 4 м². Мікростріповий сенсор з кроком 58 мкм, товщиною 285 мкм, з 1024 стріпами з кожної сторони – є основною структурною одиницею КТС.

Система оцінки якості спрямована на встановлення критеріїв відбору сенсорів для КТС та перевірку відповідності сенсорів цим критеріям. В даній доповіді оцінка якості мікростріпових сенсорів з точки зору електричних властивостей буде представлена. Для тестування великої кількості сенсорів була побудована автоматизована зондова станція з спеціалізованим програмним забезпеченням. Результати характеристики мікростріпових сенсорів від двох виробників (SiS та Hamamatsu) з використанням збудованої зондової станції і розроблених методик будуть представлені в даній доповіді.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДИФРАКЦІЙНОГО РОЗСІЯННЯ ЛЕГКИХ ЯДЕР НА ЯДРАХ ВУГЛЕЦЮ ¹²C

О. А. Понкратенко¹, Є. І. Коший², Вал. М. Пірнак¹, А. А. Рудчик¹,
А. Т. Рудчик¹, К. Русек³, Ю. М. Степаненко¹, В. В. Улещенко¹,
Ю. О. Ширма¹

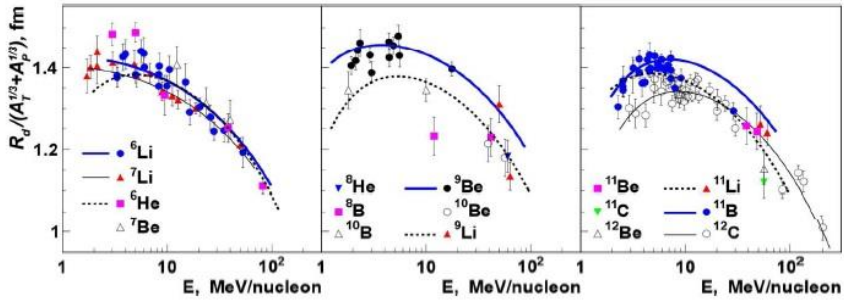
¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Техаського А&М університету, Коледж Стейшин, США*

³ *Лабораторія важких іонів, Варшавський університет, Варшава, Польща*

Досліджено дифракційну структуру експериментальних диференційних перерізів пружного розсіяння легких ядер (^{3,4,6}He, ^{6,7}Li, ^{7,9}Be, ¹¹B, ^{12,13,14}C, ¹⁴N, ^{16,18}O) на ядрах вуглецю ¹²C в енергетичному діапазоні налітаючого іона від 1 до 200 МеВ/нуклон та переданого імпульсу до 3 - 4 фм¹. Якісне розуміння

дифракційної природи перерізів пружного розсіяння для заданого кінематичного діапазону підтверджено кількісним описом з отриманням гладких аналітичних функцій, що забезпечують задовільний опис положень максимумів та мінімумів диференціальних перерізів. Знайдені параметризації адекватно описують експериментальні дані взаємодіючих пар, в тому числі і взаємодії ядер вуглецю ^{12}C з екзотичними ядрами ^6He , ^7Be , ^{14}C , ^{18}O . Побудовано залежні від енергії параметричні функції, які характеризують поведінку значень дифракційного радіусу для досліджуваних пар ядер (рисунок). Також знайдено залежності апроксимуючих функцій від індивідуальних характеристик ядер таких як енергія зв'язку та кількість нуклонів.



Енергетична залежність зведеного дифракційного радіусу $R_d / (A_P^{1/3} + A_T^{1/3})$ для ядерних систем $^{12}\text{C} + X$. Значення для різних пар ядер були отримані з аналізу q -положень максимумів диференціальних перерізів відповідно до формули $q_i^{\max} = \frac{\pi(i + \alpha^{\max})}{R_d}$. У кожній панелі α^{\max} є однаковим для всіх ядер. Параметризації зображені кривими: суцільні – з індивідуальними параметрами, товсті пунктирні – з глобальними параметрами.

1. О.А. Ponkratenko et al. Comparative analysis of the light nuclei diffractive scattering on ^{12}C . Acta Physica Polonica B 49 (2018) (прийнято до друку).

ЕНЕРГЕТИЧНА ЗАЛЕЖНІСТЬ ДИФЕРЕНЦІЙНИХ ПЕРЕРІЗІВ ПРУЖНОГО РОЗСІЯННЯ ЛЕГКИХ ЯДЕР НА ^{12}C В ДИФРАКЦІЙНІЙ ОБЛАСТІ

О. А. Понкратенко¹, Є. І. Коший², Вал. М. Пірнак¹, А. А. Рудчик¹,
А. Т. Рудчик¹, К. Русек³, Ю. М. Степаненко¹,
В. В. Улещенко¹, Ю. О. Ширма¹

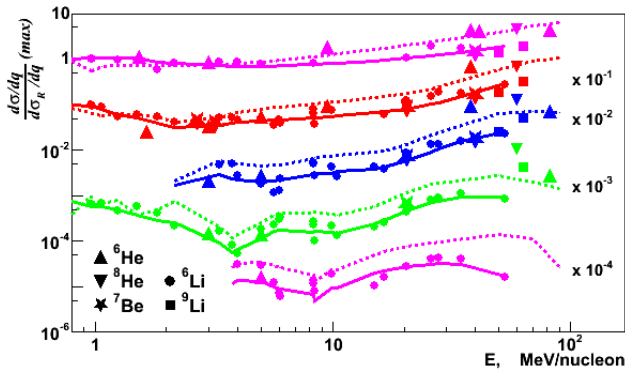
¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Техаський університет A&M, США

³ Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

Виконано систематичний аналіз великого масиву експериментальних даних з пружного дифракційного розсіяння 11 легких ядер ($A < 19$) на ядрі ^{12}C у діапазоні енергій налітаючого іона від 1 до 400 MeV на нуклон. Продемонстровано загальні закономірності плавної зміни значень диференціальних перерізів розсіяння у перших п'яти дифракційних максимумах у всьому енергетичному діапазоні для всіх аналізованих випадків розсіяння.

Для кожної пари взаємодіючих ядер отримано гладкі параметричні функції, котрі описують поведінку перерізів у максимумах з задовільною точністю. Показано, що енергетично залежні потенціали взаємодії, побудовані з повним врахуванням дисперсійних співвідношень [1], коректно описують всі характерні риси поведінки перерізів у максимумах. Продемонстровано, що значення перерізів у дифракційних максимумах для випадків розсіяння радіоактивних ядер можуть бути з задовільною точністю розраховані в енергетичному діапазоні від 1 до 200 MeV за допомогою оптичних енергетично залежних потенціалів, побудованих для близьких стабільних ядер.



Значення диференціальних перерізів пружного розсіяння ядер на ^{12}C у перших п'яти дифракційних максимумах (у відношенні до Резерфордівського перерізу).

1. О.А. Понкратенко та ін. Глобальні потенціали взаємодії для дифракційного розсіяння $^{16}\text{O} + ^{12}\text{C}$ та $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ у широкому діапазоні енергій. Ядерна фізика та енергетика 15(3) (2014) 222.

ВИКОРИСТАННЯ СТАТИСТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ В ЗАДАЧАХ ЯДЕРНОГО ДАТУВАННЯ: МЕТОД СТАНДАРТНИХ МНОЖИН

О. М. Поп¹, В. Т. Маслюк¹, М. І. Тільняк²

¹ Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, Україна

² ДВНЗ «Ужгородський національний університет», Ужгород, Україна

На сьогодні для цілей ядерного датування широкого застосування набув метод ядерних хронометрів, який використовує два радіонукліди (РН): материнсь-

кий та дочірній. Однак, вибір та використання відповідних пар нуклідів для встановлення віку зразків для різних часових масштабів є непростю задачею і потребує ряду допущень як щодо періодів напіврозпадів РН, початкового вмісту материнських нуклідів, закритість системи РН у досліджуваному зразку тощо.

Раніше був запропонований метод стандартних множин нуклідів (МСМН), який ґрунтується на встановленні закономірностей перетворень та співвідношень активностей практично всіх дочірніх РН радіоактивних рядів ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U . Проте, застосування його до задач ядерного датування дозволяло проводити лише інтервальну оцінку часу існування подій (ЧІП).

У доповіді розглядається розвиток МСМН при використанні методу Монте-Карло, що дає змогу враховувати статистичні похибки визначення активностей РН природних рядів ^{232}Th , ^{235}U , ^{238}U у досліджуваних зразках. Застосування МСМН та статистичних випробувань дають нові можливості для задач ядерного датування – використанням не двох, а значно більшого числа РН як часових міток, а також підвищення достовірності встановлення не лише часів події, але і їхніх довірчих інтервалів. Можливості МСМН ілюструються на прикладі встановлення ЧІП для зразків гірських порід Карпат, виконаних і низько фоновій лабораторії відділу фотоядерних процесів ІЕФ НАН України. Обговорюються способи пониження природного фону при експериментах та вплив точності встановлення активностей дочірніх РН досліджуваних зразків на достовірність ядерного датування. Наведено дані встановлення ЧІП для різних значень експериментальних похибок що моделюються методом Монте-Карло.

Таким чином, запропонований МСМН та методика статистичного моделювання можуть служити доповненням відомих методів ядерних хронометрів. Використання методів статистичного моделювання покращують достовірність ядерного датування, дозволяють вводити довірчі інтервали для ідентифікації часу події.

РЕКОНСТРУКЦІЯ ТРЕКІВ У РАМКАХ АЛГОРИТМУ КЛІТКОВОГО АВТОМАТУ ДЛЯ ФОРВАРДНОЇ ТРЕКОВОЇ СИСТЕМИ ЕКСПЕРИМЕНТУ PANDA

М. В. Пугач^{1,2}, І. Кісель², М. Зизак³, І. Живко⁴

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *GSI Гемгольццентр по вивченню зіткнень важких іонів,
Дармштадт, Німеччина*

³ *Франкфуртський інститут передових досліджень,
Франкфурт на Майні, Німеччина*

⁴ *Інститут теоретичної та експериментальної фізики, Москва, Росія*

Розроблено програмне забезпечення на основі алгоритму Кліткового Автомату для реконструкції треків у форвардній трекінговій системі експерименту

PANDA. Програмна процедура групує хіти у треки, виконуючи оцінку імпульсу як і інших кінематичних характеристик треку (координати та нахили до координатних осей).

З метою використання переваг сучасних процесорних архітектур було використано бібліотеку векторних класів (Vc) для паралельної обробки даних, а також створено систему інтерфейсів, які супроводжують функціональність алгоритму в середовищі PandaRoot. У доповіді наведено опис алгоритму реконструкції, представлено графіки по якості визначення параметрів треків і показники ефективності реконструкції треків.

РОЗРОБКА ТА ХАРАКТЕРИЗАЦІЯ ДЕТЕКТОРИЗОВАНОГО ФАНТОМА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕНЬ У ГАЛУЗІ ПРОСТОРОВО ФРАКЦІОНОВАНОЇ РАДІАЦІЙНОЇ ТЕРАПІЇ

Д. М. Рамазанов¹, В. М. Пугач¹, Д. Сторожик¹, О. Ковальчук¹, А. Чаус¹, В. Кива¹, С. Форостенко²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

У даній роботі розроблено та виготовлено прототип Детекторизованого Фантому для дослідження дозових полів від пучків іонізуючого випромінювання на різній глибині фантому в реальному часі для досліджень в галузі просторово фракціонованої радіаційної терапії. Прототип фантому було виготовлено із поліметилметакрилату (органічне скло), на різних товщинах якого було встановлено спеціально створені металеві-фольгові детектори. Виміряні експериментальні результати узгоджуються з Монте-Карло симуляціями. Зроблено висновок про придатність розробленого детекторизованого фантома для дослідження дозових полів на різних глибинах проникнення радіації у фантом.

Безпосередніми вимірюваннями продемонстровано належне функціонування створеного приладу в режимі реального часу для дослідження розподілу інтенсивності опромінюючих пучків радіації на різній глибині фантому. Дослідження роботи детекторизованого фантому виконані на джерелі стронцій-90 з використанням високочутливих зарядових інтеграторів для зчитування даних з металевих детекторів. Одержані результати, в межах похибок відповідають розрахункам за допомогою Монте-Карло симуляцій, а отже підтверджують можливість використання створеного прототипу детекторизованого фантому для досліджень по розвитку фізико-технічних принципів просторово фракціонованої радіаційної терапії.

РЕАКЦІЯ $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ ПРИ ЕНЕРГІЇ ІОНІВ ^{15}N 81 МеВ ТА ВЗАЄМОДІЯ ЯДЕР $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$

А. Т. Рудчик¹, К. Русек², О. Е. Куцик¹, А. А. Рудчик¹, Вал. М. Пірнак¹,
О. А. Понкратенко¹, Е. П'ясецькі², А. Столяж², А. Тжціньска², І. Строск³,
Є. І. Кошій⁴, Р. Сюдак⁵, С. Б. Сакута⁶, В. А. Плюйко⁷,
Ю. М. Степаненко¹, В. В. Улещенко¹, А. П. Ільїн¹, Ю. О. Ширма¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Лабораторія важких іонів Варшавського університету, Варшава, Польща

³ Національний центр ядерних досліджень, Варшава, Польща

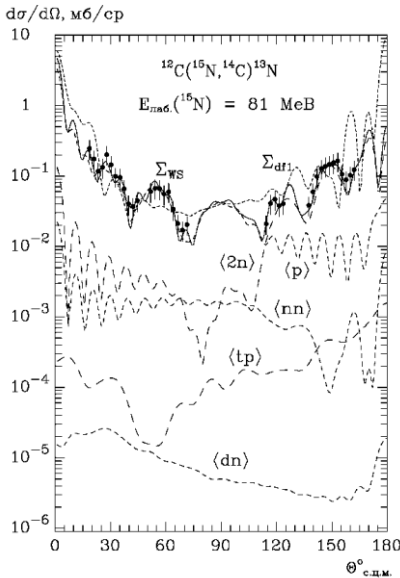
⁴ Циклотронний інститут Техаського А&М університету, Техас, США

⁵ Інститут ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського, Краків, Польща

⁶ Національний дослідний центр «Курчатовський інститут», Москва, Росія

⁷ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Отримано нові експериментальні дані диференціальних перерізів реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ іонів ^{15}N . Вимірювання реакцій $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, X)$ проведено на Варшавському циклотроні У-200Р з використанням пучка іонів ^{15}N та експериментальної ΔE - E -методики з кремнієвими детекторами. Дані показано на нижчеподаному рисунку.



Диференціальні перерізи реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ при енергії $E_{\text{лаб.}}(^{15}\text{N}) = 81$ МеВ. Штриховими кривими показано внески різних реакцій передач нуклонів і кластерів у дану реакцію, а штриховою кривою Σ_{df} – сумарні розрахунки реакції $^{12}\text{C}(^{15}\text{N}, ^{14}\text{C})^{13}\text{N}$ з використанням фолдінг-потенціалу V_{df} взаємодії ядер $^{14}\text{C} + ^{13}\text{N}$ з уявною частиною $W_{df} = 0,1V_{df}$. Суцільною кривою Σ_{WS} показано сумарні розрахунки з потенціалом Вудса-Саксона WS, параметри якого визначені з підгонки його до фолдінг-потенціалів V_{df} та W_{df} .

Експериментальні дані проаналізовано за методом зв'язаних каналів реакцій із включенням у схему зв'язку каналів пружного й непружного розсіяння та реакцій передач нуклонів та кластерів, а саме: протонів, кластерів 2n , $d + n$ і

$n + d$, $t + p$ і $p + t$ (криві $\langle p \rangle$, $\langle {}^2n \rangle$, $\langle dn \rangle$ та $\langle tp \rangle$ відповідно). Встановлено, що основну роль у реакції ${}^{12}\text{C}({}^{15}\text{N}, {}^{14}\text{C}){}^{13}\text{N}$ відіграють лередачі протонів та 2p -класерів. Внески двоступінчастих процесів у дану реакцію незначні.

Визначено параметри *потенціалу* взаємодії ядер ${}^{13}\text{N} + {}^{14}\text{C}$ в основних і збуджених станах та досліджено *ізотопічні* відмінності потенціалів взаємодії ядер ${}^{13}\text{N} + {}^{14}\text{C}$ і ${}^{14}\text{N} + {}^{14}\text{C}$.

АНАЛІЗ ДОВГОТРИВАЛИХ ВИМІРЮВАНЬ ГАММА-ФОНУ В ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ ЗОНІ ВІДЧУЖЕННЯ

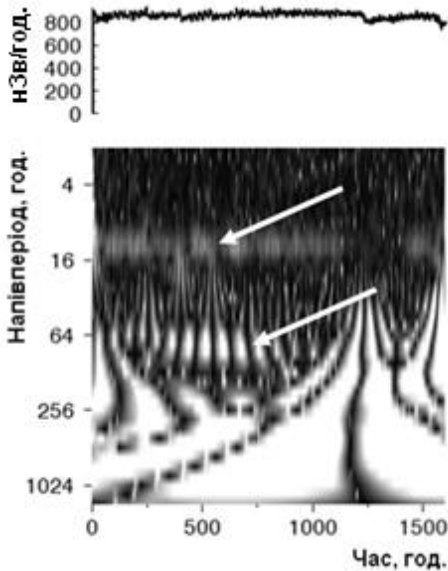
А. Д. Скорбун¹, А. І. Спірін², Б. М. Сплошной³

¹ Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, Чорнобиль, Україна

² ДСП «Екоцентр», Чорнобиль, Україна

³ ДСП «Чорнобильський спецкомбінат», Чорнобиль, Україна

На даний час у 30-кілометровій зоні навколо ЧАЕС розташовано пункти контролю автоматизованої системи контролю радіаційного стану (АСКРС).



Результати вейвлет-перетворення для ряду вимірювань. Чітко видно (показано стрілками) серії регулярних плям. Верхня серія – добові зміни сигналу (період дорівнює 24 год.), нижня – період ~ 7 діб.

Дані про рівень гамма-фону регулярно (сумарний сигнал за кожні 15 хв.) передаються на сервер. У результаті існує можливість ретроспективного аналізу радіаційної обстановки. При аналізі виявляється, що існують досить помітні варіації гамма-фону, які потребують уваги. У першу чергу це сезонні зміни, які є очікуваними і зазвичай пов'язуються з такими природними факторами, як екранування поверхні землі, де, власне, розташовані радіонукліди, вологою чи снігом. Виконано аналіз змін гамма-фону у пункті контролю «Красно» Чорнобильської зони відчуження за період 2014 - 2017 рр. У регулярному ряді вимірювань виявлено як явні сезонні (зима-літо), так і приховані більш короткоперіодичні зміни інтенсивності гамма-фону, які не пов'язані з метеороумовами.

За допомогою вейвлет-аналізу виявлено достатньо чіткі добові періодичності, а також менш контрастні з періодом у 7 - 8 діб. Показано, що максимуми добових змін припадають на 17 - 18 годину дня, а мінімальні – на 05-06 годину ранку місцевого часу. Хоча зафіксовано і випадки значних відхилень. Чіткі добові періодичності спостерігаються переважно у літній період. Періодичність сигналу видно також неозброєним оком на верхньому графіку. Величина змін становить близько 10 %. Реальність періодичності з періодом в 1 добу підтверджується також тим, що у спектрі Фур'є проаналізованих сигналів завжди є лінія, яка відповідає періоду у 24 години, причому інтенсивність її найбільша. Показано, що виявлені закономірності не пов'язано з метеоумовами.

ПРИВЕДЕНИЕ К ОДНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ШКАЛЕ СПЕКТРОВ, ПОЛУЧАЕМЫХ ПРИ ОЦЕНКЕ ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА

А. М. Соколов

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

В распространенной методике оценки обогащения урана спектр образца сравнивают со спектром эталона с известным содержанием ^{235}U [1]. По причине различия в условиях измерения спектров, одинаковым энергиям могут соответствовать разные каналы спектра, т.е. спектры имеют разную энергетическую калибровку - один спектр оказывается сдвинут и растянут (или сжат) относительно другого. Такая ситуация встречается, например, при измерении гамма-спектров сцинтилляционным детектором при разных температурах. В двух спектрах обычно наблюдаются по несколько изолированных пиков, и известно, что некоторые пики одного спектра соответствуют некоторым пикам другого спектра, т.е. из них можно составить несколько пар соответствующих пиков. При этом соответствующие пики отвечают одинаковой энергии, но положение их на шкале каналов различается. Задача состоит в том, чтобы преобразовать один из спектров так, чтобы положение соответствующих пиков на шкале каналов совпало и энергетическая калибровка спектров стала одинаковой (хотя она может быть при этом неизвестной). Иначе говоря, требуется перевести спектр с одной шкалы каналов на другую, выполнить своего рода замену переменной для спектра и сделать это без проведения калибровки по энергии. Для решения указанной задачи создана программа `Pik2Pik`. В ней, на основе информации о величине сдвигов соответствующих пиков, строится корректирующее преобразование для рабочего спектра. В программе `Pik2Pik` мы:

1. В интерактивном режиме выбираем участки на шкале каналов, где в двух спектрах находятся соответствующие пики (в частном случае данной задачи число участков $n = 3$).

2. С помощью процедуры поиска пика на участке определяем положение пиков в выбранных участках для одного спектра и для другого спектра. При

этом моделью участка спектра, содержащего пик, служит гауссиан на линейном фоне. Положение пиков в рабочем спектре обозначим как s_i , положение соответствующих пиков в «эталоне» как e_i . Составляем пары чисел (s_i, e_i) , $i = 1, \dots, n$.

3. С помощью процедуры относительной калибровки по точкам (s_i, e_i) , $i = 1, \dots, n$ строим кусочно-линейную зависимость $e(s)$, устанавливающую соответствие между каналами спектра и каналами «эталона».

4. С помощью процедуры «пересыпки» спектра с одной шкалы каналов на другую [2] (процедуры замены переменной для дискретного спектра), на основе зависимости $e(s)$, переводим рабочий спектр на шкалу каналов «эталона». При этом, хотя спектр может сжиматься или растягиваться, общее число отсчетов сохраняется.

Отметим, что если в первоначальном спектре значения в соседних каналах можно считать некоррелированными, то после преобразования, когда в соседние каналы попадут отсчеты из одного канала, они станут коррелированными. Кроме этого проявляется эффект некоторого сглаживания спектра при «пересыпке».

1. Д. Райли, Н. Энслин, Х. Смит, С. Крайнер. *Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов* (Москва: Бином, 2000) 720 с.
2. В.И. Третьяк. TS2- диалоговая система обработки одномерных спектров. Препринт КИЯИ-90-35 (Киев, 1990) 23 с.

ВІДНОВЛЕННЯ ДІЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОВЕРХНІ КРИСТАЛА ГАММА-ДЕТЕКТОРА З ОСОБЛИВО ЧИСТОГО ГЕРМАНІЮ

Р. Ю. Чаплинський, С. С. Погуляй, Е. Є. Петросян

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Погіршення діелектричних властивостей між електродного покриття веде до значної деградації спектрометричних характеристик ОЧГ детекторів, зокрема його розділової здатності (ПШПВ). Розроблено відносно простий та не дорогий метод вологого хімічного відновлення діелектричного покриття промислових коаксіальних ОЧГ детекторів. Запропонований метод складається: з п'ятихвилинного травлення діелектричної поверхні в суміші кислот HNO_3 (65 %) з HF (39,5 %) у відношенні 3:1, послідууючого гасіння кислот за допомогою CH_3OH [1, 2] протягом 3 хв та промивкою сформованої поверхні бідистильованою водою. Літєвий $n+$ контакт був закритий від кислот клейкою стрічкою, а $p+$ іонно імплантований контакт – фторопластовою вставкою. Сушка кристала проводилася двома способами за допомогою ацетону та повітря нагрітого до 70 °С. Після хімічної обробки кристал монтувався в криостаті та проводився його нагрів під вакуумною відкачкою. Вольт-амперні характеристики (ВАХ) промислово виготовленого детектора фірми Ortec моделі GEM10P4 з робочою напругою 2900В

до відновлення покриття, після хімічного відновлення та залежно від методу сушки показані на рис. 1. До відновлення діелектричної поверхні роздільна здатність детектора по кобальту вже при 1000 В була не менше 6 кеВ, а після хімічного відновлення та сушки повітрям при 70⁰С, при напрузі 2800 кеВ ПШПВ = 2,2 кеВ (рис. 2).

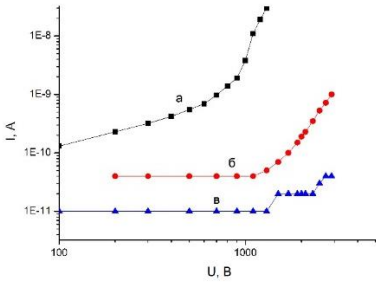


Рис. 1. ВАХи ОЧГ детектора GEM10P4 фірми ORTEC. а – до відновлення; б – після відновлення і сушки ацетоном, в – після відновлення і сушки повітрям при температурі 70⁰С.

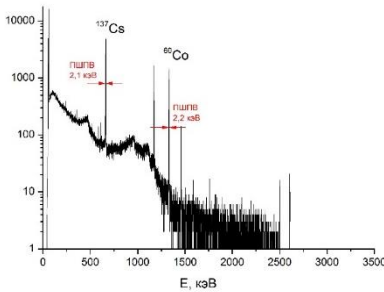


Рис. 2. Спектр точкових джерел випромінювання ²⁴¹Am, ¹³⁷Cs, ⁶⁰Co, виміряний ОЧГ детектором з відновленим кристалом.

1. S. Carturan et al. Materials Chemistry and Physics 161 (2015) 116.
2. Ю.Б. Гуров и др. Приборы и техника эксперимента (2008).

ТЕСТ РАДІАЦІОНОЇ СТІЙКОСТІ КРЕМНІЄВИХ СЕНСОРІВ У РЕАЛІСТИЧНИХ УМОВАХ НА ПРИСКОЮВАЧІ ВАН-ДЕ-ГРАФ В УНІВЕРСИТЕТІ ТЮБІНГЕНА

А. В. Чаус¹, В. М. Пугач¹, Д. Рамазанов¹, Е. Фріске², Х. Р. Шмідт²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Університет Тюбінгена, Тюбінген, Німеччина

Кремнієві двосторонні мікро-стріпові сенсори є головним елементом детекторних модулів Трекової Системи в експерименті СВМ (GSI/FAIR, Darmstadt). Накопичена в них доза протягом кількох років виконання експерименту сягає рівня 10¹⁴ n_{eq}(1 MeV)/см². Для вивчення наслідків пошкодження

сенсорів в реалістичних умовах була розроблена і виготовлена установка опромінення з використанням нейтронів. Установка на основі електростатичного прискорювача Ван-де-Графа в університеті Тюбінгену забезпечує достатньо високий потік нейтронів протягом тривалого періоду (тижнів), тим самим відтворюючи фактичний сценарій опромінення в порівнянні з миттєвим опромінюванням у реакторах.

В установці використовується криогенна газова мішень і пучок дейтронів 2,4 МеВ для генерації нейтронів в $D(D, {}^3\text{He})n$. Опроміньований сенсор зчитувався за допомогою двох мікрочіпів BEETLE-128 (система ALIBAVA) для оцінки деградації якості сенсорів (зростання зворотнього струму, погіршення ефективності збирання заряду) внаслідок радіаційного ураження. Будуть представлені попередні результати аналізу одержаних даних.

ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРІПОВИХ КРЕМНІЄВИХ СЕНСОРІВ ТА КОРОТКИХ ГНУЧКИХ МІКРОКАБЛІВ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ СВМ

**В. М. Міліція¹, В. М. Добішук¹, В. О. Кива¹, О. С. Ковальчук¹,
Д. І. Сторожик¹, В. М. Пугач¹, А. В. Чаус¹, Й. Хойзер²**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Центр по вивченню важких іонів імені Гельмгольца,
Дармштадт, Німеччина*

СВМ (Compressed Baryonic Matter – Стиснена баріонна речовина) – це майбутній експеримент з фіксованою мішенню, який буде функціонувати на базі прискорювача SIS-100/300 в GSI (Дармштадт, Німеччина). Його розробляють для дослідження зіткнень важких іонів при енергіях 10-45 ГеВ/нуклон.

Кремнієва Трекова Система (КТС) [1] експерименту СВМ розробляється для реконструкції треків і визначення імпульсу заряджених частинок, що утворюються в ядро-ядерних зіткненнях при релятивістських енергіях. Для КТС планується використовувати двосторонні мікростріпові кремнієві детектори 300 мкм завтовшки. У лабораторних умовах для тестування сенсорів застосовувалась вимірювальна система Alibava [2], що використовує зчитувальний мікрочіп BEETLE-128 для кремнієвих мікростріпових сенсорів експерименту ЛНСь (ЦЕРН).

Досліджено різні типи сенсорів від двох виробників (СіС/ФРН НАМАМАТСУ/Японія), а також гнучкі мікрокабелі для сполучення сенсорів із зчитувальною мікроелектронікою. У роботі наводяться результати тестування сенсора СВМ06Н6 виробництва фірми НАМАМАТСУ, сполученого за допомогою короткого (2 см) мікрокабелю виготовленого в Інституті Мікроприладів НАНУ, до системи зчитування Alibava. Виміряно рівень шумів, амплітудного відгуку 256 під'єднаних стріпів від джерела ⁹⁰Sr та космічних променів. Середнє значення відношення Сигнал/Шум становить величину біля 15

з коливанням у межах $\pm 5\%$ для 256 під'єднаних стріпів, демонструючи придатність сенсорів СВМ06Н6 за цим параметром для використання в КТС СВМ експерименту. Дослідження зі скануючим лазерним променем показали наявність наводок (у рідкісних випадках) у стріпах через з'єднувальні лінії другого металевого шару сенсора.

1. CBM collaboration. Technical Design report for the CBM Silicon Tracking System. GSI Report 2013-4.
2. <https://www.alibavasystems.com/>

Тези доповідей з атомної енергетики

ФОРМУВАННЯ ПРИНЦИПІВ І КРИТЕРІЇВ БЕЗПЕКИ В ПРОЦЕСІ ПРОДОВЖЕННЯ ТЕРМІНУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СВЯП-1

С. І. Азаров¹, В. М. Євланов², О. С. Задунай³

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки,
Київ, Україна

³ Державний науково-дослідний інститут спеціального зв'язку
та захисту інформації, Київ, Україна

Над проблемою дослідження безпеки СВЯП працюють багато вітчизняних і закордонних спеціалістів та науковців. Різні аспекти та окремі підходи до дослідження цієї проблеми висвітлено у чисельних працях [1 - 3], але через те, що цей процес є безперервним, постійним і надзвичайно актуальним, дослідження тривають.

З метою виконання вимог «Загальнодержавної програми зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС та перетворення об'єкта «Укриття» в екологічно безпечну систему» в частині звільнення блоків від відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) та дотримання термінів зняття з експлуатації Чорнобильської АЕС необхідно науково обґрунтувати умови безпечного розміщення та зберігання ВЯП в сховищі ВЯП (СВЯП-1), оскільки звільнення блоків № 1 та 2 від ВЯП дасть змогу розпочати роботи, передбачені на етапі остаточного закриття і консервації 1 - 3 блоків ЧАЕС.

Перш ніж все паливо буде розміщено в СВЯП-1, необхідно обґрунтувати продовження терміну його експлуатації, а також виконати аналіз існуючих принципів і критеріїв безпеки в процесі зберігання ВЯП, які відповідають основним принципам державної політики України у сфері поводження з ВЯП та враховують рекомендації МАГАТЕ.

1. Ю.К. Петреня. Работы ОАО «НПО ЦКТИ» по обоснованию тепловых режимов делящихся материалов и ОЯТ.
2. Ю.К. Петреня и др. В кн.: Труды VII междунар. конф. «Безопасность ядерных технологий». ПРО Атом (Санкт-Петербург, 2004) 34.
3. П. Броулик. *Модельные эксперименты для тесного хранилища отработавшего топлива* (Будапешт, 1982) 43 с.
4. Н.А. Карпенко. Методи вирішення проблем дефіциту безпеки систем зберігання ядерного палива.
5. Н.А. Карпенко, В.В. Соловьев. Проблеми чорнобильської зони відчуження 12 (2014) 24.

JOINT ANALYSIS EXERCISE ON URANIUM PELLETS

**M. Wallenius¹, Z. Varga¹, K. Mayer¹, A. Berlizov²,
S. Bulyha², M. Peńkin², K. Knight³, R. Williams³,
K. Schorzman³, R. Lindvall³, V. Tryshyn⁴, I. Maliuk⁴**

¹ *European Commission, Joint Research Centre,
Institute for Transuranium Elements, Karlsruhe, Germany*

² *International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria*

³ *Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, USA*

⁴ *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine,
Kyiv, Ukraine*

In the case of illicit trafficking or related unlawful acts involving nuclear or other radioactive materials, appropriate response is of utmost importance. Comprehensive characterization of the involved material, i.e. nuclear forensic analysis, is an integral part of the investigation. Shared samples of seized material, enabling multiple laboratories to examine the material, can serve as a measure for increasing the confidence in the results obtained from nuclear forensic analysis. To exercise this procedure, starting from the distribution of the samples to the compilation of the multiple-laboratory results, a "joint analysis exercise" among four laboratories was conducted. The participating laboratories included IAEA's Safeguards Analytical Laboratory (IAEA), Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), the Institute for Transuranium Elements (JRC-ITU), and the Kiev Institute for Nuclear Research (KINR). The analyzed material consisted of ten sintered fuel pellets containing two different types of low enriched UO₂: Five pellets intended for RBMK reactors, and five pellets intended for VVER reactors. The pellets were randomly selected from larger batches, seized in illicit trafficking incidents on Ukrainian territory in 1990-. Each pellet was split into four roughly equal fractions and dispatched to the laboratories for analyses.

Before starting the nuclear forensic analysis, an analytical plan was developed and agreed upon among participating laboratories. It included the following parameters to be determined:

1. uranium isotopic composition, including initial estimation of the ²³⁵U enrichment;
2. uranium concentration;
3. impurities (trace element concentrations);
4. material age (radiochronometry);
5. microstructure, including grain size and porosity.

The laboratories selected the analytical techniques according to their own preferences. Most of the laboratories used high-resolution gamma spectrometry (HRGS), thermal ionization mass spectrometry (TIMS), inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS), and scanning electron microscopy (SEM). The aim of the exercise was to compare the analytical results obtained from different

laboratories within a given period. Attribution capabilities were not tested in this exercise. The paper summarizes the obtained results, highlighting the strengths of various techniques, and confidence in analytical conclusions. We also discuss the observed discrepancies and the possible reasons for these.

ПРОГНОЗ ДИНАМИКИ НЕЙТРОННОЙ АКТИВНОСТИ В ЗОНЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОТЕНЦИАЛЬНО ЯДЕРНО-ОПАСНОГО СКОПЛЕНИЯ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ВНУТРИ НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА

Э. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль, Украина

Основным фактором, определяющим многолетнюю динамику плотности потоков нейтронов (ППН) вблизи потенциально ядерно-опасного скопления (ЯОС) топливосодержащих материалов (ТСМ), являются процессы изменения концентрации влаги в пористой размножающей среде. Предполагается, что существующая система макро и микропор образует бесконечный кластер, по открытым поровым каналам которого обеспечивается равномерное по объему скопления поступление и/или уход воды, от концентрации которой, зависит эффективный коэффициент размножения (Кэф) размножающей среды. Характерной особенностью низкообогащенных систем при увлажнении является наличие оптимального водо-уранового отношения, т.е. концентрация воды, при которой Кэф достигает максимального значения, а дальнейший рост приводит к переувлажнению и падению Кэф до значений, определяемых влагоемкостью размножающейся среды.

До установки НБК «Арка» в проектное положение нестабильность нейтронной активности проявлялась в виде регулярных сезонных трендов ППН, на фоне которых возникали локальные аномалии, сопровождающие процессы поступления и удержания дождевой и талой воды в ОУ. Прекращение доступа в помещение ОУ дождевой и талой воды определило динамику постоянного роста нейтронной активности в зоне проплавления подреакторной плиты помещения 305/2.

В условиях отсутствия доступа к среде ЯОС допускается, что в зоне проплавления подреакторной плиты находятся два объёмных источника нейтронов с самопоглощением: ниже отметки +9.00 находится керамика с критической переувлажненной композицией с высокой концентрацией топлива; выше – слой черных лавообразных ТСМ с также переувлажненной композицией и долей ядерного топлива менее 5 %. Регистрируемая в точках детектирования ППН включает в себя нейтроны, генерируемые в объеме керамики, и нейтроны, генерируемые в слое лавообразных ТСМ. При условии удержания воды ниже отметки +9.00, нейтронная активность керамики с критической

композицією стабільна, а вся наблюдаемая динаміка локальних аномалій визначається змінами Кэф, зв'язаними з поступленням або уходом води з розмножуючоїся середою шару чорних лавообразних ТСМ.

Приведені основні характеристики моніторингу нейтронної активності в точках детектування: геометрії спостереження; середою розділу; розрахункові значення вкладів ППН від джерел в відносних одиницях. Для моделі ЯОС з допомогою програмного коду MCNP отримані розрахункові значення енергетических спектрів джерел нейтронів і спектри в точках детектування ППН.

В межах консервативного підходу допускається, що в найближчий час в процесі втрати води переувлажненої розмножуючої середою реєструється ППН буде продовжувати рости до досягнення оптимального зволоження шару лавообразних ТСМ, розташованих вище позначки +9.00. Після цього очікується незначительне падіння нейтронної активності, зв'язане з повним обезвоживанням цього шару. Даліший ріст ППН буде означати уход води з об'єму критическої композиції нижче позначки +9.00 і відповідно ризики досягнення зворотної критичесності в його об'ємі. Пропонуються процедури виявлення і ідентифікації небезпеческих змін рівня підкритичесності потенціально ЯОС ТСМ, а також заходи оперативного подання рости Кэф.

ДВАДЦЯТЬ РОКІВ НА СЛУЖБИ ФІЗИЧНОЇ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ: НАРОБКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ

**В. І. Гаврилюк, А. В. Гаврилюк-Буракова, С. С. Драпей, В. І. Кирищук,
О. О. Левіна, В. В. Пархоменко, О. П. Романова, А. В. Самсоненко**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

У 2018 р. виповнюється 20 років Навчальному центру з фізичного захисту, обліку та контролю ядерних матеріалів ім. Джоржа Кузмича Інституту ядерних досліджень НАН України (далі Центр).

За 20 років свого існування Центр перетворився в широко відомий в світі заклад з підтримання та підвищення кваліфікації фахівців з фізичної ядерної безпеки.

Цьому значною мірою сприяли розроблені та впроваджені Центром технології навчання, в основу яких покладено систематичний підхід, використання досягнень передового досвіду як національного, а так і міжнародного, і, що дуже важливо, створення в Центрі матеріально-технічної бази навчання, визнаної міжнародними та вітчизняними експертами з фізичної ядерної безпеки як унікальної.

Завдяки творчим зв'язкам з відповідними структурами міжнародних організацій та окремих країн Центр впевнено дивиться в майбутнє.

ВІДНОВЛЕННЯ ПОЛЯ ЕНЕРГОВИДІЛЕННЯ В АКТИВНІЙ ЗОНІ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

В. В. Гальченко¹, В. І. Гулік^{1,2}, І. І. Шлапак¹, Д. В. Будік¹

¹ ПАТ «СНВО «Імпульс», Київ, Україна

² Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна

Для неперервного оперативного контролю і управління ядерним енергетичним реактором необхідно з досить високою точністю знати поточний розподіл енерговиділення в активній зоні реактора.

Такий безперервний контроль поля енерговиділення в активній зоні ВВЕР-1000 здійснюється системою внутрішньо реакторного контролю за допомогою детекторів прямого заряду (ДПЗ), які розташовані в 64 зі 163 тепловіділяючих збірок. В той час, як для оперативного контролю, необхідна інформація по всім тепловіділяючим збіркам, які розташовані в активній зоні з детальним розподілом по висоті.

Відновлення поля енерговиділення в активній зоні ядерного реактора базується на двох масивах даних: розподілу енерговиділення, яке було отримано шляхом числового рішення нейтронно-фізичної задачі і, на базі даних ДПЗ.

Задача відновлення полягає в такому об'єднанні розрахункових значень і значень з датчиків, за яким похибка відновлення поля буде мінімальною.

В роботі наведено опис методів відновлення поля енерговиділення, які застосовуються на сьогодні і представлені нові підходи до цієї задачі, які базуються на математичних методах алгебраїчної томограми.

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ВНУТРИ НОВОГО БЕЗОПАСНОГО КОНФАЙНМЕНТА

Р. Л. Годун

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чернобиль, Україна

После начала эксплуатации комплекса НБК-ОУ актуальными и обязательными являются не только обеспечение, но и переоценка уровня ядерной безопасности делящихся материалов, т.к. происходит изменение (зафиксированное нейтронными детекторами штатной системы контроля ядерной безопасности, СКЯБ) температурно-влажностных условий хранения скоплений топливосодержащих материалов (ТСМ).

Представлена классификация ТСМ внутри НБК-ОУ по уровню их ядерной безопасности и показано, что сейчас существует только одно потенциально ядерно-опасное скопления (ЯОС) ТСМ, в объеме которого возможно возникновение самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР), ведущей к

радиационным последствиям. Доступные экспериментальные данные не только не исключают, но и аргументировано подтверждают вероятность существования критической композиции в зоне проплавления подреакторной плиты шахты разрушенного реактора, и наличие условий, необходимых для возникновения СЦР при «возвратной критичности» в ее объеме.

Была восстановлена и проанализирована динамика роста, удержания и спада ППН, а также хронология внешних факторов, сопутствующих развитию и гашению СЦР при нейтронной аномалии июня 1990 г, которая наиболее вероятно может быть идентифицирована как холодный критический инцидент. Предложено описание процессов, происходящих при этом событии, и показано, что наиболее вероятно потенциально ЯОС ТСМ находится в переувлажненном состоянии. Также это допущение подтверждается результатами измерений СКЯБ: при поступлении воды от атмосферных осадков в зону локализации этого скопления ТСМ фиксируется снижение регистрируемой нейтронной активности, а после начала эксплуатации комплекса НБК-ОУ и, следовательно, исключения доступа воды – рост ППН.

Показана предположительная структура потенциально ЯОС ТСМ и выполнены расчеты. По результатам моделирования и вариационных расчетов параметров этого скопления ТСМ были определены диапазоны характеристик, которые не противоречат доступным на текущий момент экспериментальным данным, и обеспечивают условия для возникновения СЦР при «возвратной критичности». Также было оценено мощность нейтронной вспышки, которая может привести к серьезным радиационным последствиям.

Приведены текущие проблемы обеспечения ядерной безопасности комплекса НБУ-ОУ. Например, в зоне локализации потенциально ЯОС ТСМ эффективный мониторинг ППН обеспечивается всего лишь тремя штатными детекторами СКЯБ, а мониторинг температуры не реализован. В то же время по результатам экспериментальных исследований установлено, что нейтронпоглощающие вещества, растворы которых подаются с верхних отметок НБК-ОУ в шахту реактора, отфильтровываются на маршрутах доступа и не попадают непосредственно внутрь объема этого скопления ТСМ. Согласно экспериментальным данным концентрация гадолиния в зоне локализации потенциально ЯОС ТСМ более чем на 3 порядка ниже, чем гранично необходимо для эффективного контроля уровня подкритичности.

Приведен обзор и анализ официальной документации касательно обеспечения ядерной безопасности на объекте «Укрытие», а также меры по минимизации и/или исключению рисков возникновения СЦР в объеме потенциально ЯОС ТСМ.

ДОСЛІДЖЕННЯ В'ЯЗКОСТІ РУЙНУВАННЯ ОПРОМІНЕНИХ КОРПУСНИХ МАТЕРІАЛІВ В ОБЛАСТІ НАДПРОЕКТНИХ ФЛЮЕНСІВ

М. Г. Голяк, В. М. Ревка, Л. І. Чирко, Ю. В. Чайковський

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

На сьогоднішній день проблема подовження проектного терміну експлуатації корпусів реакторів ВВЕР-1000 є найбільш актуальною, враховуючи, що для деяких енергоблоків АЕС України проектний термін експлуатації добігає кінця і вже розпочато роботи стосовно обґрунтування їх безпечної експлуатації в надпроектний період. Можливість подовження строку експлуатації в великій мірі залежить від ступеню окрихчування матеріалів корпусів реакторів під впливом нейтронного опромінення.

Радіаційне окрихчування корпусних сталей в процесі довготривалого опромінення викликає підвищення критичної температури крихкості та зниження в'язкості руйнування матеріалів, внаслідок чого зростає вірогідність крихкого руйнування корпусу реактора в умовах аварійного розхолодження активної зони реактора. Закономірності окрихчування металу корпусу реактора при опроміненні до проектних флюенсів відносно добре вивчені і не викликають особливого занепокоєння. В той же час з точки зору окрихчування високо-опромінених матеріалів існує ряд відкритих питань, що потребують всебічного вивчення. Одне з них це непряме визначення радіаційного зсуву статичної кривої в'язкості руйнування за допомогою динамічних випробувань зразків Шарпі на ударний вигин, що може призвести до неконсервативної оцінки параметрів в'язкості руйнування опромінених матеріалів.

В рамках 2-го етапу цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «РЕСУРС-2» з використанням сучасної методики реконструкції зразків-свідків з половинок випробуваних зразків типу Шарпі та COD отримані значення референсних температур металів корпусів реакторів ВВЕР-1000 АЕС України при опроміненні до флюенсів швидких ($E \geq 0,5$ MeV) нейтронів, які відповідають флюенсам, накопиченим стінкою корпусу реактора напроти активної зони при експлуатації корпусу протягом не менше 40 років.

Аналіз отриманих результатів показав, що при накопиченні стінкою корпусу реактора надпроектних флюенса швидких ($E \geq 0,5$ MeV) нейтронів відсутня зміна залежності зсуву референсної температури крихкості від флюенса нейтронів, яка добре описується законом $F^{1/3}$. Це підтверджує висновок, зроблений за результатами ударних випробувань, про відсутність в металі корпусів реакторів типу ВВЕР прискороного окрихчування при опроміненні до високих флюенсів швидких нейтронів (так званого "late blooming effect", пов'язаного зі зміною механізму окрихчування).

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ ДІАГНОСТИКИ ДПЗ ЗА ДАНИМИ СВРК

В. В. Горанчук, В. І. Борисенко

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна

На сучасних АЕС вимірюються тисячі технологічних параметрів, відповідно існує задача контролю за станом відповідних датчиків. В даній роботі розглянута можливість діагностики несправного ДПЗ на основі показань решти ДПЗ шляхом застосування нейронних мереж. Задача діагностики несправного ДПЗ зводиться до пошуку розбіжності між фактичним значенням сигналу та очікуваним.

Навчена нейронна мережа, на основі моніторингу вхідної інформації, може з високим ступенем точності передбачити появу дефектів у обладнання і оцінити ступінь його технічного стану.

Нейронна мережа може бути описана за допомогою архітектури та синаптичних ваг. Виділяють три фундаментальних класи архітектури: одношарові мережі прямого розповсюдження, багатшарові мережі прямого розповсюдження, рекурентні мережі [1]. В роботі були розглянуті мережі без прихованих шарів, з одним прихованим шаром та з двома прихованими шарами. З'єднання мережі йдуть від вхідного шару до першого з прихованих (якщо він є), потім до другого (якщо він є), потім – до вихідного. На вхід нейронної мережі подавалися сигнали ДПЗ від 63 КНВ, у якості вихідного сигналу слугував ДПЗ, що перевірявся. Для навчальної вибірки бралася дані СВРК для 26 та 27 кампаній ЗАЕС-5, 27 та 28 кампаній ХАЕС-1, 11 та 12 кампаній ХАЕС-2. Для навчання нейронної мережі було застосовано алгоритм L-BFGS (алгоритм Бройдена - Флетчера - Гольдфарба - Шанно з обмеженим використанням пам'яті), що відноситься до квазіньютонівських методів, а також модифікований метод Левенберга-Марквардта. Алгоритм L-BFGS добре підходить для розв'язання задач великої розмірності, критерієм зупинки слугує малий крок. Алгоритм Левенберга - Марквардта часто виявляється швидшим за L-BFGS і не потребує задачі критеріїв зупинки.

Результати розрахунків показали добру узгодженість між фактичними значенням сигналу ДПЗ та розрахунковим навіть при навчанні на чотирьох тренувальних вибірках.

1. S. Haykin. *Neural networks and learning machines*. Third Edition. McMaster University. (Hamilton, Ontario, Canada, 2009).

ОСОБЛИВОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКО-В'ЯЗКОГО ПЕРЕХОДУ ДЛЯ ПОВТОРНО ОПРОМІНЕНОГО ПІСЛЯ ВІДПАЛУ МЕТАЛУ ЗВАРНОГО ШВА КОРПУСУ РЕАКТОРА ВВЕР-440

Г. П. Гринченко², О. В. Тригубенко^{1,2}, В. М. Ревка¹,
Ю. В. Чайковський¹, Л. І. Чирко¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² ВП «Науково-технічний центр» ДП «НАЕК «Енергоатом», Київ, Україна

Корпуси реакторів (КР) типу ВВЕР-440, включаючи КР енергоблоку № 1 Рівненської АЕС (РАЕС-1), характеризуються підвищеним вмістом фосфору і міді в металі їх зварного шва (ЗШ) № 4, що призводить до високої швидкості радіаційного окрихчування цього матеріалу. У зв'язку з цим продовження терміну служби КР РАЕС-1 було обґрунтовано за умови реалізації відновлювального відпаду ЗШ № 4, який визначає ресурс даного корпусу. Подальша експлуатації енергоблоку вимагала матеріалознавчого супроводу безпечної експлуатації КР та відповідно розробки нової програми зразків-свідків (ЗС).

Попередні дослідження матеріалів КР ВВЕР-440 виявили градієнт за вмістом фосфору у зварному шві, що вимагало врахувати цю обставину у новій програмі та використовувати зразки з різним вмістом фосфору для консервативної оцінки змін, що відбуваються у металі шва під дією нейтронного опромінення. Так, у новій програмі ЗС для енергоблоку РАЕС-1 передбачено 11 груп ЗС металу ЗШ, що мають різний вміст фосфору і міді. Зразки після первинного опромінення були відпалені за таким же режимом, що і зварний шов № 4 КР блоку РАЕС-1, та знову завантажені в реактор на повторне після відпаду опромінення. Зразки розділили на п'ять комплектів, зібраних в гірлянди. Два комплекти ІА-ЛК-3 і ЛК-5 було вивантажено під час третього планового вивантаження і випробувано в Інституті ядерних досліджень НАН України на експериментальному обладнанні лабораторії їх камер. Результати випробувань ЗС, повторно опромінені після відновлювального відпаду, отримано вперше в Україні. Крім того, вони становлять особливий інтерес, оскільки досліджувані метал опромінено до значно більших флюєнсів у порівнянні з попередніми вивантаженнями комплектів ЗС (ІА-ЛК-1, ІА-ЛК-2).

У даній роботі представлено результати випробувань на ударний вигин повторно опромінені зразків Шарпі третього вивантаження для КР РАЕС-1, та визначено температури крихко-в'язкого переходу (ТКВП) згідно з діючими методиками, регламентовані нормами ПНАЕ Г-7-002-86. Результати випробувань показали досить низькі значення енергії руйнування зразків при температурах верхнього шельфу кривої Шарпі. Внаслідок цього було виявлено суттєвий недолік діючої методики визначення ТКВП, що пов'язаний з вибором критеріального рівня для перехідної температури та призводить до переоцінки зсуву ТКВП внаслідок опромінення. У зв'язку цим у роботі за-

пропоновано оцінити ТКВП та її зсув, використовуючи значення критеріального рівня 41 Дж згідно з ASTM E185 [1]. Проведено порівняння двох підходів щодо коректного визначення ТКВП для матеріалів з вкрай низьким рівнем верхнього шельфу кривої Шарпі.

1. ASTM E185-16. Standard Practice for Design of Surveillance Programs for Light-Water Moderated Nuclear Power Reactor Vessels, Annual Book of ASTM Standards, Volume 12.02, 2016.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОНТЕ-КАРЛО КОДА SERPENT ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАЩИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В БЕТОННЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

**В. И. Гулик¹, И. М. Романенко¹, М. И. Голюк²,
А. В. Носовский¹, Т. С. Власенко¹**

¹ *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина*

² *БазальтЭст, Тарту, Эстония*

Разработка новых композитных материалов для атомной энергетики является важным фактором, обеспечивающим как безопасную эксплуатацию существующих АЭС, так и введение в промышленную эксплуатацию перспективных ядерных реакторов. В Институте проблем безопасности АЭС исследуется новый композитный материал на основе сверхтяжелого бетона и базальтовой фибры. Фибробетон с базальтовой фиброй имеет улучшенные механические характеристики (прочность на сжатие и прочность на растяжение при изгибе), а также способствует уменьшению количества и величины микротрещин.

В представленной работе была разработана нейтронно-физическая модель переноса нейтронов в предложенном композитном материале с помощью Монте-Карло кода Serpent. Было выполнено моделирование переноса нейтронов для двух типов бетонов с добавлением различного количества базальтовой фибры. Исследовались характеристики ослабления потока нейтронов от (D,T) источника 14 МэВ нейтронов.

Полученные результаты показали, что добавление базальтовой фибры в бетон не только улучшает его механические свойства и уменьшает количество и величину микротрещин, но и увеличивает его способность к защите от нейтронного излучения. Что позволяет рекомендовать предложенный композитный материал для использования в атомной энергетике и для различных нейтронных источников.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 С ПОМОЩЬЮ МОНТЕ-КАРЛО КОДА SERPENT ДЛЯ НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

В. И. Гулик^{1,2}, В. В. Гальченко¹, И. И. Шлапак¹, Д. В. Будик¹

¹ ЧАО «СНПО “Импульс”», Киев, Украина

² Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина

Дальнейшая успешная эксплуатация АЭС невозможна без надежных и современных систем контроля нейтронно-физических и тепло-гидравлических процессов в активной зоне ядерных реакторов. Важной составляющей безопасной эксплуатации современных ядерных реакторов является моделирование ядерных процессов, происходящих в активной зоне. Для этой цели используются специализированные программы или компьютерные коды. На данный момент существует два основных типа компьютерных кодов: 1) детерминистические коды, которые в своей работе используют решение уравнения переноса нейтронов с помощью различных методов и приближений; 2) стохастические коды, или Монте-Карло коды, которые непосредственно не решают уравнение переноса нейтронов, а основываются на вероятностях многих событий, эти события моделируются для миллионов частиц в заданной геометрии и с использованием заданного материального состава. Методы Монте-Карло очень хорошо подходят для моделирования реакторных систем со сложной структурой и геометрией.

С развитием компьютерных технологий и их вычислительных возможностей, методы Монте-Карло становятся все более популярными для расчета ядерных реакторов. Самым известным Монте-Карло кодом для расчета реакторных и делящихся систем, является код MCNP, который был разработан в Национальной лаборатории США в Лос-Аламосе. В последнее время появилось достаточное количество других Монте-Карло кодов, среди которых код Serpent. Serpent разрабатывается в Финляндии (VTT Technical Research Centre) начиная с 2004 г. На данный момент первая версия этого кода доступна через NEA Data Base, а вторая версия кода распространяется среди пользователей.

В представленной работе была разработана модель активной зоны реактора ВВЭР-1000 со значительной детализацией конструктивных элементов ядерного реактора, а также с точной детализацией всех ТВС в активной зоне. Базовой моделью для данной работы была выбрана 19 загрузка 6-го блока ЗАЭС, в которой находятся сборки ТВСА трех типов. Разработанная трехмерная модель активной зоны реактора ВВЭР-1000 будет использована для подготовки константного обеспечения для отражателей и потвельного распределения энерговыделения, а также для нейтронно-физического моделирования различных состояний активной зоны в проекте национального расчетного комплекса системы внутриреакторного контроля СВРК-М2, которая разрабатывается ЧАО «СНПО “Импульс”».

АНАЛІЗ ЗМІН НЕЙТРОННОЇ АКТИВНОСТІ ПІСЛЯ ПОЧАТКУ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙМЕНТА

А. О. Дорошенко, А. Д. Скорбун, Р. Л. Годун

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль, Україна

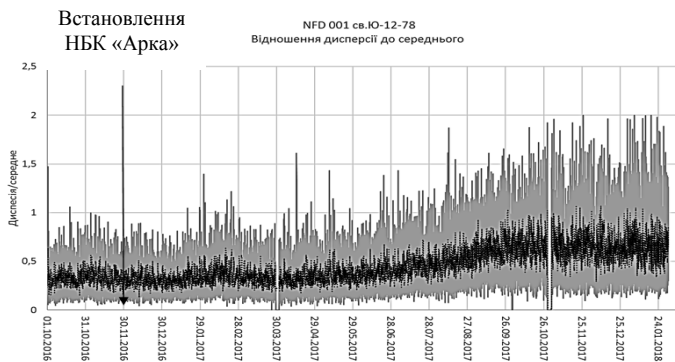
Після початку експлуатації нового безпечного конфаймента «Арка» (НБК «Арка») на ЧАЕС актуальною постала задача контролю змін умов зберігання в об'єкті «Укриття» радіоактивних та матеріалів, що діляться, особливо стосовно ядерної безпеки.

Для контролю за станом нейтронної активності використовується більше десяти детекторів, розташованих у різних точках зруйнованого 4-го енергоблоку. Показання деяких нейтронних детекторів почали помітно зростати після насування НБК «Арка» в проектне положення. Показано, що зміни нейтронної активності спостерігаються переважно у детекторів, які знаходяться в зоні локалізації потенційно ядерно-небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів.

У даній роботі представлено результати статистичного аналізу результатів вимірювань динаміки нейтронної активності, які виконуються штатною системою контролю ядерної безпеки (СКЯБ ІАСК). Виявлено зміни нейтронної активності до і після початку експлуатації нового безпечного конфаймента «Арка».

В основі аналізу – загальновідома ідея методу Фейман- α , що при появі нейронів вимушеного поділу повинна змінюватись статистика нейтронних потоків, характеристикою чого є зростання відношення дисперсії до середнього.

З наведеного рисунка видно, що після встановлення НБК «Арка» спостерігається помітне зростання відношення дисперсії до середнього. Припускається, що у розглянутому випадку можливою причиною такого зростання нейтронної активності є зміна ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів за рахунок зменшення зволоження, в сторону оптимального, скупчень паливовмісних матеріалів. У зв'язку з вищевказаним пропонується переоцінка стану ядерної безпеки об'єкта «Укриття».



Зміна відношення дисперсія/середнє за період до і після встановлення НБК «Арка» в проектне положення.

НАПРАЦЮВАННЯ ^{99}Mo НА ДОСЛІДНИЦЬКОМУ ЯДЕРНОМУ РЕАКТОРІ ВВР-М

**О. П. Жуков, В. М. Макаровський, Ю. П. Малерс,
І. А. Малюк, В. І. Слісенко, В. В. Тришин**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Одним із важливих застосувань експериментальних ядерних реакторів невеликої потужності є напрацювання радіоактивних ізотопів для медицини. Особлива увага приділяється ^{99}Mo , який використовується для створення $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ генераторів, які широко використовуються для діагностики цілого ряду захворювань в онкології, кардіології та неврології. Так, з використанням $^{99\text{m}}\text{Tc}$ у світі проводиться близько 70 % діагностичних процедур в онкології і до 50 % - в кардіології.

Більше 90 % всього ^{99}Mo , який напрацьовується у світі, отримується на ядерних реакторах як продукт поділу збагаченого урану тепловими нейтронами. Однак у зв'язку з проблемою нерозповсюдження ядерних матеріалів актуальною є потреба в налагодженні напрацювання ^{99}Mo активаційним методом за реакцією $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ без використання високозбагаченого урану в якості сировини. Особливо це стосується неядерних країн, які мають дослідницькі ядерні реактори.

В рамках виконання спільних досліджень з ННЦ ХФТІ в ІЯД НАН України було проведено ряд робіт, необхідних для отримання ^{99}Mo заданої питомої активності:

- розрахунок і компоновання активної зони;
- опромінення ампули з порошком MoO_3 на основі природного молібдену;
- визначення активності напрацьованого ^{99}Mo ;
- підготування опроміненої ампули до відправлення до ННЦ ХФТІ.

У процесі роботи були проведені три цикли опромінення, в кожному з яких ампула з порошком природного MoO_3 вагою приблизно 10 г опромінювалась в центрі активної зони впродовж 4-5 годин на потужності реактора 7 МВт. Активність ^{99}Mo на кінець опромінення становила 60, 59 і 47 ГБк.

Було визначено, що при існуючій конфігурації активної зони з паливом збагаченням 19,7 % і потужності реактора 7 МВт швидкість реакції $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$ становила $1,2 \cdot 10^{-10} \text{ c}^{-1}$.

ЩОДО БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МОКРОГО СХОВИЩА ВІДПРАЦЬОВАНОГО ЯДЕРНОГО ПАЛИВА

О. С. Задунай¹, С. І. Азаров²

¹ *Державний науково-дослідний інститут спеціального зв'язку та захисту інформації, Київ, Україна*

² *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

Аварія на АЕС Fukushima-Daiichi (Японія) стала поштовхом для перегляду філософії оцінки безпеки ядерних установок, концентрації зусиль міжнародної

спільноти щодо інтенсивного обміну досвідом та сучасними національними досягненнями у галузі безпечного використання ядерної енергії, підготовки низки фундаментальних конвенцій під егідою МАГАТЕ, на яких сьогодні будується міжнародний режим забезпечення ядерної та радіаційної безпеки.

У зв'язку з цим необхідно якнайшвидше привести у відповідність до міжнародних стандартів діючі в Україні спеціальні правила і норми із забезпечення безпеки сховищ відпрацьованого ядерного палива (СВЯП). Тільки після проведення цих заходів буде можливо здійснити оцінку безпеки експлуатації СВЯП та зробити обґрунтовані висновки щодо можливості подальшого функціонування зазначеного об'єкта.

На Чорнобильській АЕС функціонує комплекс «мокрого» зберігання відпрацьованого ядерного палива СВЯП-1 для реакторних установок РВПК-1000. Основною метою забезпечення безпеки СВЯП-1 є запобігання неконтрольованого розвитку ядерних реакцій і поширення радіації.

Для забезпечення безпечної експлуатації СВЯП-1, сховище повинне відповідати сучасним вимогам нормативних документів з безпеки як при нормальних умовах експлуатації, так і при аварійних ситуаціях.

До цих вимог належать забезпечення:

ядерної безпеки;

прийнятної потужності дози іонізуючого випромінювання на поверхні БВ і біля нього;

допустимої температури оболонок твелів;

герметичності басейну витримки і цілісності його вмісту при статичних і динамічних навантаженнях.

Експлуатація СВЯП-1 пов'язана з можливістю виникнення аварійної ситуації. Причинами аварії можуть бути:

зношення і вироблення встановленого ресурсу обладнання;

корозійні пошкодження;

порушення вимог експлуатації;

помилкові дії персоналу;

зовнішні впливи природного і техногенного походження.

Станом на сьогодні, СВЯП-1 свій термін експлуатації вже практично відпрацювало і на даний час не в повній мірі задовольняє вимогам чинних норм і правил з ядерної та радіаційної безпеки, хоча для компенсації дефіцитів безпеки було вжито низку заходів (модернізовані система вентиляції та система контролю і керування СВЯП-1). За вихідним технічним проектом сховище розраховане на 30 років експлуатації, але завдяки проведенню ремонтних робіт цей термін вдалося продовжити ще на 10 років.

Проведено прогностичні розрахунки і аналіз радіаційних впливів на компоненти навколишнього середовища у процесі експлуатації мокрого сховища відпрацьованого ядерного палива. Показано, що в умовах нормальної експлуатації сховища радіаційні впливи на навколишнє середовище несуттєві. Однак у випадку виникнення аварій можливі тяжкі екологічно небезпечні наслідки.

ОБНОВЛЕННЯ ДАНИХ ПРО ДЖЕРЕЛА НЕЙТРОНІВ ДЛЯ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ MCPV І MCSS

В. В. Ількович, О. В. Гриценко, В. Л. Дем'янін, В. М. Буканов

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Програмні засоби (ПЗ) MCPV і MCSS служать для визначення умов опромінення елементів конструкцій та зразків-свідків реакторів ВВЕР-1000 і ВВЕР-440. За допомогою цих пакетів програм виконується числове моделювання процесу переносу нейтронів у багатогруповому наближенні в тривимірній геометрії методом Монте-Карло.

Параметри елементарних джерел нейтронів для ПЗ MCPV і MCSS, кожен з яких – це частина паливного стовпа твела, визначаються на підставі картограм паливних завантажень та інформації, що міститься у вихідних файлах програм для проведення експлуатаційних нейтронно-фізичних розрахунків.

Одним з необхідних для розрахунків переносу нейтронів параметрів кожного елементарного джерела є вихід нейтронів, який визначається для кожного часового моменту паливної кампанії, на який проводиться розрахунок. Значення виходу нейтронів для даного типу тепловиділяючої збірки обчислюється за формулою:

$$S = q \cdot \sum_m f_m(B),$$

де q – кількість енергії, що виділяється в даному елементарному джерелі нейтронів за одиницю часу в даний часовий момент; f_m – середня кількість нейтронів, які утворюються при виділенні одиниці енергії в результаті поділу ядер m -го ізотопу в даному типі тепловиділяючої збірки, залежно від глибини вигорання B у даному елементарному джерелі в даний часовий момент.

Значення коефіцієнтів $f_m(B)$ для ізотопів ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu і ^{241}Pu з кроком вигорання 1 МВт·сут/кг визначаються за допомогою ПЗ WIMS-D/4 методом імовірностей перших зіткнень в 2-вимірній геометрії в 69-груповому наближенні.

Слід зазначити, що наразі вже доступна нова версія цього ПЗ-WIMSD-5B, але істотних відмінностей ці програми на мають.

Однак, на початку 90-х років за підтримки МАГАТЕ розпочався проект "WIMS-D Library Update Project" з модернізації бібліотек для ПЗ сімейства WIMS-D та для аналогічних кодів розрахунку чарунки реактора. У результаті створено серію бібліотек на основі різних файлів оцінених ядерних даних, остання з яких – на основі ENDF/B-VII.1.

З метою порівняння існуючих значень коефіцієнтів f_m з розрахованими за новими даними, було виконано їхні розрахунки для різних типів тепловиділяючих збірок за допомогою WIMSD-5B та бібліотеки, розробленої на основі ENDF/B-VII.1.

Також у цій роботі переглянуто розрахунок теплової енергії, яка виділя-

ється в одному акті поділу ядер ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu і ^{241}Pu . При цьому було враховано нові рекомендації в файлах оцінених ядерних даних ENDF/B-VII.1 щодо залежності енергії, яка виділяється при поділі ^{235}U , ^{238}U і ^{239}Pu , від енергії налітаючого нейтрона. Відповідно до останніх досліджень, у файлах ENDF/B-VII.1 ці залежності представлені або лінійними, або параболічними функціями. Крім того, додаткову енергію, яка виділяється в результаті активації матеріалів активної зони, було враховано аналогічно до того, як вона враховується в ПЗ WIMSD-5B.

ЗАСТОСУВАННЯ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ПЕРЕВІРКИ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ

Б. В. Кайдик¹, Т. В. Бібік¹, В. І. Гаврилюк², С. С. Драпей²

¹ НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Метою перевірки працездатності системи фізичного захисту, окремих складових системи, зокрема комплексу інженерно-технічних засобів системи, його функціональних груп та окремих технічних засобів є встановлення здатності виконувати ними функції відповідно до технічної, проектної і експлуатаційної документації та вимог чинного законодавства.

Практика показує, що практично неможливо перевірити всі технічні засоби системи фізичного захисту відповідно до програми випробувань передбаченої діючими нормативно-правовими актами. Виникає необхідність щодо розробки та впровадження інших методів при проведенні перевірок працездатності. Нами пропонується застосовувати статистичний метод перевірки. За допомогою статистичних методів, котрі використовуються в сфері обліку та контролю ядерного матеріалу та показали себе досить ефективними, можна спланувати обсяг і послідовність вибірки на перевірку працездатності окремих елементів системи фізичного захисту та достовірно стверджувати про характеристику всієї сукупності.

У цій роботі за статистичною методикою проводилися випробування вібраційних засобів виявлення, котрі встановлені на Навчально-тренувальному майданчику «Комплекс інженерно-технічних засобів системи фізичного захисту» Навчального центра ІЯД НАН України, у якості статистичного методу використовувався гіпергеометричний розподіл, в якому ми допускали наявність одного непрацездатного елементу.

$$P(k = 0, N, d, n) + P(k = 1, N, d, n) \leq \left(1 - \frac{n}{N}\right)^d + \left(\frac{dn}{N - d + 1}\right)\left(1 - \frac{n}{N}\right)^{d-1}$$

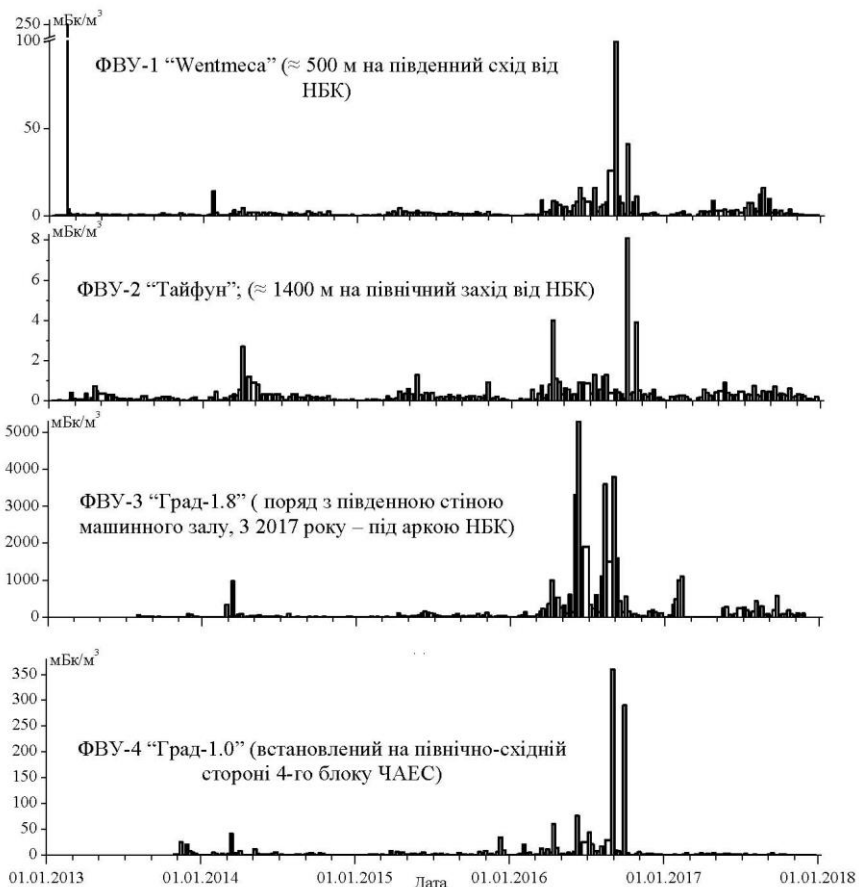
Під час випробувань імітувалися спроби ймовірного правопорушника подолати огороження. Сигнали від вібраційних засобів виявлення реєструвалися на центральному пульсі фізичного захисту. Після серії експериментів з подолання огороження були отримані результати, що допускають використання статистичного методу при перевірці інженерно-технічних засобів системи фізичного захисту. Проте з метою отримання однозначних результатів ми плануємо проведення подальших досліджень.

ВПЛИВ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТА НА РАДІОАКТИВНІ АЕРОЗОЛІ В БЛИЖНІЙ ЗОНІ ЧАЕС

В. О. Кашпур, О. А. Свирид, Г. Г. Скоряк, В. К. Шинкаренко

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль, Україна

Наведені дані про стан забруднення радіоактивними аерозолями приземного шару атмосфери ближньої зони ЧАЕС до, під час та після будівництва нового безпечного конфайнменту. Після введення НБК в експлуатацію спостерігається зменшення рівня забруднення приземного шару повітря на прилеглий території. В той же час питома активність повітря під накриттям НБК залишається досить високою, що пов'язано з проведенням певного обсягу робіт.



Динаміка об'ємної активності ^{137}Cs
в приземному шарі повітря поблизу об'єкта "Укриття".

МІЖНАРОДНІ ГАРАНТІЇ ЯДЕРНОЇ БЕЗПЕКИ УКРАЇНИ: ПРОБЛЕМИ РЕАЛІЗАЦІЇ

Р. О. Коцюба

Інститут законодавства Верховної Ради України, Київ, Україна

Розвиток подій у світі засвідчує зростання уваги до забезпечення міжнародної безпеки та дотримання гарантій безпеки на національному рівні. З метою привернення уваги міжнародного товариства до нових аспектів використання ядерної енергії, визначення місця і ролі ядерної енергетики у майбутньому, здійснення оцінки правових наслідків відмови України від ядерної зброї, що призвело до порушення ряду міжнародних та національних вимог, необхідності перегляду взятих Україною міжнародних зобов'язань (у т.ч. права на збагачення урану), які виступають гарантіями ядерної безпеки, автор пропонує проект звернення до МАГАТЕ як спеціального органу ООН та залучення його до врегулювання конфлікту між Україною та РФ в частині виконання гарантій ядерної безпеки, визнання порушення РФ режиму нерозповсюдження на території України. Це передбачає, зокрема, звернення до РБ ООН із пропозицією про прийняття резолюції щодо порушення режиму нерозповсюдження на території АР Крим.

Необхідність залучення МАГАТЕ в укріплення ядерної безпеки України обумовлене такими факторами: Україна приєдналася до ДНЯЗ як неядерна держава з метою підтримання та зміцнення режиму ядерного нерозповсюдження; частина її території залишилася без контролю зі сторони України, що ставить під сумнів мирне використання ядерної енергії; необхідності визнання порушення режиму ядерного нерозповсюдження РФ перед світовим співтовариством державами-членами ООН, визнання її учасником спору та вжиття відповідних заходів (зокрема, застосування принципу „обов'язку захистити”); потребою у наданні висновку стосовно окупації АР Крим ядерною державою РФ, що порушує вимоги ДНЯЗ та ставить під загрозу найвищі інтереси розумінні Статті X ДНЯЗ.

Виходячи із того, що Агентству притаманне «*прагнення досягти більш швидкого і широкого використання атомної енергії для підтримання миру, здоров'я і добробуту в усьому світі. В міру можливості Агентство забезпечує, щоб допомога, яка надається ним, або на його вимогу, або під його наглядом чи контролем не була використана так, щоб сприяти якій-небудь воєнній меті*», а також необхідності вирішення проблем забезпечення ядерної безпеки України автор пропонує у науковій моделі проекту Резолюції ГА ООН щодо звернення до МАГАТЕ передбачити насамперед такі правові положення:

Згідно зі Статтею II Статуту під час виконання своїх функцій Агентство:

«1) проводить свою діяльність відповідно до цілей і принципів Організації Об'єднаних Націй, спрямованими на зміцнення миру і заохочення міжнарод-

ного співробітництва, і згідно з проводжуваною Організацією Об'єднаних сприяння встановленню зумовленого гарантіями роззброєння в усьому світі і згідно з будь-якими міжнародними угодами, укладеними відповідно до такої політики;

...4) подає щорічні доповіді про свою діяльність Генеральній Асамблеї Організації Об'єднаних Націй і, у разі потреби – Раді Безпеки. Коли у зв'язку з діяльністю Агентства виникають питання, що входять у компетенцію Ради Безпеки, Агентство повідомляє про це Раду Безпеки, як орган, на який покладена головна відповідальність за підтримання міжнародного миру і безпеки, а також може вжити заходів, на які воно уповноважене в силу цього Статуту, включаючи заходи, передбачені у пункті С статті XII».

Одним із можливих заходів забезпечення реалізації міжнародних гарантій ядерної безпеки України є організація скликання Конференції Учасників Договору нерозповсюдження ядерної зброї.

ЗАСТОСУВАННЯ ЗБІДНЕНОГО УРАНУ, ЯК ЗАХИСНОГО МАТЕРІАЛУ ПРИ ЗБЕРІГАННІ РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ В КОНТЕЙНЕРАХ

С. В. Купріянчук

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль, Україна

Питання зберігання РАВ на території ЧЗВ є актуальним, оскільки на даній території, в пунктах тимчасової локалізації радіоактивних відходів та території ЧАЕС накопилась велика кількість таких речовин. При вільному знаходженні РАВ в навколишньому середовищі, вони мажуть вносити значний внесок у погіршення радіаційної обстановки та навколишнього середовища, тому створення контейнерів для високоактивних відходів є актуальною.

Для зберігання високоактивних відходів використовуються контейнери типу КТЗВ-0,2 з різними типами пакувальних комплектів: захисного контейнеру КТЗВ-0,2 поміщеного в нього первинного контейнера(ПК) об'ємом 200 л всередину якого поміщений додатковий ПК об'ємом 100 або 40 л. Навколо 100- и 40-літрових ПК можливе розміщення «вставок» - додаткового захисного шару зі свинцю.

У даній роботі розглянуто можливість застосування пластин з збідненого урану, як альтернатива свинцевим пластинам.

При максимальній активності (до $3,4E + 14$ Бк) в пакувальному комплекті з 40-літровою бочки та додатковим свинцевим захистом – 57,6 мм потужність дози на боковій поверхні контейнеру КТЗВ-0,2 становить $5,88E - 07$ мЗв/год. При використанні збідненого урану, як захисного додаткового захисного шару, потужність дози на боковій поверхні зменшується в 2,5 раза.

У роботі проведено серії розрахунків з повною активністю незалежно для двох ізотопів (Cs-137 та Co-60). Проведено аналіз захисних властивостей для свинцю та збідненого урану.

1. В.Г. Батий и др. Оценка максимсально допустимой активности упаковок. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля 9 (2008) 33.
2. И.Н. Бекман. Ядерная физика. Курс лекций (Москва, МГУ, 2010).
3. *Справочник химика*. Т. 2. Основные свойства неорганических и органических соединений. 3-е изд. Под ред. Б.П. Никольского. (Ленинград, Химия, 1971).

ВПЛИВ РОЗМІРУ ЗЕРНА ФЕРИТНОЇ СТАЛІ SUH 409L НА ТЕМПЕРАТУРУ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОЯВУ РІДКОМЕТАЛЕВОГО ОКРИХЧЕННЯ ПІД ДІЄЮ РОЗПЛАВУ СВИНЦЮ

I. С. Кухар, В. М. Федірко, Х. Р. Мельник

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів, Україна

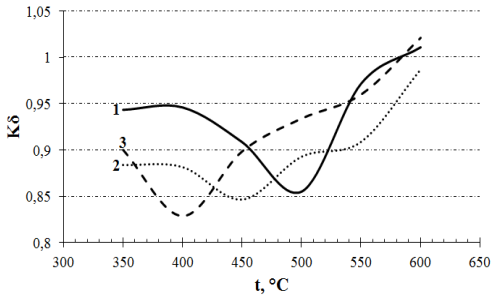
Проектна та експериментальна розробка економічних та екологічно чистих ядерних енергетичних установок нового покоління з підвищеною безпекою передбачає рідкометалеву систему охолодження [1]. Розплави важких металів (Pb, Bi та їхня евтектична суміш Pb-Bi) завдяки своїм ядерним і теплофізичними властивостями є кандидатними охолоджувальними середовищами для реакторів такого типу.

У процесі експлуатації є імовірність негативного впливу розплавів важких металів на механічні властивості конструкційних матеріалів [2]. Однією з причин погіршення механічних характеристик є явище рідкометалевого окрихчення, яке є наслідком зниження поверхневої енергії твердого металу та інших складних процесів при взаємодії з рідким за певних температурних умов.

Метою досліджень було встановити закономірності впливу розміру зерна на механічні властивості сталі феритного класу (Fe-¹¹Cr) у середовищі вакууму та розплаву свинцю в інтервалі температур 350 ... 600 °С. Для отримання різного розміру зерна феритна сталь була піддана термічній обробці (ТО1: 1100 °С, 1 год, вода; ТО2: 1100 °С, 2 год, повітря; ТО3: 1100 °С, 2 год, піч), в результаті було сформовано відповідно три розміри зерна: 35 ... 40 мкм, 40 ... 50 мкм і 60 ... 80 мкм.

Виявлено, що зі збільшенням розміру зерна пластичність знижується як і у вакуумі так і у свинці. Проте рідкометалеве середовище посилює ефект зниження пластичності порівняно з вакуумом. За допомогою коефіцієнта впливу середовища K_d , було виявлено, що зі збільшенням розміру зерна температура прояву рідкометалевого окрихчування зсувається в зону нижчих температур.

Таким чином, збільшення розміру зерна сталі феритного класу веде до зниження механічних характеристик у досліджуваному температурному інтервалі для обох середовищ. Температура максимального прояву ефекту рідкометалевого окрихчення зміщується в зону нижчих температур зі збільшенням розміру зерна з 35 до 80 мкм.



Зміна коефіцієнта впливу середовища на відносне видовження сталі SUN 409L від температури: 1 – 35...40 мкм; 2 – 40...50 мкм; 3 – 60...80 мкм

$$K_{\delta} = \frac{\delta_{\text{сер.}}}{\delta_{\text{вак.}}}$$
; де K_{δ} – коефіцієнт впливу середовища; $\delta_{\text{сер.}}$ – відносне видовження у свинці; $\delta_{\text{вак.}}$ – відносне видовження в аргоні.

1. Comparative assessment of thermophysical and thermohydraulic characteristics of lead, lead-bismuth and sodium coolants for fast reactors. IAEA-TECDOC-1289. (Vienna, 2002).
2. О.І. Яськів, В.М. Федірко, І.С. Кухар. Вплив структурного стану сталей на механічні властивості в кисневмісному свинці. Проблеми атомної науки та техніки (Вопросы атомной науки та техники) 4 (2016) 32.

ЯДЕРНО-ОПАСНЫЕ СКОПЛЕНИЯ В БАЛАНСЕ АВАРИЙНОГО ТОПЛИВА, ЛОКАЛИЗОВАННОГО ВНУТРИ НБК-ОУ ЧАЭС В СОСТАВЕ ТОПЛИВОСОДЕРЖАЩИХ МАСС

А. В. Михайлов

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Чернобыль, Украина

Многолетние исследования внутри разрушенного 4-го энергоблока ЧАЭС позволили установить наличие в подаппаратном помещении 305/2 скоплений топливосодержащих масс, представляющих ядерную опасность (ЯОС ТСМ) [1]. Основанием для таких суждений явились данные расчетов, которые продемонстрировали существование в зоне их локализации условий для реализации самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР). Границы ЯОС были оценены по результатам систематизации данных измерений температуры, плотности потока нейтронов (ППН) и мощности экспозиционной дозы (МЭД) гамма-излучения. На основе численного анализа и расчетов были изучены основные характерные особенности возникновения и развития СЦР в объеме ЯОС, а также ее основные свойства для ряда типично возможных режимов ее протекания [2].

Долгое время вопрос о количестве топлива, которое осталось в пределах энергоблока, являлся предметом достаточно острой дискуссии. Согласно современным данным внутри нового безопасного конфайнмента - Объекте «Укрытие» (НБК - ОУ) ЧАЭС локализовано от 125 до 150 т урана. А отработавшее топливо - это не только материальный, но и доминирующий энерге-

тический источник образования во время аварии основного конечного продукта высокотемпературного взаимодействия фрагментов разрушенной активной зоны (ФАЗ) реактора с окружающими материалами – лавообразных ТСМ (ЛТСМ) [3].

Обнаружение ТСМ с высоким содержанием топлива (выше 50 масс. % U), скрытых в местах глубокого проплавления бетона подреакторной плиты, потребовало внести изменения в ранее предложенные сценарии, которые не допускали условий их образования. Для модели аварийных процессов в шахте реактора, построенной на аналогии с расходом шихтовых материалов из ФАЗ в объеме одноразовой загрузки доменной печи, нами была разработана новая версия сценария и сведен материально-энергетический баланс в рамках его реализации [3]. Временные, температурные и материальные параметры модели процессов образования потоков ТСМ с различным обеднением по цезию были синхронизированы с динамикой выброса продуктов деления (ПД) на активной стадии аварии по данным современной реконструкции.

В соответствии с полученными в работе результатами масса аварийного топлива, которое явилось источником эмиссии газообразных ПД в окружающую среду и вошло в состав различных ТСМ в результате высокотемпературного взаимодействия с конструкционными материалами в подреакторном пространстве, оценивается в 103 ± 17 т (91 т U). Масса урана в составе ЯОС ТСМ, локализованных в зоне глубокого проплавления бетона ПП, может составлять 18 ± 5 т урана.

1. В.О. Краснов, А.В. Носовський, В.М. Рудько, В.М. Щербін. *Об'єкт «Укриття»: 30 років після аварії.* (Чернобыль, НАН України. Ін-т проблем безпеки АЕС, 2016) 512 с.
2. В.А. Бабенко, В.Н. Павлович. Изучение возможности возникновения, развития и свойств самоподдерживающейся цепной реакции ядерной реакции в топливосодержащих массах Объекта «Укрытие». *Ядерная физика та енергетика* 18(3) (2017) 254.
3. А.В. Михайлов. К вопросу о материальных и энергетических источниках образования топливосодержащих материалов во время аварии на 4-м блоке ЧАЭС. *Ядерная физика та енергетика* 17(4) (2016) 354.

ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ФОРМУВАННЯ СИГНАЛУ ДПЗ У КОДАХ SERPENT ТА MCNP

Ю. Ф. Піонтковський¹, В. І. Борисенко²

¹ *Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна*

² *Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна*

Контроль нейтронно-фізичних параметрів реакторної установки ВВЕР-1000 забезпечується системою внутрішньореакторного контролю (СВРК) [1]. В

склад даної системи входять детектори прямого заряду (ДПЗ), по сигналам яких відновлюється енерговиділення в активній зоні. Нейтронно чутливим елементом детектора є родієвий емітер на ядрах якого відбувається реакція радіаційного захвату з подальшою емісією електронів, що утворюють заряд на колекторі. Величина заряду пропорційна лінійному енерговиділенню твелів [2].

Оскільки ДПЗ встановлюється в 64 збірки, для дослідження розподілу енерговиділення по об'єму АЗ ректора, потрібно розуміти його локальну чутливість (розмір зони, межах якої утворюються нейтрони, що дають внесок у сигнал детектора) та як впливають фізичні параметри активної зони на формування сигналу.

У роботі представлено порівняння результатів числового моделювання в Монте-Карло кодах MCNP та SERPENT, елементу активної зони для визначення по-твельного внеску в сигнал ДПЗ. Результати отримані в даних кодах добре узгоджуються, і показують що внесок у сигнал ДПЗ переважно формуватиметься твелами ТВЗ в центральний канал якої встановлено детектор. Цей внесок у сигнал становить 70 - 75 % залежно від параметрів теплоносія (температура, концентрація борного поглинача).

1. В.А. Брагин, И.В. Батенин, М.Н. Голованов. *Системы внутриреакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР* (Москва: Энергоатомиздат, 1987).
2. С.А. Цимбалов. Характеристики родиевого детектора нейтронов ДПЗ-1М. Препринт ИАЭ-3899/4 (Москва, 1984).

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБЛУЧЕНИЯ ОБРАЗЦОВ-СВИДЕТЕЛЕЙ В РЕАКТОРЕ ВВЭР-440 ЭНЕРГОБЛОКА № 1 РИВНЕНСКОЙ АЭС

С. М. Пугач, В. Н. Буканов, А. В. Гриценко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Одним из основных условий обеспечения надежной и безопасной эксплуатации реактора типа ВВЭР-440 является осуществление контроля за состоянием металла его корпуса в течение всего срока эксплуатации. Контроль изменения механических свойств материала корпуса реактора (КР) в процессе эксплуатации осуществляется с помощью программы образцов-свидетелей (ОС).

Перенос результатов испытаний ОС на КР с целью определения текущего и прогнозирования изменения состояния металла КР должен выполняться с учетом различия условий облучения ОС и внутренней поверхности КР.

Определение функционалов нейтронного потока, характеризующих условия облучения ОС и внутренней поверхности КР для реакторов типа ВВЭР-440 выполняется путем проведения расчетов переноса нейтронов. Специалистами Отдела проблем дозиметрии ядерных реакторов ИЯИ НАН Украины для этой цели используется пакет программ MСРV собственной разработки,

основанный на методе Монте-Карло.

Используя указанный пакет программ и расчетную модель реакторной установки энергоблока № 1 Ривненской АЭС, детально описывающую его конструктивные особенности, были выполнены расчеты переноса нейтронов для всех топливных кампаний, в течение которых облучались исследуемые комплекты ОС.

Полученные в результате указанных расчетов данные позволили провести исследования условий облучения ОС и внутренней поверхности КР реактора энергоблока № 1 Ривненской АЭС для всех топливных кампаний, в течение которых облучались исследуемые комплекты ОС.

Анализ полученных результатов, в частности, показал, что ОС в реакторе энергоблока № 1 Ривненской АЭС облучаются с опережением в ~15 раз по отношению к внутренней поверхности КР.

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ СВЕРХТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ И БАЗАЛЬТОВОЙ ФИБРЫ ДЛЯ РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ

**И. М. Романенко¹, М. И. Голюк², А. В. Носовский¹,
Т. С. Власенко¹, В. И. Гулик¹**

¹ *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина*

² *БазальтЭст, Тарту, Эстония*

В представленной работе исследовался новый композитный материал на основе сверхтяжелых бетонов армированных базальтовой фиброй для радиационной защиты от гамма-излучения. Были использованы два типа бетона: бетон с обычным щебнем и бетон с баритом (сульфат бария).

Выполнено моделирование прохождения гамма-излучения с помощью кода WinXCom. С помощью этого кода были рассчитаны основные характеристики ослабления гамма-излучения в веществе: средний атомный номер Z , средняя атомная масса A , среднее значение $Z_{p1,eff}$ для энергетического спектра от 1 кеВ до 100 ГеВ, минимальные и максимальные значения $Z_{p1,eff}$ в заданном интервале энергий, а также максимальные и минимальные значения эффективной электронной плотности (N_{eff}^{max} и N_{eff}^{min}).

Из полученных результатов видно, что защитные свойства бетона с баритовым агрегатом лучше, чем бетона с обычным щебнем. Это объясняется большей плотностью и большим атомным номером агрегата в бетоне с баритом. В результате добавления базальтовой фибры в оба вида бетона есть

улучшения, хотя и незначительные, основных характеристик ослабления гамма-излучения в веществе: средняя атомная масса, средний атомный номер, эффективный атомный номер и средняя плотность электронов.

Полученные результаты показали, что добавление базальтовой фибры в бетон не только улучшает его механические свойства и уменьшает количество и величину микротрещин, но и увеличивает его способность к защите от гамма-излучения. Для значительного увеличения параметров ослабления гамма-излучения в фибробетон необходимо добавлять тяжелый агрегат, например, барит.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ФЛУКТУАЦІЙ ТЕМПЕРАТУР У ПЕТЛЯХ ПЕРШОГО КОНТУРУ ВВЕР-1000

А. Д. Скорбун¹, С. М. Стадник¹, В. Г. Котеленець²

¹ Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль, Україна

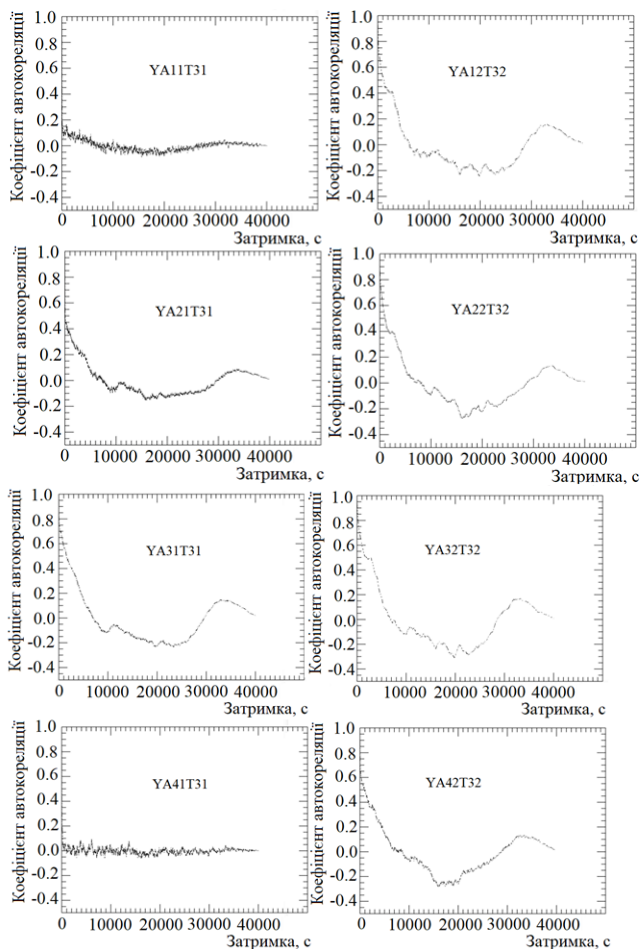
² Відокремлений підрозділ «Южно-Українська АЕС»

Державного підприємства «НАЕК «Енергоатом», Южноукраїнськ, Україна

Результатом роботи штатних систем контролю за станом обладнання атомних електростанцій є довготривалі часові ради даних. З метою пошуку статистичних параметрів, якими можна характеризувати стан роботи тих чи інших систем, було проаналізовано флуктуації сигналів термометрів опору чотирьох петель першого циркуляційного контуру реакторної установки ВВЕР-1000 при стаціонарному режимі роботи. Показано що всі дані мають ознаки гіпервипадковості, що означає неможливість застосування до їхнього аналізу стандартних підходів математичної статистики. За допомогою вейвлет-аналізу показано існування періодичних процесів у проаналізованих флуктуаціях сигналів, а також можливість виявляти прояви впливу на них інших підсистем першого контуру. Таким чином виявлено, що статистичні характеристики флуктуацій температури відповідних петель мають свої особливості, що також проявляється на графіках коефіцієнтів автокореляцій для YA11(21,31,41)T31 - температура теплоносія на виході з реактора головного циркуляційного контуру перша (друга, третя, четверта) петля;

YA12(22,32,42)T32 - температура теплоносія на вході в реактор головного циркуляційного контуру перша (друга, третя, четверта) петля.

З графіків видно, що коефіцієнти автокореляції сигналів на вході першої та четвертої петель принципово відрізняються від інших, що є характеристикою наявності впливу інших підсистем і демонстрацією відмінностей у динаміці відповідних петель. Аналогічний висновок можна зробити з аналізу Фур'є.



ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИСТОЧНИКА РАДИОАКТИВНЫХ ВЫБРОСОВ ПО ДАННЫМ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА С ПОМОЩЬЮ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Н. Н. Талерко, Д. В. Жигинас, А. Г. Кузьменко

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина

Проведено решение обратной задачи атмосферного переноса радионуклидов с целью оценки параметров источника выбросов, а также уточнения метеорологических условий в период их распространения, с использованием фильтра Калмана. Преимуществом использованного метода является возможность его применения на входном потоке зашумленных данных для полу-

чения статистически оптимальной оценки состояния системы. В качестве исходного набора данных для решения обратной задачи использованы измерения мощности экспозиционной дозы, проведенные в различных частях г. Припять в первые дни Чернобыльской аварии, включающие 485 измерений в 31 точке города. С помощью гауссовой модели струи выполнено моделирование распространения радиоактивных выбросов из аварийного блока ЧАЭС с 26 по 29 апреля 1986 г. в направлении г. Припять с шагом по времени 30 минут. При заданном соотношении основных гамма-излучающих нуклидов в выбросе рассчитана временная динамика их объемной и поверхностной активности, а также мощности экспозиционной дозы, определяемой воздушной компонентой и выпадениями, в каждом пункте измерений.

Метод расширенного фильтра Калмана (the extended Kalman filter) применен для решения двухмерной задачи обратного переноса (восстановление интенсивности радиоактивного выброса из аварийного блока, а также уточнение направления скорости ветра как функций времени) при заданной эффективной высоте выброса. Получено, что сходимость метода существенно зависит от качества исходных данных измерений МЭД, а также выбора начальных значений итерационного процесса расчетов по методу фильтра Калмана. Исследованы области сходимости метода в широком диапазоне значений начальных оценок интенсивности выброса и направления переноса, и показано, что по мере накопления радиоактивных выпадений на поверхности земли в течение рассматриваемого периода сходимость стандартного метода фильтра Калмана может ухудшаться. Предложена модификация алгоритма для улучшения сходимости при сильно зашумленных данных, позволяющая добиться сходимости метода при большой неопределенности первоначальной оценки параметров источника.

Показана возможность применения метода фильтра Калмана для решения трехмерной обратной задачи атмосферного переноса радионуклидов, включающей восстановление также третьего параметра – эффективной высоты источника.

Оценка суточных выбросов ^{137}Cs из 4-го блока ЧАЭС, полученная с помощью метода, составила 5.6 ПБк для 27 апреля, 5.1 ПБк для 28 апреля и 4.5 ПБк для 29 апреля 1986 г., что составляет соответственно 83, 88 и 102 % от общепринятых оценок. Для 26 апреля оценка выброса получена заниженной и равной 2.8 ПБк (14 %), что объясняется переносом радиоактивного выброса в первый день аварии преимущественно в других направлениях и относительно слабым влиянием на радиационную обстановку в Припяти.

Проведено сравнение результатов восстановления параметров Чернобыльского источника с аналогичными результатами, полученными ранее с помощью метода минимакса. Сделан вывод, что алгоритм, основанный на использовании фильтра Калмана, может быть использован в компьютерных системах поддержки принятия решений при радиационных авариях на АЭС для восстановления параметров источника аварийного выброса с использованием данных измерений имеющихся систем АСКРО.

ПРИМЕНЕНИЕ РАСЧЕТНОГО КОДА SERPENT ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ КИОТСКОГО УНИВЕРСИТЕТА KUCA

А. Р. Трофименко^{1,2}, А. В. Носовский², В. И. Гулик²

¹ *Теплоэнергетический факультет НТУУ «КПИ им. Игоря Сикорского»,
Киев, Украина*

² *Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина*

В рамках представленной работы был выполнен анализ экспериментов с подкритической системой Киотского университета KUCA. Была смоделирована с помощью расчетного кода Serpent [1] (далее SE) подкритическая система Киотского университета, известная как KUCA в сотрудничестве с Kyoto University, Research Reactor Institute (KURRI). Также было проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными KUCA [2, 3] (далее EXP), а также с результатами расчета с помощью расчетных кодов MCNP6 (далее MC), KENO-VI (далее KE) полученными в Bariloche Atomic Centre, Argentina [4].

В таблице представлена разница между рассчитанными и экспериментальными уровнями реактивности для трех состояний указанной системы (CRIT, EXC, SUB), которые определяются положением регулирующих стержней согласно источникам [2,3,4], а также для четырех случаев компоновки активной зоны подкритической системы KUCA (CASE I-1 – I-4).

Case		1, Excess %DK/K	1, Subcriticality %DK/K	2, Criticality %DK/K
I-1	EXP-MC	-0,434	-0,515	-0,423
	EXP-KE	0,325	0,137	0,298
	EXP-SE	-0,537	-0,686	-0,511
	MC-SE	-0,103	-0,171	-0,088
I-2	EXP-MC	-0,386	-0,498	-0,386
	EXP-KE	-	-	0,332
	EXP-SE	-0,540	-0,645	-0,471
	MC-SE	-0,154	-0,147	-0,085
I-3	EXP-MC	-0,372	-0,503	-0,341
	EXP-KE	-	-	0,200
	EXP-SE	-0,491	-0,603	-0,487
	MC-SE	-0,119	-0,100	-0,146
I-4	EXP-MC	-0,417	-0,512	-0,419
	EXP-KE	-	-	0,249
	EXP-SE	-0,422	-0,687	-0,525
	MC-SE	-0,005	-0,175	-0,106

Результаты, рассчитанные с помощью SE превышают EXP на 0,4 - 0,7 % DK/K.

Результаты, рассчитанные с помощью SE превышают результаты рассчитанные с помощью MC на 0,005 - 0,2 % DK/K.

1. J. Leppänen et al. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. Ann. Nucl. Energy 82 (2015) 142.
2. Cheol Ho Pyeon (Ed.). Experimental Benchmarks for Accelerator-Driven System (ADS) at Kyoto University Critical Assembly, KURRI-TR-444, ISSN 0287-9808, Research Reactor Institute. Kyoto University, Japan, December 2012.
3. Cheol Ho Pyeon (Ed.). Experimental Benchmarks on Thorium-Loaded Accelerator-Driven System at Kyoto University Critical Assembly, KURRI-TR (CD) - 48, ISSN 1349-7960, Research Reactor Institute. Kyoto University, Japan, January 2015.
4. Francisco Leszczynski. Analysis of KUCA experiments. Centro Atómico Bariloche, Argentina, March 2017.

ПОРІВНЯННЯ СТОХАСТИЧНОГО ТА НЕЧІТКОГО МЕТОДІВ ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ АЕС

О. М. Харабет, О. Є. Зотєєв, О. О. Чулкін, В. О. Зотєєв

Одеський Національний політехнічний університет, Одеса, Україна

Практика АЕС потребує надійного прогнозування стану обладнання у міжремонтні періоди. Цей прогноз можливо виконати тільки тоді, коли процес появи відмови чи аварії буде розглядатися як невизначений.

Як відомо, першим методом розкриття невизначеності був метод теорії ймовірностей. Спираючись на поняття відмови діючого обладнання, яке було приведено до дії в момент часу $t_1=0$ як дієздатне, та з часом прийшло до стану «відмова», як недієздатне в момент $t_2=T$, ми маємо можливість задіяти таке поняття, як «час напрацювання до відмови».

Але в практиці існує також така складна міра якості обладнання, як надійність. За визначенням, надійність є здатністю технічної системи зберігати у часі всі характеристики та параметри, які є необхідними для виконання системою бажаних функцій.

Складовими надійності є наступні показники: безвідмовність, ремонтпридатність, тривалість використання, тривалість зберігання. Можна зазначити, що стохастичний підхід забезпечує досить точну оцінку надійності схем, якщо надійність елементів добре визначена. Цей підхід також є придатним для того, щоб визначити, як застосування схем паралельного поєднання недосить надійних елементів підвищує надійність схеми у цілому. Також відомо, що більш складні обставини, пов'язані з наявністю комплексу над-

складних систем на АЕС, потребують не тільки зусиль спеціалістів дуже високої кваліфікації, але й значного ресурсу коштів і часу.

Доцільність застосування нечіткого підходу для оцінки надійності обладнання пояснюється тим, що при стохастичному аналізі цілий комплекс показників надійності випадає з розгляду. Користуючись можливостями засобів fuzzy logic, введемо до розгляду такі складові надійності, які були вказані на початку даних тез:

ремонтпридатність. Ремонтпридатна система повинна складатися з елементів, які мають високу надійність, є поширеними настільки, що їх можна тримати на складі або вільно купувати для того, щоб задіяти при заміні таких елементів, які відмовили;

наявність структурних комбінацій схем для забезпечення резервування недосить надійних елементів;

надійність з'єднань елементів між собою, наявність фіксації елементів та з'єднань шляхом пайки або зварювання, надійність засобів розділу середовищ (прокладок, сальники та таке інше);

ознаки доглянутості обладнання, наявність люфтів, вібрацій тощо.

Далі ми представляємо спрощену структуру, лінгвістичні змінні входу та виходу, кількість та форму термів для зручного конструювання експертної системи, яка має визначати надійність обладнання. Дія бази правил містить сентенції типу: «Якщо уніфікація елементів є 1.3, та структурні комбінації є 0.336, та стан поєднань є 2.35, та доглянутість є 0.238, то надійність становить 0.545».

Висновки. При розгляді питань надійності нечітка система дає можливість реально вводити до розгляду такі принципово невизначені ознаки, як: ремонтпридатність; безвідмовність; стан доглянутості обладнання (стан поєднань, сальників, прокладок); термін зберігання. Нечітка система має більшу наочність, ніж стохастична програма, тому що в ній експерти мають можливість візуального контролю за тим, що відбувається з обладнанням, а велика кількість важливих ознак згортається в єдину оцінку надійності.

НОВА ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗРАЗКІВ З ОПРОМІНЕНИХ ЗАГОТОВОК ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ НА РОЗТЯГ

Ю. В. Чайковський, В. М. Ревка, Л. І. Чирко, О. В. Шкапяк

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Безпечна експлуатація енергоблоку ВВЕР визначається в першу чергу цілісністю корпусу реактора (КР) при всіх режимах роботи, включаючи аварійні ситуації. Продовження терміну служби енергоблоку № 1 Рівненської АЕС (РАЕС-1) на понадпроектний період було обґрунтовано за умови проведення відновлювального відпалу зварного шва № 4, що визначає радіаційний ресурс КР. Для контролю металу корпусу реактора після відпалу була розроблена і

впроваджена нова програма зразків-свідків (ЗС).

У рамках нової програми передбачено п'ять комплектів ЗС (умовне позначення комплектів 1А-ЛК-1 ÷ 1А-ЛК-3, ЛК-4 і ЛК-5). Всі опромінювані комплекти призначені для контролю впливу повторного після відпалу опромінення на механічні властивості металу корпусу реактора в процесі експлуатації. Для оцінки змін механічних властивостей (міцності і пластичності), а також критичної температури крихкості внаслідок опромінення передбачені зразки для випробувань на розтяг і ударний вигин.

На відміну від штатної програми ЗС для енергоблоку РАЕС-1, в новій програмі замість стандартних зразків в контейнерах опромінюються циліндричні заготовки для подальшого виготовлення зразків на розтяг і вставки у вигляді прямокутних брусків для реконструкції зразків Шарпі. З цієї причини для проведення випробувань попередньо необхідно реконструювати зразки Шарпі із застосуванням відповідної технології, а також виготовити циліндричні зразки на розтяг, використовуючи дистанційне обладнання.

З цією метою був розроблений спеціальний токарний верстат з дистанційним управлінням, який виготовлений стороннім підприємством. У роботі представлена інформація по розробці нової технології виготовлення циліндричних зразків на розтяг з опромінених циліндричних заготовок зразків-свідків комплектів 1А-ЛК-3 і ЛК-5 корпусу реактора енергоблоку № 1 ВП РАЕС. Наведено технічні характеристики основного устаткування (токарного верстата з дистанційним управлінням), його принцип дії і складові компоненти. Розглянуто процедуру виготовлення контрольних зразків для апробації нової технології. Проведено випробування на розтяг контрольних зразків металу КР енергоблоку РАЕС-1, виготовлених за допомогою нового дистанційного обладнання. Результати випробувань свідчать про коректність виготовлення зразків.

Розроблена і впроваджена технологія дала змогу дистанційно виготовляти циліндричні зразки з опромінених заготовок, які входять до складу комплектів ЗС нової програми для енергоблоку РАЕС-1.

РОЗРАХУНОК ПРОЦЕСУ ТРАНСМУТАЦІЇ ПЛУТОНІЮ ТА МІНОРНИХ АКТИНІДІВ У ДВОЗОННОМУ ДОСЛІДНИЦЬКОМУ ПІДКРИТИЧНОМУ РЕАКТОРІ

Д. О. Шеляговський, А. В. Носовський, В. М. Павлович, В. І. Гулік

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна

Подальший прогрес у розвитку атомної енергетики буде залежати від вирішення двох основних задач: підвищення рівня безпеки та ефективної трансмутатії довгоживучих радіоактивних відходів. Вирішення цих проблем полягає у побудові підкритичних систем, які здатні підсилювати нейтронний потік від зовнішнього джерела, широко відомі як Accelerator-Driven System (ADS).

У попередніх роботах автори запропонували фізичний проект підкритичного дослідницького реактора керованого зовнішнім джерелом нейтронів[1]. На основі проведених розрахунків по оптимізації геометричних розмірів та складу палива буда обрана конфігурація даної моделі.

Розрахунок процесу трансмутації проводився за допомогою транспортно-го Монте-Карло коду Serpent v2.1.28. Було досліджено розподіл нейтронних потоків та швидкостей реакцій поділу та захоплення в обох зонах підкритичної системи. Розрахунок трансмутації проводився для однорідного та неоднорідного варіантів розташування елементів з Pu+MA (плутоній на мінорні актиніди) паливом у внутрішній (швидкій) зоні [2], обидва варіанти зображені на рисунках 1 та 2 відповідно. Кількість паливних елементів усіх типів незмінна для обох варіантів розташування.

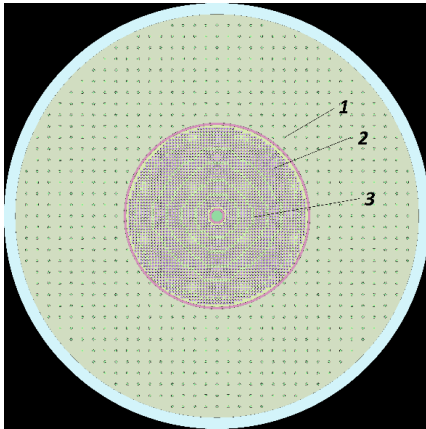


Рис. 1. Однорідне розташування.

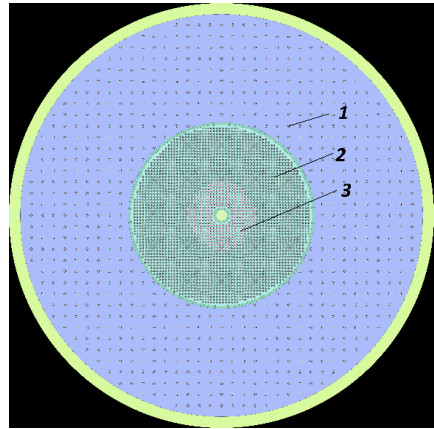


Рис. 2. Неоднорідне розташування.

1 – паливний елемент теплової зони із 5 %-ним збагаченим UO_2 паливом;
2 – паливний елемент швидкої зони із 10 %-ним збагаченим UO_2 паливом;
3 – паливний елемент із PU + MA паливом.

1. V. Gulik, A.H. Tkaczyk. Cost optimization of ADS design: Comparative study of externally driven heterogeneous and homogeneous two-zone subcritical reactor systems. Nuclear Engineering and Design 270 (2014) 133.
2. H. Shahbunder, A.A. Al Qaaod, E.A. Amin, S.U. EL-Kameesy. Effects of Pu and MA uniform and nonuniform distributions on subcritical multiplication of TRIGA Mark II ADS reactor. Annals of Nuclear Energy 94 (2016) 332.

ДО ПИТАННЯ ПРО ПОХИБКИ ВИЗНАЧЕННЯ β -АКТИВНОСТІ «ГАРЯЧИХ» ЧАСТИНОК МЕТОДОМ АВТОРАДІОГРАФІЇ

В. К. Шинкаренко

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Чорнобиль, Україна

Проведено аналіз основних джерел похибок при визначенні β -активності окремих «гарячих» частинок методом авторадіографії. Розглянуто питання про вибір оптимальних параметрів радіографічних плям і умов їхньої реєстрації для мінімізації похибок визначення. Показано, що в області мінімально-можливих облікових рівнів потемніння, що сприяє реєстрації малоактивних частинок, мінімальну чутливість до коливань фону при реєстрації радіографічних плям має інтегральна оптична густина плями. Для більш високих облікових рівнів потемніння перевагу, в якості параметра, має діаметр плями. Чотириразова експозиція одного і того ж фрагмента фільтра дала змогу отримати відтворюваність сумарної активності на фрагменті не гірше 25% відносного відхилення. Для частинок з високою активністю, що знаходились у зоні екстраполяції калібрувальної кривої ця величина не перевищувала 50%. Результати визначень наведені в таблиці.

Параметр	Номер авторадіограми					Середнє по добовій експозиції	$\pm m$, для $p = 0,95$
	1	2	3	4	5		
Калібрувальна крива по набору частинок з відомою активністю, експонованих одночасно з даною авторадіограмою							
Час експозиції, дб	1	1	1	3	10		
Сумарна активність на фрагменті, Бк	4916	4426	4833	5826	7947*	4725	651 (13,8%)
Число «гарячих» частинок на фрагменті	857	853	869	1699	1609	860	21 (2,4 %)
Мінімальна зареєстрована активність «гарячої» частинки, Бк	0,98	0,5	0,74	0,28	0,5		
Максимальна активність «гарячої» частинки, Бк	338	190	404	414	1200**	337***	164 (49) %

Параметр	Номер авторадіограми					Середнє по добовій експозиції	±m, для $p = 0,95$
	1	2	3	4	5		
Калібрувальна крива по набору частинок з відомою активністю, експонованих одночасно з іншою авторадіограмою							
Час експозиції, діб	1	1	1	3	10		
Сумарна активність, Бк, по набору частинок до фрагменту 1	4916	4611	5426			4984	1023 (20,5) %
Сумарна активність, Бк, по набору частинок до фрагменту 2	4639	4426	5025			4697	754 (16,1) %
Сумарна активність, Бк, по набору частинок до фрагменту 3	4419	4178	4833			4477	823 (18,4) %
Середнє по авторадіограмі, Бк	4658	4405	5095			4719	
±m, для $p = 0,95$, Бк	619	540	752				289
± % до середнього	13,3	12,3	14,8				6,1

* Рівень чорного – 150, результат завищений внаслідок злиття плям.

** Злиття плям. Утворились дві великі псевдо частинки з активностями 1200 і 770 Бк,

*** Для радіограм 1 - 4.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗРАЗКІВ-СВІДКІВ КОМПЛЕКТІВ ІА-ЛК-3 ТА ЛК-5 ПЕРШОГО БЛОКУ РІВНЕНСЬКОЇ АЕС МЕТОДОМ СТАТИЧНОГО РОЗТЯГУ

О. В. Шкапяк, Л. І. Чирко, В. М. Ревка, Ю. В. Чайковський

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Здійснення контролю за станом металу корпусу реактора (КР) протягом всього терміну експлуатації є однією з основних умов забезпечення надійної та безпечної експлуатації реактора і реакторної установки в цілому.

Корпус реактора першого енергоблоку Рівненської АЕС був забезпечений програмою зразків-свідків на весь проектний термін експлуатації. Продовження терміну служби на понад проектний період було обґрунтовано за умови реалізації відновлювального відпалу зварного шва № 4, що визначає радіаційний ресурс корпусу реактора першого енергоблоку Рівненської АЕС.

У цій роботі представлена інформація по дослідженню зразків-свідків методом статичного розтягу комплектів ІА-ЛК-3 і ЛК-5 корпусу реактора блоку № 1 Рівненської АЕС, призначених для супроводу експлуатації КР на період після відновлювального відпалу.

У комплекти були включені циліндричні заготовки для виготовлення зразків на розтяг. Тому, для проведення випробувань попередньо необхідно було виготовити ці зразки. Для цього був розроблений спеціальний токарний верстат з дистанційним управлінням.

Далі, для кожного матеріалу було виготовлено та випробувано по 2 зразки на статичний одновісний розтяг. Зразки були циліндричної форми з робочою довжиною 15 мм та діаметром 3 мм. Зразки випробовувалися на універсальній розривній машині Instron 8862 при кімнатній температурі.

Аналіз результатів випробувань показав, що величина радіаційного зміцнення досліджуваних матеріалів внаслідок повторного після відпалу опромінення не більша, ніж при первинному опроміненні, що узгоджується з уявленнями про механізми радіаційного пошкодження металу корпусів реакторів ВВЕР-440, повторно опромінених після відновлювального відпалу.

ВЫБОР ШАГА РАСЧЕТНОЙ СЕТКИ КОНЕЧНО-РАЗНОСТНОГО МЕТОДА РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ДИФФУЗИИ ДЛЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ВВЭР-1000

И. И. Шлапак¹, В. В. Гальченко¹, В. И. Гулик^{1,2}, Д. В. Будик¹

¹ ЧАО «СНПО "Импульс"», Киев, Украина

² Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина

Для обеспечения высокого уровня безопасности атомных электрических станций необходимо точно и оперативно определять параметры реакторной

установки, а также прогнозировать изменения этих параметров в процессе эксплуатации. Задачи контроля и прогнозирования распределения энерговыделения в активной зоне ВВЭР-1000 решаются средствами системы внутри-реакторного контроля (СВРК).

Определение поля энерговыделения в СВРК происходит путем синтеза поля энерговыделения полученного путем решения уравнения диффузии подсистемой физических расчетов и неполного поля (64 тепловыделяющие сборки из 163), измеренного детекторами прямого заряда. Таким образом точность решения уравнения диффузии оказывает существенное влияние на точность определения поля энерговыделения в СВРК.

При использовании конечно-разностного метода решения уравнения диффузии существенным вопросом является выбор шага конечно-разностной сетки. Так как между расчетными точками плотность потока нейтронов описывается линейной функцией, то при использовании слишком грубого шага можно получить недостаточную детализацию изменения плотности потока, что приведет к существенным погрешностям определения поля энерговыделения. В то же время, возможно и избыточное измельчение расчетной сетки, при этом точность определения поля энерговыделения растет не существенно, а расчетное время значительно увеличивается.

В работе проанализированы различные варианты расчетной сетки конечно-разностного метода решения уравнения диффузии для выбранной топливной загрузки. Получены поля энерговыделения для выбранных вариантов, проведено сравнение с результатами расчета нодальным методом, а также с эксплуатационными данными. Показаны зависимости среднеквадратического отклонения коэффициента неравномерности поля энерговыделения и времени расчета от шага расчетной сетки. На основе полученных результатов предложен оптимальный шаг расчетной сетки конечно-разностного метода при котором сохраняется высокая степень точности решения и минимизируется расчетное время.

Тези доповідей з радіаційної фізики та радіаційного матеріалознавства

ПОРІВНЯННЯ СТРУКТУРИ МОНОКРИСТАЛІЧНОГО КРЕМНІЮ, ОПРОМІНЕНОГО ЗНАЧНИМИ ФЛЮЕНСАМИ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ЛЕГКИХ ІОНІВ

В. І. Варніна, Г. П. Гайдар, М. Б. Пінковська, М. І. Старчик

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Узагальнено результати досліджень структурних і оптичних властивостей кремнію, опроміненого іонами 27,2 МеВ гелію (α -частинками), 6,8 МеВ водню (протонами) та 13,6 МеВ дейтерію (дейтронами) з метою порівняння їхнього впливу в умовах великих флюенсів іонів.

Структуру опроміненого іонами кремнію можна умовно поділити на декілька областей (пробіжна, гальмівна і загальмівна), вигляд яких визначається типом іонів, їхніми масою, енергією, а також температурою під час опромінення. Методами рентгенівської топографії та вибіркового протравлювання показано, що зі зростанням енергії та маси іонів ступінь пошкодження кремнію, як у пробіжній для іонів області, так і в області гальмування, зростає та ускладнюється [1]. Більш упорядковані й вузьчі лінії напружень, пов'язані з дефектами, властиві для опромінення кремнію іонами водню. У загальмівній області кремнію, опроміненого великими дозами іонів водню, спостерігався ефект далекодії – виявлення ліній напружень (паралельних лінії гальмування) на відстані розповсюдження дефектів, що дорівнює подвійній довжині пробігу (720 мкм). Визначена за допомогою атомно-силової мікроскопії поверхня кристала у цьому випадку також найменш пошкоджена.

Для кремнію, опроміненого іонами гелію, характерною є фрагментарна структура в частині пробігу іонів, а лінія гальмування складається з порожнеч [2]. Присутність дислокацій у кремнії, опроміненому іонами дейтерію, завдяки їхній взаємодії з радіаційними дефектами, призводить до руху дислокацій у процесі опромінення та до перетину ними лінії гальмування дейтронів внаслідок утворення дефектів пакування. Поверхня такого кремнію виявилася найбільш пошкодженою.

Остаточна картина утворення й упорядкування дефектів визначалася взаємодією ростових і радіаційних дефектів під час опромінення.

1. М. І. Старчик та ін. Можливості радіаційного легування кремнію легкими йонами МеВ-них енергій. В кн.: Сб. науч. трудов IX Международной конференции «Функциональная база нанoeлектроники». 18 - 23 сентября 2017, г. Одесса, Украина (Одесса, 2017) 44.
2. M. I. Starchyk et al. Voids' layer structures in silicon irradiated with high doses of high-energy helium ions. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics* 18(3) 2015 292.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МАЛИХ КОНЦЕНТРАЦІЙ ПОЛІЕТИЛЕНГЛІКОЛЕЙ НА ДИФУЗИЮ МОЛЕКУЛ ВОДИ

О. А. Василькевич, В. І. Слісенко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Великий інтерес до вивчення властивостей води обумовлений роллю, яку вона відіграє у живій та неживій природі. Аномальні властивості, притаманні воді, відповідним чином проявляються у водних системах. Згідно із сучасним уявленням структура води розглядається як неперервна динамічна тривимірна сітка водневих зв'язків. Зміна характеристик динаміки під впливом різних сполук, у тому числі високомолекулярних, є наслідком руйнування попередньої та створення нової сітки водневих зв'язків.

Отже, метою даної роботи було дослідження впливу відносно малих концентрацій високомолекулярних сполук, таких як поліетиленгліколі ПЕГ-1500 і ПЕГ-4000, на динамічні властивості води та їх механізм за допомогою квазіпружного розсіяння повільних нейтронів (КПРН). На основі спектрів КПРН були визначені наступні характеристики самодифузії молекул води: D - загальний коефіцієнт дифузії; D_L - внесок у D від колективних рухів; D_F - внесок у D від одностинкових (активаційних) рухів; τ_0 - час ослого життя молекул води у положенні рівноваги. Дослідження параметрів дифузії проводились у залежності від концентрації ПЕГ-1500 в інтервалі 0,05 - 2,0 мас.%, а ПЕГ-4000 – 0,1 - 1,0 мас.%. Розрахунки даних характеристик дифузії виконувалися у рамках моделі Оскотського-Іванова. Із отриманих результатів випливає, що даним розчинам властива аномальна поведінка параметрів дифузії. При зменшенні концентрації від 2,0 мас.% до 0,05 мас.%, на противагу іншим рідинам, загальний коефіцієнт дифузії системи вода-ПЕГ-1500 зменшується від $2,02 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ до $1,64 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$. При цьому його одностинкова складова D_F теж зменшується відповідно від $1,75 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ до $1,09 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$. Крім того, у ній при 0,1 мас.% проявляється мінімум, де $D_F = 0,96 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$. Колективній складовій D_L притаманна «нормальна» концентраційна поведінка. Вона збільшується зі зменшенням концентрації ПЕГ, проходячи при 0,1 мас.% через максимум. Щодо системи вода-ПЕГ-4000, то дослідження проводились тільки при двох концентраціях ПЕГ 0,1 мас.% і 1,0 мас.%. Проте і тут має місце аномальна концентраційна залежність коефіцієнтів D і D_F . Вони зменшуються зі зменшенням концентрації від 1,0 мас.% до 0,1 мас.% D відповідно від $1,65 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ до $1,41 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$, а D_F відповідно від $1,41 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ до $1,13 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$. Із наведених величин коефіцієнтів дифузії видно, що основний внесок у загальний коефіцієнт самодифузії належить одностинковій складовій D_F .

Відомо, що інтенсивність активаційного механізму дифузії визначається величиною енергії активації і зменшення даної складової D_F при зменшенні концентрації ПЕГ вказує на зростання цієї енергії, що цілком можливо пов'язано з інтенсифікацією процесів кластеризації.

На закінчення відзначимо наступне: аналогічна аномальна поведінка коефіцієнтів самодифузії D і D_F властива і розчинам вода-спирт малої концентрації.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСТОРОВИХ СТРУКТУР НЕСТАБІЛЬНИХ ЧАСТИНОК НА ДИСКРЕТНІЙ ГРАТЦІ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

І. Ю. Голіней

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Завдяки притяганню в системах частинок зі скінченим часом життя в умовах постійної генерації створюються різноманітні просторові структури [1 - 3]. Дифузія та агрегація частинок моделювалася в двовимірній системі методом Монте-Карло. Моделювання проводилося на квадратній та гексагональній ґратці. У моделі тільки одна частинка може займати вузол ґратки. Вона може розпастися з певною ймовірністю, може виникнути внаслідок генерації і може переміститися в сусідній вузол. Взаємодія між частинками враховувалася в наближенні найближчих сусідів. Параметрами моделювання були інтенсивність генерації, час розпаду та температура.

Результати показали, що на відміну від системи стабільних частинок розшарування на дві суцільні фази не відбувається. Замість цього в системі з гексагональною ґраткою при низьких температурах та низьких густинах частинки групуються в невеликі кластери, розмір яких визначається в часом пробігу частинки між кластерами у порівнянні з часом життя. При підвищенні температури кластери випаровуються і весь об'єм займає газова фаза. При великій густині більшість об'єму займає конденсована фаза, в якій утворюються газові порожнини. Загалом структура кластерів або порожнин близька до регулярної, але правильна надґратка не утворюється через надто малий час життя частинок у порівнянні з дуже повільним загальним рухом кластерів. Форма кластерів неправильна. При середніх густинах кластери та порожнини утворюють складну мережу.

На квадратній ґратці картина суттєво відрізняється. Замість приблизно круглих кластерів утворюються діагональні смужки конденсованої фази. Така різниця пояснюється тим що мобільність частинок на кінках смужок дуже сповільнюється. Частинка може зміститися, тільки спочатку вистрибнувши з кластера конденсованого газу, тоді як на гексагональній ґратці поверхнева дифузія не ускладнена.

Моделювання проводилося також у випадку генерації частинок в обмеженій області. Це не міняє загальної картини процесів, але дає змогу отримати різні структури, наприклад кільце конденсованої фази із порожниною в центрі, кластери конденсованої фази, розташовані по колу тощо.

Для системи стабільних частинок вивчався процес випаровування початкового сферичного острова з термалізацією газу й вирівнюванням хімічних потенціалів. Виявлено, що повне вирівнювання хімічних потенціалів відбувається тільки при температурах, коли острів повністю випаровувався. Визначено залежність часу випаровування від температури. За низьких температур

час випаровування стає дуже великим, а тому відбувається термалізація в лише в газовій фазі.

1. L.V. Butov, A.C. Gossard, D.S. Chemla. Nature 418 (2002) 751.
2. M. Remeika, J.C. Graves, A.T. Hammack et al. Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 186803.
3. A.A. Chernyuk, V.I. Sugakov. Phys. Rev. B 74 (2006) 085303.

ЗМІНА СПЕКТРА РОЗСІЯННЯ СВІТЛА ПРИ ДЕФОРМАЦІЇ ДІЕЛЕКТРИЧНОГО СЕРЕДОВИЩА ЗІ СФЕРИЧНИМИ МЕТАЛІЧНИМИ ЧАСТИНКАМИ

І. Ю. Голіней, Є. В. Оникієнко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Для оптичних властивостей середовищ з металевими наночастинками властивий плазмовий резонанс. Коли відстань між частинками менша за їхні розміри, резонансні частоти зміщуються. Це створює можливість змінювати спектр розсіяння та поглинання, змінюючи відстань між частинками. В діелектричному середовищі, яке може сильно розтягтися в одному напрямку завдяки коефіцієнта Пуассона, при розтяганні наночастинки стають ближчими одна до одної.

У даній роботі пропонується розрахунок зміни ефективної діелектричної провідності середовища при деформації в рамках теорії Максвелла-Гарнетта [1] з урахуванням пар близько розташованих частинок. Як часткову задачу розраховано зміну функції розподілу відстаней між частинками при деформації. Інша часткова задача - розсіяння світла на двох близьких наночастинках, дає зсув частот і зміну поляризованості.

Результати роботи важливі для вмикання і вимикання плазмового резонансу [2].

1. J.C. Maxwell Garnett. Phil. Trans.of the Royal Soc. 237 (1906).
2. J. Svanda, Y.Kalachyova. ACS Appl.Mater.Interfaces 8 (2015) 225.

ДИФРАКЦІЯ НЕЙТРОНІВ ТА γ -КВАНТІВ В КРИСТАЛАХ

О. Я. Дзюблик, В. В. Михайловський, В. Ю. Співак

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

У відомих динамічних теоріях розсіяння нейтронів і γ -квантів в ідеальних кристалах [1, 2] частинки та фотони описуються плоскими хвилями. В той же час, у всіх експериментах пучки падаючих частинок та фотонів, які характеризуються певною апертурою, повинні описуватись хвильовими пакетами,

тобто інтегралами як по енергії, так і по куту. Като [3] розвинув динамічну теорію дифракції Лауе сферичних рентгенівських хвиль в кристалах, в якій припускалось, що кутова дисперсія падаючого випромінювання σ значно перевищує характерний кутовий інтервал Θ , де відбувається дифракція. Інтеграли по куту оцінювались за допомогою методу фазової точки, який годен лише у випадку слабо поглинаючих кристалів.

Нами вперше побудована теорія [4, 5] для сильно поглинаючих кристалів, коли має місце як потенціальне розсіяння нейтронів ядрами кристала, так і резонансне (у випадку γ -квантів це відповідно релєївське та месбауєрівське розсіяння). Інтеграли вже оцінюються, використовуючи більш адекватний метод перевалу. Виходячи за рамки теорії Като, ми розглянули випадок довільного співвідношення σ та Θ . Зазначимо, що в експериментах з синхротронним випромінюванням реалізується $\sigma \ll \Theta$. Розрахована залежність інтенсивності заломленого та дифрагованого пучків від положення скануючої щілини на задній грані кристала. Показано, що із зростанням поглинання потік енергії нейтронів або фотонів в кристалі зосереджується в основному вздовж відбиваючих площин. Наші числові розрахунки добре описують експериментальні криві Шалла [6] для дифракції теплових нейтронів в кремнії.

Вперше розглянута дифракція (каналювання) швидких нейтронів з середньою енергією $\sim 2 - 3$ МеВ в кристалах. Розсіяння нейтронів ядрами враховується в рамках моделі чорних ядер. Береться до уваги широкий розподіл нейтронів по енергії. Розвинута теорія дала змогу пояснити експерименти [7] по проходженню швидких нейтронів скрізь кристал германію, які були виконані в ІЯД НАН України 40 років потому.

Крім того, нами дано аналіз часової залежності інтенсивності заломлених і дифрагованих пучків месбауєрівського та синхротронного випромінювання при дифракції Лауе. Показано, що в разі дуже коротких імпульсів синхротронного випромінювання, коли відбувається збудження ядерних екситонів, розпад системи збуджених ядер різко відрізняється від експоненціального. Після проходження генеруючого імпульсу збуджені ядра спочатку випромінюють короткі γ -імпульси, які потім супроводжуються затухаючими осциляціями інтенсивності.

1. А.М. Афанасьєв, Ю. Каганю ЖЭТФ 48 (1965) 327.
2. Ю. Каган, А.М.Афанасьєв. ЖЭТФ 49 (1965) 1504.
3. Andr'e Authier. Dynamical Theory of X-ray Diffraction (Oxford University Press Inc., New York, 2001).
4. A.Ya. Dzyublik, V.Yu.Spivak. УФЖ 61 (2016) 826.
5. A.Ya.Dzyublik, V.I.Slisenko, V.V.Mykhaylovskyy. УФЖ 63 (2018) 174.
6. C.G.Shull, J. Appl. Phys. 6 (1973) 257.
7. А.Н. Дюмин, В.А. Рубан, Б.Б. Токарев, М.Ф. Власов. Письма в ЖЭТФ 42 (1985) 61.

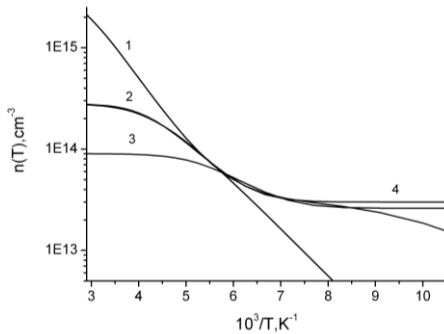
ПОЛОЖЕНИЕ УРОВНЯ ФЕРМИ В Ge, ОБЛУЧЕННОГО γ -Co⁶⁰

А. П. Долголенко

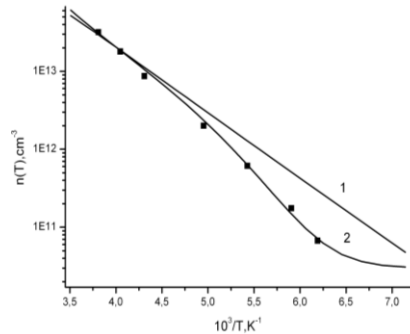
Институт ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Дивакансия в Ge, как и в Si относится к основным радиационным дефектам. В работе [1] показано, что у радиационных дефектов в германии в запрещенной зоне отсутствуют донорные уровни, а Hubbard энергия у дефектов в Ge, как и в Si. Облучение n-Ge γ -квантами Co⁶⁰ [2] показало, что после n-p конверсии наблюдалось в p-Ge предельное положение уровня Ферми $\sim E_V + 0,24$ эВ. Авторы предположили, что должен наблюдаться акцепторный уровень вблизи слегка ниже середины запрещенной зоны и донорный уровень вблизи 0,2 эВ выше валентной зоны. Дивакансия является амфотерным дефектом с уровнями, разделенными на величину корреляционной энергии в запрещенной зоне германия. При захвате электрона на уровень дивакансии её энергия возрастает на Hubbard энергию и в запрещенной зоне появляется выше лежащий уровень дивакансии, а концентрация ниже лежащего уровня уменьшается. При захвате дырки на уровень дивакансии его энергия понижается на Hubbard энергию, а концентрация уменьшается. Можно предположить, что при определенном положении уровня Ферми вероятности захвата дырки на выше или ниже лежащий уровень дивакансии равны и тогда возможно появление обобщенного уровня. Математически это можно описать как уменьшение концентрации одного уровня дивакансии и увеличение концентрации другого уровня. При определенном положении уровня Ферми в p-Ge между уровнями дивакансии $E_C - 0,25$ и $E_V + 0,25$ эВ действительно, наблюдается обобщенный акцепторный уровень $E_V + 0,31$ эВ (3-/1-).

В случае нахождения уровня Ферми между акцепторными уровнями дивакансии $E_V + 0,25$ и $E_V + 0,085$ эВ можно наблюдать акцепторный обобщенный уровень $E_V + 0,17$ эВ (см. 2) или донорный обобщенный уровень $E_V + (0,17 - 0,20)$ эВ (см. 3) в зависимости от концентрации мелких доноров до облучения (рис. 1, а).



а



б

На рис. 1, б представлена температурная зависимость концентрации дырок в p-Ge после облучения n-Ge ($n_0 = 6 \cdot 10^{12}$) γ -квантами Co^{60} [2] дозой $9 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Дырки в валентную зону Ge поставляют обобщенный акцепторный уровень дивакансии $E_V + 0,31 \text{ эВ}$ (см. 1), которые захватываются на обобщенный донорный уровень дивакансии $E_V + 0,17 \text{ эВ}$.

Таким образом предельное положение уровня Ферми в p-Ge определяют обобщенные уровни дивакансии: – акцепторный $E_V + 0,31 \text{ эВ}$ и донорный $E_V + 0,17 \text{ эВ}$.

1. А.П. Долголенко. Электронные уровни конфигураций дивакансий в германии. Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение» 5(87) 2013 37.
2. J.H. Crawford, Jr., J.W. Cleland. Nature of Bombardment and Energy Levels in Semiconductors. J. of Appl. Phys. 30(8) (1959) 1204.

ВИКОРИСТАННЯ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОПРОМІНЕННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАХИСНИХ МОДУЛІВ З SiC

М. А. Заболотний, Ю. Є. Грабовський, Л. І. Асламова

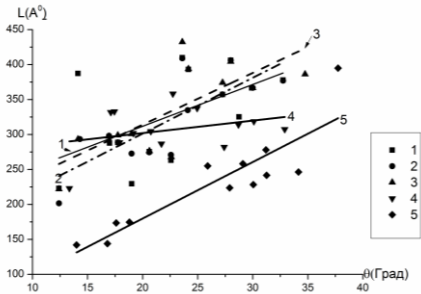
*Навчально-науковий центр радіаційної безпеки
Київського національного університету імені Тараса Шевченка,
Київ, Україна*

Актуальність дослідження обумовлюється використанням спеціалізованих модулів з SiC при виготовленні елементів бронезахисту особового складу і легкої техніки.

Мета досліджень визначення фізичних закономірностей, що обумовлюють зв'язок між механіко-міцностними та фазово-структурними властивостями функціональних елементів з карбїду кремнію.

Матеріали та апаратура. При проведенні досліджень елементів із реакційно-зв'язаного SiC густина матеріалу (ρ) вибиралася не менше $2,9 \text{ г/см}^3$, що дозволяло визначати можливість поліпшення захисної якості бронеплит за рахунок забезпечення існування в них оптимального фазового складу. Фазовий склад зразків відслідковувався за допомогою дифрактометра ДРОН-3М. Неруйнівний контроль зразків проводився на рентгенівському діагностичному цифровому комплексі «КРДЦ-08-Альфа». Результати вимірювань ілюструє Рис, наведено залежність відношення L від кута дифракції рентгенівських променів Θ .

Висновки. 1) Вироби з реакційно-зв'язаного карбїду кремнію (з $\rho = 2,9 \text{ г/см}^3 - 3,15 \text{ г/см}^3$) мають гранулоподібну структуру. 2) Просторові розміри гранул реакційно зв'язаного SiC, мають розмір 100 - 300 мкм, а величина області когерентного розсіяння променів знаходиться в межах 14 - 42 нм. 3) При динамічних навантаженнях найбільш міцні модулі містять області як з



Значення густини зразків, результати вимірювань, на яких відмічені позначками в г/см^3 є 3,09 - зразок 1; 3,05 - зразок 2; 3,00 - зразок 3; 2,9 - зразок 4, 3,15 - зразок 5. Наведені на рисунку лінії – лінійна апроксимація експериментальних точок, одержаних при дослідженні відповідних за номерами зразків.

кубічною та і гексагональною ґратками, для яких є характерною велика різниця величин областей когерентного розсіяння рентгенівських променів. 4) Для зразків SiC з високою міцністю при динамічних навантаженнях характерне значення тангенсу кута нахилу лінійної апроксимації залежності розмірів L від Θ в межах 6,0 - 8,4.

КОЕФІЦІЄНТИ РАДІАЦІЙНИХ ЗМІН ПАРАМЕТРІВ СВІТЛОДІОДІВ GaP ТА GaAsP

**М. В. Завада¹, М. Б. Пінковська¹, В. М. Попов²,
О. І. Радкевич², В. П. Тартачник¹**

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² ДП «Науково-дослідний інститут мікроприладів»

НТК «Інститут монокристалів» НАН України, Київ, Україна

В останні десятиліття сформувався напрям радіаційної технології напівпровідникових матеріалів і приладів, де роль основного інструмента впливу відіграють потоки швидких частинок. Цей метод незамінний для забезпечення однорідності легування напівпровідників, створення і-шарів та надріток, підвищення швидкодії ВЧ-приладів тощо [1, 2].

Водночас швидкий розвиток ядерної енергетики та космічної техніки потребує нових радіаційно-стійких матеріалів та радіоелектронних схем з підвищеним експлуатаційним ресурсом, радіаційно-чутливих сенсорів. Про можливість використання у цих галузях саме світлодіодів на GaP йшлося, наприклад, у роботі [3].

Їхнє визначення проводилось на монокристалічних структурах GaP та GaAsP шляхом аналізу дозових залежностей електропровідності і, відповідно, деградаційних кривих інтенсивності свічення.

Зазвичай деградація електропровідності в результаті введення радіаційних дефектів оцінюється за початковою швидкістю видалення носіїв струму $(dn/d\Phi)_{\Phi \rightarrow 0}$. З метою встановлення інтервалу доз, де вплив скупчень дефектів

мало впливає на величину $(dn/d\Phi)_{\Phi \rightarrow 0}$, проводилось диференціювання експериментальних залежностей $n(\Phi)$. Встановлено, що початкова швидкість видалення носіїв у разі опромінення кристалів GaP електронами $E = 4$ МеВ близька до $7,5 \text{ см}^{-1}$, що властиво зразкам, які містять лише точкові дефекти. Зростання дози опромінення приводить до монотонного падіння швидкості видалення носіїв.

Попередні дослідження спектрів електролюмінесценції показали, що у зразках GaP переважає випромінювання екситонів, зв'язаних на далеких NN_3 - NN_5 парах азоту з енергією зв'язку електрона $E_{зв.} = 31,4 \div 64,1$ меВ; для діодів GaAsP свічення зумовлене ближніми парами NN_1 - NN_2 $E_{зв.} = 141,1 \div 138,4$ МеВ. Коефіцієнти радіаційних змін часу життя носіїв (k_τ), оцінені згідно з

$$\frac{1}{\tau_\Phi} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{\Phi}{k_\tau}, \quad (1)$$

де τ_Φ – час життя носіїв в опроміненому зразку; τ_0 – час життя носіїв у вихідному зразку; Φ – доза опромінення. Радіаційна стійкість діодів GaP характеризується константами: $k_\tau = 10^7 \text{ см}^2 \text{ с}$ ($E_{ел.} = 1$ МеВ,) та $k_\tau = 1,62 \cdot 10^7 \text{ см}^2 \text{ с}$ ($E_{ел.} = 2$ МеВ); у GaAsP – $k_\tau = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^2 \text{ с}$ (жовті, $E_{ел.} = 2$ МеВ) та $k_\tau = 2 \times 10^{10} \text{ см}^2 \text{ с}$ (помаранчеві, $E_{ел.} = 2$ МеВ).

У випадку нейтронного опромінення ($E = 1$ МеВ, $\Phi = 1,8 \cdot 10^{12} \text{ см}^2$) коефіцієнт радіаційних змін часу життя діодів GaP становить $k_\tau = 9,5 \cdot 10^4 \text{ см}^2 \text{ с}$.

1. И.В. Васильева, Г.А. Ефремов и др. *Радиационные процессы в технологии материалов и изделий электронной техники* (Москва: Энергоатомиздат, 1997).
2. В.В. Козловский. *Модифицирование полупроводников пучками протонов* (СПБ: Наука, 2003).
3. P. Litovchenko, D. Biselo et al. *Nucl. Instr. and Method in Phys. Res. A* 552 (2005) 93.

МОДЕРНІЗАЦІЯ РАДІАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ СРТ ДЛЯ МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ *IN-VIVO*

**Ю. В. Іванов¹, В. І. Сахно¹, Т. В. Ковалінська¹, О. А. Жернов²,
А. Г. Зелінський¹, Л. О. Сахно³, В. Г. Ніколаєв³**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *НМАПО імені П. Л. Шупика, Київ, Україна*

³ *Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології
ім. Р. С. Кавецького, Київ, Україна*

Мета роботи – створення технічних умов для медико-біологічних досліджень *in-vivo* на потужній науково-технологічній радіаційній установці ІЯД.

На цьому етапі виконано спеціальні технічні розробки.

Наукова база розробок – інформація про процеси, що їх будуть потім реалізовувати на модернізованій установці. Обґрунтовано, що єдиним способом реалізації наукової програми «Розробки радіаційних технологій отримання та дослідження методів застосування гідролізних наноматеріалів для ядерної та традиційної медицини» є проведення безпосередньо на установці в ІЯД експериментів *in-vivo*. В таких експериментах детекторами радіаційно-стимульованих ефектів є фізіологічний відгук піддослідних тварин. Цей метод широко поширений в радіобіології, але з використанням спеціальної техніки. Відсутня інформація по такі дослідження на універсальній потужній промисловій радіаційній техніці.

Для медико-біологічних робіт в ІЯД необхідно створити систему технічних засобів, вписаних в структуру адаптованої радіаційної установки сектора радіанних технологій. В першу чергу розробити спеціальну експериментальну камеру для медико-біологічних досліджень і розташувати її в боксі діючого радіаційного комплексу. Це буде суттєвим удосконаленням його структури і дозволить розширити обсяги досліджень у біологічних напрямках.

Результати. Розроблена технологічна схема і удосконалена структура технічних засобів для здійснення біологічних досліджень з метою виявлення ефективних методів використання радіаційних гідролізатів. Розроблено оригінальну конструкцію експериментальної камери з засобами радіаційного моніторингу, системами подачі і кондиціонування повітря та захисту (при необхідності) від впливу небажаних фотонних факторів в реакційній камері, засобами енергопостачання цих нових вузлів установки. Конструкція камери забезпечує поглинання небажаних компонентів іонізуючої радіації (фотонів від прискорювача), має систему засобів колімації і фокусування пучків на об'єктах, засобів фіксації піддослідних біологічних об'єктів. Камера конструктивно прив'язана до структури під пучкових засобів установки в реакційній камері радіаційної установки. В доповіді обговорюються особливості конструкції і функціональні параметри експериментальної камери і методики її використання.

У результаті модернізації технічних вузлів і систем, на базі радіаційної установки ІЯД утворено експериментальний технічний комплекс, розрахований на виконання широкого переліку радіаційно-біологічних досліджень з використанням сучасного електрофізичного джерела радіації великої потужності. Для комплексу розроблено технічні засоби для здійснення досліджень *in-vivo* для опрацювання методів клінічного застосування продуктів радіолізу та зниження похибки медико-біологічних досліджень на потужній радіаційній техніці.

САМОДИFUЗІЯ МОЛЕКУЛ ВОДИ ПІСЛЯ КОНТАКТУ З КРЕМНІЙВМІСНИМИ СПОЛУКАМИ

Т. В. Кармазіна¹, В. І. Слісенко², О. А. Василькевич², Н. І. Мазіна²

¹ *Інститут колоїдної хімії і хімії води НАН України, Київ, Україна*

² *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

Інтерес до кремнійвмісних сполук обумовлений їхнім значним поширенням у природі, а також інтенсивним використанням у техніці, промисловості, фармацевції. Із природних сполук кремнію найбільш широко представлені його кисневі похідні у вигляді різних модифікацій кремнезема, силікатів і алюмосилікатів. Елементарною структурною одиницею, із якої утворюються структури всіх видів кремнезема і силікатів, є комірка SiO_4 , що представляє собою тетраедр, у центрі якого знаходиться атом кремнію, а у вершинах – атоми кисню. Залежно від умов тетраедричні комірки можуть об'єднуватися у щільні або пористі аморфні кулясті частинки або ж утворювати розгалужені ланцюги, кільця, сітки. Деякі кремнійвмісні речовини проявляють достатньо високу адсорбційну здатність по відношенню до видобування органічних сполук із водних розчинів, можуть використовуватися у якості фільтруючих матеріалів.

У більшості робіт розглядається стан води біля поверхні кремнійвмісних сполук. Ми досліджуємо вплив таких сполук на властивості об'ємної води. Для дослідження нами були використані кремнійвмісні сполуки різної структури, а саме: кристалоподібні природні мінерали – халцедон і спонголіт, а також дві аморфні форми кремнезема - аеросил і силікагель. Найбільший інтерес представляють осадові породи, структура яких формується у процесі їхнього осідання при безпосередньому контакті з водою і тому – найбільше відповідає структурі води в умовах їхнього утворення.

Методом квазіпружного розсіяння повільних нейтронів [1 - 4] були визначені характеристики самодифузії молекул води після її контакту з даними кремнійвмісними сполуками.

Дослідженнями було встановлено, що дифузійні рухи молекул води після її контакту з кристалоподібними мінералами як халцедон і спонголіт здійснюються тільки за механізмом неперервної самодифузії, що вказує на різке збільшення енергії взаємодії молекули води зі своїм оточенням. Це можна пояснити зростанням інтенсивності кластероутворення. На користь цього припущення свідчить незначне збільшення густини води. Таким чином, встановлено, що чим більш впорядкована структура кремнезему, тим у більшій мірі він впливає на динамічний стан води. Такі кристалоподібні кремнійвмісні сполуки, як природні мінерали типу халцедону і спонголіту, суттєво змінюють механізми самодифузії молекул води, призводячи до зникнення внеску активаційного механізму, тобто всі молекули води в її об'ємі на деякий час виявляються зв'язаними і можливо у кластерах. Аморфні ж аеросил та силікагель мало впливають на механізми самодифузії молекул води.

1. Л.А. Булавін та ін. *Нейтронна спектроскопія конденсованих середовищ* (К.: Академперіодика, 2005) 640 с.
2. Т.В. Кармазіна. Динамическое состояние воды и адсорбция ПАВ в системах вода - ПАВ - твердый сорбент. Теор. и экспер. химия 34(1) (1998) 19.
3. Н.В. Ярошевская, В.В. Гончарук, Т.В. Кармазіна и др. Сопоставительная оценка халцедона и кварцевого песка как фильтрующих материалов. Химия и технология воды 28(5) (2006) 472.
4. В.И. Слисенко, П.Г. Иваницкий, Т.В. Кармазіна и др. Квазиупругое рассеяние нейтронов в исследованиях динамики молекул растворов. Препринт КИЯИ 93-13 (Киев, 1993) 20 с.

ВПЛИВ ЕЛЕКТРОННОГО ОПРОМІНЕННЯ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ *n*-InSe

**З. Д. Ковалюк¹, В. Т. Маслоук², І. Г. Мегела²,
І. В. Мінтянський¹, П. І. Савицький¹**

¹ Чернівецьке відділення

Інституту проблем матеріалознавства НАН України, Чернівці, Україна

² *Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, Україна*

Серед шаруватих монокристалів A^3B^6 селенід індію має не тільки найвищу рухливість носіїв вздовж шарів, але й максимальну анізотропію провідності. Високі значення останньої пов'язуються з наявністю тривимірних 3D і менш рухливих 2D електронів та їхнім різним внеском у перенесення заряду в різних кристалографічних напрямках. Для *n*-InSe детальне математичне моделювання в рамках 2D-3D підходу вперше здійснене нами в роботах [1, 2], де досліджено вплив електронного опромінення на електричні параметри *n*-InSe та їх анізотропію для кристалів однієї групи ($n \approx 1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) при одній дозі *e*-впливу (30 кГр). Тут ми повідомляємо про вплив різних доз *e*-опромінення на електричні властивості кристалів *n*-InSe з відмінними вихідними концентраціями носіїв.

Зразки для досліджень були виготовлені зі зливка нелегованого *n*-InSe, вирощеного методом Бріджмена із нестехіометричного розплаву $\text{In}_{1,03}\text{Se}_{0,97}$. Їх опромінення швидкими електронами проводилося на мікротроні М-30 при щільностях потоку $10^{10} \div 10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, потоках $10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-2}$ та енергії електронів 10 МеВ. У діапазоні 80÷400 К вимірювалися температурні залежності електропровідностей вздовж та впоперек шарів $\sigma_{\perp C}$ і коефіцієнт Холла R_H .

Встановлено, що при використаних дозах опромінення для всіх зразків істотно змінюється тільки низькотемпературний коефіцієнт Холла, тобто концентрація мілкового донора чи/та ступінь його компенсації, а на параметри глибокого центра опромінення практично не впливає. Екстремуми в залежностях $R_H(T)$ та немонотонні температурні зміни $\mu_{\perp C}$ зафіксовані тільки для кристалів

з низькими значеннями n ($10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$) при дозі 30 кГр. Їх можна пояснити внеском у провідність двох типів носіїв. При низьких температурах домінують 2D електрони, що беруть участь лише у транспорті вздовж шарів. З ростом T вони активуються в основну c -зону і розмірність електронного газу стає більш тривимірною. При такому ж рівні e -впливу концентрація носіїв заряду в низькоомному InSe ($n \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) істотно зменшується, а холлівська рухливість електронів вздовж шарів зростає. Такі позитивні зміни для n -InSe раніше не спостерігалися ні при легуванні, ні після інтеркаляції чи довготривалої релаксації.

Для всіх зразків опромінення дозами понад 30 кГр приводить до істотного зменшення рухливості в низькотемпературному діапазоні та зростання величини енергетичного бар'єра між шарами. Електронне опромінення приводить як до значного пониження поперечної провідності, так і стимулює її активаційне збільшення з температурою. Після e -впливу анізотропія $\sigma_{\perp c} / \sigma_{\parallel c}$ істотно зростає по величині та експоненційно зменшується з ростом T . При цьому її збільшення в основному зумовлене пониженням $\sigma_{\parallel c}$. При зростанні дози від 30 до 150 та 300 кГр величина $\sigma_{\parallel c}$ сильно падає, а анізотропія електропровідності очевидно зростає.

Проаналізовано механізм збільшення анізотропії електропровідності після електронного опромінення. Її активаційна зміна з температурою добре узгоджується з 2D-3D моделлю і свідчить про посилення внеску 2D електронного газу в n -InSe. Показано, що після опромінення електронами анізотропія $\sigma_{\perp c} / \sigma_{\parallel c}$ для селеніду індію може сягати рекордних значень ($\sim 10^7$ при 80 K).

1. I.V. Mintyanskii, P.I. Savitskii, Z.D. Kovalyuk. Phys. Status Solidi B 252(2) (2015) 346.
2. З.Д. Ковалюк, І.В. Мінтянський, П.І. Савицький. Журнал нано- та електронної фізики 9(6) (2017) 06013.

ВПЛИВ ВИСОКОПРОВІДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА ЕЛЕКТРИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ОПРОМІНЕНИХ ЕЛЕКТРОНАМИ МОНОКРИСТАЛІВ ГЕРМАНІЮ

С. В. Луцьов¹, А. І. Зіміч¹, В. Т. Маслюк², І. Г. Мегела²

¹ Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна

² Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, Україна

Широке використання елементів і приладів напівпровідникової електроніки в радіаційних полях, які існують в ядерній та термоядерній енергетиці, космосі, вимагає детального вивчення поведінки напівпровідникових матеріалів при взаємодії з частинками високих енергій. При таких дослідженнях вирішуються дві взаємопов'язані задачі: фізична – це дефектоутворення в напівпровідниках, і практична – створення приладів, збільшення термінів їхньої експлуатації і прогнозування працездатності в цих умовах. Перша за-

дача вимагає дослідження механізмів утворення, природи енергетичного спектра рівнів, термічної стабільності, радіаційних порушень структури та впливу цих дефектів на фізичні процеси в напівпровідниках. Опромінення напівпровідникових кристалів високоенергетичними частинками (швидкими електронами, альфа-частками, гамма-квантами і нейтронами різних енергій) є майже ідеальним методом створення структурних порушень в заданих концентраціях. Варіюючи енергією, потоком ядерних частинок, температурою і часом опромінення можна вводити в об'єм напівпровідника набір всіляких дефектів, починаючи з найпростіших первинних точкових дефектів і закінчуючи їхніми складними комплексами. На основі одержаних закономірностей цілком реально прогнозувати поведінку напівпровідникових матеріалів і приладів в полях підвищеної радіації. Вирішення фізичної задачі повинно привести також і до вирішення прикладної, тобто підвищення радіаційної стійкості матеріалів і приладів на їх основі. Це вимагає, в першу чергу, оптимізації параметрів напівпровідникових структур та застосування прогресивних технологій під час виготовлення їх. Одним з основних напівпровідникових матеріалів, що використовується для створення елементів твердотільної електроніки є монокристалічний германій. Тому, у світлі вище сказаного, виникає значний науковий та практичний інтерес дослідження впливу радіаційного опромінення на фізичні властивості монокристалів германію.

В попередній нашій роботі [1] проводилися вимірювання ефекту Холла для опромінених монокристалів n-Ge різними потоками електронів, з енергією 10 МеВ. При потоках опромінення $\Phi < 10^{16}$ ел./см² германій не змінював тип провідності, а при $\Phi > 2 \cdot 10^{16}$ ел./см²- конвертував в р-тип.

Метою даної роботи є вивчення механізмів електропровідності для цих же монокристалів германію, опромінених потоками електронів $\Phi > 2 \cdot 10^{16}$ ел./см². Для досягнення поставленої мети досліджувались температурні залежності питомого опору та ефективної рухливості для даних монокристалів германію. В результаті проведених досліджень було виявлено зростання електропровідності та ефективної рухливості дірок зі збільшенням потоку опромінення швидкими електронами, на відміну від потоків $\Phi < 10^{16}$ ел./см². Таке аномальне зростання електропровідності та ефективної рухливості дірок може бути пов'язане з утворенням в об'ємі германію при опроміненні високопровідних включень з омичним переходом на межі поділу з матрицею напівпровідника. Аналогічні ефекти було виявлено раніше авторами роботи [2] для опромінених протонами монокристалів n-Si. На основі одержаних експериментальних результатів та проведених теоретичних розрахунків було визначено долю об'єму германію, занятого такими включеннями, та їхню електропровідність.

1. S.V. Luniov et al. Nuclear Physics and Atomic Energy 17(1) (2016) 47.
2. T.A. Pagava, N.I. Maisuradze. Semiconductors 44(2) (2010) 151.

ВПЛИВ УЗ-НАВАНТАЖЕННЯ НА ЕЛЕКТРОЛЮМІНЕСЦЕНТНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВІТЛОДІОДІВ УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

**Є. В. Малий¹, В. П. Велешук², І. В. Петренко¹, В. П. Тартачник¹,
О. І. Власенко², З. К. Власенко², М. П. Киселюк³**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
Київ, Україна*

³ *Подільський спеціальний навчально-реабілітаційний
соціально-економічний коледж, Кам'янець-Подільський, Україна*

Світлодіоди ультрафіолетового (УФ) випромінювання з максимумом на довжині хвилі $\lambda_{\text{max}} = 365$ нм застосовуються для полімеризації, флуоресцентної мікроскопії в медицині та біології, спектроскопії тощо. Однак InGaN/AlGaIn/GaN гетероструктури УФ-світлодіодів мають інтенсивну паразитну люмінесценцію у видимому діапазоні, яка складається із “жовтої” електролюмінесценції та фотолюмінесценції від власного УФ-випромінювання [1], що значно ускладнює спектральний аналіз матеріалів і структур, які випромінюють у тому ж спектральному діапазоні. Також відбувається і втрата корисного УФ-випромінювання за рахунок самопоглинання. Тому, окрім робіт з підвищення квантової ефективності, проводяться дослідження щодо зниження в УФ-світлодіодах паразитної люмінесценції у видимому діапазоні й вивчення спектрів електролюмінесценції та вольт-амперних характеристик УФ-світлодіодів у широкому діапазоні температур $T = 77 \div 300$ К.

Досліджувалися індикаторні ($I_{\text{ном}} = 20$ мА) і потужні ($I_{\text{ном}} = 350$ мА) промислові УФ-світлодіоди InGaN/AlGaIn/GaN, виготовлені методом MOCVD на сапфіровій підкладинці, з максимумом довжини хвилі випромінювання $\lambda = 365 \div 370$ нм. У зразки вводили ультразвукову (УЗ) хвилю з частотою $\nu = 2,2$ МГц та середньою потужністю $W = 0,5$ Вт/см².

Виявлено, що УЗ-обробка спричиняє зменшення інтенсивності жовтої смуги в спектрі електролюмінесценції, що супроводжується пропорційним зменшенням інтенсивності основної УФ-смуги. Це явище було як короткотривалим (тобто під час УЗ-навантаження), так і довготривалим, коли зміни лишалися після завершення УЗ-навантаження протягом наступних годин і днів.

Механізм зміни спектрів за такої УЗ-обробки загалом є дискусійним, оскільки одночасно має місце утворення і дифузія точкових дефектів (центрів безвипромінювальної рекомбінації), розпад центрів випромінювальної рекомбінації жовтої смуги, а також можливе коливання дислокаційних сегментів, що захоплюють різноманітні точкові дефекти в активній області. Слід зазначити, що досліджувані InGaN/AlGaIn/GaN гетероструктури мають високу

густину проростаючих дислокацій.

Встановлено, що у світлодіодах ультрафіолетового випромінювання ($\lambda_{\text{max}} = 365 \text{ nm}$) при $T = 77 \text{ K}$ на вольт-амперній характеристиці ділянка S-типу від'ємного диференційного опору (ВДО) виникає за рахунок переходу від монополярного (електронного) режиму інжекції до біполярного та зникає при температурі близько 187 K . Також виявлено, що при $T = 77 \text{ K}$ та малих струмах жовта смуга електролюмінесценції відсутня і виникає при зростанні струму або температури. При зростанні стабілізованого струму на ділянці ВДО відбувається різке лінійне зростання інтенсивності жовтої (паразитної) смуги електролюмінесценції за рахунок інжекції дірок та рекомбінації носіїв на глибоких рівнях дефектів.

1. В.П. Велешук та ін. Видима люмінесценція InGaN/GaN світлодіодів ультрафіолетового випромінювання 365 нм. Журнал нано- та електронної фізики 9(5) (2017) 05031.

ВОДА – КВАНТОВА СИСТЕМА

Л. С. Марценюк

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

За останні десятиліття були отримані важливі практичні і теоретичні досягнення в дослідженні фізики води. Найбільш істотний внесок дали відкриття СПЕ-ефекту (резонансної взаємодії низько інтенсивного електромагнітного випромінювання КВЧ-діапазону (мм-хвилі), з водою і водними середовищами живого організму) [1], і нова теорія води, створена з позиції квантової теорії поля видатним італійським вченим Дж.Препарата [2].

Автори відкриття СПЕ-ефекту виявили в спектрах резонансної взаємодії, в області частот поблизу 50 ГГц піки з дуже високою добротністю, на підставі чого вони зробили висновок про те, що вода - двофазна система, в якій є «льодоподібні утворення», оточені звичайними молекулами води. Проте при такому трактуванні залишаються не поясненими деякі положення, найбільш істотними з яких є відсутність подібних спектрів для льоду і дуже висока добротність виявлених піків. Така добротність може бути зіставлена з добротністю піків лазерного випромінювання, яке може створюватися тільки когерентним середовищем. Це вказує на наявність в воді когерентної складової.

Наявність у воді когерентної складової, - «когерентних доменів», передбачив Дж.Препарата в своїй теорії води. Як впливає з літературних даних, випромінювання «когерентних доменів» виявляється в мм-діапазоні і відповідає за електронні переходи між збудженими рівнями когерентних доменів.

Відповідно до теорії Дж. Препарата, когерентні домени виникають при конденсації водних молекул у водний стан, в них [2]: «сильне електромагнітне поле виникає з квантового вакууму і з'єднується з осциляціями поля мате-

рії, настраюючи всі матеріальні складові до осциляцій у фазі з ним і між собою». За нормальних умов, кількість молекул, що належать когерентній і некогерентній фракціям для фіксованої температури залишається незмінним, проте: «кожна молекула переходить між цими двома стадіями безперервно в часі». Для звичайної води, що має структурні нанонеоднорідності різного походження, час існування когерентних доменів може бути достатньо тривалим. Дж. Препарата побудував теорію води по аналогії з дворідинною моделлю Не II в якому є нормальна і надтекуча складова.

Виходячи з вищевикладеного, вперше зроблено припущення, що вже саме явище конденсації молекул води з пари в рідкий стан здійснюється по іншому механізму, ніж в стандартних рідинах, і визначається домінуванням квантових ефектів над класичними, суть яких розкриває теорія Дж.Препарата [2], чим і пояснюється нестандартний температурний інтервал для конденсованої води.

1. Н.И. Синицин и др. Особая роль системы: «миллиметровые волны – водная среда в природе». Биомедицинская радиоэлектроника 1 (1999) 3.
2. G. Preparata. *QED Coherence in Condensed Water* (World Sci. Singapore, 1995) p. 236.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПЕРСОНАЛЬНИХ ДОЗИМЕТРІВ ДГТ-4 ДЛЯ КЛІНІЧНОЇ ТА ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ДОЗИМЕТРІЇ РАДІАЦІЙНИХ ПОЛІВ ПРИСКОРЕНИХ НА МІКРОТРОНІ М-30 ЕЛЕКТРОНІВ У СУПРОВОДІ ГАЛЬМІВНИХ ФОТОНІВ

**І. Г. Мегела, В. Т. Маслюк, Т. О. Вієру-Василіца,
Й. Й. Гайніш, Г. Ф. Пітченко, О. М. Турховський**

Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, Україна

Широке використання високоенергетичних пучків ядерних частинок високої інтенсивності для прикладних застосувань як у медицині, так і в промисловості потребує адекватних мір захисту для пацієнтів та персоналу. Особливо це є актуальним для фізики прискорених електронів і супроводжуючого їм гальмівного випромінювання для медичної терапії, а також для досліджень радіаційної стійкості матеріалів, функціональних структур, приладів і радіаційної модифікації їхніх властивостей. Як правило це вимагає створення атестованих радіаційних полів із заданими і коректно визначеними параметрами щодо їхньої однорідності та енергетичного спектра. Використання твердотільних дозиметрів радіаційних полів, що створюють прискорювачі електронів створює певні труднощі, пов'язані, із неадекватністю фіксації дози опромінення персоналу. Це обумовлено, по перше, із імпульсним характером радіаційних полів, внаслідок чого виникають значні електромагнітні шуми, вели-

кими імпульсними потужностями доз ($10^6 - 10^{11}$ Гр s^{-1}), а також присутністю змішаних (e, γ), (e, γ, n) радіаційних факторів. Тому корисним є дослідження можливості використання для цих цілей накопичувальних дозиметрів, у яких поглинуту дозу визначають по комбінованому співставленні змін їхніх оптичних характеристик. Наприклад, характеристик значень термо- та фосфоролюмінесценції, що виникає в опромінених зразках. Одним зі таких стандартних термолюмінесцентних дозиметрів для індивідуальної дозиметрії є ДГТ-4, виготовлений на основі кристалічного LiF легovanого Mg і Ti.

У даній роботі наведено результати дослідження впливу зразків ДГТ-4, опромінених у змішаних (e, γ) радіаційних полях на мікротроні М-30 електронів з енергією прискорених електронів 12 МеВ, а також окремо радіаційних полях гальмівних фотонів залежно від дози в інтервалі $10^9 - 10^{14}$ ел/см² та інтенсивності в інтервалі $10^8 - 10^{11}$ ел/см²с. Досліджувалися ефекти термо- та фосфоресценції, а також спектри їхнього оптичного поглинання. Останнє дозволяло ідентифікувати центри забарвлення ДГТ-4. Одержані результати свідчать про можливість вимірювання дозиметричних характеристик імпульсних високоінтенсивних радіаційних полів стандартними фосфоро- та термолюмінесцентними методами, а із дорученням інших оптичних методів як їхнього оптичного поглинання до флюенсів 10^{15} ел/см².

УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕТРАМИ ГЕНЕРАЦИИ ЭКСИТОННЫХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ФАЗ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КВАНТОВЫХ ЯМАХ

В. В. Михайловский, В. И. Сугаков

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

В работе [1] была предложена модель генератора экситонных импульсов в двойных полупроводниковых квантовых ямах. Идея основана на том факте, что вследствие притяжения между экситонами и конечности времени жизни экситонов однородное распределение экситонов, созданных светом, становится неустойчивым, и в квантовой яме образуются периодически расположенные островки конденсированной фазы. В зависимости от интенсивности накачки в квантовой яме могут реализоваться различные режимы: при одних интенсивностях однородное распределение плотности экситонов неустойчиво к образованию периодических структур, при других параметрах накачки могут возникать как однородные так и неоднородные распределения плотности. При наличии внешней тянущей силы возникающие структуры могут распространяться на макроскопические расстояния как набор импульсов [2]. В работе [1] рассмотрен случай, когда в результате интенсивного стационарного облучения лазером одной области приводит к возникновению потока импульсов в другой области, если она находится в бистабильном состоянии. Рассматриваемая в работе система состоит из двух областей квантовой ямы,

облученных лазером, и для разных распределений интенсивностей облучения в разных областях. В данной работе рассмотрены особенности генерации импульсов в зависимости от параметров облучения, от величины тянущей силы, от размеров областей облучения и при облучении в разных областях.

В работе найдены изменения периода структур генерируемых импульсов в зависимости от интенсивности облучения и его распределения по областям. Интенсивности выбирались такими, что они могли создавать в отдельной области однородное газовое, однородное конденсированное состояние, или приводить к неустойчивому или бистабильному состоянию. Расчеты показывают, что внешним облучением можно включать/выключать поток импульсов, можно менять его период, существует пространственная корреляция периодов в разных областях, возможно появление потоков с разными периодами.

1. V. Mykhaylovsky, V. Sugakov, I. Goliney. Journal of Nanophotonics 10 (2016) 033504.
2. V.I. Sugakov. J.Phys.: Condens. Matter 21 (2009) 275803.

ВПЛИВ РАДІАЦІЙНИХ ДЕФЕКТІВ НА ЕЛЕКТРОЛЮМІНЕСЦЕНЦІЮ GaAs_{1-x}P_x

**I. В. Петренко¹, В. П. Велещук², М. В. Завада¹, О. В. Конорева¹,
П. Г. Литовченко¹, В. П. Тартачник¹**

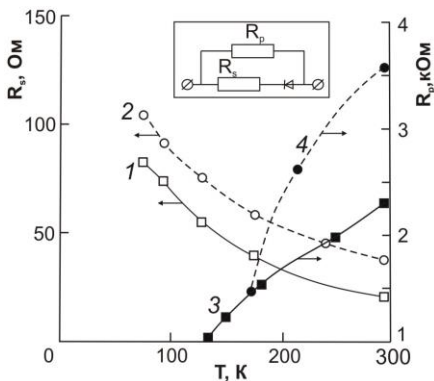
¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
Київ, Україна*

У літературі відносно мало результатів вивчення точкових дефектів у світлодіодах GaAsP, введених електронами помірних енергій ($E_e = 1 \div 2$ MeV). Обмаль інформації про вплив елементарних порушень структури на характеристики таких випромінювачів ускладнює дослідження природи складних пошкоджень, спричинених важкими частинками [1]. Тому у даній роботі ми зосередили основну увагу саме на дослідженні радіаційних порушень структури, введених 2 MeV електронами у діодах GaAs_{1-x}P_x та на деградаційних процесах, які супроводжують опромінення і стосуються основних експлуатаційних характеристик приладів.

Досліджувалися серійні світлодіодні структури GaAs_{1-x}P_x із вмістом фосфору $x = 0,45$ (помаранчеві). Опромінення електронами з енергією $E = 2$ MeV відбувалося при кімнатній температурі у межах густини потоків $\Phi = 10^{14} \div 2,64 \cdot 10^{16}$ см⁻².

На рисунку показано температурні залежності паралельного R_p та послідовного R_s опорів вихідного та опроміненних електронами зразків GaAs_{1-x}P_x. Зростання R_s у результаті опромінення є наслідком захвату основних носіїв заряду рівнями точкових радіаційних дефектів, котрі, як і у GaP, так і в GaAs,



Температурні залежності паралельного (R_p) та послідовного (R_s) опорів для вихідного (1) та опроміненних електронами ($E = 2$ MeV) помаранчевих $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$: 2 – $\Phi = 2,64 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$; 3 – $\Phi = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; 4 – $\Phi = 9,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

компенсують електропровідність р- і n- областей переходу, збільшуючи опір базової частини приладу. Зменшення R_s при зростанні температури зумовлене збільшенням концентрації носіїв у зоні провідності, оскільки їхня рухливість не зазнає помітного впливу з боку точкових радіаційних дефектів [2].

Паралельний опір R_p шунтує р-n-перехід і його величина залежить в основному від стану поверхні діода. Струми обтікання, які течуть через нього, є паразитними і погіршують роботу схем. З рисунку видно, що зростання температури приводить до збільшення R_p ; аналогічний ефект створює також зростання дози опромінення діода. Враховуючи наслідок впливу обох цих факторів, можна висловити припущення про механізм формування струмів обтікання досліджуваних об'єктів.

Відомо, що підвищення температури зразка зменшує величину струму лавинного пробігу у результаті зменшення довжини вільного пробігу носіїв. Введення радіаційних дефектів відіграє подібну роль, тому можна зробити припущення, що існування струмів обтікання у світлодіодах $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ забезпечується окремими мікропробійними каналами лавинної природи [3].

1. J. Wu et al. J. Phys. D: Appl. Phys. 48(36) (2015) 363001.
2. Ф.П. Коршунов и др. *Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах* (Минск: Наука и техника, 1978).
3. О.Ya. Olikh et al. J. Appl. Phys. 123(16) (2018) 161573.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ И РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЧАСТИЦ В ГИББСОВСКОЙ СИСТЕМЕ

В. В. Рязанов

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

В рамках гиббсовской статистической теории рассмотрен вопрос распределения размеров частиц, образующих статистическую систему, и моментов

этого распределения. Эта задача актуальна для самых разнообразных приложений. В многочисленных задачах спектроскопии, физической химии, в моделях конденсированного состояния и т.д. возникают вопросы, связанные с определением конечного размера частиц, образующих исследуемую систему. Известна, например, проблема учета конечного объема частиц в связи с исследованием уравнения состояния ядерной материи. Эффекты исключенного объема (объема, недоступного для центров частиц из-за наличия собственного конечного объема частиц) оказываются важными в исследованиях многокомпонентного адронного газа. Собственные объемы частиц играют важную роль в исследовании вязкости дисперсных систем. Небольшие изменения радиуса твердой сердцевины частиц или энергии парного взаимодействия могут приводить к заметным изменениям структуры и плотности жидкости. Знание размеров частиц важно и во многих задачах биофизики. Квазихимическая теория также учитывает конечность объема частиц. Распределение для размеров частиц и моменты этой величины определяются из вероятностных соображений [1]. Размер частиц зависит от взаимодействий в системе, от фактора сжимаемости, от числа взаимодействующих частиц, от объема системы. Выражения для среднего значения собственного объема частиц подставляются в уравнения состояния, записанные при помощи теории исключенного объема для различных выражений фактора исключения. Полученные таким образом уравнения состояния могут рассматриваться, как детализация уравнения состояния, переход на более высокий уровень описания.

1. V.V. Ryazanov. Distribution of size particles in the Gibbs system. arXiv/cond-mat/1711.08316.

ДОСЛІДЖЕННЯ ШЛЯХІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОТУЖНОГО ПРОМИСЛОВОГО ПРИСКОРЮВАЧА ПРИ НИЗЬКИХ І НАДНИЗЬКИХ СТРУМАХ ПУЧКА

**В. І. Сахно¹, Ю. В. Іванов¹, Т. В. Ковалінська¹,
О. А. Жернов², А. Г. Зелінський¹**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *НМАПО імені П. Л. Шутика, Київ, Україна*

Метою досліджень є удосконалення технічної бази радіаційних експериментів для виконання Державного завдання за темою «Розробки радіаційних технологій отримання та дослідження методів застосування гідролізних наноматеріалів для ядерної та традиційної медицини».

Вперше вирішується проблема залучення потужної промислової радіаційної техніки до досліджень тонких біологічних ефектів при опромінуванні іонізуючою радіацією медичних рідин і живої матерії. В медико-біологічних

радіаційних дослідженнях детекторами радіаційно стимульованих ефектів є фізіологічний відгук піддослідних тварин. А такі дослідження вимагають широкого діапазону регулювання параметрів радіаційних полів, суттєво ширшого, за ті, що прийняті в традиційних радіаційних технологіях. Причому, в сторону максимального низьких інтенсивностей. На промисловій техніці навіть «темновий» потік радіації від допоміжного обладнання вже є суттєвим для впливу на фізіологічний відгук піддослідних тваринах. З аналізу було встановлено перелік нових вимог до експериментальної радіаційної техніки.

Проблема. Промисловий прискорювач належить до переліку потужної радіаційної техніки і розрахований на експлуатацію в максимальному режимі. Характеристика регулювання потужних прискорювачів електронів стає лінійною лише при значимих інтенсивностях пучка, яка є надлишковою для медико-біологічних досліджень. Але конструкції промислових прискорювачів не передбачає встановлення нештатних вузлів для генерації електронів.

Необхідно було виконати низку незвичних вимог. Деякі з яких становлять непросту проблему, як для такої потужної радіаційної техніки, бо діапазон інтенсивностей радіаційних полів повинен бути в тисячі разів менший за прийняті в традиційних радіаційних технологіях. Крім того, для моделювання процесів дії радіації на біологічні об'єкти, необхідно формувати не тільки «чисті» радіаційні поля, але і їхні суперпозиції.

Результати. Досліджено шляхи досягнення мети, не пов'язані з втручанням в конструкцію прискорювача. Вивчено особливості процесів, які відбуваються в інжекторі прискорювача, з метою пошуків інших режимів його роботи. Показано, що емісійна характеристика інжектора може стати ефективним регульованим параметром в режимі отримання пучків мінімальної інтенсивності. Знайдено оптимальні режими роботи інжектора та розроблено технічні засоби для регулювання і оптимізації режиму роботи інжектора. Розроблена методика оперативного укорочування фактичного імпульсу пучка в межах імпульсу прискорюючої напруги НВЧ. Разом ці заходи сукупно забезпечують плавне регулювання інтенсивності радіаційного поля в «біологічно-му» діапазоні досліджень.

Реалізовані заходи дозволили експлуатувати потужний прискорювач електронів в режимі малих струмів пучка. Результуюча інтенсивність відповідає вимогам радіаційних медико-біологічних досліджень in-vivo.

ОСТРІВЦІ ЕЛЕКТРОННО-ДІРКОВОЇ РІДИНИ У 2D КРЕМНІЙ-ГЕРМАНІЄВИХ СТРУКТУРАХ

В. Й. Сугаков, А. А. Чернюк

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Утворення електронно-діркової рідини (ЕДР) при інтенсивному опроміненні напівпровідників давно й інтенсивно досліджується в об'ємних мате-

ріалах [1]. Явище спостерігається в появі крапель ЕДР серед екситонного газу, збудженого світлом. Перспективним є виявлення ЕДР в двовимірній (2D) системі, в якій взаємодія між зарядами проявляється інтенсивніше, ніж в об'ємному матеріалі. В останні роки фазовий перехід «екситонний газ – ЕДР» спостережувалося в напівпровідникових Si/SiGe/Si гетероструктурах [2] та в шарах кремнію, обмежених із обох сторін високими бар'єрами SiO₂ [3]. В області співіснування фаз у 2D системі ЕДР повинна формуватись у вигляді острівців.

У даній роботі розглянуто утворення та властивості системи острівців ЕДР в 2D напівпро-відниковій системі. У розрахунках використано статистичну модель, застосовану для дослідження острівців конденсованої фази екситонів у квантових ямах напівпровідників [4]. Взаємодія між острівцями відбувається через дифузійні поля екситонів: захоплення екситонів певним острівцем впливає на густину екситонів біля сусідніх острівців і, отже, на їхній ріст. Внаслідок скінченного часу життя екситонів і процесів рекомбінації електронів і дірок в острівцях стаціонарна структура може існувати лише при наявності накачки, яка створює екситони. Такі структури називають дисипативними.

Вивчається утворення острівців в областях, обмежених на площині квантової ями. Обмежену систему можна створити, освітлюючи квантову яму та створюючи екситони лише в певній області. Досліджено острівці ЕДР в таких системах:

1. *Напівпровідникова квантова яма, в якій збудження екситонів відбувається в області у вигляді смужки*, на ширині якої може утворитися тільки один острівець, внаслідок чого острівці можуть розміщуватися лише в напрямку смуги. Острівці утворюються при накачках, вищих деяких порогових значень. Радіус острівців із ростом накачки зростає, а відстань між острівцями збільшується.

2. *Область опромінення площини поверхні має форму диска*. Залежно від інтенсивності опромінення та радіуса диска змінюється кількість, розподіл і взаємне розташування острівців. Острівець може бути розміщений в центрі області опромінення. Острівці можуть знаходитись поблизу периметра кола, або і в центрі, і поблизу периметра, можливе розміщення ЕДР у вигляді кільця поблизу периметра. Зі збільшенням радіуса диска кількість острівців поблизу периметра зростає.

1. Н.Н. Сибельдин. УФН 187 (2017) 1236.
2. Т.М. Бурбаев и др. Письма в ЖЭТФ 98 (2013) 926.
3. N. Pauc et al. Phys. Rev. B 72 (2005) 205324.
4. V.I. Sugakov. Phys. Rev. B 76 (2007) 115303.

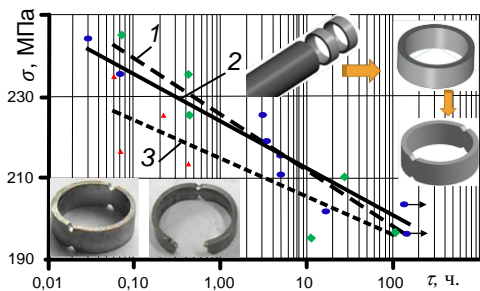
ВЛИЯНИЕ ОКСИДИРОВАНИЯ ЦИРКОНИЕВОГО СПЛАВА Zr-1 %Nb НА ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ $T = 380^{\circ}\text{C}$

**В. С. Труш¹, М. И. Тихоновский²,
В. Н. Федирко¹, О. Г. Лукьяненко¹, П. И. Стоев²,**

¹ Физико-механический институт им. В. Карпенко НАН Украины,
Львов, Украина

² Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий
ННЦ «ХФТИ» НАН Украины, Харьков, Украина

Циркониевые сплавы широко применяются в качестве конструкционного материала в атомной промышленности для изготовления оболочек топливных элементов ТВЭЛов. На служебные свойства циркония значительно влияет кислород [1 - 3]. Химико-термическая обработка является одним из эффективных методов управления характеристиками приповерхностных слоев металла, которые влияют на физико-механические свойства изделий. Так, расширение представлений о влиянии химико-термической обработки на длительную прочность образцов-колец, вырезанных из ТВЭЛЬных трубок, при рабочей температуре ($T = 380^{\circ}\text{C}$) является актуальным. Цель работы – установить влияние обработки в кислородсодержащей газовой среде при температуре $T = 580^{\circ}\text{C}$ в течение $\tau = 3$ ч, при разном разрежении ($R1 - P = 1,33 \times 10^{-2}$ Па.; $R2 - (P = 1,33 \text{ Па}, \tau = 0,5 \text{ ч.}) + (P = 1,33 \cdot 10^{-2} \text{ Па}, \tau = 2,5 \text{ ч.})$; $R3 - P = 1,33 \text{ Па}$) на длительную прочность при температуре $T = 380^{\circ}\text{C}$ образцов-колец из циркониевого сплава Zr - 1 %Nb.



Длительная прочность образцов-колец из циркониевого сплава Zr - 1 % Nb на воздухе при температуре $T = 380^{\circ}\text{C}$ после обработок по режимам: 1 – R1, 2 – R2, 3 – R3.

Установлено, что свойства образцов-колец при длительной выдержке при температуре $T = 380^{\circ}\text{C}$ на воздухе чувствительны к наличию модифицированных приповерхностных слоев металла. Так разрушающие напряжения образцов-колец, обработанных по режиму R2, находятся на уровне характеристик после стандартной термической обработки ТВЭЛЬных трубок (режим R1). С другой стороны, образцы-кольца, обработанные по режиму R2, выдерживают более высокие разрушающие напряжения в сравнении с образцами,

которые обработаны по режиму R3. Причиной различий в разрушении образцов-колец является формирование приповерхностного слоя металла с различным градиентом твердости по сечению, что и влияет на зависимость разрушающих напряжений от времени. Для обстоятельного изучения данного факта в дальнейшем будут проведены углубленные металлофизические исследования.

1. S. Banerjee, M.K. Banerjee. Materials Science and Materials Engineering. (2016) doi: 10.1016/B978-0-12-803581-8.02576-5.
2. D. Lee, P.T. Hill. Journal of Nucl. Mater. 60 (1976) doi: 10.1016/0022-3115(76)90170-7.
3. A.T. Motta, A. Couet, R. J. Comstock. Annual Review of Materials Research. 45 (2015) doi: 10.1146/annurev-matsci-070214-020951

ПРО ОБМЕЖЕННЯ У ВИКОРИСТАННІ КЛАСИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МАРКУСА ТА МІЛЛЕРА – АБРАХАМСА В ОРГАНІЧНИХ НАПІВПРОВІДНИКАХ

І. І. Фіщук

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Температурний діапазон, в якому можна застосовувати класичну двох вузлову модель Маркуса [1] при обчисленні ефективної рухливості в енергетично неупорядкованих органічних напівпровідниках залежить від відношення E_a/δ , де E_a - енергія активації полярону, δ - півширина розподілу Гауса енергії локалізованих станів в неупорядкованій системі. При $E_a/\delta > 0,65$ температурний діапазон досить широкий. При зменшенні цього відношення температурний діапазон різко скорочується, залишаючись тільки на високо-температурному краю. Це означає, що модель Маркуса застосовна тільки тоді, коли в системі переважають між вузлові переходи в нормальній (не інвертованій) області.

Двовузлова модель Міллера - Абрахамса [2], яка використовується для обчислення ефективної рухливості в енергетично неупорядкованих органічних напівпровідниках при низьких температурах правильно описує температурну залежність рухливості. Проте дає занижене приблизно на порядок значення її величини. Це обумовлено тим, що в системі присутня значно частина пар вузлів з невеликою різницею енергій. До цих пар вузлів модель Міллера - Абрахамса не застосовна. Запропоновано узагальнену модель, яка описує між вузлові переходи при довільній різниці енергій. В цій моделі ймовірність між вузлового стрибка визначається виразом [3]

$$W_{ji} = W_0 \frac{\frac{|\varepsilon_j - \varepsilon_i|}{2k_B T}}{\sinh\left(\frac{|\varepsilon_j - \varepsilon_i|}{2k_B T}\right)} \exp\left(-\frac{\varepsilon_j - \varepsilon_i}{2k_B T}\right). \quad (1)$$

Тут ε_j та ε_i - енергії пари вузлів, W_0 - коефіцієнт. При $|\varepsilon_j - \varepsilon_i|/k_B T \gg 1$ формула (1) переходить у класичний вираз Міллера - Абрахамса. Отриманий з допомогою (1) вираз для ефективної рухливості також правильно описує її температурну залежність, але дає на порядок більше значення величини рухливості. Це важливо при порівнянні результатів з даними розрахунків величини рухливості з перших принципів.

Таким чином класичні вирази Маркуса і Міллера - Абрахамса для міжвузлового стрибка носіїв заряду мають обмеженість при застосуванні їх для обчислення ефективної рухливості носіїв заряду в енергетично неупорядкованих органічних напівпровідниках.

1. R.A. Marcus. Rev. Mod. Phys. 65 (1993) 599.
2. A. Miller, E. Abrahams, Phys. Rev. 120 (1960) 745.
3. I.I. Fishchuk et al. Phys. Rev. B 65 (2002) 125201.

ПРИНЦИП ВИЗНАЧЕННЯ СПЕКТРА ПРОТОНІВ, ОТРИМАНИХ НА ЛАЗЕРНИХ ПРИСКОРЮВАЧАХ ЗА ДОПОМОГОЮ КРЕМНІЄВИХ P-I-N ДІОДІВ

І. Є. Анохін¹, А. Б. Розенфельд²

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Центр медичної радіаційної фізики, Університет Вуллонгону,
Вуллонгонг, Австралія*

Використання надпотужних лазерів для отримання контрольованих протонних пучків та їхнього застосування в різних областях – область досліджень, що інтенсивно розвивається протягом останніх 20 років [1 - 3]. Вважається, що такі лазери можуть бути використані в якості альтернативи РЧ прискорювачам для отримання пучків з відповідними характеристиками, які необхідні для лікування раку [4].

У роботі теоретично досліджено застосування тонких кремнієвих планарних р-і-n діодів для визначення спектра пучків протонів, отриманих за допомогою лазерних прискорювачів. Розроблено метод відновлення протонного

спектра шляхом аналізу форми імпульсу струму від часу для різних відстаней між джерелом протонів та положенням детектора. Було змодельовано залежність відгуку детектора від часу для ультратонкого надшвидкого кремнієвого діода.

1. K. Ledingham, W. Galster. *New Journal of Physics*. 12 (2010) 045005.
2. H. Daido et al. *Rep. Prog. Phys.* 75 (2012) 056401.
3. A. Macchi, M. Borghesi, M. Passoni. *Rev. Mod. Phys.* 85 (2013) 751.
4. H. Owena, A. Lomax, S. Jolly. *Nucl. Inst. Meth. A*809 (2016) 96.

Тези доповідей з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу

ОСОБЛИВОСТІ ЗАПАЛЮВАННЯ НЕСАМОСТІЙНОГО ДУГОВОГО РОЗРЯДУ В ПАРАХ ТАНТАЛУ

А. Г. Борисенко, Е. Г. Костін, О. А. Рокицький, О. А. Федорович

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Останнім часом значно збільшився інтерес до можливостей несамостійного дугового розряду в парах матеріалу анода. Цей інтерес стимулюють дослідження, які доводять можливості створення за допомогою даного типу електричного розряду безкрапельних потоків плазми різних матеріалів. Збільшує відповідний інтерес до нього і той факт, що даний тип розряду може також ефективно використовуватися для розробки джерел іонів різних твердофазних матеріалів для прискорювачів та інших потреб. Пряме використання найбільш поширеного типу дугового розряду, розряду в парах матеріалу катода, не завжди можливе оскільки наявні фізичні процеси є такими, що роблять неминучою присутність в створюваних ним потоках плазми краплинно-кластерної фази матеріалу катода. Частка крапель в загальному переносі маси потоком може перевищувати 90 % [1]. Фільтрація таких потоків не лише частково сприяє видаленню краплинної фази, але і призводить до значного послаблення інтенсивності потоків плазми на виході з цих джерел [2]. У той же час, несамостійний дуговий розряд в парах матеріалу анода характеризується дифузною прив'язкою розряду на аноді і випаровуванням робочого матеріалу з широкої зони [3, 4]. Як свідчать експерименти, режим локального випаровування робочого матеріалу з поверхні анода в цьому типі розряду практично відсутній.

Тантал відносяться до групи тугоплавких конструкційних матеріалів, які знайшли широке застосування в ядерній енергетиці. Він є перспективним також при застосуванні в якості захисних покриттів. Тому розробка джерел потоків плазми парів танталу є важливим і актуальним завданням. У роботі представлені результати попередніх досліджень джерела потоків плазми твердофазних матеріалів на основі інтенсивного несамостійного дугового розряду в парах танталу і в парах нікелю. Дослідження були виконані з метою розробки нових методів ефективною генерації безкрапельних і високоіонізованих потоків плазми конструкційних металів ядерної енергетики. В експериментах були досліджені вольт-амперні характеристики розрядів, встановлені мінімальні потужності запалювання вакуумного дугового розряду в парах танталу та величини необхідної мінімальної потужності розрядів за умови їхнього стабільного горіння. Визначено значення плаваючого потенціалу ізольованого зонда в створюваних плазмових потоках та показано, що

плазмові потоки мають компенсований об'ємний заряд. Тобто, що утворювані потоки можуть бути використані для осадження плівок не лише на металеві та напівпровідникові, але й на діелектричні підкладки. У роботі також наведені дані які свідчать, що розряд в парах матеріалу аноду здатен забезпечувати швидкості наплення плівок, які є співставними з можливостями вакуумної катодної дуги.

1. В.М. Хороших П. Капельная фаза эрозии катода стационарной вакуумной дуги. Физическая инженерия поверхности. 2(4) (2004) 200.
2. A. Anders. *Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation* (New York: Springer, 2008).
3. A.G. Borisenko, V.A. Saenko, V.A. Rudnitsky. Nonself-sustained arc discharge in anode material vapors. IEEE Trans Plasma Science 27(4) (1999) 877.
4. A.G. Borisenko, V.A. Saenko, J.S. Podziray. Destruction of the arc discharge in vapors of the anode material by the gas entering into the vacuum chamber. In: Proc. Intern. Conf. on Plasma of Low Temperature Plasma, PLTP-03, Kyiv, Ukraine, May 11 - 15 (Kyiv, 2003) 6.

ОПТИЧНА СПЕКТРОСКОПІЯ ТЕРМІЧНОЇ БАГАТОКОМПОНЕНТНОЇ ПЛАЗМИ З ДОМІШКАМИ ПАРІВ МІДІ ТА НІКЕЛЮ

**А. М. Веклич¹, М. М. Клещич¹, С. О. Фесенко¹,
Л. О. Крячко², В. Ф. Борецький¹**

*¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем, Київ, Україна*

*² Інститут проблем матеріалознавства імені І. М. Францевича НАН України,
Київ, Україна*

Композити та сплави на основі міді, які в своєму складі містять ще й домішки нікелю, широко застосовуються для виготовлення матеріалів контактів електротехнічних пристроїв [1]. Кількість парів електродного походження в каналі дугового розряду, який виникає під час процесів комутації електричного кола, залежить як від структури та складу електродів, так і від параметрів плазми. На сьогоднішній день вже розроблено методики дослідження плазми електродугового розряду між такими електродами. Вивчення ерозійної стійкості даних матеріалів методами оптичної спектроскопії раніше проводилося тільки із залученням спектральних ліній Cu I. Тому, з метою розширення експериментальних можливостей методики оптичної діагностики плазми електричної дуги з домішками парів міді, необхідно долучити і спектральні лінії Ni I [2]. Як модельне джерело доцільно використати плазму електродугового розряду між однокомпонентними електродами. У такій конфігурації електричної дуги один електрод обов'язково повинен бути виготовлений з нікелю, а інший – з міді, атомні константи і спектральні лінії якої добре

вивчені [3].

У сучасних технологіях електрозварювання, нанесенні покриттів та електроерозійної обробки металів використовується дуговий розряд постійного струму. Тому раціонально встановити, як полярність прикладеної напруги на дузі впливає на інтенсивність ерозійних процесів в робочому шарі електродів. А саме, з поверхні матеріалу катода чи аноду відбувається переважно емісія парів металів в розрядний проміжок.

Виконано комплекс експериментальних досліджень плазми вільно існуючого електродугового розряду струмом 3,5 А та 30 А між однокомпонентними Cu та Ni електродами, які підключались до джерела живлення різної полярності. Повітря при атмосферному тиску використано як плазмо утворюючий газ. Дуговий розряд запалювався між торцевими поверхнями не охолоджуваних електродів циліндричної форми. Розрядний проміжок становив 8 мм, а досліджувані електроди, виготовлені з міді (нижній) та нікелю (верхній), розміщувалися вертикально.

Методами оптичної спектроскопії здійснено вимірювання радіальних розподілів температури плазми в різних режимах роботи електричної дуги. Діагностику плазми з домішками парів міді та нікелю реалізовано із залученням Cu I та Ni I.

У випадку домінуючого квадратичного ефекту Штарка з півширини спектральної лінії Cu I 515.3 нм визначено електронну концентрацію плазми електродугового розряду струмом 30 А. Із розв'язку рівняння енергетичного балансу Еленбааса - Геллера обчислено електронну концентрацію плазми в каналі дуги струмом 3,5 А.

На основі одержаних радіальних розподілів температури та електронної концентрації здійснено розрахунок рівноважного складу плазми в припущенні локальної термодинамічної рівноваги. Встановлено, що зміна полярності живлення електродугового розряду (силою струму як 3,5 А, так і 30 А) при незмінному розташуванні Cu та Ni електродів призводить до зміни співвідношення між кількістю парів міді та нікелю в плазмі. Як впливає з отриманих результатів, ерозія матеріалу відбувається переважно з того електрода, який використовується як катод.

1. M. Akbi. Intern. Journal of Chem., Mol., Nucl., Mater. and Metall. Eng. 9 (2015) 296.
2. A.N. Veklich, M.M. Kleshich, V.V. Vashchenko, I.O. Kuzminska. PAST 98 (2015) 215.
3. I.L. Babich, V.F. Boretskij, A.N. Veklich. AIP Conf. Proc. 938 (2007) 252.

ВПЛИВ НЕОДНОРІДНОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ГЕЛІКОННИЙ РОЗРЯД, ЗБУДЖУВАНИЙ РІЗНИМИ АНТЕНАМИ

В. Ф. Вірко, Ю. В. Вірко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Досліджено вплив неоднорідного магнітного поля на геліконний розряд, збуджуваний на азимутально симетричній моді геліконних хвиль $m = 0$ індукційними антенами двох типів: двовитковою «петльовою» антеною, яка зовні охоплює циліндричну кварцову розрядну камеру, та «планарною» антеною, яка являє собою плоску спіраль, розміщену на діелектричному вікні в торці камери. Свого часу було виявлено, що в багатьох випадках використання неоднорідного магнітного поля, яке зростає з віддаленням від антени, в кілька разів збільшує концентрацію плазми в геліконному розряді з *петльовою антеною* при тій самій вкладеній ВЧ потужності. *Планарна* антена має істотні переваги для технологічних застосувань і її удосконалення з використанням неоднорідного поля мало б важливе значення. Наявні в літературі дані відносно впливу неоднорідного поля на розряд з планарною антеною одержані в різних експериментальних умовах і є неоднозначними. Метою роботи було порівняння впливу неоднорідного магнітного поля на петльову та планарну антени в однакових умовах в області слабких (< 10 мТ) магнітних полів. Досліди проводились в аргоні при тиску 0,65 Па в магнітному полі 4,5 мТ при ВЧ потужності ≤ 1 кВт на частоті 13,56 МГц. За допомогою плоского лемгмюрівського зонда вимірювались радіальні розподіли параметрів плазми при збудженні розряду антенами обох типів як в однорідному, так і в неоднорідному полі. За допомогою діамантної петлі вимірювався імпульс е.р.с. індукції, що виникав внаслідок зміни магнітного поля при вимиканні розряду.

Показано, що коли розряд утворюється *петльовою антеною*, яка вводить ВЧ енергію через бокову границю плазми, перпендикулярно до зовнішнього магнітного поля, іонізація зосереджена на периферії розряду. Внаслідок контакту зони генерації плазми зі стінкою виникає крайовий дрейфовий струм, який обумовлює парамагнітні властивості плазми. В цих умовах, накладання неоднорідного поля призводить до відокремлення зони генерації плазми від стінки, що зменшує втрати іонізуючих електронів і супроводжується зростанням температури на відстані 1 ... 2 см від стінки до 6,5 еВ, тоді як на осі розряду вона становить лише 2,3 еВ. Внаслідок різниці температур концентрація іонізуючих електронів біля стінки в десятки разів перевищує їхню концентрацію у внутрішній області плазми, що призводить до збільшення іонізації, і погонна концентрація плазми зростає по всьому перерізу розряду. Плазма при цьому стає діаманетиком.

При збудженні розряду *планарною антеною* вздовж магнітного поля, як в однорідному, так і в неоднорідному полі основна іонізація відбувається у внутрішній області розряду. В обох випадках плазма виявляє діамантні вла-

стивості, що вказує на відсутність контакту області генерації плазми зі стінкою. У цих конкретних умовах накладання неоднорідного поля не впливає на баланс іонізуючих електронів і не збільшує концентрації плазми.

Одержані результати підтверджують, що однією з причин підвищення концентрації плазми в геліконному розряді з неоднорідним магнітним полем є зменшення втрат іонізуючих електронів на стінках розрядної камери.

1. V.F. Virko, V.M. Slobodyan, K.P. Shamrai, Yu.V. Virko. Helicon Discharge excited by a Planar Antenna in bounded Volume. Problems of Atomic Sci. Technol. Series: Plasma Physics. 6 (2014) 130.

ЗАЛЕЖНІСТЬ НАПРУГИ АВТОЗМІЩЕННЯ ВІД РОДУ ГАЗУ ТА ПАРАМЕТРІВ ВЧ РОЗРЯДУ НА ПЛАНАРНОМУ ПХР З КЕРОВАНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

В. В. Гладковський, Б. П. Полозов, О. А. Рокицький, О. А. Федорович

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Досить важливим параметром в процесі плазмохімічної обробки матеріалів виступає напруга автозміщення. Розуміння особливостей утворення даного потенціалу є важливим для модифікації поверхонь матеріалів. Як відомо з робіт [1, 2], постійна складова напруги автозміщення, при відсутності магнітного поля, рівна амплітуді змінної напруги і визначає середню енергію іонів, які взаємодіють з оброблюваним матеріалом. Зміна даного потенціалу викликає зміну енергії іонів, і як наслідок, призводить до зміни результатів плазмохімічного травлення.

Для високочастотних розрядів без магнітних полів напруга автозміщення зростає пропорційно з різницею площ активного й заземленого електродів [3]. Напруга автозміщення залежить від роду газу, його тиску та потужності ВЧ розряду. Однак поведінка даного потенціалу в плазмохімічних реакторах з керованими магнітними полями є мало вивчена.

У роботі представлено результати досліджень залежності напруги автозміщення від роду газу, його тиску, потужності ВЧ розряду та напруженості магнітного поля. Дослідження проводилися для газів N_2 , CH_4 , H_2 , SF_6 , CF_4 та Ag при наступних параметрах: напруженість магнітного поля змінювалася в діапазоні від 0 А/м до $3,5 \times 10^4$ А/м, вихідна потужність ВЧ генератора від 100 Вт до 500 Вт, тиск робочих газів від 10^{-3} Тор до 10^{-1} Тор.

Отриманий результат є досить цікавим та неоднозначним. При рівномірному розподілі магнітного поля в зоні розряду для всіх використовуваних газів можна зазначити аналогічні залежності напруги автозміщення від напруженості магнітного поля, а саме, з ростом напруженості магнітного поля спостерігається зменшення напруги автозміщення. Однак для кожного робочого газу спостерігаються індивідуальні особливості поведінки напруги автозміщення, що не властиві іншим газам.

При потужності генератора 100 Вт і напруженості магнітного поля до $1 \cdot 10^4$ А/м запалити ВЧ розряд в H_2 не вдається. Змінивши газ на CF_4 та SF_6 при тій же потужності в усьому досліджуваному інтервалі напруженості магнітного поля (0 А/м до $3,5 \cdot 10^4$ А/м) ВЧ розряд не вдається запалити. Для інших використовуваних газів проблем з утворенням розряду при 100 Вт не спостерігалось.

Ще одна з особливостей напруги автозміщення проявляється в наступному. При роботі з H_2 коли напруженість поля становить $3 \cdot 10^3$ А/м спостерігається різкий ріст напруги автозміщення. Змінивши газ на більш складний, а саме SF_6 , у даній точці спостерігається різке зменшення напруги автозміщення. При ВЧ розряді в CF_4 спостерігається подібний провал напруги автозміщення, але при напруженості поля $5 \cdot 10^4$ А/м. При роботі з Ar спостерігається чисто лінійна залежність напруги автозміщення від напруженості магнітного поля.

Дослідження залежності напруги автозміщення від тиску мають також спільну ознаку – з ростом тиску від 10^{-3} Тор до 10^{-2} Тор спостерігається падіння потенціалу автозміщення, в діапазоні 10^{-2} Тор до $6 \cdot 10^{-2}$ Тор спостерігається стабільна зона. При подальшому рості тиску до 10^{-1} Тор спостерігається незначний ріст потенціалу зміщення.

Одержані експериментальні дані залежності напруги автозміщення можуть бути обумовлені особливостями хімічних зв'язків молекул та величиною їхньої енергії.

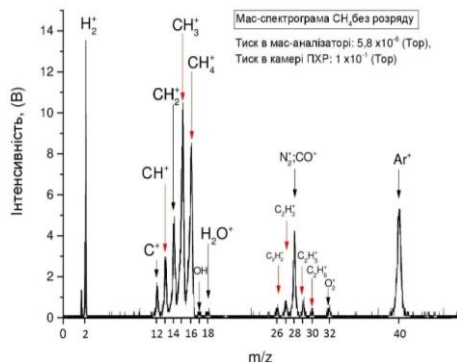
1. О.Д. Парфенов. *Технология микросхем* (Москва: Высш. школа, 1986) 218 с.
2. Е.Г. Шустин и др. ВАНТ 4 (2008) 169.
3. Н. R. Koenig, L.I. Maissel. IBM JRD. 14(2) (1970) 168.

МАС-СПЕКТРОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ПЛАЗМИ ВЧ РОЗРЯДУ В МЕТАНІ НА ПЛАНАРНОМУ ПХР З КЕРОВАНИМ МАГНІТНИМ ПОЛЕМ

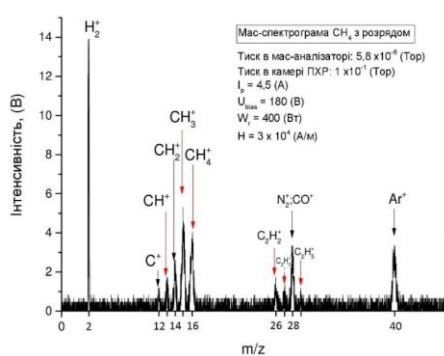
В. В. Гладковський, Б. П. Полозов, О. А. Рокицький, О. А. Федорович

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

У даній роботі наведено результати досліджень особливостей утворення іонів фрагментів молекули метану залежно від зміни електрофізичних параметрів високочастотного (ВЧ) розряду. Дослідження проводилися на плазмохімічному реакторі, опис якого приведено в роботі [1]. Отримано мас-спектри в області масових чисел з $m/z = 1 - 40$ а.о.м. з використанням монопольного мас-спектрометра МХ-7304А. Залежно від зміни параметрів розряду спостерігається динаміка мас-спектра метану.



a



б

Мас-спектр метану: *a* - без розряду; *б* - з розрядом.

Даний спектр містить вуглеводневі сполуки і найбільш імовірним буде наявність наступних сполук: C^+ (m/z 12), CH^+ (m/z 13), CH_2^+ (m/z 14), CH_3^+ (m/z 15), CH_4^+ (m/z 16) [2].

Однак можна бачити, що крім основних очікуваних сполук на спектрі присутні більш складніші молекули в діапазоні мас від 26 а.о.м. до 30 а.о.м. $C_2H_2^+$ (m/z 26), $C_2H_3^+$ (m/z 27), N_2^+ (m/z 28), $C_2H_5^+$ (m/z 29), $C_2H_6^+$ (m/z 30). Утворення даних молекул може бути наслідком недостатньої чистоти використаного газу.

Проведено дослідження динаміки мас-спектра метану залежно від зміни одного з параметрів ВЧ розряду при постійних інших його параметрах: при зміні напруженості магнітного поля; при різних напругах керованого зміщення; різних струмах ВЧ розряду; в сумішах з іншими газами (H_2 , N_2 , Ar) та різних тисках.

1. В.В. Гладковский і др. Влияние параметров ВЧ-разряда и параметров нагревателя на температуру подложки в плазмохимическом реакторе «Алмаз» для синтеза углеродных алмазоподобных пленок. Технология и конструирование в электронной аппаратуре 5-6 (2014) 39.
2. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>

МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОДІЛІВ ШВИДКИХ ІОНІВ НА ПЛАСТИНІ СЦИНТИЛЯЦІЙНОГО ДЕТЕКТОРА В ТОКАМЦІ ЖЕТ

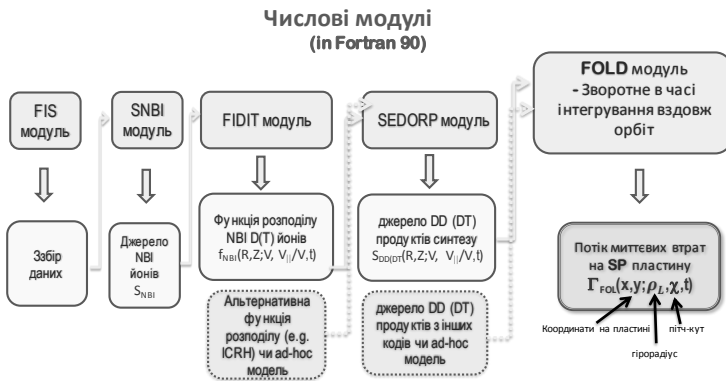
В. Я. Голобородько¹, К. Шопф²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Інститут теоретичної фізики Інсбруцького університету, Інсбрук, Австрія

Розроблено числовий алгоритм розрахунків розподілів потоків заряджених продуктів термоядерного синтезу по пластині сцинтиляційного детектора

на токамаці JET. Вказаний алгоритм було реалізовано у вигляді пакета числових програм. Серед них, зокрема, модуль для автоматичного зчитування даних про рівновагу плазмової конфігурації, параметрів плазми та інжекції (FIS). Створено модуль для обчислення іонізації інжекттованих нейтралів та просторово-швидкісних розподілів джерела іонів інжекції (SNBI). Розроблено модуль для розв'язання дрейфового кінетичного рівняння Фокера - Планка на функцію розподілу інжекттованих іонів (FIDIT). Обчислена функція розподілу в комбінації з Максвелівською функцією розподілу іонів основної плазми використовується в наступному модулі розробленому для обчислення просторово-швидкісних розподілів джерела заряджених продуктів синтезу (SEDORP). У наступному модулі (FOLD) проводиться зворотне в часі інтегрування джерела швидких іонів вздовж траєкторій, що потрапляють на пластину скінтіляційного детектора, для отримання розподілу їхнього потоку. Описана процедура схематично представлена на малюнку наведеному нижче.



У числових модулях передбачена можливість використання функцій розподілу та джерел швидких іонів обчислених іншими кодами або модельних. Отримані результати записуються в базу даних на токамаці JET в форматі, що дає змогу проводити візуалізацію та аналіз їх. Робота виконана в рамках проекту консорціуму EUROfusion WPJET4 (SPU) котрий спрямовано на модернізацію скінтіляційного детектора для використання в наступній дейтерій-третієвій компанії на токамаці JET.

ЗАДАЧА МИЛНА – ДЛЯ ПЛАЗМИ

В. В. Горин

Задачу знаходження функції розподілення (ФР) частиц вблизи поглотючої стінки в отсутствии силового поля называють задачей Милна [1]. Для електронів плазми, в отличие от нейтронів и света, преобладает рассеяние на малые углы, вследствие чего, вместо больцмановского интеграла столкно-

вений для упругих шаров в кинетическом уравнении следует применить диффузионный интеграл столкновений электронов с атомами газа – дифференциальный оператор 2-го порядка по косинусу угла наклона скорости к нормали. В безразмерной форме задача имеет вид:

$$f(x, \xi) \geq 0: \quad \xi \frac{\partial f}{\partial x} - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial \xi} (1 - \xi^2) \frac{\partial f}{\partial \xi} = 0,$$

$$0 < x < \infty, \quad -1 < \xi < +1; \quad \xi = \cos \vartheta. \tag{1}$$

$$f(0, \xi) = 0, \quad \xi > 0; \tag{2}$$

$$f(x, \xi) \rightarrow \frac{1}{2}(x - \xi + c), \quad x \rightarrow \infty. \tag{3}$$

Классическая задача Милна, с рассеянием упругих шаров, сводится к интегральному уравнению типа Винера-Хопфа для плотности частиц $n(x) = \int_{-1}^1 d\xi f(x, \xi)$, которая в простейшем случае изотропной индикатрисы рассеяния решается аналитически [2].

Задача для электронов (1) таким методом не решается. Здесь предложен метод разложения ФР по полиномам Лежандра. Результаты решения и сравнение с классической задачей приведены на рис. 1, 2.

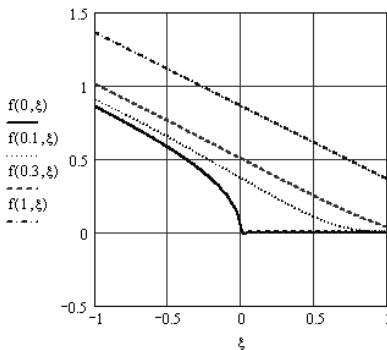


Рис. 1. ФР электронов у поглощающей стенки.

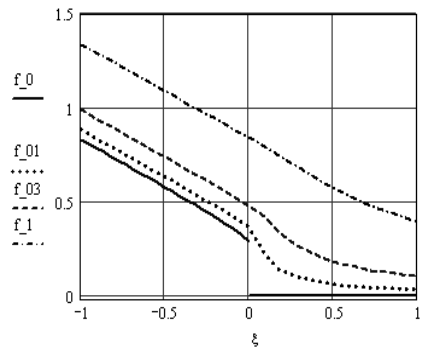


Рис. 2. ФР нейтронов у поглощающей стенки.

При получении рис. 1 использовано разложение по базису в 102 полинома Лежандра. Поведение плотности электронов у поглощающей стенки оказалось аналогичным классическому: близко к линейному росту вглубь объема, с константой Хопфа, близкой к известному значению 0,71. Отсутствие электрического поля в тлеющем разряде может быть вблизи анода, где электриче-

ское поле может иметь оба направления: к аноду и от него; в частности, и быть равным нулю. Плотности электронов и ионов при этом равны, поток электронов превосходит поток ионов на анод из-за разной тепловой скорости. Ионы на стенке анода могут как отражаться внутрь объёма плазмы, так и рекомбинировать с частью электронов на его поверхности.

1. E.A. Milne. Mon. Notices Roy. Astron. Soc. 81 (1921) 361.
2. E. Hopf. *Mathematical problems of radiative equilibrium* (Cambridge Cambridge [England] University Press, 1934).

АЛГОРИТМ РУНГЕ-КУТТА ДЛЯ ІНТЕГРУВАННЯ СТОХАСТИЧНИХ РІВНЯНЬ НЕОКЛАСИЧНОЇ ДИФУЗІЇ ІОНІВ

А. А. Гурин

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

На основі теорії дифузійних марківських процесів розглянуто систему стохастичних дрейфових рівнянь руху заряджених частинок в тороїдальній плазмі, що відповідають дрейфовій теорії з кулонівськими зіткненнями в загальному вигляді. Для ізотропної плазми в аксіально-симетричному магнітному полі сформульовано систему рівнянь для кінетичної енергії, підпараметра та класичної двовимірної дифузії частинок в полоїдальному перерізі плазмового шнура. Ця модель коректно враховує дрейф захоплених і пролітних частинок та радіальний броунівський рух, що призводить до ефектів неокласичної дифузії. Подано алгоритм чисельного інтегрування типу Мільштейна 1-го порядку, який не потребує обчислення похідних для кінетичних коефіцієнтів, тобто належить до класу Рунге - Кутта. Алгоритм виключає також необхідність обчислення повторних континуальних інтегралів Іто при моделюванні двовимірної полоїдальної дифузії, тому може служити зручною основою для моделювання прискореної неокласичної дифузії плазми методом Монте-Карло, ігноруючи аналітичні моделі «бананових» траєкторій частинок в тороїдальній плазмі.

LANDAU DAMPING OF ALFVÉNIC MODES IN STELLARATORS

Ya. I. Kolesnichenko¹, A. Könies², A. V. Tykhyy¹

¹ *Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

² *Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Greifswald, Germany*

It is found that the presence of the so-called non-axisymmetric resonances of wave-particle interaction in stellarators (which are associated with the lack of axial symmetry of the magnetic configuration [1]) may have a strong stabilizing influence through Landau mechanism on the toroidicity-induced Alfvén Eigenmodes (TAE) and isomon modes (Alfvénic modes with equal poloidal and toroidal mode

numbers and frequencies in the continuum region) destabilized by the energetic ions. These resonances involve largest harmonics of the equilibrium magnetic field of stellarators and lead to absorption of the mode energy by thermal ions in the medium pressure plasma, in which case the effect is large. On the other hand, at the high pressure attributed to, e.g., a Helias reactor, thermal ions can interact also with high frequency Alfvén gap modes (Helicity-induced Alfvén Eigenmodes (HAE) and mirror-induced Alfvén Eigenmodes (MAE)), leading to a considerable damping of these modes. Only resonances with passing particles are considered. The developed theory is applied to various modes in the Wendelstein 7-X stellarator and a Helias reactor, and a TAE mode in the LHD helical device.

1. Ya.I. Kolesnichenko et al. Phys. Plasmas 9 (2002) 517.

АНАЛІЗ МОЖЛИВОГО ПОКРАЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМИ У ТОКАМЦІ ЖЕТ ЗАВДЯКИ НАПРАВЛЕНОМУ ВСЕРЕДИНУ ПРОСТОРОВОМУ КАНАЛЮВАННЮ ЕНЕРГІЇ ШВИДКИХ ІОНІВ

**Я. І. Колесниченко¹, В. В. Луценко¹, М. Г. Тищенко¹,
Г. Вейсен², Ю. В. Яковенко¹**

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Плазмовий центр Швейцарії, Лозанна, Швейцарія

У роботі вивчено вплив на параметри плазми просторового каналювання енергії альфа-частинок, які є продуктами реакцій синтезу, а саме просторового перенесення енергії швидких іонів дестабілізованими власними модами та передачі цієї енергії частинкам основної плазми [1]. Аналіз проведено в припущенні, що альфа-частинки, які знаходяться на периферії плазми збуджують множинні швидкі магнітозвукові моди, що мають глобальну радіальну структуру. Розглянуто швидкі магнітозвукові моди з частотами близькими до циклотронних гармонік альфа-частинок. Знайдено, що ці швидкі магнітозвукові моди можуть бути в резонансі з іонами та електронами основної плазми, що знаходяться в центральній області плазми, передаючи енергію альфа-частинок в цю область. Це покращує загальне утримання плазми. Окрім того, це призводить до аномального іонного нагрівання, коли іонне гамування швидких магнітозвукових мод переважає електронне. Порахована швидкість згасання розглянутих хвиль. Показано, що досить малі амплітуди хвиль є достатніми щоб забезпечити отримання хвилями і передачу ними поперек магнітних поверхонь стільки густини енергії, скільки необхідно для просторового каналювання значної частки термоядерної енергії. Розвинену теорію просторового каналювання енергії, направленою всередину плазми, застосовано до дейтерій-тритієвих експериментів на ЖЕТ, які проводились під час DTE1 кампанії, де, ймовірно, мали місце аномальне іонне нагрівання та покращення утримання плазми.

1. Ya.I. Kolesnichenko, Yu.V. Yakovenko, V.V. Lutsenko Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 075001.

TEMPERATURE GRADIENT DRIVEN ALFVÉN INSTABILITY PRODUCING INWARD ENERGY FLUX IN STELLARATORS

Ya. I. Kolesnichenko, A. V. Tykhyy

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

Destabilizing influence of plasma inhomogeneity on Alfvén eigenmodes in stellarators is considered.

It is found that the plasma diamagnetic frequency can strongly increase in a plasma with inhomogeneous temperature.

This occurs when the resonance velocity of the wave-particle interaction exceeds the particle thermal velocity, increasing the role of superthermal particles. Then Alfvén eigenmodes can be destabilized even in the absence of the energetic ion population. It is shown that in the case of the temperature distribution with large gradient at the periphery, the destabilized mode can channel the energy from the peripheral plasma region to the inner region. The analysis carried out with using a model temperature profile indicates that the considered destabilizing mechanism could lead to an Alfvén instability accompanied with the inward energy flux in first experiments on the Wendelstein 7-X stellarator where long-lasting high-frequency oscillations were observed.

НЕЛІНІЙНА ТЕОРІЯ МОДУЛЯЦІЙНОЇ НЕСТІЙКОСТІ НА ІОН-ІОН ГІБРИДНОМУ РЕЗОНАНСІ В ПЛАЗМІ З ДВОМА СОРТАМИ ІОНІВ

В. М. Лашкін

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

У плазмі з двома сортами іонів (типова ситуація в іоносферній плазмі, а також при ВЧ нагріванні плазми на частоті поблизу іонно-циклотронної в режимі малої добавки іонів [1]) поряд з верхньогібридним та нижньогібридним резонансами існує так званий іон-іон гібридний резонанс, частота якого близька до іонно-циклотронних частот іонів.

Лінійна теорія параметричних нестійкостей у плазмі з двома сортами іонів була побудована в [2, 3] на основі теорії розробленої в [4]. В даній роботі запропоновано нелінійну теорію параметричних нестійкостей на іон-іон гібридній частоті. Основним нелінійним механізмом є генерація другої гармоніки іон-іон гібридної частоти, на відміну від відомих механізмів обумовлених взаємодією ВЧ хвиль (нижньогібридної, верхньогібридної) з НЧ хвилями (іонний звук, магнітний звук, альфвенівська хвиля тощо). В багатовимірному випадку нелінійність включає доданки як скалярного так і векторного типів одного порядку. Знайдено інкременти та пороги модуляційної нестійкості, які

збігаються з отриманими в [3]. В радіально симетричному випадку внесок дає тільки скалярна нелінійність та чисельно знайдено нелінійну структуру у вигляді двовимірною солітона. Нелінійність обумовлює позитивний внесок в гамільтоніан, на відміну від взаємодії з НЧ хвилями, і при цьому солітон може бути стійким в широкому діапазоні значень нелінійного зсуву частоти та не колапсує.

1. В.Е. Голант, В.И. Федоров. *Высокочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках*. (Москва: Энергоатомиздат, 1986).
2. А.Б. Киценко, К.Н. Степанов. ЖЭТФ 64 (1973) 1606.
3. М. Ono, М. Porkolab, R.P.C. Chang. Phys. Fluids 23 (1980) 1656.
4. В.П. Силин. *Параметрическое воздействие излучения большой мощности на плазму* (Москва: Наука, 1973).

НЕЛІНІЙНА ТЕОРІЯ ПОВЗДОВЖНИХ ПЛАЗМОВИХ ХВИЛЬ У КВАРК-ГЛЮОННІЙ ПЛАЗМІ

В. М. Лашкін

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Кварк-глюонна плазма – новий фундаментальний стан матерії, який уявляє собою сукупність кварків – елементарних частинок з дрібним електричним зарядом та 6 ароматами (6 ароматів відповідає різним масам кварків а також іншим квантовим числам) з 3 кольорами та глюонів – безмасових частинок, які відповідають за взаємодію кварків. Виникає кварк-глюонна плазма (КГП) коли температура середовища перевищує приблизно 200 МеВ. В експериментальних умовах КГП вже була нещодавно реалізована при зіткненнях зустрічних пучків важких ядер (вперше на прискорювачі RHIC Брукхейвенської національної лабораторії в 2005 і далі, на Великому Адронному Коллайдері LAC з температурою 900 МеВ в 2010). У природі КГП передбачається всередині нейтронних зірок, а також при будь яких інших можливих екстремальних станів речовини з надзвичайно високими температурами та густиною. На ранній еволюції Всесвіту, протягом перших мікросекунд після Великого Вибуху, матерія також являла собою кварк-глюонну плазму.

Теоретичний опис КГП базується на квантовій хромодинаміці (КХД) – неабелевій теорії полів Янга - Міллса з групою симетрії SU(3) – 3 кольори кварків. Як і у звичайній електрон-іонній (або релятивістській електрон-позитрон-іонній) плазмі у КГП можуть існувати лінійні колективні збудження – плазмові хвилі (див. огляди [1, 2]). Нелінійна теорія колективних збуджень у КГП майже відсутня. В роботі запропоновано нелінійне рівняння для глюонного поля Янга - Міллса (аналог електромагнітного поля в звичайній плазмі) з урахуванням нелінійного відгуку середовища (тобто кварків). Розклад кольорового току (аналог звичайного току) проводився до 2-го та 3-го

порядків по глюонному полю з урахуванням того, що дисперсія по вздовжній плазмовій хвилі в КПП (аналога ленгмюрівської хвилі в звичайній плазмі) має нерозпадний характер. Формалізм, подібний до запропонованого у звичайній плазмі [3,4], дає змогу обчислити з неабелевого кінетичного рівняння (аналога рівняння Власова) нелінійні відгуки 2-го та 3-го порядків та «секулярізувати» відповідні члени як і в [3,4]. Обчислення проводилися, як і в лінійній теорії КПП [1,2] в безмасовому наближенні, тобто тільки для двох найлегших кварків (u-кварка з масою приблизно 3 МеВ, та d-кварка з масою приблизно 5 МеВ), коли маси кварків набагато менше температури плазми. Передбачається, однак, включення s-кварку (маса близько 100 МеВ і, взагалі кажучи, вже порівняна з температурою КПП), тобто врахування тяжкої фракції, подібно іонам у звичайній плазмі (іншими, більш важкими s, b, t кваркам нехтуємо). Це дозволило б врахувати нелінійну взаємодію ВЧ хвиль (безмасових) з НЧ хвилями (деяким аналогом іонного звуку у звичайній плазмі).

1. J.P. Blaizot, E. Iancu. Phys. Rept. 359 (2002) 355.
2. S. Mrowczynski, B. Schenke, M. Strickland. Phys. Rept. 682 (2017) 1.
3. В. Н. Цытович. *Нелинейные эффекты в плазме* (Москва: Наука, 1967).
4. V.N. Tsytovich. *Lectures on Non-linear Plasma Kinetics* (Berlin: Springer, 1995).

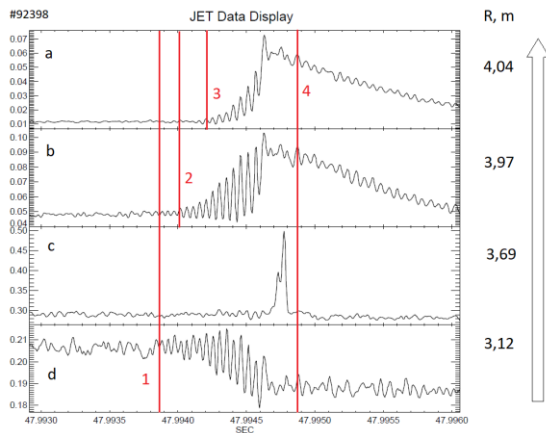
ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПИЛЧАСТИХ КОЛИВАНЬ З ДАНИХ ЕЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТОКАМАКА JET

Б. С. Лепявко, Ю. В. Яковенко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Пилчасті коливання є одним з найпоширеніших типів магнітогідродинамічної активності плазми в токамаках. Вони характеризуються стрімким спадом температури (колапсом) біля центра плазми та її зростанням на певній відстані від нього. Згідно з передбаченнями теорії [1], вплив колапсу на швидкі іони залежить від його тривалості та радіусу просторової області, в якій відбувається перемішування плазми. Тому визначення цих параметрів є важливим для аналізу процесів у плазмі.

У даній роботі було оброблено масив даних з токамаку JET з метою визначення згаданих параметрів колапсів пилчастих коливань та порівняння цих даних з передбаченнями моделі Кадомцева [2]. Дані щодо еволюції температури електронів у певних точках простору було отримано за допомогою детекторів електронно-циклотронного випромінювання, часова роздільна здатність яких є достатньою для дослідження колапсів. Втім, визначення тривалості колапсу ускладнюється тим, що ця діагностика дає дані про температуру лише вздовж одної екваторіальної хорди.



Зміна температури при спостереженні пилчастих коливань на ЖЕТ. Стрілка справа вказує напрям поширення теплового імпульсу (від центра до периферії). У момент часу (1) колапс починається у центральній області, моменти (2) і (3) – досягає периферії, (4) – перерозподіл завершено, на периферії починається охолодження. На частині рисунка (с) бачимо проходження теплового імпульсу в області, де помітного перерозподілу не відбувається. Регулярні коливання під час перерозподілу пояснюються обертанням плазми, яке у даному випадку є значним.

Однак проведений аналіз показує, що, якщо взяти до уваги дані з усього масиву наявних точок, можна визначити область простору, в якій зароджується колапс, та прослідкувати його поширення і, таким чином визначити параметри колапсу. Обертання полегшує аналіз, оскільки дає змогу бачити розвиток збурення температури з різних ракурсів. Характерний приклад еволюції температури під час колапсу в ЖЕТ за наявності швидкого обертання плазми показано на рисунку.

Кінцевою метою проведеного аналізу є написання коду, який був би в змозі знаходити пилчасті коливання серед необроблених даних та визначати їхні параметри в автоматичному режимі.

Ця робота виконувалась у рамках консорціуму EUROfusion і отримувала фінансову підтримку програми досліджень та навчання Євратома 2014 - 2018 за грантовою угодою № 633053 і Національної академії наук України за проектом «Явища, пов'язані з енергійними іонами, у токамаках та стелараторах».

1. Ya.I. Kolesnichenko, V.V. Lutsenko, R.B.White, Yu.V. Yakovenko, Nucl. Fusion 40 (2000) 1325.
2. C.M. Muscatello et al. Plasma Phys. Control. Fusion 54 (2012) 025006.

ГІБРИДНА МОДЕЛЬ ПЛАЗМОВОГО ПРИСКОРЮВАЧА ІЗ ЗАМКНЕНИМ ДРЕЙФОМ ЕЛЕКТРОНІВ ТА ВІДКРИТИМИ СТІНКАМИ

**І. В. Літовко¹, О. А. Гончаров², А. М. Добровольський²,
І. В. Найко², Л. В. Найко²**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Інститут фізики НАН України, Київ, Україна*

Прискорювачі з замкненим дрейфом електронів є одним з видів електричних ракетних двигунів та пристроїв іонно-плазмової обробки поверхні матеріалів. Перші прискорювачі з замкненим дрейфом електронів з'явилися ще у минулому сторіччі у варіантах прискорювача з анодним шаром та прискорювача з діелектричною стінкою довгого каналу прискорення А.І. Морозова [1]. Однак, однією з проблем цього типу пристроїв є ерозія стінки прискорювального каналу навіть у сучасних варіантах [2]. Варіантом вирішення цієї проблеми може бути прискорювач з анодним шаром та газовою стінкою у циліндричній геометрії.

В Інститут фізики НАН України було створено та досліджено макет циліндричного прискорювача з анодним шаром та замкненим дрейфом електронів і відкритими стінками. Було показано існування двох режимів роботи прискорювача: слабкострумового з великим, до декількох кіловольт, потенціалом на аноді та відносно малими, до декількох сотень міліампер, струмами і сильно струмового зі струмом до декількох ампер та з сотнями вольт на аноді.

Була розвинута гібридна модель для такого типу прискорювача, коли для електронної компоненти використовується гідродинамічний опис, а для іонної та нейтральної – кінетичний. Це дає змогу врахувати процеси іонізації, а також вплив нейтральних атомів робочого газу та обмеженість часу знаходження іонів в системі. Показано існування сформованого потоку плазми вздовж осі обертової симетрії приладу поза межами прискорювача в певних режимах роботи, а також, існування високого плаваючого потенціалу в об'ємі обмеженому електродами прискорювача, до величини близької до прикладеного анодного потенціалу. Результати теоретичної моделі добре відповідають результатам фізичного експерименту. Відмітимо також, що режим з високим потенціалом у об'ємі пристрою та сформованим іонно-плазмовим потоком із торців системи може бути використаний задля створення прототипу маневрових іонно-плазмових космічних двигунів.

1. С.Д. Гришин, В.С. Ерофеев, А.В. Жаринов. *Плазменные ускорители* (Москва: Машиностроение, 1973) 54.
2. В.П. Ким Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова. Журнал технической физики 85(3) (2015) 45.

НЕТЕПЛОВИЙ ВПЛИВ НАГРІВАННЯ НА ЕЛЕКТРОННОМУ ЦИКЛОТРОННОМУ РЕЗОНАНСІ НА АЛЬФВЕНОВІ ВЛАСНІ МОДИ

В. С. Марченко, С. Н. Резник

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

У 2008 р. на токамаку DIII-D спостерігалось цікаве явище [1]: у розрядах з немонотонним профілем струму, де інжекція нейтрального пучка комбінувалася з нагріванням на електронному циклотронному резонансі (ЕЦРН), так звані альфвеніві каскади (АК) [2] (специфічні для таких розрядів альфвеніві моди, що збуджуються енергійними іонами) повністю зникали, коли потужність ЕЦРН була локалізована поблизу поверхні з мінімальним фактором безпеки. Пізніше цей ефект було підтверджено на токамаку ASDEX Upgrade [3]. Однак усунення АК не спостерігалось, коли моди збуджувалися енергійними іонами, що генерувалися при нагріванні малої добавки на іонному циклотронному резонансі (ІЦРН) [4].

Усунення АК є парадоксальним, оскільки ЕЦРН підвищує температуру електронів і тому збільшує кількість швидких іонів завдяки зменшенню їхнього гальмування електронами. Більше того, тенденція каскадів зникати при високих тисках плазми в сферичних торах [5] не могла спрацювати в цих експериментах через $q_{\min}^2 \beta \ll 1$, де q_{\min} – мінімальний фактор безпеки і β – відношення тиску плазми до тиску магнітного поля. Чутливість ефекту до локалізації ЕЦРН також парадоксальна, тому що профілі електронної температури є жорсткими (тобто слабо залежать від профілю нагрівання), і жодної суттєвої зміни електронної температури на поверхні з мінімальним фактором безпеки при зміні профілю нагрівання не спостерігалось. Всі ці факти разом свідчать, що усунення АК є суттєво нетепловим ефектом.

В даній роботі показано, що горизонтальна поляризація плазми при ЕЦРН призводить до повного усунення АК, якщо магнітні поверхні в області локалізації моди поляризовані певним чином, тобто надлишковий негативний (позитивний) заряд на магнітній поверхні локалізований в області слабого (сильного) магнітного поля, що пояснює відсутність ефекту в комбінації ЕЦРН + ІЦРН на ASDEX Upgrade [4], оскільки ІЦРН в цих експериментах мало потужність більшу за ЕЦРН і тому сумарна поляризація мала протилежний знак.

1. M.A. Van Zeeland et al. Plasma Phys. Control. Fusion 50 (2008) 035009.
2. H.L. Berk et al. Phys. Rev. Letters 87 (2001) 185002.
3. S.E. Sharapov et al. Plasma Phys. Control. Fusion 60 (2018) 014026.
4. M. Garcia-Munoz et al. 42nd EPS Conference on Plasma Physics, paper P4.118.
5. N.A. Crocker et al. Phys. Plasmas 15 (2008) 102502.

ВИПРОМІНЮВАННЯ ІЗ ПЛАЗМИ ПРИ ПАРАМЕТРИЧНОМУ ЗБУДЖЕННІ КОНВЕКТИВНИХ КОМІРОК

В. Г. Панченко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

У роботі вивчається процес випромінювання із плазми коли має місце трансформація повздовжньої ленгмюрівської хвилі в поперечні електромагнітні. Трансформація відбувається на турбулентних флуктуаціях плазми в умовах параметричної нестійкості верхньогібридної хвилі накачки. Розглянуто розпад такої хвилі на дочірню верхньогібридну хвилю та модифіковані конвективні комірки. Показано, що основний внесок в корелятор електронної густини, який визначає величину коефіцієнта трансформації, дають саме низькочастотні коливання плазми – модифіковані конвективні комірки.

Слід зауважити, що модифіковані конвективні комірки поширені в плазмі іоносфери, коли відношення тиску плазми до тиску магнітного поля є малим [1, 2].

Обчислено коефіцієнт трансформації ленгмюрівської хвилі та показано, що головний внесок до нього здійснюється так званим “польовим членом”, який суттєво залежить від амплітуди і частоти хвилі накачки. Зроблені оцінки для типових параметрів іоносферної плазми F – шару демонструють, що цей член на декілька порядків перевищує відповідну величину для випадку спокійної плазми (у відсутності параметричних нестійкостей), коли флуктуації електронної густини визначаються виключно тепловими шумами.

Знайдена величина електромагнітної енергії, що випромінюється із плазми, та показано, що вона визначається частотою і декрементом затухання модифікованих конвективних комірок .

1. V.N. Pavlenko, V.G. Panchenko. Phys. Scr. 82 (1999)109.
2. V.N. Pavlenko, V.G. Panchenko. J. Plasma Phys. 81 (2015) 64.

ОСОБЛИВОСТІ ТРАНСПОРТНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАЗМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ДУГИ З ПЛАВКИМИ СТАЛЕВИМИ ЕЛЕКТРОДАМИ

П. В. Порицький

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Розробка джерел безкрапельних потоків плазми на основі дугового розряду для обробки та модифікації поверхонь конструкційних матеріалів є важливим для розвитку сучасних технологій [1, 2]. Такі потоки генеруються як в чистих парах матеріалів, так і в сумішах парів металів з різними газами. Для багатокomпонентного плазмового середовища внаслідок великої кількості різнотипових міжчастинкових взаємодій картина процесів, що мають місце

значно ускладнюється. Для частково іонізованої плазми дуже важливими є процеси взаємодії електрона з нейтральними частинками. У даній роботі досліджено вплив домішок матеріалу плавких сталевих електродів на транспортні властивості плазми. Найважливішими чинниками, що впливають на властивості, є такі: газова та плазмова неідеальності, багатокomпонентність середовища. Врахування цих факторів дає змогу отримати транспортні коефіцієнти плазми.

Проведені розрахунки ґрунтувалися на методи моментів Грета [3 - 5]. Показано, що невелика кількість металевих домішок може суттєво змінити величини транспортних коефіцієнтів порівняно із випадком розряду у чистому газі. Розглянуто вплив моделі перерізу зіткнень електрона з атомом металу на транспортні властивості термічної плазми. Випаровування плавких сталевих електродів спричиняє значну різноманітність складу плазми. Найбільш виражений вплив на властивості матимуть домішки заліза, нікелю, хрому, молібдену та деякі інші. Показано, що властивості багатокomпонентної плазми мають яскраво виражений немонотонний характер з гострими піками у певних діапазонах температур та тисків. Ці піки відповідають дисоціації, іонізації та іншим впливовим чинникам. Встановлено, що збільшення концентрації металу в плазмі може призвести не тільки до відповідного збільшення електропровідності плазми, а й, у певних випадках, до її зменшення.

Таким чином, малі кількості металевих домішок можуть призвести до значних змін величин транспортних коефіцієнтів плазми підводних розрядів порівняно із розрядом без домішок. Властивості багатокomпонентної плазми розрядів, що містять домішки металів, істотним чином залежать від характеру перерізу розсіяння електрона на атомах металів.

1. A. Ander. *Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation* (New York: Springer, 2008).
2. R.L. Boxman, D.M. Sanders, P.J. Martin. *Handbook of Vacuum Arc Science and Technology* (Park Ridge, N.J., Noyes Publications, 1995)
3. H. Grad, *Comm. Pure and Appl. Math.* 2 (1949) 331.
4. V.M. Zhdanov. *Transport Processes in Multicomponent Plasma* (Taylor & Francis, New York, 2002)
5. P. Porytsky, I. Krivtsun, V. Demchenko et al. *Phys. Plasmas* 20 (2013) 023504.

SPATIAL ENERGY TRANSFER BY FAST MAGNETOACOUSTIC MODES IN A ONE-FLUID MODEL

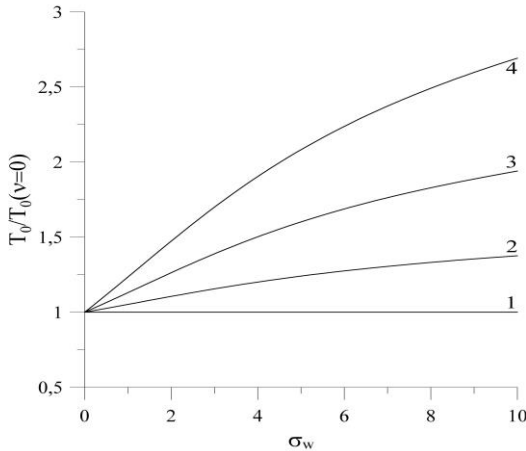
M. H. Tyshchenko, Ya. I. Kolesnichenko, V. V. Lutsenko, Yu. V. Yakovenko

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

Plasma heating is often accompanied by degradation of its energy confinement time. However, it seems that the overall confinement time was not less but slightly higher at the largest fusion power in deuterium-tritium (DT) experiments on JET

during the DTE1 campaign; see [1 - 3]. The same experiments have shown, in addition, that the central ion temperature in DT discharges was higher than that in deuterium (D) discharges where the Ion Cyclotron Resonance Heating (ICRH) was applied with the heating power equal to the power of alpha particles (fusion products) in DT discharges. This fact indicates the presence of some anomalous heating mechanism because mainly electrons are heated during slowing down of 3.5-MeV alpha particles by Coulomb collisions.

The purpose of this work is to see whether the spatial channeling (SC) of the energy and momentum of fast ions [4] can improve the plasma performance and, in particular, explain the mentioned observations in JET. To do this we consider two principal issues of the spatial energy transfer: first, the wave amplitudes required for the SC of a considerable part of fusion energy and, second, the efficiency of the transfer of this energy by Fast Magnetoacoustic Modes (FMM) across the magnetic field. The effect of the SC on the plasma central temperature is studied in a one-fluid model.



Dependence of the central plasma temperature in an ignited reactor on the profile peaking factor for the wave power deposition, σ_w , for various magnitudes of the fraction of the alpha energy (ν) transferred to the waves: 1, $\nu=0$; 2, $\nu=0.2$; 3, $\nu=0.5$; 4, $\nu=0.9$.

It is shown that for the required spatial channeling the FMM should provide the energy transfer from the periphery region where the instability is located to the near-axis region and the central temperature can be considerably increased due to the SC. The influence of the SC on the central temperature is demonstrated in the Figure. Reasonably small wave amplitudes of FMW ($\tilde{B}/B = 4 \cdot 10^{-5}$) are sufficient to provide receiving by the waves and transferring by them across the flux surfaces a large fraction of the fusion power density associated with alpha particles

1. P.R. Thomas et al. Phys. Rev. Lett. 80 (1998) 5548.
2. P.R. Thomas et al. In: Proc. 28th EPS Conf. Control. Fusion and Plasma Phys. Europhysics Conf. Abstracts 25A (2001) 929.
3. S.E. Sharapov et al. Fusion Sci. Technol. 53 (2008) 989.
4. Ya.I. Kolesnichenko et al. Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 075001.

ПРО ВПЛИВ ПЛАЗМИ ВЧ РОЗРЯДУ У ВОДНІ НА ПОВЕРХНЮ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

**О. А. Федорович¹, В. В. Гладковський¹, Л. М. Войтенко¹, Є. Г. Костін¹,
Б. П. Полозов¹, В. О. Петряков¹, О. А. Рокицький¹,
В. М. Шевель¹, О. С. Оберемок²**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України,
Київ, Україна*

Вплив низько енергетичних іонів водню на конструкційні матеріали, які використовуються в ядерній енергетиці і використовуватимуться в якості першої стінки термоядерних реакторів (ТЯР), вивчено недостатньо. В порівнянні з матеріалами традиційних енергетичних установок, ядерні та термоядерні установки працюють в набагато складніших умовах [1]. При опроміненні нейтронами, протонами та від'ємними іонами водню першої стінки реактора відбувається перетворення їх в атоми водню. Опромінення при підвищених температурах (до 150 °С), високих (800 °С) і особливо надвисоких (більше 800 °С), сприяє зниженню опору корозії матеріалів. В результаті взаємодії з матеріалами протони перетворюються у водень, що призводить до газового розпилення і появи водневої крихкості матеріалів. Оpubліковано немало оглядів по впливу протонів на стінки реакторів, особливо на першу стінку ТЯР. Найбільшу увагу необхідно приділити першій стінці ТЯР, де буде використовуватися дейтерій та тритій, що може призвести до значних втрат за рахунок дифузійних процесів [2]. Кількість водню, яка потрапить при цьому на поверхню матеріалу першої стінки реактора може стати критичною для використовуваного конструкційного матеріалу, по відношенню його стійкості до водневої крихкості [3]. Конструкційні матеріали першої стінки ТЯР весь час змінюються. Для ITER ELMs використовують сплави Ti-Zn-Ni (Ti41,5; Zn41,5; Ni17) [4], багат шарові перші стінки з берилієвим облицюванням, дзеркала з вольфрамовим покриттям [5] та багато інших.

В даній роботі дослідження проводились на установці, описаній в [6]. Енергія протонів і від'ємних іонів водню 350 - 400 еВ. При таких енергіях коефіцієнт розпилення матеріалів найбільший. Експозиції 5 ÷ 36 год. Густина струму в розряді $\sim 2 \text{ мА/см}^2$. При цьому одержували потоки від $2,25 \cdot 10^{20}$ до $1,8 \cdot 10^{21}$ протонів/см². Проводилась обробка таких матеріалів: алюміній, мідь, конструкційна сталь корпусу реактора 4 блоку Запорізької АЕС, ніобій, вольфрам, молібден, нікель, пермалой, тантал, плівка нікелю на кремнії тощо.

Вторинна іонна мас-спектрометрія показала суттєві зміни в складі поверхні оброблених і необроблених ділянок матеріалів. На мас – спектрах вторинної іонної емісії всіх оброблених зразків, крім матеріалів зразків, спостерігались залізо, хром, нікель, титан. Вони входять до складу підкладко три-мача та верхнього активного електрода виготовлених з немагнітної нержаві-

ючої сталі 12Х18Н10Т, які бомбардуються протонами і від'ємними іонами і також розпилюються. На деяких оброблених зразках на ВІМС спектрах з'являються маси елементів чи молекулярних сполук, які однозначно ідентифікувати не вдається.

1. И.М. Неклюдов, Г.Д. Толстолуцкая ВАНТ 3 (2003) 3.
2. В.М. Шарапов, А.Е. Городецкий, А.П. Захаров, А.И. Павлов. Атомная энергия 56(1) (984) 29.
3. В.М. Шарапов. Водородопроницаемость первой стенки термоядерного реактора. Атомная энергия 60(6) (1986) 391.
4. В.О. Махлай та ін. У кн.: Звіт наукової ради з проблеми «Фізика плазми і плазмова електроніка» за 2012 - 2014 рр. (Київ, 2015) 53.
5. В.О. Махлай та ін. У кн.: Звіт наукової ради з проблеми «Фізика плазми і плазмова електроніка» за 2012 - 2014 рр. (Київ, 2015) 23.
6. В.В. Гладковский и др. ТКЭА 5 - 6 (2014) 39.

ПРО ВПЛИВ ІОНІВ ВОДНЮ ТА НАГРІВАННЯ НА КОНСТРУКЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

**О. А. Федорович¹, В. В. Гладковский¹, Л. М. Войтенко¹, Є. Г. Костін¹,
Б. П. Полозов¹, В. О. Петряков¹, О. А. Рокицький¹, В. М. Шевель¹,
О. С. Оберемок², В. В. Бурдін³**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України,
Київ, Україна*

³ *Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України,
Київ, Україна*

Конструкційні матеріали, які використовуються в ядерній енергетиці, також використовуються для першої стінки термоядерного реактора, де опромінюються іонами водню та його ізотопів при підвищених температурах. Тому однією з найважливіших задач є дослідження змін структури поверхні зразків та накопичення водню в них по глибині залежно від температури нагріву їх.

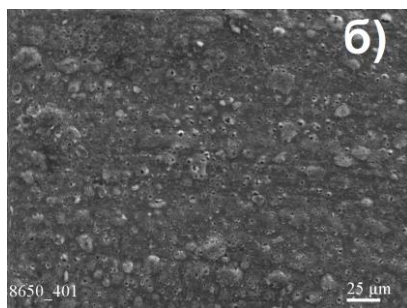
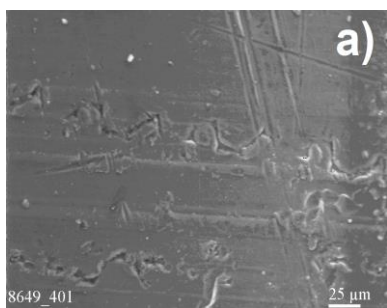
Дослідження проводились на модернізованому експериментальному джерелі іонів водню (протонів), яке було описано в [1]. Для нагрівання підкладко тримача був виготовлений і прокалібрований нагрівач з молібденового дроту, який дозволяє одержувати температуру нагріву до 1000 С [1]. Дослідження були проведені до температури 400 С. Для одержання між розрядними електродами напруг зміщення 250 - 300 В виготовлено додаткове джерело зміщення з від'ємною регульованою напругою від 0 до 1000 В та струмом до 1 А. Через спеціальні фільтри джерело живлення було підключено до генератора іонів водню. Від'ємний полюс підключено до тримача підкладки, а додатний

до активного електрода. Для уникнення електричних пробоїв на поверхню зразків обирались режими ВЧ розрядів і такі магнітні поля, щоб не відбувалось пробоїв між активним електродом і тримачем підкладки.

Опромінення протонами проводилось при струмах ВЧ розрядів у водні 5,5 А, напрузі від'ємного зміщення (без пробоїв) 250 - 260 В. Експозиція становила 11 год, температури нагріву 150 - 400 °С, робочий тиск в ПХР 0,13 Тор, при напруженості магнітного поля 300 Е.

Для досліджень змін хімічного складу поверхні зразків після обробки їх іонами водню була використана якісна вторинна іонна мас-спектрометрія. Проводились порівняльні дослідження оброблених та необроблених зразків в діапазоні мас 1 - 250 а.о.м., а також окремих мас по глибині проникнення в зразки протягом до 1200 с. Розпилення зразків проводилось іонами аргону з енергією 500 еВ із струмом первинних іонів 4 мА.

Проведено дослідження змін поверхні після опромінення зразків протонами і залежно від нагріву мікрофотографічними методами і растровою електронною мікроскопією. Виявлено суттєві зміни оброблених протонами і нагрітих поверхонь.



Структура поверхні алюмінієвої фольги до обробки (а) та після обробки іонами водню (б) (струм основного ВЧ розряду 5,5 А, енергія іонів водню 250 еВ, експозиція 11 год, температура нагріву 300 °С, робочий тиск $1,2 \cdot 10^{-1}$ Тор).

1. В.В. Гладковский и др. ТКЭА 5-6 (2014) 39.

ВИКОРИСТАННЯ ПЛАЗМИ МІКРОРОЗРЯДУ ДЛЯ ОБРОБКИ ЖИВИХ ОРГАНІЗМІВ

**В. Я. Черняк¹, О. В. Коломісць¹, В. В. Юхименко¹, Д. Л. Чернолуцький¹,
А. М. Горячко¹, В. В. Лендесл¹, Ю. М. Самченко¹,
А. К. Трохимчук², О. В. Легенчук²**

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

² Інститут біологічної хімії імені Ф. Д. Овчаренка НАН України,
Київ, Україна

На сьогоднішній день у природі нашої планети відомо велике різноманіття живого світу. Причому, у більшій частині з них, умови існування дуже обмежені рядом, умовно позначених, необхідних факторів для комфортного або терпимого існування. Це вказує на дуже високу чутливість живих організмів до факторів зовнішнього середовища та елементів впливу та взаємодії. Такі речі накладають необхідність розширювати межі впливу на етапі обробки живих тканин та організмів, що найбільш яскраво проявляється у плазмовій медицині. Плазма, у різних своїх проявах, може бути застосована у широкому діапазоні використань, проте у випадку роботи з живою тканиною, зокрема людини, вимагає особливої уважності та обережності (зокрема, невисока потужність та низькі, як для плазми, температури) і, поряд з тим, є надзвичайно перспективною. Саме з цих причин, ми вважаємо необхідним використання у плазмо-медицині генераторів плазми якомога ширшого ряду модифікацій. Подібний підхід робить можливим найбільш ефективним застосування всіх переваг плазми у цій сфері. Один з найбільш перспективним у даній сфері досліджень є генератор мікророзрядної плазми атмосферного тиску, що утворюється у вихровому потоці газу, який і буде розглянутий далі.

Мікророзрядна (МР) плазма атмосферного тиску, що утворюється у вихровому потоці газу, є стабільним джерелом неізотермічної плазми низької потужності. Фізичною особливістю такого розряду є генерування плазми з високою енергоефективністю за рахунок обмеження тепло-масо обміну плазми з оточуючим середовищем в об'ємі генерації плазми. Що, в свою чергу дає змогу забезпечити якомога м'якшу взаємодію плазми із живою тканиною (зокрема її поверхнею).

Було проведено ряд експериментальних досліджень плазми мікророзряду малої потужності (до 30 Вт) у вихровому газовому потоці за атмосферного тиску. Які, в свою чергу, показали залежність електричного поля від відстані між електродами розряду. Також у ході досліджень було визначено температури заселення збуджених обертальних та коливальних молекулярних рівнів компонент плазмо-формуєчого газу, що були зафіксовані у оптичних емісійних спектрах мікроплазми міжелектродного проміжку (у середині розрядної камери досліджуваного генератора плазми).

Електричне поле мікророзряду має немонотонну залежність напруги від міжелектродної відстані. Тангенс кута нахилу до осі абсцис (значення напруги розряду) більший за малої міжелектродної відстані.

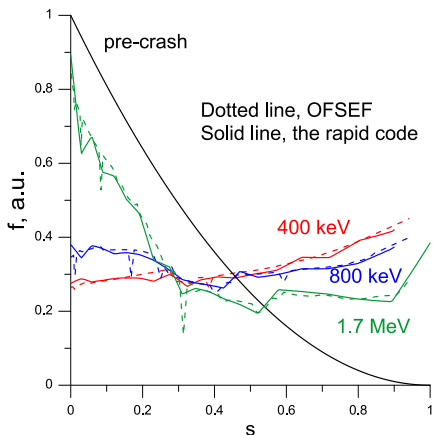
Наявність потоку газу збільшує напругу горіння мікророзряду (за малої міжелектродної відстані), що збільшує тангенс кута нахилу до осі абсцис.

ЧИСЛОВІ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ ШВИДКИХ ІОНІВ ПИЛЧАСТИМИ КОЛИВАННЯМИ В ТОКАМАКАХ JET ТА ITER

Ю. В. Яковенко, В. В. Луценко, Б. С. Лепявко, Я. І. Колесниченко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

У багатьох токамаках спостерігався значний перерозподіл швидких іонів (як термоядерного походження, так і тих, що утворюються при нагріванні плазми) пилчастими коливаннями (див., напр., [1-4]). Це показує, що для прогнозування ефективності термоядерних реакторів важливо мати змогу моделювати вплив пилчастих коливань на швидкі іони. Як теорія [5], так і нещодавні експерименти на токамаках DIII-D та ASDEX Upgrade [3, 4] свідчать, що цей вплив залежить від пітч-кута та енергії частинок.



Перерозподіл швидких дейтронів у JET. Позначення: $s = (r/r_{\text{mix}})^2$, r – радіальна координата, r_{mix} – радіус зони перемішування, f – функція розподілу, суцільні та пунктирні лінії – результати нового коду та коду OFSEF. Сепаратриса знаходиться при $s = 0,28$.

Ефективності нового швидкого коду, розробленого на основі проведених моделювань. Код є здатним моделювати дію колапсу на швидкі іони або навіть у реальному часі. Представлено порівняння результатів нового коду з результатами коду OFSEF (див. рисунок).

Моделювання показали, що коли профіль коефіцієнта безпеки q є непараболічним (наприклад, плоским або типу «голова-плечі», що є можливим у гібридному режимі), це може значно вплинути на радіальний профіль функції розподілу термоядерних альфа-частинок у реакторі ITER після колапсу.

За допомогою коду OFSEF [6] було проведено моделювання перерозподілу швидких дейтронів колапсами пилчастих коливань у токамаку JET. Відповідно до теорії [5] знайдено, що сильно пролітні іони і низькоенергійні частинки добре перерозподіляються. Перерозподіл захоплених та слабо пролітних частинок демонструє бар'єрну поведінку на сепаратрисі між пролітними та захопленими частинками (див. рисунок): частинки з енергіями, що перевищують критичну енергію, введену в [5], не можуть пройти радіальну координату, що відповідає сепаратрисі. Сильно захоплені частинки при надкритичних енергіях вони є нечутливими до колапсів [5].

У доповіді обговорюються алгоритм, структура та показники ефек-

Ця робота виконувалась у рамках консорціуму EUROfusion і отримувала фінансову підтримку програми досліджень та навчання Євратома 2014 - 2018 за грантовою угодою № 633053 і Національної академії наук України за проектом «Явища, пов'язані з енергійними іонами, у токамаках та стелараторах». Погляди та думки, висловлені тут, не обов'язково відображають погляди та думки Європейської Комісії.

1. S.S. Medley et al. Nucl. Fusion 38 (1998) 1283.
2. V.G. Kiptily et al. Nucl. Fusion 49 (2009) 065030.
3. C.M. Muscatello et al. Plasma Phys. Control. Fusion 54 (2012) 025006.
4. F. Jaulmes et al. Nucl. Fusion 56 (2016) 112012.
5. Ya.I. Kolesnichenko, Yu.V. Yakovenko. Nucl. Fusion 36 (1996) 159.
6. Ya.I. Kolesnichenko et al. Phys. Plasmas 4 (1997) 2544.

Тези доповідей з радіобіології та радіоекології

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ДІЇ ХВИЛЬОВОГО «ПРИСТРОЮ» НА БІОЛОГІЧНИЙ ОБ'ЄКТ («ПАТЕНТ» № 53568) ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ МАГНІТНОГО ЗАРЯДУ З МАГНІТОВМІСНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА ЇХНІХ СПОЛУК У ОПРОМІНЕНИХ ТВАРИН З МЕТОЮ УНЕМОЖЛИВЛЕННЯ УТВОРЕННЯ АКТИВНИХ ФОРМ КИСНЮ І РОЗВИТКУ РАДІАЦІЙНО-ІНДУКОВАНИХ ХВОРОБ ТА ЇХНІХ УСКЛАДНЕНЬ

В. Г. Бебешко¹, І. В. Гомоляко², В. В. Гринчишин¹

*¹ Інститут клінічної радіології Національного наукового центру
радіаційної медицини НАМН України, Київ, Україна*

*² Національний інститут хірургії та трансплантології ім. О. О. Шалімова
НАМН України, Київ, Україна*

Наші дослідження спрямовані на визначення ролі активних форм кисню в розвитку гострої та хронічної променевої хвороб у щурів, опроміненіх в дозі 8 Гр. В одній групі тварин використовувався пристрій («патент № 53568»), впродовж 2,5 хв через 1,5 год після опромінення, інша група щурів не була оброблена пристроєм і слугувала контролем. Дослідження виконані на білих щурах ($m \approx 250$ г.). У розмагнічених тварин, забитих через 60 діб, дистрофічні зміни в клітинах та в тканинах печінки, легенів, нирок, головного мозку, кісткового мозку та селезінки були незначними в порівнянні з контрольною нерозмагніченою групою щурів. Матеріали дослідження показали, що «Пристрій» зменшує магнітний заряд у магнітовмісних елементах та їхніх сполуках в організмі опроміненіх тварин і тим самим зберігає структуру клітин та упереджує утворення надзвичайно активних форм кисню (АФК), які відіграють ключову роль в розвитку радіаційно-індукованих захворювань. Отже, отримані результати дають змогу рекомендувати цей «Пристрій» для обов'язкового використання у працівників ядерної промисловості, особам які брали участь у ліквідації техногенних аварій і були опромінені, у рентгенологів, радіологів, та у осіб, які працюють з іншими магнітними опромінювачами з метою упередження розвитку радіаційно-індукованих захворювань та їхніх ускладнень, а також застосовувати його при лікуванні онко-гематологічних захворювань, для яких використовують променеві засоби та цитостатичні препарати, котрі збільшують в організмі хворих концентрацію АФК – джерел рецидивів хвороби і розвитку вторинних пухлин.

МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ ОПРОМІНЕННЯ IN VITRO КРОВІ ЛЮДИНИ ІЗОТОПОМ ^{137}Cs ВІД ЗОВНІШНЬОГО ДЖЕРЕЛА ТА РАДІОНУКЛІДНОГО ЗАБРУДНЕННЯ

**Л. К. Бездробна, І. П. Дрозд, В. І. Федорченко, В. А. Курочкіна,
В. М. Шевель, В. В. Давиденко, І. А. Хоміч**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Мета роботи – моделювання умов і розробка пристроїв для проведення порівняльного дослідження in vitro цитогенетичної ефективності ^{137}Cs у лімфоцитах крові людини при зовнішньому опроміненні та радіонуклідному забрудненні зразків крові.

Передбачено короткочасний (впродовж 1 год) вплив на зразки крові умовно здорових донорів ^{137}Cs від зовнішнього точкового джерела і при радіонуклідному забрудненні обумовленому їхньою інкубацією з розчином хлориду цезію-137. Зразки крові опромінювали при температурі (34,0 - 35,5) °C у повітряних термостатах TV-80. У термостати вмонтовані спеціально розроблені пристрої для розміщення пробірок зі зразками крові, а у випадку зовнішнього впливу – і самого джерела опромінення.

Для зовнішнього впливу використовували джерело ^{137}Cs (діаметр 8 мм) зафіксоване в центрі капсули з металевої фольги. Джерело і пробірки зі зразками крові розміщували у лунках планшету зі щільного полістеролу. Для фіксації джерела використано магніт закріплений в планшеті. Лунки для пробірок зі зразками крові розташовані на відстанях 7,5, 10, 16 і 22 см від джерела. Середина висоти пробірки зі зразком крові знаходиться на одному рівні з джерелом. Внутрішній діаметр пробірок 11 мм, висота – 16 мм, об'єм крові 1,3 мл. Передбачено також лунки для розміщення ТЛД-дозиметрів для контролю доз за час опромінення крові. Під час опромінення планшет за допомогою електродвигуна, розташованого поза термостатом, обертається (12 об/хв.) навколо умовної вісі, що проходить через його центр. Це забезпечує постійне перемішування клітин крові в пробірках. Термостат знаходиться в «гарячій» камері. Після розміщення в планшеті зразків крові і контрольних дозиметрів з пульту управління «гарячої» камери маніпулятором встановлюється джерело опромінення і запускається електродвигун. Представлені умови при опроміненні впродовж 1 год забезпечують дози 0,5, 0,25, 0,1 і 0,05 Гр.

Забруднення лімфоцитів крові ^{137}Cs відбувається шляхом внесення розчину $^{137}\text{CsCl}$ (100 мкл) безпосередньо в пробірку (внутрішній діаметр 11 мм, висота 40 мм), що містить 1,5 мл крові. Пробірки зі зразками по одній встановлюються в контейнери з полістеролу, які зафіксовані на горизонтально розташованому у термостаті валу, що проходить крізь центр чотирьох свинцевих блоків (100 × 100 × 50 мм). Контейнери знаходяться у проміжках між блоками. Обертання валу забезпечує перемішування клітин крові в пробірках. Виходимо з того, що розчин $^{137}\text{CsCl}$ рівномірно розподіляється між клітинами крові.

Для опромінення крові в дозах 0.5, 0.25, 0.1 і 0.05 Гр впродовж 1 год інкубації з хлоридом ^{137}Cs розраховували необхідні відповідні кінцеві концентрації радіонукліда у зразку. Також враховували додаткові дози, що отримували клітини після закінчення інкубації під час відмивання зразку від радіонукліда.

РАДІОБІОЛОГІЧНІ ЕФЕКТИ ОПРОМІНЕННЯ *IN UTERO* РАДІОІЗОТОПОМ ^{131}I У СИСТЕМІ ТИРЕОЇДНОЇ ГОРМОНАЛЬНОЇ РЕГУЛЯЦІЇ ЩУРІВ ВІСТАР

**О. А. Бойко¹, Є. М. Прохорова¹, Н. П. Атаманюк¹, О. Я. Плєскач¹,
І. П. Дрозд², А. І. Липська², Г. Й. Лавренчук¹, В. В. Талько¹**

¹ Державна установа «Національний науковий центр радіаційної медицини
Національної академії медичних наук України», Київ, Україна
² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

На сьогодні пренатально опромінені внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС особи знаходяться у віці 28 - 29 років, тобто в періоді максимального ризику можливого прояву ендокринних порушень, що потребує ретельного обстеження та аналізу визначених ефектів з урахуванням даних індивідуальної дозиметрії. Актуальність роботи визначається нез'ясованістю питання щодо механізмів формування таких ефектів за умов опромінення *in utero* інкорпорованим ^{131}I , що потребує проведення експериментального дослідження. Тиреоїдні гормони відіграють суттєву роль у метаболічних процесах в організмі. Більшість їхніх ефектів опосередковано механізмами, що стимулюють швидкість метаболічних процесів, збільшення енергетичних витрат.

Мету дослідження склало вивчення функціонального стану гіпофіз-тиреоїдної системи гормональної регуляції пренатально опромінених ^{131}I щурів.

Створено модель внутрішньоутробного опромінення щурів Вістар ^{131}I шляхом одноразового перорального введення на 12 - 14-ту добу гестації 27,5 кБк радіонукліда (доза на ЩЗ залозу плоду $0,72 \pm 0,14$ Гр). У дослідній групі отримано 55 особин (25 самців, 30 самиць), у контролі 60 (22 самці, 28 самиць). Утримання тварин та проведення досліджень виконувалися у відповідно до Закону України «Про захист тварин від жорстокого поводження».

Кількісне визначення гормонів у сироватці крові здійснено конкурентним твердофазним імуноферментним методом з реєстрацією вимірювань на мікропланшетному рідері "LabLine 022" з використанням «СвТ₃-ИФА» ХЕМА (РФ) для вільного трийодтиронину (Т₄); «СвТ₄-ИФА» ХЕМА – вільного тироксину (Т₃); «ТТГ-ИФА» ХЕМА – тиреотропного гормону гіпофіза. Статистичну обробку результатів виконано з використанням комп'ютерного пакета програм Microsoft Excel-XP.

Концентрацію гормонів ЩЗ Т₃, Т₄ та ТТГ гіпофізу в сироватці крові тварин, опромінених *in utero*, та інтактних тварин (біологічний контроль) визна-

чали в терміни 6 та 10 міс. На першому етапі дослідження було визначено збільшення концентрації ТТГ в сироватці крові опромінених тварин: $2,48 \pm 0,23$ нмоль/л (у контролі $1,80 \pm 0,29$; $p < 0,05$) за відсутністю різниці у концентрації гормонів ЩЗ T_3 ($8,01 \pm 0,48$ проти $7,92 \pm 0,43$ у контролі; $p > 0,05$) та T_4 ($15,65 \pm 0,97$ проти $15,99 \pm 1,04$ у контролі; $p > 0,05$). Отримані дані дають змогу припустити, що за умов експерименту мала місце відносна функціональна недостатність ЩЗ, що була компенсована підвищенням концентрації гіпофізарного ТТГ. На другому етапі дослідження у експериментальних тварин 10-місячного віку (що відповідає віку людини 29 - 30 років) не було визначено різниці у концентрації ТТГ та тиреоїдних гормонів ЩЗ відносно контролю: ТТГ ($2,35 \pm 0,21$ проти $1,94 \pm 0,18$ у контролі; $p > 0,05$), T_3 ($7,81 \pm 0,42$ проти $7,66 \pm 0,39$ у контролі; $p > 0,05$), T_4 ($14,85 \pm 1,06$ проти $16,09 \pm 0,94$ у контролі; $p > 0,05$).

Висновок. Внутрішньоутробне опромінення щурів Вістар внаслідок одноразового введення радіоізотопу ^{131}I , що формує дозу на ЩЗ залозу плоду $0,72 \pm 0,14$ Гр, призводить до тимчасового підвищення продукції ТТГ з поступовим відновленням балансу гормонів гіпофізарно-тиреоїдної осі в період 6-10-ти міс спостереження.

РЕАКЦІЯ СИСТЕМИ КРОВОТВОРЕННЯ НА ДОДАТКОВЕ ОПРОМІНЕННЯ У СУБЛЕТАЛЬНІЙ ДОЗІ ЩУРІВ, БАТЬКИ ЯКИХ ЗАЗНАЛИ ВПЛИВУ ІНКОРПОРОВАНОГО ^{131}I

О. Б. Ганжа¹, Н. М. Рябченко¹, А. І. Липська¹, В. В. Талько²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*² ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини
Національної академії медичних наук України», Київ, Україна*

Дослідження виконано на білих лабораторних щурах-самцях, батьки яких зазнали впливу інкорпованого ^{131}I . Було сформовано 4 групи нащадків першого покоління (F 1) щурів: 1) інтактні батько і мати (контроль) – F 1; 2) інтактна мати та опромінений батько – F 1 (♂); 3) інтактний батько та опромінена мати – F 1 (♀); 4) опромінені батько і мати – F 1 (♂ ♀).

Для виявлення реакції кровотворної системи щурів-нащадків усіх 4-х експериментальних груп одноразово опромінювали на апараті РУМ-17 у дозі 5,34 Гр, що є сублетальною для даного виду тварин. Досліджувані показники визначали в динаміці: до опромінення (вихідні дані), на 7, 14, 21 та 28 добу після опромінення. Отримані результати оцінювали як по відношенню до вихідних даних, так і даних контрольної групи щурів.

Досліджували зміни вмісту лейкоцитів і еритроцитів у периферичній крові щурів, кількість клітин кісткового мозку та тимуса. Рівень генотоксичних ушкоджень у кістковому мозку щурів визначали за частотою поліхроматофілних еритроцитів із мікроядрами за допомогою методу проточної цитофлуориметрії. Індекс цитотоксичної дії оцінювали за співвідношенням поліхро-

матофільних еритроцитів до нормохроматофільних еритроцитів кісткового мозку.

Після опромінення в дозі 5,34 Гр у досліджуваних щурів спостерігали типові для сублетальних доз порушення у системі кровотворення, зокрема стосовно вмісту лейкоцитів і еритроцитів у периферичній крові тварин.

При аналізі лейкоцитарної формули виявили зміни кількості лімфоцитів, еозинофілів, моноцитів та базофілів у крові щурів. Також спостерігали зміни співвідношення окремих фракцій у лейкограмі: впродовж усіх термінів спостереження відмічали зниження вмісту сегментоядерних нейтрофілів та появу значної кількості палочкоядерних нейтрофільних гранулоцитів, що свідчить про подразнення кістково-мозкового кровотворення внаслідок опромінення.

При підрахунку установили, що у щурів групи F1 (♂), F1 (♀) та F1 (♂ ♀) кількість клітин кісткового мозку суттєво не відрізнялась від контролю, тоді як кількість клітин тимуса була вірогідно знижена.

Найвищий рівень цитогенетичних ушкоджень у клітинах кісткового мозку спостерігали у групі щурів F1 та F1 (♂ ♀): рівень поліхроматофільних еритроцитів із мікроядрами на кінець експерименту становив $5,5 \pm 0,5$ та $5,0 \pm 0,9$ % відповідно. У тварин групи F1 (♂) рівень цитогенетичних показників достовірно не відрізнявся від групи порівняння (F1). У цей термін спостереження у групі тварин F1 (♀) рівень цитогенетичних ушкоджень клітин кісткового мозку становив $3,0 \pm 0,4$ %, що відповідає популяційній нормі. На кінець експерименту в усіх групах експериментальних щурів не виявлено відмінностей у величині індексів цитотоксичності, що свідчить про відновлення дозрівання та диференціації еритроїдного ряду кісткового мозку.

Таким чином, за дії опромінення у сублетальній дозі існують відмінності у щурів-нащадків, батьки яких зазнали впливу інкорпорованого ^{131}I , від контрольних тварин, що виявляються у динаміці змін основних показників системи кровотворення.

ВІЛЬНОРАДИКАЛЬНІ ПРОЦЕСИ У КРОВІ ЩУРІВ ЗА ДІЇ НА ОРГАНІЗМ ІНКОРПОРОВАНИХ РАДІОНУКЛІДІВ РІЗНОЇ ТРОПНОСТІ

**Ю. П. Гриневич¹, А. І. Липська¹, І. П. Дрозд¹,
С. В. Телецька¹, Л. І. Маковецька²**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології
ім. Р. Є. Кавецького НАН України, Київ, Україна*

У результаті аварії на ЧАЕС в атмосферу було викинено широкий спектр радіонуклідів, що обумовило формування складного їхнього впливу на біоту. Якщо в перші дні після аварії дозові навантаження визначались короткоіснуючими радіонуклідами, найважливішими із яких були ізотопи радіоактивного

йоду ($^{131-133}, ^{135} \text{I}$), то в подальшому дозові навантаження формувались довгоіснуючими радіонуклідами цезію ($^{137} \text{Cs}$) і стронцію ($^{90} \text{Sr} + ^{90} \text{Y}$). Маючи неординарну тропність, ці радіонукліди депонуються в організмі людей і тварин в різних органах і тканинах, спричиняючи особливий вплив на процеси метаболізму, зокрема, і на вільнорадикальні (ВРП), які є первинною ланкою в механізмі дії радіації. Так, $^{131} \text{I}$ акумулюючись в щитоподібній залозі, активно впливає на метаболічні процеси всього організму. Водночас, $^{90} \text{Sr} + ^{90} \text{Y}$ має тропність до кісткового мозку, там депонується і тим самим активно впливає не тільки на кістково-мозкове кровотворення, а й на систему крові в цілому.

Мета роботи: дослідити особливості перебігу вільнорадикальних (перекисних) процесів у крові щурів за разового введення інкорпорованих радіонуклідів $^{131} \text{I}$ та $^{90} \text{Sr} + ^{90} \text{Y}$.

Експерименти проведені на статевозрілих щурах-самцях лінії Вістар масою 220 ± 30 г, які утримувались на стандартному раціоні. Розчин натрію йодиду (0,2 мл) активністю 114,8 кБк/тварину та розчин хлориду стронцію (0,5 мл) активністю 113,9 кБк/тварину вводили тваринам разово. Кров із хвостової вени (0,2 мл) відбирали згідно із графіком експерименту. Інтенсивність перекисних (вільнорадикальних) процесів досліджували в гемолізатах за методом кінетичних хемілюмінесцентних характеристик (ХЛ-тест) в динаміці експерименту. Обробку і аналіз даних здійснювали за допомогою ПК з використанням програмного забезпечення "Power Graph". Вміст $^{131} \text{I}$ та $^{90} \text{Sr} + ^{90} \text{Y}$ в органах і тканинах вимірювали на γ -спектрометрі з Ge (Li) детектором ДГДК-60.

На основі проведеного порівняльно-узагальненого аналізу інтенсивності ВРП за кінетичними параметрами ХЛ-реакції: світлосуми світіння (Σ_{300}), амплітуди швидкого спалаху ХЛ (I_{max}) та прикінцевої інтенсивності світіння ($I_{\text{кін}}$) було виявлено однотипність змін досліджених показників за дії на організм інкорпорованих радіонуклідів $^{131} \text{I}$ та $^{90} \text{Sr} + ^{90} \text{Y}$ в період перших трьох діб від початку введення їх. Належить зазначити, що як зменшення, так і подальше зростання амплітуди параметрів ХЛ-реакції в цей період спостереження відбувається інтенсивніше і з більшою швидкістю за введення $^{90} \text{Sr} + ^{90} \text{Y}$. Від третьої доби, коли реєструються повторне зменшення параметрів ХЛ-реакції мінімальні їхні значення реєструються на 7-у добу за введення $^{131} \text{I}$, тоді як за введення $^{90} \text{Sr} + ^{90} \text{Y}$ – на 15-у. Швидкість зниження показників ХЛ-реакції та їхня інтенсивність також вищі за введення $^{131} \text{I}$. Водночас, початок відновлення віднорадикальних процесів за введення $^{131} \text{I}$ відбувається у більш ранні терміни (сьома доба), ніж за введення $^{90} \text{Sr} + ^{90} \text{Y}$ (14-а доба).

Отримані результати свідчать, що за наведених умов опромінення реєструвалися фазні зміни у окисному гомеостазі тварин. Окрім того, спостерігаються відмінності в інтенсивності та динаміці перебігу ВРП у крові щурів за дії на їхній організм інкорпорованих радіонуклідів різної тропності, що будуть детально обговорені у доповіді, в якій будуть представлені також експериментальні дані впливу досліджуваних радіонуклідів на систему кровотворення.

АЭРОБНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ МЕТАБОЛИЗМ МИОКАРДА – МИШЕНЬ ИНКОРПОРИРОВАННОГО ^{137}Cs

А. И. Грицук¹, А. Н. Коваль¹, Н. А. Грицук², В. Т. Свергун¹

¹ Гомельский государственный медицинский университет, Гомель, Беларусь

² ОАО «Современные медицинские технологии», Санкт-Петербург, Россия

^{137}Cs – основной дозообразующий элемент загрязненных территорий, является аналогом и антагонистом калия, играющего в деятельности миокарда исключительно важную функциональную роль. Для цезия не установлена какая-либо специфическая биологическая функция. Однако его клеточное поведение, напоминает поведение K^+ , что обусловлено значительным сходством их физико-химических параметров.

Цель. Изучение параметров митохондриального окисления миокарда животных при пероральном поступлении и инкорпорации ^{137}Cs .

Материалы и методы. Полярографическим методом исследовали влияние инкорпорированного ^{137}Cs на показатели митохондриального окисления ткани миокарда крыс с уровнем накопления радионуклида 60, 600, 1500 и 17000 Бк/кг веса животного, что соответствует дозам облучения в 4, 15, 170 и 1940 мкГр.

Результаты. Установлен фазный ответ системы тканевого дыхания и окислительного фосфорилирования миокарда на различные уровни инкорпорации ^{137}Cs . При уровне инкорпорации 60, 600 Бк/кг интенсивность митохондриального дыхания на эндогенных субстратах увеличивается соответственно в 1,7 и 2,2 раза по сравнению с контролем. Эффективность энергетического обмена в миокарде при этом снижается за счет лабилизации системы сопряжения окислительного фосфорилирования и снижения активности креатинфосфокиназной буферной системы. Увеличение уровня накопления ^{137}Cs до 1500 и 17000 Бк/кг сопровождается снижением дыхательной активности миокарда соответственно до 0,78 и 0,80 от контрольных значений. При стабильной активности креатинфосфокиназной буферной системы миокарда, в системе сопряжения окислительного фосфорилирования наблюдается разобщение. При значительно меньших уровнях накопления радиоцезия ответная реакция организма более выражена. Так, при инкорпорации ^{137}Cs в количестве 60 и 600 Бк/кг содержание МДА в ткани миокарда и плазме крови возрастало более чем в два раза. Вместе с тем, при длительном поступлении в организм животных и инкорпорации ^{137}Cs в количестве 1500 и 17000 Бк/кг концентрация конечного продукта ПОЛ возрастала в плазме крови животных, тогда как в миокарде животных обеих подопытных групп изменялась незначительно, что подтверждает мнение о высоком антиоксидантном потенциале мышечной ткани.

Несомненно, что в условиях увеличения рабочей нагрузки на миокард, воздействия на него дополнительных неблагоприятных факторов (курение,

алкоголь, алиментарные нарушения, гипоксия, ишемия, гипокинезия и др.) вероятность появления дисфункций резко возрастает. В нормальных условиях система производства и потребления энергии кардиомиоцита взаимно сбалансированы, однако при экстремальных воздействиях, возможно нарушение этого баланса с последующим развитием «метаболической фибрилляции» и гибели клетки Weiss J. N. et al. 2006. Совокупное действие этих факторов повышает риск развития сердечно-сосудистой патологии.

Выводы. С учетом сходства физико-химических параметров ионов K^+ и $^{137}Cs^+$, авторы обосновывают концепцию о высокой кардиотропности и кардиотоксичности ^{137}Cs .

КОНЦЕНТРАЦІЯ ПРОЗАПАЛЬНИХ ЦИТОКІНІВ (ФНП- α ТА ІЛ-6) У КРОВІ, РІВЕНЬ АДИПОНЕКТИНУ ТА ГЛЮКОЗНИЙ ГОМЕОСТАЗ У УЧАСНИКІВ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ АВАРІЇ НА ЧАЕС, ЯКІ ЗАХВОРИЛИ НА ЦУКРОВИЙ ДІАБЕТ 2 ТИПУ

Н. С. Домбровська

Державна установа «Національний науковий центр радіаційної медицини Національної академії медичних наук України», Київ, Україна

Цукровий діабет (ЦД) 2 типу є однією з основних проблем сучасної медицини. Результати проведеного ретроспективного дослідження 10 033 постраждалих внаслідок аварії на ЧАЕС, за даними клініко-епідеміологічного реєстру (КЕР) ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України» (ННЦРМ), свідчать про високу частоту ЦД 2 типу серед учасників ліквідації наслідків аварії (УЛНА) на ЧАЕС. Через 25 років після аварії його частота дорівнювала 14,2 %, що в 2,5 рази більше, ніж серед евакуйованих і жителів радіоактивно забруднених територій. Ретроспективний аналіз даних КЕР у динаміці 1992 - 2015 рр. показав високу частоту та збільшення нетиреоїдної незлоякісної ендокринної патології в УЛНА йодного періоду, опроміненіх у молодому віці. Якщо у 1992 - 1993 рр. частота ЦД 2 типу в них дорівнювала 4,82 %, то в 2014 - 2015 рр. збільшилась майже у 4 рази і досягла значення 16,05 %. На всіх етапах спостереження частота ЦД 2 типу в УЛНА на ЧАЕС суттєво перевищувала загальнодержавний рівень.

Механізми формування ЦД 2 типу та його ускладнень дотепер залишаються недостатньо вивченими. В останні роки встановлено, що важливу роль у патогенезі інсулінорезистентності (ІР) (ЦД 2 типу) відіграє активація імунної системи, в тому числі, підвищення концентрації цитокінів. Доведено, що за умов ІР жирової тканини, адипоцитами виділяється надмірна кількість цитокінів, таких, як фактор некрозу пухлин- альфа (ФНП- α), ІЛ-6 та багатьох інших. ФНП- α є типовим прозапальним цитокіном та одночасно адипокіном. Відповідно до сучасних уявлень жирова тканина вважається ендокринним органом, що синтезує регуляторні протеїни («адипокіни», «адипоцитокіни»),

які відіграють суттєву роль в патогенезі ЦД. В останні два десятиріччя велика увага приділяється одному із протизапальних адипоцитокінів, а саме адипонектину.

Метою роботи є дослідження концентрації прозапальних цитокінів (ФНП та ІЛ-6) адипонектину, глюкозного гомеостазу в учасників ліквідації наслідків аварії (УЛНА) на ЧАЕС гострого «йодного» періоду, які хворіють на ЦД 2 типу.

Дослідження глюкозного гомеостазу показало, що рівень ІРІ у пацієнтів основної групи складав ($27,78 \pm 2,71$ мкМО/мл), що перевищувало його значення в групі порівняння ($20,55 \pm 0,79$ мкМО/мл), $p < 0,05$. Відповідно до цього у пацієнтів основної групи були максимальні значення НОМА-ІР, а саме ($9,99 \pm 0,56$), в групі порівняння – ($4,96 \pm 0,21$), ($p < 0,05$). Рівень глікозильованого гемоглобіну складав ($7,19 \pm 0,18$) %.

У хворих основної групи рівень адипонектину дорівнював ($9,58 \pm 0,81$) нг/мл, що був меншим, чим в групі порівняння ($16,95 \pm 3,14$) нг/мл, $p < 0,05$. При нормальній масі тіла (ІМТ до 25,0), та передожирінні (ІМТ 25, - 29,9) його рівні були також були достовірно меншими порівняно з показниками в аналогічних підгрупах групи співставлення, відповідно ($8,25 \pm 0,93$) та ($23,88 \pm 9,88$) нг/мл і ($10,95 \pm 1,36$) та ($24,34 \pm 10,04$) нг/мл. При ожирінні І ст. (ІМТ понад 30,0) рівні адипонектину не відрізнялися в групах, відповідно ($9,43 \pm 1,15$) та ($9,02 \pm 3,15$), $p > 0,05$.

Висновок. В учасників ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС гострого «йодного» періоду, які хворіють на цукровий діабет 2 типу, зниження рівня протизапального адипоцитокіну – адипонектину асоційовано з порушеннями глюкозного гомеостазу та ожирінням.

КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ БІОМАРКЕРІВ ІНДИВІДУАЛЬНОЇ РАДІОЧУТЛИВОСТІ ЛЮДИНИ

М. О. Дружина, Л. І. Маковецька, В. М. Михайленко, Е. А. Дьоміна, О. А. Главін, Т. В. Семиглазова

*Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології
ім. Р. С. Кавецького НАН України, Київ, Україна*

Епідеміологічні спостереження та ретроспективний аналіз свідчать, що індивідуальна радіочутливість (ІРЧ) людини, як генетично детермінована ознака організму, варіює в широких межах. Проте, при нормуванні дії іонізуючих випромінювань це практично не враховується. У той же час, застосування ядерних технологій в промисловості, сільському господарстві, медицині, науці веде до надфонового опромінення професіоналів і населення, що зумовлює підвищення канцерогенного ризику. Тому в роботі вивчали можливість створення комплексного тесту ІРЧ. Для цього периферичну кров дорівнів досліджували як до, так і після опромінення (2 Гр) *in vitro*.

Підтверджено, що хромосомний G₂-radiation sensitivity assay є інформативним біомаркером визначення ІРЧ. Для радіочутливих осіб коефіцієнт ІРЧ варіює від 1,1 до 1,7.

Виявлено високу міжіндивідуальну варіабельність показників окисного метаболізму крові. Найбільш чутливим з них є швидкість генерування супероксидного аніон-радикала лімфоцитами периферичної крові (ЛПК) та кількість апоптичних клітин, а найбільш стабільними – рівень сульфгідрильних білків (СГБ) та активність каталази. Показано наявність достовірного прямого кореляційного зв'язку між прооксидантно-антиоксидантним співвідношенням у гемолізаті і вмістом СГБ в плазмі та зворотного кореляційного зв'язку між інтенсивністю утворення вільних радикалів ЛПК та відносною кількістю цих клітин в стані апоптозу.

Показана наявність міжстатевих відмінностей за деякими із досліджених показників крові донорів. У чоловіків спостерігали достовірно вищий рівень продукції вільних радикалів ЛПК (в 1,47 раза), менший вміст СГБ в плазмі крові (в 1,2 раза) і більш високу міжіндивідуальну варіацію активності каталази (у 1,67 раза) та зменшений вміст клітин в стані апоптозу після тестуючого опромінення.

За отриманими результатами оптимальна базова панель біомаркерів для визначення ІРЧ складається із наступних показників: хромосомний G₂-radiation sensitivity assay, прооксидантно-антиоксидантне співвідношення, рівень СГБ, швидкість генерування вільних радикалів. Як додаткові показники слід виділити активність каталази, відносний вміст апоптичних клітин та рівень токсичних продуктів пероксидного окиснення ліпідів.

МОДИФІКАЦІЯ ВОДОРОЗЧИННИХ ПРОТИПУХЛИННИХ ПРЕПАРАТІВ РАДІАЦІЙНИМ ОПРОМІНЕННЯМ

**М. А. Заболотний¹, Г. І. Довбешко², Г. І. Соляник³,
О. П. Гнатюк², В. Е. Орел⁴**

¹ *Навчально-науковий центр РБ КНУ ім. Тараса Шевченка, Київ, Україна*

² *Інститут фізики НАН України, Київ, Україна*

³ *Інститут ІЕПОР ім. Р.Є. Кавецького НАН України, Київ, Україна*

⁴ *Національний інститут раку МОЗ України, Київ, Україна*

Актуальність досліджень обумовлена необхідністю створення неруйнівних фізичних методів модифікації протипухлинних препаратів для підвищення їхньої терапевтичної ефективності.

Мета – визначення та аналіз впливу попереднього опромінення розчинника на оптичні і терапевтичні властивості розчинених в ньому лікарських препаратів антрациклінового та алкалоїдних рядів для підвищення їхньої ефективності.

Об'єкти дослідження – при измерениях використовувались препарати доксорубіцин (Pharmacia Italia SpA", Italy), коніум ("Valeda", Germany), розчинник – хлорід натрію.

При оптичних дослідженнях вимірювалися спектральні залежності поглинання (А) розчину препаратів в неопромінену та попередньо опромінену електронами розчиннику в інфрачервоному діапазоні світла. Вимірювання виконувалися на ІЧ-фур'є спектрометрі Bruker IFS 66. Спектри визначалися в діапазоні енергій (ϵ) [$10^3 - 2 \cdot 10^3$] cm^{-1} Енергія опромінюючих електронів становила 1,0 Мев. Величини дози поглинутого (I) опромінення були 5, 15, 25, 40, 80, 100 кГрей. Використовувався кореляційний аналіз Пірсона при проведенні порівняльного аналізу поглинання (А(ϵ), I).

Дослідження здатності високоенергетичного електронного опромінення фізіологічного розчину, як розчинника лікарського препарату, модифікувати фармакологічну активність протипухлинного препарату доксорубіцин досліджували *in vitro* з використанням лінії злоякісних клітин карциноми легені Льюїс (LLC). Було зареєстровано, що інкубація клітин LLC протягом 24 год в присутності доксорубіцину, розчиненого в неопромінену фізіологічному розчині, призводить до концентраційно-залежного зменшення кількості живих клітин. Це обумовлено або інгібуванням проліферації пухлинних клітин (цитостатична дія), та/або їхньою загибеллю (цитотоксична дія), індукованою протипухлинним препаратом. Водночас, доксорубіцин, розчинений в опромінену фізіологічному розчині, призводить до посилення цитотоксичної/цитостатичної дії, яка найбільше проявляється за низьких концентрацій: так, кількість живих клітин LLC за концентрацій, менших 3 мкМ, зменшилась в середньому на 20 % ($p < 0,05$) порівняно з дією доксорубіцину, розчиненого в неопромінену фізіологічному розчині..

Висновки. 1) Таким чином, попереднє радіаційне опромінення розчинника, не змінюючи суттєво медичні препарати (у всіх випадках коефіцієнт кореляції перевищує критичне значення), змінює деякі його властивості в коливальному діапазоні, який суттєво залежить від конформаційного стану молекул. 2) Встановлена здатність високоенергетичного електронного опромінення розчинника підвищувати фармакологічну активність протипухлинних препаратів коніум та доксорубіцин (особливо в діапазоні низьких концентрацій препаратів). 3) Зареєстрована низька варіабельність показників виживаності клітин після інкубації з доксорубіцином на опромінену фізіологічному розчині в порівнянні з відповідними показниками з використанням неопроміненого розчинника.

МЕТАБОЛИЗМ ^{137}Cs В ОРГАНИЗМЕ СЕРЕБРЯНОГО КАРАСЯ (*CARASSIUS GIBELIO*) ПРИ НИЗКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ВОДЫ

**О. В. Кашпарова, С. Е. Левчук, В. П. Процак,
В. С. Павленко, И. Н. Гудков, В. О. Кашпаров**

*Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины,
Киев, Украина*

Изменение удельной активности радионуклида в организме рыб $C_f(t)$, как правило, описывают линейным дифференциальным уравнением:

$$\frac{dC_f}{dt} = (k_f + k_w)C_w - (k_b + \lambda)C_f, \quad (1)$$

где $C_w(t)$ и $C_f(t)$ удельная активность ^{137}Cs в воде и мышечной ткани рыбы (Бк/кг) в момент времени t (сут); k_f и k_w – скорость поступления ^{137}Cs в рыбу с кормом и из воды (1/сут); k_b – скорость выведения ^{137}Cs из организма рыбы (1/сут); $\lambda = 6.3 \cdot 10^{-5}$ 1/сут - постоянная радиоактивного распада ^{137}Cs .

Величины равновесного коэффициента накопления ^{137}Cs (CF) из воды в организм различных видов разного размера рыб в зависимости от содержания в воде макроаналога цезия-калия хорошо изучена:

$$CF = \frac{C_f}{C_w} \approx (k_f + k_w) / (k_b + \lambda), \quad (2)$$

Целью этой работы было определение скорости поступления ^{137}Cs из воды (k_w , 1/сут) и выведения (k_b , 1/сут) ^{137}Cs из организма серебряного карася (*Carassius gibelio*) при низкой температуре воды (5 ± 1 °C). Воду для аквариумов использовали с содержанием калия 2 мг/л и ^{137}Cs менее 0,01 Бк/л из озера в районе с. Козин с добавлением раствора $^{137}\text{CsCl}$ из расчета 1 Бк/мл. Для прижизненно измерения в динамике активности ^{137}Cs в живой рыбе использовали пластиковые емкости (сосуды Маринелли) на низкофоновом γ -спектрометрическом комплексе ADCAM-300 с детектором с высокочистого германия GEM-30185 («EG & G ORTEC», США). В конце экспериментов через 21 - 123 сут были отобраны пробы мышечной ткани, кожи, жабр и желудков рыб для измерения удельной активности ^{137}Cs .

В результате работы впервые получены значения скоростей поступления ^{137}Cs в организм серебряного карася (*Carassius gibelio*) из воды с содержанием калия 2 мг/л ($k_w = 0,045 \pm 0,002$ 1/сут, $T_{1/2} = 350$ сут) и выведение из организма ^{137}Cs ($k_b = 0,002 \pm 0,001$ 1/с) при температуре $T = 5 \pm 1$ °C. При уменьшении содержания калия в воде до 0,2 мг/л скорость поступления ^{137}Cs в рыбу из воды увеличивается почти в 2 раза до величины $k_w = 0,071 \pm 0,004$ 1/сут, а при увеличении содержания калия в воде в 10 раз до 20 мг/л незначительно уменьшается до $k_w = 0,037 \pm 0,003$ 1/сут.

Полученные нами результаты показывают, что скорость поступления радиоцезия из воды при низкой температуре 5 °С ($k_w = 0,045 \pm 0,002$ 1/сут) в организм рыб в сотни раз ниже по сравнению со скоростью поступления ^{137}Cs с кормом ($k_f = 10 - 15$ 1/сут) при температуре около 20 °С. Несмотря на это, полученные оценки k_w крайне важны для прогнозирования загрязнения рыбы в осенне-зимне-весенний период при температуре воды около 5°С.

Удельная активность ^{137}Cs в желудке рыб была в 2 раза выше по сравнению с мышечной тканью, кожей и жабрами рыб при поступлении радиоцезия из воды в рыбу в отсутствие кормления. Это может указывать на ошибочность общепринятого предположения о поступлении радиоцезия в организм рыб из воды преимущественно через жабры и кожу.

Показано, что динамика и уровни радиоактивного загрязнения рыбы в случае загрязнения озер в осенне-зимне-весенний период (ноябрь - март) будут принципиально отличаться от радиоактивного загрязнения водоемов в весенне-летне-осенний период (май - сентябрь) при температуре воды около 20 °С. Отличия в этом случае удельной активности ^{137}Cs в организме рыб на протяжении 4 месяцев будут составлять два порядка величины.

МОРФОФУНКЦІОНАЛЬНИЙ СТАН ПРОЛІФЕРУЮЧИХ КЛІТИН IN VITRO В УМОВАХ ПОСІДНАНОГО ВПЛИВУ ФОТОСЕНСІБІЛІЗАТОРА ТА СВІТЛА ОПТИЧНОГО ДІАПАЗОНУ (630 нм)

І. В. Козловська, Г. Й. Лавренчук

*ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України»,
Київ, Україна*

Загальновідомо, що фотодинамічна терапія (ФДТ) заснована на взаємодії молекули фотосенсибілізатора з оптичним випромінюванням певної довжини хвилі. В результаті утворюються цитотоксичні агенти (синглетний кисень і вільні радикали), що вражають клітинні елементи пухлинної тканини.

Метою наукової роботи було дослідження впливу світла червоного діапазону на проліферуючі клітини в присутності фотосенсибілізатора.

Матеріали та методи. Тест-системою проліферуючих клітин була вибрана культура перещеплюваних клітин лінії L₉₂₉. Клітини культивували в повному поживному середовищі RPMI-1640 (Gibco), що містило 4 ммоль/л L-глутаміну, 10 % ембріональної сироватки теляти, 40 мкг/мл гентаміцину згідно зі стандартними методами роботи з клітинними штамми. Вирощували при постійній температурі 37°С на покривних скельцях розмірами (16×8) мм, які знаходилися на дні скляних пляшечок, до конфлуентного стану моношару (1 - 6 діб). В експерименті джерелом червоного світла слугувало лазерне випромінювання з довжиною хвилі 630 нм від апарата «Ліка хірург» (ЧМПП

«Фотоніка плюс», м. Черкаси) (He-Ne-лазер) за потужності 100 мВт з експозицією 10 хв (щільність світлової енергії 60 Дж/см²). Опромінення проводили через 1 год після введення в поживне середовище культури клітин фотосенсибілізатора «ФОТОЛОН» (Білорусь) у різних концентраціях. Морфофункціональні характеристики культури клітин оцінювали у різні терміни культивування клітин за загальноприйнятими показниками життєздатності: проліферативна і мітотична активність та кількість гігантських багатоядерних клітин. Проліферативну активність клітин оцінювали за кінетикою росту. Під оптичним мікроскопом «Axioscop» (West Germany) при збільшенні у 1000 разів у межах сітки підраховували загальну кількість клітин, кількість мітозів і кількість гігантських багатоядерних (2 і більше ядер) клітин. Мітотичний індекс та індекс полікаріоцитів розраховувався на 1000 клітин (%). Фото отримані при допомозі цифрової камери DIGITAL CAMERA for Microscope ScienceLab DCM320(USB 2.0), Resolution 3.5 Mpixels. У контрольних та дослідних культурах клітин визначали рівень апоптозу. Аналізували на протоковому цитофлюориметрі FACStar Plus фірми “Becton Dickinson” (США). Апоптоз фіксували по гіподиплоїдному ДНК-піка, який чітко відділявся від нормального (диплоїдного) ДНК-піка. Оцінювали червону флуоресценцію (канал FL-2) пропідіум йодиду с довжиною хвилі λ 595 нм не менш, ніж для 10000 клітин.

Статистичний аналіз вірогідності отриманих даних проводили за допомогою t-критерію Стьюдента, використовуючи комп'ютерні програми Microsoft Excel та Biostat з попередньою перевіркою гіпотези про нормальний закон розподілу випадкової величини за критерієм Колмогорова - Смірнова. При виконанні експериментальних досліджень було проаналізовано 894 препаратів культур клітин.

Результати дослідження. Було виявлено, що опромінення клітин світлом червоного діапазону заданої потужності в присутності фотосенсибілізатора «ФОТОЛОН» в концентрації 100 мкл/мл поживного середовища викликає деструктивні зміни у 96 % клітин. Показано, що морфофункціональні зміни (зменшення щільності клітинного моношару, мітотичної активності, вакуолізація цитоплазми, зростання кількості полікаріоцитів і кількості ядер в них) спостерігались вже за поєданого впливу опромінення та препарату в концентрації 10 мкл/мл. Водночас окреме застосування цих двох чинників не призводило до таких негативних наслідків для клітин.

Висновок. За результатами дослідження можна вважати, що поєднаний вплив фотосенсибілізатора «ФОТОЛОН» та лазерного випромінювання з довжиною хвилі 630 нм викликає деструкцію 96 % проліферуючих клітин лінії L₉₂₉, яка може моделювати пухлинні клітини.

ВЛИЯНИЕ ФОТОДИНАМИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ НА ЗАЖИВЛЕНИЕ ЛУЧЕВОЙ ЯЗВЫ КОЖИ, ИНФИЦИРОВАННОЙ *PSEUDOMONAS AERUGINOSA*

Н. В. Красносельский, Л. И. Симонова, В. З. Гертман, Е. С. Пушкарь

*ГУ «Институт медицинской радиологии им. С. П. Григорьева
Национальной Академии медицинских наук Украины», Харьков, Украина*

Проблема лечения лучевых повреждений тканей, которые являются следствием терапии злокачественных новообразований, сохраняет свою актуальность. В Европе из 10 млн человек с онкологическими заболеваниями лучевую терапию получают 60 - 70 % больных]. При проведении лучевой терапии злокачественных новообразований наибольшему воздействию подвергаются кожа и подлежащие ткани. Лучевые язвы кожи являются частыми осложнениями лучевой терапии, лечение которых продолжительно и невероятно затруднено. У больных со злокачественными новообразованиями отмечено частое инфицирование лучевых язв кожи, что еще больше усугубляет процессы заживления поврежденных тканей. Известно, что при лечении инфицированных повреждений первоочередным лечебным мероприятием является антибактериальная терапия. Традиционно для этого используют антибиотики, однако, в настоящее время все больше патогенных микроорганизмов становятся антибиотикорезистентными. Поэтому внимание медиков привлекают альтернативные антибактериальные методы, среди которых наиболее перспективным является фотодинамическая терапия (ФДТ). ФДТ представляет собой метод активации специального вещества (фотосенсибилизатора) световым излучением с последующим развитием фотохимических реакций в клетке, приводящих к ее гибели. В настоящее время ФДТ широко используется для лечения ран и длительно незаживающих трофических язв диабетической стопы. При этом, несмотря на довольно широкое применение ФДТ в качестве антибактериального метода при лечении инфицированных ран и язв, мы не встретили в доступной нам литературе упоминаний об использовании этого метода при лечении инфицированных лучевых повреждений кожи и мягких тканей.

Цель: выявить влияние фотодинамической терапии на заживление экспериментальной лучевой язвы кожи, инфицированной *Pseudomonas aeruginosa*.

Материалы и методы. Инфицированную лучевую язву моделировали путем локального рентгеновского облучения кожи бедра крысы в дозе 85,0 Гр с последующим нанесением на поверхность язвы бактериальной взвеси *Pseudomonas aeruginosa*. Фотодинамическую терапию (ФДТ) проводили с помощью фотонного аппарата «Барва-LED/630» и фотосенсибилизатора метиленового синего. Влияние ФДТ на скорость и качество заживления инфицированной лучевой язвы определяли путем сравнения показателей гистологического и морфометрического исследования кожи из области лучевой язвы

животных из контрольных и леченной ФДТ групп.

Результаты и выводы. Наличие *Pseudomonas aeruginosa* в лучевой язве приводило к увеличению площади раневой полости по сравнению с неинфицированной лучевой язвой и к существенному торможению процессов ее заживления. Присоединение фактора инфицирования снижало активность репаративных процессов в лучевой язве на 20 % по сравнению с неинфицированной. Воздействие фотодинамической терапии способствовало полному заживлению в среднем на один месяц раньше, чем у животных контрольных групп.

DYNAMICS OF RADIOECOLOGICAL AND CYTOGENETIC CHANGES IN THE POPULATIONS OF *MYODES GLAREOLUS* INHABITING THE CHORNOBYL EXCLUSION ZONE

A. I. Lypska, O. O. Burdo, N. N. Ryabchenko, V. A. Shytuk, V. I. Nikolaev

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

Environmental contamination resulting from the Chernobyl disaster offers a unique opportunity to examine *in vivo* biological effects of chronic low-dose exposure to radiation. For a long time, highly radioactive area of the Red Forest has been used as a test site for the prolonged radioecological and radiobiological investigations, which include adaptation of natural populations to chronic radiation exposure combined with other changing environmental factors. Since 2009, dosimetric assessments of the experimental site and radiobiological studies of *Myodes glareolus* (bank vole) population have been performed at the Department of Radiobiology and Radioecology of the Institute for Nuclear Research of NAS of Ukraine.

The results of long-term (2009 - 2016) dynamics of radioactive contamination, dose rates and cytogenetic changes in somatic cells of the bank voles living on the territories with high level of radiation contamination are presented. The bank voles of the studied populations were combined into one group within each year of research.

Wide variations of total ^{137}Cs content in the body that can reach 1 - 2 orders of magnitude were observed. At the same time changes of ^{90}Sr activity in animals were less expressed. In our opinion, the principal reasons of the observed fluctuations of radionuclide content in the body are the alterations of radionuclide levels in their daily food intake due to the specific features of animals' metabolism (mainly the radionuclide excretion intensity) and changes in the trophic chains involved also under extreme natural factors (such as flood and fire on the contaminated area). The total absorbed dose rates in animals have been decreased over the years of the research.

Cytogenetic and mitotic abnormalities in the bone marrow cells of the bank voles inhabiting the contaminated site were studied. In spite of the remote post-

accident period and the fact of the decrease of the radiation dose rates to the biota, elevated levels of micronucleated (MN) bone marrow cells in the voles from the experimental site were observed. The highest levels of MN cells (4 times higher than in reference animals) were registered in the immigrant animals after the impact of the extreme environmental factors. Mitoses of bone marrow cells of the irradiated animals were characterized by pathologic features, which included mostly binucleated cells and premature chromosome condensation.

An assessment of the dependence of the level of genotoxic injuries on the radionuclide content was carried out using individual data. There were no linear dose-effect dependencies of the examined parameters indicating the absence of threshold of low dose impact and transgenerational accumulation of genomic instability in chronically irradiated wild populations.

ВПЛИВ 2-МЕРКАПТОБЕНЗОТІАЗОЛУ НА МОРФОФУНКЦІОНАЛЬНІ ПОКАЗНИКИ КЛІТИН *IN VITRO*

Х. М. Литвинчук, Г. Й. Лавренчук, Д. Д. Гапєснко

*ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України»,
Київ, Україна*

На сьогодні, незважаючи на міжнародні угоди, неухильно зростає загроза ядерного тероризму й можливе застосування ядерної зброї у сучасних локальних конфліктах. Тривожним застереженням проти широкомасштабного застосування радіаційних технологій були аварії на ядерних установках: Чорнобильській АЕС – у 1986 р., на АЕС Фукусіма (Японія) – у 2011 р., які загострили проблему захисту всієї біоти як від гострого опромінення, так і від тривалої дії радіації. Подальше проникнення людини в космос також вимагає розробки відповідних радіозахисних заходів.

Метою дослідження було виявлення радіопротекторних властивостей 2-меркаптобензотіазолу у тест-системі культури проліферуючих клітин.

Матеріали і методи. Морфофункціональні зміни в клітинах досліджували у тест-системах культур клітин лінії L₉₂₉ та ембріональних міогенних клітин щурів, які були обрані для дослідження через свою здатність до перманентного поділу, з метою створення моделі проліферативної тканини *in vitro*. Культивування здійснювали в повному поживному середовищі RPMI-1640, що містило 4 ммоль/л L-глутаміну, 10 % ембріональної сироватки теляти та 40 мкг/мл гентаміцину. Клітини вирощували при постійній температурі 37°C на покривних скельцях розмірами (16 × 8) мм до конфлуентного стану моношару. Опромінювали на апараті «Тератрон» (Канада) (джерело – ⁶⁰Co 1,2 Мев, потужність експозиційної дози 4,3 · 10⁻⁴ Кл/(кг·с), відстань до об'єкта 80 см) в дозах 1,0; 5,0 та 10,0 Гр через 24 год після посадки. 2-МБТ додавали за 1 год перед опроміненням в концентраціях 3,0; 0,3 та 0,03 мкг/мл та культивували впродовж 1 - 5 діб. Контролем слугували культури клітин без реагента. Клі-

тинні відповіді оцінювали у різні терміни культивування за загальноприйнятими морфофункціональними показниками життєздатності: проліферативна і мітотична активність та кількість атипичних багатоядерних клітин. Одночасно визначали кількість клітин на стадії апоптозу. Аналізували на протоковому цитофлюориметрі FACStar Plus фірми «Becton Dickinson» (США). Оцінку ефективності радіопротекторних властивостей 2-МБТ проводили за фактором зменшення дози (ФЗД) та коефіцієнтом захисту (Кз). Диференціацію міогенних клітин оцінювали під оптичним мікроскопом «Axioscop» (West Germany) при збільшенні у 1000 разів за наступними показниками: загальна кількість клітин на площі препарата 0,05 мм², кількість мітозів, кількість малодиференційованих міобластів на площі препарата 0,05 мм², кількість високодиференційованих багатоядерних міосимпластів на площі усього препарату та середня кількість ядер в міосимпластах. Впродовж 6 - 8 діб в культурі клітин спостерігали формування мязових волокон: малодиференційовані міобласти об'єднувалися і утворювали багатоядерні структури – міосимпласти. Оцінка процесу диференціації комплексна – за усіма показниками.

Статистичний аналіз вірогідності отриманих даних проводили за допомогою t-критерію Стьюдента, використовуючи комп'ютерні програми Microsoft Excel та Biostat.

Результати дослідження. Було встановлено, що 2-МБТ у фізіологічних для клітин концентраціях (3,00 - 0,003 мкг/мл) не змінює щільності клітинної популяції в моношарових культурах клітин, але підвищує мітотичну активність у термінальний період культивування (5 - 6 доби). Після гамма-опромінення клітин в дозах 1, 5 і 10 Гр спостерігали дозозалежне зменшення їхньої проліферативної та мітотичної активності та істотне зростання в культурі клітин (у 4 рази) кількості полікаріоцитів, які вважають маркерами репродуктивної загибелі. Збільшення рівня апоптозу в опроміненіх культурах проліферуючих клітин свідчить про радіогенний характер їхньої загибелі. Показано, що за умови інкубації клітин до та під час опромінення з 2-МБТ зменшувались радіоіндуковані uszkodження клітин: підвищувались проліферація та мітотична активність порівняно з дією тільки радіації. Зменшення кількості полікаріоцитів у культурі клітин вказувало на генопротекторні властивості реагента. Водночас підвищений рівень апоптозу за цих умов свідчив про елімінацію uszkodжених радіацією клітин з культури. Кількісна оцінка радіопротекторних властивостей 2-меркаптобензтіазолу у тест-системі культури клітин лінії L₉₂₉ показала, що найвищі показники коефіцієнта захисту (0,31 – 0,36) 2-МБТ показав при концентрації 3 мкг/мл при опроміненні в дозі 1 Гр. Водночас фактор зменшення дози (ФЗД), розрахований за ЛД₅₀, при концентраціях 2-МБТ 0,03 та 0,30 мкг/мл мав значення 1,5 та 1,8 відповідно, а за концентрації 3,00 мкг/мл ФЗД був максимальний – 4.

Висновок. За сукупністю даних літератури та результатів власних досліджень можна вважати 2-меркаптобензтіазол реагентом з радіопротекторними властивостями для клітин *in vitro*.

КЛІНІКО-ПСИХОФІЗІОЛОГІЧНИЙ СТАН ПЕРСОНАЛУ ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ», ПІСЛЯ ОПРОМІНЕННЯ В МАЛИХ ДОЗАХ

К. М. Логановський, І. В. Перчук

*ДУ«Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України»,
Київ, Україна*

Охорона психічного здоров'я персоналу і психофізіологічне забезпечення робіт є однією з ключових ланок медичного супроводу робіт з перетворення об'єкта «Укриття» (ОУ) до екологічно безпечної системи. Вплив радіаційних і шкідливих загальнопромислових чинників, а також праця в умовах високої психоемоційної напруги формує унікальне середовище для працівників об'єкта.

Дослідження інформаційних процесів головного мозку із використанням найбільш досконалих технологій аналізу спонтанної і викликані біоелектричної активності є перспективним методом визначення радіоцеребральних ефектів і розробки нових способів біоіндикації опромінення у людей. Комп'ютерна електроенцефалографія (кЕЕГ) є доступним неінвазивним методом для скринингу і сортування неопромінених, опромінених і переопромінених людей при професійному контакті з джерелами іонізуючих випромінювань, радіаційних аваріях, а також при радіологічній терористичній атаці. Роботи на об'єкті «Укриття» забезпечують унікальні можливості для здійснення такої розробки.

Мета дослідження. Визначити зміни стану нервової системи і психіки, когнітивних функцій і біоелектричної активності головного мозку внаслідок робіт на ОУ для удосконалення клініко-психофізіологічних критеріїв професійного відбору і допуску персоналу до робіт в особливо небезпечних і шкідливих умовах праці при дії радіаційних і загальнопромислових факторів ризику.

На підставі проспективного дослідження (перед початком робіт, протягом та після закінчення їх) 196 працівників чоловічої статі віком від 20 до 52 років, ($M \pm SD$: 35,9 \pm 8,2 роки) встановлено, що за дії радіаційних (загальне опромінення у діапазоні доз 0 - 56,7 мЗв, $M \pm SD$: 19,9 \pm 13,0 мЗв), загальнопромислових факторів ризику та стресу формується когнітивний тип синдрому хронічної втоми із дисфункцією кортико-лімбічної системи переважно у домінуючій (лівій) півкулі із ключовим залученням гіпокампу, можливо, за рахунок розладів нейрогенезу. Доведена клінічна і експертна ефективність нейрофізіологічних та нейропсихологічних досліджень для оптимізації контролю стану здоров'я кандидатів для робіт на ОУ та в зоні відчуження ЧАЕС. Показана необхідність постійного медичного моніторингу і реабілітаційних заходів для працівників ОУ.

Використання нейрофізіологічних (кЕЕГ із картуванням спектральної потужності основних діапазонів церебральної електричної активності, домінуючої частоти та ін.) і нейропсихологічних методів дослідження забезпечує

ранню, об'єктивну і ефективну діагностику змін в головному мозку за умов дії радіаційних і загальнопромислових факторів ризику, а також високої психоемоційної напруженості праці.

Встановлено ефект відбору «радіорезистентного працівника», який полягає у тому, що особи, які раніше зазнали впливу іонізуючого випромінювання, але залишилися здоровими, є більш стійкими до подальшого опромінення.

Кандидати для робіт на ОУ та в зоні відчуження ЧАЕС потребують проведення уніфікованого комплексу нейрофізіологічних та нейропсихологічних досліджень для оптимізації контролю за станом їхнього здоров'я. Персоналу ОУ необхідний постійний медичний моніторинг і проведення індивідуальних реабілітаційних заходів.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН МАРКЕРІВ ОКСИДАТИВНИХ ТА НІТРОЗАТИВНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ЗА ТРИВАЛОГО ВПЛИВУ МАЛИХ ДОЗ РАДІАЦІЇ ТА ОКСИДІВ АЗОТУ

Л. І. Маковецька, О. А. Главін, М. О. Дружина, В. М. Михайленко

*Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології
ім. Р. Є. Кавецького НАН України, Київ, Україна*

У реальних умовах живі організми зазнають комплексного впливу чинників навколишнього середовища фізичної та хімічної природи, що при поєднанні з радіацією можуть призводити до нових неочікуваних біологічних ефектів. Оксиди азоту (ОА) та іонізуючі випромінювання (ІВ) відносяться до поширених забруднювачів навколишнього середовища. Дослідження комбінованої дії цих чинників із точки зору канцерогенної небезпеки та розвитку пухлин викликає значний інтерес, оскільки їхні первинні ефекти пов'язані з утворенням та перетворенням різноманітних активних форм кисню (АФК) і активних форм азоту, що зумовлює негативний вплив на організм людини і тварин, призводячи до розвитку оксидативного стресу. При підвищенні концентрації АФК збільшуються окисні пошкодження ДНК, накопичуються зміни у геномі, що викликає збільшення кількості мутацій. Тривале зрушення прооксидантно-антиоксидантної рівноваги призводить до порушення структури і функцій ключових ферментів, мембран, органел, тобто створюються умови для малігнізації тканин.

Тому метою роботи було дослідити порушення системи вільнорадикального гомеостазу та оцінити рівень і тривалість оксидативних і нітрозативних пошкоджень макромолекул для відбору маркерів впливу ІВ та ОА. Досліди проводили на інтактних нелінійних самках щурів вагою 120-150 г розведення віварію ІЕПОР НАН України. Тварини зазнавали фракціонованого рентгенівського опромінення в малих дозах (5 разів по 0,1 Гр, сумарно 0,5 Гр) та впливу екзогенних ОА (12 разів, 8 год/добу, 150 мг/м³ по NO). Визначали чутливість та характер змін маркерів оксидативних і нітрозативних пошкоджень макромолекул за умов порушення вільнорадикального гомеостазу у експериментальних

тварин на 1, 4, 8, 10 та 15 доби після припинення впливу чинників.

Аналіз змін інтегральних маркерів у крові, таких як прооксидантно-антиоксидантне співвідношення, показав переважання прооксидантних процесів, що супроводжувалось посиленням пероксидного окиснення ліпідів та спонтанної і металкаталізованої окисної модифікації білків на 15 добу дослідження. У свою чергу на 4 добу за сумісної дії факторів зареєстровано достовірне зниження продукції вільних радикалів лімфоцитами крові в 2,3 раза, яке змінювалось посиленням утворенням їх на 10 та 15 добу спостереження з перевищенням контрольного рівня до 3,0 разів (10 доба). Зокрема, спостерігали зростання на 20 - 25 % генерації супероксидного аніон-радикала лімфоцитами, порівняно з контролем. Ці дані корелюють із збільшенням (до 3,5 раза) апоптичних клітин з 8 до 15 доби. Однак, в плазмі крові тварин рівень нітрозотіолів не зростав, а продукція АФК була навіть зниженою порівняно з контролем як за дії ОА, так і ОА та ІВ (в 1,4 та 1,3 раза на 15 добу, відповідно). У той же час, активність ксантиноксидоредуктази, яку було переважно представлено ксантиноксидазною ізоформою (89 - 99 %) поступово зростала в 1,2 - 1,6 раза ($p < 0,05$). Такі зміни можуть бути пов'язані із активацією ферментів антиоксидантного захисту – супероксиддисмутази (1,6 раза) і глутатіонредуктази (1,5 - 2,1 раза) в період з 4 до 15 доби та каталази (1,2 раза) до 8 доби із подальшим її зниженням на 10 і 15 добу спостереження.

Таким чином, чутливість та тривалість змін досліджуваних показників окисного метаболізму дає можливість застосовувати їх як маркери оксидативних і нітрозативних пошкоджень для оцінки впливу поширених канцерогенонебезпечних факторів довкілля на організм.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ МУТАГЕННОГО ВПЛИВУ ІНКОРПОРОВАНОГО ¹³¹I IN UTERO

**Л. В. Неумержицька¹, Є. М. Прохорова¹, Н. П. Атаманюк¹,
О. С. Ватліцова, І. Р. Дмитрієва¹, Ж. С. Ярошенко¹,
І. П. Дрозд², А. І. Липська², В. В. Талько¹**

¹ ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України»,
Київ, Україна

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Дослідження закономірностей реалізації спадкових пострадіаційних ефектів у нащадків опромінених батьків передбачає розробку відповідної експериментальної моделі, що дає змогу оцінити можливу специфіку віддалених наслідків. Одним з критеріїв таких досліджень може бути загиньбель потомства на різних етапах онтогенезу, що може свідчити про індукований мутагенез.

Метою роботи було виявлення мутагенної дії інкорпорованого ¹³¹I на зародкові клітини шурів. Серед задач, поставлених в даній роботі, було визначення мутагенної дії інкорпорованого йоду за показником генетичних ушко-

джен в статевих клітинах щурів методом доміантних летальних мутацій. Матеріалом експериментального дослідження було обрано щурів самців і самок. Перед початком експерименту всі тварини були оглянуті, зважені, враховувався їхній вік, рухова активність та стан шкіри. Під час спостереження лабораторні тварини утримувались в звичайних умовах віварію.

Робота виконана на 43 білих статевозрілих щурах - самцях і самках лінії Вістар масою 190 ± 25 г. Сформовано 5 груп; 4 - піддослідні, 1 - контрольна. Для вирішення зазначених задач самцям вводили одноразово перорально водний розчин Na^{131}I по 27,35 кБк на тварину. При цьому ту чи іншу дозу опромінення отримували їхні статеві клітини, що знаходились на даний момент на різних стадіях сперматогенезу. Через різні терміни після радіаційного впливу, необхідних для завершення того чи іншого етапу сперматогенезу, самців спарювали з інтактними самками: через 1 - 8, 10 - 21, 22 - 37, 38 - 48 діб після радіаційного впливу, аналізуючи тим самим післятпроменеві ефекти в зрілих сперматозоїдах, сперматидях, сперматоцитах і сперматогоніях, відповідно до неопромінених самців для отримання контрольних показників для кожної з піддослідних груп.

Першим днем вагітності вважався день виявлення сперматозоїдів в вагінальному мазку, після чого самок відсаджували в іншу клітку. Вагінальні мазки отримували стандартним способом та досліджували під мікроскопом без фіксації і забарвлення. Відсаджених від самців самок на 17 - 19 добу вагітності умертвляли методом декапітації (іншу половину вагітних самок залишали до пологів для подальших досліджень нащадків другого покоління), ножицями розтинали обидва роги матки, підраховували число живих і загиблих ембріонів. Велика частина доміантних летальних мутацій викликає смерть ембріонів при або незабаром після імплантації. Загиблі на цій стадії мертві ембріони виглядають як темні гомогенні округлі тіла діаметром 2,5 - 3 мм.

Показниками слугували: загальна ембріональна смертність, до- і постімплантаційна ембріональна смертність. Доімплантаційну смертність визначали за різницею між кількістю жовтих тіл в яєчниках і кількістю місць імплантації в матці; постімплантаційну – за різницею між кількістю місць імплантації і кількістю живих плодів.

Аналіз отриманих даних дає змогу зробити висновок, що дія радіоїоду призводить до порушення гаметогенезу, що обумовлено насамперед мутагенним ефектом. Однак причини різної генетичної радіочутливості статевих клітин, що знаходяться на різних стадіях гаметогенезу, ще остаточно не відомі. Це може бути обумовлено комплексом факторів: особливостями метаболізму клітин, ступенем конденсації хромосом, рівнем насичення клітин киснем, відносною тривалістю стадій ядерного циклу, чутливістю до летального ефекту радіації, кількістю радіозахисних речовин в цитоплазмі, інтенсивністю роботи системи репарації. Накопичення в статевих клітинах перекисних продуктів може впливати на процеси мейозу через зміни в ДНК і, тим

самим, викликати в них мутаційні зміни, що призводить до збільшення патологічних сперматозоїдів і як наслідок – загибелі плодів.

ГЕМОПОЕТИЧНІ КЛІТИНИ-ПОПЕРЕДНИКИ ЩУРІВ W1STAR ПРИ ДОВГОТРИВАЛОМУ ВНУТРІШНЬОМУ ОПРОМІНЕННІ ^{90}Sr

І. З. Русець¹, Д. І. Білько¹, Н. К. Родіонова², Н. М. Білько¹

¹ Національний університет «Києво-Могилянська академія», Київ, Україна

² Інститут експериментальної патології, онкології та радіобіології
ім. Р. Є. Кавецького НАН України, Київ, Україна

Вплив іонізуючої радіації на організм ссавців проявляється значною мірою у тих системах та органах, де процеси клітинного поділу відбуваються з високою швидкістю, до яких належить процес кровотворення у кістковому мозку. Гемопоетичні стовбурові клітини та їхні найближчі нащадки – клітини-попередники є одними з найбільш радіочутливих, тож актуальним є дослідження кровотворення за умов дії іонізуючого випромінювання, зокрема, у культурі клітин, що дає змогу оцінити функціональну активність стовбурових клітин та клітин-попередників. Метою даної роботи було вивчення процесу гемопоезу щурів Wistar, за умов довготривалого внутрішнього опромінення тварин радіонуклідом ^{90}Sr , із використанням культури клітин у дифузійних камерах *in vivo*.

Модель опромінення лабораторних тварин ^{90}Sr було розроблено так, щоб до кінця періоду затравки поглинута у скелеті доза становила 1 Гр. Щурам щоденно протягом 6 місяців вводили *per os* розчин хлориду стронцію та утримували у стандартних умовах віварію із дотриманням усіх вимог біоетики та принципів гуманного поводження із лабораторними тваринами. Після цього проводили дослідження стану кровотворної системи щурів за умов довготривалої дії іонізуючої радіації, здійснюючи оцінку як гемопоетичних стовбурових клітин, так і їхніх нащадків клітин-попередників за функціональною активністю їх, а також вивчали кількісні та якісні показники на рівні зрілих клітин крові.

Результати культивування кровотворних клітин-попередників опромінених ^{90}Sr тварин у культурі дифузійних камер *in vivo* свідчили про достовірне зниження їхньої колонієутворюючої активності внаслідок довготривалої дії іонізуючої радіації, що проявлялося у зменшенні кількості гранулоцитарно-макрофагальних колонієутворюючих одиниць у кістковому мозку.

Кількісні і якісні зміни у периферичній крові та кістковому мозку внутрішньо опромінених ^{90}Sr тварин свідчили про наявність дизгемопоезу зі зміною співвідношення між окремими паростками кровотворення, порушенням процесів проліферації, диференціювання й дозрівання клітин кісткового мозку, появою патологічних форм клітин.

Таким чином, у роботі проведена комплексна оцінка компонентів, які

складають кровотворення, починаючи із стовбурової клітини та її найближчих нащадків, і закінчуючи зрілими клітинами крові в організмі тварини, яка була піддана дії внутрішнього опромінення ^{90}Sr . Представлені результати щодо морфофункціональних особливостей кровотворних клітин в умовах дії радіонукліда ^{90}Sr є співставними з даними, отриманими нами раніше щодо впливу радіаційної компоненти на функціонування первісних відділів гемопоєзу людини та можуть бути використані при подальшій інтерпретації показників стану кровотворення у осіб, що мешкають на забруднених радіонуклідами територіях. Виявлені особливості кровотворення у лабораторних тварин при внутрішньому надходженні радіонукліда ^{90}Sr є застереженням у випадку появи подібних змін у кровотворенні опромінених осіб.

СУЧАСНІ ПІДХОДИ ДО ХАРАКТЕРИСТИКИ ВІДНОСНОЇ БІОЛОГІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АДРОННОЇ (ПРОТОННОЇ) ТЕРАПІЇ

Н. М. Рябченко, О. Б. Ганжа, А. І. Липська

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Адронна терапія пучками протонів належить до найефективніших інноваційних технологій в сучасній ядерній медицині. Її терапевтичний ефект при лікуванні злоякісних новоутворень у порівнянні з електромагнітними видами випромінювань зумовлений низкою переваг. Можливість оптимального формування та фокусування дози в безпосередньо в місці локалізації злоякісної пухлини реалізується за рахунок невеликого поперекового розсіювання пучка протонів та зростання щільності іонізації з максимумом у кінці пробігу – в області піка Брегга (максимум Брегга), що дає змогу забезпечити максимальну ушкоджуючу дію на пухлини, локалізовані на глибині до 30 см, та мінімальний вплив на оточуючі нормальні тканини. Удосконалення адронної терапії пучками протонів пов'язують з можливостями збільшення локального променевого навантаження на злоякісні клітини з одночасним забезпеченням толерантної дози для здорових тканин, що досягається зокрема за допомогою протонної терапії з модуляцією інтенсивності (ІМРТ) і просторово фракціонованою променевою терапією.

Разом з фізичними характеристиками терапевтичного пучка протонів широко здійснюють радіобіологічні дослідження, що дає змогу оцінити його відносну біологічну ефективність (ВБЕ) щодо інших терапевтичних джерел іонізуючої радіації. Для цього використовують тест систему лімфоцитів периферичної крові (ЛПК) людини, що рекомендована ВООЗ як «золотий стандарт» для біологічної/цитогенетичної дозиметрії променевих уражень людини.

У клінічній практиці протонної терапії ВБЕ протонів відносно фотонів, відповідно до цитогенетичних досліджень, є умовно фіксована величина 1,1 в діапазоні терапевтично значущих доз (1 - 4 Гр). Насправді, ВБЕ залежить від багатьох факторів, серед яких величина дози опромінення за одну фракцію, лінійна передача енергії (ЛПЕ), радіочутливість опромінених клітин та тка-

нин, кінцевого біологічного ефекту тощо. Клінічна практика свідчить, що нехтування варіабельності ВБЕ часто призводить до непередбачуваних побічних ефектів терапії, таких як висока токсичність або рецидиви. У доповіді буде розглянуто вплив біологічних факторів, насамперед варіабельності радіочутливості клітин та тканин на величину ВБЕ, зокрема за адронної терапії.

ОСОБЛИВОСТІ ЗМІН В ЛЕЙКОЦИТАРНІЙ ФОРМУЛІ У *MYODES GLAREOLUS* ІЗ ЗОНИ РАДІОАКТИВНОГО ЗАБРУДНЕННЯ ЧАЕС

О. А. Сова, О. О. Бурдо, А. І. Липська, О. Б. Ганжа, В. А. Шитюк

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Природні популяції тварин, які мешкають на радіаційно забруднених територіях, зазнають поєднаного впливу зовнішнього та внутрішнього опромінення радіонуклідами, що призводить до суттєвих системних змін в організмі. Окрім того, мешканці забруднених територій зазнають впливу факторів нерадіаційної природи, що значною мірою може впливати на дію опромінення. Кровотворна система тварин характеризується досить високою радіочутливістю і тому швидко реагує на дію факторів різної природи, що, в свою чергу, дає можливість за рахунок змін її показників оцінити наслідки хронічного, низькодозового впливу радіаційного фактора.

Метою роботи було – дослідити особливості змін у лейкоцитарній формулі тварин, які мешкали в умовах різного радіоактивного забруднення.

Об'єктом дослідження була руда нориця (*Myodes glareolus*) – домінуючий та індикаторний вид в угрупованні дрібних ссавців, які широко використовуються в радіоекологічних та радіобіологічних дослідженнях. Референсна група – нориці з умовно чистої території, де потужність дози γ -випромінювання на полігоні складала 20 - 22 мкР/г.

Дослідні полігони знаходились на різній відстані, приблизно 3 та 10 км від ЧАЕС. Потужність експозиційної дози γ -випромінювання в місцях перебування тварин суттєво перевищувала фонові рівні і відрізнялась до 9 разів. Відповідно і радіоактивне забруднення тварин також суттєво різнилось, середні значення в групах були: ^{137}Cs – 88 кБк/кг, ^{90}Sr – 342 кБк/кг та ^{137}Cs – 8,93 кБк/кг, ^{90}Sr – 4,65 кБк/кг.

Гематологічний профіль нориць контрольної групи, які обстежувались паралельно з дослідними тваринами, відповідав фізіологічній нормі для даного виду тварин. У лейкоцитарній формулі контрольних тварин лімфоцити складали майже 70 % усіх елементів лейкограми, що є притаманним для даного виду тварин. Атипові клітини в лейкограмах тварин контрольної групи не перевищували 1 - 2 % і були представлені переважно лімфоцитами з лопатевими ядрами.

Загальна кількість лейкоцитів усіх тварин суттєво не відрізнялась та знаходилась у межах довірчих інтервалів середніх значень.

У опромінених тварин відмічали зміни в лейкограмі: зниження числа нейтрофілів, лімфоцитоз, порушення співвідношення малих та великих лімфоцитів, збільшення великих гранульованих лімфоцитів, у порівнянні з референсною групою, а також зростання значень індексів ядерного зсуву та лімфоцитарного. Це, імовірно, може бути зумовлено як безпосереднім радіаційним ушкодженням клітин крові, так і наслідком порушення процесів мієло- та ліфопоезу в кістковому мозку тварин.

Також у тварин опромінених груп реєстрували збільшення структурних аномалій, що були представлені атипovими лімфоцитами (двоядерні клітини, лімфоцити з лопатевими ядрами тощо), що є свідченням репродуктивних порушень клітин. Слід зазначити, що за деякими показниками у тварин із низьким вмістом інкорпорованих радіонуклідів порушення були більш суттєвими. Отже, зміни в лейкоцитарній формулі тварин, що індуковані хронічною дією іонізуючої радіації низької інтенсивності, не мали лінійної залежності «доза-ефект» та проявляли гетерогенність реакції-відповіді системи кровотворення на малі хронічні радіаційні впливи.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-КЛІНІЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ПРЕНАТАЛЬНОГО ОПРОМІНЕННЯ ¹³¹I НА НЕЙРОГЕНЕЗ ТА РОЗВИТОК КОГНІТИВНИХ І ЕМОЦІЙНО-ПОВЕДІНКОВИХ РОЗЛАДІВ

**В. В. Галько¹, К. М. Логановський¹, А. А. Чумак¹, Л. М. Овсяннікова¹,
Т. К. Логановська¹, Є. В. Тукаленко, Н. П. Атаманюк¹, І. П. Дрозд²,
А. І. Липська², Г. Й. Лавренчук¹, М. І. Лісяний³, Б. С. Ісаєв⁴,
О. С. Ватліцова¹, І. Р. Дмитрієва¹, С. М. Альохіна¹, Л. В. Бельська³,
І. І. Лушнікова⁴, Є. М. Прохорова¹, О. А. Бойко¹,
Д. Д. Гапєєнко¹, О. Я. Плєскач¹, О. М. Литвинєць¹**

¹ ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України»,
Київ, Україна

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

³ ДУ «Інститут нейрохірургії ім. акад. А. П. Ромоданова НАМН України»,
Київ, Україна

⁴ Інститут фізіології ім. О. О. Богомольця НАН України, Київ, Україна

За результатами клінічних та експериментальних досліджень показано, що чутливість структур головного мозку, що розвивається, до впливу іонізуючої радіації проявляється складним комплексом функціональних, структурних та метаболічних порушень на всіх рівнях організації.

Відповідно до мети роботи – дослідити нейрорадіобіологічні ефекти в організмі пренатально опромінених ¹³¹I щурів Вістар і оцінити нейрокогнітивні та емоційно-поведінкові розлади у внутрішньоутробно опромінених внаслідок Чорнобильської катастрофи, виконані експериментальні та клінічні

дослідження. Створено модель внутрішньоутробного опромінення щурів Вістар ¹³¹I шляхом одноразового перорального введення на 12 - 14-ту добу гестації радіонукліда активністю 27,5 кБк. Проведені в експерименті на щурах віком 3 - 6 та 10 міс дослідження поведінкових реакцій, охарактеризовано стан гіпофізарно-тиреоїдної гормональної регуляції, проантиоксидантних систем, морфофункціональних змін в структурах головного мозку.

У пренатально опроміненних осіб виявлено збільшення частоти захворювань нервової системи та асоційованих розладів, психічних та поведінкових розладів, їхньої коморбідності, зокрема, цереброваскулярної патології, розладів вегетативної нервової системи, цервікалгій, депресивних та неврозоподібних розладів. Виявлена психоневрологічна симптоматика в опроміненних пренатально внаслідок Чорнобильської катастрофи багато у чому відповідає критеріям синдрому хронічної втоми/фіброміалгії. Цей синдром може бути дебютом іншої, більш важкої нейропсихіатричної патології. Після опромінення *in utero* існує нейрокогнітивний дефіцит, переважно за рахунок пірамідних порушень. Простежена тенденція до соматичної стурбованості, тривожності, депресивного настрою і загально більш вираженої психопатологічної симптоматики та збільшення проявів посттравматичного стресового розладу, підвищення тривоги/безсоння та депресії, а також гіршої самооцінки здоров'я у цілому. Крім того, існує тенденція до більшої кількості соматоформних симптомів та проявів соціальної дисфункції і більшої вираженості депресії. У внутрішньоутробно опроміненних осіб зберігається тенденція до зменшення загального та вербального IQ, а також дисгармонія розитку інтелекту за рахунок зниження вербального IQ.

Розроблено концепцію механізмів формування ефектів пренатального опромінення інкорпорованим ¹³¹I.

РОЗРОБКА ПРОГРАМИ КОНТРОЛЮ САНІТАРНО-ГІГІЄНИЧНИХ УМОВ ВИРОБНИЦТВА РАДІОФАРМАЦЕВТИЧНИХ ПРЕПАРАТІВ В ІНСТИТУТІ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ

В. В. Тришин, Л. К. Бездробна, Т. В. Циганок

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

В ІЯД НАН України впродовж ряду років проводяться роботи з організації серійного виробництва вітчизняних радіофармацевтичних препаратів (РФП) на базі реакторних радіонуклідів, зокрема, елюату пертенетату технецію-m99 і розчину натрію йодиду-131.

При виробництві РФП, як і всіх лікарських засобів, важливе значення має контроль за санітарним станом виробничого середовища. Особливої уваги потребують умови виробництва ін'єкційних РФП з коротким періодом напіврозпаду радіонукліда, що виробляються серіями невеликих розмірів і дозволяються до випуску до завершення випробувань (на стерильність, піроген-

ність). Для зведення до мінімуму ризику контамінації РФП їх слід виробляти у приміщеннях і боксах, що відповідають певному класу чистоти (А,В, С, D).

Для проведення моніторингу санітарного стану умов виробництва РФП в Інституті створюється лабораторія мікробіологічного контролю і, відповідно до вимог нормативних документів, розроблено інструкції для основних операційних процедур, що мають виконуватися.

Мета розробки – забезпечення стандартизації одних і тих же процесів і гарантування їхньої якості. Зокрема, розроблено стандартні операційні процедури для проведення контролю концентрації аерозольних частинок ($\geq 0,5 \mu\text{m}$ і $\leq 5,0 \mu\text{m}$) і мікроорганізмів у повітрі «чистих» виробничих приміщень, мікробіологічної забрудненості поверхонь виробничих приміщень і технологічного обладнання та спецодягу персоналу. Визначено кількість і розташування точок відбору проб для аналізу у кожному приміщенні (технологічне, операторна «гарячих» камер, «гарячі» камери, закамерна зона), періодичність відбору і необхідні об'єми проб. У повітрі вимірювання аерозольних частинок буде здійснюватися ручним лічильником частинок HandLaz Mini використовуючи режим ISO; визначення концентрації мікроорганізмів – аспіраторним методом за допомогою пробовідбірника-імпактора Тайфун «Р-40» і методом природної седиментації на поверхню живильного середовища в чашках Петрі. Мікробіологічна забрудненість поверхонь приміщень і обладнання визначатиметься методом змивів за допомогою стерильних тампонів, а технологічного одягу – методом відбитків на контактних агарових пластинах. Необхідно використовувати живильні середовища для вирощування бактерій (соєво-казеїновий агар) і грибів (агар Сабуро). Рівень біозабруднення виражається числом колонієутворюючих одиниць.

Контроль відповідності виробничого приміщення певному класу чистоти необхідно здійснювати в його оснащеному стані, тобто, після завершення підготовки до виробничого процесу, безпосередньо перед початком виконання кожного циклу робіт. Проведення поточного контролю в процесі виробництва РФП (у функціонуючому стані) в деякій мірі обмежено, зокрема, в «гарячих» камерах, оскільки РФП є джерелом іонізуючого випромінювання.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОФІЛІВ МЕТИЛЮВАННЯ ГЕНОМУ *ASPERGILLUS VERSICOLOR* ЗА ДІЇ ХРОНІЧНОГО ОПРОМІНЕННЯ

Т. І. Тугай^{1,2}, Л. Б. Зелена^{1,2}, А. В. Тугай^{1,2}, О. Б. Поліщук³

¹ *Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К.Заболотного НАН України, Київ, Україна*

² *Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна*

³ *Національний технічний університет «КПІ», Київ, Україна*

Механізми, які забезпечують здатність мікроскопічних грибів, які тривалий час знаходились у Зоні відчуження, до позитивної реакції на дію великих

доз опромінення, тобто здатність проявляти позитивний радіотропізм, мало досліджені. На теперішній час висунуто припущення, що в основі механізмів адаптаційних процесів до дії хронічного іонізуючого опромінення у ряду представників біоти лежать епігенетичні зміни, дані щодо можливості таких змін у мікроміцетів практично відсутні.

Відомо, що одним з критеріїв присутності епігенетичних змін, що можуть відбуватися в організмі при адаптації до дії опромінення є зміни метилювання ДНК. Виходячи з цих міркувань нами були проведені дослідження в порівняльному аспекті профілів метилювання геному штамів *Aspergillus versicolor*, що були виділені з зони відчуження та проявляли радіоадаптивні властивості та контрольних штамів цього ж виду, що опромінювались вперше, та не мали радіоадаптивних властивостей.

З метою оцінки профілів метилювання геному *Aspergillus versicolor* тотальну ДНК обробляли ендонуклеазами рестрикції *HpaII* та *MspI* та проводили ПЛР з праймером до короткого нуклеотидного повтору. Контролем слугували патерни ПЛР-продуктів необробленої ДНК. Реєстрували відмінності у спектрах ампліконів між попередньо фрагментованими зразками ДНК та нативним препаратом за контрольних умов та після опромінення.

У результаті проведеного ПЛР-аналізу нативних препаратів ДНК показано, що кожен з досліджуваних штамів характеризувався специфічним набором продуктів амплікації, що може бути зумовлено як штамспецифічними ознаками, так і різними джерелами виділення штамів: ґрунти з різним рівнем радіаційного забруднення. Зміну патернів ампліконів спостерігали лише у контрольних зразках, що зазнали дії опромінення.

Порівняльний аналіз між спектрами ПЛР-фрагментів, отриманими після розщеплення ДНК метилчутливими / нечутливими рестрикційними ензимами, виявив відмінності у патернах ампліконів, обробленої ДНК у порівнянні з нативними препаратами, а також у зразках, виділених із забруднених територій, що зазнали хронічного опромінення.

Таким чином, культивування штамів в умовах хронічного опромінення призвело до незначної зміни профілів метилювання геному *Aspergillus versicolor*, виділеного з ґрунтів з різним рівнем радіаційного забруднення.

ФУНКЦІОНУВАННЯ ПРООКСИДАНТНОЇ ТА АНТИОКСИДАНТНОЇ СИСТЕМ У ПОСТРАДІАЦІЙНИХ ГЕНЕРАЦІЙ *ASPERGILLUS VERSICOLOR* ЗА РОСТУ НА РІЗНИХ ЗА ВМІСТОМ ДЖЕРЕЛ ВУГЛЕЦЮ СЕРЕДОВИЩАХ

А. В. Тугай^{1,2}, Т. І. Тугай^{1,2}, В. О. Желтоножський³, М. В. Желтоножська³, Л. В. Садовніков³, Л. Б. Зелена^{1,2}, О. Б. Поліщук⁴

¹ Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України, Київ, Україна

² Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна», Київ, Україна

³ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

⁴ Національний технічний університет «КПІ», Київ, Україна

Дослідження впливу хронічного іонізуючого опромінення на мікробіоту є важливим бо вона постійна і активна компонента біогеоценозу та відіграє значну роль у переміщуванні різного роду поживних речовин та деяких мікроелементів у ґрунті, включаючи радіонукліди. Для мікроміцетів притаманна швидка зміна генерацій, що робить їх зручною моделлю для вивчення ефектів хронічного опромінення у низці генерацій, встановлення прямих та віддалених ефектів хронічного іонізуючого опромінення.

Для вивчення віддалених наслідків дії хронічного опромінення було задіяний комбінований лабораторно-польовий підхід.

Було проведено вивчення функціонування про- та антиоксидантної систем у пострадіаційних генерацій штаму *Aspergillus versicolor*, виділеного з фонових територій та не проявляючого радіоадаптивних властивостей та штаму, виділеного з території Зони відчуження, що проявляв радіоадаптивні властивості за умов росту на різних, за вмістом джерела вуглецю, середовищах.

При рості на багатому за джерелом вуглецю середовищі, не виявлено суттєвих змін у прооксидантній системі, про які судили за кількістю дієнових кон'югатів, у пострадіаційних генерацій штаму, що був виділений з території Зони відчуження. При цьому, у пострадіаційних генерацій цього штаму виявлено активацію ферментативної складової антиоксидантної системи, що проявлялось у зростанні супероксиддисмутазної активності.

У пострадіаційних генерацій штаму виділеного з фонових територій виявлені істотні зміни у пострадіаційних генераціях штаму, що був виділений з фонових територій - збільшенням до 6 разів рівня дієнових кон'югатів. Виявлені зміни корелювали з змінами антиоксидантної системи: збільшенням до 6 разів каталазної активності у пострадіаційних генераціях штаму, що був виділений з фонових територій, при цьому не виявлено змін генерацій цього штаму у супероксиддисмутазної активності. Проте за росту на середовищі, що імітує природний рівень зміни виявлені у прооксидантній та антиоксидантній системі у пострадіаційних генераціях, як штаму, що був виділений з фонових територій так і штаму, що був виділений з території Зони відчуження.

ЛІНІЙНІ ПОКАЗНИКИ ПАРОСТКІВ НАСІННЯ ОЧЕРЕТУ ЗВИЧАЙНОГО З ВОДОЙМ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ЗА УМОВ ДОДАТКОВОГО ГОСТРОГО ОПРОМІНЕННЯ

А. А. Явнюк¹, Н. Л. Шевцова², Д. І. Гудков²

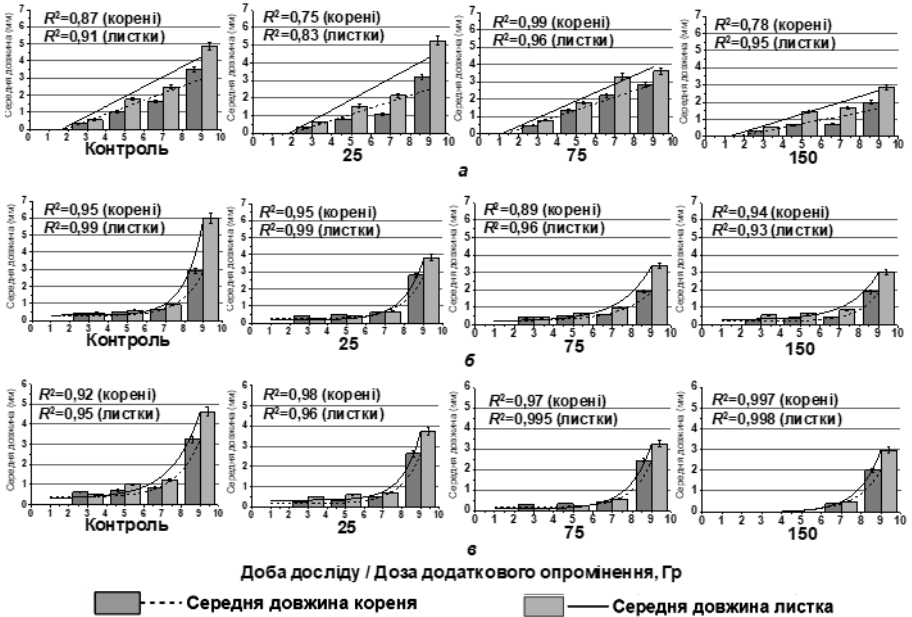
¹ Національний авіаційний університет, Київ, Україна

² Інститут гідробіології НАН України, Київ, Україна

Важливим джерелом інформації про вразливість вищих рослин в умовах тривалого низькоінтенсивного йонізуючого опромінення є дані про пору-

шення розвитку рослинного організму на ранніх стадіях онтогенезу. Об'єктивну оцінку наявності таких порушень може забезпечити аналіз показників життєздатності, морфологічних та фізіологічних характеристик насінневого потомства, але вони можуть бути прихованими та не проявлятися при проростанні. Додаткове гостре опромінення дає змогу виявити такі зміни, зокрема у ростових процесах кореня та листка.

Аналіз лінійних показників росту кореня та листка паростків виявив, що насіння очерету з водою Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) характеризуються значною затримкою проростання та повільним ростом, що посилюється за додаткового гострого опромінення у дозі 25, 75 та 150 Гр, у порівнянні з показниками насіння з контрольної водою (рис.).



Середня довжина кореня та листка паростків насіння очерету звичайного у водою з різним рівнем радіонуклідного забруднення та додаткового гострого опромінення у дозі 25, 75 та 150 Гр): *а* – Оз. Вербне ($y = at+b$, 0,06 мкГр/год); *б* – ВО ЧАЕС ($y = ae^{kt}+c$, 1,9 мкГр/год); *в* – Оз. Глибоке ($y = ae^{kt}+c$, 34 мкГр/год)

У градієнті зростання потужності поглиненої дози хронічного опромінення встановлено зменшення темпів росту кореня та листка паростка у порівнянні з паростками рослин з фонові водою майже на 40 %. Додаткове гостре опромінення підтвердило існування різної динаміки росту паростків насіння рослин з імпульсних та контрольної водою. Динаміка росту кореня та листка паростків насіння рослин з фонові водою характеризувалася віро-

гідною лінійною залежністю, а з водою ЧЗВ – вірогідною експоненційною залежністю, що свідчить про зміну радіостійкості фізіологічних показників насінневого потомства з водою ЧЗВ.

СТАН ЗДОРОВ'Я НАЩАДКІВ ПЕРШОГО ПОКОЛІННЯ УЧАСНИКІВ ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ АВАРІЇ НА ЧАЕС 1986 - 1987 рр.

Ж. С. Ярошенко

*ДУ «Національний науковий центр радіаційної медицини НАМН України»,
Київ, Україна*

Мета дослідження полягає у вивченні структури непухлинної захворюваності нащадків першого покоління, народжених у 1987-1999 рр. від учасників ліквідації наслідків аварії (УЛНА) на ЧАЕС за період спостереження 1987 - 2016 рр.

За даними ДУ «Український центр інформаційних технологій та Національного реєстру» (ДРУ) за період 1987 - 1999 рр. народилося 45946 тис. нащадків першого покоління віком від 0 до 18 рр. (загальна когорта) УЛНА на ЧАЕС 1986 - 1987 рр., у тому числі, 23578 осіб чоловічої статі та 22368 – жіночої.

За період епідеміологічного спостереження (1987 - 2016 рр.) проведено вивчення структури непухлинних захворювань за МКХ – 10 у нащадків першого покоління. Зареєстровано 70862 (100 %) вперше виявлених нозологічних форм. Серед них аналізувались хвороби крові і кровотворних органів та окремі порушення з залученням імунного механізму, хвороби ендокринної системи, розладу харчування та порушення обміну речовин, розлади психіки та поведінки, хвороби нервової системи, хвороби ока та придаткового апарату, хвороби вуха та соскоподібного відростку, хвороби системи кровообігу, хвороби органів дихання, хвороби органів травлення, хвороби шкіри та підшкірної клітковини, хвороби кістково-м'язові системи та сполучної тканини, хвороби сечостатевої системи, вроджені аномалії (вади розвитку), деформації та хромосомні порушення.

У структурі непухлинних хвороб загальної когорти основні частки за відсотками мають хвороби органів травлення (20,41 %), хвороби органів дихання (15,07%), хвороби кістково-м'язові системи та сполучної тканини (13,06 %), четверте місце поділяють хвороби ендокринної та хвороби нервової систем (11,07 і 10,8 %). Ще значні частки в структурі хвороб займають хвороби ендокринної системи (7,05 %), хвороби системи кровообігу (6,73 %), хвороби ока та придаткового апарату (5,91 %). Решта хвороб займають від 0,25 до 3,40 %. Із всіх зареєстрованих непухлинних хвороб превалює клас хвороб органів травлення, які формуються, в основному, за рахунок хвороби жовчного міхура, жовчовивідних шляхів та підшлункової залози (К80 - К87) – 8,76 %, хвороби стравоходу, шлунку та дванадцятипалої кишки (К20-К31) – 5,55 %. Решта становить від 0,01 до 1,71 %. В структурі патології органів дихання превалюють інші хвороби верхніх дихальних шляхів (J30 – J39), що становлять 11,75 %.

Клас хвороб кістково-м'язові системи та сполучної тканини представлений такими нозологічними формами як деформуючі дорсопатії (М40-М54) – 7,81 % та остеохондропатії і хондропатії (М80-М94) – 1,58 %.

Структура непухлинних хвороб у чоловіків і жінок ідентична структурі загальній когорти. Так, серед чоловіків та жінок перші чотири місяця посідають хвороби органів травлення (20,2 та 20,62 % відповідно), хвороби органів дихання (15,76 та 14,35 %), хвороби кістково-м'язові системи та сполучної тканини (14,1 та 12,01 %), четверте місце поділяють хвороби ендокринної (10,55 та 11,6 %) та хвороби нервової систем (11,22 та 10,38 %).

Висновки. В структури непухлинної захворюваності серед нащадків першого покоління УЛНА на ЧАЕС 1986 - 1987 рр. превалюють хвороби органів травлення, органів дихання, хвороби кістково-м'язові системи та сполучної тканини. Структура непухлинних хвороб у чоловіків і жінок ідентична структурі в загальній когорті.

РОЛЬ ВЫСШИХ ВОДНЫХ РАСТЕНИЙ В БИОТРАНСФОРМАЦИИ ^{137}Cs В ЭКОСИСТЕМЕ КИЕВСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

В. В. Беляев, Е. Н. Волкова, С. П. Пришляк, А. А. Пархоменко

Институт гидробиологии НАН Украины, Киев, Украина

Водные экосистемы играют важную роль в перераспределении вещества, в том числе и радиоактивных элементов, выполняя транспортную и аккумуляционную функции. В полной мере это относится к головному в каскаде Днепровских водохранилищ – Киевскому. Хорошо известна его барьерная функция, т.к. в экосистеме водохранилища аккумулируется от 30 до 70 % поступающего в него ^{137}Cs .

В Киевском водохранилище сложились благоприятные условия для развития высших водных растений, занимающих до 150 км² [1]. Несмотря на значительную фитомассу высших водных растений, их роль в процессах миграции радионуклидов не учитывают, что связано с относительно небольшими (до 1 % от содержащегося в экосистеме) запасами ^{137}Cs в наземной фитомассе. Однако нами было установлено, что удельная активность ^{137}Cs в корнях растений во много раз выше, чем в наземных органах. В процессе жизнедеятельности водных растений радионуклид в обменных формах поступает в биомассу, а при отмирании изменяется его локализация и физико-химические формы. Поэтому целью работы была оценка активности биотрансформированного высшими водными растениями ^{137}Cs в Киевском водохранилище.

В работе использовались оригинальные данные о наземной и подземной массе растений, их удельной активности, а также удельной активности и плотности загрязнения донных отложений; литературные данные об общей продукции наземной части растений Киевского водохранилища [1].

Удельная активность ^{137}Cs в растениях Киевского водохранилища значительно отличается по акватории. Наименьшие уровни наблюдаются в Днепровском отроге и вдоль левого берега, наибольшие – в припятском отроге и вдоль правого берега до траверса с. Страхолесье, максимальные уровни загрязнения донных отложений – на глубоководных участках и в припятском отроге. В зарослях растительности плотность загрязнения донных отложений во много раз меньше, чем на глубоководных участках.

Надземные органы растений и корни воздушно-водных отмирают ежегодно, корневища – в среднем обновляются на 40 %. При отмирании надземных органов высших водных растений в абиотические компоненты водохранилища возвращается порядка 1,5 - 3 ГБк ^{137}Cs , доля воздушно-водных растений в этом процессе составляет 90 %. Нами было установлено, что в подземных органах растений общее содержание ^{137}Cs в 2,7 - 6,7 раз больше, чем в надземных. При ежегодном отмирании корней в донные отложения возвращается 50 - 60 % от общей активности ^{137}Cs , содержащегося в растении, корневищ – 10 %. Таким образом, в Киевском водохранилище ежегодно высшими водными растениями трансформируется 6 - 14 ГБк ^{137}Cs . Принимая, что средняя плотность загрязнения донных отложений ^{137}Cs в зарослях водных растений составляет 25 кБк/м², ежегодную величину трансформированного радионуклида можно оценить в 0,15 - 0,37 % от его содержания в донных отложениях зарослей или 1,5 - 5 % от его поступления в донные отложения из водных масс. В монозарослях тростника обыкновенного величина биотрансформации ^{137}Cs достигает 1 % от его общего содержания в 30-ти см слое донных отложений.

1. К.М. Цаплина. Продукційні характеристики вищих водяних рослин Київського водосховища на сучасному етапі функціонування його екосистеми. Наук. записки Тернопіль. нац. пед. ун-ту ім. В. Гнатюка. Серія: Біологія 2(43) (2010) 524.

ИССЛЕДОВАНИЕ МИГРАЦИИ РАДИОНУКЛИДОВ В 30-КМ ЗОНЕ ЧАЭС

**Д. М. Бондарьков, М. В. Желтоножская, Н. В. Кулич,
А. И. Липская, В. И. Николаев**

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

Продолжены исследования поведения радионуклидов на сильнозагрязненных территориях 30 км зоны ЧАЭС. Исследования проводятся с 2000 г. Были отобраны пробы в двух слоях для определения возможного влияния работ по перекрытию саркофага. Измерения проводились на антикомптоновском спектрометре с Ge-детектором с входным бериллиевым окном. В результате проведенных исследований в ряде проб наблюдается аномальное соотношение $A(^{241}\text{Am})/ A(^{137}\text{Cs})$. Величина меняется от 0,004 до 0,30. Отметим что средняя величина ожидалась равной 0,025. В ряде проб наблюдалась

активность ^{94}Nb и ^{60}Co . Это указывает на подпитку активностей, связанных с конструкционными материалами. В ряде образцов наблюдали активность ^{243}Am . Измерены активности $^{155,154}\text{Eu}$. Это позволило определить выгорание топлива, попавшего на полигоны. Проводиться обсуждение полученных результатов.

ОЧИСТКА РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННОЙ ВОДЫ ФОСФОРНОКИСЛЫМ КАТИОНИТОМ НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННОГО РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

А. М. Валяев¹, В. Ю. Коровин¹, Т. В. Лаврова²

¹ *Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины,
Киев, Украина*

² *Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС Украины
и НАН Украины Киев, Украина*

Представлены результаты сорбционного извлечения урана фосфорнокислым катионитом на основе модифицированного растительного сырья (абрикосовая косточка) из радиоактивно-загрязнённой воды подвала производственного здания бывшего ПО «Приднепровский химический завод». Ранее в этом здании проводилось химическое вскрытие урановых руд с последующим отделением и очисткой урановых концентратов. После вынужденной остановки деятельности предприятия в 1992 г., работы по дезактивации территории и зданий предприятия не были выполнены. На сегодняшний день здание №103 относится к числу чрезвычайно загрязнённых и одним из приоритетных для его очистки и последующего демонтажа загрязнённого оборудования и строительных конструкций, в том числе по причине продолжающегося разрушения. Одним из факторов нестабильности строительных конструкций является накопленная вода в подвалах здания, за счет накопления атмосферных осадков, которые проникают внутрь помещений и смывают радиоактивные материалы в подвал здания, образуя растворы с высоким содержанием урана (до 500 Бк/л). Поэтому выкачивать данную воду из здания можно только после очистки. С этой целью были проведены начальные исследования о возможном использовании селективных катионитов на основе модифицированного растительного сырья.

Были отобраны пробы воды из здания с консервацией, поэтому для целей исследования в дальнейшем ее стабилизировали путем коррекции кислотности 20% р-ром аммиака до значения $\text{pH} = 7$. Анализ гидрохимического состава воды подтвердил ее атмосферное происхождение (гидрокарбонатно-кальцевая, минерализация до 0,6 г/дм³, с низким содержанием натрия и калия 6 мг/дм³). Радиоактивность воды на 98% обусловлена содержанием в ней изотопов урана (238, 234). Удельную активность изотопов урана (238, 234) раствора определяли в аналитической лаборатории УкрГМИ в соответствии с

аттестованной методикой выполнения измерений объемной активности изотопов урана в природных водах с минерализацией до 5 г/дм³ альфа-спектрометрическим методом с радиохимической подготовкой, измерения проводили на альфа-спектрометре Alpha Analyst модель 7200-08 Canberra (США).

Оценку сорбционных приготовленного сорбента для выведения урана из воды проводили в статическом режиме с использованием 0,5 г сорбента в объеме 0,5 дм³ раствора при периодическом перемешивании в течение 7 сут при комнатной температуре. Пересчет удельной активности урана в концентрации осуществляли из соотношения активности 1 г ²³⁸U – 1,24·10⁴ Бк. Емкость сорбента (мг/г) определяли по разности концентраций урана в растворе. Масса сорбированного урана составила 9,78 мг, что обуславливает сорбционную емкость сорбента порядка 20 мг/г и коэффициентом распределения 4800.

Полученные результаты могут быть предложены в качестве обоснования метода и технологии очистки загрязненных вод, которые будут откачиваться из подвальных помещения здания.

Кроме того, установлено, что на основе модифицированного растительно-го сырья может быть приготовлен сорбент для выделения изотопов цезия-137 из водных проб после его импрегнирования ферроцианидом кобальта, который может быть использован в практике радиологических лабораторий гидрометеорологической службы Украины.

РАДІАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ОБ'ЄКТІВ НАВКОЛИШНЬОГО ПРИРОДНОГО СЕРЕДОВИЩА В ЗОНІ ВПЛИВУ ДОСЛІДНИЦЬКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ВВР-М ІНСТИТУТУ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ (2012 - 2017 рр.)

**О. В. Гайдар, О. В. Сваричевська, В. В. Тришин, А. Д. Саженок,
І. А. Малюк, І. О. Павленко, О. В. Святун**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Нагальним завданням Інституту ядерних досліджень (ІЯД) НАН України як експлуатуючої організації дослідницького ядерного реактора (ДЯР) ВВР-М є забезпечення його ефективної безпечної роботи, а також радіаційної безпеки персоналу і довкілля. Тому протягом всього періоду експлуатації ДЯР ВВР-М проводиться систематичний радіаційний контроль за його впливом на навколишнє природне середовище в санітарно-захисній зоні (СЗЗ) і зоні спостереження (ЗС).

У 2017 р. були отримані і проаналізовані нові експериментальні дані щодо вмісту техногенних радіонуклідів у об'єктах навколишнього середовища (а саме, приземному шарі атмосферного повітря, ґрунті, скидних водах, сніговому покриві, рослинності, тощо).

З метою вивчення динаміки радіоактивного забруднення досліджуваних об'єктів ці дані були порівняні із аналогічними даними за попередні роки (2012 – 2016 рр.). Результати вимірювань основних показників наведені нижче:

№	Показник	Значення	
		2017 р.	2012 - 2016 рр.
1	Щільність випадінь β -випромінюючих радіонуклідів з осідаючим пилом та атмосферними опадами, кБк/м ² -рік	0,10 ± 0,03 ÷ 0,13 ± 0,04	0,11 ± 0,03 ÷ 0,28 ± 0,08
2	Концентрація β -аерозолів у приземному шарі атмосферного повітря, Бк/л	(0,7 ± 0,2)·10 ⁻⁶ ÷ (1,3 ± 0,4)·10 ⁻⁴	(0,9 ± 0,3)·10 ⁻⁶ ÷ (3,1 ± 0,4)·10 ⁻⁴
3	Середні значення загальної питомої β -активності скидних вод, Бк/л: – колодязь №1 – колодязь №2	0,83 ± 0,28 0,54 ± 0,18	0,75 ± 0,24 0,54 ± 0,18
4	Середні значення питомої активності техногенних радіонуклідів у зразках ґрунту із спостережних свердловин навколо реактора і «гарячих камер», Бк/кг: – ¹³⁷ Cs – ⁹⁰ Sr	1,1 ± 0,3 0,88 ± 0,3	0,58 ± 0,17 3,2 ± 1,1

Протягом усього досліджуваного періоду концентрації ³H у зразках скидних вод із колодязів № 1 та 2, талої води снігового покриву та березового соку були на рівні значень, характерних для реперних точок (м. Обухів, м. Вишневе) і суттєво нижчими за допустиму концентрацію тритію у питній воді (ДК_В^{ingest}) для категорії В, яка, згідно із НРБУ-97, становить 3·10⁴ Бк/л.

Середні значення вмісту радіонуклідів ¹³⁷Cs і ⁹⁰Sr у зразках ґрунту на території СЗЗ становили 72 ± 6 Бк/кг та 15,1 ± 2,6 Бк/кг відповідно, а в зразках ґрунту на території ЗС – 66 ± 5,2 Бк/кг та 10,1 ± 2,5 Бк/кг відповідно.

Рівні потужності еквівалентної дози гамма-випромінювання в усіх контрольних точках СЗЗ і ЗС були меншими за контрольний рівень ПЕД для м. Києва, що становить 0,26 мкЗв/год.

Таким чином протягом 2017 р. не було виявлено перевищення вмісту радіоактивних речовин у контрольованих об'єктах навколишнього середовища у порівнянні з попередніми роками та з контрольними рівнями у м. Києві, що свідчить про стабільність ситуації в зоні впливу ДЯР ВВР-М та відсутність його негативного впливу на довкілля.

РОЗРОБКА ЯДЕРНО-КРИМІНАЛІСТИЧНИХ БАЗ ДАНИХ У РАМКАХ МІЖНАРОДНОГО НАВЧАННЯ «GALAXY SERPENT»

О. В. Гайдар, В. В. Тришин, В. К. Вітюк, Я. А. Деюн, Г. А. Прокопюк

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Протягом 2017 р. фахівці Центру екологічних проблем атомної енергетики боади активну участь у міжнародних навчаннях "Galaxy Serpent – 2. Sealed Radioactive Sources" та "Galaxy Serpent – 3. Uranium Ore Concentrates".

Основна задача навчання "Galaxy Serpent – 2. Sealed Radioactive Sources" полягала у створенні бази даних для закритих джерел іонізуючого випромінювання на основі даних, наведених у наданих організаторами навчань електронних копіях документів різного типу: каталоги виробників, реєстраційні документи на джерела, сертифікати, тощо. Після створення бази даних було розіграно два сценарії подій: автодорожня пригода з автомобілем, що перевозив контейнер з джерелом ^{137}Cs , та терористичний акт з використанням «брудної» бомби на основі потужного джерела ^{60}Co . За наданою організаторами навчань інформацією, щодо визначення основних параметрів джерел, необхідно було визначити тип джерела та відповісти на питання, чи є аналоги такого джерела у створеній нами базі даних. За результатами проведеного аналізу нами було зважливо визначено типи джерел, що було позитивно оцінено організаторами змагань на нараді Міжнародної групи з ядерної криміналістики ITWG-22, яка проходила у м. Карлсруе (Німеччина) 28 - 30 червня 2017 р.

Навчання "Galaxy Serpent – 3. Uranium Ore Concentrates" було спрямоване на створення бази даних атрибутивних характеристик концентратів уранової руди для подальшої ідентифікації джерела походження вилучених зразків і мало дві фази.

На першій фазі учасникам було надано таблиці синтезованих даних щодо елементного складу зразків концентрату уранової руди, які імпортуються з умовної країни "Тихоокеанії". Загалом таблиці вміщують дані про вміст 45 елементів для 821 зразка. Однак, для більшості зразків дані представлені лише для незначної кількості елементів, а інформація про рідкоземельні елементи наявна лише для 90 зразків. Задачею першої фази було упорядкування та аналіз даних з метою визначення атрибутивних ознак, використовуючи які учасники могли б в подальшому ідентифікувати місце походження вилученого з незаконного обігу матеріалу.

На другій фазі учасникам було надано інформацію щодо елементного складу для трьох вилучених з незаконного обігу контейнерів з урановим концентратом і учасники мали визначити чи схожі між собою зразки матеріалу, відібрані з трьох різних контейнерів, чи є аналогічні зразки в створеній протягом першої фази базі даних та які методи виявилися найбільш корисними для ідентифікації.

У доповіді будуть представлені основні результати, отримані українськими учасниками при створенні баз даних в ході участі в навчаннях "Galaxy Serpent" та продемонстровані переваги, які надає запропонований підхід, реалізований при створенні інформаційної системи для ядерної криміналістики в Україні. Також будуть представлені методи аналізу, які використовувалися для ідентифікації зразків уранового концентрату, серед яких: аналіз принципних компонент, аналіз співвідношень між вмістом окремих елементів та інші.

ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ФОРМИ ^{90}Sr ТА ^{137}Cs У ДОННИХ ВІДКЛАДАХ ВОДОЙМИ-ОХОЛОДЖУВАЧА ЧАЕС

**Х. Д. Ганжа, С. П. Пришляк, О. О. Пархоменко,
Д. І. Гудков, О. Є. Каглян**

Інститут гідробіології НАН України, Київ, Україна

Донні відклади є одним із системоутворюючих компонентів водних екосистем та відіграють важливу роль у кругообігу радіоактивних речовин у водоймах. В умовах спрацювання рівня води та осушування забруднених радіонуклідами донних відкладів, водойма-охолоджувач (ВО) Чорнобильської АЕС (ЧАЕС) розглядається як потенційне джерело додаткового радіаційного впливу на довкілля. У зв'язку з цим виникає необхідність проведення досліджень щодо оцінки динаміки фізико-хімічних форм головних дозоутворювальних радіонуклідів ^{90}Sr та ^{137}Cs у донних відкладах ВО.

Метою роботи був аналіз сучасного стану та динаміки питомої активності радіонуклідів та їхніх фізико-хімічних форм у донних відкладах ВО ЧАЕС.

Упродовж літнього та осіннього періодів 2017 р. здійснено пошаровий вибір проб донних відкладів на північно-західній ділянці ВО. Виконано вимірювання валового вмісту та розподілу потенційно-обмінних фізико-хімічних форм ^{90}Sr та ^{137}Cs у донних відкладах. Вміст радіонуклідів визначали в обмінній, карбонатній та зв'язаній з гідроксидами та оксидами металів формах. Питому активність ^{90}Sr та ^{137}Cs визначали гамма-спектрометричними і радіохімічними методами [1]. Фізико-хімічні форми радіонуклідів визначали методом послідовної екстракції [2].

Проведено аналіз питомої активності радіонуклідів у прибережній смузі та на глибинах 3 і 5 метрів. На глибині 3 м відбирали шар 0–5 см, на глибині 5 м відбирали шари: 0 - 2,5; 2,5 - 7,5; 7,5 - 12,5 і 12,5 - 22,5 см. Загальна питома активність ^{90}Sr у донних відкладах прибережної смуги становила в середньому 0,7 кБк/кг, а у верхньому шарі донних відкладів на глибині 5 м – близько 1 кБк/кг, у шарах 7,5 - 12,5 і 12,5 - 22,5 см – близько 0,4 та 0,9 кБк/кг, відповідно. Питома активність ^{137}Cs у донних відкладах з глибиною зростає, особливо активними є верхні шари на глибині 5 м – близько 67 кБк/кг. У донних відкладах прибережної смуги питома активність ^{137}Cs становить близько 13 кБк/кг, а у верхньому шарі на глибині 3 м – близько 3 кБк/кг. Такий розподіл свідчить про наявність значних запасів ^{137}Cs у донних відкладах ВО.

Розподіл потенційно-обмінних форм ^{90}Sr показав, що 40–60% радіонукліда знаходиться у донних відкладах в обмінній формі, що дає змогу припустити високу здатність радіонукліда переходити у розчин та поглинатися гідробіонтами. У карбонатній формі практично у всіх досліджуваних шарах донних відкладів знаходиться 9 - 13 % радіонукліда, вміст ^{90}Sr у даній формі знижується до 2 % у шарі 12,5 - 22,5 см на глибині 5 м. У формі зв'язаній з гідроксидами металів вміст радіонукліда не перевищує 1 %. Розподіл потен-

ційно-обмінних форм ^{137}Cs у донних відкладах характеризується незначним вмістом радіонукліда у всіх досліджуваних формах і не перевищує 5 %. Підвищення вмісту спостережено у формі зв'язаній з гідроксидами металів у верхньому 5 см шарі донних відкладів на глибині 3 м (14 %). Таким чином, в даний час близько 80 % ^{137}Cs у ВО ЧАЕС залишається малодоступними для обмінних процесів у екосистемі.

1. *Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод*. За ред. В. Д. Романенка (Київ: ЛОГОС, 2006) 408 с.
2. Ch. Ganzha et al. Physicochemical forms of ^{90}Sr and ^{137}Cs in components of Glyboke Lake ecosystem in the Chernobyl exclusion zone. *Journal of Environmental Radioactivity* 127 (2014) 176.

РОЗПОДІЛ ПИТОМОЇ АКТИВНОСТІ ^{90}Sr У СТОВБУРНІЙ ДЕРЕВИНІ СОСНИ ЗВИЧАЙНОЇ У БЛИЖНІЙ ЗОНІ ВИПАДІНЬ ЧАЕС

Д. М. Голяка, В. О. Кашпаров, С. Є. Левчук, В. П. Процак, Л. В. Йощенко

*Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології
Національного університету біоресурсів і природокористування України,
Київ, Україна*

У даній роботі розглянуто закономірності перерозподілу ^{90}Sr в річних приростах деревини стовбура. Збір дослідного матеріалу виконано на експериментальному майданчику закладеному у вигляді квадратної пробної площі (30 × 30 м) до початку вегетаційного періоду 2017 р. Лісова ділянка розташована в 5 км на північ від четвертого енергоблоку Чорнобильської АЕС (GPS WGS84: N°51.13, E°28.60), яка представлена лісовими культурами сосни звичайної 52 років. Відбір зразків для встановлення питомої активності радіонуклідів здійснювали на основі вирізаних дисків деревини товщиною 4 - 5 см на відносних висотах: 0,00Н (біля основи зрізаного дерева), 0,10Н (10 % висоти стовбура і т.д.), 0,25Н, 0,50Н, 0,75Н, 0,90Н, а також на висоті 1,3 м. Детальний радіальний та профільний розподіл ^{90}Sr деревині стовбура вивчений на основі деревних дисків 4 модельних дерев. Всього для вимірювання питомої активності досліджуваних радіонуклідів відібрано 156 зразків деревини стовбура, з яких 40 шт. на 1,3 м висоти дерева, та 116 шт. на відносних висотах.

Питома активність ^{90}Sr у річних приростах деревини зростає при наближенні їх до серцевини стовбура дерева, тому спостерігається поступове «зміщення» найзабрудненіших річних кілець до зони із ранньою деревиною при збільшенні висоти дерева. У периферійних шарах деревини середня питома активність радіоізоотопу незначно зростає із висотою стовбура від 15 $\text{кБк}\cdot\text{кг}^{-1}$ до $\approx 20 \text{кБк}\cdot\text{кг}^{-1}$. Перші дві наймолодші групи річних кілець (2008 - 2012 рр. і 2013 - 2016 рр.) характеризуються найменшою концентрацією ^{90}Sr у радіальному напрямку на всіх висотах дерева з яких відібрані деревні диски.

Необхідно звернути увагу, що у більшості наукових публікацій в яких описується радіальний розподіл ^{90}Sr у стовбуровій деревині дерев зазначається про наявність у структурі дерева річних шарів майже непроникних для вказаного радіонукліда [1 - 4], тому подібні дослідження необхідно продовжити підібравши для вивчення значно старші дерева сосни звичайної.

1. А.Н. Переволоцкий. *Распределение ^{137}Cs и ^{90}Sr в лесных биогеоценозах* (Гомель: РНИУП «Институт радиологии», 2006) 255.
2. А.И. Щеглов. *Биогеохимия техногенных радионуклидов в лесных экосистемах* (Москва: Наука, 2000) 268.
3. M. Chigira, Y. Saito, K. Kimura. *J. Radiation Research* 29 (1988) 152.
4. N. Momoshima, E.A. Bondietti. *J. E. Radioactivity* 22 (1994) 93.

ДО ПРОБЛЕМИ УПРАВЛІННЯ РИЗИКОМ У ГАЛУЗЯХ АТОМНОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ

І. П. Дрозд

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

У міжнародній практиці поширеним підходом до управління ризиками є так звана «П'ятикрокова система».

Крок 1. *Ідентифікація небезпек, що призводять до ризику.* На цьому етапі потрібно розглянути на робочому місці все, що потенційно може спричинити заподіяння шкоди і визначити працівників, які можуть зазнавати небезпеки.

Крок 2. *Оцінювання та «ранжирування» ризиків* (їх серйозність, імовірність, розподіл за важливістю).

Крок 3. *Визначення превентивних заходів.* На цьому етапі необхідно ідентифікувати відповідні заходи для виключення ризиків та управління ними.

Крок 4. *Вживання заходів.* Реалізація цього кроку полягає у складанні плану реалізації захисних та превентивних заходів, визначенні, хто, що і коли конкретно робить і якими засобами забезпечується виконання запланованих заходів.

Крок 5. *Моніторинг та перевірка.* Оцінку слід проводити на регулярній основі. Результати оцінки повинні переглядатися при значущих змінах в організації виробництва, а також при нещасних випадках.

В пострадянських республіках, коли відбувались великі техногенні аварії, важливу роль відігравав людський фактор. У країнах заходу вплив цього фактора є менш відчутним, що очевидно пов'язано з вищим рівнем культури безпеки на потенційно небезпечних виробництвах. Тому рекомендуємо ширше впроваджувати культуру безпеки на атомних об'єктах України.

В Україні в Концепції управління ризиками [1] за рівні прийнятних ризиків рекомендовано вважати:

мінімальний ризик – менший або дорівнює $1 \cdot 10^{-8}$;

гранично допустимий ризик - менший або дорівнює $1 \cdot 10^{-5}$.

Очевидно, що за наявного стану безпеки в атомній галузі досягнення рамових рівнів прийнятних ризиків є неможливим. На цей випадок в Концепції зауважено, що рекомендовані рівні досягаються за 2 етапи, залежно від умов, що склалися в галузі.

Там же зазначено, що одним із ефективних механізмів державного регулювання управління ризиками є нагляд і контроль. Тут доречно згадати, що дієвий метод контролю, притаманний атомній галузі, є застосування на об'єктах галузі контрольних рівнів, які дають змогу ефективно знижувати дози опромінення на виробництві, а значить і ризики. Виходячи з цього, рекомендуємо з метою досягнення прийнятних рівнів ризиків широко застосовувати контрольні рівні на виробництві.

Вважаємо за доцільне оцінити і проаналізувати ризики на усіх об'єктах атомної і ядерно-енергетичної галузей України і на підставі цього аналізу розробити перспективне бачення подальшого розвитку галузей.

1. Концепція управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру. Схвалено Розпорядженням КМУ від 22 січня 2014 р. № 37-р.

СПЕКТРОСКОПИЯ ^{241}Am В ОБЪЕМНЫХ ПРОБАХ

М. В. Желтоножская, Н. В. Кулич, Д. Ю. Москаленко, Д. Е. Мызников

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

При использовании слабоактивных проб из зоны аварии на ЧАЭС возникают проблемы с калибровкой спектрометра по эффективности регистрации гамма-квантов в области низких энергий из-за разной плотности изучаемых образцов. При решении этой задачи проведены методические исследования по учету изменения эффективности регистрации гамма-лучей в пробах большого объема. Для этого сравнивалась активность ^{137}Cs , определенная по выходу K_x -излучения Ва (36 кэВ) и гамма-лучей с энергией 661 кэВ. Различие в активности связывалось с изменением плотности в исследуемых образцах. Были получены выражения для определения поправки при измерении активности ^{241}Am (59 кэВ):

$$A(^{241}\text{Am})^* = A(^{241}\text{Am}) \cdot (1,6 - 0,6 A(661 \text{ кэВ})/A(K_x \text{ Ва})),$$

где $A(^{241}\text{Am})$ – активность ^{241}Am измеренная в стандартных условиях, $A(K_x \text{ Ва})$ – активность ^{137}Cs , измеренная по выходу K_x -излучения Ва (36 кэВ), $A(661 \text{ кэВ})$ - активность ^{137}Cs , измеренная по $\gamma 661 \text{ кэВ}$.

Для проверки были исследованы образцы весом 6 - 10 г и 100 - 150 г. Было получено совпадение активности с точностью $(4 \div 6) \%$.

В таблице приведены значения активности ^{241}Am , полученные с и без учета поглощения.

Разрез/АктивностьБк/г	A ₆₆₁ /A ₃₆	A(Am) _{обр}	A(Am)*
Jn5_1_1	0,72	209,38	244,95
3	0,71	583,31	685,38
5,5	0,75	286,88	330,28
8,5	0,84	24,99	27,43
12,5	0,79	5,61	6,31
17,5	0,93	2,88	3,00
22,5	1,63	5,85	3,64
27,5	0,73	8,27	9,61
Jn5_2_1	0,76	217,19	248,53
3	0,66	240,99	289,66
5,5	0,82	327,43	363,49
8,5	0,98	215,00	217,31
12,5	0,92	187,89	196,87
17,5	1,20	63,01	55,33
22,5	0,94	4,16	4,32
27,5	1,11	0,76	0,71
Jn4_3_1	0,68	384,63	458,43
3	0,68	465,90	555,51
5,5	0,77	374,14	425,85
8,5	0,81	83,96	93,53
12,5	0,90	13,35	14,16
17,5	0,91	6,43	6,78
22,5	0,92	3,72	3,90
27,5	0,90	2,12	2,25

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МІКРОМІЦЕТІВ НА ПАЛИВОВМІСНІ МАТЕРІАЛИ

**В. О. Желтоножський¹, М. В. Желтоножська¹, Л. В. Садовніков¹,
А. В. Тугай^{2,3}, Т. І. Тугай^{2,3}**

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»,
Київ, Україна

³ Інститут мікробіології і вірусології ім. Д. К. Заболотного НАН України,
Київ, Україна

В попередніх дослідженнях виявлена здатність ряду видів мікроміцетів, зокрема штамів *Cladosporium cladosporioides*, позитивно реагувати на великі дози іонізуючого опромінення, реалізуючи радіоадаптивні властивості: позитивний радіотропізм та здатність взаємодіяти в модельній системі з «гарячими» частинками, що призводить до «розпушування» останніх.

Метою даної роботи було вивчити вплив на «гарячі» частинки штамів трьох видів мікроміцетів, що постійно виділялись у Зоні відчуження та мали виражені радіоадаптивні властивості. Було проведено порівняльне дослідження здатності штамів відповідних видів мікроміцетів, а саме: *Cladosporium cladosporioides* 4061 та 4, *Penicillium hirsutum* 3, *Hormoconis resinae* 61 у модельній системі взаємодіяти з паливними частинками та переводити радіонукліди, які входили до їхнього складу, у біологічно доступні рухливі форми.

До складу «гарячих» частинок входили ізотопи плутонію, ^{241}Am , ^{137}Cs , ^{90}Sr .

Виявлено, що вищезгадані штами мікроміцетів переводять ^{241}Am і ізотопи Pu із зв'язаної форми в оплавленій частинці в біологічно доступну форму, що призводить до акумуляції цих радіонуклідів в грибному міцелії. За збільшенням рівня накопичення ^{241}Am у міцелії досліджувані види можна розташувати наступним чином: *H. resinae* 61 > *Penicillium hirsutum* 3 > *C. cladosporioides* 4061 > *C. cladosporioides* 4. У штаму *C. cladosporioides* 4061 накопичення у міцелії ^{241}Am та ізотопів плутонію на порядок перевищує накопичення ^{137}Cs . Активність ^{241}Am та ізотопів Pu в мікроміцетах штамів *C. cladosporioides* на два порядки перевищує активність їх у поживному середовищі.

Встановлено, що всі досліджувані види мікроміцетів здатні переводити ізотопи, які входять до складу досліджуваних «гарячих» частинок в біологічно доступні іонообмінні форми. Показано, що акумуляція ^{241}Am у міцелії у всіх трьох досліджених видів мікроміцетів вища ніж для ^{137}Cs . При аналізі спектрів β -випромінювання значущих рівнів накопичення ^{90}Sr виявлено не було ні в міцелії цих штамів ні в їхній поживних середовищах.

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ НТО З КАОЛІНОМ

О. В. Коваленко¹, О. О. Кряжич²

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, Київ, Україна*

Глинисті мінерали мають велику сорбційну ємність та високорозвинену поверхню [1]. У роботі [2] зазначені деякі особливості обмінних процесів між оксидом тритію та глинистими мінералами.

Для дослідження були обрані мінерали каолінітової групи (каолініт, галлуазит, гіббсіт), широко представлені в Україні в білих глинах. Ці мінерали мають вузьке молярне відношення $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3 = 2(2\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3 - n\text{H}_2\text{O})$ і є діоктаедричними шаруватими алюмосилікатами з нерухомою кристалічною ґраткою. Сильний зв'язок між пакетами утруднює доступ води в міжпакетний простір та малу дисперсність. У таких мінералах характерною для спостереження є картина, коли водень зовнішнього гідроксилу може заміщуватися обмінними катіонами. Деякі гідроксильні групи будуть оголюватись

навколо обломлених країв усіх глинистих мінералів, і обмінні катіони, обумовлені порушеними зв'язками, частково заміщуватимуться воднем зовнішніх гідроксильних груп.

Досліджена нами динаміка питомої активності тритію у воді після розчинення в ній каоліну рис. 1. показує практично миттєве зниження концентрації тритію до значення $3,0 \cdot 10^4$ Бк/л в перші 20 - 30 хв, що свідчить про швидкий ізотопний обмін в розчинах з каоліном. Потім швидкість зниження питомої активності дещо зменшується. Подальше збільшення маси каоліну в розчині та підвищення температури додатково знижує концентрацію тритію рис. 2 [3].

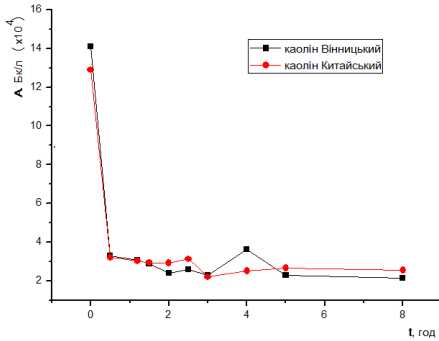


Рис. 1. Динаміка питомої активності тритію у воді протягом часу.

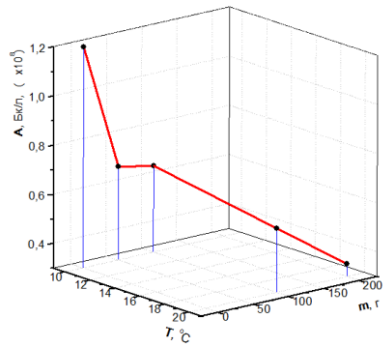


Рис. 2. Динаміка питомої активності тритію у воді від кількості каоліну і температури.

Практичне значення наведеного в роботі полягає у можливості створення технології адсорбування тритію з води, що є актуальною задачею зменшення радіоактивних відходів, що утворюються в результаті роботи АЕС.

1. Е.Г. Куковский. Особенности строения и физико-химические свойства глинистых минералов (Київ: Наук. думка, 1966) 45.
2. В.В. Долін та ін. Тритій у біосфері (Київ: Наук. думка, 2012) 224 с.
3. О.О. Кряжич, О.В. Коваленко. Дослідження ізотопного обміну в системі «оксид тритію – природний мінерал». Математичне моделювання в економії 1-2 (2017) 93.

ПРИМЕНЕНИЕ ИДЕЙ И МЕТОДОВ РАДИОЭКОЛОГИИ И РАДИОБИОЛОГИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ И ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ БИОСИСТЕМ

Ю. А. Кутлахмедов¹, И. В. Матвеева²

¹ *Институт клеточной биологии и генетической инженерии НАН Украины, Киев, Украина*

² *Институт экологической безопасности НАУ, Киев, Украина*

Показано, что в радиобиологических исследованиях и радиоэкологических ситуациях происходит реальное испытание надежности биосистем на разных уровнях интеграции от клеток до экосистем. В радиобиологических исследованиях на высшем растении Спиродела многокоренная (ряска) установлена применимость математической теории моделей надежности для описания радиационного поражения от уровня клеток до целых популяций организмов. Показана эвристичность и важность надежного подхода в радиобиологии.

Кыштымская, Чернобыльская и авария на Фокусиме произвели серьезное испытание надежности экосистем в зонах своего влияния. Необходимо было предложить и использовать соответствующую меру надежности биоты экосистем. Нами предложено, в качестве меры надежности экосистем использовать параметр радиационной емкости компонентов экосистемы, который определяет вероятность и надежность удержания радионуклидов ^{137}Cs в компонентах, являющийся как известно реальным аналогом важного элемента минерального питания биоты экосистем-К. Поэтому мы можем использовать меру надежности транспорта ^{137}Cs , как параметр благополучия или неблагополучия биоты экосистем в условиях радиационных аварий. Для оценки надежности компонентов экосистемы, как элементов транспорта ^{137}Cs , а значит и К, В терминах камерных моделей надежность транспорта ^{137}Cs по конкретной камере экосистемы предложено использовать отношение суммы скоростей поступления к сумме скоростей поступления и оттока ^{137}Cs , а значит и- К для данного компонента экосистемы.

Данным методом была нами проведена оценка надежности транспорта ^{137}Cs в ряде конкретных наземных и водных экосистем. Так на примере агроэкосистемы с. Галузия (Маневический район. Волынская область) показано, какова надежность транспорта ^{137}Cs от 4 пастбищ, через коров (молоко, мясо) к людям. Оценены дозовые нагрузки на разные когорты населения в данном селе. Через оценку влияния разных контрмер на параметры камерной модели, и тем самым на надежность транспорта ^{137}Cs к людям, показана широкая потенциальная возможность снижения доз на население за счет эффективного использования целого ряда контрмер. Такими эффективными контрмерами могут быть: улучшение пастбищ, глубокая вспашка, снятие дернины на пастбищах с высевом культурных трав, использование феррациновых болусов и т.д.

Построены модели надежности в самых разных типах экосистем, проведена оценка надежности транспорта ^{137}Cs в лесных, озерных и других типах экосистем в нормальных ситуациях и в условиях аварий (пожаров, подтоплений и т.д). Аварийные ситуации и контрмеры вносились в расчет, через изменение параметров камерных моделей, а значит и надежности транспорта ^{137}Cs по компонентам экосистемы. Данный надежный анализ, является весьма перспективным методом оценки и исследования экологических систем и процессов в нормальных условиях и в ситуациях различных аварий, включая дозовые нагрузки на биоту и людей.

ГЕОИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СЕТИ МОНИТОРИНГА ТЕРРИТОРИЙ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВСЛЕДСТВИЕ РАДИАЦИОННОЙ АВАРИИ С УЧЕТОМ СТЕПЕНИ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ КРИТИЧНОСТИ

Т. Д. Лев, Б. С. Пристер, В. Д. Виноградская

Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, Киев, Украина

Для наиболее быстрого и оптимального управления процессами ликвидации последствий радиационных аварий необходимо изучить и заблаговременно провести анализ и радиоэкологическую оценку природно-географических особенностей территорий вокруг АЭС и выявить критические особенности территории для снижения их влияния на формирование дозы облучения населения до аварии на ядерных или радиационных объектах. Использование современных ГИС-технологий позволяет получать пространственно – временную картину формирования радиационной обстановки с учетом местных условий, выявлять наиболее уязвимые районы и эффективно управлять процессами мониторинга и реабилитации загрязненных территорий.

Предложен алгоритм формирования сети мониторинга объектов загрязненной территории в случае радиационной аварии по результатам численного моделирования или прогноза радиоэкологической ситуации, проведения зонирования территории по действующим уровням вмешательства (ДУВ), определенных в документе [1], с учетом превентивной оценки степени радиоэкологической критичности [2]. Первым этапом оптимизации сети является распределение объемов мониторинга между объектами, имеющими определенный класс потенциальной радиоэкологической критичности. Необходимо учесть современную структуру природопользования и предоставить приоритет тем территориям, где выращиваются продукты с учетом местных привычек населения. Далее необходимо проанализировать значение концентрации радионуклида в каждом из видов продукции, и сравнить их со значением нормативов для острой фазы аварии (расчет аэрального загрязнения) и для долгосрочной фазы аварии (корневое загрязнение). Оценить динамику загрязнения продукции и сформировать объем мониторинга по зонам удельной активности (по ДУВ), классам очередности и классам критичности.

В зависимости от уровня принятия управленческих решений, радиоэкологическая оценка территории проводится на трех масштабах: общегосударственном - где оценивается территория страны или нескольких областей; региональном - для области или нескольких районов; локальном - для района, сельсовета или отдельного уголья в структуре землепользования. На каждом из этих уровней используется входная информация различной детализации. Расчеты выполняются для регулярной сетки с шагами - 2 км, 500м, 250м.

1. Общее руководство по безопасности, № GSG-2 - БЕНА, 2012 - 132 с.
2. B.S. Prister et al. Preventive radioecological assessment of territory for optimization of monitoring and countermeasures after radiation accidents. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.01.021>

ВПЛИВ ВИТЯЖОК З ЛІСОВОГО ОПАДУ НА ВИЛУГОВУВАННЯ РАДІОНУКЛІДІВ З ҐРУНТІВ ЗОНИ ЧАЕС

А. І. Липська, В. І. Ніколаєв, В. А. Шитюк

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Основний вклад в забруднення території ближньої зони ЧАЕС вносять паливомісткі частинки, які знаходяться у верхніх шарах ґрунтів. З плином часу під дією процесів руйнування структури частинок (окислення, подрібнення, вилуговування та ін.) відбувається перехід радіонуклідів в більш рухомий стан. Тому важливо вивчати процеси деструкції, міграції, переходу радіонуклідів в розчинні та біодоступні форми під дією водних розчинів різного складу. В даній роботі досліджується вплив водних витяжок лісового опаду на вилуговування радіонуклідів з ґрунту зони ЧАЕС.

В експерименті використаний опад листя осики та берези, хвої сосни як дерев найбільш поширених в зоні ЧАЕС. Співвідношення сухого опаду до дистильованої води 1:10, час настоювання – 7 діб при підвищеній температурі. Ґрунт з шару 0-4см був відібраний на полігоні Янів та був гомогенізований. Питома активність ґрунту ^{137}Cs -420 Бк/г, ^{90}Sr -120 Бк/г та ^{241}Am -10,8 Бк/г. Чотири однакових 25-грамових проби ґрунту заливались витяжками сосни (рН-5.0), берези (рН 4.0), осики (рН 3.5) і дистилатом (рН 6.3) в пропорції 1:10. Протягом місяця, через кожних 7 діб, відбирались 10-грамові проби витяжок, з якими проводились спектрометричні γ - β -вимірювання. На кінцевому етапі вимірювались проби вилуженого ґрунту.

Отримані експериментальні дані показують значний вихід радіоізоотопів з ґрунту у витяжки. Активність ^{137}Cs в вилужених ґрунтах зменшилась на 15 - 25 % а в ґрунті з дистилатом на 0,9%, ^{90}Sr на 35 - 55 %, в ґрунті з дистилатом на 3 %, ^{241}Am на 15 - 50 %, в ґрунті з дистилатом 0,1 %. Відповідно у витяжках активності радіоізоотопів склали ^{137}Cs 0,8 - 0,9 Бк/г, ^{90}Sr 2,0 - 5,5 Бк/г, ^{241}Am 0,015 - 0,2 Бк/г. У дистилаті ^{137}Cs 0,01Бк/г, ^{90}Sr 0,04Бк/г, ^{241}Am 0,001Бк/г.

Результати експерименту показали, що витяжки лісового опаду виводять значну радіоактивність з ґрунту в розчинні та біодоступні форми в порівнянні з дистильованою водою. Особливо високу здатність до виведення радіоізоотопів ^{90}Sr (55 %) та ^{241}Am (50 %) має витяжка з опаду листя осики. Здатність до вилуговування ^{137}Cs з ґрунтів витяжками з опаду осики, берези та сосни показали майже однакові результати.

СОРЕЦІЯ ^{137}Cs З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ ЗОЛОЮ ТОРФІВ ТА ДЕРЕВИНИ

І. М. Малоштан, С. В. Поліщук

*Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології
Національного університету біоресурсів і природокористування України,
Київ, Україна*

Досліджено сорбцію ^{137}Cs з водних розчинів золю торфу двох типів болотних ґрунтів та золю деревини ясеня звичайного (*Fraxinus excelsior* L), встановлено коефіцієнти сорбції (S) та розподілу (Kd) ^{137}Cs у системі «тверда фаза-розчин». Для проведення досліджень відібрано зразки торфів з перехідного мезотрофного торфовища поблизу с. Вежця Рокитнівського району Рівненської області та низинного евтрофного торфовища с. Ходорків Попільнянського району Житомирської області. Температура озолення зразків становила 600 °С.

Експеримент полягав у визначенні активності ^{137}Cs у водному розчині, яка залишилась після контакту з золю і розрахунку значень Kd та S. Співвідношення рідка фаза (дистильована вода з привнесеною активністю ^{137}Cs):тверда фаза (зола) у дослідах складало 25:1. Суспензію 1 год перемішували на магнітній мішалці та відстоювали добу.

Коефіцієнт сорбції (S) визначали за формулою:

$$S = (C_p - C_p') \cdot 100 / C_p, \quad (1)$$

де S – кількість ^{137}Cs , що сорбувалась твердою фазою золи торфу у % від кількості у початковому розчині; C_p – концентрація ^{137}Cs в розчині до взаємодії його із золю, Бк/мл; C_p' – концентрація ^{137}Cs в розчині після взаємодії його із золю, Бк/мл.

Коефіцієнт розподілу (Kd) розраховувався за формулою:

$$Kd = (C_p - C_p') \cdot V / C_p' \cdot m, \quad (2)$$

де Kd – коефіцієнт розподілу, мл/г; V – об'єм початкового розчину, мл; m – маса наважки золи торфу, г.

Коефіцієнти сорбції (S) радіонукліда складали: зола торфу перехідного мезотрофного торфовища – 99 %, низинного евтрофного торфовища – 60 %, золи ясеня звичайного – 27 %, значення коефіцієнта розподілу (Kd) відповідно становили 2400 ± 100 , 38 ± 12 та $9,2 \pm 3,1$ мл/г.

Водні розчини золи торфів мають нейтральне значення рН (рН = 6,8) і проявляють буферні властивості до дії сильних кислот. Зола деревини має лужний рН водного розчину (рН=10,2) і швидко розчиняється при додаванні кислоти, внаслідок чого весь ^{137}Cs десорбується.

Високі сорбційні характеристики золи торфу перехідного мезотрофного торфовища, обумовлені на нашу думку значним у порівнянні з золю торфу низинного евтрофного торфовища та золю деревини вмістом окислів полівалентних металів.

Враховуючи високі сорбційні характеристики золи торфу перехідного мезотрофного торфовища та її позитивну дію на родючість, агрохімічні та фізико-хімічні характеристики ґрунту, перспективним є використання даного природного меліоранту місцевого походження на торф'яно-болотних ґрунтах Полісся у якості контрзаходу для зниження переходу ^{137}Cs в ланці «ґрунт-рослина».

ОБҐРУНТУВАННЯ МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯМ РАДІОАКТИВНО ЗАБРУДНЕНОЇ ПІСЛЯ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ АВАРІЇ ПАЛИВНОЇ ДЕРЕВИНИ

Л. М. Отрешко, Л. В. Йощенко, Д. М. Голяка, О. В. Косарчук

*Український науково-дослідний інститут сільськогосподарської радіології
Національного університету біоресурсів і природокористування України,
Київ, Україна*

Останнім часом в умовах економічної кризи в Україні все частіше починають використовувати альтернативні джерела енергії, зокрема печі та теплові котли, що працюють на паливній деревині. Враховуючи радіонуклідне забруднення Північних регіонів, існує потреба оцінки і прогнозу радіоактивного забруднення паливної деревини із радіоактивно забруднених лісових масивів та наявності висновків про можливість її використання.

Взявши до уваги попередній досвід [1] та рекомендації щодо проведення моніторингу, для оцінки рівнів забруднення паливної деревини у 2017 р. із лісових масивів Північних районів Київської та Житомирської областей були відібрані спряжені зразки ґрунту та деревини (22 зразки ґрунту та 30 зразків неокорованої деревини (20 зразків сосни звичайної і 10 зразків берези бородавчастої)).

У кожній точці пробовідбору за допомогою приймача GPSmap 78s (Garmin, США) встановлювались географічні координати в системі WGS84. Проби ґрунту відбиралися спеціальним циліндричним пробовідбірником діаметром 37 мм на глибину 30 см у п'яти точках методом конверта. Зразки деревини відбирали на тих же ділянках спеціальним проростковим буром діаметром 0,5 см на висоті стовбура 1,3 м. Вміст ^{137}Cs визначався на високоефективному гамма-спектрометрі з напівпровідниковим детектором із високочистого германію «GEM-30185» фірми «EG & ORTEC» США, вміст ^{90}Sr - за активністю його дочірнього радіонукліда ^{90}Y на бета-спектрометрі СЕБ-01 (АКП, Україна).

Встановлено, що питома активність ^{137}Cs та ^{90}Sr у 30-сантиметровому шарі лісових ґрунтів складала $74 \pm 15 - 6380 \pm 64$ та $1 \pm 0,5$ до $65 \pm 5,4$ Бк/кг відповідно. Питома активність ^{137}Cs у зразках деревини знаходилась у межах $<9 - 744 \pm 16$ Бк/кг, ^{90}Sr - від $31 \pm 0,5$ до 1503 ± 193 Бк/кг. Результати виявили, що 93 % зразків деревини перевищують ГНПАР-2005 по ^{90}Sr (60 Бк/кг), в той час коли по ^{137}Cs не відповідає даному нормативу (600 Бк/кг) лише 3 % зразків. Виявлено 80 % проб із питомою активністю ^{90}Sr у деревині понад 100 Бк/кг (відповідно, золи ≥ 10 кБк/кг), що вимагає її віднесення згідно з ОСПУ-2005 до низькоактивних радіоактивних відходів.

Проведені дослідження підтвердили високу ймовірність одержання із радіоактивно-забруднених лісових масивів деревини, що не відповідає гігієнічному нормативу для дров паливних та паливних пучків ГНПАР-2005. Зроб-

лено висновок, що з урахуванням сумарної питомої активності ^{137}Cs та ^{90}Sr у досліджених зразках деревини та низької зольності даного палива, існує досить висока ймовірність отримати зольний залишок із питомою активністю понад 10 кБк/кг, що згідно з ОСПУ-2005 відповідає критерію низькоактивних радіоактивних відходів. Так як у паливних енергетичних установках відбувається концентрування радіонуклідів, відповідно, ризик отримати зольний залишок рівня радіоактивних відходів зростає. Через відсутність в Україні нормативів для паливної деревини, що використовується у якості палива на таких установках, існує необхідність розробки методології відповідних нормативів. Отримані результати вказують на потребу проведення моніторингу радіонуклідного забруднення паливної деревини і ретельного радіологічного контролю її використання на постраждалих внаслідок Чорнобильської катастрофи територіях.

Дані дослідження виконані в рамках науково-дослідної роботи Міністерства Освіти і Науки України за реєстраційним номером 0117U002545.

1. Л.Н. Отрешко, М.А. Журба., А.М. Билоус, Л.В. Йощенко. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в древесине на южном топливном следе чернобыльских радиоактивных выпадений. Ядерная физика та енергетика 16(2) (2015) 183.

ВМІСТ ^{137}Cs В ТОРФ'ЯНОМУ ҐРУНТІ ЧОРНОГОРСЬКОГО МАСИВУ КАРПАТ

Л. С. Пірнач¹, Г. В. Лаптев¹, Е. С. Тодосієнко²

¹ Український гідрометеорологічний інститут НАН України, Київ, Україна

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

Від правильного довгострокового прогнозу латерального переносу радіонуклідів, наслідками якого можуть бути як самоочищення так і вторинне забруднення екосистеми водосборів, залежить ефективність заходів з реабілітації радіоактивно забруднених територій. Математичне моделювання таких процесів має базуватися на масивній базі даних довготривалих спостережень, отриманих зокрема з застосуванням детальної аерогамма – зйомки, польової радіометрії, пробовідбору. Завдання ще більше ускладнюється, коли мова йдеться про забруднення території, що складаються з гірських ландшафтів.

Важкодоступність місць досліджень, жорсткі погодні та кліматичні умови, притаманні високогірним масивам, суттєвою мірою вплинули на недостатній рівень вивчення стану радіоактивного забруднення на їхніх теренах. Це стосується, зокрема Карпатських гір, що стали на шляху руху радіоактивно забруднених повітряних мас в процесі утворення чорнобильського «південного сліду».

Представлена робота є продовженням досліджень, розпочатих в Українських Карпатах в 2016 р. Подаватимуться результати визначання активності ^{137}Cs переважно в торф'яному ґрунті північно-західної частини Чорногорського масиву.

Відбір проводили, головним чином, в самих високих місцях альпійської зони на гірських вершинах хребта, де відсутність можливість вторинного забруднення внаслідок намивання дрібнозему в післяаварійний період. Як і в попередніх роботах відбиралися зразки моху з шаром підстилаючого ґрунту. Наявність моху уповільнює ерозійні процеси, а тому слід очікувати, що саме такі зразки несуть максимально достовірну інформацію відносно початкового рівня забруднення у 1986 р.

Результати дослідження показали наступне:

найбільшу поверхневу активність ^{137}Cs близько 14 КБк/ м² на теперішній час виявлено на території південно – східної частини Чорногорського масиву Карпат;

для більшості зразків існує зворотня залежність між питомою активністю ^{137}Cs і насипною щільністю зразка, що вказує на домінуючу роль органічної речовини в процесах сорбції ^{137}Cs торф'яним ґрунтом.

ЗМІНИ ЛЕЙКОЦИТАРНОЇ ФОРМУЛИ ТА ПАТОМОРФОЛОГІЧНІ ПОРУШЕННЯ ЕРИТРОЦИТІВ ПЛІТКИ ЗВИЧАЙНОЇ У ВОДОЙМАХ ЧОРНОБИЛЬСЬКОЇ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ

Н. А. Поморцева, Д. І. Гудков

Інститут гідробіології НАН України, Київ, Україна

Впродовж 2015 - 2017 рр. аналізували зміни лейкоцитарної формули та патоморфологічні порушення еритроцитів периферичної крові плітки звичайної (*Rutilus rutilus* L.) з найбільш забруднених водойм Чорнобильської зони відчуження (ЧЗВ) – оз. Глибоке, Янівського затону, а також північно-західної (ПЗЧ) і північно-східної частин (ПСЧ) водойми-охолоджувача (ВО) ЧАЕС. Потужність поглиненої дози (ППД) йонізуючого випромінювання для риб визначали за допомогою програмного забезпечення ERICA Assessment Tool 1.0 [1] з використанням даних питомої активності ^{90}Sr і ^{137}Cs у воді, донних відкладах різних екологічних зон у водоймах, а також тканинах риб. Референтною водоймою було оз. Підбірна з фоновим рівнем радіонуклідного забруднення. Усереднена потужність поглиненої дози для риб становила: в оз. Підбірна – 0,07; в Янівському затоні – 13,1; в ПЗЧ – 19,4; в ПСЧ – 28,6; в оз. Глибоке – 100,8 мкГр/год.

У лейкоцитарній формулі плітки водойм ЧЗВ встановлена зміна співвідношення формених елементів крові відносно риб референтної водойми. Так, у риб оз. Підбірна кількість лімфоцитів становила 85,7 %, а у водоймах ЧЗВ зі збільшенням ППД відзначали зменшення кількості їх з 81,9 до 77,26 %. Пропорційно зменшенню лімфоцитів спостерігали дозозалежне збільшення кількості гранулоцитів, серед яких найбільший внесок становили нейтрофіли: 4,7 % (оз. Підбірна); 6,5 % (Янівський затон); 7,6 % (ПЗЧ ВО); 9,1 % (ПСЧ ВО); 11,2 % (оз. Глибоке).

У водоймах ЧЗВ у дослідженому градієнті ППД відмічено достовірне дозозалежне збільшення кількості еритроцитів з наступними порушеннями у порівнянні з референтною водоймою: мікроцити – у 0,3 - 2,3 раза (з 0 до 2,3‰); пікноз – у 4,6 - 7,1 раза (з 0,9 до 6,4‰); цитоліз – 5,7 - 9,3 раза (з 0 до 9,3‰). Оцінка еритроцитів з порушеннями в результаті патології мітозу показала достовірне збільшення еритроцитів з мікроядрами. Так, в ПЗЧ ВО їх кількість становила 0,9‰, в ПСЧ ВО – 1,0‰, в оз. Глибоке – 1,2‰. У риб з референтної водойми та Янівського затону еритроцитів з мікроядрами не виявлено. Загальна кількість порушень клітин зі структурними порушеннями і патологією мітозу становила в Янівському затоні – 14,3 і 0,2‰, в ПЗЧ ВО – 14,7 і 0,9‰, ПСЧ ВО – 23,9 і 1 ‰, в оз. Глибоке – 26,1 і 1,4‰, відповідно. У контрольному озері кількість еритроцитів зі структурними порушеннями складала – 2,9 ‰, з порушеннями мітозу – 0,3‰. Найбільшу загальну кількість порушень еритроцитів (27,5‰) відзначено для риб за максимальної ППД в оз. Глибоке.

Таким чином у периферичній крові плітки звичайної в градієнті хронічного дозового навантаження 0,07 - 100,8 мкГр/год зареєстровані дозозалежні збільшення порушень еритроцитів, а також зміни лейкоцитарної формулі, що може свідчити про напруженість кровотворної системи і цитогенетичну нестабільність риб в умовах підвищеної радіотоксичності та мутагенності водного середовища.

1. ERICA Assessment Tool 1.0, 2012. The integrated approach seeks to combine exposure/dose/effect assessment with risk characterisation and managerial considerations (<http://www.ERICA-tool.com>).

АНАЛІЗ СПЕКТРА ГІДРОЛІЗАТІВ РАДІАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ МОДИФІКАЦІЇ МЕДИЧНИХ РОЗЧИНІВ

**В. І. Сахно¹, О. А. Жернов², Т. В. Ковалінська¹, Л. О. Сахно³,
В. Г. Ніколаєв³, Ю. В. Іванов¹**

¹ *Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

² *НМАПО імені П. Л. Шупика, Київ, Україна*

³ *Інститут експериментальної патології, онкології і радіобіології
ім. Р. Є. Кавецького НАН України, Київ, Україна*

Медико-біологічні дослідження останнім часом стали актуальним напрямком прикладної ядерної фізики. Встановлена ефективність використання іонізуючих випромінювань для цілеспрямованої передачі енергії до різноманітних процесів модифікації багатокомпонентної органіки. В ІЯД створено нові оригінальні напрямки промислових технологій, де енергія випромінювань забезпечує контрольовані процеси структурних перетворень в складаних органічних системах.

Метою даного дослідження є пошуки шляхів використання енергії іонізуючих випромінювань для стимулювання біохімічних і фізіологічних процесів в організмі, як важливий напрямок прогресу медицини при лікуванні важких форм захворювань. Ці дослідження виконуються в рамках державного замовлення на визначення перспективи використання гідролізних наноматеріалів для ядерної та традиційної медицини. Очікується підвищення активності дії традиційних лікувальних препаратів при обробці їх мегавольтними електронами. Це забезпечить більшу ефективність цих засобів у порівнянні з традиційними препаратами при застосуванні в комбустіології, онкології, ядерній медицині, загальній терапії і дасть можливість за допомогою радіаційних технологій створити нові, більш дешеві і дієві медичні засоби та технології лікування.

У доповіді викладено основні **результати** досліджень. Показано, що при опроміненні водних медичних розчинів у їхньому складі, формуються функціональні нанорозмірні композиції високоактивних утворень, куди трансформується і нагромаджується енергія іонізуючих випромінювань. Аналізується спектр таких утворень і перспективу їх залучення до медичної практики. Показано, що основним фактором утворення активних центрів є радіоліз води в складі опромінених розчинів. Наводиться перелік найбільш помітних гідролізатів. Показано, що утворюються численні групи високоактивних енергетичних центрів з різними термінами існування. Виявлено, що деякі з них мають тривалі терміни існування, перспективні для створення методів передачі енергії випромінювань безпосередньо через опромінений розчин до фізіологічного процесу з метою стимулювання клітинних репараційних процесів на молекулярному рівні. Виділено процеси, що характеризуються найбільш помітними для фізіологічних цілей енергетичними співвідношеннями. Показано, що опромінення мегавольтними електронами фізіологічного розчину хлориду натрію сприяє оптимальному перебігу ранового процесу шляхом прискорення його фаз та зменшення системної запальної відповіді у постраждалих із поверхневими та глибокими термічними ураженнями. Встановлено, що з технологічної точки зору радіаційна модифікація медичних засобів є найбільш дешевим шляхом досягнення поставленої мети.

Результати використано також і для розробки шляхів технічної модернізації радіаційної установки ІЯД НАН України для подальших медико-біологічних досліджень *in-vivo* радіаційних методів підвищення ефективності медичних розчинів і технологій практичного їх застосування.

СТАТИСТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ПОШИРЕННЯ НАЗЕМНИХ РАДІОНУКЛІДІВ У ЗРАЗКАХ НАМУЛІВ ТА ГРУНТІВ ГІРСЬКИХ РАЙОНІВ ЗАКАРПАТТЯ

Н. І. Сватюк¹, О. І. Симканич², В. Т. Маслюк¹

¹ *Інститут електронної фізики НАН України, Ужгород, Україна*

² *ДВНЗ «Ужгородський національний університет», Ужгород, Україна*

Радіоекологічний моніторинг є важливою складовою всіх систем контролю та діагностики стану довкілля. Вкрай актуальні такі дослідження для молодих гір, якими є Карпати, адже зональність території Закарпаття з виділенням гірських, передгірських і низовинних районів потребує встановлення фонових значень по вмісту гамма-активних нуклідів (ГАН), зокрема, в ґрунтах і намулах гірських рік в ізольованих гірських районах із специфічним мікроелементним та ізотопним складом території.

У даній роботі представлено результати систематизації даних радіологічних досліджень ґрунтів та намулів Закарпаття, зокрема, по вмісту ГАН для національних природних парків (НПП) Закарпаття: «Синевир», «Ужанський» і «Зачарований край» та 3-х найбільших гірських річок Закарпаття – Уж, Латориця та Боржава. Вимірювання питомих активностей ГАН у досліджуваних зразках проводилося в низькофонових умовах на охолоджуваному напівпровідниковому Ge-детектору (100 см³). Відбір проб зразків намулів гірських рік та ґрунтів НПП проводився згідно з відповідними стандартами [1, 2]. Досліджувався питомий вміст ГАН природних рядів урану ²³⁸U (²¹⁴Pb, ²¹⁴Bi, ²²⁶Ra), торію ²³²Th (²¹²Pb, ²¹²Bi, ²²⁸Ac, ²⁰⁸Tl), а також природного ⁴⁰K та техногенного ¹³⁷Cs. Члени природних рядів ²³²Th, ²³⁸U пов'язані між собою ланцюжками радіоактивних перетворень, які чутливі до впливу. Встановлений при дослідженні характер акумуляції та дисипації ГАН природних рядів ²³⁸U та ²³²Th дає цінну інформацію про характер впливу зовнішніх (геохімічних, техногенних та глобальних) факторів.

Статистичні дослідження дають змогу встановити латентні закономірності, що впливають на характер поширення ГАН на гірських територіях. У доповіді представлено результати статистичних залежностей, ролі та інтенсивності факторів, що визначають особливості групування ГАН природного та штучного походження. Зокрема:

дані про стійкість геохімічних факторів, що визначають стійкість кларкових відношень для намулів та ґрунтів різних горизонтів НПП;

кореляційну близькість точок пробовідбору НПП для досліджуваних гірських територій;

характер статистичної кластеризації ГАН та природу факторів, що її обумовлюють.

На основі проведених досліджень, Національних природних парків Закарпаття встановлено закономірності розподілу, міграції та акумуляції і ГАН у

грунтових профілях і донних відкладах річок, басейни яких охоплюють природно-заповідні території Закарпаття. Отримані результати дають важливу інформацію про просторові, часові закономірності розподілу, вмісту ГАН уранового та торієвого природних рядів, а також природоутворюючих і техногенних ізотопів ^{40}K , ^{137}Cs . Застосування багатовимірної статистичної аналізу дає змогу підтвердити механізм «самоочищення» екосистеми Закарпаття через водойми гірських рік. Співставлення отриманих результатів із даними геологічних досліджень є важливим для розуміння природи утворення гір Закарпаття та специфіки ізольованих гірських районів.

1. Якість ґрунту. Відбір проб: ДСТУ 4287:2004. Чинний від 01.07.2005. (Київ: Держспоживстандарт України, 2005) 10 с.
2. Охрана природы: Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность: ГОСТ 17.1.5.01-80. Введ. 01.01.81 (Москва: Госкомитет СССР по стандартам, 1981) 6 с.

ВДОСКОНАЛЕННЯ АНАЛІЗУ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АЕС

В. Л. Сидоренко¹, С. І. Азаров², О. С. Задунай³

¹ Інститут державного управління у сфері цивільного захисту, Київ, Україна

² Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

³ Державний науково-дослідний інститут спеціального зв'язку та захисту інформації, Київ, Україна

До вдосконалення аналізу екологічного стану в процесі експлуатації АЕС необхідно віднести наступні основні заходи [1 - 3].

1. Проведення об'єктивної та комплексної екологічної експертизи і паспортизації АЕС, створення алгоритму і екологічного паспорту. Реконструкція АЕС повинна здійснюватись з врахуванням висновків ретельної екологічної експертизи, що повинна базуватись на прямих вимірюваннях показників та розрахунках характеристик та режимних параметрів.

Екологічна експертиза повинна проводитись з метою визначення якісних та питомих кількісних енергетичних і екологічних характеристик реакторних установок та АЕС в цілому, їхня відповідність допустимим нормам та проведення оцінки негативного впливу на навколишнє природне середовище з точки зору оцінки наслідків порушення екологічної рівноваги.

3. Здійснення розробки і впровадження на АЕС сучасних систем екологічного моніторингу. Екологічний аналіз та моніторинг еколого-економічних характеристик експлуатації обладнання реакторних установок як комплексний захід повинен базуватися на використанні нормативно-правової бази з урахуванням існуючого екологічного стану навколишнього природного середовища поблизу АЕС.

3. Розробка положень системного екологічного аналізу стану АЕС на відповідність сучасним вимогам з екологічної безпеки і енергетичної ефективності як всередині країни, так і у порівнянні з вимогами МАГАТЕ та директив і регламентів Європейського Співтовариства. Контроль та комплексний аналіз стану АЕС на відповідність сучасним вимогам з екологічної безпеки повинен базуватися на принципах: багаторівневості; узгодженості нормативного, правового, методичного, технічного і програмного забезпечення; комплексності в оцінці екологічної інформації; відкритості екологічної інформації.

4. Конче потрібна розробка пропозицій щодо оптимізації експлуатації енергетичного обладнання реакторних установок та впровадження нових сучасних екологозахисних технологій, приладів та установок у конкретних схемах експлуатації АЕС.

5. З метою інтеграції України в Європейську спільноту та забезпечення відповідності експлуатації АЕС вимогам МАГАТЕ і директив ЄС необхідно вдосконалити проведення системного і систематичного екологічного менеджменту. Екологічний менеджмент повинен опиратися на екологічний паспорт АЕС та систематизовані дані екологічного моніторингу як окремих агрегатів та установок, так і об'єкту в цілому.

Реалізація запропонованих п'яти основних заходів дають змогу забезпечити розробку і впровадження нормативно-правових інструментів реалізації екологічного аналізу як експлуатації існуючих АЕС.

1. Про оцінку впливу на довкілля: Закон України від 23 травня 2017 року № 2059-VIII / Верховна Рада України. *Відомості Верховної Ради*. 2017, № 29, Ст. 315.
2. ДБН А.2.2-1-2003. Склад і зміст матеріалів оцінки впливів на навколишнє середовище (ОВНС) при проектуванні і будівництві підприємств, будинків і споруд. Київ, 2003. 40 с.
3. Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2020 року: Закон України від 21 грудня 2010 року № 2818-VI / Верховна Рада України. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2818-17> (дата звернення: 05.03.2018).

**АКРЕДИТАЦІЯ ЛАБОРАТОРІЇ ЯДЕРНОЇ КРИМІНАЛІСТИКИ
ЦЕНТРУ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
ІНСТИТУТУ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ.
ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ**

В. В. Тришин, О. В. Божок, І. А. Малюк, О. Ф. Рудик, О. П. Жуков

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Ядерна криміналістика дає відповіді на питання пов'язані з ідентифікацією, призначенням, мірою небезпеки, походженням і шляхами транспортування вилучених із незаконного обігу ядерних, радіоактивних матеріалів і

радіаційних джерел і потребує міжнародної співпраці та взаємного визнання результатів.

Акредитація Лабораторії ядерної криміналістики (ЛЯК) у Національному агентстві із акредитації України (НААУ) як випробувальної лабораторії, що відповідає вимогам ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 – процедура офіційного підтвердження відповідності встановленим критеріям і показникам, технічної компетентності при проведенні ядерно-криміналістичної експертизи (ЯКЕ), здатності задовольняти вимоги замовників.

Відповідно до Порядку акредитації в НААУ ЛЯК вже підтвердила відповідність вимогам керування і має пройти аудит на підтвердження виконання технічних вимог.

Технічні вимоги до лабораторій викладено у 5 розділі ДСТУ ISO/IEC 17025:2006, де підкреслено, що точність та вірогідність випробування визначають наступні чинники: людський фактор, приміщення та умови довкілля, методи випробування і оцінювання придатності методів, устаткування, простежуваність вимірювання, відбирання зразків, поводження з досліджуваними пробами.

Концепція функціонування ЛЯК та процедура ЯКЕ базується на основі керівних матеріалів МАГАТЕ (розроблено «Порядок проведення ЯКЕ», «Листок життєвого циклу проби», «Аналітичний листок ЯКЕ» «Експертний висновок», Карти-схеми процесів, схеми ЯКЕ та реагування на інцидент та ін).

На виконання технічних вимог НААУ розроблено Паспорт, Проект сфери акредитації та Дані оцінювання методів випробування. У Цих трьох документах практично представлена технічна компетентність ЛЯК та її можливості.

На сьогодні ЛЯК має у своєму розпорядженні сучасне дозиметричне, радіометричне та спектрометричне обладнання (Мас-спектрометр з індуктивно-зв'язаною плазмою Element 2 з лазерною абляцією NWR 213, спектрометр рентгенівський енергодисперсійний рентгено-флюоресцентний S2 RANGER, електронний мікроскоп EVO 18 Research та ін.), мобільну ядерно-криміналістичну лабораторію, яка дає змогу взяти проби для досліджень та провести попередню характеристизацію ЯМ та РМ безпосередньо на місці можливого інциденту.

ЛЯК повністю укомплектована професійним персоналом, що постійно підвищує свою кваліфікацію як в Україні так і за кордоном.

Особливу увагу НААУ звертає на дані про участь лабораторії у програмах міжлабораторних порівнянь, які є обов'язковою та невід'ємною частиною акредитації. ЛЯК брала участь у чотирьох міжнародних програмах міжлабораторних порівнянь і успішно їх пройшла. Кураторами порівнянь були: Міжнародна агенція з атомної енергії, служба аналітичного контролю якості (три порівняння) та Інститут ядерної хімії і технології (Варшава) (одне порівняння).

Акредитація в НААУ – перший етап стратегічних цілей ЛЯК, що підвищить рівень фізичної ядерної безпеки України, та стане ефективним елементом протидії незаконному обігу ЯМ та РМ як в Україні так і за її межами.

**АКРЕДИТАЦІЯ ЛАБОРАТОРІЇ ЯДЕРНОЇ КРИМІНАЛІСТИКИ
ЦЕНТРУ ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
ІНСТИТУТУ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ.
ВИМОГИ ДО УПРАВЛІННЯ**

В. В. Тришин, О. В. Божок, Г. Я. Мінчук

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

Незважаючи на жорсткий регулюючий контроль за ядерними і радіоактивними матеріалами (ЯМ, РМ), економічні, політичні та інші фактори стимулюють їх незаконний обіг. Така ситуація вимагає від держав, що володіють ЯМ, РМ мати ефективну систему фізичної ядерної безпеки (ФЯБ). Важливим елементом останньої є ядерна криміналістика.

В Україні для протидії незаконному обігу ядерних матеріалів і відвертання можливих актів ядерного тероризму затверджена «Концепція державної цільової програми розвитку ядерної криміналістики в Україні» №73/2013. Одна із тез якої - опрацювання питання стосовно створення при Інституті ядерних досліджень Національної академії наук України (ІЯД НАН України) національної експертно-криміналістичної лабораторії.

Оскільки ФЯБ потребує міжнародної взаємодії і взаємовизнання результатів розслідувань, з 2015 р. в ІЯД НАН України, як головній експертній організації у зазначеній сфері (Постанова Кабінету міністрів України № 813/2003 р.) та на виконання Концепції розпочато активну підготовку до акредитації Лабораторії ядерної криміналістики (ЛЯК). Роботи ведуться у рамках проектів Українського науково-технологічного центру.

За рекомендаціями МАГАТЕ ядерно-криміналістичні лабораторії мають впровадити Систему управління якістю (СУЯ) або на базі стандартів ISO 9000 або ISO 17025.

Виходячи з вищенаведеного ЛЯК акредитується у Національному агенстві із акредитації України (НААУ) як випробувальна лабораторія, що відповідає вимогам ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 «Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій». Національна система акредитації України визнається національними органами з акредитації країн-членів ЕА (Європейська асоціація з акредитації) та ІЛАС (Міжнародна організація з акредитацій лабораторій).

На сьогодні, відповідно до Порядку проходження акредитації у НААУ, ЛЯК успішно пройдено два етапи: розгляд Заявки та аналіз розробленої документації.

Виконання розділу 4 (Вимоги до керування) ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 потребує розробки і впровадження Політики, Цілей, організаційної структури ЛЯК, Настанови з «Системи управління якістю» (СУЯ) з повним комплектом процедур якості.

Структурною основою СУЯ стала модель ISO 9001 в яку вбудовано необ-

хідні технічні вимоги ISO 17025. Розроблено СУЯ ЛЯК на базі основних принципів менеджменту. Запорукою покращення СУЯ є застосування принципу Демінга. Вся діяльність ЛЯК була розподілена на взаємопов'язані процеси (основні, керуючі, забезпечуючі) і подальші розробки документації системи велись на базі конкретних процесів. Це стало об'єднуючим елементом, і зробило СУЯ ЛЯК логічною, зрозумілою для співробітників системою як при проведенні ядерно-криміналістичних експертиз (ЯКЕ), так і створенні документів. Дещо розширений опис розділу управління у Настанові з СУЯ сприятиме навчанню персоналу, кращому розумінню значимості виконання вимог щодо якості, залученню співробітників до свідомого виконання процедур якості та бажання покращувати якість своєї роботи, розуміти свої чітко визначені обов'язки, права і можливості.

Структуризація, системність, упорядкованість проведення ЯКЕ, постійне аналізування та управління з боку керівництва, підвищення кваліфікації співробітників, відповідальність, розуміння і бажання виконувати визначені Настановою вимоги щодо якості - все це підвищує якість проведеної ЯКЕ, дає можливість у визначені терміни надавати замовнику «Експертний висновок», що відповідає встановленим вимогам.

МОДЕРНІЗАЦІЯ КОМПЛЕКСУ НИЗЬКОФОНОВИХ КАМЕР УМФ-1500

В. В. Тришин¹, І. О. Махньов², О. І. Махньов²

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

² Науково-виробниче спільне підприємство «ОПЫТ», Київ, Україна

У доповіді розглядається запропонована та реалізована модернізація комплексу низькофонових камер УМФ-1500, який призначений для вимірювання активності малоактивних проб за альфа та бета випромінюванням з пасивним свинцевим та активним захистом від космічних частинок. Система складається із столику для проб з вимірювальним альфа-бета лічильником Гейгера-Мюллера над ним, що знаходиться у свинцевому захисті. Столик оточений захисними лічильниками, що детектують потрапляння космічних частинок (мюонів) у свинцевий захист.

Сигнал з вимірювального та захисних лічильників подається на схему антизбігів, що вимикає сигнал з вимірювального лічильника на деякий час після реєстрації космічної частки у захисних лічильниках – це робиться для того, щоб космічні частки не спотворювали вимірювання активності проби.

В своїй оригінальній конструкції система була реалізована на схемах на електровакуумних приладах з окремим лічильним пристроєм та передбачала ручний замір часу, розрахунок активності та архівування вимірювань, що є незручним, повільним та морально застарілим методом роботи. Очевидно, що з сучасним розвитком напівпровідникової та обчислювальної техніки можлива та необхідна модернізація системи.

Для забезпечення роботи лічильників Гейгера - Мюллера у систему було введено імпульсний зворотньоходовий високовольтний блок живлення на заміну трансформаторному блоку живлення оригінальної системи.

Сигнали з лічильників подається на підсилюючі каскади та на схему антизбігів на напівпровідникових тригерах, вихідні сигнали якої подаються на мікроконтролер. Розроблена програма для мікроконтролера підраховує кількість імпульсів з вимірювального лічильника, лічильників захисту та з виходу схеми антизбігів.

Підраховані імпульси зберігаються у пам'яті мікроконтролера протягом секундного інтервалу. З кількості імпульсів, що була підрахована за секундний інтервал, контролер формує пакет даних, що передається по послідовним інтерфейсам на UART-USB перетворювач та на Bluetooth-передавач. Таким чином, система має можливість передавання даних як по дротовому інтерфейсу, так і по бездротовому Bluetooth.

Для забезпечення функціонування комплексу було створено програмне забезпечення у платформі для розробки віртуальних приладів LabView, що дає можливість простого та швидкого введення значних змін у роботу програми за вимогою користувача.

Програмне забезпечення виконує прийом даних з USB-інтерфейсів та Bluetooth-приймача. З отриманих даних виділяється передана кількість імпульсів. Програма виконує підрахунок кількості імпульсів за інтервалами, що задані такими умовами:

- часом підрахунку;
- кількістю підрахованих імпульсів;
- отриманою точністю вимірювання.

Можливість обирати час підрахунку по досягненню деякої кількості імпульсів або по досягненню деякої точності прискорює роботу системи та підвищує ефективність роботи з високоактивними пробами.

Виконана модернізація приводить систему УМФ-1500 до сучасного стандарту вимірювальної апаратури, підвищує ефективність роботи, знижує можливість помилок та пришвидшує процес вимірювань. Загалом, проведена робота знімає статус морально застарілих з комплексів УМФ-1500.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ЖАБЕРНОГО АППАРАТА РЫБ В УСЛОВИЯХ ВОДОЕМОВ ЧЕРНОБЫЛЬСКОЙ ЗОНЫ ОТЧУЖДЕНИЯ

В. В. Шукалеви¹, Б. В. Борисевич², Д. И. Гудков¹, А. Е. Каглин¹

¹ *Институт гидробиологии НАН Украины, Киев, Украина*

² *Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, Киев, Украина*

Жаберный аппарат рыб относится к индикаторным органам, морфологические изменения которого позволяют в определенной степени оценить

общее функциональное состояние организма. С использованием гистологических методов анализировали показатели жаберного аппарата трех видов рыб – окуня обыкновенного (*Perca fluviatilis* L.), щуки (*Esox lucius* L.) и плотвы обыкновенной (*Rutilus rutilus* L.), обитающих в водоемах Чернобыльской зоны отчуждения (ЧЗО) с различными уровнями радионуклидного загрязнения. Отбор материала выполняли в летний период 2015 - 2016 гг. в оз. Глубоком, Яновском (Припятском) затоне и северо-западной части водоема-охладителя (ВО) Чернобыльской АЭС (ЧАЭС). Референтным водоемом служило оз. Горова Старуха (Броварской район Киевской области) с фоновым уровнем радионуклидного загрязнения.

Расчет мощности поглощенной дозы (МПД) ионизирующего излучения для рыб выполняли с использованием программного обеспечения ERICA Assessment Tool 1.0 на основе данных удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде, донных отложениях различных экологических зон водоемов, а также тканях рыб. Средние значения МПД для рыб были следующими: оз. Горова Старуха – 0,07 - 0,08; Яновский затон – 9,3 - 13,1; ВО ЧАЭС – 13,4 - 19,5; оз. Глубокое – 70,2 - 100,8 мкГр/час. Среди трех видов максимальные значения МПД отмечены для плотвы, ведущей, преимущественно, придонный образ жизни.

Анализировали степень деградации жаберных ламелл на основе показателей их асимметрии относительно оси филамента, среднюю ширину и длину ламелл, площадь респираторного эпителия, а также ширину центрального кровеносного сосуда филамента. Доминирующими типами патологий у исследованных видов рыб были деградации жаберных ламелл, проявляющаяся в увеличении коэффициента их асимметрии, а также расширение кровеносного сосуда филамента. Коэффициент асимметрии жаберных ламелл достоверно увеличивался с возрастанием МПД: для окуня с 1,010 до 1,196; для щуки с 1,007 до 1,157; для плотвы с 1,015 до 1,101 (для всех видов $p < 0,05$). Расширение кровеносного сосуда филамента также носило достоверный дозозависимый характер, увеличиваясь в среднем для окуня с 21,58 до 25,03, для щуки с 24,69 до 27,65, а для плотвы с 21,78 до 23,31 мкм (для всех видов $p < 0,05$).

Характерной тенденцией изменения жаберного аппарата исследованных видов рыб было увеличение длины и ширины жаберных ламелл в градиенте МПД, которые приводили к увеличению общей площади респираторного эпителия. Так средняя ширина ламелл при увеличении МПД возрастала для окуня с 18,48 до 23,41, для щуки с 20,65 до 28,98, а для плотвы с 18,22 до 21,21 мкм (для всех видов $p < 0,05$). Средняя длина жаберных ламелл, вследствие деградации и высокого уровня их асимметрии, достоверно возрастала только для щуки – с 235,4 до 257,4 мкм ($p < 0,05$), для двух других видов изменения этого показателя были недостоверными. Общая площадь респираторного эпителия рыб в исследуемом градиенте МПД увеличивалась для окуня с 2798,9 до 3365,9 мкм² ($p < 0,25$), для щуки с 4861,7 до 7450,1 мкм² ($p < 0,05$), а для плотвы увеличение этого показателя не зарегистрировано.

Необходимо отметить, что большинство изменений, происходящих в жаберном аппарате, и свидетельствующих об увеличении потребления кислорода организмом рыб в условиях хронического радиационного воздействия, не зависело от уровня содержания кислорода в воде исследованных водных объектов.

Авторський покажчик

- Абраимов В. В. 60
Абрамович Х. 51
Абросімов В. І. 19
Азаров С. І. 84, 96, 228
Альохіна С. М. 198
Анохін І. Є. 145
Аріта К. 38
Асламова Л. І. 126
Атаманюк Н. П. 175, 193, 198
Барабаш О. С. 62
Бартел Дж. 21
Бєбешко В. Г. 173
Бєздробна Л. К. 174, 199
Бєзшийко О. А. 51
Бєллі П. 62, 63
Бєляєв В. В. 205
Бєляновська О. А. 24
Бєнхамму Я. 51
Бєрнабєй Р. 62, 63
Бєльська Л. В. 198
Бібік Т. В. 99
Біган З. М. 68
Білько Д. І. 195,
Божок О. В. 229, 231
Бойко Р. С. 62
Бойко О. А. 175, 198
Бондарьков Д. М. 206
Борєцький В. Ф. 148
Борисевич Б. В. 233
Борисенко А. Г. 147
Борисенко В. І. 91, 105
Борисов О. 51
Борисова М. 51
Будик Д. В. 88, 94, 118
Буканов В. М. 98, 106
Бурдін В. В. 168
Бурдо О. О. 197
Валяєв А. М. 207
Варніна В. І. 120
Васильєв Я. В. 63
Василькевич О. А. 121, 130
Ватліцова О. С. 193, 198
Вєйсен Г. 157
Вєклич А. М. 148
Вєлєщук В. П. 134, 138
Вєличук Н. И. 60
Виноградская В. Д. 219
Вієру-Василіца Т. О. 136
Вірко В. Ф. 150
Вірко Ю. В. 150
Вітюк В. К. 209
Власенко З. К. 134
Власенко О. І. 134
Власенко Т. С. 93, 107
Водін О. М. 51
Войтенко Л. М. 167, 168
Войтер А. П. 64, 65, 66
Волкова Е. Н. 205
Высотский Э. Д. 86
Гаврилов О. О. 64, 65, 66
Гаврилюк В. І. 87, 99
Гаврилюк-Буракова А. В. 87
Гайдар Г. П. 120
Гайдар О. В. 208, 209
Гайніш Й. Й. 136
Гальченко В. В. 88, 94, 118
Ганжа О. Б. 176, 196, 197
Ганжа Х. Д. 211
Гапєнко Д. Д. 189, 198
Георгадзе А. Ш. 52
Гертман В. З. 187
Главін О. А. 181, 192
Гладковський В. В. 151, 152, 167, 168
Гнатюк О. П. 182
Годун Р. Л. 86, 88, 95
Голіней І. Ю. 122, 123
Голінка-Бєзшийко Л. О. 51
Голобородько В. Я. 153
Голюк М. И. 93, 107
Голяк М. Г. 90
Голяка Д. М. 212, 222
Гомоляко І. В. 173
Гончаров О. А. 162
Горанчук В. В. 91
Горбаченко О. М. 47, 48
Горєнштейн М. І. 39
Горин В. В. 154
Горощенко С. Я. 19
Горпинченко Д. В. 21
Горячко А. М. 169
Грабовський Ю. Є. 126
Григор'єв У. В. 39
Гриневич Ю. П. 177
Гринченко Г. П. 92
Гринчишин В. В. 173
Гриценко О. В. 98, 106
Грицук А. И. 179
Грицук Н. А. 179
Гудков И. Н. 184
Гудков Д. І. 202, 211, 224, 233
Гулик В. И. 88, 93, 94, 107, 111, 114, 118
Гурин А. А. 156
Давиденко В. В. 174
Давидовська О. І. 19, 22
Давидовський В. В. 23
Даневич Ф. А. 62, 63
Денисов В. Ю. 22, 24

- Деречкей П. С. 68
 Деюн Я. А. 209
 Дем'юхін В. Л. 98
 Дзюблик О. Я. 123
 Дімітріу П. 47
 Дмитрієва І. Р. 193, 198
 Добішук В. М. 82
 Добровольський А. М. 162
 Довбешко Г. І. 182
 Довбня А. М. 51
 Долголенко А. П. 125
 Долінська М. Е. 53
 Домбровська Н. С. 180
 Доронін М. І. 64, 65, 66
 Дорошенко А. А. 86, 95
 Дорошко Н. Л. 53
 Драпей С. С. 54, 87, 99
 Дрноюн Дж. 57
 Дрозд І. П. 174, 175, 177, 193, 198, 213
 Дружина М. О. 181, 192
 Дьоміна Е. А. 181
 Євланов В. М. 84
 Жаба В. І. 25, 26
 Желтоножская М. В. 55, 201, 206, 214, 215
 Желтоножский В. А. 54, 55, 56, 57, 201, 215
 Жеменик В. И. 57
 Жернов О. А. 128, 140, 225
 Живко І. 75
 Жигинас Д. В. 109
 Жуков О. П. 96, 229
 Заболотний М. А. 126, 182
 Завада М. В. 126, 138
 Задунай О. С. 84, 96, 228
 Заикин Г. Г. 59, 60
 Зелена Л. Б. 200, 201
 Зелінський А. Г. 128, 140
 Зизак М. 75
 Зіміч А. І. 132
 Зотєєв О. Є. 112
 Зотєєв В. О. 112
 Ильин А. П. 29, 30, 77
 Йощенко Л. В. 212, 222
 Іванов Ю. В. 128, 140, 225
 Іванок Ф. О. 27
 Ількович В. В. 98
 Інчікітті А. 62, 63
 Ісаєв Б. С. 198
 Ішізука Ч. 27
 Каглян О. Є. 211, 233
 Каденко І. М. 51, 61
 Кайдик Б. В. 99
 Капоте Р. 47
 Каппелла Ф. 62, 63
 Караччіоло В. 62, 63
 Кармазіна Т. В. 130
 Касперович Д. В. 62, 63
 Кашпаров В. О. 184, 212
 Кашпарова О. В. 184
 Кашпур В. О. 100
 Кемпер К. В. 69
 Кива В. О. 71, 72, 76, 82
 Киришук В. І. 87
 Киселюк М. П. 134
 Кісель І. 75
 Клещич М. М. 148
 Кобичев В. В. 62, 63
 Кобичев Р. В. 62
 Коваленко О. В. 216
 Ковалінська Т. В. 128, 140, 225
 Ковалюк З. Д. 131
 Коваль А. Н. 179
 Ковальов О. М. 64, 65, 66
 Ковальчук О. С. 76, 82
 Козловська І. В. 185
 Колесниченко Я. І. 157, 171
 Коломієць В. М. 32, 33
 Коломієць О. В. 169
 Коновалов С. І. 62
 Конорева О. В. 138
 Коровин В. Ю. 207
 Косарчук О. В. 222
 Костін Е. Г. 147, 167, 168
 Котеленець В. Г. 108
 Котенко А. В. 51
 Коцюба Р. О. 101
 Кошій Є. І. 72, 73, 77
 Красносельский Н. В. 187
 Кривенко-Еметов Я. Д. 34
 Кряжич О. О. 216
 Крячко Л. О. 148
 Кузьменко А. Г. 109
 Кулич Н. В. 206, 214
 Купріянчук С. В. 102
 Курочкіна В. А. 174
 Куртева А. А. 36
 Кутлахмедов Ю. А. 217
 Кухар І. С. 103
 Куцик О. Е. 77
 Кушнір В. А. 51
 Літовко І. В. 162
 Лавренчук Г. Й. 175, 185, 189, 198
 Лаврова Т. В. 207
 Лазорка М. М. 26
 Лаптев Г. В. 223
 Лаубенштейн М. 62, 63
 Лашкін В. М. 158, 159
 Лев Т. Д. 219
 Леві А. 51
 Леві І. 51
 Левіна О. О. 87

- Левон О. І. 37, 67
Левчук С. Е. 184, 212
Легенчук О. В. 169
Лендєєл В. В. 169
Лендел О. І. 42
Лепявко Б. С. 160, 171
Липська А. І. 175, 176,
177, 193, 196, 197,
198, 206, 220
Литвинець О. М. 198
Литвинчук Х. М. 189
Литовченко П. Г. 138
Лісяний М. І. 198
Логановська Т. К. 198
Логановський К. М.
191
Логановський К. М.
198
Лотоцкая В. А. 60
Лубинець С. В. 51
Лук'янов С. В. 32
Лукьяненко О. Г. 143
Луньов С. В. 132
Луценко В. В. 157, 171
Лушнікова І. І. 198
Магнер О. Г. 21, 37, 38,
39, 67
Мазіна Н. І. 130
Мазур В. М. 68
Майданюк С. П. 41
Макаренко Л. Г. 64, 65
Макаровський В. М. 96
Маковецька Л. І. 177,
181, 192
Малерс Ю. П. 96
Малий Є. В. 134
Малоштан І. М. 220
Малюк І. А. 96, 208,
229
Марценюк Л. С. 135
Марченко В. С. 163
Маслюк В. Т. 42, 74,
131, 132, 136, 227
Матвеева І. В. 217
Махньов І. О. 232,
Махньов О. І. 232
Мегела І. Г. 131, 132,
136
Межевич С. Ю. 69
Мельник Х. Р. 103
Михайленко В. М. 181,
192
Михайлов А. В. 104
Михайлов Л. В. 70
Михайловський В. В.
123, 137
Міліція В. М. 82
Мінтянський І. В. 131
Мінчук Г. Я. 231
Мітроченко В. В. 51
Момот Є. Л. 71
Москаленко Д. Ю. 54,
57
Москаленко Д. Ю. 214
Мызников Д. Е. 214
Мышинский Г. В. 57
Найко І. В. 162
Найко Л. В. 162
Нестеров В. О. 19, 22,
43
Нестеров О. В. 19
Неумержицька Л. В.
193
Ніколаєв В. Г. 128, 225
Ніколаєв В. І. 206, 220
Носовский А. В. 93,
107, 111, 114
Оберемок О. С. 167,
168
Обіход Т. В. 43, 44
Овсяннікова Л. М. 198
Олійник С. М. 51
Ольховский В. С. 46
Омельченко С. А. 46
Оникієнко Є. В. 123
Орел В. Е. 182
Отрешко Л. М. 222
П'ясецькі Е. 77
Павленко В. С. 184
Павленко І. О. 208
Павлович В. М. 114
Панасенко Я. В. 72
Панченко В. Г. 164
Парлаг О. О. 42
Пархоменко А. А. 205
Пархоменко В. В. 87
Пархоменко О. О. 211
Пережогін С. А. 51
Перчук І. В. 191
Петренко Е. О. 43, 44
Петренко І. В. 134, 138
Петросян Е. Є. 80
Петряков В. О. 167, 168
Пінковська М. Б. 120,
126
Піонтковський Ю. Ф.
105
Пірнак Вал. М. 72, 73,
77
Пірнак Л. С. 223
Пітченко Г. Ф. 136
Плескач О. Я. 175, 198
Плюйко В. А. 47, 48, 77
Погуляй С. С. 80
Пода Д. В. 62
Поліщук О. Б. 200, 201
Поліщук О. Г. 62, 63
Поліщук С. В. 220
Полозов Б. П. 151, 152,
167, 168
Поморцева Н. А. 224
Понкратенко О. А. 29,
69, 72, 73, 77
Поп О. М. 74
Попов В. М. 126
Порицький П. В. 164
Пристер Б. С. 219
Пришляк С. П. 205, 211
Прокопюк Г. А. 209

- Прохорова Є. М. 175, 193, 198
 Процак В. П. 184, 212
 Пугач В. М. 72, 76, 81, 82
 Пугач М. В. 75
 Пугач С. М. 106
 Пушкарь Е. С. 187
 Радіонов С. В. 37
 Радкевич О. І. 126
 Рамазанов Д. М. 76, 81
 Ревка В. М. 90, 92, 113, 118
 Резник С. Н. 163
 Ровенських Є. П. 55
 Родіонова Н. К. 195
 Розенфельд А. Б. 145
 Рокицький О. А. 147, 151, 152, 167, 168
 Романенко І. М. 93, 107
 Романова О. П. 87
 Романюк М. І. 42
 Руденко Т. П. 70
 Рудик О. Ф. 229
 Рудчик А. А. 69, 72, 73, 77
 Рудчик А. Т. 69, 72, 73, 77
 Русек К. 69, 72, 73, 77
 Руссу І. З. 195
 Рябченко Н. М. 176, 196
 Рязанов В. В. 139
 Савицький П. І. 131
 Саврасов А. М. 54, 55, 56, 57
 Садовніков Л. В. 201
 Садовніков Л. В. 215
 Саженок А. Д. 208
 Сакута С. Б. 69, 77
 Самсоненко А. В. 87
 Самченко Ю. М. 169
 Санжур А. І. 32, 33
 Сахно В. І. 128, 140, 225
 Сахно Л. О. 128, 225
 Сваричевська О. В. 208
 Сватюк Н. І. 227
 Свергун В. Т. 179
 Свирид О. А. 100
 Святун О. В. 208
 Семенюк О. М. 66
 Семиглазова Т. В. 181
 Сидоренко В. Л. 228
 Симканич О. І. 227
 Симонова Л. І. 187
 Скорбун А. Д. 78, 95, 108
 Скоряк Г. Г. 100
 Слісенко В. І. 96, 121, 130
 Сова О. А. 197
 Соколов А. М. 79
 Солодовник К. М. 47, 48
 Соляник Г. І. 182
 Співак В. Ю. 123
 Спін А. І. 78
 Сплошной Б. М. 78
 Стадник С. М. 108
 Старчик М. І. 120
 Степаненко Ю. М. 29, 72, 73, 77
 Стоев П. І. 143
 Столяж А. 77
 Сторожик Д. І. 76, 82
 Стрільчук М. В. 54
 Строек І. 77
 Сугаков В. Й. 137, 141
 Сухий К. М. 24
 Сюдак Р. 77
 Талерко Н. Н. 109
 Талько В. В. 175, 176, 193, 198
 Тартачник В. П. 126, 134, 138
 Теклішин М. А. 71
 Телецька С. В. 177
 Тжціньська А. 77
 Тихоновський М. І. 143
 Тищенко М. Г. 157
 Тільняк М. І. 74
 Тодосієнко Е. С. 223
 Третяк В. І. 62, 63
 Тригубенко О. В. 92
 Тришин В. В. 96, 199, 208, 209, 229, 231, 232
 Трофименко А. Р. 111
 Трохимчук А. К. 169
 Труш В. С. 143
 Тугай А. В. 200, 201, 215
 Тугай Т. І. 200, 201, 215
 Тукаленко Є. В. 198
 Турховський О. М. 136
 Улещенко В. В. 29, 72, 73, 77
 Уматов В. І. 62
 Усанг М. 27
 Федірко В. М. 103, 143
 Федорович О. А. 147, 151, 152, 167, 168
 Федорченко В. І. 174
 Федоткин С. Н. 49
 Фесенко С. О. 148
 Фішук І. І. 144
 Форостенко С. 76
 Фріске Е. 81
 Фурса А. Д. 23
 Харабет О. М. 112
 Хойзер Й. М. 72, 82
 Хоменков В. П. 24, 57
 Хоміч І. А. 174
 Циганок Т. В. 199
 Чайковський Ю. В. 90, 92, 113, 118
 Чаплинський Р. Ю. 80

- Чаус А. В. 71, 76, 81, 82
 Чепурнов А. П. 70
 Чернолуцкий Д. Л.
 169
 Чернюк А. А. 141
 Черняк В. Я. 169
 Черулли Р. 62, 63
 Чирко Л. І. 90, 92, 113,
 118
 Чіба С. 27
 Чулкін О. О. 112
 Чумак А. А. 198
 Шаров А. Ф. 59, 60
 Шевель В. М. 167, 168,
 174
 Шевцова Н. Л. 202
- Шеляговський Д. О.
 114
 Шинкаренко В. К. 100,
 116
 Ширма Ю. О. 72, 73, 77
 Шитюк В. А. 197, 220
 Шкапяк О. В. 113, 118
 Шлапак І. І. 88, 94, 118
 Шлегель В. М. 63
 Шмідт Х. Р. 72, 81
 Шопф К. 153
 Шукалевич В. В. 233
 Юхименко В. В. 169
 Явнюк А. А. 202
 Яковенко Ю. В. 157,
 160, 171
 Ярошенко Ж. С. 193,
 204
- Berlizov A. 85
 Bulyha S. 85
 Burdo O. O. 188
 Knight K. 85
 Kolesnichenko Ya. I.
 156, 158, 165
 Könies A. 156
 Lindvall R. 85
 Lutsenko V. V. 165
 Lypska A. I. 188
 Maliuk I. 85
 Mayer K. 85
 Nikolaev V. I. 188
 Peñkin M. 85
 Ryabchenko N. N. 188
 Schorzman K. 85
 Shytuk V. A. 188
 Tryshyn V. 85
 Tykhyy A. V. 156, 158
 Tyshchenko M. H. 165
 Varga Z. 85
 Wallenius M. 85
 Williams R. 85
 Yakovenko Yu. V. 165

Наукове видання

**XXV ЩОРІЧНА
НАУКОВА КОНФЕРЕНЦІЯ
ІНСТИТУТУ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
НАН УКРАЇНИ**

(Київ, 16 - 20 квітня 2018 року)

Тези доповідей

Укладач *Пугач Олександр Михайлович*

Тези публікуються в авторських редакціях

Комп'ютерна верстка *О. Д. Григоренко*

Підп. до друку 29.03.2018. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 14,1.
Тираж 200 пр. Зам. № 2.

Інститут ядерних досліджень НАН України,
просп. Науки, 47, м. Київ, 03028, тел. (044) 525-14-56
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4051 від 18 квітня 2011 р.

Надруковано у ТОВ «ВПК «ЦЕНТРДРУК»
вул. Гарматна, 39В, м. Київ, 03058, тел. (044) 247-50-77
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 1550 від 30 жовтня 2003 р.

Для нотаток