

ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ



**50 РОКІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
І ЗВЕРШЕНЬ**

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

**ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
НАН УКРАЇНИ**

**50 РОКІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
І ЗВЕРШЕНЬ**

За загальною редакцією В. І. Слісенка

Київ 2020

Редакційна колегія:

В. М. Буканов, А. П. Войтер, В. І. Гаврилук, Г. П. Гайдар, О. О. Грицай,
В. В. Давидовський, Ф. А. Даневич, В. Ю. Денисов, Н. Л. Дорошко,
Ф. О. Іванюк, Я. І. Колесніченко, А. І. Липська, Н. І. Мазіна,
В. М. Макаровський, О. М. Поворозник, О. А. Понкратенко, В. М. Пугач,
В. М. Ревка, В. Й. Сугаков, В. І. Третяк, В. В. Тришин, О. А. Федорович

За загальною редакцією
члена-кореспондента НАН України *В. І. Слісєнка*

*Затверджено до друку рішенням ученої ради
Інституту ядерних досліджень НАН України*

Інститут ядерних досліджень НАН України: 50 років наукових
I 71 досліджень і звершень / за заг. ред. В. І. Слісєнка. – Київ : ІЯД НАН
України, 2020. – 234 с.
ISBN 978-966-02-9206-2

Книга містить матеріали про 50-річну історію та наукову діяльність Інституту ядерних досліджень НАН України. Представлено структуру інституту та основні результати фундаментальних і прикладних досліджень з ядерної фізики, фізики елементарних частинок і високих енергій, ядерної енергетики, радіаційної фізики та реакторного матеріалознавства, фізики плазми та керованого термоядерного синтезу, ядерної, радіаційної та техногенно-екологічної безпеки.

Розрахована на широке коло читачів – науковців, аспірантів, студентів, школярів, істориків науки, наших допитливих співвітчизників, які хочуть більше дізнатися про українську ядерну науку.

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

ПЕРЕДМОВА

Інститут ядерних досліджень НАН України порівняно молода наукова установа – йому виповнюється лише 50 років. Але у вимірах тривалості людського життя – це досить значний період. Тому ми й вирішили, поки ще живуть і працюють люди, які стояли у самих підвалин заснування інституту, пройшли всі етапи його становлення і розвитку, були очевидцями і безпосередніми учасниками подій, творцями наукових здобутків, які відчули на собі і гіркоту невдач, і радість перемог, згадати все – щоб знали сучасники і пам'ятали нащадки.

А згадати є що. З часу свого заснування і дотепер наш інститут був і залишається одним із флагманів української ядерної науки. У ньому готуються висококваліфіковані наукові кадри, розвиваються найперспективніші наукові напрями, багато з яких стали міцним підґрунтям для заснування під керівництвом наших видатних учених широковідомих наукових шкіл.

Інститут має потужну матеріально-технічну базу з унікальними ядерно-фізичними установками (дослідницьким ядерним реактором ВВР-М, «гарячими камерами» для роботи з високоактивними матеріалами, циклотронами У-240 і У-120, тандем-генератором ЕГП-10К, прискорювачем електронів та ін.), яка постійно модернізується й поповнюється новим, у тому числі і розробленим в інституті, специфічним обладнанням, що дозволяє виконувати унікальні експериментальні дослідження і прикладні роботи на найвищому рівні.

Світове визнання отримали результати теоретичних та експериментальних досліджень з теорії атомного ядра, ядерних реакцій, ядерної спектроскопії та структури ядра. Значних успіхів досягнуто в галузі нейтронної фізики, фізики елементарних частинок, радіаційної фізики та радіаційного матеріалознавства, керованого термоядерного синтезу та фізики плазми, радіоекології та радіобіології. Ряд наукових досліджень інституту відзначено міжнародними преміями, державними нагородами і преміями та преміями Президії НАН України імені видатних учених. Про високий рівень наукових досліджень свідчить те, що інститут завжди займав і займає одне з чільних місць у світових наукометричних базах даних.

Велика увага в інституті приділяється і впровадженню результатів досліджень у галузі економіки, зокрема в атомну енергетику.

Нашими науковцями розроблена та впроваджена на всіх енергоблоках АЕС України унікальна система моніторингу радіаційного навантаження корпусів реакторів ВВЕР для одержання інформації, необхідної для безпечної роботи енергетичних реакторів, ефективного керування їхнім ресурсом та прийняття науково обґрунтованих рішень щодо можливості їхньої подальшої безаварійної експлуатації.

Співробітниками інституту проводяться дослідження причин радіаційного окрихчування конструкційних матеріалів ядерних реакторів, ведуться роботи по відбору нових перспективних матеріалів для ядерного реакторобудування, розробляються та виготовляються напівпровідникові детектори, впроваджуються у виробництво методи підвищення радіаційної стійкості матеріалів та радіаційні й плазмові технології.

Проводиться значна робота щодо вивчення впливу підприємств ядерного паливного циклу (зокрема, АЕС України) на екологічні системи та людину. Здійснюється регулярний контроль вмісту радіонуклідів у компонентах навколишнього середовища, розраховуються дозові навантаження на людину, вивчається радіоекологічний стан забруднених територій. На основі даних, отриманих науковцями, сформовано базу даних параметрів радіаційного стану компонентів наземних і водних екосистем у зоні впливу АЕС та побудовано достовірні карти забруднення радіонуклідами території України внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС.

Співробітники інституту були в числі перших, хто брав активну участь у ліквідації наслідків Чорнобильської аварії.

За фінансової підтримки Міністерства енергетики США в інституті створено навчальний майданчик (полігон) інженерно-технічних засобів системи фізичного захисту АЕС, який отримав високу оцінку МАГАТЕ і провідних фахівців Японії, США, Швеції та інших країн. На полігоні для фахівців з Мінекобезпеки, Міненерго, Міністерства промислової політики, МОН, МНС, Мінтрансу, Держмитслужби, Держкомкордону, МВС, СБУ, Державної служби з експертного контролю України та спеціалістів з інших країн регулярно проводяться навчання з фізичного захисту ядерних установок з імітацією різноманітних зловмисних дій щодо ядерних установок та способів реагування на ці дії.

Для проведення в Україні експертизи ядерних та інших радіоактивних матеріалів, вилучених з незаконного обігу, в інституті створено ядерно-криміналістичну лабораторію, яка є базовою для лабораторій такого типу країн членів ГУАМ. Наші експерти беруть активну участь у міжнародній діяльності по боротьбі з незаконним обігом ядерних та інших радіоактивних матеріалів.

Інститут здійснює наукове співробітництво з рядом зарубіжних ядерних центрів та наукових установ США, Німеччини, Франції, Італії, Австрії, Швейцарії, Японії, Кореї, Польщі та інших країн світу, з міжнародними і урядовими структурами (МАГАТЕ, ЄК, Міненерго США та ін.). Завдяки широким міжнародним зв'язкам науковці інституту мають можливість спільно з колегами з інших країн виконувати дослідження на сучасному світовому рівні, брати участь у великих експериментах (LHCb, SuperNEMO, BOREXINO, EURECA тощо).

Діяльність інституту здобула визнання на державному рівні, що знайшло своє відображення в ряді указів Президента України, постанов та розпоряджень Кабінету Міністрів України, інших органів центральної виконавчої влади, за якими на інститут покладено виконання важливих завдань державного значення, зокрема з науково-технічного супроводу ядерної енергетики України, участі в державній експертизі з обліку та контролю ядерних матеріалів, фізичного захисту ядерних установок, проведення ядерно-криміналістичних експертиз ядерних та інших радіоактивних матеріалів, виявлених поза межами регулюючого контролю. Інститут є головною експертною організацією України з питань дослідження та визначення характеристик радіонуклідних джерел іонізуючого випромінювання, які вилучено з незаконного обігу, та провідною організацією Координаційної групи при НАЕК «Енергоатом» з питань визначення поточного стану металу корпусів енергетичних реакторів та наукового супроводу керування їхнім ресурсом. На інститут за дорученням Державної служби експертного контролю України покладено забезпечення технічної підтримки при розгляді заявок на експорт ядерно-орієнтованих матеріалів і технологій та технологій подвійного призначення.

Книга містить матеріали про історію та наукову діяльність Інституту ядерних досліджень НАН України за 50 років його існування і розрахована на широке коло читачів – наших співробітників, їхніх дітей і онуків, науковців, аспірантів, студентів, школярів, істориків науки, наших допитливих співвітчизників, які хочуть більше дізнатися про наукову роботу і творчий пошук, цікавляться передовим і перспективним, кому не байдужа подальша доля науки в нашій країні.

Читайте, знайте, пам'ятайте, творіть нове, збагачуйте науку!

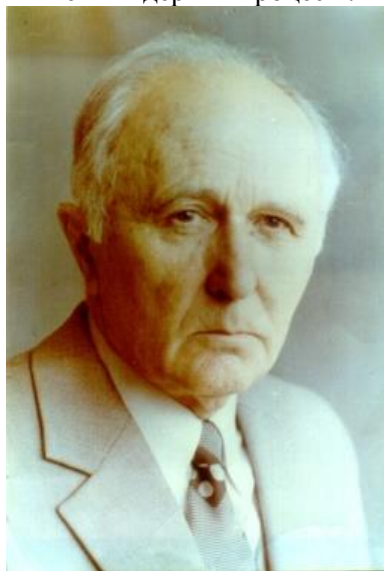
Директор Інституту ядерних досліджень НАН України,
член-кореспондент НАН України В. І. Слісенко

КОРОТКА ІСТОРІЯ ТА ОСНОВНІ ДОСЯГНЕННЯ

26 березня 2020 р. виповнюється 50 років Інституту ядерних досліджень НАН України.

Витоки ядерних досліджень в Україні сягають ще довоєнних років, коли в Українському фізико-технічному інституті в Харкові в 1932 р. була здійснена перша в СРСР реакція розщеплення ядер літію, а групою вчених під керівництвом О. І. Лейпунського були досягнуті визначні успіхи у встановленні умов здійснення ланцюгової реакції поділу ядер урану та оцінена енергія, яка при цьому виділяється.

Цей напрямок досліджень було продовжено в Інституті фізики АН УРСР, де ще в 1944 р. було створено відділ для вирішення низки питань ядерної фізики та використання атомної енергії. Для виконання запланованих робіт послідовно, упродовж 10 років, було введено в дію циклотрон У-120 (1956), дослідницький ядерний реактор ВВР-М (1960) та електростатичний генератор ЕГП-5 (1964). На цих установках було одержано важливі результати, що підтвердили актуальність вивчення ядерних процесів.



М. В. Пасічник
(1912 - 1996)

Потреби в розвитку ядерно-фізичних досліджень невпинно зростали, що обумовило необхідність комплексного вирішення ряду пов'язаних із цим проблем. Саме тому 26 березня 1970 р. Президія АН УРСР на виконання відповідної постанови Ради Міністрів УРСР прийняла Постанову № 105 про створення Інституту ядерних досліджень АН УРСР (ІЯД) на базі ряду відділів Інституту фізики АН УРСР. Основними напрямками досліджень ІЯД було визначено фундаментальні та прикладні розробки з ядерної фізики низьких і середніх енергій, фізики реакторів, перспективних проблем атомної енергетики та дослідження з використання ізоотопів і ядерних випромінювань у народному господарстві.

Ініціатором створення ІЯД та першим його директором був академік АН УРСР Митрофан Васильович Пасічник. У 1972 - 1973 рр. обов'язки директора інституту виконував



О. Ф. Ліньов
(1926 - 2001)



О. Ф. Німець
(1922 - 2002)

доктор технічних наук Олександр Федорович Лін'ов. У подальшому інститут очолювали академік АН УРСР Олег Федорович Німець (1974 - 1983), академік НАН України Іван Миколайович Вишневський (1983 - 2015) і член-кореспондент НАН України Василь Іванович Слісенко (з жовтня 2015 р. і дотепер).



І. М. Вишневський
(1938 - 2017)



В. І. Слісенко

У перші роки свого існування ІЯД складався з відділів ядерної фізики, ядерних реакцій, ядерної спектроскопії, радіаційної фізики,

ядерної електроніки, теорії ядра, теорії плазми, теоретичної фізики, науково-технічної інформації, лабораторії фізики плазми та Ужгородського відділення ІЯД.

Експериментальні дослідження інституту забезпечуються ядерно-фізичними установками, що періодично модернізуються відповідно до вимог часу. Зокрема, на дослідницькому ядерному реакторі ВВР-М у 2005 р. завершено створення сучасної системи фізичного захисту, у 2007 р. проведено модернізацію системи керування реактором з використанням нової елементної бази. Для роботи з високоактивними матеріалами в інституті побудовано унікальні, єдині в Україні, захисні бокси «гарячі камери», де проводяться також регламентні роботи з дослідження зразків-свідків енергетичних реакторів України; у 2009 р. встановлено сучасне обладнання. Електростатичний генератор ЕСГ-5 перебудовано в тандем-генератор ЕГП-10К для підвищення енергії прискорених частинок вдвічі. У 1976 р. в ІЯД було введено в дію ізохронний циклотрон У-240, який у той час не мав аналогів у Європі. Роботи з його запуску та подальшої експлуатації очолював О. Ф. Ліньов.



О. О. Ключников
(1945 - 2016)

Дослідницький ядерний реактор ВВР-М з «гарячими камерами» та ізохронний циклотрон У-240 Постановою Кабінету Міністрів України № 1709 від 19 грудня 2001 р. занесено до переліку наукових об'єктів, що становлять національне надбання.

В інституті працює тритісва лабораторія, радіохімічні лабораторії, використовується багато спеціфічного, зокрема розробленого безпосередньо в інституті експериментального обладнання для проведення фундаментальних досліджень і прикладних розробок з ядерної фізики та атомної енергетики, радіаційної фізики та фізики плазми, радіоекології та радіобіології.

У 1979 р. у складі ІЯД було створено Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро з дослідним виробництвом, яке разом з науковими підрозділами інституту займа-

лося розробками і виготовленням нестандартного устаткування, експериментальних зразків радіаційно-вимірювальних пристроїв різноманітного спрямування, специфічних приладів для проведення досліджень за науковими напрямками інституту, технологій реакторних та радіаційних випробувань матеріалів і конструкцій, необхідних для створення нової техніки, тощо. Директором Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з дослідним виробництвом було призначено Олександра Олександровича Ключникова, у майбутньому академіка НАН України, Героя України.

Протягом 70 - 80-х років минулого століття конкретизувалися головні напрямки фундаментальних та прикладних досліджень інституту: ядерна фізика середніх та низьких енергій, атомна енергетика, радіаційна фізика твердого тіла та радіаційне матеріалознавство, фізика плазми та керований термоядерний синтез, радіобіологія та радіоекологія. Поступово збільшувався кадровий науковий потенціал інституту та розширювались обсяг і тематика наукових розробок.

У 1981 р. на базі уже діючих окремих наукових відділів інститутів АН УРСР – відділу фотоядерних процесів Інституту фізики АН УРСР та відділу теорії гадронів Інституту теоретичної фізики АН УРСР – було створено Ужгородське відділення Інституту ядерних досліджень АН УРСР. Першим його керівником та заступником директора з наукової роботи Інституту ядерних досліджень АН УРСР став доктор фізико-математичних наук, професор Іван Прохорович Запісочний.

У 1992 р. Ужгородське відділення ІЯД було реорганізовано в Інститут електронної фізики НАН України.

З 1992 р. в ІЯД набуває розвитку наукова діяльність у галузі фізики високих енергій. Інститут стає офіційним членом міжнародних колаборацій HERA-B, ZEUS (DESY, Hamburg), LHCb (CERN, Geneva), CBM (GSI/FAIR, Darmstadt), LIA IDEATE (IN2P3/CNRS, Paris). Завдяки успішній діяльності ІЯД та інших наукових установ НАН України Україна з 2016 р. набула статусу асоційованого члена Європейської організації з ядерних досліджень (ЦЕРН).



І. П. Запісочний
(1922 - 2001)

Основні результати фундаментальних і прикладних досліджень.

Перші роботи з ядерної фізики почалися дослідженнями з нейтронної фізики в Інституті фізики АН УРСР у 1944 р. У створеній під керівництвом академіка АН УРСР М. В. Пасічника науковій школі з нейтронної фізики експериментально визначено перерізи взаємодії нейтронів з великою кількістю ядер, що дало змогу створити банк даних нейтронних констант для конструкційних матеріалів ядерних реакторів. Було виявлено також оболонкові ефекти при розсіянні нейтронів ядрами та визначено відносні внески прямого й компаундного механізмів у перерізи пружного та непружного розсіяння нейтронів ядрами в широкій області енергій (І. О. Корж).

Досліджено перерізи взаємодії нейтронів із стабільними та радіоактивними ізотопами з високою роздільною здатністю за енергією, а також вивчено перерізи та досліджено гамма-спектри захвату нейтронів проміжних енергій за допомогою нейтронних фільтрів.



В. П. Вертебний
(1930 - 1987)

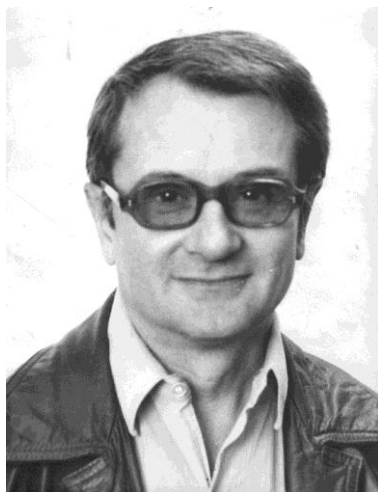
Виявлено властивості магічності деформованих ядер і відкрито ядерну оболонку з числом нейтронів $N = 100$ (В. П. Вертебний та ін.). Досліджено низькоенергетичні збудження в різних станах конденсованого середовища та отримано інформацію щодо фізичних властивостей речовини, що визначаються динамікою електронів, атомів та молекул (П. Г. Іваницький, В. І. Слісенко). Запропоновано й обґрунтовано варіант узагальненої оптичної моделі з переважним поглинанням в однофонових каналах (М. Б. Федоров) та розроблено модель розсіяння нуклонів на деформованих м'яких ядрах (І. Є. Кашуба). Завдяки наяв-

ності в інституті унікального набору нейтронних інтерференційних фільтрів здійснюється масштабна міжнародна програма дослідження взаємодії квазімоноенергетичних нейтронів (у діапазоні від енергії теплових нейтронів до сотень кілоелектрон-вольт) з атомними ядрами. Отримано значення перерізів реакцій, необхідних для розрахунків в ядерній енергетиці (А. В. Мурзін, О. О. Грицай).

Під керівництвом академіка АН УРСР О. Ф. Німця створено наукові відділи, в яких розвиваються дослідження ядерних реакцій. Одним з яскравих досягнень наукової школи, яку заснував О. Ф. Німець, стало експериментальне встановлення (за участю М. В. Соколова, Б. Г. Стружка) та теоретичне обґрунтування (К. О. Теренєцький, М. В. Євланов) немонотонної залежності перерізів розщеплення дейтрона від маси ядер. Цей результат одержав назву «ефект Німця». Проведено фундаментальні дослідження взаємодії протонів, дейтронів, іонів ^3He та альфа-частинок з атомними ядрами (В. В. Токаревський), поляризаційних явищ у розсіянні протонів на атомних ядрах (М. М. Пучеров). Принципове значення для розуміння природи ядерної взаємодії мають наукові досягнення ІЯД: установлений у багаточастинкових реакціях вплив супутніх частинок на параметри двочастинкових резонансів (В. М. Пугач, Ю. М. Павленко); дослідження поляризаційних явищ та поділу атомних ядер у реакціях із зарядженими частинками (М. І. Заїка, О. М. Ясногородський, Ю. В. Кібкало, П. Л. Шмарін, Г. В. Мохнач); вивчення структури легких ядер та механізмів ядерних процесів під час взаємодії важких іонів з легкими ядрами (А. Т. Рудчик); результати вимірювань на пучках прискорювачів повних перерізів реакцій (Л. І. Слюсаренко); вимірювання магнітних моментів збуджених станів ядер, що, серед іншого, дало змогу виявити аномалію орбітального магнетизму нуклонів в ядрі (О. І. Левон).

Світове визнання одержали теоретичні роботи з фізики атомного ядра члена-кореспондента АН УРСР В. М. Струтинського і послідовників його наукової школи. Запропонований В. М. Струтинським метод об'ємних поправок для розрахунку енергії зв'язку та деформації ядер мав значний вплив на розвиток теорії ядра і дав змогу провести кількісні розрахунки мас та рівноважних деформацій ядер, багатьох властивостей процесу поділу ядер, а також передбачити можливість існування надважких ядер.

Цикл робіт В. М. Струтинського «Явище формування сильно дефор-



В. М. Струтинський
(1929 - 1993)

мованих важких атомних ядер у квазістаціонарному стані» було зареєстровано в 1978 р. Державним комітетом СРСР як відкриття.



В. М. Коломієць
(1942 - 2018)

Широковідомі праці В. М. Коломійця з вивчення процесів релаксації та ефектів в'язкості в ядерній фермі-рідині. Ним була розроблена теорія оболонкової структури важких ядер з урахуванням ефектів надплинності та швидкого обертання ядер, установлена можливість існування за великих кутових моментів ядра так званих іраст-пасток, потрапляючи до яких ядро має аномально великий час життя відносно гамма-розпаду, створена теорія кипіння ядерної фермі-рідини, екситонна каскадно-випарювальна модель заселення ядерних ізомерних станів, уперше вивчено вплив скінченності потенціальної ями ядра на

ймовірності внутрішньоядерних каскадних переходів. Він запропонував і детально описав у багатьох публікаціях принципово нову модель ядра як краплі фермі-рідини.

Співробітниками відділу теорії ядра показано, що оболонкова або зонна структура спектра ядер є загальною властивістю скінченних фермі-систем (О. Г. Магнер); розроблено та реалізовано низку нетрадиційних теоретичних методів визначення перерізів прямих та непрямих реакцій розсіяння важких іонів ядрами з аналізу експериментальних даних щодо їхнього пружного розсіяння (К. О. Теренецький); запропоновано та проаналізовано новий варіант напівфеноменологічної моделі модифікованого лоренціану (MLO4) для обчислення дипольних радіаційних функцій (В. А. Плюйко); виведено динамічне рівняння для повільного колективного руху в моделі рідкої краплини в рамках статистичної квантової теорії поля для скінченних фермі-систем (В. П. Альошин).

Наразі у відділі теорії ядра проводяться теоретичні дослідження складних ядерних процесів, таких як поділ атомних ядер, зіткнення важких іонів, збудження гігантських резонансів; розроблено методи опису динамічних властивостей ядра за допомогою введення обмеженої кількості макроскопічних характеристик, таких як параметри фор-

ми ядра, ядерна густина, ядерне тертя, ядерна в'язкість. Проаналізовано класичні та квантово-механічні аспекти реакцій з важкими іонами, зроблено значний внесок у розвиток теорії колективного руху з великою амплітудою та скінченною швидкістю в атомних ядрах (В. І. Абросімов, Ф. О. Іванюк). У рамках чотиривимірною динамічного ланжевенівського підходу виконано розрахунки розподілів уламків поділу ряду актинідних та трансактинідних ядер за масою уламку та повною кінетичною енергією (Ф. О. Іванюк). Показано, що існує новий механізм дезбудження ядра, пов'язаний з народженням позитронів в ядерних переходах довільної мультипольності та розрахована ймовірність цих процесів (С. М. Федоткін). Досліджено механізми синтезу надважких ядер та структури надважких ядер, запропоновано мікроскопічний та напівмікроскопічний опис ядерно-ядерної взаємодії між сферичними та деформованими ядрами, розроблено об'єднану модель альфа-розпаду та альфа-захоплення, що дає змогу одночасно розраховувати періоди цих процесів з високим ступенем точності (В. Ю. Денисов). Запропоновано альфа-кластерну модель з дисперсією і доведено, що врахування кластеризації важливо для опису поведінки спостережуваних характеристик пружного та непружного розсіяння протонів та легких ядер проміжних енергій ядрами (В. П. Михайлюк).

Розроблено часові методи аналізу квантових та ядерних процесів, теоретично досліджено еволюцію тунелювання частинок крізь складні енергетичні бар'єри (В. С. Ольховський).

Значних успіхів досягнуто в галузі ядерної спектроскопії. Започаткував цей напрямок досліджень член-кореспондент АН УРСР Г. Д. Латишев, збудувавши разом із співробітниками магнітний бетаспектрометр, який за своїми характеристиками був одним з найкращих у світі. На цьому спектрометрі були проведені прецизійні вимірювання спектрів електронів внутрішньої конверсії низки радіоактивних ядер. Одержано значний масив даних що-



Г. Д. Латишев
(1907 - 1973)

до коефіцієнтів внутрішньої конверсії, мультипольностей гамма-переходів, встановлено квантові характеристики збуджених станів ядер, виявлено різні аномалії в ядерних процесах (Г. Д. Латишев, В. Т. Купряшкін, В. І. Гаврилюк, О. І. Феоктистов). Інтенсивний розвиток гамма-спектроскопії в дослідженнях радіоактивного розпаду та на пучках заряджених частинок привів до виявлення у структурі атомних ядер багатьох нових збуджених станів, одержано нові дані про структуру ядер, відкрито нове явище – збудження ядер при анігіляції позитронів з електронами атома (І. М. Вишневський, В. О. Желтоножський, В. В. Тришин). Досліджено динаміку перебування оболонки атома в процесі радіоактивного розпаду, виявлено зміщення конверсійних та оже-ліній при іонізації атома. Розроблено методики прецизійних вимірювань енергії гамма- і конверсійних переходів та визначення на цій основі часу життя високозбуджених станів ядер у ($n\gamma$)-реакціях на теплових нейтронах та магнітних моментів ядер. Проведено дослідження низькоенергетичних (≤ 1 eV) електронів та пояснено природу їхньої емісії з поверхні радіоактивних джерел (О. І. Феоктистов, В. Т. Купряшкін та ін.).



Ю. Г. Здесенко
(1941 - 2004)

Під керівництвом члена-кореспондента НАН України Ю. Г. Здесенка в інституті було розпочато дослідження властивостей нейтрино та процесів слабкої взаємодії елементарних частинок у процесах подвійного бета-розпаду атомних ядер. Співробітниками відділу фізики лептонів отримано цілу низку пріоритетних результатів щодо пошуку подвійного бета-розпаду ізотопів кадмію, вольфраму та інших рідкісних розпадів.

Дослідження інституту в галузі ядерної енергетики спрямовано на вирішення науково-технічних проблем безпечної експлуатації атомних електростанцій. Розроблено унікальну методику вимірювання параметрів ядерної безпеки об'єктів ядерної енергетики, яка реалізована на об'єкті «Укриття» (В. М. Павлович); у «гарячих камерах» систематично вивчають фізико-механічні властивості металу зразків-свідків, виготовлених з того самого матеріалу, що

й корпус реактора (В. С. Карасьов, Е. У. Гринік, Л. І. Чирко); розроблено сучасні методики моніторингування радіаційного навантаження корпусів реакторів типу ВВЕР-1000 та дозиметрії опромінених зразків-свідків (В. М. Буканов), що дає змогу отримувати інформацію, необхідну для визначення експлуатаційного ресурсу корпусу реактора, а також для прийняття науково обґрунтованих рішень щодо можливості продовження терміну його експлуатації.

Дослідження в галузі радіаційної фізики розпочато у відділі радіаційної фізики, створеному професором І. Д. Конозенком у 1960 р. Під його керівництвом активно вивчався вплив різних видів ядерного випромінювання на кінетику змін електрофізичних властивостей напівпровідникових матеріалів залежно від типу та концентрації легуючих та супутніх домішок. Метою цих досліджень був пошук методів підвищення радіаційної стійкості приладів. Виявлено значний вплив домішок на кінетику введення радіаційних дефектів та вплив останніх на преципітацію кисню. Плідними виявилися дослідження радіаційних дефектів у надчистому кремнії. Одержані результати знайшли практичне застосування в розробці нового класу аварійних нейтронних дозиметрів (І. Д. Конозенко, В. І. Хіврич, М. І. Старчик та ін.).

Виконано комплекс робіт з моделювання нейтронних пошкоджень у напівпровідникових матеріалах шляхом опромінення зарядженими частинками середніх енергій; встановлено низку нових фізичних ефектів, зокрема індуковану опроміненням надпровідність арсеніду індію, флуктуації провідності з ростом дози опромінення, гістерезис магнітоопору в легованому марганцем антимоніду індію; виявлено ефект гігантського (10 порядків) зменшення провідності антимоніду індію в разі комплексного опромінення нейтронами реактора і рентгенівськими променями (П. Г. Литовченко, А. Я. Карпенко, Г. О. Віхлій).



І. Д. Конозенко
(1907 - 1997)



А. Ф. Лубченко
(1921 - 1977)

резонансним лазерним променем (А. Ф. Лубченко, В. М. Павлович).

Розвинуто теорію впливу ядерного опромінення на властивості металів, сплавів, напівпровідників, рідких кристалів. Виявлено особли-



В. М. Ораєвський
(1935 - 2006)

Під керівництвом професора А. Ф. Лубченка виконано низку досліджень з квантової теорії оптичних і дифузійних явищ у твердих тілах. Вивчено форму смуг поглинання світла молекулярними кристалами під час міжзонних переходів, форму кривих оптичної активності та кругового дихроїзму локальних центрів (І. І. Фіщук), а також досліджено вплив поступової та обертової дифузії в рідинах еліпсоїдальних броунівських частинок, що містять гамма-радіоактивні ядра, на форму месбауєрівських ліній (О. Я. Дзюблик). Теоретично передбачено ефект прискорення дифузії легких домішок у напівпровідниках у разі опромінення

вості утворення конденсованої фази екситонів у двовимірній системі. Розвинуто теорію явищ самоорганізації, а саме утворення періодичних структур, автоколивань та виникнення надпровідних областей у кристалах при ядерному опроміненні (член-кореспондент НАН України В. Й. Сугаков).

Дослідження в галузі фізики плазми та керованого термоядерного синтезу розпочато в ІЯД під керівництвом Л. Л. Пасічника (експеримент) та В. М. Ораєвського (теорія) – автора офіційно зареєстрованого в СРСР відкриття розпадної нестійкості хвиль у плазмі (спільно з Р. З. Сагдєєвим). Розвинуто нелінійну теорію взаємодії хвиль в обмежених плазмових систе-

мах, досліджено «вибухові» нестійкості за участю хвиль з від'ємною енергією, розглянуто як динамічні, так і стохастичні процеси (В. М. Ораєвський, Я. І. Колесниченко, Т. О. Давидова та ін.). Уперше теоретично показано можливість збудження нестійкостей плазми продуктами термоядерної реакції (Я. І. Колесниченко, В. М. Ораєвський) – результат, що стимулював експериментальні й теоретичні дослідження нестійкостей на енергійних іонах у багатьох лабораторіях світу.

Пізніше було відкрито існування критичної енергії іонів у токамаках, вище якої іони є нечутливими до магнітогідродинамічної активності. Відкрито нові типи альфвенівських коливань та резонансів «частинка - хвиля» у стелараторах; знайдено основний класичний механізм стохастичної дифузії енергійних іонів у стелараторах і механізм аномальної теплопровідності плазми в лабораторній та космічній плазмі (Я. І. Колесниченко, В. В. Луценко, В. С. Марченко, Ю. В. Яковенко та ін.). Розроблено фоккер-планківську модель транспорту енергійних іонів у токамаках (В. О. Яворський та ін.)

Досліджено широке коло колективних процесів взаємодії електромагнітних хвиль і потоків заряджених частинок з плазмою. Виявлено й теоретично обґрунтовано існування нових типів солітонів та інших нелінійних структур, а також вивчено закономірності їхньої еволюції (Т. О. Давидова, В. М. Лашкін); розвинуто теорію колективного поглинання ВЧ потужності в геліконній плазмі (К. П. Шамрай), яка знайшла експериментальне підтвердження в ІЯД (В. Ф. Вірко, В. М. Слободян) та в інших лабораторіях світу; досліджено нові механізми трансформації й розсіяння плазмових хвиль (В. М. Павленко, В. Г. Панченко).



Т. О. Давидова
(1941 - 2005)

Експериментально вивчено дрейфово-дисипативну нестійкість, аномальну дифузію плазми та властивості ємнісного високочастотного розряду (Л. Л. Пасічник, В. В. Ягола та ін.); з'ясовано механізми релаксації пучків іонів у плазмі (Г. С. Кириченко, А. Г. Борисенко, В. Г. Хмарук).

Завдяки плідній співпраці теоретиків та експериментаторів було відкрито явище просвітлення плазових хвильових бар'єрів (В. М. Ораєвський, Л. І. Романюк та ін.), за що його авторам було присуджено Державну премію України в галузі науки і техніки.



Л. Л. Пасічник
(1932 - 1984)

Експериментально (Г. С. Кириченко, В. Ф. Вірко) й теоретично (Т. О. Давидова, К. П. Шамрай) досліджено нелінійні явища в нерівноважній плазмі з високочастотною накачкою та пучками заряджених частинок; виявлено особливості фізичних процесів у вакуумно-дуговому розряді (В. А. Сасенко, А. Г. Борисенко, О. І. Владіміров); вивчено оптичні й транспортні властивості неідеальної плазми імпульсних розрядів у воді (Л. Л. Пасічник, П. Д. Старчик, О. А. Федорович).

Дослідження щільної плазми (10^{17} - 10^{22} см⁻³) електронів показали «просвітлення» такої плазми при концентраціях більше $5 \cdot 10^{18}$ см⁻³. Отримано ефект «нереалізації» рівнів атомів та одержано залежність величини «оптичної щільності» від концентрації електронів (О. А. Федорович, Л. М. Войтенко).

Одержано зменшення коефіцієнта розпаду щільної плазми від теоретичного на декілька порядків, емпіричну формулу залежності коефіцієнта розпаду від концентрації електронів, а також одержано збільшення часу життя електронів у щільній плазмі в порівнянні з теоретичним (О. А. Федорович, Л. М. Войтенко).

Розроблено методи збору, накопичення та аналізу даних ядерно-фізичних експериментів, пристрої ядерної електроніки, спеціалізоване програмне забезпечення та створено автоматизовані вимірювальні системи нового покоління на основі сучасної мікроелектроніки, універсальних комп'ютерів та інформаційних технологій (Р. Г. Офенгенден, С. І. Пилипчак, А. П. Войтер).

Актуальність радіоекологічних проблем істотно зросла у зв'язку з аварією на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС). Це питання набуло першочергового значення в контексті стабільного розвитку держави, яка використовує ядерні матеріали та радіаційні технології.

Основні дослідження інституту в цій галузі пов'язані з вивченням впливу підприємств ядерного паливного циклу (зокрема, АЕС України) на екологічні системи та людину. Для цього здійснюється контроль активності альфа-, бета- і гамма-випромінюючих радіонуклідів у компонентах навколишнього середовища; розраховуються дозові навантаження на людину, що формуються за рахунок інгаляційного та перорального надходження до організму; вивчається радіоекологічний стан територій, що зазнали забруднення внаслідок аварії на ЧАЕС, та довкілля працюючих АЕС України (В. К. Чумак, Г. М. Коваль, І. М. Вишневський, В. О. Желтоножський, В. В. Тришин, Л. К. Бездробна).

Інститут проводить фундаментальні і прикладні дослідження та розробки за такими напрямками:

- ядерна фізика, фізика елементарних частинок і високих енергій;
- ядерна енергетика;
- радіаційна фізика та реакторне матеріалознавство;
- фізика плазми та керований термоядерний синтез;
- ядерна, радіаційна та техногенно-екологічна безпека.

Поряд із фундаментальними дослідженнями в інституті велика увага завжди приділяється впровадженню одержаних результатів у виробничу сферу. Розроблено й наразі успішно використовуються прилади, технології, методики та експериментальні установки для проведення робіт з радіаційного матеріалознавства, радіоелементного аналізу, ядерної медицини, плазмових технологій, рентгенівської дифрактометрії та лазерної мас-спектрометрії, систем радіаційного моніторингу, контролю радіоактивного забруднення навколишнього середовища тощо.

В інституті виконуються поточні регламентні роботи з визначення ресурсу конструкційних матеріалів діючих енергетичних реакторів за замовленнями АЕС України; проводяться дослідження з виявлення впливу радіаційних навантажень на фізичні властивості конструкційних матеріалів ядерних реакторів; ведуться роботи з відбору нових перспективних конструкційних матеріалів для ядерного реакторобудування; розробляються вдосконалені технології та виготовляються напівпровідникові детектори; впроваджуються у виробництво методи підвищення радіаційної стійкості матеріалів з метою збільшення термінів функціонування приладів, виготовлених на їхній основі; застосовуються у промисловості радіаційні технології для збільшення строків зберігання деяких видів харчової, медичної та сільськогосподарської продукції.

Використовуючи напрацювання з фізики плазми, розроблено методику для деструкції без утворення пилу та знезараження матеріалів і речовин, забруднених радіоактивними й біологічно активними домішками, ряд плазмових технологій осадження і травлення матеріалів, створено універсальний іонізатор парів матеріалів для нанесення плівок і захисних покриттів у мікроелектроніці.

Розроблено та виготовлено плазмохімічний реактор та відповідні технології для селективного травлення робочих шарів мікросхем для фірми MOTOROLA. Розроблено, виготовлено та впроваджено в Мінському НДІ радіоматеріалів (Білорусь) плазмохімічний реактор для глибокого травлення кремнієвих пластин. Розроблено, виготовлено та впроваджено на ВАТ «КВАЗАР» (Київ) плазмохімічні реактори для створення ізоляції при виготовленні сонячних елементів, які за технічними параметрами вдвічі перевищують кращі зарубіжні аналоги (О. А. Федорович, Б. П. Полозов).

Розроблено технологію нанесення матеріалів з високими температурами плавлення та кипіння (А. Г. Борисенко, Є. Г. Костін).

Відділом фізики плазми та плазмових технологій і відділом фізики високих енергій спільно розроблено та виготовлено низку прозорих для ядерних випромінювань мікростріпових детекторів різного призначення з просторовою роздільною здатністю до 3 мкм. Вони успішно випробувані та застосовуються на різних ядерних установках у Швейцарії, Великобританії, Франції, Німеччині, Чехії, Україні.

Досліджено взаємодію низькоенергетичних протонів та гелію з енергією 200 - 300 еВ з рядом матеріалів, що застосовуються в будівництві ядерних установок. Робота проводилась спільно з Інститутом фізики напівпровідників НАН України та Інститутом металофізики НАН України.

Започатковані в інституті медико-біологічні дослідження з терапії онкологічних захворювань нейтронним опроміненням було доведено до практичного застосування у процесі лікування хворих. Спільно з медичними установами України проводилась робота з отримання радіофармпрепаратів на ядерно-фізичних установках ІЯД.

Після Чорнобильської аварії співробітники інституту були в числі перших, хто брав активну участь у ліквідації її наслідків. Роботи підрозділів інституту з ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС очолив заступник директора В. І. Гаврилюк. Під його керівництвом і при особистій участі в першій половині травня 1986 р. були розвідані радіаційні поля навколо зруйнованого реактора 4-го блока ЧАЕС. У другій половині

травня 1986 р. В. І. Гаврилюк організував і особисто взяв участь у визначенні фізичних характеристик зруйнованого реактора. У результаті проведеної роботи було доведено, що у зруйнованому реакторі відсутня ланцюгова реакція і розплавлена радіоактивна маса не проплавить бетон споруди реактора й не потрапить у підземні води.

Співробітниками інституту виміряно радіоактивність сотень тисяч зразків ґрунту, води, рослинності та інших об'єктів навколишнього середовища з метою оцінки рівня радіоактивного забруднення довкілля в різних регіонах України. Розроблено й виготовлено численні прилади для контролю за міграцією радіонуклідів у навколишньому середовищі та станом паливовмісних мас об'єкта «Укриття», що значною мірою сприяло пом'якшенню наслідків Чорнобильської катастрофи.

Технологічні розробки інституту були представлені й відзначені дипломами на численних міжнародних та національних виставках науково-технічних досягнень й отримали сотні патентів на винаходи методів використання іонізуючої радіації як основного інструменту досягнення технологічних результатів у різних галузях виробництва.

В інституті діє низка проблемно-орієнтованих баз даних:

Український центр інформації з ядерної науки і техніки (INIS), що готує та передає в МАГАТЕ інформацію щодо публікацій з ядерної фізики в Україні, а також інформує співробітників інституту стосовно новітніх досягнень світової науки;

Український центр ядерних даних (УКРЦЯД), який з 1998 р. входить до мережі центрів ядерних даних, які працюють під егідою МАГАТЕ. Основними напрямками наукової діяльності УКРЦЯД є компіляція експериментальних ядерних даних, отриманих в Україні, для системи EXFOR та забезпечення ядерно-фізичними константами українських користувачів для вирішення наукових і технологічних задач;



В. І. Гаврилюк



NELRS (Nuclear Export License Review System) – база даних та автоматизована система контролю за міжнародними передачами ядерних матеріалів, обладнання і технологій, а також товарів подвійного використання. NERLS – спільний проект Державної служби експортного контролю України, ІЯД НАН України та NNSA Міністерства енергетики США;

інформаційна система для ядерної криміналістики в Україні, яка призначена для підвищення ефективності протидії незаконному обігу ядерних та інших матеріалів (ЯРМ), сприянню оперативності ідентифікації ЯРМ, що виявляються поза межами регулюючого контролю. Користувачами інформаційної системи є уповноважені представники організацій, які відповідно до Постанови КМ України № 813 від 2 червня 2003 р. проводять діяльність у сфері використання ядерної енергії в разі виявлення радіоактивних матеріалів у незаконному обігу;

база даних щодо забруднення України внаслідок аварії на ЧАЕС;

інформаційна система даних екологічного моніторингу в зонах спостереження атомних станцій та зони відчуження ЧАЕС.

У 1998 р. в інституті створено Навчальний центр з фізичного захисту, обліку та контролю ядерного матеріалу (НЦДК), беззмінним керівником якого є В. І. Гаврилук. За роки роботи НЦДК було проведено близько 300 національних навчальних курсів з фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів, на яких підвищили свою кваліфікацію майже 5300 українських фахівців із 216 установ й організацій.

Потенціал НЦДК використовується міжнародними установами й організаціями інших країн для проведення регіональних і національних навчальних курсів, семінарів і робочих нарад для фахівців з ядерної та радіаційної безпеки, фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів країн Центральної Європи, СНД і Балтії. У НЦДК було проведено більше 30 подібних заходів, в яких взяли участь близько 800 іноземних слухачів майже з 30 країн світу.

НЦДК є офіційно зареєстрованим членом мережі національних і регіональних навчальних центрів для навчання та досліджень у сфері фізичної ядерної безпеки (NSSC)/центрів передового досвіду на базі порталу МАГАТЕ NUSEC.

ІЯД має широкі міжнародні наукові зв'язки. Співробітники інституту проводять спільні дослідження з науковими установами США, Франції, Німеччини, Італії, Австрії, Польщі, Швеції, Нідерландів, Японії та інших країн. Інститут підтримує робочі зв'язки з МАГАТЕ. Науковці беруть активну участь у виконанні низки міжнародних наукових програм, надають суттєву допомогу в підготовці висококваліфікованих кадрів і спеціалістів для інших країн. Інститут відзначено нагородою Web of Science Award Ukraine як українську організацію з найбільшою кількістю наукових праць, опублікованих у міжнародній співпраці, а також відзнакою "LEADER IN OPEN ACCESS".





Щорічно близько 100 наукових співробітників інституту виїжджають за кордон з метою виконання наукової роботи, на стажування та для участі в міжнародних наукових заходах. Кожного року приблизно 70 - 80 іноземних учених та фахівців із США, Німеччини, Австрії, Японії, Франції, Республіки Корея та інших країн відвідують інститут.

Особливо плідним є співробітництво вчених інституту з такими центрами: DESY (Гамбург, Німеччина); CERN (Женева, Швейцарія); Інститутом ядерної фізики Макса Планка (Грайфсвальд, Німеччина); Технічним університетом Мюнхена (Німеччина); Інститутом ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського (Краків, Польща); Інститутом ядерних досліджень (Варшава, Польща); науковими установами, що входять до Національного інституту ядерної фізики (Італія); Інститутом фізики плазми Макса Планка (Грайфсвальд, Німеччина); Лабораторією фізики плазми Принстонського університету (США); Інститутом теоретичної фізики університету Інсбрука (Австрія); GSI (Дармштадт, Німеччина); Аргонською, Лос-Аламосською та Сандійськими національними лабораторіями США.

На базі інституту за участі його фахівців проводяться наукові семінари та школи для учасників міжнародних проєктів: HERA-B (DESY, Німеччина), LHCb (CERN, Швейцарія) та ін.

На сьогодні в інституті налічується 464 співробітники, з яких 290 є науковими, у тому числі чотири члени-кореспонденти НАН України, 36 докторів та 100 кандидатів наук, які працюють у 17 наукових підрозділах. Координація наукової діяльності здійснюється через учену раду, секції вченої ради та раду молодих учених.

Щорічно в інституті навчається в середньому 10 аспірантів за такими спеціальностями: фізика ядра, фізика елементарних частинок і високих енергій; ядерно-фізичні установки; радіаційна фізика конденсованого стану; фізика плазми і керованого термоядерного синтезу; радіобіологія.

В інституті функціонує спеціалізована вчена рада з правом прийняття до розгляду та проведення захисту дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора (кандидата) фізико-математичних та технічних наук за спеціальностями 01.04.16 «Фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій» (фізико-математичні та технічні) та 05.14.14 «Теплові та ядерні енергоустановки».

Учені інституту зробили вагомий внесок у світову скарбницю знань. Наукові дослідження співробітників відзначено міжнародними преміями, державними преміями України та преміями Президії НАН України імені видатних учених. В інституті проходять щорічні наукові конференції, а також проводяться міжнародні конференції та наукові школи з актуальних питань ядерної фізики, атомної енергетики і фізики плазми. Інститут заснував та видає науковий журнал «Ядерна фізика та енергетика», щороку виходять з друку кілька монографій науковців та понад 200 статей у міжнародних та українських наукових виданнях. За якістю цих публікацій (h -індекс = 137) інститут займає одне з провідних місць серед наукових установ України.

НАУКОВІ ПІДРОЗДІЛИ

СЕКЦІЯ ЯДЕРНОЇ ФІЗИКИ, ФІЗИКИ ЕЛЕМЕНТАРНИХ ЧАСТИНОК І ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

ВІДДІЛ ТЕОРІЇ ЯДРА

Відділ теорії ядра був створений у 1970 р. З 1970 по 1991 р. відділом керував чл.-кор. АН України, проф. Вілен Митрофанович Струтинський, який був запрошений в ІЯД після роботи в Інституті атомної енергії імені І. В. Курчатова. На той час В. М. Струтинський був відомим ученим із світовим ім'ям.



В. М. Струтинський

У перші роки існування відділу теорії ядра активно розроблявся метод оболонкових поправок, запропонований раніше В. М. Струтинським. Було показано, що оболонкова структура спектра ядер є загальною властивістю скінченних фермі-систем. Було встановлено кількісний зв'язок між величиною оболонкових ефектів та симетрією одночастинкового руху в ядерному потенціалі, якісно встановлено закономірності зміни інтенсивності оболонок залежно від числа нуклонів і форми ядра. Таким чином, було виявлено ті фактори, якими обумовлено несферичність ядер та стабільність надважких елементів.

Застосування методу оболонкових поправок у розрахунках мас ядер, що обертаються, привело до відкриття супердеформованих квазістаціонарних станів, що виникають при великих кутових моментах. У подальшому надважкі ядра, супердеформовані квазістаціонарні стани з великими спінами та існування кількох долин поділу було підтверджено експериментально.

Аналізувалися також макроскопічний та квантово-механічний аспекти реакцій з важкими іонами. Уперше дано пояснення властивостей таких реакцій, які не узгоджувались з класичними уявленнями. Розроблено просту теорію ядерних реакцій між важкими іонами, що враховує макроскопічний та хвильовий аспекти та є зручною для аналізу експериментальних даних по квазіпружних та глибоко непружних реакціях з важкими іонами.

З 1991 по 2018 р. відділ теорії ядра очолював чл.-кор. НАН України, проф. Володимир Михайлович Коломієць. З 2018 р. відділ очолює д.ф.-м.н. Федір Олексійович Іванюк.

За цей час у відділі запропоновано і в багатьох публікаціях детально розроблена принципово нова модель ядра як краплі фермі-рідини. Ця модель є суттєвим узагальненням і уточненням класичної крапельної моделі ядра. Модель враховує вплив фермієвського руху нуклонів на формування основного стану ядер та на транспортні характеристики ядер. Уперше показано, що на колективний рух в ядрах та на деякі транспортні харак-



В. М. Коломієць

теристики, такі як коефіцієнти жорсткості та тертя, суттєво впливає динамічне збурення поверхні Фермі. Ці роботи мають принципове значення для вивчення природи таких важливих для фізики ядра колективних збуджень, як мультипольні гігантські резонанси, та дослідження меж стабільності ядер і розвитку в них нестійкостей.

Були виконані фундаментальні дослідження макроскопічних характеристик ізоскалярних та ізовекторних гігантських мультипольних резонансів, зокрема їхніх центрів енергії та ширин. Роботи цього циклу добре відомі світовій науковій спільноті і широко цитуються.

Основні напрямки досліджень:

дослідження оболонкової структури ядер і впливу квантових ефектів на масу ядер, енергію деформації ядер та бар'єри ядерного поділу, а також проміжні стани в реакціях поділу при великих деформаціях ядер;

дослідження макроскопічного колективного руху та рівняння стану в ядрах при скінченних температурах з метою виявлення нових властивостей ядерної речовини;

розрахунок транспортних характеристик ядерного колективного руху, таких як коефіцієнти жорсткості, інерції, моментів інерції, тертя, та опис за допомогою їх колективних коливань та обертань і вимушеного поділу ядер;

вивчення динаміки фазових переходів і розвитку об'ємної нестабільності збуджених ядер з можливим застосуванням теорії до розрахунків мультифрагментації ядер при зіткненні важких іонів;

дослідження впливу ефектів пам'яті та процесів релаксації на колективні збудження в ядрах, ядерний поділ і колективний рух з великою амплітудою;

розрахунок фундаментальних ядерних характеристик, таких як поверхнева енергія, енергія ізотопічної симетрії, модуль стиснення, просторовий розподіл нуклонів та статистична густина збуджених станів, в ядрах, віддалених від долини стабільності, та їхній вплив на колективні збудження ядер з великим надлишком нейтронів.



Відділ теорії ядра, 1977 р. Зліва направо стоять: О. Г. Магнер, С. М. Видруг-Власенко, В. П. Заварзін, В. М. Коломієць, Ф. О. Іванюк, К. О. Теренецький, В. І. Абросімов, О. Л. Шолох, С. М. Федоткін, С. Ю. Кун. Зліва направо сидять: С. Р. Офенгенден, В. П. Альошин, К. Дітріх (ТУ, Мюнхен), В. М. Струтинський, Н. П. Семенова, Б. Д. Константинов

Основні наукові досягнення.

Запропоновано й детально розвинуто принципово новий метод розрахунку оболонкових поправок до енергій основних станів та енергії деформації важких ядер. Метод широко використовується у багатьох провідних наукових центрах світу для кількісного опису процесу

ядерного поділу та передбачення формування надважких елементів в ядерних реакціях з важкими іонами.

Розроблено термодинамічний метод обрахунку оболонкових поправок до вільної енергії та енергії деформації важких ядер. Метод дає змогу вивчати залежність ядерних характеристик від температури ядра, що має значний практичний інтерес при вивченні колективного руху в ядрах при скінчених температурах та для вирішення багатьох проблем, пов'язаних із вимушеним поділом ядер. Суттєвим є встановлене в цьому методі існування порога зникнення оболонкових ефектів при значних внутрішніх енергіях збудження ядра (В. М. Коломієць).

Розроблено теорію ефектів в'язкості в ядерній фермі-рідині з урахуванням ефектів запізнення в інтегралі зіткнень та скінченності ядерної температури. Уперше передбачено можливість переходу від режиму нульового звуку в холодних ядрах до режиму першого звуку при високих ядерних температурах, що є предметом багатьох теоретичних і експериментальних досліджень у різних наукових групах (В. М. Коломієць, д.ф.-м.н. О. Г. Магнер, д.ф.-м.н. В. А. Плюйко, к.ф.-м.н. С. В. Лук'янов).



О. Г. Магнер



В. А. Плюйко

Уперше введено в ядерну фізику поняття ефектів пам'яті при колективному русі ядер. Це явище було детально досліджено в багатьох публікаціях відділу, де було показано, що ефекти пам'яті суттєво впливають на динаміку ядер. Теорію застосовано до опису ширини гігантських мультипольних резонансів і динаміки спуску ядра з

бар'єра поділу до точки розриву. Результати цих досліджень мають чисельні підтвердження в експериментах по збудженню гігантських мультипольних резонансів у важких ядрах (В. М. Коломієць).

Отримано рівняння стану ядерної речовини в екстремальних умовах надвеликих температур і густин нуклонів, далеких від насичення. Уперше побудована та досліджена поверхня рівноваги ядерної речовини у тривимірному просторі «тиск - температура - параметр» ізотопічної асиметрії та сформульовані умови фазових перетворень та стабільності важких ядер з ростом температури ядер. Уперше дано пояснення причини виникнення області плато в калориметричній кривій (залежності енергії збудження ядра від температури ядра). Така особливість калориметричної кривої ядер експериментально виявлена в реакціях зіткнення важких іонів у багатьох лабораторіях світу (В. М. Коломієць, к.ф.-м.н. А. І. Санжур).

Розроблено нову теорію кипіння ядерної речовини, ключовим елементом якої є динаміка розвитку бульбашкової нестійкості. Уперше показано, що розвиток бульбашкової нестійкості в ядерній речовині фермі-рідині суттєво гальмується завдяки ефектам пам'яті та супроводжується характерним гамма-випромінюванням. Останнє може бути використано для вимірювання температури фазових переходів в ядрах при високих температурах (В. М. Коломієць, А. І. Санжур).

Уперше передбачено явище нейтронної дистиляції (збагачення нейтронами) насиченої нуклонної пари при фазових переходах першого роду в ядрах. Це явище знайшло експериментальне підтвердження в реакціях по мультифрагментації ядер при зіткненні важких іонів високих енергій. Уперше встановлено існування суттєвих оболонкових ефектів в енергії симетрії та у просторовому розподілі нуклонів в ядрах, віддалених від лінії бета-стабільності (В. М. Коломієць).

Розроблено новий варіаційний метод розрахунку енергії деформації важких ядер. Метод враховує дифузність ядерної поверхні, що дає змогу обчислювати рівняння стану ядер залежно від густини нуклонів та нуклон-нуклонної взаємодії. Установлено суттєву залежність бар'єрів ядерного поділу та умов формування поверхні розриву при ядерному поділі від дифузності ядерної поверхні. Показано, що врахування дифузності ядерної поверхні, яке відсутнє в крапельній моделі ядра, значно збільшує енергію бар'єра поділу, змінює характеристики ядерної поверхні в точці розриву та впливає на кінетичну енергію уламків поділу (В. М. Коломієць, А. І. Санжур).

Обґрунтовано й детально розвинуто теорію розчеплення ізовекторних гігантських резонансів у важких ядрах, близьких до сферичних. Запропоновано новий механізм розчеплення цих резонансів, обумовлений різницею потенціалів взаємодії асиметричних протонних та нейтронних підсистем. Показано, що зазначений ефект розчеплення лінійно залежить від параметра асиметрії та ізовекторних констант взаємодії, таких як параметр Ландау в об'ємі ядра та константа поверхневого натягу (В. М. Коломієць, О. Г. Магнер).

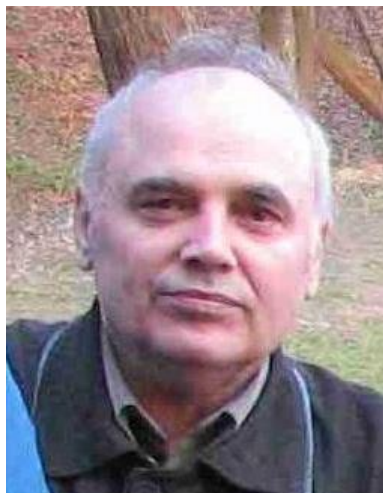
Розвинуто теоретичну модель, що дає змогу на мікроскопічному рівні проводити розрахунки кінетичних коефіцієнтів, що визначають динаміку процесів з великою перебудовою стану атомних ядер. Уперше вдалось врахувати вплив на кінетичні коефіцієнти таких тонких структурних ефектів, як залежність кореляційної ширини одночастинкових рівнів від спарювальної взаємодії, обертання об'єднаної ядерної системи, відновлення калібрувальної та обертової симетрій, порушених спарювальною та коріолісовою взаємодією (Ф. О. Іванюк).



Ф. О. Іванюк

На базі розв'язку рівнянь Ланджевена для змінних форми налітаючих іонів та ядра-мішені розраховано перерізи злиття та ймовірність утворення надважкого елемента з $Z = 122$. Показано, що ядро з $Z = 122$ з найбільшою ймовірністю утворюється в реакції $^{58}\text{Fe} + ^{248}\text{Cm} \rightarrow ^{306-x}122 + x\text{n}$ при енергії $E_{\text{см}} = 299 \text{ MeV}$ (Ф. О. Іванюк).

Розроблено метод визначення оптимальних форм ядер, що обертаються, для довільних значень параметра подільності та кутової швидкості. Установлено існування різкого переходу від сплюснутих до витягнутих еліпсоїдальних форм з ростом кутового моменту ядра. Обчислено граничні кутові моменти, при яких атомне ядро втрачає стабільність по відношенню до поділу. Показано, що аксіальна асиметрія ядер має значний вплив на величину моменту інерції та спектри ротаційних станів ядер, зокрема визначає межу обриву ротаційних станів ядер. У рамках запропонованого методу оптимальних форм



В. П. Альошин
(1944 - 2009)



В. І. Абросімов

ядер описано такі деталі експериментальних даних, як положення максимумів у масовому розподілі уламків поділу, величина та залежність кінетичної енергії уламків поділу від їхньої маси, величина повної енергії збудження уламків поділу (Ф. О. Іванюк).

Розроблено напівкласичну теорію випромінювання нуклонів деформованими ядрами та виведено замкнуті вирази для ймовірності вильоту частинок з ядра довільної форми залежно від енергії збудження та спіну ядра. Досліджено вплив деформації ядра на кутові розподіли частинок при повільному та швидкому обертанні (д.ф.-м.н. В. П. Альошин).

Розроблено кінетичну теорію колективних збуджень у скінченній фермі-рідині, що дає можливість вивчення дисипативних та нерівноважних процесів при колективному русі в ядрах. Установлено важливу роль динамічної деформації фермі-поверхні у формуванні вихрового руху нуклонів при колективних збудженнях ядер (д.ф.-м.н. В. І. Абросімов).

Знайдено рішення залежних від часу рівнянь Хартрі - Фока - Боголюбова в напівкласичному наближенні, в якому враховуються само-

узгоджені коливання парного поля. Установлено, що дисперсійне рівняння для парних колективних збуджень у надплинних ядрах має рішення при частоті подвоєної енергетичної щільності (В. І. Абросімов).

Виявлено вплив спарювання на транспортні характеристики повільного колективного ядерного руху. Знайдено, що масовий параметр для парних вібрацій визначається величиною середньоквадратичної

флуктуації одночасткових енергій відносно середнього значення з ваговою функцією, яка має максимум поблизу енергії Фермі. Установлено, що основний внесок у коефіцієнт жорсткості дає член, пропорційний квадрату енергетичної щільності (В. І. Абросімов).

Знайдено, що коефіцієнти тертя суттєво залежать від енергії Фермі та значно відрізняються від передбачуваних класичною стінковою формулою при невеликих мультипольностях деформації поверхні ядра. Показано, що оболонкові компоненти до моментів інерції та до вільної енергії приблизно пропорційні та експоненційно зменшуються із зростанням температури (О. Г. Магнер).

Обчислено масові параметри, коефіцієнти жорсткості та тертя при колективному русі нуклонів у квазікласичному наближенні за межами квантової теорії збурень. Отримано добре узгодження середніх енергій та ймовірності переходів для низьколежачих колективних станів з експериментальними даними (О. Г. Магнер, д.ф.-м.н. С. М. Федоткін).

Розвинуто квазікласичну теорію періодичних орбіт з урахуванням симетрій гамільтоніану в наближенні середнього поля ядра. Запропоновано новий покращений метод стаціонарної фази, який враховує зміну симетрії як числа інтегралів руху нуклонів з деформацією ядра. Показано та аналітично обґрунтовано в рамках цього методу існування сильно деформованих магічних ядер – проміжних станів у процесах ядерного поділу – унаслідок підсилення оболонкової структури по параметру квазікласичності при локальному зростанні симетрії гамільтоніану. Деформації подовження ядер у цих станах добре узгоджуються з результатами чисельних розрахунків двогорбого бар'єра поділу ядер за методом оболонкової поправки та з експериментальними даними (О. Г. Магнер, С. М. Федоткін).



С. М. Федоткін

Показано, що існує новий механізм дезбудження ядра, пов'язаний з народженням позитронів в ядерних переходах довільної мультипольності та розраховано ймовірність цих процесів. Розраховано ймо-

вірності іонізації атома при анігіляції позитрона з К-електроном дочірнього атома при β^+ -розпаді та наступним вибиванням другого електрона з верхніх оболонок. Найбільш імовірний процес пов'язаний з вибиванням другого електрона з К-оболонки (С. М. Федоткін).

У рамках статистичної моделі Томаса - Фермі запропоновано метод розрахунку поперечних перерізів фотоефекту та одноквантової анігіляції, усереднених по всіх електронах атома. У рамках цієї ж моделі розроблено метод розрахунку енергій рівнів для багатоелектронних нейтральних атомів з урахуванням міжелектронної взаємодії. Із застосуванням теорії збурень отримано аналітичні вирази та обчислено енергії електронів у доброму узгодженні з експериментальними даними для станів К, L та М-оболонки у широкому інтервалі зарядів ядер (С. М. Федоткін).

Запропоновано та проаналізовано новий варіант напівфеноменологічної моделі модифікованого лоренціану (MLO4) для обчислення дипольних радіаційних функцій. У підході враховано залежність параметра ширини форми гамма-спектра від параметра динамічної деформації атомних ядер. Розроблено нову спрощену статистичну модель обчислення розподілу кутових моментів первинних фрагментів фотоподілу важ-



К. О. Теренецький
(1943 - 2011)

ких атомних ядер та середніх значень кутових моментів за відомих ізомерних відношень у первинних фрагментах (В. А. Плюйко).

Основні напрямки роботи д.ф.-м.н. К. О. Теренецького були пов'язані з теоретичними дослідженнями прямих ядерних реакцій між складними частинками, а також з однією з найактуальніших проблем сучасної ядерної фізики – вивчення характеристик ядер, віддалених від лінії стабільності за допомогою ядерних реакцій, що дозволило запропонувати ідею

та здійснити перший у світі експеримент щодо з'ясування деталей структури нейтроннонадлишкових ядер. Експеримент, який було спільно виконано науковцями України та Бельгії, підтвердив можливість

застосування запропонованого підходу для відповідних фізичних досліджень. К. О. Теренецьким також було розроблено та реалізовано низку нетрадиційних теоретичних методів визначення перерізів прямих та непрямих реакцій розсіяння важких іонів ядрами з аналізу експериментальних даних щодо їхнього пружного розсіяння.

Перспективи подальших досліджень.

У даний час робота відділу направлена на виявлення нових властивостей важких радіоактивних ядер, пов'язаних із впливом нейтронного надлишку та з їхньою віддаленістю від лінії бета-стабільності. Плануються дослідження реакцій поділу таких ядер, ядерного рівняння стану, енергії ізотопічної симетрії, поверхневої енергії та встановлення меж спінодальної і поверхневої стабільності ядер. У практичній роботі планується використання сучасних напівкласичних та макроскопічних підходів до ядерної проблеми багатьох частинок, що базуються на загальних властивостях двокомпонентної ядерної ферміїдини та на методі оболонкової поправки. Будуть досліджені нові аспекти структури важких радіоактивних ядер: структура нейтронного надлишку в поверхневій області ядра; вплив поляризаційних ефектів, обумовлених нейтронним надлишком, на густину нуклонів; формування поверхневої енергії ізотопічної симетрії та гігантського нейтронного гало в ядрах, віддалених від лінії бета-стабільності; вплив нейтронного надлишку на поверхневу та спінодальну нестійкість радіоактивних ядер.

Державні та академічні премії.

Передбачене В. М. Струтинським явище існування оболонкової структури в сильно деформованих ядрах та утворення метастабільного проміжного стану в процесі поділу зареєстровано як відкриття СРСР «Двогорбий бар'єр ядерного поділу», патент № 200 (СРСР), 1977.

За дослідження в області теорії оболонкової структури, поділу ядер та стабільності важких і надважких ядер В. М. Струтинському в 1977 р. присуджена премія з ядерної фізики ім. Т. Боннера Американського фізичного товариства.

За поданням Інституту Нільса Бора (Данія) у зв'язку з 500-річним ювілеєм Копенгагенського університету в 1979 р. В. М. Струтинському присвоєно звання почесного доктора наук Копенгагенського університету.

У 2011 р. В. М. Коломійцю присуджена премія імені О. С. Давида НАН України за цикл наукових праць «Структура та колективні збудження в атомних ядрах».

В. М. Коломієць та інші співробітники відділу отримували міжнародні гранти Фонду Сороса (США), Європейського фонду INTAS, Фонду Німецького дослідницького товариства (DFG).

Міжнародна співпраця.

Відділ проводить успішну наукову співпрацю з провідними науковими центрами: Інститутом Нільса Бора (Копенгаген, Данія), Південною національною лабораторією ядерної фізики (Катанія, Італія), Національним інститутом ядерної фізики (Флоренція, Італія), Інститутом Макса Планка (Гейдельберг, Німеччина), Мюнхенським технічним університетом (Гархінг, Німеччина), Товариством дослідження важких іонів (Дармштадт, Німеччина), Регенсбургським університетом (Регенсбург, Німеччина), Циклотронним інститутом Техаського університету (Коледж-Стейшен, США), Лундським університетом (Лунд, Швеція), Об'єднаним інститутом ядерних досліджень (Дубна, Росія), Центром ядерних досліджень (Бордо, Франція), Страсбургським університетом (Страсбург, Франція). Національним центром ядерних досліджень (Варшава, Польща), Університетом ім. Марії Кюрі-Скłodовської (Люблін, Польща), Токійським технологічним інститутом (Токіо, Японія), Центром ядерних досліджень (Осака, Японія), Кіото університетом (Кіото, Японія), Нагояським технологічним інститутом (Нагоя, Японія).

У відділі опубліковано 2 монографії – В. М. Коломиец. *Приближение локальной плотности в атомной и ядерной физике* (К.: Наук. думка, 1990, 164 с.); В.М. Коломиец. *Ядерная ферми-жидкость* (К.: Наук. думка, 2009, 415 с.) та 8 монографічних оглядових статей, написаних на замовлення редакцій провідних міжнародних наукових журналів “Physics Reports”, “Report on Progress in Physics”, «Физика элементарных частиц и атомного ядра» тощо.

Список найбільш важливих публікацій відділу.

1. V.M. Kolomietz, B.D. Konstantinov, V.M. Strutinsky, V.I. Chvorostyanov. To the theory of nuclear shell structure. Phys. of Elementary Part. and Atomic Nuclei (ЭЧАЯ) 3 (1972) 392.

2. G.G. Bunatyan, V.M. Kolomietz, V.M. Strutinsky. Foundation to the shell correction method. Nucl. Phys. A 188 (1972) 225.
3. V.M. Strutinsky, A.G. Magner, S.R. Ofengenden, T. Dossing. Semi-classical interpretation of the gross-shell structure in deformed nuclei. Z. Phys. A 283 (1977) 269.
4. V.M. Strutinsky, V.M. Kolomietz. Macroscopic Rotation of Cold Nuclei. Z. Phys. A 289 (1978) 77.
5. V.M. Kolomietz, P. Siemens. Self-consistent field approximation to the linear response for nuclear dissipation. Nucl. Phys. A 314 (1979) 141.
6. V.M. Strutinsky, V.I. Abrosimov, F.A. Ivanyuk. Towards CRAMOLA, the Cranking Model for Large Amplitudes. Z. Phys. A 306 (1982) 273.
7. V.M. Strutinsky, A.G. Magner, V.Yu. Denisov. Density Distributions in Nuclei. Z. Phys. A 322 (1985) 149.
8. V.M. Kolomietz, A.G. Magner, V.A. Plujko. Retardation effects in damping of nuclear collective excitations. Z. Phys. A 145 (1993) 131.
9. S.N. Fedotkin. Internal positronium production from nuclear transitions. Journ. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 20(4) (1994) 607.
10. F.A. Ivanyuk, H. Hofmann, V.V. Pashkevich, S. Yamaji. Transport coefficients for shape degrees in terms of Cassini ovaloids. Phys. Rev. C 55 (1997) 1730.
11. V.M. Kolomietz, S. Shlomo. Nuclear Fermi liquid drop model. Phys. Rep. 390 (2004) 133.
12. V.I. Abrosimov, A. Dellafiore, F. Matera. Collective motion in finite Fermi systems within Vlasov dynamics. Phys. Part. Nucl. 36(7) (2005) 1234.
13. F.A. Ivanyuk, K. Pomorski. Optimal shapes and fission barriers of nuclei within the liquid drop model. Phys. Rev. C 79 (2009) 054327.
14. V.M. Kolomietz, A.I. Sanzhur, S. Shlomo. Self-consistent mean-field approach to the statistical level density in spherical nuclei. Phys. Rev. C 97(6) (2018) 064302.
15. F.A. Ivanyuk, C. Ishizuka, M.D. Usang, S. Chiba. The temperature dependence of the shell corrections. Phys. Rev. C 97(6) (2018) 054331.

ВІДДІЛ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ

Відділ ядерних реакцій створено у 1965 р. як підрозділ Інституту фізики АН УРСР. У 1970 р. відділ увійшов до складу ІЯД АН УРСР. Фундатор відділу – акад. НАН України, проф. Олег Федорович Німець.



О. Ф. Німець

Очолювана ним лабораторія ядерних реакцій переросла в 1960-ті роки в однойменний відділ. Усе життя та наукова діяльність О. Ф. Німця тісно пов'язана з відділом ядерних реакцій, який він очолював з 1965 по 2000 р. З 2000 р. і до останніх днів життя О. Ф. Німець працював на посаді провідного наукового співробітника цього відділу. З 1974 р. протягом 10 років Олег Федорович, обіймаючи посаду директора ІЯД, не покидав керівництва відділом.

Велике значення має установлення ним у багаточастинкових реакціях вплив супутніх частинок на параметри двочастинкових резонансів, дослідження поділу атомних ядер, утворених у реакціях із зарядженими частинками, дослідження структури легких ядер та механізмів ядерних процесів при взаємодії важких іонів з легкими ядрами, результати вимірювань на пучках прискорювачів повних перерізів реакцій. Олегом Федоровичем започатковано дослідження магнітних моментів збуджених станів ядер на пучках прискорювачів, що дало можливість підтвердити аномалію орбітального магнетизму нуклонів. О. Ф. Німець був визнаним лідером таких досліджень у Радянському Союзі.

Під керівництвом О. Ф. Німця на основі відділу були створені відділи, які очолили його вихованці:

відділ поляризаційних процесів – д.ф.-м.н. Микола Іванович Заїка;

відділ прикладної ядерної фізики – д.ф.-м.н. Володимир Васильович Токаревський;

відділ фізики важких іонів – д.ф.-м.н. Адам Тихонович Рудчик;

відділ атомно-ядерних процесів – д.ф.-м.н. Олександр Іванович Левон;

відділ теорії ядерних реакцій – д.ф.-м.н. Костянтин Олегович Теренєцький;

відділ фізики високих енергій – д.ф.-м.н. Валерій Михайлович Пугач.



Відділ ядерних реакцій на початку 80-х років минулого століття.



Ю. М. Павленко
(1955 - 2015)



О. М. Поворозник

З 2000 по 2015 рр. відділ очолював д.ф.-м.н. Юрій Миколайович Павленко.

У 2016 р. після зміни структури ІЯД до відділу ядерних реакцій було включено відділ ядерної електроніки як лабораторію ядерної електроніки та інформаційних технологій і відділи прискорювачів – циклотрон У-120, електростатичний перезарядний прискорювач ЕГП-10К (тандем-генератор), ізохронний циклотрон У-240. Керівництво реорганізованим відділом було покладено на д.ф.-м.н. Ореста Михайловича Поворозника.

На даний час у відділі працює 4 доктори та 5 кандидатів фізикоматематичних наук.

Основні напрямки досліджень:

експериментальні дослідження ядерних реакцій на пучках легких заряджених частинок, важких іонів та вторинних радіоактивних ядер при низьких та середніх енергіях;

визначення механізмів перебігу бінарних та багаточастинкових реакцій за участю малонуклонних ядер;

дослідження структури слабкозв'язаних ядер та ядер з нейтронним надлишком, властивостей розпаду незв'язаних станів легких ядер у багаточастинкових реакціях;

дослідження розподілу густини ядерної матерії в реакціях розщеплення легких ядер. Визначення ізотопічних залежностей повних перерізів реакцій.

Основні наукові досягнення.

Уперше в кінематично повних експериментах детально досліджено процес розщеплення дейтронів у полі ядер різної маси. Установлено, що диференціальні перерізи розщеплення немонотонно змінюють-

ся зі зміною масового числа ядер і максимальні для магічних ядер. Це явище знайшло підтвердження в експериментах, виконаних у зарубіжних лабораторіях, і у світовій науковій літературі отримало назву «ефект Німця» (М. В. Соколов, Б. Г. Стружко).

Виконано цикл експериментів з вимірювання повних перерізів реакцій та перерізів розвалу дейтронів та ядер ${}^3\text{He}$ при взаємодії їх з ізотопами різних елементів. Визначено зв'язок надлишку нейтронів в ізотопах з дифузністю їхньої поверхні (В. В. Токаревський, Л. І. Слюсаренко).

Значний обсяг досліджень було спрямовано на вивчення поляризаційних явищ. Було розроблено ряд методик досліджень поляризаційних процесів, наприклад, унікальну мішень поляризованих ядер ${}^3\text{He}$. Проведено ряд досліджень поляризації пружнорозсіяних дейтронів і (d, p)-реакцій та виявлено можливість розділення векторної та тензорної компонент поляризації (М. І. Заїка, Ю. В. Кібкало, А. В. Мохнач, В. В. Осташко, П. Л. Шмарін, О. М. Ясногородський).

У кореляційних експериментах досліджено три- та чотиричастинкові канали реакцій $d + {}^2\text{H}$, $d + {}^3\text{H}$, $\alpha + {}^3\text{H}$. Визначено ймовірності різних механізмів їхнього перебігу. Установлено, що домінуючими є квазібінарні процеси, зокрема подвійний спін-фліп та квазівільне розсіювання нуклонів для реакцій $d + {}^2\text{H}$, а також послідовний розпад через резонанси для реакцій $d + {}^3\text{H}$, $\alpha + {}^3\text{H}$. За допомогою розробленої методики ідентифікації нейтронів за часом прольоту проведено вимірювання довжини нейтрон-нейтронного розсіяння (Б. Г. Стружко, І. П. Дряпаченко, О. К. Горпинич, В. І. Конфедератенко, О. М. Поворозник).

Досліджено закономірності процесів розпаду незв'язаних станів ядер легких ядер за умов утворення їх у різних багаточастинкових реакціях. В експериментах з повним визначенням кінематики цих реакцій виявлено вплив кулонівського поля супутніх частинок на розпад короткоживучих станів ядер ${}^5\text{He}$, ${}^5\text{Li}$, ${}^7\text{Li}^*$, ${}^8\text{Be}^*$ (В. М. Пугач, Ю. М. Павленко, Ю. В. Васильєв).

Проведені дослідження магнітних моментів збуджених станів ядер методом збуреного в часі кутового розподілу гамма-квантів з реакцій на імпульсному пучку прискорювача дозволили виявити ефект аномалії орбітального магнетизму нуклонів в ядрі порівняно з вільними нуклонами, а також ефект насичення парамагнетизму при пониженні температури та розвинути послідовну теорію магнітних моментів на основі квазічастинково-фононої моделі та виконати розрахунки на її основі (О. І. Левон, О. В. Севастюк, Д. А. Волков).

У відділі також проводилися науково-прикладні роботи, зокрема, методом ядерних реакцій досліджувався вміст вуглецю та азоту в зерні злаків з метою визначення концентрації білка для селекції високобілкових сортів з найбільшим його вмістом (О. Е. Меленевський, В. О. Тихий).

У рамках міжнародної колаборації HERA-B за участю співробітників відділу створено першу у світі багатомішенну адронну фабрику на накопичувальному кільці HERA. Виміряно поперечні перерізи процесів утворення «чарівних» та «дивних» мезонів при взаємодії протонів з енергією 920 Гев та ядер С, Ті, W (В. М. Пугач, Ю. М. Павленко).

Список найбільш важливих публікацій відділу.

1. О.Ф. Немец, Ю.В. Гофман. *Справочник по ядерной физике* (К.: Наук. думка, 1975) 415 с.
2. О.Ф. Немец, А.М. Ясногородский. *Поляризационные исследования в ядерной физике* (К.: Наук. думка, 1980) 352 с.
3. А.И. Левон, О.Ф. Немец. *Электромагнитные моменты возбужденных и радиоактивных ядер* (К.: Наук. думка, 1989) 504 с.
4. I.P. Dryapachenko, V.I. Grantsev, V.A. Kornilov, O.F. Nemets, V.M. Pugatch, B.A. Rudenko, B.G. Struzhko, O.M. Bilaniuk. An approach to neutron-neutron quasifree scattering using a cyclotron. *Nuclear Instruments and Methods* 141(1) (1977) 153.
5. O.F. Nemets, V.M. Pugach, M.V. Sokolov, B.G. Struzhko. Study of Mechanisms for 13.6 MeV Deuteron Disintegration by Nuclei. *Ukr. J. Phys.* 16 (1971) 403.
6. V.M. Lebedev, V.G. Neudatchin, B.G. Struzhko. Reactions Involving the Flip of the Deuteron Spin and Isospin and Supermultiplet Potential Model for the Interaction of Extremely Light Clusters. *Phys. Atomic Nuclei* 65 (2002) 462.
7. И.П. Дряпаченко, В.В. Затекин, В.В. Комаров, А.М. Попова. Об уточнении параметров нейтрон-нейтронного взаимодействия. *Изв. Акад. наук СССР (серия физическая)* 50(5) (1986) 993.
8. Yu.N. Pavlenko, V.N. Dobrikov, N.L. Doroshko, O.K. Gorpnich, T.A. Korzina, V.O. Kyva, V.L. Shablov, I.A. Tyras. Decay properties of short lived resonances of light nuclei in many-particle nuclear reactions. *Int. J. Mod. Phys. E* 19 (2010) 1220.
9. A.S. Demyanova, ..., L.I. Slusarenko, Yu.N. Pavlenko. Neutron halo in the exotic first excited state of ^9Be . *JETP Lett.* 102 (2015) 413.
10. O.O. Beliuskina, V.I. Grantsev, K.K. Kisurin, S.E. Omelchuk, Yu.S. Roznyuk, B.A. Rudenko, V.S. Semenov, L.I. Slusarenko, B.G. Struzhko, V.K. Tartakovsky. Breakup of deuterons on tritons. *Phys. Atomic Nuclei* 75(12) (2012) 1454.

11. O.M. Povoroznyk, O.K. Gorpinich, O.O. Jachmenjov, H.V. Mokhnach, O.A. Ponkratenko, G. Mandaglio, F. Curciarello, V.De Leo, G. Fazio, G. Giardina. Experimental evidence of the ${}^6\text{He}$ level at $E^* = 18.3$ MeV via the ${}^4\text{He} + {}^3\text{H}$ three-body reaction. Phys. Rev. C 85 (2012) 064330.
12. A.G. Sitenko, A.D. Polozov, M.V. Evlanov, A.M. Sokolov. Inclusive particle spectra from light-ion fragmentation processes. Nuclear Physics A 442(1) (1985) 122.
13. J.P. Fernandez Garcia, M. Zadro, A. Di Pietro, P. Figuera, M. Fisi-chella, O. Goryunov, M. Lattuada, C. Marchetta, A.M. Moro, A. Musumarra, V. Ostashko, M.G. Pellegriti, V. Scuderi, E. Strano, D. Torresi. Effects of coupling to breakup in the ${}^{6,7}\text{Li} + {}^{64}\text{Zn}$ systems at near-barrier energies. Phys. Rev. C 92 (2015) 054602.
14. A.I. Levon, D. Bucurescu, C. Costache, T. Faestermann, R. Hertenberger, A. Ionescu, R. Lica, A.G. Magner, C. Mihai, R. Mihai, C.R. Nita, S. Pascu, K.P. Shevchenko, A.A. Shevchuk, A. Turturica, H.-F. Wirth. New data on 0^+ states in ${}^{158}\text{Gd}$. Phys. Rev. C 100 (2019) 034307.

Лабораторія ядерної електроніки та інформаційних технологій

Історія лабораторії розпочинається з невеликого наукового колективу у складі Інституту фізики АН УРСР, який у 1947 - 1951 рр. очолював акад. АН СРСР Олександр Олександрович Харкевич. З 1952 р. лабораторією ядерної електроніки керував д.т.н., проф. Рафаїл Гецевлевич Офенгенден. У 1965 р. лабораторію перетворено у відділ ядерної електроніки, а в 1970 р. відділ переведено до новоствореного ІЯД АН УРСР. З 1996 р. відділ очолює д.т.н. Анатолій Петрович Войтер.



О. О. Харкевич
(1904 - 1965)



Р. Г. Офенгенден



А. П. Войтер

У 2016 р. відділ реорганізовано в лабораторію ядерної електроніки та інформаційних технологій у складі відділу ядерних реакцій.

Спочатку основні дослідження проводилися в галузі магнітного запису безперервних і дискретних сигналів. Найбільш вагомий результат цих робіт – створення першого тридорожного магнітофону, ряду спеціалізованих запам'ятовуючих пристроїв, а також пам'яті на магнітному барабані для першої в країні обчислювальної машини МЕСМ.



ASSOZIATIVER IMPULSANALYSATOR
MIT EINER MILLION MEKANÄLE



AUSGEZEICHNET MIT
DER GOLDMEDAILLE
DER LEIPZIGER MESSE

ЗОЛОТАЯ МЕДАЛЬ
ЛЕЙПЦИГСКОЙ ЯРМАРКИ

AWARDED THE GOLD
MEDAL OF LEIPZIG FAIR

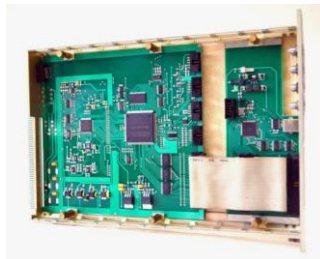
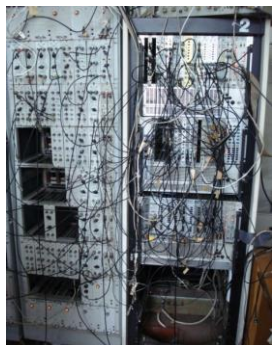
MÉDAILLE D'OR DE LA
FOIRE DE LEIPZIG



Надалі для проведення багатовимірних експериментів на ядерно-фізичних установках інституту було розроблено нові методи побудови спеціалізованих ЕОМ із жорсткою програмою. Ці машини, що отримали назву «аналізатори імпульсів», призначалися для вимірювання в реальному масштабі часу багатовимірних розподілів, тобто реєстрації і сортування інформації по безлічі (до мільйона) каналів. На основі цих методів у відділі було створено ряд аналізаторів електричних імпульсів. Міжнародне визнання у вигляді золотих медалей на міжнародних виставках у Брно і Лейпцигу отримав асоціативний мільйонно-канальний аналізатор АІМА-10⁶.

З 1970 р. у відділі проводились роботи по створенню вимірювально-обчислювальних систем на базі універсальних ЕОМ, у тому числі розроблялися пристрої ядерної електроніки для формування вимірювального тракту і його зв'язку з машиною, а також спеціалізоване

програмне забезпечення для накопичення вимірювальних даних та їх обробки. Цей етап почався з використання промислової ЕОМ БЕСМ-4 та розроблених у відділі модулів у стандарті ВИШНЯ і був завершений у кінці 1980-х років створенням автоматизованих систем багато-параметричного аналізу даних на основі СМ ЕОМ і магістрально-модульних систем блоків ядерної електроніки в стандарті КАМАК.



Сьогоднішній етап у роботі лабораторії пов'язаний зі створенням методів, засобів і комплексів автоматизації ядерно-фізичних досліджень на основі використання персональних комп'ютерів, сучасної елементної бази, комп'ютерних мереж і нових інформаційних технологій.

Основні напрямки досліджень:

дослідження та розробка методів і засобів збору, накопичення та аналізу даних ядерно-фізичних експериментів;

розробка пристроїв ядерної електроніки та створення на їхній основі систем для автоматизації експериментальних досліджень на ядерно-фізичних установках інституту;

розробка спеціалізованого програмного забезпечення для автоматизованих систем ядерно-фізичних експериментів;

розробка програмного забезпечення для обробки даних та теоретичних розрахунків в ядерній фізиці;

дослідження, розробка та аналіз методів і засобів підвищення ефективності роботи комп'ютерних мереж;

науково-технічне забезпечення експериментальних та прикладних робіт на ядерно-фізичних установках інституту;

розвиток та експлуатація локальної комп'ютерної мережі інституту.



Співробітники лабораторії, 2019 р. Сидять зліва направо: О. М. Соколов, М. І. Доронін, В. Г. Савчук, А. Г. Березовський, О. М. Семенюк. Стоять зліва направо: А. П. Войтер, І. О. Мазний, О. М. Мофа, О. М. Ковальов, О. О. Гаврилов

Основні наукові досягнення.

Розроблено нові пристрої ядерної електроніки на основі сучасної технологічної та елементної бази, у тому числі спектрометричні підсилювачі, спектрометричні АЦП, блоки збігів, блоки кодування часових інтервалів, мультиплексори та ін.

Створено автоматизовані вимірювальні системи нового покоління, зокрема для багатопараметричних кореляційних вимірювань на циклотронах У-240 та У-120, для поляризаційних експериментів, для дослідження орієнтованих залежностей проходження іонів через тонкі монокристали на тандемному прискорювачі ЕГП-10, для нейтронних досліджень на дослідницькому ядерному реакторі ВВР-М та об'єкті «Укриття» для вимірювань нейтронних параметрів підкритичних ядерних матеріалів.

Розроблено програми для розрахунку реакцій з екзотичними та гіперядрами для аналізу томографічних даних для моделей об'єктів «Укриття-1» та «Укриття-2».

Створено локальну комп'ютерну мережу інституту (у тому числі її сегменти на вимірювальних центрах ядерно-фізичних установок) в якості інформаційного середовища для ядерно-фізичних досліджень.

Розвинуто теорію комп'ютерних радіомереж шляхом розробки нових методів і засобів покращення основних параметрів їхнього функціонування та забезпечення адаптації до динаміки системних параметрів при конкурентному доступі до радіоканалу.

Список найбільш важливих публікацій лабораторії.

1. С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. *Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами* (К.: Наук. думка, 2012) 444 с.
2. М.Е. Ильченко, С.Г. Бунин, А.П. Войтер. *Сотовые радиосети с коммутацией пакетов* (К.: Наук. думка, 2003) 266 с.
3. С.Г. Бунин, А.П. Войтер. *Вычислительные сети с пакетной радиосвязью* (К.: Техніка, 1989) 223 с.
4. А.П. Войтер, М.І. Доронін, О.М. Ковальов, І.О. Мазний. Вимірювальна система з гнучкою архітектурою для дослідження ядерних реакцій. *Ядерна фізика та енергетика* 20(2) (2019) 187.
5. А.М. Соколов. Учет аппаратной функции при регистрации опытных данных: особенности выбора параметра регуляризации по критерию I-кривой при деконволюции спектра. *Ядерна фізика та енергетика* 20(1) (2019) 96.
6. А.П. Войтер, М.І. Доронін, О.М. Ковальов, І.О. Мазний. Тестер для спектрометричних АЦП. *Ядерна фізика та енергетика* 19(1) (2018) 74.
7. А.П. Войтер. Эффективность адаптивного управления длиной пакетов в радиосетях передачи данных. *Управляющие системы и машины* 2 (2018) 80.
8. А.П. Войтер. Оптимізація довжини пакетів даних в адаптивних радіомережах. *Наук. вісті Нац. техн. ун-ту України «КПІ»* 5 (2017) 7.
9. А.П. Войтер, М.І. Доронин, А.Н. Ковалев, А.А. Гаврилов. Восьмиканальный спектрометрический АЦП с программируемой логикой. *Ядерна фізика та енергетика* 17(1) (2016) 86.
10. А.П. Войтер. МАС уровень сверхширокополосных импульсных радиосетей. *Управляющие системы и машины* 3 (2014) 87.
11. А.П. Войтер. Комплексний аналіз ефективної швидкості передачі в адаптивних пакетних радіомережах. *Наук. вісті Нац. техн. ун-ту України «КПІ»* 6 (2013) 7.
12. А.П. Войтер. Вплив стратегій управління довжиною пакетів на ефективність МАС рівня пакетних радіомереж. *Наук. вісті Нац. техн. ун-ту України «КПІ»* 6 (2012) 7.
13. А.П. Войтер, О.О. Грицай, М.І. Доронін, В.А. Лібман, І.О. Мазний, О.М. Ковальов. Аналізатор для експериментів на фільтрованих пучках нейтронів. *Ядерна фізика та енергетика* 3(12) (2011) 294.
14. А.П. Войтер, В.І. Слісенко, М.І. Доронін, І.О. Мазний, О.А. Василькевич, В.В. Голік, О.М. Ковальов, В.І. Копачов, В.Г. Савчук. Багатоканальний аналізатор для нейтронного спектрометра за часом прольоту. *Ядерна фізика та енергетика* 1(11) (2010) 90.
15. А.М. Sokolov. S-method for event localization in anger type gamma camera. *Ядерна фізики та енергетика (Nucl. Phys. At. Energy)* 2(11) (2010) 209.

Прискорювачі

Ізохронний циклотрон У-240

19 березня 1976 р. в ІЯД було введено в дію перший в СРСР ізохронний циклотрон У-240, призначений для проведення фундаментальних і прикладних досліджень у галузі ядерної фізики. Роботи по його запуску очолював д.т.н. Олександр Федорович Ліньов. На той час циклотрон У-240 не мав аналогів у Європі. Перші фізичні експерименти було проведено в лютому 1978 р. на прискореному до 50 MeV пучку протонів.

Ізохронний циклотрон У-240 є унікальною ядерно-фізичною установкою, на якій проводяться наукові і прикладні ядерно-фізичні дослідження з використанням прискорених пучків заряджених частинок широкого спектра мас від протонів до важких іонів. Параметри прискорювача дозволяють отримувати пучки протонів з плавним регулюванням їхньої енергії в межах від 8 до 80 MeV, пучки дейтронів з енергією 15 - 70 MeV, а також прискорювати важкі іони до енергії $140 \cdot Z^2/A$ MeV, де Z - зарядність іона, A - атомна маса іона. Відносна енергетична роздільна здатність пучків $\delta E/E = 10^{-2} - 10^{-3}$, а при використанні монохроматора, що сам по собі є унікальною складною установкою, енергетична роздільна здатність досягає 10^{-4} . За сукупністю своїх параметрів – енергія частинок, струм пучка (кількість частинок у пучку), енергетична роздільна здатність, набір іонів, що можуть прискорюватися, – ізохронний циклотрон У-240 і сьогодні залишається унікальною установкою, яка дає можливість проводити ядерно-фізичні експерименти на світовому рівні.



Будівля циклотрона У-240



Ізохронний циклотрон У-240

Ізохронний циклотрон У-240 є прискорювачем циклічного типу. Характерною особливістю цього типу прискорювачів є наявність спеціального просторово-змінного магнітного поля. Таке поле створюється за допомогою основного магніту (цей магніт для У-240 виготовлений за допомогою відомої фірми «Тесла») і стаціонарно встановленими секторними накладками спеціальної форми та активними магнітними елементами, так званими концентричними та гармонічними обмотками (параметри живлення обмоток вибираються індивідуально для кожного режиму роботи прискорювача). Створене магнітне поле має таку залежність від радіуса, що дозволяє утримувати частинку на потрібних орбітах прискорення, хоча маса частинки змінюється в процесі прискорювання через релятивістські ефекти.

Після запуску постійно проводилась модернізація різних вузлів прискорювача з використанням сучасної елементної бази. Також, з розвитком комп'ютерної техніки, вводилися елементи автоматизованого керування роботою прискорювача, відпрацьовувалися нові режими.

Будівля, в якій розміщено прискорювач, має робочу площу 12 000 м² і об'єм 120 000 м³. У головному приміщенні, так званому магнітному залі, розміщується власне прискорювач, загальна маса якого близько 1000 т. Є шість експериментальних боксів, куди може транспортуватися пучок за допомогою активних магнітних елементів по вакуумних іонопроводах. У кожному з цих залів розміщені дві-три



Експериментальна установка для досліджень ядерних реакцій

експериментальні установки для дослідження фундаментальних чи прикладних ядерно-фізичних проблем. Біологічний захист від радіоактивного випромінювання забезпечують стіни з важкого бетону товщиною 4,5 м навколо кожного експериментального боксу та магнітного залу. Дозиметричний контроль на прискорювачі та в експериментальних залах централізований з дублюванням.

На прискорювачі У-240 був виконаний значний обсяг експериментальних робіт з різних напрямків фундаментальної ядерної фізики. У першу чергу це дослідження ядерних реакцій і механізмів проходження їх при середніх та низьких енергіях за участю поляризованих і неполяризованих частинок та дослідження природи утворення й характеристик ядерних станів атомних ядер, у тому числі короткоживучих ядер та ізомерів. Також досліджувалися задачі, пов'язані з проблемами нуклон-нуклонної і ядерної взаємодії, вивчалися процеси поділу атомних ядер та ін. Значна частина дисертаційних робіт виконана на основі експериментального матеріалу, отриманого на ізохронному циклотроні У-240. На циклотроні У-240 проводилися спільні експерименти з науковцями з багатьох інститутів близького зарубіжжя та країн Європи.

За час експлуатації циклотрона виконувалися дослідження по прикладних темах. Серед найважливіших з них: імплантація важких іонів у напівпровідникові матеріали для створення напівпровідників із заданими властивостями; опромінення різних зразків для моделювання радіаційних навантажень, які можуть отримувати космічні об'єкти



Технологічна установка для напрацювання радіонукліда ^{82}Sr на циклотроні У-240

в радіаційних поясах Землі; дослідження радіаційної стійкості надпровідних матеріалів та різноманітних виробів електронної промисловості; дослідження на радіаційну стійкість перспективних матеріалів для будівництва реакторів на швидких нейтронах. Виконано великий обсяг робіт по променевої терапії в протонних та нейтронних полях опромінення на лабораторних тваринах та фантомах, що імітують людину.

На ізохронному циклотроні багато напрацьовано по отриманню стратегічно важливих радіофармпрепаратів на основі гамма-генераторів ^{123}I , ^{201}Tl , ^{82}Sr . Роботи були доведені до промислового виробництва фармпрепаратів та були отримані тимчасові фармакопейні статті. Завершено лабораторне тестування на лабораторних тваринах радіофармпрепарату на основі ^{67}Ga . На жаль, зараз ці роботи зупинено, тому що не вистачає фінансування для експлуатації циклотрона У-240, а в той же час Україна замовляє радіофармпрепарати за кордоном.

Перспективним на сьогодні є проведення експериментальних досліджень густини матерії в ядрах шляхом вивчення процесів розвалу складних частинок ядрами та повних перерізів реакцій при їхній взаємодії, а також експерименти по дослідженню взаємодії в кінцевому стані пари нейтрон-протон у тричастинкових реакціях з метою вивчення ефектів порушення закону збереження за ізотопічним спіном у таких реакціях.

Циклотрон У-120

Навесні 2 квітня 1956 р. в Інституті фізики АН УРСР після кількох років будівництва і монтажу було підписано акт уведення в експлуатацію циклотрона Р-7, одного із серійних радянських прискорювачів, розробленого й виготовленого в НДІЕФА ім. Д. В. Єфремова (Ленінград). Виведений пучок прискорених протонів уперше було отримано 21 липня 1956 р., а з 5 травня 1957 р. розпочалися перші наукові дослідження. Свою другу назву – У-120 – циклотрон отримав тому, що діаметр полюса основного магніту, який визначає розмір кінцевих орбіт прискорених частинок, дорівнює 120 см. У-120 є циклотроном класичного типу і призначений прискорювати пучки протонів, дейтронів та альфа-частинок з енергіями 6,8, 13,6 і 27,2 МеВ та деякі важкі іони (бор, вуглець і азот) до енергій 1 МеВ/нуклон. Максимальний струм виведеного пучка 50 мкА, монохроматичність $\sim 10^{-3}$.

З 1970 р. У-120 перейшов у підпорядкування новоствореного Інституту ядерних досліджень АН УРСР.

Уведення в дію циклотрона У-120 значно розширило можливості проведення фундаментальних і прикладних досліджень у різних галузях ядерної фізики. Експериментальні роботи на циклотроні виконувались на високому науковому рівні й охоплювали широке коло актуальних проблем сучасної фізики.



Циклотрон У-120

На циклотроні було розроблено та впроваджено оригінальні експериментальні методики, зокрема: новий метод ідентифікації та спектрометрії заряджених частинок, який дав змогу проводити вимірювання в широкому діапазоні енергій; кореляційну методику вимірювань диференціальних перерізів тричастинкових реакцій, за допомогою якої вперше у світі в кінематично повних експериментах досліджено процес розщеплення дейтронів; методику вимірювань повних перерізів взаємодії заряджених частинок з ядрами; запропоновано і вперше впроваджено новий метод вимірювання g -факторів збуджених станів ядер на імпульсних пучках прискорювача; методику досліджень поляризаційних процесів та першу в СРСР мішень поляризованих ядер гелію-3; методику ідентифікації нейтронів за часом прольоту, яку застосовано для визначення довжини нейтрон-нейтронного розсіяння, а також ряд методик для досліджень структури збуджених станів атомних ядер.

Завдяки творчій співпраці фізиків з екіпажем циклотрона було виконано великий обсяг наукових досліджень й отримано ряд унікальних результатів, неповний перелік яких наведено нижче.

Перші важливі результати отримано при дослідженні «ізотонічного ефекту» в пружному розсіянні протонів на парно-парних і парно-непарних ядрах.

Один з найяскравіших результатів отримано при дослідженні процесу розщеплення дейтронів ядрами з різним масовим числом. У кінематично повних експериментах було встановлено, що диференціальні перерізи розщеплення дейтронів немонотонно змінюються зі зміною масового числа ядер і максимальні для магічних ядер. Це явище знайшло підтвердження в експериментах, виконаних у зарубіжних лабораторіях, і у світовій науковій літературі отримало назву «ефект Німця».

В експериментах, в яких вимірювалися повні перерізи реакцій, також виявлено ізотопно-ізотонний ефект, що полягає в різній залежності цих перерізів для реакцій на ізотопах та ізотонах від числа нейтронів і протонів в ядрах.

На циклотроні було виконано також комплекс досліджень ядерних процесів, що відбуваються при взаємодії альфа-частинок з легкими та середніми ядрами.

Уперше для пояснення процесів взаємодії складних частинок з ядрами успішно застосовано оптичну модель та метод деформованих хвиль.

У результаті виконаних уперше у світі вимірювань на пучку прискорювача g -факторів збуджених ядерних станів для високоспінових двоквазічастинкових станів було виявлено ефект аномалії орбітального магнетизму нуклонів в ядрі в порівнянні з вільними нуклонами.

В експериментах із повним визначенням кінематики три- та чотиричастинкових реакцій досліджено закономірності процесів утворення та розпаду резонансних станів легких ядер, зокрема виявлено вплив кулонівського поля супутніх частинок на розпад короткоживучих ядерних станів. Отримані експериментальні дані стимулювали розвиток теорії багаточастинкових ядерних реакцій.

Значний обсяг експериментальних робіт виконано з метою детального вивчення поляризаційних явищ. У результаті систематичних досліджень поляризації пружно розсіяних дейтронів та реакцій (d, p) виявлено можливість розділення векторної та тензорної компонент поляризації, уперше вдалося визначити всі спін-тензори, що описують поляризацію при пружному розсіянні дейтронів, встановлено закономірності зміни кутових залежностей векторної аналізуючої здатності при розсіянні дейтронів ядрами з різним масовим числом.

Вагомі результати отримано в ядерно-спектроскопічних дослідженнях, що виконувалися за допомогою пучків заряджених частинок циклотрона. У цих експериментах визначено квантові характеристики енергетичних станів багатьох ядер, виявлено нові ядерні стани, які раніше не спостерігалися.

На циклотроні У-120 значна увага приділялась також вирішенню задач науково-прикладного характеру, впровадженню їх у промисловість, сільське господарство, медицину. Зокрема, виконувалися дослідження радіаційного впливу та модифікації властивостей матеріалів, зумовлених опроміненням; вимірювання кількості вуглецю та азоту в зерні злаків методом ядерних реакцій з метою визначення вмісту білка в зернах злаків для селекції високобілкових сортів з найбільшим його вмістом; медико-біологічні дослідження та нейтронна терапія онкологічних хворих на створеному пучку нейтронів тощо.

За останні роки на прискорювачі модернізовано методику багатопараметричних кореляційних вимірювань перерізів багаточастинкових реакцій та методику вимірювань магнітних моментів ядер. За допомогою цих методик досліджено розподіл гілок розпаду біляпорогового короткоживучого резонансу ядра ${}^7\text{Li}$, що збуджується при непружному розсіянні альфа-частинок; уточнено будову низькоенергетичного спектра збуджень ядер ${}^{5-6}\text{He}$; досліджено структуру та визначено магнітні моменти високоспінових ізомерів ядер ${}^{190,192,194}\text{Pt}$ та ${}^{196,198}\text{Hg}$. Результати досліджень, виконаних упродовж 50 років на циклотроні У-120, стали вагомим внеском у розвиток ядерної фізики в Україні, отримали визнання вітчизняної та міжнародної наукової спільноти. Найвагоміші результати відзначено державними та урядовими преміями й нагородами. На цьому прискорювачі пройшли школу професійного зростання провідні українські фізики-ядерники, серед яких більше 20 докторів та 40 кандидатів наук.

Електростатичний перезарядний прискорювач (тандем) ЕГП-10К

Електростатичний перезарядний прискорювач ЕГП-10К (тандем-генератор), призначений для фундаментальних і прикладних досліджень з ядерної фізики та інших галузей науки і техніки, було введено в експлуатацію 26 грудня 1996 р. після реконструкції діючого з 1965 р. електростатичного прискорювача ЕГ-5. На прискорювачі ЕГП-10К можна отримати пучки протонів, дейтронів та альфа-частинок з енергією в межах 3 - 10 та 3 - 15 МеВ відповідно. Тандем дає можливість прискорювати важкі іони в широкому діапазоні мас. Струм пучка досягає 5 мкА, монохроматичність 10^{-3} .



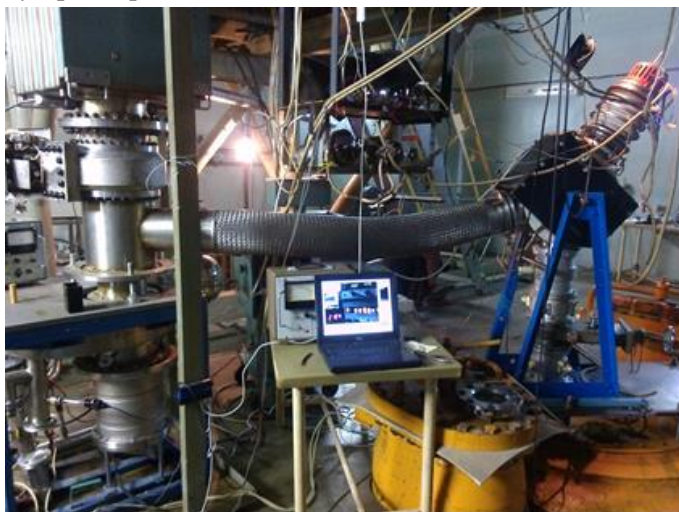
Електростатичний перезарядний
прискорювач ЕГП-10К

фундаментальних досліджень механізмів ядерних реакцій під керівництвом академіка О. Ф. Німця.

Події останніх 20 років ХХ століття не минули й долю електростатичного прискорювача ІЯД. Плани створення надсучасного комплексу ТАЦИТ (тандем-циклотрон) для прискорення важких іонів у двокаскадному електростатичному прискорювачі з подальшим доприскоренням їх у циклотроні У-240 після 1986 р. були «забуті». Але завдяки наполегливості видатного фізика-теоретика В. М. Струтинського наша лінійка електростатичних прискорювачів була продовже-

У 1964 р. фізики-експериментатори отримали у своє користування нову установку такого ж типу – електростатичний генератор ЕГ-5 з енергією пучка прискорених заряджених частинок (протонів, дейтронів і альфа-частинок) до 5 МеВ. Протягом майже 30 років разом з колегами інших відділів ІЯД співробітники відділу ядерних реакцій проводили цілий ряд досліджень ядерної взаємодії продуктів пружного та непружного розсіяння, двочастинкових і багаточастинкових ядерних реакцій. Ці роботи сприяли розвитку і закріпленню результатів досягнень напрямку

на. У 1996 р. в ІЯД запрацював електростатичний двокаскадний генератор ЕГП-10К, який замінив у тому ж приміщенні прискорювач ЕГ-5. Уже в ті роки подібна робота вимагала справжнього ентузіазму, постійного технологічного пошуку, самовіддачі як відповідальних виконавців Ю. І. Тоцького, В. В. Жука, Е. М. Можжухіна, Л. В. Кацубо, так і великої, часто виснажливої, праці всього інженерно-технічного складу екіпажу прискорювача.



Джерело іонів ЕГП-10К

Виведеного пучка нового прискорювача з нетерпінням чекало нове покоління ядерників-експериментаторів, які достойно підхопили естафету досліджень особливостей механізмів ядерних реакцій на пучках прискорювачів. Були розроблені й налагоджені комп'ютеризовані системи накопичення, сортування і обробки багатопараметричної статистичної інформації в кореляційних експериментах на пучку прискорювача для реєстрації в одному експерименті декількох кінцевих продуктів взаємодії частинок налітаючого пучка з ядрами мішені.

В останні роки на електростатичному генераторі проводяться модернізаційні заходи «осучаснення» технологічних режимів, а також зроблено декілька перших кроків для отримання пучка прискорених іонів важких іонів (вуглецю, азоту, кисню та фтору). І це світовий тренд – технологічний пошук впливу на надтонкі поверхневі шари речовини й матеріалів, прискорювачі такого класу (з «малою» енергією пучка) можуть бути імплантаторами «поатомових» матриць.

ВІДДІЛ ФІЗИКИ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

Відділ фізики високих енергій (ВФВЕ) був створений за рішенням ученої ради ІЯД від 18 жовтня 2005 р. Завідувач відділу – чл.-кор. НАН України, проф., д.ф.-м.н. Валерій Михайлович Пугач.

Співробітники відділу (1 доктор наук, 5 кандидатів наук, 2 м.н.с, 5 аспірантів, 8 інженерів) беруть участь в експериментах та теоретичних дослідженнях з фізики високих енергій, створюють та застосовують методики для вимірювань, аналізу та інтерпретації фізичних даних у рамках сучасних теоретичних моделей. Метою робіт є дослідження фундаментальних взаємодій в ато-метровому просторі, з'ясування асиметричних властивостей матерії та антиматерії, пошук сигналів нової фізики, нових кваркових станів та частинок, сигналів кварк-глюонної плазми тощо.



В. М. Пугач

Підґрунтям для створення ВФВЕ став накопичений у відділі ядерних реакцій досвід експериментальних та теоретичних досліджень багаточастинкових ядерних реакцій при низьких та середніх енергіях. Вплив ядерного середовища на спостережувані характеристики проміжних резонансів досліджується і при високих енергіях. В експериментах HERA-B (DESY, Гамбург) та LHCb (ЦЕРН, Женева) одержано унікальні дані про модифікацію процесів генерації «дивних», «чарівних» та «привабливих» мезонів/баріонів в ядерному середовищі.

Практична діяльність з експериментальної фізики високих енергій розпочалась у 1992 р. участю в розробці та тестуванні прототипу В-мезонної фабрики на накопичувальному кільці протонів HERA з енергією 0,92 TeV. З 1995 р. ІЯД – член Міжнародної колаборації HERA-B. З 1997 р. співробітники інституту в складі Міжнародної колаборації LHCb долучились до розбудови експерименту LHCb, націленого на дослідження порушення комбінованої парності в розпадах В-мезонів та пошук рідкісних процесів за межами стандартної моделі (при енергіях протон-протонних зіткнень до 13 TeV). З 2013 р. в LHCb розгорнуто також роботи по дослідженню модифікації поперечних перерізів генерації адронів в ядерному середовищі з метою іденти-

фікації сигналів нового стану речовини – кварк-глюонної плазми. Аналогічний напрямок досліджень розробляє Міжнародна колаборація CBM (GSI/FAIR, Дармштадт), у складі якої ІЯД НАН України з 2008 р. бере участь у розробці кремнієвої трекової системи для експерименту CBM (Compressed Baryonic Matter).



Ю. М. Малюта
(1932 - 2011)



В. Є. Аушев

Найбільший доробок становлять результати, отримані в рамках діяльності Міжнародної колаборації LHCb у ході підготовки та виконання експерименту LHCb. ІЯД є одним із засновників Міжнародної колаборації LHCb, функціонуючої вже майже 25 років з головною метою: дослідження явища порушення комбінованої СР інваріантності як одного з можливих чинників асиметричної розбудови Всесвіту у вигляді матерії при повній відсутності антиматерії (<http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public>). Україна отримала статус асоційованого члена ЦЕРН з 2016 р.

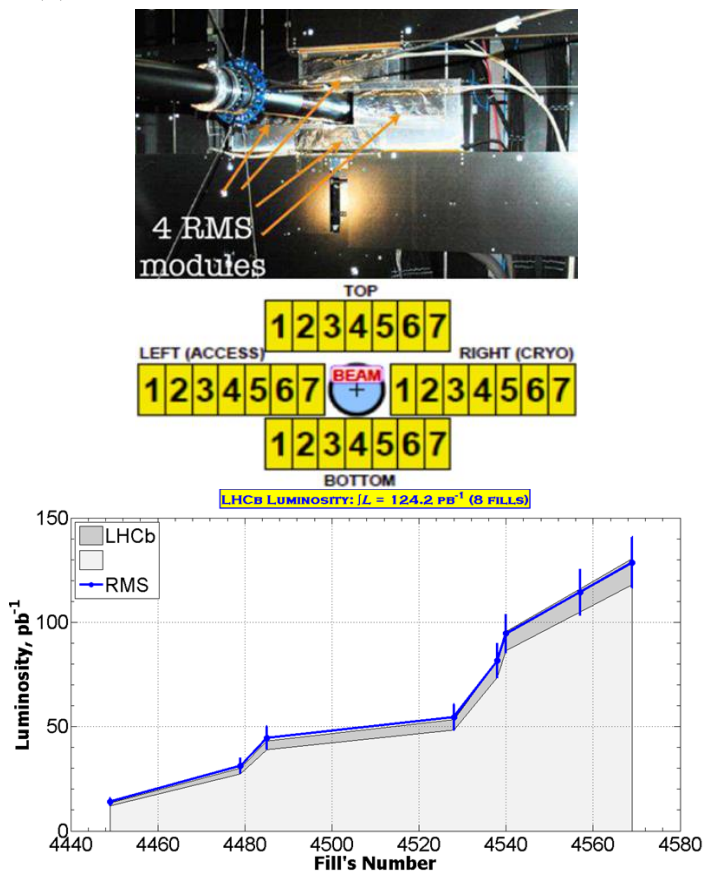
Доробок вагомих результатів з фізики високих енергій створено і збагачується плідною працею висококваліфікованих фахівців інституту, серед яких доктори наук: Ю. М. Малюта, В. Є. Аушев, Ю. М. Павленко, В. М. Пугач; кандидати наук: Ю. О. Васильєв, Ю. В. Пилипченко, Т. В. Обіход, М. С. Борисова, Д. Ю. Волянський, А. О. Лиманець, Ю. І. Сорокін, А. В. Вербицький, М. А. Теклишин, А. В. Чаус, В. М. Яковенко, Г. М. Малигіна, О. С. Ковальчук; інженерний персонал: М. М. Ткач, В. О. Кива, О. Ю. Охріменко, Д. І. Сторожик, В. М. Міліція та ін.

Основні наукові досягнення.

На великому адронному колайдері в експерименті LHCb у дослідженнях розпаду важких мезонів та баріонів виміряно їхню масу, час життя, частоту осциляцій, співвідношення гілок розпаду тощо.

Ці результати є найбільш точними або одержані вперше у світі (рідкісна мода розпаду $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$; порушення комбінованої CP парності в розпадах B^0_s мезонів, спостереження пента-кваркових структур тощо).

Протягом 8 років в експерименті LHCb успішно функціонує система радіаційного моніторингу (CPM), розроблена та виготовлена за фізико-технічними основами металевих фольгових детекторів, розвинутих в ІЯД.

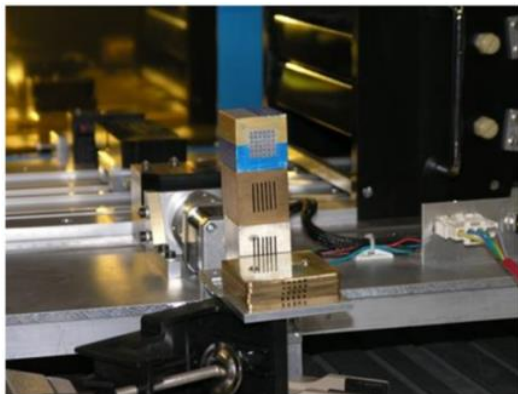


Система радіаційного моніторингу експерименту LHCb:
зверху – фото та схема CPM; знизу – виміряна за даними CPM
еволюція інтегральної світимості експерименту LHCb у 2015 р.

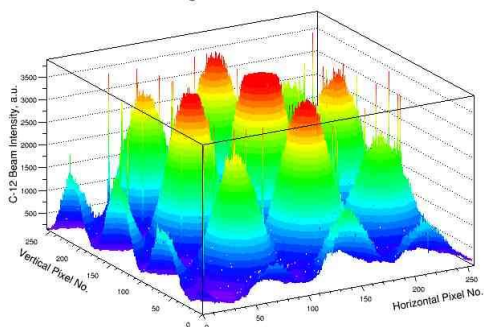
У рамках теорії похідних категорій та мінімальної суперсиметричної стандартної моделі розраховано спектри адронів та суперсиметричних партнерів з метою упорядкування спостережуваних адронів та передбачення нових частинок, що утворюються при енергіях протон-протонних зіткнень близько 14 TeV на великому адронному колайдері.

З повного набору даних протон-антипротонних зіткнень при енергії 1,96 TeV експерименту D0 (FNAL) з точністю 1 % визначено масу топ-кварка, $m_t = 173,93 \pm 1,61$ (стат) $\pm 0,88$ (сист) GeV/c².

Розроблено систему оцінки якості та виміряно характеристики мікростріпових детекторів для трекової системи експерименту CBM (Дармштадт), а також металевих мікродетекторів для систем вимірювання просторового розподілу пучків частинок, у тому числі для цілей адронної терапії.



TimePix Image of Matrix Collimated C-12 Beams



Формування міні-пучків для експериментів у клінічному центрі НІТ м. Гейдельберг: зверху – фото матричного та щілинних коліimatorів ІЯД; знизу – просторовий розподіл інтенсивності міні-пучків іонів вуглецю з енергією 2,35 GeV, виміряний мікродетектором у реальному часі.

Створено спільно з лабораторією плазмових технологій ІЯД фізико-технічні основи детекторів нового типу – металевих мікродетекторів (ММД). Позиційно-чутливі детекторні системи на основі ММД успішно застосовані як в експериментах з фізики високих енергій (система моніторингу світимості HERA-B, система радіаційного моніторингу LHCb), так і в інших галузях наукових досліджень: електронна фокальна площа лазерного мас-спектрометра (ІПФ НАН України, Суми); установка швидкісного рентгено-структурного аналізу (ІПМ НАН України, Київ) для вивчення динаміки фазових переходів у металах при нагріванні/охолодженні; вимірювання просторового розподілу дози для цілей фракціонованої радіотерапії (біомедична лінія на синхротроні ESRF в Греноблі (Франція), клінічний центр важких іонів НІТ у Гейдельберзі (Німеччина). Роботи по створенню нових детекторних систем для фізики високих енергій та медичного застосування розгортаються в рамках діяльності Міжнародної асоційованої лабораторії LIA IDEATE (Франція, Україна).

Установлено фізичний принцип відповідності кількості ядерних взаємодій величині заряду, утворюваного в металевих мішенях-детекторах при взаємодії їх з високоенергетичними іонами, що дало змогу реалізувати вперше у світі режим одночасного дослідження взаємодій на кількох мішенях, уведених в гало пучка накопичувально-прискорювального комплексу (В. М. Пугач, В. Є. Аушев, Ю. О. Васильєв, М. М. Ткач). Це дало змогу суттєво підвищити точність вимірювань відносних поперечних перерізів рідкісних процесів. Досягнута відносна точність вимірювань (порядку кількох відсотків) дотепер є неперевершеним досягненням у цій галузі досліджень. Режим одночасного експерименту на восьми мішенях також є унікальним явищем у техніці експерименту. Наразі схожий мішенний комплекс розробляється для експерименту LHCb.

Результати досліджень, одержані науковцями відділу фізики високих енергій, опубліковані в провідних наукових журналах та представлені в матеріалах міжнародних конференцій, симпозіумів у понад 500 наукових публікаціях з високим індексом Гірша (<https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=eFoR2KEAAAJ>).

ВІДДІЛ СТРУКТУРИ ЯДРА



І. М. Вишневський



В. Ю. Денисов

У 1982 р. у відділі ядерної спектроскопії було створено лабораторію ядерної спектроскопії на пучках заряджених частинок, яку очолив молодий доктор наук Іван Миколайович Вишневський. У червні 1984 р. на базі цієї лабораторії було сформовано відділ структури ядра, керівником якого став директор ІЯД І. М. Вишневський. Академік НАН України І. М. Вишневський був завідувачем відділу з 1984 по 2011 р. З 2011 р. відділом керує чл.-кор. НАН України Віталій Юрійович Денисов.

Спочатку у відділі була тільки група ядерної спектроскопії на пучках заряджених частинок і наукові дослідження проводились під керівництвом І. М. Вишневського і д.ф.-м.н. В. О. Желтоножського.

У 1996 р. у відділі було утворено сектор радіаційних технологій, яким у 1996 - 2013 рр. керував д.т.н. В. І. Сахно, а з 2013 р. — к.т.н. Т. В. Ковалінська. Створення і запуск у 2003 р. радіаційної установки з прискорювачем електронів суттєво розширило експериментальні можливості інституту в напрямку використання електронів з енергією до 4 MeV для фундаментальних і прикладних досліджень.

У 1999 р. у відділ було додано групу напівпровідникових детекторів, якою керував Е. Є. Петросян. У 2011 р. у відділі було сформовано лабораторію теорії ядерних взаємодій та процесів, якою керував В. Ю. Денисов (2011 - 2017), а з 2017 р. — д.ф.-м.н. В. П. Михайлюк. Також у відділі у 1997 - 2015 р. працював сектор Українського центру INIS, яким керувала к.ф.-м.н. Ж. І. Писанко.

У відділі захистили докторські дисертації В. О. Желтоножський (1989), В. Ю. Денисов (1995), В. І. Сахно (2009), О. І. Давидовська (2010). З 1984 по 2017 р. у відділі захистили дисертації 27 кандидатів наук.

Основні напрямки досліджень:

експериментальне дослідження структури та властивостей збуджених станів атомних ядер, що заселяються як у радіоактивному розпаді, так і на пучках заряджених частинок;

дослідження механізмів ядерних реакцій методом ізомерних відношень;

дослідження атомно-ядерних процесів, що протікають за участю зв'язаних атомних електронів;

вивчення ефектів вищих порядків у процесах радіоактивного розпаду та внутрішньої конверсії гамма-променів;

дослідження впливу наслідків аварії на ЧАЕС на довкілля та людину;

мікроскопічний та напівмікроскопічний опис ядерно-ядерної взаємодії, розрахунки взаємодії між сферичними та деформованими ядрами;

дослідження механізмів різноманітних ядерних реакцій;

дослідження альфа-, бета- та гамма-розпадів ядер;

експлуатація та розвиток експериментальної науково-технологічної радіаційної установки та стенду для функціональних випробувань;

дослідження та розробка радіаційних методів і технічних засобів нових цементуючих систем;

дослідження та розробка радіаційних технологій для утилізації відходів;

дослідження та розробка аероіонних технологій рибних харчових продуктів, а також радіаційних технологій пастеризації та консервації продуктів;



В. О. Желтоножський



О. І. Давидовська



В. П. Михайлюк

розробка гамма- та бета-спектрометрів і методик калібрування спектрометрів;

відновлення електричних, спектрометричних та експлуатаційних характеристик напівпровідникових детекторів, блоків детектування, виготовлених на основі високочистого Ge і Ge(Li) p-i-структур, а також аналізаторів імпульсів.

Основні наукові досягнення та науково-технічні розробки:

досліджено багато збуджених станів різноманітних ядер на пучках заряджених частинок і в радіоактивному розпаді та відкрито декілька сотень енергетичних збуджених рівнів у багатьох ядрах, визначено їхні характеристики та ймовірності альфа-, бета-переходів;

установлено аномалії в процесах внутрішньої конверсії електронів; уперше експериментально встановлено нові канали розпаду ядра через «електронні містки», існування квадрупольних тороїдних моментів в ядрі;

відкрито новий ефект збудження ядер при анігіляції позитронів; розроблено об'єднану модель альфа-розпаду та альфа-захвату (UMADAC), яка дає змогу одночасно розраховувати як періоди альфа-розпаду ядер, так і перерізи захоплення альфа-частинок ядрами з високим ступенем точності;

отримано вирази для ядерної та кулонівської частин взаємодії двох сферичних та аксіально-деформованих довільно орієнтованих ядер;

запропоновано багатовимірні моделі для злиття ядер та кластерного розпаду, в яких ядра динамічно деформуються в процесі злиття або розпаду;

побудовано модель для опису перерізу злиття надважких ядер у реакціях «холодного» синтезу та описано експериментальні перерізи;

розраховано протонні і нейтронні оболонкові поправки для ядер з кількістю протонів $76 \leq Z \leq 400$ уздовж лінії бета-стабільності та визначено магічні числа протонів і нейтронів;

активна участь у ліквідації аварії на ЧАЕС та її наслідків;

створення електрофізичних радіаційних пікохвильових технологій для тривалого зберігання при позитивній температурі делікатесних харчових продуктів без будь-яких консервантів;

впровадження іонних технологій у реальне виробництво для рибопереробної галузі;

розроблено і реалізовано проект сучасної електрофізичної радіаційної техніки (дослідницький радіаційний комплекс) універсального використання для наукових досліджень, розробки та практичні реалізації нових радіаційних технологій у різних галузях науки і виробництва;

розроблено радіаційні технології цілеспрямованої модифікації пористих будівельних матеріалів з покращеними характеристиками (гідрофобізацією, міцністю до руйнування, морозостійкістю, стійкістю до кислот, лугів, вологи, корозії);

розроблено методики для відновлення електричних, спектрометричних та експлуатаційних характеристик напівпровідникових детекторів, блоків детектування, виготовлених на основі високоочищеного Ge і Ge(Li) p-i-n структур, а також аналізаторів імпульсів. Розроблено малогабаритний сцинтиляційний гамма-спектрометр для аналізу харчових продуктів та будівельних матеріалів, а також електромеханічний охолоджувач для детекторів з надчистим германієм та портативний золомір для вимірювання частки золи у вугіллі.

Технологічні розробки сектору радіаційних технологій були представлені й відзначені дипломами на міжнародних та національних виставках науково-технічних досягнень. Отримано 20 патентів на винаходи методів використанням іонізуючої радіації як основного інструменту досягнення технологічних результатів у різних галузях виробництва;

Перспективи подальших досліджень:

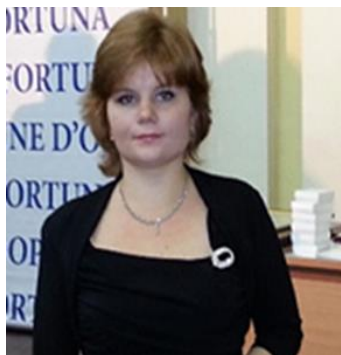
дослідження збуджених станів різноманітних ядер;

дослідження механізмів ядерних реакцій методом ізомерних відношень;

дослідження атомно-ядерних процесів, що протікають за участю зв'язаних атомних електронів;



В. І. Сахно



Т. В. Ковалінська

вивчення ефектів вищих порядків у процесах радіоактивного розпаду та внутрішньої конверсії гамма-променів;
дослідження впливу наслідків аварії на ЧАЕС на довкілля та людину;
дослідження механізмів різноманітних ядерних реакцій;
дослідження альфа-, бета- та гамма-розпадів ядер;
моделювання різноманітних ядерних процесів;
розвиток експериментальної бази та створення нового прискорювача в секторі радіаційних технологій;
створення нових радіаційних технологій та матеріалів;
створення нових прогностичних методів підвищення експлуатаційної надійності ядерної енергетики на принципах завчасного розпізнавання і запобігання кризових ситуацій в обладнанні АЕС;
розробка гамма- та бета-спектрометрів та методик калібрування спектрометрів.

Державні та академічні премії та нагороди.

Державна премія Української РСР в галузі науки і техніки 1985 р. за цикл наукових праць «Створення багатоцільового експериментального комплексу ІЯД» (В. І. Сахно).

Премія імені К. Д. Синельникова НАН України 1990 р. за цикл наукових праць «Збудження ядер при анігіляції позитронів» (І. М. Вишневський і В. О. Желтоножський).

Державна премія України в галузі науки і техніки 1999 р. за цикл наукових праць «Закономірності та аномальні явища в ядерних процесах» (І. М. Вишневський і В. О. Желтоножський).

Премія імені Д. В. Волкова НАН України 2009 р. за цикл наукових праць «Фізика надважких ядер та поляризаційних явищ у квантовій електродинаміці та електродинаміці адронів» (В. Ю. Денисов).

Премія імені К. Д. Синельникова НАН України 2016 р. за цикл наукових праць «Теорія дифракційних ядерних процесів» (В. П. Михайлюк).

Державна премія України в галузі науки і техніки 2019 р. за наукову роботу «Структура та взаємодія атомних ядер в пружних, непружних і радіоактивних процесах» (В. Ю. Денисов, В. П. Михайлюк).

У 1986 р. Указом Президії Верховної Ради УРСР акад. НАН України І. М. Вишневському присвоєно почесне звання «Заслужений діяч науки Української РСР», у 2006 р. він отримав Державну нагороду України орден «За заслуги» III ступеня, у 2008 р. – Почесну грамоту Верховної Ради України, у 2013 р. – Почесну грамоту Кабінету Міністрів України.



Відділ структури ядра, 2017 р. Стоять зліва направо: В. І. Сахно, В. О. Желтоножський, Ю. В. Іванов, В. О. Нестеров, В. Ю. Денисов, Е. С. Петросян, В. П. Хоменков, А. М. Саврасов, Д. Ю. Москаленко, Л. В. Садовніков, В. П. Михайлюк. Сидять зліва направо: С. С. Погуляй, Р. Ю. Чаплинський, Ю. М. Пархітько, О. І. Давидовська, Т. О. Маргітич, Н. В. Кулич, В. П. Колокольнікова

Міжнародна співпраця.

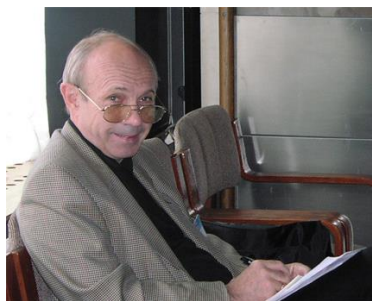
В. Ю. Денисов активно співпрацював з ученими Флорентійського, Нантського, Токійського університетів та науково-дослідними інститутами Італії, Франції, Німеччини та Японії. У рамках співпраці з іноземними вченими В. Ю. Денисовим було побудовано моделі для опису різноманітних колективних та одночастинкових явищ в ядрах та ядерних реакціях, а також запропоновано моделі для опису синтезу надважких ядер та альфа-розпаду.

В. П. Хоменков (к.ф.-м.н.) співпрацював з ученими університетів Падуї (Італія), Гамбурга (Німеччина) та Кана (Франція), а також з Європейської організації з ядерних досліджень – ЦЕРН (Швейцарія). У рамках цієї співпраці В. П. Хоменков досліджував проблему підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових детекторів для потужних колайдерів, а також моделював вплив опромінення швидкими іонами на структуру композитних наноматеріалів.

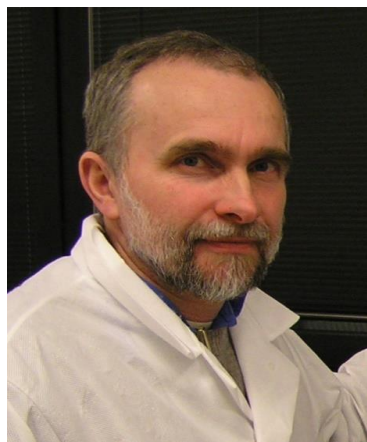
Співробітниками відділу опубліковано такі монографії:

1. В.Ю. Денисов, В.А. Плюйко. *Проблеми фізики атомного ядра и ядерных реакций* (К.: Київ. нац. ун-т імені Тараса Шевченка, 2013) 430 с.
2. І.М. Вишневський, Г.П. Гайдар, О.В. Коваленко, Т.В. Ковалінська, М.Ф. Коломієць, А.І. Липська, П.Г. Литовченко, В.І. Сахно, В.М. Шевель. *Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України* (К.: Ін-т ядерних дослідж., 2014) 176 с.

ВІДДІЛ ФІЗИКИ ЛЕПТОНІВ



Ю.Г. Здесенко



Ф. А. Даневич

Відділ фізики лептонів було утворено рішенням Президії НАН України в 1986 р. з відділу розробки та конструювання систем низькофонових вимірювань (відділ № 23) Спеціального конструкторсько-технологічного бюро з експериментальним виробництвом (СКТБ з ЕВ) ІЯД АН УРСР. У 1986 - 2004 рр. відділ очолював д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. НАН України Юрій Георгійович Здесенко. З 1 вересня 2004 р. відділом завідує д.ф.-м.н., проф. Федір Анатолійович Даневич.

Початком відділу фізики лептонів можна вважати лабораторію фізичних методів досліджень у Дослідному підприємстві Інституту геохімії та фізики мінералів АН УРСР (зараз Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення ім. М. П. Семененка НАН України), де Ю. Г. Здесенко працював у 1971 - 1980 рр. старшим інженером, а потім завідувачем лабораторії. Уже тоді Ю. Г. Здесенко розпочав роботи над експериментальною установкою для дослідження подвійного бета-розпаду атомних ядер, що стали основним напрямком роботи відділу. У цій лабораторії під керівництвом Ю. Г. Здесенка розпочали свою наукову діяльність майбутні співробітники відділу І. А. Мицик, А. С. Ніколайко, В. М. Куц, Б. М. Кропивянський, Ф. А. Даневич. У 1980 р. група була переведена до відділу розробки та конструювання систем низькофонових вимірювань (відділ № 23 СКТБ з ЕВ ІЯД). Відділ очолював Ю. Г. Здесенко. З квітня 1986 р. цей відділ було реорганізовано у відділ фізики лептонів ІЯД АН УРСР. У 1984 р. за ініціативою Ю. Г. Здесенка було споруджено підземну лабораторію на глибині близько 430 м у соляній шахті в с. Солотвино на Закарпатті, де проводились дослідження 2β -розпаду,

рідкісних альфа- і бета-розпадів, кластерної активності ядер, розробка методів низькофонової спектrometerії. У кінці 1990-х років група ІЯД НАН України розпочала міжнародну співпрацю в підземних лабораторіях Модан (Франція), Гран Сассо (Італія), Каміока (Японія).

Основні напрямки досліджень:

дослідження властивостей нейтрино і слабкої взаємодії, подвійного бета-розпаду атомних ядер, рідкісних ядерних розпадів та пошук екзотичних ядер, гіпотетичних частинок та ефектів за межами стандартної моделі елементарних частинок.

розробка методів наднизькофонової ядерної спектrometerії.

Основні наукові досягнення та науково-технічні розробки:

спостережено двонейтринний подвійний бета-розпад ядер ^{48}Ca , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd та ^{150}Nd на основні рівні дочірніх ядер, а також двонейтринний подвійний бета-розпад ядра ^{100}Mo на перший 0^+ збуджений рівень дочірнього ядра;

на новому рівні чутливості досліджено процеси 2β -розпаду ядер ^{40}Ca , ^{46}Ca , ^{48}Ca , ^{64}Zn , ^{70}Zn , ^{82}Se , ^{96}Ru , ^{104}Ru , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{106}Cd , ^{108}Cd , ^{114}Cd , ^{116}Cd , ^{136}Ce , ^{138}Ce , ^{142}Ce , ^{150}Nd , ^{156}Dy , ^{158}Dy , ^{160}Gd , ^{180}W , ^{186}W , ^{184}Os , ^{192}Os , ^{190}Pt , ^{198}Pt , ^{196}Hg ;

в експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{150}Nd встановлено жорсткі обмеження на ефективну масу нейтрино Майорани на рівні 0,3 - 1,7 eB, а також на параметри домішок правих токів у слабкій взаємодії та на константу зв'язку нейтрино з майороном, параметр порушення R -парності в мінімальній суперсиметричній стандартній моделі з незбереженням R -парності;

отримано нові обмеження на масу аксіонів, що можуть випромінюватись Сонцем, електричний заряд фотону та на ймовірності процесів із порушенням законів збереження електричного та баріонного зарядів, перевірено принцип Паулі в атомах та атомних ядрах;

уперше виміряно потік нейтрино від розпаду ядер ^7Be в Сонці, що дало змогу отримати нову інформацію про осциляції, маси та параметри змішування нейтрино, виміряно потік нейтрино від р-р циклу у Сонці;

зарєєстровано антинейтрино з глибини Землі, встановлено обмеження на потік антинейтрино від Сонця, на магнітний момент нейтрино та на змішування важких стерильних нейтрино;

досліджено рідкісний бета-розпад ядер ^{113}Cd , відкрито альфа-активність природних вольфраму і європію, альфа-розпад платини та бета-розпад індію на збуджені рівні дочірніх ядер;

розроблено методи наднизькофонові ядерної спектрометрії, глибокого очищення матеріалів, запропоновано нові та вдосконалено існуючі детектори ядерних випромінювань та методи аналізу даних;

уперше розроблено й застосовано сцинтилятори із збагачених ізотопів кадмію і молібдену, запропоновано сцинтилятори молібдатів літію та цинку як низькотемпературні сцинтиляційні болометричні детектори безнейтринного подвійного бета-розпаду ядра ^{100}Mo .



Відділ фізики лептонів, 2003 р. Стоять зліва направо: А. Ш. Георгадзе, С. С. Нагорний, Д. В. Пода, В. А. Яценко, Ю. С. Юрченко, С. Ю. Здесенко. Сидять зліва направо: Ф. А. Даневич, В. В. Кобичев, Б. Н. Кропивянський, Ю. Г. Здесенко, А. С. Ніколайко, В. І. Третяк

Перспективи подальших досліджень.

Подальший розвиток методів низькотемпературних сцинтиляційних болометричних детекторів для дослідження властивостей нейтрино в експериментах з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер ^{100}Mo і ^{116}Cd , пошук нових сцинтиляційних матеріалів, зокрема для дослідження ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{150}Nd . Найбільш перспективними, з

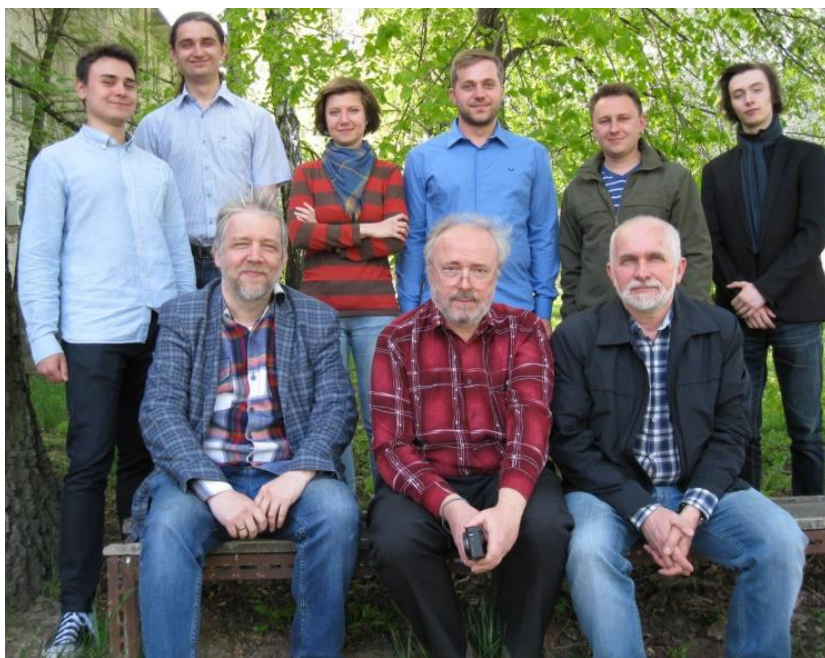
огляду на можливість визначення маси нейтрино та природи нейтрино, є пошуки безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd і ^{130}Te , вимірювання двонейтринного подвійного бета-розпаду ядер ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{150}Nd , пошук електронного поглинання з випромінюванням позитрону у ^{106}Cd . Дослідження подвійного бета-розпаду методами низькофонові гамма-спектрометрії (зокрема, ядер ербію, ітербію, самарію) за допомогою напівпровідникових детекторів з надчистого германію, пошуки резонансного подвійного електронного поглинання в ядрах ^{164}Er і ^{152}Gd за допомогою скінтіляторів з гадолінієм та ербієм.

Буде продовжено участь в експериментах Bogexino та SoX з метою вимірювання нейтрино від Сонця та інших джерел, дослідження осциляцій нейтрино на малих відстанях. Пошуки ефектів та частинок за межами стандартної моделі елементарних частинок. Зокрема, пошуки аксіонів, масивних слабковзаємодіючих частинок, стерильних нейтрино, перевірка законів збереження заряду, лептонного та баріонного чисел, принципу Паулі та інших гіпотетичних процесів будуть вестися шляхом аналізу наявних даних низькофонових експериментів.

Перспективними є також дослідження рідкісних бета- та альфа-розпадів, пошуки надважких елементів.



Ю. Г. Здесенко з Бруно Понтекорво і Б. С. Негановим під час конференції в Баксанській ущелині (Росія, 1987)



Відділ фізики лептонів, 2017 р. Стоять зліва направо: М. М. Зарицький, М. О. Ніколайчук, О. Г. Поліщук, Д. В. Касперович, Р. С. Бойко, Н. В. Сокур. Сидять зліва направо: В. В. Кобичев, В. І. Третьак, Ф. А. Даневич

Державні та академічні премії.

Премія імені К. Д. Синельникова НАН України 2007 р. за серію праць «Експериментальні дослідження рідкісних процесів у фізиці атомного ядра та елементарних частинок» (Ф. А. Даневич, В. В. Кобичев, В. І. Третьак).

Премія Президента України для молодих учених 2010 р. за цикл робіт «Рідкісні ядерні процеси» (С. С. Нагорний, Д. В. Пода, О. Г. Поліщук, С. С. Юрченко).

Державна премія України в галузі науки і техніки 2016 р. за роботу «Властивості нейтрино і слабкої взаємодії, пошуки ефектів за межами стандартної моделі елементарних частинок» (Ф. А. Даневич, Ю. Г. Здесенко, В. В. Кобичев, В. І. Третьак).

Міжнародна співпраця.

Дослідження подвійного бета-розпаду, рідкісних альфа- та бета-розпадів, пошук гіпотетичних процесів та частинок, розробка низько-фонових детекторів для дослідження рідкісних ядерних розпадів ве-

дуться у співпраці з групою DAMA (університети у Римі «Ла Сапієнца» і «Тор Вергата», Національна лабораторія Гран Сассо, Італія).

Відділ бере участь у великому міжнародному експерименті Bogexino, основною метою якого є вимірювання потоків нейтрино від Сонця. Крім того, колаборація використовує унікальний детектор для дослідження нейтринних осциляцій, пошуку сонячних аксіонів, дослідження антинейтрино з надр Землі (так звані гео-нейтрино), пошук ефектів за рамками стандартної моделі елементарних частинок. Метою колаборації SoX, яка планує використовувати детектор Bogexino, є пошуки осциляцій нейтрино на відстанях у кілька метрів або кілька десятків метрів за допомогою радіоактивних джерел нейтрино, а також пошуки стерильних нейтрино.

Група відділу є учасником проекту LUMINEU Національного агентства наукових досліджень Франції, метою якого є вивчення маси і природи нейтрино в подвійному бета-розпаді ядра ^{100}Mo . Розвитком цих досліджень є великий міжнародний проект низькотемпературного сцинтиляційного болометричного експерименту CUPID для пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{130}Te на рівні чутливості до маси нейтрино, що відповідає інвертованій схемі масових станів нейтрино.

Учені відділу беруть участь у колаборації AMoRE, метою якої є здійснення великомасштабного кріогенного експерименту з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядра ^{100}Mo за допомогою низькотемпературних сцинтиляційних кристалів молібдату кальцію, збагачених ізотопом молібдену 100 і збіднених на кальцій 48.

Після завершення експериментів NEMO-2 та NEMO-3, у яких відділ брав участь, у рамках проекту SuperNEMO ведеться підготовка великомасштабного експерименту з пошуку безнейтринного подвійного бета-розпаду ядер ^{82}Se і ^{150}Nd з чутливістю до маси нейтрино на рівні 0,05 - 0,1 eV.

Пошуки темної матерії ведуться в рамках колаборації DarkSide, метою якої є пошук частинок темної матерії за допомогою низькофонові часово-проекційної камери з рідким аргоном, добутим із глибин Землі для зменшення фону від космогенно утвореного ізотопу ^{39}Ar .

Продовжується співробітництво в дослідженнях рідкісних альфа-розпадів та подвійного бета-розпаду з Інститутом стандартних матеріалів та вимірювань Об'єднаного дослідницького центру Європейської комісії (Геель, Бельгія). Група також співпрацює з Об'єднаним інститутом ядерних досліджень у Дубні в дослідженнях подвійного бета-розпаду атомних ядер.

Список найбільш важливих публікацій відділу.

1. Yu.G. Zdesenko. Double β decay and conservation of lepton charge. Sov. J. Part. Nucl. 11 (1980) 542 (review).
2. V.I. Tretyak, Yu.G. Zdesenko. Tables of double beta decay data. At. Data Nucl. Data Tables 61 (1995) 43 (review).
3. Yu.G. Zdesenko. The future of double β decay research. Rev. Mod. Phys. 74 (2002) 663 (review).
4. V.I. Tretyak, Yu.G. Zdesenko. Tables of double β decay data - an update. At. Data Nucl. Data Tables 80 (2002) 83 (review).
5. F.T. Avignone III et al. Next generation double-beta decay experiments: metrics for their evaluation. New J. Phys. 7(6) (2005) 46 p. (review).
6. F.A. Danevich, V.V. Kobychiev, V.I. Tretyak. Search for effects beyond the Standard Model of particles in low counting experiments. Chapter 7 in book: "Dark Energy and Dark Matter in the Universe". Ed. by V. Shulga. Vol. 3. "Observational Manifestation and Experimental Searches" (Kyiv: Akadempriodyka, 2015) 375 p. (pp. 245 - 335).
7. P. Belli, R. Bernabei, F.A. Danevich, A. Incicchitti, V.I. Tretyak. Experimental searches for rare alpha and beta decays. Eur. Phys. J. A 55 (2019) 140 (review).

ВІДДІЛ ФІЗИКИ ВАЖКИХ ІОНІВ

Відділ фізики важких іонів створений у 1989 р. на базі лабораторії процесів глибоких перебудов ядер, що існувала у складі відділу ядерних реакцій ІЯД з 1986 р. До 2015 р. відділ очолював д.ф.-м.н., проф. Адам Тихонович Рудчик. З 2015 р. завідувачем відділу став д.ф.-м.н. Олег Анатолійович Понкратенко.



А. Т. Рудчик



О. А. Понкратенко

Основні напрямки досліджень:

експериментальне дослідження ядерних реакцій на пучках легких і важких іонів при взаємодії з легкими ядрами;

взаємодія легких ядер. Процеси при зіткненнях ядер;
механізми ядерних реакцій;
прояви впливу структури ядер на процеси їхньої взаємодії;
деформація і кластеризація ядер у процесах розсіювання і реакцій;
теоретичний опис і апроксимація ядро-ядерної взаємодії. Оптичний потенціал. Потенціал подвійної згортки;
енергетична залежність ядро-ядерної взаємодії;
ізотопічні ефекти у ядро-ядерній взаємодії. Залежності від маси та заряду;
взаємодія нестабільних та екзотичних ядер;
взаємодія у кінцевому стані. Вихідний канал реакції як джерело інформації про взаємодію ядер. Унікальність такої інформації для нестабільних ядер;
фізика малонуклонних систем. Дослідження збуджених станів легких ядер за допомогою кореляційних експериментів.

Основні наукові досягнення.

Виконано серію експериментальних робіт з вимірювання перерізів ядерних реакцій, процесів пружного та непружного розсіювання легких ядер; із вивчення ядро-ядерних процесів та структури стабільних і нестабільних (екзотичних) ядер в основних та збуджених станах при взаємодії іонів бору, вуглецю, азоту і кисню з легкими ядрами. Експериментальні вимірювання здійснювались на циклотроні У-240 ІЯД, а також на циклотроні Варшавського університету С-200Р. Більшість експериментальних даних отримано вперше.

Виконано аналіз експериментальних даних за методом зв'язаних каналів реакцій (МЗКР) з урахуванням процесів потенціального розсіювання ядер в основних та збуджених станах, збудження частинкових і колективних мод руху ядер, реорієнтації ядер з ненульовим спіном, одно- та двоступеневих передач нуклонів і кластерів. Для розрахунків спектроскопічних амплітуд нуклонів і кластерів в ядрах розроблено оригінальну методику в рамках трансляційно-інваріантної моделі оболонки (ТІМО).

З аналізу даних за МЗКР отримано нові відомості про:

потенціали ядро-ядерної взаємодії (у тому числі для нестабільних та рідкісних ядер ${}^8\text{Li}$, ${}^8\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{13}\text{N}$, ${}^{15}\text{N}$, ${}^{16}\text{N}$, ${}^{17}\text{N}$, ${}^{15}\text{O}$, ${}^{17}\text{O}$, ${}^{18}\text{O}$ тощо);

довжини деформації легких ядер та спектроскопічні характеристики нуклонів і кластерів у досліджуваних ядрах;

одно- та двоступеневі передачі нуклонів і кластерів, їхні внески до перерізів реакцій та процесів розсіювання ядер; процеси реорієнтації ядер та їхній вплив на перерізи пружного та непружного розсіювання ядер.



Під час вимірювань на Варшавському циклотроні С-200Р, 2006 р.
Зліва направо: Б. Чех (Краків), Є. І. Кошій (Харків), А. Т. Рудчик,
С. Б. Сакута (Москва), Вал. М. Пірняк, О. А. Понкратенко

У результаті систематичного та порівняльного аналізу великого масиву експериментальних даних з пружного розсіяння ядер масами від 2 до 40 а.о.м. побудовано параметричні функції, що адекватно апроксимують енергетичну залежність положень дифракційних максимумів та мінімумів диференційних перерізів пружного розсіяння та значень цих перерізів у відповідних максимумах та мінімумах.

Побудовано ядерні енергетично залежні потенціали взаємодії з урахуванням дисперсійних співвідношень між дійсною і уявною частинами потенціалу для пар ядер $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$, $^{16}\text{O} + ^{16}\text{O}$, $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$, $^6\text{Li} + ^{12}\text{C}$ та ін., що забезпечують задовільний опис експериментальних даних пружного розсіяння в діапазоні значень енергії зіткнення від 1 до 200 MeV/нуклон.



Відділ фізики важких іонів, 2017 р. Сидять зліва направо:
Ю. М. Степаненко, А. А. Рудчик. Стоять зліва направо: В. В. Улещенко,
А. П. Ільїн, А. Т. Рудчик, Г. С. Соломенко, О. А. Понкратенко, Вал. М. Пірняк

Отримано нові відомості про збуджені стани та резонанси ізотопів гелію та літію. Частину рівнів виявлено вперше.

Наукові результати, отримані у відділі, лягли в основу 16 кандидатських та 2 докторських дисертацій, захищених співробітниками відділу.

Перспективи подальших досліджень.

У рамках експериментального й теоретичного дослідження ядерних реакцій з виходом нестабільних ядер – продуктів реакцій при взаємодії пучків іонів $^{10,11}\text{B}$, $^{12,13}\text{C}$, $^{14,15}\text{N}$, $^{16,18}\text{O}$ з ядрами $^{6,7}\text{Li}$, ^9Be , $^{10,11}\text{B}$, $^{12,13,14}\text{C}$ при енергіях 5 - 10 МеВ/нуклон передбачається отримання експериментальних даних диференціальних перерізів реакцій з виходом нестабільних ізотопів, отримання інформації про структуру досліджуваних ядер, їхню деформацію чи кластеризацію, отримання інформації про взаємодію ядер, визначення параметрів оптичних потенціалів взаємодії нестабільних ядер в основних та збуджених

станах, дослідження залежностей перерізів розсіяння та відповідних потенціалів ядро-ядерної взаємодії від енергії зіткнення, мас та зарядів ядер, дослідження одно- та двоступеневих механізмів ядерних реакцій.

Заплановано теоретичні дослідження в рамках єдиного цілісного підходу взаємодії легких ядер у широкому діапазоні енергій зіткнення з включенням до єдиного опису процесів пружного та непружного розсіяння, реакцій передач, з урахуванням фундаментальних фізичних принципів, зокрема принципу причинності, що накладає обмеження на оптичний потенціал у вигляді дисперсійних співвідношень між його дійсною та уявною частинами.

Державні премії.

Державна премія України в галузі науки і техніки 1985 р. за результатами роботи по розробці та впровадженню джерела важких іонів на циклотроні У-240 та дослідженню ядерних реакцій з важкими іонами (А. Т. Рудчик).

Державна премія України в галузі науки і техніки 2019 р. за наукову роботу «Структура та взаємодія атомних ядер в пружних, непружних і радіоактивних процесах» (О. А. Понкратенко).

У відділі працює 14 співробітників: 2 доктори та 7 кандидатів фіз.-мат. наук, 1 професор, 3 старших наукових співробітники, 1 аспірант.

Міжнародне співробітництво.

Співробітники відділу уже протягом багатьох років успішно співпрацюють з такими зарубіжними ядерними центрами: Лабораторією важких іонів Варшавського університету. Циклотроном С200-Р (Варшава, Польща); Інститутом ядерної фізики ім. Г. Неводнічанського (Краків, Польща); Національним центром ядерних досліджень (Варшава, Польща); Університетом штату Флорида (Таллахассі, Флорида, США); Університетом штату Техас (Texas A&M University) (Колледж-Стейшен, Техас, США); Російським дослідницьким центром «Інститут Курчатова» (Москва, Росія).

Результати досліджень співробітників відділу регулярно публікуються у фахових періодичних виданнях (у тому числі Phys. Rev. C, Eur. Phys. J. A, Nucl. Phys. A) та представляються на вітчизняних та міжнародних наукових конференціях. Опубліковано понад 300 робіт.

Було опубліковано монографію: О.Ф. Немец, В.Г. Неудачин, А.Т. Рудчик, Ю.Ф. Смирнов, Ю.М. Чувильский. *Нуклонные ассоциации в атомных ядрах и ядерные реакции многонуклонных передач* (К.: Наук. думка, 1988) 488 с.

ВІДДІЛ ТЕОРІЇ ЯДЕРНИХ ПРОЦЕСІВ

Відділ теорії ядерних процесів був створений у 2013 р., але його історія почалася в 1994 р., коли була створена лабораторія часового аналізу ядерних процесів, на базі якої був створений відділ. З 1994 по 2015 р. лабораторією, а згодом і відділом, керував д.ф.-м.н., проф. Владислав Сергійович Ольховський, який працював в ІЯД з 1970-х років.

У лабораторії часового аналізу ядерних процесів теоретично досліджувалися процеси тунелювання частинок і ядер крізь різні типи потенціальних бар'єрів, було розроблено метод дослідження тунелювання частинок при наявності квантового тертя, проводилися теоретичні дослідження процесів еволюції розпаду радіоактивних ядер, досліджувалося гальмівне випромінювання фотонів у процесах альфа-розпаду, були удосконалені методи ядерної хронометрії з урахуванням збудження радіоактивних ядер у природних процесах, а також активно досліджувалася кінетика та динаміка лептон-ядерних і адрон-ядерних зіткнень.

Під керівництвом та за особистої активної участі В. С. Ольховського в лабораторії було одержано вагомі наукові результати, які знайшли міжнародне визнання:

- запропоновано й обґрунтовано загальне визначення часу тунелювання;

- узагальнено й розширено зміст ефекту Хартмана для часу тунелювання частинок;

- досліджено еволюцію тунелювання частинок крізь подвійні бар'єри;

- розроблено метод багаторазових внутрішніх відбиттів при тунелюванні частинок;

- уперше пояснено експериментальні дані з тунелювання нейтронів крізь нейтронні фільтри;

- пояснено перші експерименти з гальмівного випромінювання фотонів у процесах альфа-розпаду сферичних ядер;



В. С. Ольховський

запропоновано новий алгоритм визначення ефективного часу та інтенсивності альфа-розпаду з урахуванням збуджених станів і проведено розрахунки цих величин для випадків розпаду ряду радіоактивних ядер;

показано, що ефективна тривалість альфа-розпаду при врахуванні формування та розпаду збуджених станів альфа-радіоактивних ядер в астрофізичних і геофізичних процесах під дією космічного випромінювання на поверхні землі помітно менша, ніж без урахування цих процесів;

запропоновано нову інтерпретацію енергетичної залежності радіуса оптичного потенціалу з точки зору часової затримки розсіювання частинок при взаємодії їх з ядром мішені у випадку низьких енергій для сферичних ядер.

У результаті багаторічних досліджень В. С. Ольховським було розроблено теорію оператора часу, в якій час розглядається як квантова спостережувана величина. Ця теорія дає загальний метод визначення часових характеристик квантових (зокрема, і ядерних) процесів.

Враховуючи успішний розвиток лабораторії та розширення напрямків її діяльності, у 2013 р. на базі лабораторії було створено відділ теорії ядерних процесів. Напрямки роботи відділу, крім традицій-



них, пов'язаних з дослідженням часових характеристик в основному реакцій з нейтронами та альфа-розпадів, включають також теоретичні дослідження широкого спектра ядерних процесів – пружного та непружного розсіювання і реакцій за участю ядер та елементарних частинок, бета-розпадів, гальмівного випромінювання при різноманітних ядерних процесах, заплутаних станів у квантових системах.

З 2015 р. відділ теорії ядерних процесів очолює д.ф.-м.н. Володимир

В. В. Давидовський
Володимирович Давидовський.

На даний час відділ нараховує 10 співробітників, з яких 2 доктори і 5 кандидатів наук.

У відділі розвивається власний дифракційний підхід до опису ядерних реакцій при середніх та високих енергіях, який узагальнює стандартну дифракційну теорію на випадок процесів з великими поздовж-

німи передачами імпульсу і дозволяє кількісно описувати, зокрема, процеси розщеплення двокластерних ядер у кулоновому та ядерному полях (В. В. Давидовський, А. Д. Фурса).

Було запропоновано простий метод визначення параметрів модельної деформованої хвилі безпосередньо з рівняння Шредінгера з відомим оптичним потенціалом. Одержані цим методом функції виявляються близькими до знайдених точними методами. Метод проілюстровано на прикладі пружного розсіяння протонів на ^{12}C при енергіях 72 та 156 МеВ. Одержані модельні функції використовуються при дослідженні більш складних ядерних реакцій (д.ф.-м.н. А. Д. Фурса).

Для реакцій (p, pn) розроблено аналітичний варіант імпульсного наближення з деформованими хвилями. Одержано вирази для перерізів реакції і вектора поляризації ядерного нуклона. Вивчено їхні властивості для різних геометрій експерименту. Показано, що деформація хвильових функцій істотно модифікує імпульсний розподіл, а разом з ним і переріз реакції. Підхід виявився здатним без жодного вільного параметра добре описувати й передбачати спостережувані величини (В. В. Давидовський, А. Д. Фурса).

У моделі з нуклон-фононою взаємодією теоретично досліджено енергетичні спектри та структури основних та низько розташованих збуджених станів непарних ядер середньої атомної маси. Порівняння теоретично розрахованих положень рівнів ядер з їхніми експериментальними значеннями дозволило визначити силу взаємодії частинок з фононами, а також більш детально конкретизувати послідовність і розташування одночастинкових станів в моделі Нільссона, яка була обрана для побудови базису (А. Д. Фурса).

Шляхом побудови енергетичної матриці для станів з певним кутовим моментом і парністю для повного гамільтоніану непарних ядер, який складається з одночастинкової та колективної частин, а також із взаємодії між цими частинами, визначено розташування і послідовність енергетичних рівнів збуджених станів непарних ядер ^{59}Co і ^{55}Mn та обчислено значення коефіцієнтів розкладу хвильових функцій цих



А. Д. Фурса

станів за обраним базисом. Було одержано добре узгодження розрахованих рівнів з їхніми експериментальними значеннями. Знайдена структура хвильових функцій основних і збуджених станів непарних ядер дозволить більш надійно обрати модель ядра і метод розрахунків перерізів непружного розсіяння нейтронів цими ядрами в широкій області енергій нейтронів (А. Д. Фурса).

Досліджено природу найнижчих збуджених станів непарних ядер, одержано нові дані про перерізи пружного та непружного розсіяння швидких нейтронів з непарними ядрами, необхідних для фундаментальної нейтронної фізики та прикладних задач ряду галузей науки, де використовуються ядерні технології (А. Д. Фурса).

Крім того, у відділі розроблено та вдосконалюється феноменологічний просторово-часовий підхід до розгляду ядерних процесів. Цей підхід дав змогу винайти кілька нових методів задля задовільної інтерпретації експериментальних даних за урахування інтерференційних ефектів у бінарних реакціях (а також у реакціях з трьома частинками у вихідному каналі) пружного розсіяння нуклонів на легких та середніх ядрах за наявності одного ізольованого або декількох близьких резонансів, що перекриваються. За допомогою просторово-часового підходу був розроблений та зараз узагальнюється метод часових резонансів, який дозволяє задовільно описувати нетипові інклюзивні спектри кінцевого фрагмента високоенергетичних реакцій (В. С. Ольховський, к.ф.-м.н. Н. Л. Дорошко, С. О. Омельченко, к.ф.-м.н. М. Е. Долінська).



Н. Л. Дорошко



М. Е. Долінська



С. О. Омельченко

У розвиток методів дослідження ядерних реакцій на основі спільного аналізу їх тривалостей і енергетичної структури S-матриці, започаткованих В. С. Ольховським, було розроблено новий квантовий підхід

для визначення ймовірності розпаду складених ядер, що утворюються в мессбауерівських експериментах. Запропоновано новий метод дослідження еволюції розпаду радіоактивних ядер, що ґрунтується на теоремі Крилова - Фока, узагальненій на випадок змішаних станів, коли процес розпаду ансамблю частинок відбувається одночасно з його утворенням. Шляхом поєднання S-матричного і часового аналізів функцій збудження нуклон-ядерного розсіювання розроблено новий метод визначення рівнів зв'язаних і віртуальних станів складеного ядра при заданих геометричних параметрах нуклон-ядерного потенціалу, який може успішно застосовуватися в ядерній спектроскопії. Теоретично досліджена поведінка тривалостей і перерізів розсіювання в області енергій поблизу двох ізольованих резонансів; результати розрахунків, виконані для одноканального і багатоканального розсіювання, можуть послужити орієнтацією для пошуків ефекту зміни знака часу затримки в реальних нейтрон-ядерних процесах (Н. Л. Дорошко).

Зроблено квантово-механічне обґрунтування необхідності перегляду часових характеристик розпаду ядер-хронометрів, що застосовуються при визначенні віку різних об'єктів. Показано, що при дослідженні еволюції радіоактивних перетворень і ланцюжків розпаду треба брати до уваги часи існування не лише основних, а й можливих збуджених станів ядер, що розпадаються. Показано, що «скориговані» належним чином показники «ядерного годинника» в ряді випадків можуть відповідати значно меншим значенням тривалостей реальних процесів розпаду ядер-хронометрів, а значить, і віку об'єктів, в яких відбуваються ці процеси (В. С. Ольховський, Н. Л. Дорошко, М. Е. Долінська).

Також у відділі розвивається власний підхід до опису бета-розпаду ядер. Так, уперше було запропоновано метод розрахунку зведених імовірностей бета-переходів на збуджені стани непарних ядер з урахуванням вакуумних флуктуацій квазічастинок і багатофонових (до 10 фонов) станів основної смуги парно-парного остова, які можуть давати внесок у формування збуджених станів (к. ф.-м. н. Г. П. Куртєва).



Г. П. Куртєва

Уперше виявлено з аналізу великої сукупності експериментальних даних по ймовірностях бета-переходів на конкретні стани ядер закономірності впливу колективних ступенів свободи на ймовірності бета-переходів і на цій основі визначено величину перенормування констант слабкої взаємодії. Це перенормування використано у всіх розрахунках бета-розпаду ядер. У сукупності результати розрахунків показують, що ослаблення слабких сил в ядрах не залежить від масового числа й енергії збуджуваних при бета-розпаді станів (Г. П. Куртева).

У відділі також розв'язуються прикладні задачі фізики ядра та елементарних частинок, такі як розробка методики стохастичного охолодження пучків на прискорювачах.

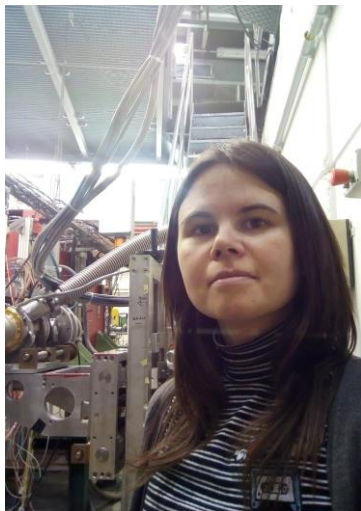
Розроблено авторську методику розрахунків емітансу та еволюцій імпульсного розкиду прискорених пучків, що стохастично охолоджуються; проводиться тестування програмного забезпечення для різних типів сигналів кікеру системи стохастичного охолодження для пучків антипротонів та важких іонів на прискорювачі CR (FAIR-проекту) (М. Е. Долінська).

Із середини 1990-х років у відділі проводиться дослідження ядерної взаємодії та механізмів ядерних реакцій методами гальмівного випромінювання. Було розроблено теорію гальмівного випромінювання, що супроводжує різноманітні ядерні процеси. Теорію застосовано (та перевірено у випадках, де існують експериментальні дані) для аналізу гальмівного випромінювання, що супроводжує альфа-розпад, протонний розпад, розсіяння протонів на ядрах (від близьконульових до релятивістських енергій), розсіяння пі-мезонів на ядрах, спонтанний поділ, потрійний поділ, захоплення протонів ядрами (у зірках). Фокус направлено до здобуття нової інформації (та зрозуміння) про взаємодію між нуклонами, що складають ядра в реакціях, динамічні характеристики, злиття, магнітне випромінювання, підбар'єрні та інтерференційні процеси та ін. (к. ф.-м. н. С. П. Майданюк).

У відділі активно розвивається феноменологія збуджених нуклонних станів, що спостерігаються у процесах фотонародження мезонів при високих енергіях (к. ф.-м. н. М. В. Романюк).

При дослідженні характеру взаємодії тотожних частинок у полі квантових мікронеоднорідностей уперше було показано, що обмінна взаємодія тотожних частинок при їхньому одночасному проходженні поля квантового бар'єра або квантової ями змінює енергетичні параметри частинок, час їхнього проходження через квантовий бар'єр або квантову яму. Такі зміни пов'язуються з процесами заплутування то-

тожних частинок і дозволяють контролювати динаміку процесів заплутування. Було розраховано час проходження тотожними частинками прямокутної квантової ями і прямокутного квантового бар'єра (к. ф.-м. н. Л. С. Марценюк).



М. В. Романюк



Л. С. Марценюк

Активно досліджуються інтерференційні переходи в квантових системах твердого тіла (дивакансії кремнію) і наноструктурах живих організмів. Вивчаються властивості водних структур з позиції квантової теорії поля. Уперше наведено вичерпну інтерпретацію недавно відкритого японськими дослідниками ефекту індукції водою надпровідності в з'єднаннях SrFe_2As_2 та $\text{FeTe}_{0,8}\text{S}_{0,2}$ (Л. С. Марценюк).

Міжнародна співпраця.

Останнім часом відділ розширює співпрацю із закордонними установами, а саме з Центром дослідження важких іонів імені Гельмгольца (GSI, Дармштадт, Німеччина), Університетом Ланьчжоу (Китай), Національним інститутом ядерної фізики (INFN, Рим, Італія).

Список найбільш важливих публікацій відділу.

1. V. Davidovsky, B. Struminsky. Nucleon structure functions, resonance form factors and duality. Phys. Atom. Nucl. 7 (2003) 1368.
2. В.В. Давидовский, М.В. Евланов, В.К. Тартаковский. Дифракционное рассеяние на атомных ядрах слабосвязанных ядер с двумя заряженными кластерами. ЯФ 69(2) (2006) 252.

3. І.О. Корж, М.Т. Скляр, А.Д. Фурса. Вплив змішування станів мультиплетів у ядрі ^{27}Al на перерізи розсіяння нейтронів. УФЖ 53(8) (2008) 744.
4. В.В. Давидовский, А.Д. Фурса. Энергетические спектры протонов в дифракционном расщеплении дейтронов ядрами ^{12}C и ^{40}Ca при средних энергиях. Ядерна фізика та енергетика 17(2) (2016) 111.
5. А.А. Куртева, В.Е. Митрошин. Учет коллективных степеней свободы при бета-распаде нечетных ядер. Изв. РАН. Сер. физ. 74(6) (2010) 911.
6. M.E. Dolinska, N.L. Doroshko, V.S. Olkhovsky. To the modification of nuclear-chronometry methods in astrophysics and geophysics with considering excited states of alpha-radioactive nuclei and of gamma-emissions. Intern. J. of Mod. Phys. E 23(6) (2014) 146007.
7. M. Dolinska, C. Dimopoulou, A. Dolinskii. Time-Domain Approach for Stochastic Cooling. Physica Scripta 166 (2015) 014049.
8. V.S. Olkhovsky, M.E. Dolinska, S.A. Omelchenko. On new experimental data manifesting the time resonances (or explosions). Central Europ. J. Phys. 9(4) (2011) 1131.
9. P. Aguar Bartolomé, M. Romaniuk et al. First measurement of the helicity dependence of ^3He photoreactions in the $\Delta(1232)$ resonance region. Phys. Lett. B 723 (2013) 71.
10. L.S. Martseniuk. Change Time of Identical Particles through the Rectangular Barrier at Their Exchange interaction. Problems of Atomic Science and Technology 5 (2014) 35.
11. L.S. Martseniuk. About the mechanism of arising of the superconductivity, induced by water in compounds SrFe_2As_2 and $\text{FeTe}_{0.8}\text{S}_{0.2}$. In: Superconductivity Properties Applications and New Developments. Chapter 2. Ed. by P. Grant (New York: Nova Publisher, 2016) p. 17.
12. S.P. Maydanyuk, P.-M. Zhang, L.-P. Zou. New quasibound states of the compound nucleus in α -particle capture by the nucleus. Phys. Rev. C 96 (2017) 014602.
13. S.P. Maydanyuk, P.-M. Zhang, L.-P. Zou. A new approach for extraction of information on many-nucleon structure in alpha decay from accompanying bremsstrahlung emission. Phys. Rev. C 93 (2016) 014617.
14. В.С. Ольховський, Н.Л. Дорошко, М.Е. Долінська. Необхідність перегляду часових характеристик ядер-хронометрів. УФЖ 46(3) (2001) 277.
15. N. Doroshko, M. Dolinska. Investigation of the time decay characteristics of the nuclear-chronometers in order to revision of the astrophysics objects age. Problems of Atomic Science and Technology 5(44) (2004) 89.

СЕКЦІЯ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

ВІДДІЛ ДОСЛІДНИЦЬКОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Відділ дослідницького ядерного реактора створений 3 жовтня 2000 р. на базі відділу проблем зняття з експлуатації ядерних установок та дослідницького ядерного реактора, який на той час був окремою структурною одиницею. Керує відділом чл.-кор. НАН України, д.ф.-м.н. Василь Іванович Слісенко.

У відділі працюють 2 доктори і 6 кандидатів наук. У структуру відділу входять лабораторія нейтронної фізики та дослідницький ядерний реактор ВВР-М.

Основним завданням відділу є науковий та науково-технічний супровід безпечної експлуатації ядерного реактора; дослідження низько-енергетичних збуджень конденсованого стану речовини за допомогою спектроскопії повільних нейтронів, а саме: коливання атомів і молекул, дифузія атомів і молекул, ефекти кристалічного електричного поля в сполуках рідкоземельних елементів тощо; дослідження ядер, що діляться, за допомогою спектрометрії множинності; розробка радіаційних технологій, зокрема отримання радіоактивних ізотопів; розробка методів визначення вмісту радіоактивних речовин, що діляться.



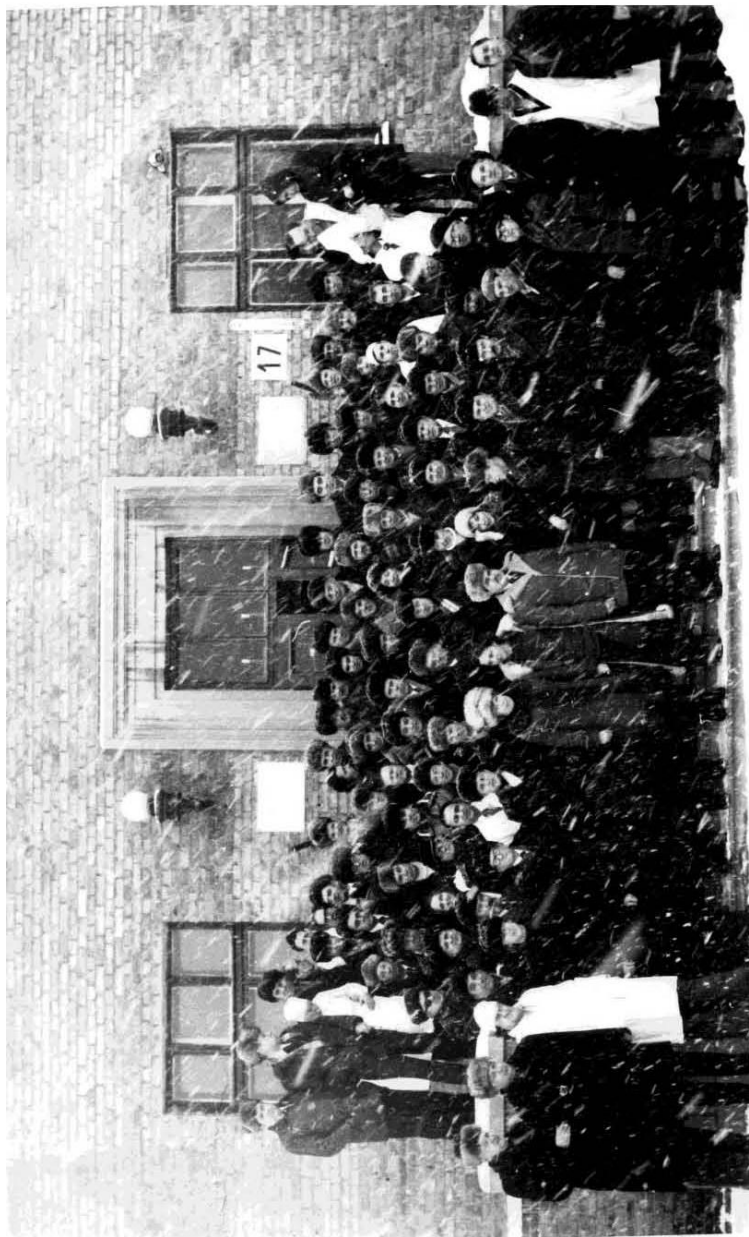
В. І. Слісенко



Зліва направо: С. І. Азаров (д.ф.-м.н.), О. А. Василькевич (к.ф.-м.н.),
Н. І. Мазіна (к.ф.-м.н.), Ю. Г. Щепкін (к.ф.-м.н.)

У відділі виконуються наукові дослідження та розробляються технічні заходи щодо вдосконалення діючих та введення в експлуатацію нових систем, важливих для безпечної експлуатації. Зокрема, за участю працівників відділу розроблено проект та введено в експлуатацію нову систему управління та захисту (СУЗ) реактора, в якій використано сучасні ідеї створення апаратури управління і реєстрації параметрів реактора на базі сучасної елементної бази. У рамках проекту заміни СУЗ замінено всю апаратуру контролю параметрів реактора, апаратуру управління електродвигунами насосів 1-го і 2-го контурів, електродвигунів спецвентиляторів та всі силові і контрольні електрокабелі, ізоляція яких не поширює горіння. У відділі було розроблено та узгоджено в Державній інспекції ядерного регулювання України проект модернізації системи поводження з відпрацьованим ядерним паливом. Реалізація проекту здійснена за технічним наглядом працівників відділу спеціалізованою будівельно-монтажною організацією. У рамках цього проекту створено додаткове сховище відпрацьованого ядерного палива, що дало можливість привести систему зберігання відпрацьованого ядерного палива до вимог сучасних правил ядерної безпеки: при виході з ладу проектного сховища (побудоване в 1959 р.) відпрацьовані паливні елементи можуть бути розміщені в новому сховищі. Нове сховище дає змогу використати сучасну технологію завантаження відпрацьованих паливних збірок у контейнери для відправлення їх за межі інституту. Реалізація цих проектів дала можливість привести системи, важливі для безпеки, у відповідність до вимог сучасних правил ядерної безпеки.

У 2004 р. Міністерство енергетики та Національна адміністрація з ядерної безпеки США виступили з ініціативою щодо зменшення ризику викрадення та незаконного використання ядерних і радіоактивних матеріалів, а також забезпечення їхнього надійного зберігання (міжнародна програма «Глобальна ініціатива із зменшення загрози»). До цієї програми долучилася й Україна. Відповідно до програми у відділі було здійснено модернізацію сховища відпрацьованого ядерного палива і шляхів транспортування високоактивного палива з урахуванням можливостей оперативної та якісної дезактивації на випадок виникнення аварійної ситуації. Було встановлено додаткову систему відеоспостереження, цифрового запису та зберігання інформації, додаткову систему фізичного захисту і автоматизованої системи пожежної сигналізації, а також додаткову систему радіаційного контролю і сигналізації щодо самопідтримуваної ланцюгової реакції, потужності



12 лютого 1985 р. 25 років від дня фізичного пуску реактора

еквівалентної дози гамма-випромінювання, об'ємної активності бета-аерозолів, забруднення радіонуклідами інструментів, спецодягу, персоналу тощо.

Після проходження всіх необхідних процедур і в присутності міжнародних експертів високоактивне високозбагачене відпрацьоване ядерне паливо було підготовлено до відправлення й вивезено з території України. Натомість на це одержано низькозбагачене ядерне паливо. Для конверсії реактора на низькозбагачене ядерне паливо було виконано розрахунки нейтронно-фізичних та теплогідрравлічних характеристик рівноважної активної зони реактора з низькозбагаченим паливом і проведено аналіз безпеки реактора в різних умовах, включаючи запроекту аварію з розплавленням активної зони. Отримані результати гарантують безпечну роботу реактора. Завдяки оптимізації компоновки активної зони забезпечується висока ефективність використання реактора з низькозбагаченим ядерним паливом при виконанні вимог, установлених в експлуатаційних межах і критеріях безпеки.

За розробленими працівниками відділу технічними завданнями спеціалізованими організаціями Києва проведено розрахунки міцності (з урахуванням сейсмічності) корпусу (бака) реактора, трубопроводів і обладнання 1-го контуру, обладнання систем аварійного охолодження реактора, в яких показано можливість їхнього використання в подальшому.

Персоналом відділу проведено роботи щодо обґрунтування безпеки експлуатації реактора. На підставі того, що більшість важливих для експлуатації систем реактора модернізовано чи замінено новими з використанням позитивних результатів розрахунків міцності систем, що працюють без заміни з 1960 р., розроблено новий варіант технічного обґрунтування безпеки експлуатації реактора, в якому показано можливість експлуатації реактора до 2023 р.

У відділі обґрунтовано, експериментально підтверджено та реалізовано можливість виробництва в новій активній зоні реактора ^{99}Mo для отримання $^{99\text{m}}\text{Tc}$, важливого для застосування в ядерній медицині. Досвід і технологічні розробки з одержання радіонуклідів, а також виготовлення з них зразків дали змогу створити технології дослідно-промислового виробництва радіонуклідної продукції для потреб практики. Зокрема, це закриті джерела випромінювання як загальнотехнічного, так і медичного призначення, а також препарати для різних сфер використання, у тому числі й радіофармпрепарати для медицини. Насамперед розчин $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$ потрібної активності у стерильних заваль-



12 лютого 2010 р. 50 років від дня фізичного пуску реактора

цьованих флаконах пройшов доклінічні дослідження на тваринах в Інституті онкології АМН України. Результати досліджень показали відповідність характеристик препарату вимогам нормативних документів до лікувальних препаратів. Створена в інституті стаціонарна технологічна лінія з виробництва стерильного розчину $\text{Na}^{99\text{m}}\text{TcO}_4$ може забезпечити готовим радіофармпрепаратом медичні установи (клініки) Києва та прилеглих регіонів.



Візит президента НАН України академіка Б. Є. Патона
на дослідницький ядерний реактор

У відділі розроблено низку ефективних нейтронних методів дослідження конденсованого стану речовини в широкому діапазоні від іонних, молекулярних і міцелярних водних розчинів до гелів та твердих сполук. Методами нейтронної спектроскопії було визначено характеристики молекулярно-динамічного стану низки розчинів простих і складних органічних сполук; створені методи дослідження молекулярно-динамічного стану речовин у міцелярному стані. Це дає змогу на основі кількісних характеристик молекулярно-динамічного стану встановлювати специфічні особливості перебігу процесів на мікрорівні: міцелоутворення, агрегативної і седиментаційної стійкості дисперсних систем, гелеутворення, комплексоутворення тощо. Це новий напрямок у фізико-хімії дисперсних систем, який ґрунтується на дослідженнях впливу наночастинок різної природи на молекулярно-динамічний стан середовища.

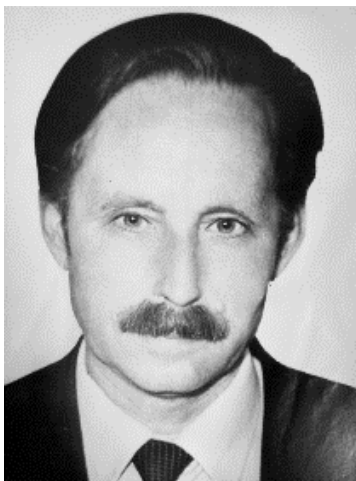


Академіки НАН України І. М. Вишневський, А. Г. Наумовець, генеральний директор НВП «Радій» О. А. Сіора, президент НАЕК «Енергоатом» Ю. О. Недашковський, акад. НАН України Л. А. Булавін під час введення в експлуатацію новітньої системи управління і захисту дослідницького ядерного реактора

У відділі створено і функціонує спектрометр для вимірювання нейтронних перерізів, дослідження взаємодії нейтронів з речовиною і розв’язування прикладних задач. В основі його роботи лежить метод спектрометрії множинності випромінювання, тобто спектрометрії кількості частинок, що утворюються в процесах випромінювання. Поєднання методу спектрометрії множинності із спектрометрією енергії і часу досліджуваних реакцій дає змогу одночасно реєструвати акти різних процесів, що відбуваються в досліджуваних зразках і виділення ймовірності кожного із них, визначати абсолютні значення кількості актів досліджуваних процесів унаслідок високої ефективності їхньої реєстрації, досліджувати рідкісні процеси завдяки низькому рівню фону внаслідок можливості введення подій з високою множинністю при одночасній відносно великій ефективності їхньої реєстрації. За допомогою даного спектрометра проведені різноманітні нейтронні дослідження – розроблена методика і проведені вимірювання перерізів радіоактивних ядер, розроблена методика аналізу кількості ядер, що діляться.

Лабораторія нейтронної фізики

Лабораторію нейтронної фізики створено на базі відділу нейтронної фізики 1 вересня 2017 р. як структурну одиницю відділу дослідницького ядерного реактора.



В. П. Вертебний



А. В. Мурзін
(1938 - 1998)



О. О. Грицай

Відділ нейтронної фізики створено в 1973 р. З 1973 по 1987 р. відділ очолював д.ф.-м.н., проф. Вадим Павлович Вертебний, з 1987 по 1998 р. – д.ф.-м.н., проф. Артур Володимирович Мурзін, з 1998 р. по 2017 р. – к.ф.-м.н. Олена Олександрівна Грицай, яка зараз очолює лабораторію нейтронної фізики.

У лабораторії нейтронної фізики виконуються експериментальні дослідження ядерно-фізичних характеристик атомних ядер: визначення з високою точністю нейтронних перерізів при взаємодії з ядрами квазімоноенергетичних нейтронів із середніми

енергіями, що забезпечує отримання однозначних ядерно-фізичних характеристик, необхідних як для розвитку модельних уявлень про

механізми взаємодії нейтронів з ядрами, так і для вирішення прикладних задач ядерної енергетики; удосконалення існуючих та впровадження нових експериментально-розрахункових методик, розробка та впровадження нових інтерференційних нейтронних фільтрів.

Співробітниками лабораторії отримано значення перерізів реакцій взаємодії нейтронів теплових, резонансних та проміжних енергій з-понад 100 атомними ядрами. Більшість нейтронних даних, а для радіоактивних ядер – усі, було одержано вперше. Уперше досліджено нейтронні резонанси для ядер в області масових чисел $A = 130 - 200$. Установлено ізотопну залежність густини рівнів збуджених ядер; показано, що нуклідам із числом нейтронів 100 - 110 притаманні властивості магічних ядер, що є експериментальним підтвердженням теорії В. М. Струтинського про зміщення замкнутих оболонок при деформації ядер.

Одержано великий об'єм спектроскопічної інформації про властивості нижніх збуджених станів. Досліджено закономірності розпаду s-, p- та d-резонансів, залежність радіаційних силових функцій від енергії. Досліджено широке коло середніх та важких ядер для встановлення статистичних та нестатистичних закономірностей розпаду високозбуджених станів ядер. Розроблено та успішно впроваджено на реакторі ВВР-М багатопрофільну експериментальну базу для досліджень взаємодії нейтронів з ядрами методами нейтронної спектрометрії – це установка для одержання та дослідження радіоактивних ядер, унікальні набори нейтронних фільтрів на основі як природних елементів, так і збагачених ізотопів, що дозволяють формувати квазімоноенергетичні пучки нейтронів, реакційна камера для дослідження високоенергетичної частини спектра нейтронів реактора.

У лабораторії нейтронної фізики функціонує Український центр ядерних даних (керівник центру О. О. Грицай), що забезпечує надання інформаційної підтримки та послуг в отриманні ядерних даних користувачам в Україні (у тому числі проведення оновлення та підтримки сайту УКРІЦЯД <http://ukrndc.kinr.kiev.ua/>); здійснення компіляції експериментальних даних, отриманих українськими вченими, представлення їх у форматі EXFOR для включення до світового банку експериментальних даних CSISRS/EXFOR; надання допомоги в підготовці багатогрупових бібліотек для потреб ядерних технологій в Україні, розповсюдженні комп'ютерних програм для фундаментальних і прикладних розрахунків.

Український центр ядерних даних створено в 1996 р. як підрозділ ІЯД НАН України, з 1998 р. він входить до мережі центрів ядерних даних, що працюють під егідою МАГАТЕ, що забезпечує включення експериментальних результатів українських учених до міжнародного банку даних, сприяє обміну та використанню ядерно-фізичних даних та програмних комплексів, вироблених усією світовою науковою спільнотою, українськими вченими для вирішення фундаментальних і прикладних задач.

У лабораторії нейтронної фізики функціонує Український центр INIS (International Nuclear Information System), який входить до мережі центрів INIS, що працюють під егідою МАГАТЕ (Український центр INIS створено в інституті в 1973 р.), що забезпечує розповсюдження інформації в галузі ядерної науки та техніки, отриманої в Україні, серед міжнародної наукової спільноти, а також отримання українськими користувачами інформації в галузі ядерної науки та техніки (у тому числі важко доступної), отриманої всім світовим співтовариством. Керівником центру INIS в ІЯД з 1973 по 2017 р. була к.ф.-м.н. Ж. І. Писанко, зараз центром керує к.ф.-м.н. А. К. Гримало.



Ж. І. Писанко



А. К. Гримало

У лабораторії виконувалось декілька проектів УНТЦ (Науково-технологічний центр України), у тому числі: партнерський проект з Ліверморською національною лабораторією (США); проект CRDF (Civilian Research and Development Foundation) з Орегонським університетом (США); спільний проект з Узбекистаном; проекти в рамках угоди про спільні дослідження з Мюнхенським технічним університетом (Hi-

меччина) і Лабораторією нейтронної фізики ОІЯД (Дубна, Росія), про науково-технічне співробітництво з Об'єднаним інститутом енергетичних та ядерних досліджень «Сосни» НАНБ (Мінськ, Білорусь) і Гомельським державним технічним університетом (Білорусь); продовжується науково-інформаційне співробітництво із Секцією ядерних даних МАГАТЕ (Відень, Австрія).

Дослідницький ядерний реактор ВВР-М

Роботою дослідницького ядерного реактора ВВР-М з 2000 р. керує головний інженер Володимир Миколайович Макаровський.

Дослідницький ядерний реактор ВВР-М (далі – реактор) було введено в експлуатацію 12 лютого 1960 р. З 1959 по 2000 р. головними інженерами реактора були: Ілля Федорович Барчук, Дмитро Тихонович Пилипець, Володимир Сергійович Карасьов, Юрій Арсентійович Цибулько, Іван Григорович Сисевич, Анатолій Леонідович Кирилук, Віктор Іванович Остапенко, Олексій Геннадійович Д'яков, Михайло Власович Лисенко.



В. М. Макаровський

Реактор використовується як потужне джерело нейтронів для проведення фундаментальних і прикладних досліджень у різних галузях науки і техніки.

Надійність роботи реактора забезпечується його конструкцією, професійною експлуатацією обладнання та систем, постійним оновленням та модернізацією обладнання.

З метою підвищення безпеки експлуатації обладнання і систем реактора за останні роки було виконано багато робіт, у тому числі замінено теплообмінники і частину спеціальної вентиляції; створено систему безперервного контролю радіонуклідів у теплоносії 1-го контуру реактора, систему поводження з відпрацьованим ядерним паливом реактора, що значно підвищило радіаційну безпеку експлуатації цієї системи; створено надчутливий імпульсний канал вимірювання та контролю нейтронного потоку; уведено в експлуатацію нову систему фізичного захисту реактора, додаткове джерело аварійного електроживлення дизель-електростанції; впроваджено сучасну систему радіа-

ційного контролю автотранспорту при виїзді з території реактора та інституту; виконано додаткові розрахунки на сейсмостійкість та міцність корпусу реактора.

За результатами виконаних робіт було отримано ліцензію на експлуатацію реактора.



Основні характеристики реактора

Номінальна потужність, МВт	10
Уповільнювач і теплоносій	легка вода
Відбивач нейтронів	берилій
Паливо	уран, збагачення < 20 %
Висота активної зони, мм	600
Паливна збірка	BVR-M2
Кількість паливних збірок	до 256
Максимальний потік нейтронів, н/(см ² · с)	$1,2 \cdot 10^{14}$
Кількість горизонтальних каналів	10
Кількість вертикальних каналів	20

Протягом всієї експлуатації дослідницького ядерного реактора проводиться систематичний радіаційний контроль за його впливом на навколишнє природне середовище. Отримані результати радіаційного моніторингу свідчать, що за всі роки експлуатації реактора рівні забруднення об'єктів радіаційного контролю не перевищували харак-

терні для Києва рівні й були значно нижчими від допустимих рівнів, регламентованих діючими в Україні нормативними документами, а отже, і не являють собою загрозу для населення міста.



Заступники головного інженера реактора (зліва направо)
А. І. Пасічник, В. М. Шевель, Ю. М. Нестерук
і головний технолог реактора М. В. Лисенко



Завідувачі служб реактора. Зліва направо стоять: В. В. Давиденко, Т. Г. Луданова, О. П. Волох, І. А. Хомич, О. Г. Д'яков; зліва направо сидять: Є. Д. Луфєренко, Т. В. Ссаулкова, Н. К. Жирова



О. Ф. Рудик

Провідного інженера відділу дослідницького ядерного реактора О. Ф. Рудика відзначено Державною премією України в галузі науки і техніки (2006), а завідувача відділу В. І. Слісенка – Грамотою Верховної Ради України, чотирма Почесними грамотами Президії НАН України, премією імені О. І. Лейпунського, званням «Почесного працівника атомної енергетики України» та Почесною відзнакою «15 років ДП НАЕК «Енергоатом»».

Співробітники відділу брали активну участь у ліквідації наслідків аварії на ЧАЕС.

У науково-дослідних роботах і розробках технологій на реакторі спільно з відділами ІЯД брали участь установи НАН України: Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», Інститут геохімії навколишнього середовища, Інститут прикладної фізики, Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова, Інститут фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова, Інститут металофізики імені Г. В. Курдюмова, Інститут електронної фізики, Інститут колоїдної хімії та хімії води, Інститут хімії високомолекулярних сполук, Інститут загальної та неорганічної хімії, Інститут хімії поверхні, Інститут ботаніки, Інститут клітинної біології та генної інженерії, Інститут молекулярної біології та генетики, Інститут гідробіології, Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення; вищі навчальні заклади України: Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Одеський національний політехнічний інститут; представники НАЕК «Енергоатом», Кіровоградського НВП «Радій»; закордонні організації: ОІЯД (Дубна, Росія), Мюнхенський технічний університет (Німеччина), ЦЕРН, Інститут ядерної фізики (Падуя, Італія), Масачусетський інститут технологій, Міністерство енергетики США, Вашингтонський університет (США), Інститут трансранових елементів (Євросоюз), Інститут ядерної фізики АН Республіки Узбекистан.

Співробітниками відділу зареєстровано такі патенти України:

1. Пат. № 1601. Спосіб визначення розміру поглинутої дози гамма і нейтронного випромінювання (П.О. Вознюк, В.М. Шевель) Опубл. 15.10.1993.
2. Пат. № 10809 А. Спосіб очистки водних розчинів від іонів металів біомасою мікроорганізмів (О.Б. Таширевіч, В.М. Шевель) Опубл. 25.12.1996, бюл. № 4.
3. Пат. № 61512 А (G01T3/06). Детектор нейтронів (Я.В. Буряк, П.О. Вознюк, В.М. Шевель, В.Т. Адамів, І.М. Теслюк) Опубл. 11.2003.
4. Пат. № 87509. Спосіб електрохімічного полірування нержавіючих і низьколегованих сталей (І.М. Юденкова, А.О. Омелечук, В.М. Шевель, М.А. Масло, М.Ф. Захарченко) Опубл. 10.02.2014, бюл. № 3.
5. Пат. № 56382. Корисна модель: нейтронно-захисний гідрид титану, високо водневий сповільнювач нейтронів гідриду цирконію (В.В. Скороход, Р.О. Морозова, О.В. Кондрашов, В.М. Шевель та ін.) Опубл. 10.01.2011.
6. Пат. № 87509. Спосіб електрохімічного полірування нержавіючих і низьколегованих сталей (І.М. Юдінкова, А.О. Омелечук, В.М. Шевель, М.А. Масло, М.Ф. Захарченко) Опубл. 10.02.2014.
7. Пат. № 86967. Спосіб промислового виробництва екстракційного технецію-99m (^{99m}Tc) (В.М. Шевель, В.П. Левченко) Опубл. 10.01.2014.

Список найбільш важливих публікацій відділу.

1. Л.А. Булавін, Т.В. Кармазіна, В.В. Клепко, В.І. Слісенко. *Нейтронна спектроскопія конденсованих середовищ* (К.: Академперіодика, 2005) 605 с.
2. Л.А. Булавін, В.І. Слісенко, А.А. Василькевич, В.А. Губанов, В.Ф. Королович, Н.М. Белый, А.П. Науменко, В.І. Ковальчук. Термодинамические и оптические свойства жидкостных систем «вода – одностенные углеродные нанотрубки». В кн.: *Наноразмерные системы и наноматериалы: исследования в Украине*. Под ред. А.Г. Наумовца (К.: Академперіодика, 2014) с. 127.
3. І.М. Вишневецький, Г.П. Гайдар, О.В. Коваленко, Т.В. Ковалінська, М.Ф. Коломієць, А.І. Липська, П.Г. Литовченко, В.І. Сахно, В.М. Шевель. *Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України* (К.: Ін-т ядерних дослідж., 2014) 176 с.

ВІДДІЛ ПРОБЛЕМ ДОЗИМЕТРІЇ ЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ

Відділ був створений у 2000 р. з метою виконання робіт з науково-технічної підтримки безпечної експлуатації енергоблоків АЕС України. З часу створення відділу і дотепер керівником є к.ф.-м.н. Володимир Миколайович Буканов.



В. М. Буканов

Безпека експлуатації реакторної установки значною мірою залежить від надійності захисних бар'єрів, що перешкоджають виходу продуктів реакції поділу в навколишнє середовище. Для атомних енергетичних установок з водо-водяними реакторами одним з найбільш важливих бар'єрів безпеки є корпус реактора. Безумовною вимогою до корпусу є збереження цілісності при штатних умовах експлуатації та при будь-яких проектних аваріях. Отже, забезпечення надійної та безпечної експлуатації реактора і реакторної установки в цілому неможливе без контролю стану металу корпусу реактора протягом усього призначеного терміну

служби. Здійснення такого контролю приводить до необхідності розробки та впровадження на АЕС систем, які забезпечували б на сучасному рівні реєстрацію нейтронно-фізичних параметрів, що впливають на працездатність елементів першого контуру енергоблока. До таких систем відноситься створена співробітниками відділу система моніторингу радіаційного навантаження, яка забезпечує визначення величин функціоналів нейтронного потоку, що діє на корпус (к.ф.-м.н. О. Г. Васильєва, к.т.н. В. Л. Дем'юхін, к.т.н. О. М. Пугач).

Основою системи є спеціальна сучасна методика, яка включає чисельні розрахунки переносу нейтронів у біякорпусному просторі реактора методом Монте-Карло та дозиметричні вимірювання біля його зовнішньої поверхні.

Розрахунки переносу нейтронів виконуються розробленим співробітниками відділу пакетом програм MCPV (к.т.н. О. В. Гриценко, С. М. Пугач). Відповідно до вимог, діючих в атомно-енергетичному комплексі України, пакет програм пройшов процедуру верифікації і за її результатами включений до Переліку дозволених для використання в ДП НАЕК «Енергоатом» розрахункових кодів для обґрунтування безпеки ядерних установок.

Для отримання експериментальних даних біля зовнішньої поверхні корпусу ВВЕР використовуються нейтронно-активаційні детектори. Детектори виготовлені з матеріалів, сертифікованих для реакторної нейтронної дозиметрії Інститутом стандартизованих матеріалів і вимірювань Об'єднаного дослідницького центру під егідою Європейської Комісії.

Спектрометричні вимірювання опроміненіх нейтронно-активаційних детекторів здійснюються спеціалістами відділу за допомогою сучасного спектрометричного обладнання (О. Г. Васильєва, к.ф.-м.н. Т. М. Лашко).

Отримані експериментальні дані використовуються для обґрунтування достовірності результатів визначення умов опромінення корпусу реактора.

Роботи з моніторингу радіаційного навантаження корпусів ВВЕР виконуються спеціалістами відділу на всіх енергоблоках АЕС України. Отримані дані використовуються при визначенні поточного стану корпусу реактора та прогнозуванні терміну його безаварійної роботи.

Важливим джерелом інформації про зміну властивостей матеріалів корпусу реактора під впливом нейтронного опромінення є програма зразків-свідків, дослідження яких проводяться в ІЯД. Дозиметрія зразків-свідків виконується за допомогою розробленої співробітниками відділу методики, основою якої є пакет прикладних програм MCSS (О. В. Гриценко, С. М. Пугач, В. Л. Дем'янін). Як і пакет програм MCPV, пакет MCSS пройшов процедуру верифікації і за її результатами включений до Переліку дозволених для використання в ДП НАЕК «Енергоатом» розрахункових кодів для обґрунтування безпеки ядерних установок.

Відповідно до «Енергетичної стратегії України на період до 2030 року», затвердженою Розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071-р від 24 липня 2013 р., одним з основних завдань перспективного розвитку атомно-енергетичного комплексу є «...продовження строку експлуатації діючих енергоблоків АЕС до 20 років за умов позитивних підсумків періодичної переоцінки безпеки».

Комплексна програма робіт з продовження строку експлуатації діючих енергоблоків АЕС України схвалена Розпорядженням Кабінету Міністрів України № 263-р від 29 квітня 2004 р. «Про схвалення комплексної програми робіт з продовження строку експлуатації діючих енергоблоків атомних електростанцій».

Важливим та достатньо складним етапом зазначених робіт є науково-технічне обґрунтування можливості продовження терміну роботи енергоблока на понадпроектний період, зокрема визначення та прогнозування флюенсу нейтронів на внутрішньокорпусні пристрої та опорні елементи корпусу реактора.

Внутрішньокорпусні пристрої та опорні елементи корпусів реакторів енергоблоків ВВЕР мають обмежений термін служби. Засобом, що дозволяє уникнути заміни внутрішньокорпусних пристроїв та опорних елементів, є реалізація комплексу організаційно-технічних заходів, спрямованих на об'єктивну оцінку технічного стану та обґрунтування можливості перепризначення терміну служби цих важливих конструкційних елементів реактора ВВЕР.

Конструкція реактора ВВЕР не дозволяє експериментально визначити радіаційне навантаження, зокрема флюенс нейтронів на внутрішньокорпусні пристрої та опорні елементи реакторної установки. Тому з метою визначення умов опромінення, поточного та накопиченого радіаційного навантаження цих конструкційних елементів спеціалістами відділу розроблено спеціальну сучасну методику, основу якої становлять чисельні розрахунки переносу нейтронів у біякорпусному просторі реактора методом Монте-Карло (О. В. Гриценко, С. М. Пугач, В. Л. Дем'янін, к.т.н. В. В. Ількович).

За допомогою вказаної методики визначено умови опромінення внутрішньокорпусних пристроїв та опорних елементів реакторів ряду енергоблоків АЕС України. Отримані дані використано при науково-технічному обґрунтуванні можливості подовження терміну експлуатації енергоблоків на понадпроектний період.

У реакторі ВВЕР-1000 шість комплектів зразків-свідків штатної програми, яка надає інформацію про зміну властивостей матеріалів корпусу реактора під впливом нейтронного опромінення, розташовуються біля внутрішньої поверхні шахти реактора в просторі між вигородкою та блоком захисних труб. У трьох перших комплектах зразки розташовані у двох рядах: один над одним, а в інших – тільки на верхньому.

Дослідження з використанням технології реконструкції зразків-свідків, що опромінювались у дворядних контейнерних збірках, надають інформацію про зміну властивостей матеріалів корпусу реактора, яка забезпечує супровід безпечної експлуатації корпусу до закінчення проектного терміну. Разом з тим штатна програма зразків-свідків не в змозі забезпечити матеріалознавчий супровід експлуатації корпусу реактора в понадпроектний період. У зв'язку з цим «Типовая программа контроля свойств металла корпусов реакторов ВВЭР-1000 по образцам-свидетелям» № ПМ -Т.0.03.120-08 вимагає розробки і реалізації додаткових програм, які б, насамперед, забезпечували випереджаче опромінення зразків-свідків порівняно з корпусом реактора.

Спеціалістами відділу розроблено оригінальний підхід до вирішення цієї проблеми, що базується на модернізації однорядних контейнерних збірок зі зразками-свідками, які зараз опромінюються в реакторах ВВЕР-1000 АЕС України (О. В. Гриценко, В. Л. Дем'янін,

В. В. Ількович). З використанням цього підходу розроблені та погоджені Держатомрегулювання України «Рабочая программа модернизации однорядных облучаемых контейнерных сборок с образцами свидетелями металла корпуса реактора энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС ПМ.1.0019.0073» і «Программа модернизации облучаемых контейнерных сборок с образцами-свидетелями металла корпуса реактора энергоблока № 2 ОП ЗАЭС 02.РО.00.ПМ.205-14/Н».

На теперішній час реалізовано перший етап «Рабочей программы модернизации однорядных облучаемых контейнерных сборок с образцами свидетелями металла корпуса реактора энергоблока № 1 ОП ЮУАЭС ПМ.1.0019.0073» – виконано модернізацію контейнерної збірки 5Л2 зі зразками-свідками металу зварного шва корпусу реактора, розроблено, затверджено на АЕС та узгоджено Держатомрегулювання України «Рабочую программу контроля свойств металла сварного шва корпуса реактора энергоблока № 1 ЮУАЭС в процессе эксплуатации по образцам-свидетелям ПМ-Т.41.125-14» і модернізовану контейнерну збірку 5Л2 встановлено в реактор для подальшого опромінення. Це дало змогу забезпечити матеріалознавчий супровід безпечної експлуатації корпусу реактора энергоблока № 1 ВП ЮУАЕС у понадпроектний період.

Значні дози радіаційного опромінення, яким піддаються конструкційні елементи ядерного енергетичного реактора (перш за все внутрішньокорпусні пристрої та корпус реактора) викликає виникнення цілого комплексу дефектів, що призводять до деградації фізико-механічних властивостей матеріалів, з яких ці елементи виготовлено. Радіаційні пошкодження ініціюються на атомному рівні, але макроскопічні ефекти деградації, такі як розпухання, повзучість, окрихчування тощо, у дійсності виникають у результаті мікроструктурних змін. У свою чергу, еволюція мікроструктури матеріалу дуже залежить від його температури, яка в конструкційних елементах реактора значною мірою обумовлена ефектом радіаційного розігріву внаслідок радіаційного енерговиділення. Конструкція реакторів корпусного типу практично виключає можливість безпосереднього визначення радіаційного енерговиділення по об'єму внутрішньокорпусних пристроїв і корпусу.

Для вирішення цієї задачі має використовуватися спеціальна методика, що базується на розрахунках переносу випромінювання (нейтронів і гамма-квантів) у складному гетерогенному середовищі ядерного реактора. Створення такої сучасної методики визначення дози та радіаційного енерговиділення в конструкційних елементах реактора ВВЕР є першочерговим завданням, яке стоїть перед співробітниками відділу проблем дозиметрії ядерних реакторів.

**СЕКЦІЯ РАДІАЦІЙНОЇ ФІЗИКИ
ТА РЕАКТОРНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА**

ВІДДІЛ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ

Відділ теоретичної фізики створено в 1972 р. Засновником відділу і його першим керівником був лауреат Ленінської премії СРСР, д.ф.-м.н., проф. Андрій Федорович Лубченко. З 1979 р. відділом керує чл.-кор. НАН України, лауреат Державної премії УРСР і Премій імені К. Д. Синельникова та С. І. Пекара, д.ф.-м.н., проф. Володимир Йосипович Сугаков.



А. Ф. Лубченко



В. Й. Сугаков

Метою створення відділу є теоретичний супровід досліджень проблеми взаємодії опромінення з конденсованим середовищем.

Уже з перших років роботи відділу А. Ф. Лубченко застосував нове на той час поняття про квазічастинки «дефектони» до радіаційних явищ. Разом з В. М. Павловичем А. Ф. Лубченко запропонував метод прискорення дифузії домішок в кристалах. На жаль, А. Ф. Лубченко рано пішов з життя.

Під керівництвом В. Й. Сугакова у відділі виконано низку наукових досліджень у широкій області радіаційної фізики твердого тіла, які є піонерськими. Так, В. Й. Сугаков перший застосував методи синергетики до дослідження радіаційних дефектів. В. Й. Сугаков і С. В. Шияновський першими почали вивчати вплив опромінення на

рідкі кристали, дослідження і застосування яких у той період лише починалося. Вони зініціювали ці роботи в Інституті фізики НАН України і надрукували перший огляд з радіаційної фізики рідких кристалів (В. О. Ліньов, В. Й. Сугаков, С. В. Шияновський). О. Я. Дзюблик виконав важливі роботи по застосуванню тонких методів ядерної фізики до вивчення процесів у кристалах. І. І. Фіщук плідно використав теоретичні методи дослідження неупорядкованих напівпровідників до пояснення процесів в актуальній прикладній області – фізики полімерів. Нові ефекти в теорії надпровідності кристалів з радіаційними порами та проходження частинок у деформованому кристалі отримав талановитий фізик В. М. Рудько, який, на жаль, помер у молодому віці.

У 1995 р. з відділу виділився відділ теорії ядерних реакторів (ВТЯР) під керівництвом д.ф.-м.н., проф. В. М. Павловича. У 2016 р. відділи були об'єднані під час оптимізації структури інституту. Основні результати наукової роботи ВТЯР з 1995 по 2016 р. представлено окремо.

Основні напрямки досліджень відділу теоретичної фізики.

Процеси самоорганізації в кристалах при ядерному та електромагнітному опроміненні. Властивості неупорядкованих систем та наноструктур у зовнішніх полях. Транспорт зарядів у напівпровідникових полімерах. Теорія напівпровідникових детекторів. Атомно-ядерні процеси. Месбауєрівська спектроскопія та розсіяння нейтронів кристалами. Теоретичне дослідження питань безпеки ядерних реакторів та ядерно-небезпечних систем у стаціонарних і перехідних режимах. Розрахунки критичності і нейтронних параметрів, створення моделей перехідних процесів, у тому числі аварійних.

Основні наукові досягнення та науково-технічні розробки.

Розвинено квантову теорію дифузії домішок і дефектів у кристалах. Виявлено важливу роль ангармонізму коливань атомів кристалів у процесах дифузії і досліджено квантовий характер дифузійних процесів легких домішок типу водню і дейтерію в металічних кристалах. На



В. М. Павлович

основі розвинутої теорії було передбачено ефект прискорення дифузії домішок у напівпровідникових і діелектричних кристалах при опроміненні їх резонансним лазерним світлом (А. Ф. Лубченко, В. М. Павлович). Цей ефект пізніше було підтверджено експериментально (В. М. Павлович, В. І. Сорока, Є. М. Кудрявцев (ФІАН, Москва)).

Побудовано теорію процесів самоорганізації в кристалах та на її основі досліджено низку явищ й отримано нові ефекти в кристалах у зовнішніх полях (В. Й. Сугаков), а саме:

на базі теорії створено нову модель утворення періодичних дисипативних структур – просторових надграток та автоколивань густини дефектів – при ядерному опроміненні кристалів (В. Й. Сугаков);

показано виникнення в бінарних напівпровідниках нестабільності стосовно утворення областей з високою концентрацією антиструктурних дефектів. При умові, що одна з компонент бінарного напівпровідника є компонентою надпровідника, у кристалі виникають надпровідні включення. На підставі цих результатів пояснено виникнення в кристалі InAs, опроміненому альфа-частинками, явища надпровідності (В. В. Михайловський, В. В. Сугаков, О. М. Шевцова), яке експериментально спостерігалось в ІЯД (Г. А. Віхлій, А. Я. Карпенко);

пояснено низку ефектів, спостережуваних у різних лабораторіях при дослідженні випромінювання світла непрямыми екситонами в напівпровідниках з подвійними квантовими ямами: появу фрагментованого кільця випромінювання навколо лазерної плями, залежність просторових структур випромінювання з квантової ями від характеру неоднорідності опромінення та ін. (В. Й. Сугаков, А. А. Чернюк);

запропоновано генератор імпульсів конденсованих екситонних фаз у подвійних квантових ямах при стаціонарному опроміненні (І. Ю. Голіней, В. В. Михайловський, В. Й. Сугаков).

Виконано розрахунки фізичних властивостей паливовмісних матеріалів 4-го блока ЧАЕС. Запропоновано модель для пояснення деградації паливовмісних матеріалів (І. Ю. Голіней, О. С. Зінець, В. Й. Сугаков, І. І. Фіщук).

Побудовано теорію чутливості сенсорів на основі PIN-діодів для детекторів швидких нейтронів та стріп-детекторів для визначення координат короткопробіжних заряджених частинок. Побудовано теорію відгуку кремнієвих планарних структур на ядерне, високоенергетичне рентгенівське та гамма-опромінення для застосування, насамперед, для діагностики радіаційних полів, що використовуються в ядерній медицині для лікування онкологічних захворювань. Результати

можуть бути використані для вибору оптимальних характеристик детекторів і умов опромінення при радіаційній терапії (І. Є. Анохін, О. С. Зінець).

Досліджено вплив зовнішніх сталих та змінних магнітних полів на форму месбауерівських спектрів у м'яких феромагнетиках. Зокрема, передбачено ефект квазіземанівського розщеплення квазіенергетичних рівнів ядер та відповідно месбауерівських ліній поглинання (О. Я. Дзюблик, В. Ю. Співак). Цей ефект згодом спостерігався цими авторами разом з колегами з Казанського університету (Росія).

Проведено моделювання методами молекулярної динаміки когерентного прискорення атомів при фазовому переході на поверхні кристала з урахуванням впливу теплових коливань кристалічної ґратки. Досліджено обмеження енергії прискорених атомів унаслідок ефектів фокусування та температури (І. Ю. Голіней, В. В. Михайловський, В. Й. Сугаков).

Запропоновано новий метод поляризації спінів електронів і ядер при тунелюванні електронів через подвійний гетероперехід, побудований на базі напівмагнітних напівпровідників. Метод може бути застосований у спінтроніці (Г. В. Верцімаха, С. Б. Лев, В. Й. Сугаков).

Виявлено нові ефекти в металах з порами, заповненими атомами інертних газів. Показано існування сильного підсилення інтенсивності оптичних переходів зі збудженням станів атомів інертних газів у порах унаслідок змішування їхніх станів зі станами локалізованих в околі пор плазмонів (І. Ю. Голіней, В. Й. Сугаков). Це була перша робота з популярного зараз напрямку керування властивостями середовища – плазмоніки.

З'ясовано роль електронного оточення у збудженні та розпаді ядер. Зокрема, О. Я. Дзюблик разом з французькими колегами розраховував перерізи кулонівського збудження ядер вільними електронами в гарячій плазмі, враховуючи електронне екранування. Було також показано, що електронне оточення призводить до незначного зростання ($\sim 0,1\%$) часу життя ядер по відношенню до альфа-розпаду порівняно з випадком, коли атоми повністю іонізовані; розвинуто послідовну теорію збудження ядер при електронних переходах, що дозволило описати всі тонкі експериментальні ефекти; пояснено появу низькоенергетичного піка в спектрах електронів струсу, що супроводжують розпад ядер (О. Я. Дзюблик). Показано можливість збудження ядер, а також вивільнення великої енергії ядерних ізомерів при опроміненні їх рентгенівськими лазерами (О. Я. Дзюблик). З'ясовано особливості дифракції Лауе

гамма-квантів та теплових нейтронів у сильно поглинаючих кристалах, що може бути використано при аналізі структури кристалів (О. Я. Дзюблик, В. В. Михайловський, В. Ю. Співак).

Розглянуто вплив металічної наночастинки на процеси фотосинтезу. Теоретично досліджено вплив взаємодії сферичної наночастинки з діелектричним осердям з електронними збудженнями світлозбирального (LN2) комплексу фотосинтетичних бактерій на інтенсивність поглинання світла. Показано, що вплив срібної і золотої наночастинки приводить до посилення поглинання світла, яке зростає при збільшенні розміру наночастинки, наближення частинки до молекулярного кільця й у випадку використання наночастинок з низькою діелектричною проникністю матеріалу осердя (І. Ю. Голіней, Г. В. Верцімаха, В. Й. Сугаков).

Побудовано в рамках методу ефективного середовища аналітичну теорію, що описує температурну залежність коефіцієнта дифузії поляронних триплетних екситонів у полімерних структурах зі слабким енергетичним безладом. Знайдено, що у високотемпературній області ефективний коефіцієнт дифузії має поляронно обумовлену термічно активовану залежність, а у низькотемпературній області має місце слабка температурна залежність, що обумовлена тільки слабким енергетичним безладом. Уперше показано, що при зменшенні електрон-фононної взаємодії в полімерах високотемпературна область застосування поляронної моделі Маркуса різко звужується й у широкому діапазоні температур може бути застосована тільки широко використовувана модель Міллера - Абрахамса, в якій відсутні полярони і враховується тільки енергетичний безлад при слабкій електрон-фононній взаємодії (І. І. Фіщук).

Обчислено та проаналізовано спектри енергетичних втрат електронів при розсіянні на органічній молекулі в присутності срібної наночастинки. Показано, що резонансна взаємодія між збудженнями молекули та локалізованими плазмонами срібної нанооболонки призводить до значного збільшення ймовірності збудження молекули (І. Ю. Голіней, Є. В. Оникієнко).

Пояснено явище появи провалу в температурній залежності повзучості сталі при ядерному опроміненні, що спостерігалось в ІЯД (ефект Карасьова). Ефект обумовлений зміною радіаційних і температурних потоків дефектів до дислокацій зі зміною температури (П. О. Селіщев (КНУ), В. Й. Сугаков).

Основні результати наукової роботи ВТЯР (1995 - 2016).

У ВТЯР розроблялися методи і програми розрахунку перехідних та стаціонарних процесів в ядерних реакторах та розмножуючих нейтрони системах. На основі розвинутих методів були досліджені питання ядерної безпеки об'єкта «Укриття» та інших скупчень ядерних матеріалів, що можуть ділитися. На основі ймовірного підходу до розташування паливних матеріалів в об'єкті «Укриття» було розраховано коефіцієнт розмноження нейтронів у лавоподібних паливомісних матеріалах (ЛПВМ) і показано, що деякі ймовірні композиції з реальною кількістю ядерних матеріалів і реальним нуклідним складом можуть бути ядерно-небезпечними. Тобто в умовах наповнення ЛПВМ водою (дощі та конденсація вологи) є можливим, що коефіцієнт розмноження нейтронів у системі досягне та перевищить одиницю (О. Я. Верцимаха, В. М. Павлович). Найбільш імовірним сценарієм розвитку самопідтримної ланцюгової реакції (СЛР) виявився сценарій коливальних нейтронного потоку з подальшим переходом системи у підкритичний стан з великою кількістю води. Схожа картина поведінки густини потоку нейтронів спостерігалася на об'єкті «Укриття» в 1990 р. Ці роботи знайшли продовження останнім часом після спорудження нового конфайнмента над об'єктом «Укриття». Виявилось, що осушення паливних мас може привести до значного нейтронного спалаху в системі (О. Я. Верцимаха, В. О. Бабенко, В. М. Павлович).

Розроблена методика застосовувалась також до вивчення аварії на японському заводі з конверсії уранового палива в Токаї-Мура. На відміну від об'єкта «Укриття» в Токаї-Мура спостерігалися періодичні нейтронні спалахи, які, відповідно до розрахунків, пояснюються розвитком СЛР у надкритичній системі з її подальшим затуханням завдяки накопиченню радіолітичного газу. Виток радіолітичних газів обумовлював наступний спалах (С. А. Стороженко, В. М. Павлович).

Досліджувалась також загальна поведінка нерівноважних розмножуючих систем, якими є ядерний реактор і скупчення ядерних матеріалів. Показано можливість виникнення дисипативних структур у таких системах, і на прикладі нейтронно-ксенонових коливальних в ядерних реакторах досліджено біфуркаційну структуру параметричного простору (В. М. Павлович, С. Г. Шпирко).

Запропоновано та розроблено розрахунково-експериментальну методику вимірювання коефіцієнта розмноження нейтронів у глибоко

підкритичних системах, якими в сухому вигляді є ЛПВМ ЧАЕС. Методика заснована на вимірюванні статистичних властивостей нейтронного випромінювання в поєднанні з розрахунками статистичних розподілів і параметрів розмножуючої системи. Запропонована В. М. Павловичем на основі цієї методики електронна апаратура виготовлена та випробовується на об'єкті «Укриття» (С. А. Стороженко, В. М. Павлович, С. В. Ярошенко спільно з ІПБ АЕС НАН України).

Запропоновано нову концепцію керування ядерними реакторами за допомогою газових або рідинних потоків речовини, що ділиться (В. М. Павлович, С. А. Яцкевич).

У ВТЯР розглянуто та обґрунтовано фізичні принципи побудови підкритичного дослідницького реактора, в якому реакція поділу підтримується зовнішнім джерелом нейтронів. Оптимізація структури активної зони таких реакторів дозволяє підсилити потік нейтронів від зовнішнього джерела на три порядки і більше (В. І. Гулік, В. М. Павлович).

Важливі і цікаві результати отримано при дослідженні реакторів на хвилі ядерного поділу (реактор Феоктистова, Traveling Wave Reactor). Отримано умови існування та стійкості стаціонарної хвилі ядерних поділів і на їхній основі аналітично і чисельно розраховано залежність швидкості хвилі (або потужності реактора) від кількості поглиначів у активній зоні. Показано можливість використання у хвильовому реакторі різних типів палива, у тому числі відпрацьованого палива легководних реакторів без радіохімічної переробки. Розроблено методику чисельного розрахунку параметрів хвилі поділів на основі сучасних розрахункових реакторних кодів (О. М. Хотяїнцева, В. М. Павлович; В. М. Хотяїнцев, КНУ).

В. М. Павлович є одним з ініціаторів та безпосереднім учасником застосування ядерно-фізичних методів в антарктичних дослідженнях України. Він був учасником VII, IX, X, XII Українських антарктичних експедицій. З метою можливого передбачення землетрусів паралельно в Україні та на українській антарктичній станції «Академік Вернадський» налагоджено моніторинг вмісту радону в повітрі поблизу розломів земної кори. Радонометрія відбувається одночасно із сейсмометрією за допомогою чутливих сейсмографів. Аналіз накопичених в Україні та Антарктиді даних дозволив пов'язати підвищення концентрації радону з проходженням сейсмічних хвиль або виникненням землетрусів. Покладено також початок використанню нейтронно-активацій-

ного елементного аналізу в екологічних, палеокліматичних та гляціологічних дослідженнях.

Перспективи подальших досліджень відділу теоретичної фізики.

Дослідження напівпровідникових наноструктур, їхньої поведінки при ядерному та інтенсивному лазерному опроміненні. Побудова теорії збудження та розпаду ядер, стимульованих оптичним або рентгенівським лазерним імпульсом. Вивчення впливу нових фаз у кристалах, індукованих зовнішнім опроміненням, на фізичні властивості кристалів. Теоретичне дослідження полімерів. Вивчення залежності від температури та електричного поля ефективних електропровідності та рухливості у високопровідних полімерах. Розгляд ефектів змішування станів системи з плазмовими коливаннями для підсилення різноманітних процесів: фотосинтезу, ефектів розсіяння частинок, випромінювання світла та ін.

Державні та академічні премії.

Державна премія України в галузі науки і техніки 1987 р. за роботу «Ефекти самовпливу та самоорганізації при формуванні упорядкованих дефектних та домішкових структур у твердих тілах» (В. Й. Сугаков).

Премія НАН України імені К. Д. Синельникова 1998 р. за цикл робіт «Поверхневі екситони та деформуючі поляритони в молекулярних кристалах» (В. Й. Сугаков).

Премія НАН України імені С. І. Пекаря 2013 р. за цикл робіт «Теорія кореляційних та когерентних процесів у напівпровідникових гетероструктурах» (В. Й. Сугаков).

Премія НАН України імені К. Д. Синельникова 2019 р. за цикл робіт «Теорія процесів у зв'язаній системі атомів і ядер» (О. Я. Дзюблик).

Міжнародна співпраця.

У рамках грантового проекту CRDF (США, Массачусетський технологічний інститут, 1997 - 1999) розвинено теорію утворення просторових структур і автоколивань у кристалах при ядерному опроміненні.

При виконанні грантового проекту INTAS (Німеччина, Вюрцбурзький університет Юліуса Максиміліана, Інститут фізики Польської академії наук (ПАН), Варшава, 2004 - 2007) отримано залежність ширини смуг екситонних смуг у гетеропереходах на базі напівмагнітних напівпровідників від магнітного поля. Роботи з фізики гетероструктур спільно з Інститутом фізики ПАН та ІФ НАН України продовжуються.

За грантом “Visby” (Швеція - Україна - Литва, м. Лінчюпін, 2007 - 2009) було показано утворення локалізованих станів екситонів у квантовій ямі напівпровідника у присутності металевої кульки.

За грантом з Фізичним інститутом імені П. М. Лебедєва (Росія, 2013) розраховано просторове розміщення фаз електронно-діркової рідини в напівпровідниках.

З японськими вченими (Японія, Тохуко університет, м. Сендай) досліджено фазові переходи в ланцюжку атомів в моделі «доміно».



Цікавий результат. Дискусія з японськими вченими

Наукові дослідження транспортних властивостей неупорядкованих органічних напівпровідників проводились у тісному співробітництві з зарубіжними науковцями. Разом із працівниками Марбурзького університету імені Філіппа (Німеччина) та Інституту макромoleкулярної хімії (Прага, Чехія) виконувалася спільна наукова робота в рамках програми гранта НАТО у 2002 - 2003 рр. Із працівниками Марбурзького університету (Німеччина), ІМЕС (Бельгія), Інституту макромoleкулярної хімії (Прага, Чехія), Інституту напівпровідників та твердого тіла (Лінц, Австрія), Байройтського університету (Німеччина) виконувалася спільна наукова робота в рамках двох українсько-австрійських міжнародних проєктів у 2009 - 2012 рр. Побудовано аналітичну теорію рухливості носіїв заряду з їх довільною концентрацією в органічних неупорядкованих напівпровідниках при наявності довільного зовнішнього електрич-

ного поля та розвинуто теоретичну модель, що описує стрибковий транспорт в органічних напівпровідниках із врахуванням енергетичної неупорядкованості та поляронного внеску.

Разом із співробітниками Казанського університету (Росія) за допомогою мессбауерівської спектроскопії відкрито явище квазісееманівського розщеплення квазіенергетичних рівнів ядер, що знаходяться в радіочастотному магнітному полі.

Спільно із співробітниками CEA DAM II de France (Франція) показано, що вільні високоенергетичні електрони в гарячій плазмі ефективно збуджують ядра з енергіями ~ 1 keV.



Співробітники відділу теоретичної фізики з японськими вченими

Налагоджено тісне співробітництво відділу теоретичної фізики ІЯД з Центром медичної радіаційної фізики Університету Вуллонгонгу, Австралія (проф. А. Б. Розенфельд) у напрямку моделювання та теоретичного дослідження властивостей різноманітних кремнієвих структур для використання їх у радіаційній медицині та моніторингу різноманітних радіаційних пучків. Співробітники відділу беруть участь в обговоренні планування експериментів, аналізують та пояснюють результати експериментів. Результати досліджень регулярно доповідаються на міжнародних конференціях (наприклад IEEE Nuclear Science Symposium – Medical Imaging Conference).

Відділ плідно працює зі співробітниками Київського національного університету імені Тараса Шевченка, Інститутом фізики НАН України, Інститутом фізики напівпровідників НАН України тощо.

Монографії.

1. А.Ф. Лубченко. *Квантовые переходы в примесных центрах твердых тел* (К.: Наук. думка, 1978) 294 с.
2. M.D. Sturge, L. Birman, ..., V.I. Sugakov, ... *Excitons. Collective monograph*. Ed. by E.I. Rashba and M.D. Sturge. Ser. "Modern Problems in Condensed Matter Sciences" (North-Holland: Publishing Company, Amsterdam/New York/Oxford, 1982) 866 p.
3. Н.И. Остапенко, В.И. Сугаков, М.Т. Шпак. *Спектроскопия дефектов в молекулярных кристаллах* (К.: Наук. думка, 1988) 184 с.
4. В.А. Андреев, М.В. Курик, С. Нешпурек, Э.А. Силиньш, В.И. Сугаков, Л.Ф. Тауре, Е.Л. Франкевич, В. Чапек. *Электронные процессы в органических молекулярных кристаллах*. Под ред. Э.А. Силиньша (Рига: Зинатне, 1992) 363 с.
5. N.I. Ostapenko, V.I. Sugakov, M.T. Shpak. *Spectroscopy of Defects in Organic Crystals* (Dordrecht - Boston - London Kluwer Academic Publishers, 1993) 262 p.
6. V.I. Sugakov. *Lectures in Synergetics* (Singapore: World Scientific, 1998) 207 p.
7. В.Й. Сугаков. *Основы синергетики* (К.: Обереги, 2001) 288 с.
8. В.М. Павлович. *Фізика ядерних реакторів* (Чорнобиль: ПІБ АЕС НАН України, 2009) 222 с.
9. І.С. Анохін, В.В. Давидовський. *Актуальні питання експортного контролю ядерних матеріалів, обладнання та технологій* (К.: ІЯД НАН України, 2016) 108 с.

Підручники.

1. L.G. Grechko, V.I. Sugakov, O.F. Tomasevitch, A.M. Fedorchenko. *Problems in Theoretical Physics*, in 3 volumes (Tokyo, 1979, 1980) Vol. 1 - 182 p. Vol. 2 - 166 p. Vol. 3 - 150 p. (in Japanese).
2. Л.Г. Гречко, В.И. Сугаков, О.Ф. Томасевич, А.М. Федорченко. *Сборник задач по теоретической физике*. Изд. 2-е перераб. (Москва: Высш. школа, 1984) 320 с.
3. В.Й. Сугаков. *Фізика рідкокристалічного стану* (К.: Вища школа, 1992) 48 с.
4. В.И. Сугаков. *Введение в синергетику* (К.: Киевский университет, 1992) 180 с.
5. І.П. Пінкевич, В.Й. Сугаков. *Теорія твердого тіла* К.: Київ. ун-т, 2006) 333 с.
6. Л. Гречко, С. Єжов, В. Сугаков. *Збірник задач із теоретичної фізики. Квантова механіка* (К.: Київ. ун-т, 2013) 215 с.

ВІДДІЛ РАДІАЦІЙНОЇ ФІЗИКИ

Засновником і першим керівником відділу радіаційної фізики був д.т.н., проф. Іван Дмитрович Конозенко (1907 - 1997). Відділ створено в 1960 р. як підрозділ Інституту фізики АН УРСР (у 1970 р. увійшов до складу Інституту ядерних досліджень АН УРСР). Тривалий час (1978 - 2015) відділом керував д.ф.-м.н., проф. Петро Григорович Литовченко. З 2015 р. і дотепер завідувачем відділу є д.ф.-м.н. Галина Петрівна Гайдар.



І. Д. Конозенко



П. Г. Литовченко



Г. П. Гайдар

Основним науковим напрямком відділу, очолюваного І. Д. Конозенком, було дослідження фізичних явищ і структурних порушень у твердих тілах, спричинених дією радіації, а також розробка напівпровідникових детекторів ядерних випромінювань. У відділі активно вивчався вплив різних видів випромінювання на зміни електрофізичних властивостей напівпровідникових матеріалів залежно від типу та концентрації легуючих і супутніх домішок. Проведення зазначених науково-дослідних робіт мало на меті пошук методів підвищення радіаційної стійкості приладів, що було актуальним не лише для розвитку космічних досліджень, а й для забезпечення належної обороноздатності країни.

Протягом багатьох років, починаючи з фізичного пуску ядерного реактора (12 лютого 1960 р.), у відділі радіаційної фізики проводили наукові дослідження з радіаційної фізики атомарних (Si, Ge) і бінарних (GaP, GaAs, InSb, CdTe) напівпровідників, вивчали природу й поведінку дефектів, наведених швидкими і тепловими нейтронами реактора, досліджували кінетику перебудови дефектно-домішкових

комплексів у процесі радіаційно-термічних обробок, проводили вивчення електрофізичних і термоелектричних властивостей розупорядкованих напівпровідників. Отримано фундаментальні результати стосовно природи радіаційних процесів у напівпровідниках, встановлено їхній зв'язок із домішками та структурними дефектами, що дало змогу прогнозувати зміни параметрів напівпровідникових приладів. Одержані результати були фізичним підґрунтям для створення детекторів ядерних випромінювань, підвищення радіаційної стійкості приладів на основі напівпровідників та збільшення терміну їхньої експлуатації в полях ядерних випромінювань.

Велику увагу приділяли дослідженню монокристалів кремнію, який упродовж тривалого часу був і залишається на сьогодні основним матеріалом для виробництва багатьох елементів електронної техніки. Вивчення кінетики виникнення і накопичення радіаційних дефектів у кремнії *n*- і *p*-типу провідності, вирощеного різними способами, залежно від дози опромінення і виду радіації дало можливість зробити висновок про високу радіаційну стійкість кремнію *p*-типу, одержаного методом безтигельної зонної плавки (І. Д. Конозенко, д.ф.-м.н. В. І. Хіврич, М. І. Старчик).

Показано, що у звичайному технічному кремнії з великими концентраціями легуючої домішки та кисню за будь-якого виду опромінення концентрація носіїв заряду (при 300 К) зменшується і рівень Фермі зміщується до середини забороненої зони. В особливо чистому кремнії *p*-типу спостерігається збільшення концентрації зарядів з дозою гамма-опромінення з подальшим виходом на насичення. При цьому рівень Фермі займає граничне положення в забороненій зоні. Особливо чистий кремній *n*-типу в разі гамма-опромінення конвертує в *p*-тип. Зі збільшенням дози опромінення провідність зростає і виходить на насичення, а рівень Фермі займає граничне положення.

Встановлено, що в разі нейтронного опромінення особливо чистого кремнію основними дефектами, які впливають на електропровідність і час життя носіїв заряду, є області розупорядкування. У процесі відпалу відбувається розпад зазначених областей, що призводить до утворення дивакансій і виходу рівня Фермі на граничне положення (І. Д. Конозенко, В. І. Хіврич, А. К. Семенюк).

Уперше було виявлено явище перемикання електричної пам'яті й аномальної фотопровідності в сильнолегованих і компенсованих власними дефектами монокристалах CdTe (В. І. Хіврич, Л. П. Дідковський).

Досліджено структурні недосконалості низки напівпровідників (Si, Ge, GaAs, SiC) і складних напівпровідникових систем на їхній основі залежно від технології отримання їх, характеру й дози опромінення частинками високих енергій, а також від термообробки. Визначено типи дефектів структури, що спостерігаються в цих кристалах, їхній розподіл і концентрацію. Установлено зв'язок зазначених дефектів зі зміною оптичних, електричних та інших фізичних властивостей досліджуваних кристалів. Результати досліджень, отримані у відділі, надалі передавали на завод чистих металів (м. Світловодськ), а також до Київського політехнічного інституту (Л. Г. Ніколаєва, М. І. Старчик).

Установлено закономірності змін електричних, оптичних і люмінесцентних властивостей кристалів GaAs, GaP і твердих розчинів на їхній основі в разі опромінення електронами з енергіями від 1 до 50 MeV, гамма-фотонами ^{60}Co і нейтронами реактора. Показано, що в деяких випадках радіацію можна застосовувати для отримання кристалів із заданими властивостями (концентрацією носіїв заряду, однорідністю, фоточутливістю) та для поліпшення характеристик GaAs і GaP світлодіодів (Е. Ю. Брайловський, д.ф.-м.н. В. П. Тартачник).

Досліджено радіаційні пошкодження в монокристалах CdS у разі опромінення гамма-квантами ^{60}Co , швидкими електронами і нейтронами реактора, запропоновано моделі процесів, що пояснюють особливості електричних і оптичних властивостей опромінених кристалів. Установлено температурні області стабільності різних радіаційних дефектів у CdS і визначено енергії активації їхнього відпалу, запропоновано моделі перебудови радіаційних дефектів у процесі відпалу. Показано, що в результаті опромінення InSb високоенергетичною радіацією утворюються дефекти з глибокими донорними і акцепторними рівнями в забороненій зоні.

Показано принципову можливість використання потужних потоків гамма-радіації для радіаційного матеріалознавства. Найбільш важливим у цих дослідженнях було те, що ефект зміцнення не супроводжувався погіршенням пластичних властивостей сплаву. А той факт, що опромінення гамма-радіацією не викликає ефекту наведеної радіоактивності, який зазвичай спостерігається в разі опромінення ядерними частинками, відкривав широкі перспективи впровадження результатів зазначених досліджень у промисловість (І. Д. Конозенко, С. П. Половнева, В. Н. Дробязін, Г. А. Солдатенко). І. Д. Конозенком було виявлено низку особливостей впливу радіації на процеси кристалізації металів і сплавів.

Вивчалися електрофізичні й рекомбінаційні властивості високо-чистих монокристалів германію і кремнію, які застосовували в подальшому для виготовлення детекторів ядерних випромінювань, а також спектри поверхневих електронних станів, створюваних при обробках, які використовували в технології виготовлення детекторів. Розроблено детектори ядерних випромінювань: dE/dx -детектори, гамма-спектрометри на основі германію, компенсованого літієм, позиційно-чутливі детектори, що дають одночасно інформацію про енергію і місце попадання частинок (Л. І. Барабаш, С. В. Бердніченко, П. Г. Литовченко, 1967 - 1980). Одержані у відділі детектори за своїми параметрами не поступалися аналогічним детекторам, виготовленим за кордоном. Розроблено також прилади типу дистанційних безконтактних вимірювачів потоків теплової радіації.

У 1978 р. І. Д. Конозенко, якому виповнилося на той час 71 рік, передав відділ к.ф.-м.н. П. Г. Литовченку, а сам залишився працювати в якості наукового консультанта. У відділі продовжено роботи з вивчення впливу домішок на кінетику введення радіаційних дефектів і з'ясовано вплив останніх на преципітацію кисню. Установлено, що в опромінену кремній відбувається скорочення часу преципітації кисню, що зумовлено додатковим уведенням зародків преципітатів за участю первинних радіаційних дефектів, створених опроміненням. Виявлено, що подібні утворення спричиняють гетерування домішок і дефектів у кремній і суттєво покращують його якість, що важливо враховувати у процесі виготовлення напівпровідникових приладів.

Установлено, що в опромінені швидкими нейтронами реактора і термооброблені при 800 °С зразках кремнію спостерігається зменшення концентрації дефектів і збільшення їхнього розміру, що може бути пов'язано з явищем коалесценції. З'ясовано, що складні радіаційні дефекти типу областей розупорядкування суттєво не впливають на швидкість преципітації кисню в термообробленому при 1000 °С кремній.

У результаті проведених досліджень виявлено, що в опроміненому нейтронами кремній після відпалу при 800 °С спостерігається парамагнетизм. Подальший відпал кристалів призводить до зростання магнітної сприйнятливості на основі утворення киснево-кремнієвих преципітатів і структурних дефектів. Дослідження дозових залежностей концентрації та рухливості носіїв заряду у високоомному кремній, опроміненому протонами з енергією 24 ГеВ, показали, що значний вплив на їхні характеристики створюють не лише точкові дефекти, але також і кластери дефектів.

Плідними виявилися дослідження радіаційних ефектів у надчистому кремнії. На основі вивчення впливу швидких нейтронів на оптичні властивості кремнію було запропоновано відносно простий спосіб вимірювання флюенсів нейтронів у межах 10^{15} - $5 \cdot 10^{18}$ нейтрон/см². Результати вивчення особливостей дефектоутворення у надчистому кремнії стали основою для розробки нового класу аварійних нейтронних дозиметрів, які знайшли практичне застосування (разом із паралельно розробленими гамма-дозиметрами) в ІЯД НАН України, Інституті експериментальної фізики РАН (Арзамас), використовувалися для визначення полів іонізуючих випромінювань на прискорювачі в CERN та в умовах ліквідації аварії на ЧАЕС (П. Г. Литовченко, В. І. Куц, В. І. Хіврич, Л. І. Барабаш).

Значна увага у відділі приділялася розробці технології нейтронного трансмутаційного легування кремнію за допомогою теплових нейтронів на дослідницькому реакторі ВВР-М, що забезпечило створення наукової бази для виготовлення сучасних високочутливих напівпровідникових детекторів і дозиметрів ядерних випромінювань.

Уперше в 1982 р. проведено експерименти з використання енергетичного реактора РБМК ЧАЕС для цілей, що надалі стали основою створення промислової лінії на ЧАЕС з випуску нейтронно-легованого кремнію. Трансмутаційне легування дало можливість отримувати якісно новий матеріал із підвищеною радіаційною стійкістю та однорідністю (А. Р. Дідковський, А. К. Саакова, В. І. Хіврич), що створило передумови для виготовлення більш якісних тиристорів і детекторів ядерних випромінювань (С. В. Бердніченко, Л. І. Барабаш, Т. І. Кібкало, П. Г. Литовченко).

У відділі розроблено прецизійні напівпровідникові детектори для спектроскопії заряджених ядерних частинок з високою енергетичною роздільною здатністю та напівпровідникові дозиметри роздільного визначення компонент змішаних гамма-нейтронних полів. Їхні параметри виявилися навіть дещо кращими, ніж у зарубіжних аналогів за чутливістю. Такі прилади використовувалися під час ліквідації аварії на ЧАЕС і в ядерно-фізичних експериментах (ІЯД НАН України, ОІЯД (Дубна, Росія), CERN (Женева, Швейцарія) тощо).

Розроблено технологію виготовлення однорідного високоомного та низькоомного нейтронно-легованого кремнію в широкому діапазоні питомих опорів. Проведено дослідження радіаційної стійкості кремнію для детекторів ядерних випромінювань та виробів електронної техніки.

Цілеспрямовані зміни електрофізичних властивостей під дією радіації вивчались і досліджуються на даний час у складних напівпровідниках, які є перспективними для електронної техніки: GaAs, CdTe, CdS, InSb. У монокристалах CdTe було вперше виявлено відоме для аморфних напівпровідників явище перемикання струму, аномальну фотопровідність, інші цікаві явища. Запропоновано чутливі й швидкодіючі датчики на основі GaAs для побудови карт радіаційних полів.

На основі фундаментальних досліджень радіаційних дефектів у напівпровідникових матеріалах A_3B_5 одержано комплекс даних щодо електрофізичних властивостей InSb в інтервалі температур 4,2 - 400 K у разі опромінення нейтронами реактора (температура опромінення 78 - 330 K). Розроблено спосіб визначення концентрації донорів і акцепторів в InSb за допомогою опромінення досліджуваних зразків швидкими нейтронами реактора. Запропоновано методику нейтронного легування InSb. Виявлено ефект гігантського (10 порядків) зменшення провідності InSb у процесі комплексного опромінення нейтронами реактора та рентгенівськими променями, який став фізичним підґрунтям розробленої технології виготовлення рентгенівських дозиметрів (Г. А. Віхлій, А. Я. Карпенко, П. Г. Литовченко).

Виконано комплекс робіт з моделювання нейтронних пошкоджень у напівпровідникових матеріалах шляхом опромінення зарядженими частинками середніх енергій на циклотроні У-240. Показано, що ефективність дефектоутворення в разі опромінення протонами з енергією 50 MeV у тисячу разів вища, ніж за умов використання швидких нейтронів реактора. Установлено ряд нових фізичних ефектів, а саме: флуктуації провідності з ростом дози опромінення; надпровідність InAs, індукована опроміненням; гістерезис магнітоопору в InSb (Mn). Рекомендовано матеріал для радіаційно стійких магнітних сенсорів, що працюють на космічних апаратах, прискорювачах заряджених частинок (CERN), атомних станціях тощо.

Виконано цикл досліджень радіаційної стійкості широкого класу складних напівпровідникових термоелектричних матеріалів високо- і середньотемпературного діапазонів використання, визначено оптимальні співвідношення матеріалів для створення внутрішньореакторного генератора електричної енергії, що використовує термоелектричний спосіб прямого перетворення ядерної енергії в електричну. Виконано експериментальні випробування прототипу внутрішньореакторного термоелектричного перетворювача (РТЕГ) ядерної енергії в електричну.

Запропоновано та експериментально перевірено метод підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів і приладів, створених на їхній основі, способом попередньої радіаційно-термічної термообробки (П. Г. Литовченко, А. А. Гроза, В. І. Хіврич, Л. І. Барабаш). Показано, що опромінення нейтронами реактора кремнію та наступна його термообробка призводить до утворення ефективних стоків для первинних радіаційних дефектів, унаслідок чого підвищується радіаційна стійкість попередньо опроміненого матеріалу. Прилади, виготовлені на базі такого кремнію, мають у декілька разів вищу радіаційну стійкість, ніж контрольні зразки.

Виявлено, що введення електрично-неактивної домішки кисню знижує потік вакансій до легуючої домішки фосфору, що зумовлює підвищення радіаційної стійкості кремнію (М. І. Старчик, д.ф.-м.н. О. П. Долголенко та ін.).

Установлено, що введення ізовалентної домішки германію в кремній *n*-типу провідності, вирощений методом Чохральського, підвищує його радіаційну стійкість майже на порядок, що зумовлено не тільки меншим середнім радіусом кластерів дефектів за рахунок зниження теплопровідності матеріалу, а й зменшенням швидкості введення дивакансій і тривакансій у провідну матрицю. Показано, що відпал кластерів дефектів після опромінення кремнію з домішкою германію швидкими нейтронами пов'язаний з анігіляцією вакансійного типу дефектів з міжвузловими атомами і диміжвузлями. Визначено енергії міграції і частотні фактори диміжвузля, міжвузлового атома і вакансії кремнію. З'ясовано особливості впливу методів вирощування і легування на радіаційну стійкість кремнію *n*-типу, опроміненого швидкими нейтронами реактора (О. П. Долголенко, Г. П. Гайдар, М. Д. Варенцов).

Визначено критерій радіаційної стійкості напівпровідників через швидкість видалення носіїв заряду кластерами і точковими дефектами. Показано, що атоми германію, кисню та дислокаційні петлі в кремнії є центрами анігіляції вакансій і міжвузлових атомів. Досліджено відпал А-центрів і трансформацію попередників створення стабільного C_2O_2 -дефекту при відпалі, який відповідає кінетиці відпалу першого порядку і визначається міграцією їх на нерухомий центр – міжвузловий кисень. Установлено особливості утворення радіаційних дефектів у кремнії з низькою і високою концентраціями кисню (О. П. Долголенко, Г. П. Гайдар, М. Д. Варенцов).

Запропоновано модель модифікації фоновими домішками основних рівнів відомих радіаційних дефектів у кремнії і германії. Енергія Хаббарда є незалежною від числа електронів на радіаційному дефекті, але її величина залежить від фонових домішок поблизу вакансійного дефекту. Якщо поблизу нього розташоване міжвузля атома кисню, то енергія від'ємно зарядженого акцептора знижується на 0,06 еВ, а донора підвищується на цю ж величину. Міжвузля атома кремнію або германію змінює рівні дефекту на 0,03 еВ. Атом вуглецю в міжвузловому положенні змінює енергію вакансійного дефекту на 0,035 еВ, але в протилежному напрямку. Модифікація вакансійних дефектів не змінює енергію нейтрального рівня дефекту в забороненій зоні кремнію і германію (О. П. Долголенко).

Показано, що в ході дослідження спектрів поглинання опроміненого швидкими нейтронами реактора кремнію, вирощеного методами Чохральського (Cz) та безтигельної зонної плавки (FZ), спостерігалось утворення різної концентрації дивакансій і областей розупорядкування дивакансійного типу завдяки різному вмісту кисню в зразках. У випадку Cz-Si їх було більше, імовірно, унаслідок зниження процесів анігіляції точкових радіаційних дефектів. У разі використання великих флюенсів опромінення залежність від вмісту кисню для кремнію Cz і FZ ставала менш виразною (М. І. Старчик, А. А. Гроза).

Виявлено ефект далекодії в кремнієвих *p-n*-структурах у процесі опромінення альфа-частинками ^{239}Pu . Показано можливість реалізації поверхневого молекулярного «сита» для цілей сенсорики у випадку опромінення прискореними важкими іонами (Xe, Kr, Ar, Bi) окисної плівки структури SiO_2/Si . Установлено, що модифікована ядерними частинками поверхня кремнію і структури SiO_2/Si може бути використана для створення нових типів газових сенсорів (В. І. Хіврич, М. Б. Пінковська).

Після протонного опромінення кремнію високоенергетичними частинками одержано зменшення показника заломлення, що пояснено деструкцією приповерхневого шару кремнію, яка зумовлена скупченням вакансійних дефектів. Опромінення альфа-частинками поверхні кремнію, навпаки, призводило до збільшення показника заломлення, що є свідченням ущільнення приповерхневого шару. У випадку зразків, опромінених протонами, виявлено найбільше зростання параметра адсорбційної чутливості до аміаку та ацетону (В. І. Хіврич, М. Б. Пінковська).

При опроміненні монокристалічного кремнію високоенергетичними протонами й альфа-частинками виявлено радіаційний вплив та поширення періодичної дефектної структури у запробіжну для іонів частину зразків («ефекти далекодії»), що не передбачено існуючою теорією іонної імплантації. Радіаційний вплив у разі протонного опромінення проявлявся в прискореному утворенні термодфектів у прошарках росту кремнію, яке в запробіжній частині зразка було більш інтенсивним і спостерігалось за температури відпалу на 50 °C нижчій, ніж у пробіжній. У випадку опромінення альфа-частинками виявлено утворення періодичної дефектної структури (яка поширювалась як до, так і за область гальмування іонів) у вигляді «стінок» дефектів, перпендикулярних до напрямку руху іонного пучка. Запропоновано фізичне пояснення одержаних ефектів: формування періодичної дефектної структури може бути результатом процесу самоорганізації дефектів в опроміненому кристалі, а поширення радіаційного впливу на запробіжну для іонів частину кристала – реалізацією солітонного механізму. Виявлено пошаровий розподіл дефектів і «розбухання» кремнію в області пробігу альфа-частинок, що пов'язано, імовірно, з аморфізацією та утворенням пор. Розірвані міжатомні зв'язки в порах можуть слугувати гетерами для домішок та центрами релаксації напружень у кристалічній ґратці (М. І. Старчик, А. А. Гроза, М. Б. Пінковська). Одержані результати важливі як з точки зору фундаментальної радіаційної фізики, так і для практичного застосування в мікро- і нанoeлектроніці.

З 2015 р. у відділі під керівництвом Г. П. Гайдар з'ясовано особливості впливу поверхневих електронних процесів на формування кремнієвих поверхнево-бар'єрних детекторних структур; визначено режими хімічних обробок поверхні кристалів кремнію для прискореного створення поверхнево-бар'єрних структур зі стабільними параметрами; оптимізовано технологію виготовлення кремнієвих спектрометричних детекторів (Г. П. Гайдар, С. В. Бердниченко, В. І. Кочкін, В. Г. Воробйов). Досліджено закономірності впливу одновісних пружних деформацій, радіаційних, магнітних і теплових полів на кінетику електронних процесів у багатодолинних напівпровідниках. Виявлено особливості тензоефектів і гальваноманітних ефектів в опромінених і неопромінених кристалах кремнію і германію. Для монокристалів германію запропоновано ефективний і надійний спосіб визначення тензоопору розтягу, який досить важко вимірювати експериментально. Виявлено і пояснено особливості концентраційної залежності гра-

ничних значень тензоопору для одновісно пружно деформованих кристалів кремнію. Розроблено зручний для практичного використання метод визначення ступеня компенсації електрично-активних домішок у монокристалах *n*-кремнію.

Проведено порівняння мікроструктури кремнію в разі варіювання струму іонного пучка та в процесі опромінення іонами різних енергій і мас (протони, дейтрони, альфа-частинки) в областях їхнього пробігу, гальмування та в запробіжній області. Виявлено низку особливостей поведінки радіаційних дефектів в умовах їхньої великої концентрації та неоднорідного розподілу. Установлено залежність ступеня порушення дефектної структури кремнію від маси опромінюючих частинок: структура області пробігу після опромінення протонами істотно не змінювалася на відміну від сильно ушкодженої (можливо, полікристалічної) структури після опромінення альфа-частинками (Г. П. Гайдар, М. І. Старчик, Л. С. Марченко, Г. Г. Шматко, М. Б. Пінковська).

Запропоновано модель для опису залежності концентрації носіїв заряду від температури в кремнії *n*- і *p*-типу провідності, опромінених швидкими нейтронами реактора, яка враховує не лише перезарядку рівнів дивакансії, але й, як наслідок, конфігураційний перехід дивакансії зі стану з більшою дисторсією у стан з меншою дисторсією, і навпаки. Виявлено, що експериментальне спостереження об'єднаних рівнів дивакансії з енергіями залягання 0,23 eV відносно дна зони провідності та 0,283 eV відносно вершини валентної зони є можливим при її конфігураційній перебудові. Установлено, що деформація ґратки кремнію, зумовлена дефектами міжвузлового типу, зменшує ймовірність конфігураційної перебудови дивакансій, унаслідок чого зменшується концентрація об'єднаних рівнів (О. П. Долголенко, Г. П. Гайдар).

Розроблено модель поведінки міжвузлових атомів кремнію в кластерах дефектів, яка пояснює температурну залежність рухливості електронів у разі вимірювання ефекту Холла зі зниженням і зворотним підвищенням температури зразків кремнію, вирощених різними методами (Чохральського та методом безтигельної зонної плавки). Модель ґрунтується на зменшенні енергії міграції міжвузлового атома кремнію при захопленні електрона на акцепторний рівень (з енергією залягання 0,37 eV відносно дна зони провідності) міжвузлового атома кремнію (О. П. Долголенко).

Досліджено ефекти акустостимульованої релаксації вихідних та опромінених електронами з енергією 2 MeV трикомпонентних напівпровідникових світлодіодних структур, одержаних на основі твердих

розчинів арсеніду галію та фосфіду галію. Виявлено зростання ефективності випромінювання після ультразвукової обробки, яке має релаксаційний характер і зумовлене формуванням у кристалі дислокаційних сіток. Установлено зростання щільності дислокаційних сіток зі збільшенням часу перебування зразка в ультразвуковому полі, що спричиняє розвиток деградаційних процесів. Релаксаційне падіння яскравості діода у разі пропускання струму є наслідком зміни зарядового стану центрів, що входять до складу дефектів темних ліній та областей безвипромінювальної рекомбінації (В. П. Тартачник та ін.).



В. І. Хіврич



О. П. Долголенко



В. П. Тартачник

Установлено, що найбільші порушення структури монокристалічного кремнію, опроміненого високоенергетичними протонами і дейтронами, спостерігаються в області гальмування іонів. Ширина цієї області становила приблизно 1000 і 160 мкм відповідно для протонів з енергіями 43 і 6,8 МеВ та порядку 220 мкм для дейтронів з енергією 13,6 МеВ. Структура порушеної області визначалася енергією протонів та величиною флюенса опромінення (М. І. Старчик, М. Б. Пінковська, Г. П. Гайдар).

Застосування приладів в екстремальних умовах і продовження терміну їхньої служби вимагає всебічного вивчення властивостей напівпровідникових матеріалів, на основі яких ці прилади виготовляються. Дослідницька стратегія відділу радіаційної фізики полягає у використанні комплексного підходу до вивчення процесів утворення і трансформації радіаційних дефектів у напівпровідниках як моноатомних, так і бінарних, а також у трикомпонентних сполуках залежно від їхнього домішкового складу, дози опромінення, температури опромі-

нення, типу опромінюючих частинок та їхніх енергій, режиму подальшої термообробки кристалів. З метою виявлення особливостей змін електрофізичних характеристик напівпровідників планується поєднувати, по можливості, опромінення із впливом інших зовнішніх факторів, таких як термообробка, різні режими охолодження, направлена пружна деформація, ультразвук тощо. Такий підхід є доцільним і виправданим як з наукової, так і з практичної точок зору, оскільки актуальність подібних досліджень зумовлена широким використанням напівпровідникових приладів у полях комбінованих зовнішніх впливів, причому не тільки в наземних умовах, а й при освоєнні космічного простору. Для реалізації зазначеного підходу залучатимуться різноманітні електрофізичні, оптичні, ядерно-фізичні, рентгенівські та електронно-мікроскопічні методи досліджень. Запропонований підхід дозволить отримувати нові знання щодо специфіки утворення і відпаду дефектів в області пробігу та в запробіжній частині кристалів під впливом опромінення легкими прискореними іонами; розробляти технології відновлення свічення промислових світлодіодних структур, які містять різні типи радіаційних дефектів; розробляти рекомендації щодо особливостей використання радіаційно-термічних обробок для модифікації властивостей напівпровідників; виявляти можливості підвищення термічної і радіаційної стійкості матеріалів, детекторних структур та інших приладів на основі напівпровідників; прогнозувати їхні основні характеристики в умовах дії зовнішніх екстремальних полів.

На сьогодні відділ плідно співпрацює з вітчизняними інститутами: Інститутом фізичної хімії імені Л. В. Писаржевського НАН України, Інститутом фізики напівпровідників імені В. Є. Лашкарьова НАН України, Київським національним університетом імені Тараса Шевченка, Національним університетом «Львівська політехніка», Дрогобицьким державним педагогічним університетом імені Івана Франка, Науково-дослідним інститутом мікроприладів Науково-технологічного комплексу «Інститут монокристалів» НАН України. Також бере участь у міжнародному співробітництві з CERN (Європейська організація з ядерних досліджень, Женева, Швейцарія) за програмою міжнародної колаборації RD-50 з радіаційної стійкості напівпровідникових детекторів.

Результати досліджень доповідаються співробітниками відділу не лише на щорічній науковій конференції ІЯД, а й на багатьох міжна-

родних конференціях, опубліковані більш ніж у 600 наукових працях, захищені 26 свідоцтвами на винаходи.

Одержані результати систематизовано й узагальнено співробітниками відділу в 12 монографіях за тематикою всіх наукових напрямків, які розробляються у відділі:

1. И.Д. Конозенко, А.К. Семенюк, В.И. Хиврич. *Радиационные эффекты в кремнии* (К.: Наук, думка, 1974) 199 с.
2. І.Д. Конозенко. *Ядерна радіація і тверді тіла* (К.: Знання, 1977) 48 с.
3. П.І. Баранський, А.В. Федосов, Г.П. Гайдар. *Фізичні властивості кристалів кремнію та германію в полях ефективного зовнішнього впливу* (Луцьк: Надстир'я, 2000) 280 с.
4. А.А. Гроза, П.Г. Литовченко, М.І. Старчик. *Ефекти радіації в інфрачервоному поглинанні та структурі кремнію* (К.: Наук. думка, 2006) 124 с.
5. П.І. Баранський, А.В. Федосов, Г.П. Гайдар. *Неоднорідності напівпровідників і актуальні задачі міждефектної взаємодії в радіаційній фізиці і нанотехнології* (Київ - Луцьк: Луцьк. держ. техн. ун-т, 2007) 316 с.
6. А.П. Долголенко, Ю.А. Антова. *Кинетические коэффициенты в кремнии: Кластеры радиационных дефектов* (Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012) 199 с.
7. Г.П. Гайдар. *Трансформация радиационных дефектов и кинетические явления в Si и Ge* (Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013) 266 с.
8. П.І. Баранський, О.Є. Беляєв, Г.П. Гайдар, В.П. Кладько, А.В. Кучук. *Проблеми діагностики реальних напівпровідникових кристалів* (К.: Наук. думка, 2014) 462 с.
9. І.М. Вишневський, Г.П. Гайдар, О.В. Коваленко, Т.В. Ковалінська, М.Ф. Коломієць, А.І. Липська, П.Г. Литовченко, В.І. Сахно, В.М. Шевель. *Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України* (К.: ІЯД НАН України, 2014) 175 с.
10. Г.П. Гайдар. *Кинетика электронных процессов в Si и Ge в полях внешних воздействий* (Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2015) 268 с.

11. Г.П. Гайдар. *Нанообъекты и современные проблемы термоэлектричества* (Saarbrücken, Deutschland: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2017) 220 с.
12. П.І. Баранський, О.Є. Беляєв, Г.П. Гайдар. *Кінетичні ефекти в багатодолинних напівпровідниках* (К.: Наук. думка, 2019) 448 с.

Основні напрямки наукової діяльності:

дослідження впливу ядерних випромінювань на фізичні властивості атомарних і бінарних напівпровідників та приладів на їхній основі;

дослідження радіаційних і ростових дефектів у напівпровідниках та кінетики перебудови дефектно-домішкових комплексів;

нейтронно-трансмутаційне легування напівпровідників та вивчення їхніх властивостей;

розробка і виготовлення різних типів напівпровідникових детекторів для дозиметрії та спектрометрії ядерних випромінювань.

Основні наукові досягнення:

установлено, що в опромінену кремнії відбувається скорочення часу преципітації кисню. Одержаний ефект пояснено додатковим уведенням зародків преципітатів за участю первинних радіаційних дефектів, створених опроміненням. Прискорення преципітації кисню в опромінену кремнії визначається загальною концентрацією наведених точкових радіаційних дефектів, тобто флюенсом опромінення. Визначено, що час 50%-ної преципітації кисню в процесі відпалу (при 600 - 800 °C) у кремнії, опромінену флюенсом нейтронів меншим, ніж 10^{16} нейтрон/см², скорочується майже на порядок. У разі опромінення флюенсом більшим, ніж 10^{16} нейтрон/см², процес преципітації стає гомогенним і кінетика преципітації зумовлюється переважно радіаційними дефектами, наведеними попереднім нейтронним опроміненням;

доведено, що циклічне навантаження ультразвуком фосфід-галієвих приладів з великою густиною мікроплазм зменшує їхню кількість. Подібне гасіння є наслідком взаємодії рухомих дислокацій із нерівноважними скупченнями дефектів. Особливо виразно такий ефект проявляється на зразках, що містять радіаційні дефекти;

виявлено явище надпровідності в антимоніді індію, опромінену зарядженими ядерними частинками;

виявлено в напівпровідниках A_3B_5 новий вид залежності провідності від флюенсу (флуктуації провідності), що пояснюється ефектами самоорганізації в кристалах;

розроблено радіаційно-термічну технологію підвищення радіаційної стійкості напівпровідникових матеріалів;

визначено, що в нейтронно-трансмутаційно легovanому кремнії підвищується радіаційна стійкість (до гамма-опромінення приблизно у 10 разів, а до нейтронного – у 2 рази) за рахунок стоків, створених під час нейтронного легування і технологічного відпалу кремнію;

розроблено та виготовлено різні типи напівпровідникових детекторів для ядерно-фізичних експериментів ІЯД. Напівпровідникові детектори постачали також до Лабораторії ядерних реакцій імені Г. М. Фльорова Об'єднаного інституту ядерних досліджень (м. Дубна, Росія);

установлено особливості ефектів кластеризації радіаційних дефектів у *n*- і *p*-Si, вирощеному різними методами, у бінарних напівпровідниках InSb, InP та сплавах $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$ під час взаємодії ядерного випромінювання з твердим тілом. Визначено критерії радіаційної стійкості, термічної стабільності кластерів дефектів і окремих простих дефектів;

у рамках уточненої моделі кластерів дефектів розраховано ефективну концентрацію носіїв заряду залежно від температури й дози опромінення кремнію високоенергетичними ядерними частинками. Визначено ймовірність додаткового перекриття областей просторового заряду кластерів, обумовлену точковими дефектами;

описано відпал кластерів дефектів, утворених швидкими нейтронами реактора, як процес анігіляції дивакансій і тривакансій з міжвузловими і диміжвузовими дефектами кремнію та визначено енергії активації відпалу і частотні фактори цих процесів;

показано, що коефіцієнт радіаційно-стимульованої дифузії бору і фосфору у твердому розчині $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$ у разі опромінення в реакторі при 810 K прямо пропорційний квадрату радіуса теплових клинів і обернено пропорційний сталій часу відновлення електричної активності фосфору і бору;

у процесі опромінення монокристалічного кремнію високоенергетичними протонами й альфа-частинками виявлено радіаційний вплив та поширення періодичної дефектної структури в запробіжну для іонів частину зразків («ефекти далекодії»), що не передбачено існуючою теорією іонної імплантації;

визначено критерій радіаційної стійкості напівпровідників через швидкість видалення носіїв заряду кластерами і точковими дефектами;

запропоновано модель модифікації фоновими домішками основних рівнів відомих радіаційних дефектів у кремнії і германії;

з'ясовано механізми підвищення радіаційної стійкості в разі опромінення швидкими нейтронами реактора кристалів кремнію зі збільшеним вмістом фонові домішки кисню, легованих ізовалентною домішкою германію, вирощених в атмосфері аргону, а також легованих методом ядерної трансмутації;

у неопромінених кристалах кремнію *n*-типу при симетричному розміщенні осі деформації щодо всіх ізоенергетичних еліпсоїдів виявлено тензоопір, величина якого зменшується в разі гамма-опромінення. Одержані ефекти пояснено відповідно зміною рухливості електронів у зоні провідності внаслідок зростання поперечної ефективної маси та появою нових глибоких центрів під дією опромінення;

пояснено особливості змін електрофізичних параметрів (концентрацій носіїв заряду і їх рухливостей) у сильно легованих монокристалах германію *n*-типу, вирощених методом Чохральського, які відбувалися в результаті низки термовідпалів у широкому температурному інтервалі. Виявлено, що зміна основних параметрів досліджуваних зразків за умов використання режимів термовідпалів, які зазвичай застосовують у процесі виробництва напівпровідникових приладів, відбувається немонотонно;

одержано спектри електролюмінесценції червоних фосфідогалієвих світлодіодів та з'ясовано природу аномального розширення ліній. Установлено існування короткохвильової компоненти ($h\nu = 2,206$ eV), пов'язаної з донорно-акцепторними переходами між парами «цинк - олово». Виявлено зростання її інтенсивності за малих струмів (до 50 мА) та зумовлене тепловим ефектом падіння за великих (понад 90 мА);

з'ясовано вплив ультразвукової обробки на електролюмінесценцію вихідних і опромінених електронами трикомпонентних напівпровідникових світлодіодних структур, одержаних на основі твердих розчинів арсеніду галію та фосфіду галію. Установлено, що ультразвукова обробка спричиняє виникнення низки деградаційно-відновлювальних процесів у світлодіодах.

ВІДДІЛ РАДІАЦІЙНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

Ядерне опромінювання (у першу чергу нейтронне, як найбільш ефективне) призводить до зміни структури та фізико-механічних властивостей матеріалів. Для конструкційних матеріалів, що застосовуються в ядерній енергетиці, нейтронне опромінення суттєво впливає на міцність, пластичність та в'язкість руйнування, тому питання радіаційної стійкості матеріалів є вкрай важливим для безпечної експлуатації ядерних установок.

Сучасний рівень моделювання радіаційних пошкоджень не дозволяє надійно прогнозувати поведінку конструкційних матеріалів під опроміненням, враховуючи синергетичний вплив хімічних елементів та унікальні умови опромінення в реакторі. У зв'язку з цим, для вирішення матеріалознавчих задач ядерної фізики та енергетики вкрай необхідні експериментальні дослідження впливу опромінення на структуру та властивості металів та сплавів.

Відділ був створений у 1977 р. на базі лабораторії радіаційного матеріалознавства, яка була структурним підрозділом ІЯД.

Першим завідувачем відділу був д.ф.-м.н., проф. Володимир Сергійович Карасьов. У 1993 - 2009 рр. відділ очолював д.ф.-м.н., проф., чл.-кор. НАН України Едуард Улянович Гринік. З 2009 по 2016 р. завідувачем відділу була к.ф.-м.н. Людмила Іванівна Чирко. Зараз відділ очолює к.ф.-м.н. Володимир Миколайович Ревка.



В. С. Карасьов
(1934 - 1993)



Е. У. Гринік
(1938 - 2011)



Л. І. Чирко



В. М. Ревка

На сьогоднішній день у відділі працюють 22 співробітники, 3 з яких мають науковий ступінь. Співробітниками відділу підготовлено та захищено 2 докторських та 8 кандидатських дисертацій. Завідувач відділу Е. У. Гринік у 2004 р. нагороджений нагрудним знаком «За вагомий внесок у розвиток атомної енергетики України», а у 2006 р. відзначений премією імені академіка В. І. Трефілова. У 2012 р. завідувач відділу Л. І. Чирко нагороджена медаллю «Трудова слава».

У відділі є унікальна та єдина в Україні «гаряча» лабораторія із захисними камерами, які оснащені експериментальним обладнанням з дистанційним керуванням для проведення механічних випробувань опромінених матеріалів. Результати випробувань неопромінених та опромінених матеріалів дають можливість експериментально визначати зміни в механічних властивостях, що зумовлені дією опромінення, та оцінити фактори, які є ключовими для пояснення радіаційної чутливості матеріалів.

Найбільш цінними є дослідження змін у механічних властивостях не після, але під час реакторного опромінення матеріалів. Таку можливість уперше в Україні (і в колишньому Радянському Союзі) було реалізовано на практиці у відділі шляхом розробки та використання в матеріалознавчому каналі дослідницького реактора ВВР-М крутильного маятника для визначення релаксаційних характеристик та параметрів повзучості матеріалів під час опромінення.

Основні напрямки досліджень відділу стосуються матеріалознавчого супроводу безпечної експлуатації корпусів ядерних реакторів, зокрема дослідження радіаційного окрихчування корпусних сталей за допомогою механічних випробувань матеріалів (статичний розтяг, ударний вигин, експериментальні методи механіки руйнування, малоциклова втома), аналізу експериментальних даних для оцінки структурної цілісності і радіаційного ресурсу корпусів реакторів типу ВВЕР, а також матеріалознавчої підтримки розробки нормативних документів у галузі атомної енергетики.

Дослідження, виконані у відділі, показали, що до флюенсу нейтронів $\sim 10^{25} \text{ м}^{-2}$ в інтервалі температур $(0,4 \div 0,7) \cdot T_{\text{пл}}$ повзучість матеріалів контролюється переповерханням дислокацій. При температурах нижче $\sim 0,4 \cdot T_{\text{пл}}$ термічний розпад вакансійних каскадів сповільнений, а стабілізація їх рухливими домішками ефективна, тобто повзучість швидко згасає в результаті зменшення довжини вільного ковзання рухливих дислокацій. Внутрішньореакторні експерименти з вивчення повзучості металів виявили ступінчасту форму часової залежності деформації, тобто спостерігається часовий інтервал, в якому швидкість деформації дорівнює нулю за рахунок зміни механізмів повзучості з міжвузлового на вакансійний. У цей момент часу зрівнюються потоки міжвузлових атомів і вакансій на рухливі дислокації і переміщення останніх припиняється.

У відділі експериментально виявлено ефект оборотного зменшення модуля зсуву матеріалів під час реакторного опромінення. Аналітичні розрахунки, на основі механізму, що пов'язує дислокаційну пружність з пересиченням матриці точковими дефектами, показали, що ефект спричиняється збільшенням дифузійної рухливості дислокацій за рахунок надлишкового притоку міжвузлових атомів. Згаданий механізм дав змогу пояснити не тільки температурну залежність зміни модулю зсуву, але й вплив на неї густини потоку й флюенсу нейтронів, який проявляється в температурному інтервалі $(0,25 \div 0,4) \cdot T_{\text{пл}}$, тобто в тому ж температурному інтервалі, що й вакансійне розпухання при опроміненні. Виявлена кореляція дає змогу оцінювати радіаційну стійкість матеріалів без проведення довготривалих реакторних експериментів.

Установлено, що на відміну від вакансійного розпухання чистих металів, яке характеризується зміною положення максимуму на температурній залежності внутрішнього тертя, поява пор з гелієм, який накопичується в результаті ядерних (n , α)-реакцій, і є одним з основних чинників високотемпературного окрихчування, змінює його висо-

ту. Цей ефект пов'язаний з впливом гелію на рух зерномежевих дислокацій.

Дослідження паливних каналів реакторів РБМК енергоблоків ЧАЕС показали, що головним чинником погіршення фізико-механічних властивостей цирконієвого сплаву є водневе окрихчування при утворенні гідридних пластин у матриці сплаву. Крім того, дослідження радіаційно-стимульованих змін мікроструктури сталь-цирконієвих зварних з'єднань паливних каналів дали змогу сформулювати критерій безпечної експлуатації, який було введено в регламент АЕС і досі використовується на зарубіжних енергоблоках типу РБМК.

У відділі експериментально підтверджено, що синергетичний ефект нікелю та марганцю підсилює негативний вплив цих елементів на радіаційну стійкість сталі корпусів реакторів ВВЕР-1000, а також можливість застосування статистичної методології Майстер кривої для прямої оцінки в'язкості руйнування матеріалів корпусів ядерних реакторів ВВЕР-1000. Ця методологія розглядається міжнародним ядерним співтовариством як перспективна з точки зору вибору стратегії подовження терміну експлуатації корпусів реакторів, що експлуатуються з водою під тиском.



Зовнішній вигляд «гарячих камер» з дистанційним обладнанням

Лабораторія 1-го класу з важкими захисними «гарячими камерами» оснащена сучасним експериментальним обладнанням з дистанційним керуванням для дослідження опромінених матеріалів. Обладнання для дослідження високоопромінених матеріалів розміщене всередині «гарячих камер» і тому управляється дистанційно, здебільше за допомогою комп'ютерів. Це серво-електрична випробувальна система Instron 8862 (максимальне зусилля 100 кН); маятниковий копер з енергією 300 Дж; серво-гідравлічна система BISS (максимальне зусилля 50 кН). Також у відділі використовуються спектрометр GDS 500A (LECO Corporation, США) та оптичний мікроскоп МИМ-10.



Система Instron
для випробування матеріалів



Маятниковий копер 300 Дж

До технологічного обладнання з дистанційним керуванням для виготовлення опромінених зразків, яке є у відділі, відносяться: комплекс для електронно-променевого зварювання зразків EBW-НС (Чехія); електроерозійний верстат BP-SPECd (Польща); фрезерний верстат для демонтажу конструкцій та компонентів; шліфувальний верстат; токарний верстат з комп'ютерним управлінням.

Відділ має експериментальні можливості для дослідження опромінених матеріалів, а саме:

- визначення характеристик міцності та пластичності методом статичного розтягу в діапазоні температур від -150 до $+500$ °С;

- визначення ударної в'язкості матеріалів у діапазоні температур від -150 до $+400$ °С;

- визначення характеристик в'язкості руйнування матеріалів експериментальними методами механіки руйнування (позацентровий розтяг та триточковий вигин) у діапазоні температур від -150 до $+500$ °С;

- визначення хімічного складу неопромінених матеріалів методом фотоелектричного спектрального аналізу;

- металографічний аналіз матеріалів методом оптичної мікроскопії.

У перспективі у відділі планується провести пряму оцінку в'язкості руйнування та референсної температури T_0 матеріалів корпусів реакторів ВВЕР-1000 за допомогою мініатюрних зразків 0,16Т С(Т), виготовлених з половинок випробуваних зразків Шарпі контрольних комплектів зразків-свідків, а також розробити та обґрунтувати концепцію нового нормативного підходу до використання референсної температури T_0 в якості температури крихкості матеріалів корпусу реактора у вихідному стані замість величини T_{K0} .

Аналіз результатів досліджень зразків-свідків показав, що існуючий нормативний підхід ПНАЕ Г-7-002-86 та критична температура крихкості T_{K0} в деяких випадках характеризують в'язкість руйнування матеріалів з надмірним консерватизмом, що може призвести до невинновданого обмеження терміну експлуатації корпусів реакторів ВВЕР-1000. Як перший крок для зменшення консерватизму розглядається визначення вихідної температури крихкості для матеріалів корпусів реакторів у неопромінену стані, що базується на результатах статичних випробувань зразків на в'язкість руйнування та референсній температурі T_0 , замість критичної температури крихкості T_{K0} , що визначається з випробувань зразків Шарпі на ударний вигин. Референсна температура T_0 прямо пов'язана з в'язкістю руйнування металу та суттєво нижча за температуру T_{K0} , що дає змогу отримати більш низьку критичну температуру крихкості опромінених матеріалів і відповідно збільшити радіаційний ресурс корпусу реактора.

Ще один перспективний напрямок досліджень пов'язаний з визначенням впливу опромінення на параметри міцності та в'язкості руйнування конструкційних сталей, з яких виготовлені опорні елементи корпусу реактора ВВЕР-1000. Зразки відповідного металу планується опромінювати в матеріалознавчому каналі дослідницького реактора ВВР-М. Для цього заплановано в найближчі три роки за фінансової підтримки державної компанії НАЕК «Енергоатом» виготовити новий матеріалознавчий канал з газо-вакуумною системою. Результати цих досліджень будуть використані для обґрунтування безпечної експлуатації корпусів реакторів ВВЕР-1000 в понадпроектний період.

У відділі виконувалися два проекти в рамках міжнародної програми TACIS у період 2003 - 2010 рр.: TAREG 2.01/03 “Neutron irradiation embrittlement assessment and validation of embrittlement models for VVER Reactor Pressure Vessels” та TAREG 2.01/03 “Validation of neutron embrittlement for VVER 1000 & 440/213 RPVs with emphasis on integrity assessment”. Під час виконання проектів було перераховано флюенси нейтронів для зразків-свідків з використанням сучасних інструментів та 3-D моделювання. Для вибраних енергоблоків АЕС було проведено реконструкцію зразків-свідків та їхнє випробування. Отримані експериментальні результати було використано для побудови нових кривих радіаційного окрихчування, за допомогою яких було оцінено в'язкість руйнування матеріалів корпусів реакторів ВВЕР у кінці терміну їхньої експлуатації.

СЕКЦІЯ ФІЗИКИ ПЛАЗМИ ТА КЕРОВАНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗУ

ВІДДІЛ ТЕОРІЇ ЯДЕРНОГО СИНТЕЗУ

Відділ створено за ініціативи д.ф.-м.н., проф. Ярослава Івановича Колесниченка в 1982 р., який відтоді й до цього часу очолює цей відділ. Відділ було створено на базі його групи – молодих, але кваліфікованих, фахівців з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу (КТС) В. С. Белікова, С. Н. Резніка, В. О. Яворського, а також тих, хто зовсім нещодавно був студентом – В. Я. Голобородька і І. С. Плотника.

Крім того, до складу відділу увійшов К. С. Педченко – фахівець зі стажем, який працював у галузі атомної енергетики. Річ у тім, що О. Ф. Німець, який тоді очолював інститут, хотів посилити не лише дослідження з КТС, а й роботи з розвитку атомної енергетики. Тоді в інституті було відносно небагато докторів наук. Я. І. Колесниченко захистив дисертацію доктора фіз.-мат. наук «Вопросы динамики и кинетики плазмы в режиме протекания термо-



Я. І. Колесниченко

ядерных реакций» ще в 1978 р., причому у провідному науковому центрі Радянського Союзу – Інституті атомної енергії імені І. В. Курчатова (Москва). Тож планувався симбіоз досліджень з КТС та атомної енергетики. Тому першою назвою нового відділу була «Відділ теорії перспективної ядерної енергетики». Згодом в інституті було створено відділення атомної енергетики. Після цього було визнано за доцільне, щоб відділ сконцентрував зусилля на дослідженнях з КТС та фізики плазми. Тоді відділ отримав назву «Відділ теорії ядерного синтезу» (ВТЯС), яку має дотепер.

Тематика досліджень ВТЯС – фізика плазми з енергійними іонами в тороїдальних термоядерних пристроях – є незмінною з часу створення відділу. За цією тематикою у відділі підготовлено чотири доктори фіз.-мат. наук: В. В. Луценко, В. С. Марченко, О. К. Черемних, Ю. В. Яковенко.



О. К. Черемних



В. С. Марченко



Ю. В. Яковенко



В. В. Луценко

За цією тематикою було ініційовано та проведено першу (1989) та ювілейну (2009) конференції МАГАТЕ «Частинки високих енергій у термоядерних магнітних системах», а також першу Міжнародну конференцію з новітніх концепцій та теорії стелараторів (2001).

Крім того, було ініційовано проведення українських конференцій з керованого термоядерного синтезу та фізики плазми. Було проведено першу конференцію цієї серії (1992) та низку наступних конференцій (1994, 1997, 1999, 2007, 2009, 2011, 2013, 2015).



Учасники української конференції з фізики плазми та керованого термоядерного синтезу, ІЯД, 2007 р.

Не можна не згадати про обставини, без яких ВТЯС навряд чи був би створений. Передусім, це переїзд на початку 1960-х років до Києва з Харкова О. Г. Ситенка – молодого тоді доктора фіз.-мат. наук, який очолив теоретичний відділ в Інституті фізики АН УРСР. Фактично завдяки цьому в Києві стали проводитися роботи з теорії плазми. Утім, лише половина його відділу займалася плазмою. Дещо пізніше до цієї групи приєднався к.ф.-м.н. В. М. Ораєвський (1966), який до того працював кілька років в Інституті ядерної фізики (Новосибірськ, Росія). У Новосибірську він виконав роботи з нелінійної фізики плазми, де, зокрема, було передбачено розпаду нестійкості хвиль у плазмі (робота у співавторстві з Р. З. Сагдєєвим), що згодом було визнано відкриттям.

У Києві, в Інституті фізики АН УРСР, В. М. Ораєвський фактично, перебрав на себе керівництво плазмістами-теоретиками. Він же очолив відділ теорії плазми (ВТП), створений в ІЯД у 1970 р., куди перейшли плазмісти з Інституту фізики АН УРСР. Пропрацювавши кілька років в ІЯД, В. М. Ораєвський переїхав до Москви. Після цього велику роль у збереженні та розвитку досліджень з КТС в ІЯД відіграли В. Д. Шафранов та Б. Б. Кадомцев – світові лідери з фізики плазми токамаків. Вони не лише формально підтримали групу молодих плазмістів-теоретиків ІЯД (Б. Б. Кадомцев був директором Відділення фізики плазми ІАЕ імені І. В. Курчатова), а й запропонували конкретну тему для розробок – розрахувати потоки термоядерних альфа-частинок на першу стінку токамака Т-20 – першого радянського проекту термоядерного реактора-токамака. Ця підтримка була дуже важливою, адже тоді серед керівного складу плазмістів ІЯД панувала думка про недоцільність термоядерних досліджень в інституті, а вивчення фізики енергійних іонів, зокрема термоядерних альфа-частинок, вважалося безперспективним.

У подальшому, велику роль у розвитку ВТЯС відіграла співпраця з провідними термоядерними лабораторіями світу – Принстонською лабораторією фізики плазми (США) та Інститутом фізики плазми Макса Планка (Німеччина). Слід зазначити також співпрацю з JET (ЄС), Університетом Каліфорнії-Ірвайн (США), Технологічним університетом Чалмерса (Швеція), Національним інститутом термоядерних досліджень (Японія), Інсбруцьким університетом (Австрія), Дослідницьким центром Сайберсдорф (Австрія) тощо.

Завдяки міжнародній співпраці було отримано експериментальні дані з провідних токамаків та стелараторів, з'явилася можливість пра-

цювати на американських суперкомп'ютерах, спілкуватися з провідними науковцями. У результаті взаємовигідної співпраці було відкрито низку нових явищ, дано інтерпретацію багатьом термоядерним експериментам, виконано прогнознi дослідження.

Основний напрямок досліджень.

Дослідження фізичних процесів у плазмі термоядерних систем (токамаків, стелараторів, сферичних торів), передусім процесів, пов'язаних з енергійними іонами, що утворюються внаслідок термоядерної реакції, інжекції пучків нейтральних атомів та високочастотного нагрівання плазми.

У складі відділу 4 доктори і 4 кандидати наук. Індекс Гірша $h = 31$ (за версією Гугл).

Основні наукові досягнення та науково-технічні розробки.

1. Закладено основи фізики енергійних (надтеплових) іонів та фізики термоядерного горіння в реакторах-токамаках та стелараторах.

2. Відкрито нові явища та ефекти, частина яких була підтверджена експериментально:

новий клас нестійкостей плазми, пов'язаний з термоядерними альфа-частинками, передбачення якого стимулювало як теоретичні, так і експериментальні дослідження в цьому напрямку у світі;

критична енергія іонів у МГД-активній плазмі, вище якої іони з малими позовжніми швидкостями стають практично нечутливими до МГД-збурень. Це передбачення було підтверджено експериментально в перших експериментах з дейтерій-тритієвою плазмою на найбільшому американському токамаку TFTR, а згодом на інших токамаках США та ЄС;

просторове каналювання енергії та імпульсу енергійних іонів, яке пояснює експерименти з аномальним нагрівом плазми у сферичному торі NSTX (США);

нові типи альфвенових коливань та резонансів між хвилями та іонними пучками у стелараторах, існування яких підтверджено в експериментах на стелараторах Wendelstein 7-AS (Німеччина) та LHD (Японія);

аномальний електронний транспорт, що виникає при збудженні іонним пучком альфвенової хвилі;

якісно новий процес із перезамкненням силових ліній магнітного поля, який може мати місце як в лабораторній, так і космічній плазмі; процес підтверджено в числових розрахунках американських авторів;

стабілізація фішбон-нестійкості плазми при збільшенні тиску плазми, підтверджено на сферичному торі MAST (Англія);

механізм стохастичної дифузії енергійних іонів у стелараторах, який вважається основним для оптимізованих стелараторів лінії Wendelstein (Німеччина);

механізм різкого падіння частоти при спалахах фішбон-нестійкості плазми, яке спостерігається на всіх сучасних токамаках;

збудження альфвенових хвиль у токамаках магнітними островами, яке може бути відповідальним за високочастотну активність, яка спостерігалась на токамаках FTU (Італія) і HL-2A (Китай);

генерація струму у приосьовій області плазми токамаків альфа-частинками, яка є принципово важливою для концепції стаціонарного токамака з використанням неокласичних процесів у плазмі.

3. Дано інтерпретацію явищам, які спостерігалися в експериментах, але не мали пояснення, зокрема таким:

теплові колапси в стелараторі Wendelstein 7-AS (Німеччина);

широкий смугастий частотний спектр коливань, збуджених іонним пучком, у Wendelstein 7-AS;

перерозподіл іонів пучка в токамаку DIII-D (США) внаслідок пилчастих коливань;

зникнення «гарячої плями» – сильно локалізованого джерела випромінювання гамма-променів та нейтронів, яке відбувалося після колапсу пилчастих коливань у JET (найбільшому у світі токамаку, Англія);

надтеплове іонно-циклотронне випромінювання в токамаках, зокрема у JET (Англія);

деградація нагрівання плазми в NSTX через збудження іонними пучками альфвенових коливань;

утворення пагорбу на іонно-пучковому розподілі (“high-energy feature”) в NSTX (США);

збудження парної та непарної TAE-мод (Toroidicity-induced Alfvén Eigenmodes) у стелараторі LHD (Японія);

зникнення альфвенових каскадів при електронному циклотронному нагріванні в токамаках DIII-D (США) і ASDEX Upgrade (Німеччина).

4. Виконано прогнози та пошукові дослідження:

обчислено потоки альфа-частинок (продуктів термоядерної реакції) у плазмі та на першу стінку у першому радянському проекті реактора-токамака Т-20 та проекті ОТР, для німецького проекту реактора-

стеларатора HELIAS, міжнародного реактора-токамака ITER, токамака JET;

передбачено можливість збудження великомасштабних власних коливань – «ізомон»-нестійкостей плазми – у запланованих експериментах з інжекцією пучків нейтральних атомів в оптимізованому й найбільшому стелараторі Wendelstein 7-X (Німеччина);

уперше показано, що режим з немонотонним профілем струму в плазмі є можливим і перспективним. Зокрема, він може мати місце у міжнародному токамаку ITER, який споруджується у Франції;

показано принципову можливість покращення утримання енергійних іонів у стелараторах за допомогою ВЧ-поля. Як приклад для можливого застосування розвиненої теорії розглянуто заплановані експерименти з нагріванням плазми інжекцією енергійних іонів у стелараторі Wendelstein 7-X;

розроблено теорію плазмового двигуна з використанням електромагнітного поля, що обертається. Результати можуть бути використані для оптимізації експериментів, спрямованих на створення плазмового двигуна для довготривалих космічних польотів;

запропоновано концепцію гібридного реактора синтезу-поділу ядер з бланкетом, близьким до критичного. Перевага цього реактора в тому, що вимоги до параметрів плазми є багато слабкішими, ніж в інших гібридних реакторах і, особливо, у термоядерному реакторі.

Актуальність обраного напрямку досліджень буде лише зростати при наближенні до створення експериментального реактора ITER, демонстраційного термоядерного реактора DEMO та промислових термоядерних реакторів.

Державні та академічні премії.

Премія НАН України імені К. Д. Синельникова 2003 р. за серію робіт «МГД-явища та транспорт іонів високих енергій у термоядерній плазмі» (Я. І. Колесниченко, В. В. Луценко, Ю. В. Яковенко).

Міжнародна співпраця.

Завдяки контракту STINT (Swedish Foundation for International Cooperation in Research and Higher Education) Dnr 96/152 було з'ясовано природу надтеплого іонно-циклотронного випромінювання з плазми токамаків (Я. І. Колесниченко став переможцем конкурсу STINT). Було показано, що надтеплове іонно-циклотронне випромінювання виникає через магнітозвукову нестійкість, що підсилюється тороїдальним дрейфом енергійних іонів. Це пояснює ряд частот у

спектрі надтеплого іонно-циклотронного випромінювання в експериментах на європейському токамаку JET.

З кінця 1990-х триває плідна співпраця ВТЯС з Принстонською лабораторією фізики плазми, США (Princeton Plasma Physics Laboratory, PPPL) та Інститутом фізики плазми Макса Планка, Німеччина (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, IPP).

Співпраця з PPPL відбувалась у рамках чотирьох проектів CRDF: #UP2-290 (1997 - 1999), #UP2-2114 (2000 - 2001), #UP2-2419-KV-02 (2002 - 2004) та #UKP2-2463-KV-05 (2005 - 2007). (Зазначимо, що ймовірність виграти конкурс CRDF була 10^{-1} , таким чином ймовірність отримати чотири гранти CRDF була 10^{-4} !) Керівником цих проектів з боку США був Р. Вайт, з українського боку – Я. І. Колесниченко.



Українська команда проекту CRDF з проф. Р. Вайт (R. White) – провідний американський фізик-теоретик із Принстонської лабораторії фізики плазми (PPPL), липень 2001 р. На фото зліва направо: В. В. Луценко, Ю. В. Яковенко, Р. Вайт, Я. І. Колесниченко, В. С. Беліков, В. С. Марченко. Українська команда, очолювана Я. І. Колесниченком, та американська на чолі з Р. Вайтом чотири рази вигравали престижний конкурс проектів CRDF, починаючи з 1997 р. Плідна співпраця вчених ІЯД та PPPL також відбувалася завдяки проектам УНТЦ та фінансовій підтримці з боку PPPL.

Уперше було показано, що високе β (β – це відношення тиску плазми до тиску магнітного поля) веде до стабілізації низькочастотної гілки фішбон-нестійкості, що збуджується захопленими частинками.

Було показано, також уперше, що високе β може погіршувати утримання захоплених енергійних іонів у сферичному торі під час магнітного перезамкнення. Було передбачено, що енергійні іони втрачають можливість стабілізувати МГД-активність при високих β . Це передбачення узгоджується з тим фактом, що велика популяція швидких іонів у плазмі сферичного тора NSTX (PPPL) не стабілізує нестійкості пилчастих коливань. Було створено числовий код OFSEF для розрахунку транспорту частинок під час пилчастих коливань.

Співпраця з Інститутом фізики плазми Макса Планка (IPP) розпочалась у рамках партнерського проекту УНТЦ № Р-034 (1999 - 2008). Спершу основним завданням цього проекту було дослідження фізики енергійних іонів у стелараторах типу Wendelstein та токамака ASDEX-U. Після перенесення стелараторних досліджень з Гархінга під Мюнхеном до Грайфсвальда спільні дослідницькі зусилля сконцентрувались на стелараторах. У різний час керівниками проектів з німецького боку були С. Гюнтер, Г. Вобіг, А. Веллер, з українського – Я. І. Колесниченко.



Міжнародна конференція “Innovative Concepts and Theory of Stellarators”, Київ, 2001 р., якою було започатковано серію цих конференцій. На пердньому плані – д-р Г. Вобіг (H. Wobig), один з фундаторів стелараторних досліджень у Німеччині. З ним та його групою в Інституті фізики плазми Макса Планка (IPP) у 1999 р. було започатковано співпрацю між вченими ІЯД та IPP у рамках довготривалого партнерського проекту УНТЦ, а згодом – у рамках регулярних проектів УНТЦ.

У рамках співпраці IPP та ІЯД створено теорію неідеальної фішбон-нестійкості з беззіткневою фізикою в сингулярному шарі, яка може пояснити температурні спади, спостережені під час фішбон-активності в токамаку ASDEX Upgrade. Передбачено нові типи альфвенових мод та резонансів «хвиля - частинка», зумовлених відсутністю аксіальної симетрії в стелараторах. Було знайдено, що послідовні зміни частот дестабілізованих мод, що спостерігались на стелараторі Wendelstein 7-AS (W7-AS), корелюють з «естафетою» резонансів хвилі з частинками протягом часової еволюції густини плазми. Було встановлено різні типи нестійкостей на W7-AS. Відкрито новий механізм аномальної теплопровідності плазми, що дало змогу пояснити експерименти на W7-AS, де були помічені суттєві спади енергії плазми під час виникнення нестійкостей. Передбачено існування незвичайної глобальної альфвенової власної моди (NGAE-моди). Відкрито новий механізм стохастичної дифузії енергійних іонів у стелараторах, який вважається основним для оптимізованих стелараторів. Було розроблено кілька кодів: COBRA, що обраховує альфвенові континууми, BOA, що розраховує альфвенові власні моди, та GAMMA – для розрахунку інкременту нестійкостей у стелараторах. Теоретичні результати, отримані в рамках проекту, було підтверджено на стелараторі LHD (Японія). Вони також були використані при розробці проекту реактора Helias.

З 2008 по 2011 р. група ВТЯС у рамках проекту УНТЦ № 4588 співпрацювала з Інститутом фізики плазми Макса Планка (керівник А. Веллер; пізніше – П. Геландер), Принстонською лабораторією фізики плазми (Р. Вайт) та Університетом Каліфорнії в Ірвайні, США (В. Гайдбрінк). Було отримано цікаві й практично важливі результати. Тут ми згадаємо лише про відкриття нового явища – просторового каналування енергії та імпульсу енергійних іонів нестійкостями, що збуджуються цими іонами. Завдяки цьому явищу радіальний профіль нагрівання плазми може значно змінитись і може мати місце чірпінг частоти під час нестійкості. Таким чином, роль нестійкостей, що збуджуються енергійними іонами на ITER та в майбутніх реакторах, може бути більш важливішою, ніж до цього вважалось. Результатами проекту стали публікації в реферованих журналах, таких як Physical Review Letters, Europhysics Letters, Nuclear Fusion, Physics of Plasmas, Plasma Physics and Controlled Fusion тощо.

У 2015 - січні 2017 р. міжнародна співпраця відділу здійснювалась через проект УНТЦ № 6058. Закордонними партнерами були

П. Геландер (Інститут фізики плазми Макса Планка, Грайсвальд), Р. Вайт (Принстонська лабораторія фізики плазми), Ф. Романеллі та Д. Борба (JET), В. Гайдбрінк (Університет Каліфорнії в Ірвайні США). Було показано, що в стелараторі W7-X можуть існувати моди альфвенового типу, які зазнають впливу стисності плазми і мають однакові торієдалльні та полоїєдалльні модові номери (так звані «ізомон-моди»); іони інжектіваного пучка можуть резонансно взаємодіяти з цими модами, що веде до нестійкості, яка поширюється на велику частку поперечного перерізу плазми. Було вдосконалено код OSFEF, що обраховує перерозподіл енергійних іонів під час колапсу пилчастих коливань. Показано, що резонансні енергійні іони, що збуджують геодезичну акустичну моду, можуть значно сповільнюватись і зміщуватись за радіальною координатою; було показано, що зміна розподілу цих іонів за швидкостями значно впливає на спади нейтронної емісії, які спостерігались на DIII-D. Досліджувалась можливість покращити утримання енергійних іонів, перетворюючи захоплені частинки в пролітні за допомогою радіочастотних хвиль. Вивчалось так зване «цеберне перенесення» енергійних іонів – просторове перемішування цих іонів внаслідок просторового переміщення резонансів. Знайдено негативну кореляцію між тривалістю проміжку часу між колапсами пилчастих коливань і тривалістю наступного колапсу в розрядах JET.

Завдяки Проекту Р4 Австрійської академії наук невелика група з ВТЯС (В. О. Яворський, В. Я. Голобородько) брала участь у дослідженнях на європейському токамаді JET (Великобританія). Основною темою цих досліджень було моделювання енергійних іонів, що втрачаються або утримуються на JET та ITER. У минулому була також співпраця з Національним інститутом термоядерних досліджень (Японія), де Я. І. Колесниченко був запрошеним професором у 2003 р. Окрім того, ВТЯС мав декілька дослідницьких проектів МАГATE CRP та грантів Міжнародного наукового фонду (International Science Foundation).

У 2017 р. Україна приєдналася до термоядерної дослідницької програми Євратома, що здійснюється в рамках консорціуму EUROfusion – об'єднання національних дослідницьких організацій, спрямованого на дослідження термоядерної плазми та створення термоядерного реактора. Пропозиції ВТЯС було прийнято одразу до кількох так званих Пакетів робіт (напрямків, за якими працює консорціум) – токамаки JET та ASDEX Upgrade, стеларатори. Зокрема, Пакет робіт JET1 охоплює роботи на однойменному найбільшому у світі токамаку,

розташованому в Калемському науковому центрі (Великобританія). Наразі ВТЯС разом з іншими європейськими науковими установами виконує теоретичні роботи, спрямовані на підготовку до нової серії експериментів з дейтерієво-тритієвою плазмою.



Учасники семінару за участю українських фахівців та експерта Євроф'южн д-ра Г. Вейсена (H. Weisen) з нагоди приєднання України до робіт з КТС за програмою Консорціуму Євроф'южн. Семінар відбувся в ІЯД у грудні 2016 р. Він сприяв успішному залученню вже на початку 2017 р. фахівців ІЯД до Пакету робіт JET1 щодо експериментів на найбільшому у світі токамаку JET (Joint European Torus) у Калемському науковому центрі (Великобританія).

Проф. Я. І. Колесниченко нагороджений медаллю CRDF (США) за сприяння розвитку міжнародної співпраці в галузі науки і техніки (2005).

Список найбільш важливих публікацій відділу.

1. Ya.I. Kolesnichenko. The role of alpha particles in tokamak reactors. Invited review paper. Nucl. Fusion 20 (1980) 727. (CI = 187, Google Scholar data).
2. R.J. Hawryluk, ..., V. Yavorski, et al. Fusion plasma experiments on TFTR: A 20 year retrospective. Phys. Plasmas 5 (1998) 1577. (CI = 114).
3. Ya.I. Kolesnichenko, V.V. Lutsenko, H. Wobig, Yu.V. Yakovenko, O.P. Fesenyuk. Alfvén continuum and high-frequency eigenmodes in optimized stellarators. Phys. Plasmas 8 (2001) 491. (CI = 75).

4. Ya.I. Kolesnichenko, Yu.V. Yakovenko. Theory of fast ion transport during sawtooth crashes in tokamaks. Nucl. Fusion 36 (1996) 159. (CI = 72).
5. V.Ya. Goloborod'ko, Ya.I. Kolesnichenko, V.A. Yavorskij. Neoclassical theory of alpha-particle transport in the central region of a tokamak plasma. Nucl. Fusion 23 (1983) 399. (CI = 60).
6. V.S. Belikov, Ya.I. Kolesnichenko. Magnetoacoustic cyclotron instability in a thermonuclear plasma. ЖТФ 45 (1975) 1798; Sov. Phys. – Tech. Phys. 20 (1976) 1146. (CI = 51).
7. Ya.I. Kolesnichenko, Yu.V. Yakovenko, D. Anderson, M. Lisak, F. Wising. Sawtooth oscillations with the central safety factor, q_0 , below unity. Phys. Rev. Lett. 68 (1992) 3881. (CI = 47).
8. V. Yavorskij, V. Goloborod'ko, K. Schoepf, S.E. Sharapov, C.D. Chailis, S. Reznik, D. Stork. Confinement of fusion alpha-particles in JET hollow current equilibrium. Nucl. Fusion 43 (2003) 1077. (CI = 46).
9. Ya.I. Kolesnichenko, V.V. Lutsenko, R.B. White, Yu.V. Yakovenko. Effect of sawtooth oscillations on energetic ions. Invited talk at the IAEA Technical Committee Meeting on Energetic Particles in Fusion Research, Naka, Japan (1999); Invited paper, Nucl. Fusion 40 (2000) 1325. (CI = 50).
10. Ya.I. Kolesnichenko, V.V. Lutsenko, H. Wobig, Yu.V. Yakovenko, Alfvén instabilities driven by circulating ions in optimized stellarators and their possible consequences in a Helias reactor. Phys. Plasmas 9 (2002) 517. (CI = 47).
11. Ya.I. Kolesnichenko, S. Yamamoto, K. Yamazaki, V.V. Lutsenko, N. Nakajima, Y. Narushima, K. Toi, Yu.V. Yakovenko. Interplay of energetic ions and Alfvén modes in helical plasmas. Phys. Plasmas 11 (2004) 158. (CI = 30).
12. T. Fülöp, Ya.I. Kolesnichenko, M. Lisak, D. Anderson. Origin of superthermal ion cyclotron emission in tokamaks. Nucl. Fusion 37 (1997) 1281. (CI = 39).
13. C.D. Beidler, Ya.I. Kolesnichenko, V.S. Marchenko, I.N. Sidorenko, H. Wobig. Stochastic diffusion of energetic ions in optimized stellarators. Phys. Plasmas 8 (2001) 2731. (CI = 33).
14. Ya.I. Kolesnichenko, V.V. Lutsenko, A. Weller, A. Werner, Yu.V. Yakovenko, J. Geiger, O.P. Fesenyuk. Conventional and nonconventional global Alfvén eigenmodes in stellarators. Phys. Plasmas 14 (2007) 102504. (CI = 33).
15. Ya.I. Kolesnichenko, Yu.V. Yakovenko, V.V. Lutsenko. Channeling of the energy and momentum during energetic-ion-driven instabilities in fusion plasmas. Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 075001. (CI = 27).

ВІДДІЛ ФІЗИКИ ПЛАЗМИ ТА ПЛАЗМОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Історія відділу фізики плазми та плазмових технологій досить складна. Основою теперішнього відділу була лабораторія фізики плазми (ЛФП), створена в ІЯД у 1970 р. Першим завідувачем ЛФП до 1973 р. був к.ф.-м.н. Леонід Львович Пасічник. У 1972 р. Л. Л. Пасічник захистив дисертацію на здобуття ступеня доктора фіз.-мат. наук. У 1973 р. на базі ЛФП було створено відділ фізики плазми (ВФП), який очолював Л. Л. Пасічник до 1984 р.



Л. Л. Пасічник

Перші роки після створення ЛФП основні дослідження проводились на території відділу газової електроніки Інституту фізики АН УРСР, де знаходилась основна експериментальна база лабораторії до 1975 р., і у двох кімнатах у корпусі № 101. Одночасно проводились роботи по будівництву і монтажу другого поверху в експериментальному залі в корпусі № 105. У цей час проводились такі наукові роботи: дослідження дифузійних процесів у плазмі; взаємодії іонних потоків з плазмою; вивчення передбаченого теоретично явища просвітлення плазмових хвильових бар'єрів, обумовлене лінійними кінетичними

ефектами; експериментально вивчалась можливість ефективної втрати енергії направленої руху іонних потоків при їхній колективній взаємодії з плазмою в умовах збудження іонно-звукової нестійкості та нижньогібридного плазмового резонансу; дослідження високочастотних розрядів; почались дослідження імпульсних високовольтних розрядів у воді (неідеальної плазми, 1972 р.) та ін.

У 1975 р. було проведено перевезення установок і переселення співробітників у новий корпус № 105. Почались роботи по прокладанню комунікацій і монтаж як працюючих установок, так і нових. Було розширено й напрямки досліджень, у тому числі і прикладних та господарсько-договірних. Це були дослідження розрядів у вакуумі в парах металів, у тому числі в магнітних полях, і розробка методів нанесення металевих плівок з високою адгезією між нанесеною плівкою та

підкладок з різних матеріалів, які могли використовуватися в мікроелектроніці. Розроблялись, монтувались і досліджувались великі установки джерел іонів, у тому числі важких і багатозарядних. Продовжувались дослідження високочастотних розрядів у магнітних полях, які могли використовуватись для розробки плазмо-хімічних реакторів для обробки матеріалів мікроелектроніки. Також проводились дослідження розрядів у воді з метою збільшення коефіцієнта корисної дії розрядно-імпульсних установок. Почались спільні роботи з Інститутом кібернетики (ІК) і СКБ ММС ІК АН УРСР по створенню малого токамака для можливості придушення виникаючих у плазмі нестійкостей за допомогою керованих магнітних полів. До кінця 1984 р. всі ці роботи проводились при активній підтримці і під керівництвом Л. Л. Пасічника, який трагічно загинув під час службового відрядження.



Г. С. Кириченко
(1939 - 2016)



А. Г. Борисенко

Протягом 1986 - 2009 рр. відділом керував д.ф.-м.н. Георгій Сергійович Кириченко, а з 2010 по 2015 рр. завідувачем ВФП був к.ф.-м.н. Анатолій Григорович Борисенко.

Для розширення господарчо-договірних робіт у липні 1979 р. на базі відділу фізики плазми було створено відділ плазмових технологій (ВПТ) (№ 17) СКТБ з ЕВ ІЯД АН УРСР під керівництвом к.ф.-м.н. В. Ф. Семенюка, який працював у відділі до 1988 р. З 1988 по 2000 р. завідувачем відділу № 17 був к.ф.-м.н. В. В. Усталов. Спочатку у ВПТ було 7 співробітників, які були переведені з ВФП. У 1983 - 1985 рр. було побудовано корпус з усіма необхідними комунікаціями. За кош-

ти, одержані від замовників, було закуплено 10 вакуумних установок різного призначення. Вони були переобладнані під розроблені й виготовлені у відділі установки для нанесення металевих та діелектричних плівок, плазмохімічних установок для травлення металів, напівпровідників, діелектриків та високотемпературних надпровідників. Було закуплено також все необхідне обладнання для оптичних, спектроскопічних і мас-спектрометричних досліджень плазми як стаціонарних, так і імпульсних розрядів.

Господарські договори укладалися з підприємствами України, республіки Білорусь, РРФСР. Договори були з Інститутом імпульсних процесів і технологій АН УРСР, Миколаїв; НДІ «Оріон», Київ; завод «Квазар», Київ; Раменським проектно конструкторським бюро авіабудування, Раменське Московської області; конструкторським бюро заводу ім. Ленінського комсомолу, Новгород; Московським радіотехнічним інститутом, Москва; НДІ «Оріон», Москва; НДІ точної механіки та НДІ молекулярної електроніки, Зеленоград Московської області; Всесоюзним НДІ хроматографії, Москва; НДІ радіоматеріалів, Мінськ; Інститутом електрозварювання АН УРСР імені Є. О. Патона; Інститутом кібернетики і СКБ ММС та машин ІК АН УРСР та ін. У 1988 р. у відділі налічувалось 36 співробітників. Проводились спільні дослідження і велась співпраця з відділом фізики плазми, а також з відділом теорії плазми. Були спільні роботи з кафедрою техніки високих напруг Московського енергетичного інституту.

Після розпаду СРСР різко зменшилось фінансування прикладних робіт і частина висококваліфікованих співробітників звільнилась. За ініціативи Російської Федерації були припинені всі договори з Україною. У цей час активізувалась робота з підприємствами України. У 1995 р. прем'єр-міністром України Є. К. Марчуком були підписані дві Програми розвитку мікроелектронної промисловості в Україні до 2000 р. У них СКТБ з ЕВ ІЯД НАН України разом з верстатобудівним заводом «Веркон» (Київ) були основними виконавцями та ВО «Квазар» (Київ) основним споживачем розроблених автоматизованих плазмохімічних установок з низькими енергіями іонів. Плазмохімічні установки дозволяли одержувати субмікронні розміри елементів мікросхем та плазмохімічне травлення без радіаційних пошкоджень при високій продуктивності обробки матеріалів мікроелектроніки. У 2000 р. у зв'язку з ліквідацією СКТБ з ЕВ ІЯД відділ № 17 був переве-

дений до ІЯД як відділ плазових технологій, яким до листопада 2001 р. керував В. В. Усталов. У кінці 2001 р. відділ було реорганізовано в лабораторію плазових технологій (ЛПТ) відділу фізики плазми, чисельність співробітників якої у 2008 р. становила 9 осіб. Керівником ЛПТ до 2013 р. був к.ф.-м.н. Олег Антонович Федорович. У 2013 р. на базі ЛПТ було створено відділ фізики плазових технологій (ВФПТ), в якому у 2014 р. працювало 13 співробітників (з них 2 аспіранти). Керівником цього відділу було обрано за конкурсом О. А. Федоровича, який працював завідувачем до 2015 р.



О. А. Федорович

У 1970 р. також був створений відділ теорії плазми (ВТП) під керівництвом д.ф.-м.н., проф. В. М. Ораєвського, який у 1974 р. перейшов до НПО «Енергія» (Москва), а пізніше працював директором Інституту земного магнетизму і радіохвиль АН СРСР. У 1974 р. завідувачем ВТП було призначено к.ф.-м.н. Т. О. Давидову, яка у 1982 р. захистила докторську дисертацію і була завідувачем цього відділу до 2006 р. На базі ВТП в 1982 р. було створено відділ теорії перспективної ядерної енергетики (тепер відділ теорії ядерного синтезу), керівником якого дотепер є д.ф.-м.н., проф. Я. І. Колесниченко. У 1988 р. у ВТП було 12 співробітників. З 2006 до 2013 р. завідувачем ВТП був д.ф.-м.н. К. П. Шамрай. У 2013 р. ВТП було ліквідовано, а співробітники були розподілені між відділами фізики плазми і теорії ядерного синтезу. Після реорганізації і об'єднання відділів фізики плазми (ВФП) та відділу фізики плазових технологій (ВФПТ) у відділ фізики плазми та плазових технологій (ВФП та ПТ) по теперішній час його очолює к.ф.-м.н. О. А. Федорович (автор та співавтор більш ніж 275 робіт, з них 4 авторських свідоцтва та 1 патент на винахід). У 2016 р. у ВФП та ПТ було 23 співробітники.

На даний час у складі ВФП та ПТ працює 18 співробітників, з них 9 кандидатів наук. У 2019 р. відбувся захист 1 докторської і 2 кандидатських дисертацій.

Усього за минулі роки працівники відділу фізики плазми захистили 5 докторських дисертацій та 22 кандидатські. У відділі плазмових технологій СКТБ з ЕВ ІЯД було захищено дві кандидатські дисертації.

Основні напрямки досліджень.

Експериментальні та теоретичні дослідження фундаментальних механізмів генерації низькотемпературної плазми, транспортних та хвильових процесів у плазмі високочастотних індукційних та ємнісних, електричних імпульсних та стаціонарних розрядів: у парах металів; газах, включаючи хімічно активі гази; конденсованих середовищах. Дослідження оптичних та транспортних властивостей щільної (неідеальної) плазми, процесів рекомбінації в ній.

Розробка нових принципів побудови ефективних плазмових джерел для наукового та технічного застосування, розробка нових технологій плазмохімічного травлення нових матеріалів мікроелектроніки та нанесення функціональних шарів з високою адгезією. Дослідження проводяться електрофізичними, оптичними, спектроскопічними та мас-спектрометричними методами. Діапазон досліджень: температура плазми змінюється від 5000 до 50 000 К; концентрація електронів в плазмі від 10^9 до 10^{22} см⁻³.

Дослідження впливу взаємодії іонів водню та його ізотопів з конструкційними матеріалами, які використовуються в ядерній енергетиці (спільно з Інститутом фізики напівпровідників та Інститутом проблем матеріалознавства НАН України).

Розробка та виготовлення радіаційно стійких мікροстріпових металевих детекторів, «прозорих» для іонізуючих випромінювань з просторовою роздільною здатністю до 3 мкм, які не мають аналогів у світі (спільно з відділом фізики високих енергій ІЯД).

Теоретичні дослідження механізмів трансформації та розсіяння плазмових хвиль.

Створення теоретичної моделі плазмового прискорювача із замкненим дрейфом електронів та відкритими газовими стінками (спільно з Інститутом фізики НАН України).

Основні наукові досягнення.

Враховуючи, що в теперішньому відділі фізики плазми та плазмових технологій працюють співробітники відділів фізики плазми, фізики плазмових технологій та частково теорії плазми, у досягненнях приводяться основні досягнення перших двох відділів та тих співробітників відділу теорії плазми, які працюють зараз у ВФП та ПТ.

Співробітниками ВФП було встановлено умови збудження і просторову структуру коливань при дрейфово-дисипативній нестійкості,

визначено вплив нестійкості на дифузію плазми (Л. Л. Пасічник, В. Г. Наумовець, О. С. Попович).

Явище просвітлення плазових хвильових бар'єрів, обумовлене лінійними кінетичними ефектами (теоретично передбачене В. М. Ораєвським та В. В. Лиситченком, ВТП), було виявлено та досліджено експериментально. Ці дослідження були дуже актуальними для розвитку космічного зв'язку (Л. І. Романюк, М. Є. Свавільний, В. В. Усталов, ВФП).

Експериментально було доведено можливість та досліджені умови значної безіткневої втрати направленої енергії та нелінійного гальмування іонних потоків у плазмі при збудженні іонно-звукової нестійкості та нижньогібридного плазового резонансу (Г. С. Кириченко, А. Г. Борисенко, В. Г. Хмарук, ВФП).

Вивчено динаміку розряду Пенінга з розжареним катодом (Л. І. Романюк, М. Є. Свавільний, В. М. Слободян та ін., ВФП).

Розроблено метод отримання спокійної стаціонарної плазми в магнітному полі та амплітудно-частотний метод дослідження дифузії електронів та іонів у газах і плазмі (Л. Л. Пасічник, В. Г. Наумовець, В. В. Ягола, ВФП).

Виявлено солітоноподібну структуру сильної параметричної турбулентності плазми в зоні нижньогібридного резонансу (Л. Л. Пасічник, В. Ф. Семенюк, С. Н. Громов, ВФП).

Досліджено нестійкості іонно-звукового типу в плазмі нейтралізованого іонного потоку, що знаходиться в поперечному магнітному полі, які є основною причиною турбулентного нагріву плазми з поперечним струмом (Г. С. Кириченко, В. Ф. Вірко, ВФП).

Спільно з працівниками відділу теорії плазми було експериментально вивчено фізичні властивості плазми ВЧ розрядів та розроблено фізичні основи для побудови ефективних індукційних джерел низькотемпературної плазми на базі геліконних розрядів з неоднорідним магнітним полем. Досліджено механізми поглинання ВЧ енергії в цих розрядах та виявлено прискорення іонів, перспективне для створення безіткових плазових космічних двигунів (Г. С. Кириченко, В. Ф. Вірко, В. М. Слободян, ВФП; К. П. Шамрай та ін., ВТП).

Було досліджено фізичні процеси у вакуумно-дугових розрядах з випаровуванням електродом та параметри створюваних плазових потоків, створено фізико-технічні основи та технологію термоіонного нанесення покриттів високоадгезивних металевих і металево-газових сполук на різні матеріали, розроблено технологічні джерела безкра-

пельних високоіонізованих плазмових потоків твердофазних матеріалів та потоків металево-газової плазми (В. А. Саєнко, А. Г. Борисенко, О. І. Владіміров та ін., ВФП, ВПТ).

Розвинуто нелінійну теорію дрейфової нестійкості у плазмово-оптичних середовищах на прикладі сильнострумової плазмової лінзи та показано, що в плазмовій лінзі можлива реалізація вихрових структур, розвиток яких призводить до утворення стійкого вихору. Створено теоретичну модель плазмового прискорювача із замкненим дрейфом електронів та відкритими газовими стінками (І. В. Літовко, ВФП спільно з працівниками ІФ НАН України).

Розсіяння ленгмюрівських хвиль на когерентних флуктуаціях з електронною плазмовою частотою є неможливими через закони збереження. Якщо має місце процес трансформації, то частота електромагнітної хвилі стає близькою до подвійної плазмової частоти електронів $2\omega_{pe}$. Інтерпретація аномальної радіації електромагнітних хвиль з турбулентної плазми є фундаментальною проблемою астрофізичної плазми.

Запропоновано можливий механізм для пояснення аномальної радіації із сонячної корони – це механізм радіації хвиль на подвійній плазмовій частоті. Досліджено вплив турбулентності на радіацію з плазми сонячної корони завдяки мазер-ефекту. Ці результати актуальні для інтерпретації аномальної електромагнітної радіації в лабораторній і космічній плазмі, наприклад для плазми сонячної корони, суперзірок, іоносферної плазми тощо (В. М. Павленко, В. Г. Панченко, ВФП та ІТ).

Розроблено ряд прототипів плазмових джерел і реакторів для нанесення плівок, плазмохімічного травлення та високоселективної прецизійної обробки різноманітних матеріалів (Л. Л. Пасічник, Г. С. Кириченко, В. А. Саєнко, В. В. Ягола, В. Ф. Семенюк, В. В. Усталов, О. А. Федорович, В. П. Катюха, О. В. Хвастунов, В. А. Глушко, О. Ю. Попов, В. М. Коновал, А. Г. Борисенко, О. І. Владіміров, О. І. Деркач, С. В. Горюк, О. А. Рокицький, ВФП, ВПТ).

Уперше у світі спільно з відділом фізики високих енергій (ВФВЕ) сконструйовано, розроблено технологію і виготовлено 9 типів «прозорих» для ядерних випромінювань мікростріпових детекторів різного призначення з просторовою роздільною здатністю до 3 мкм з високою радіаційною стійкістю, які успішно випробувано на різних ядерних установках у Швейцарії, Великобританії, Франції, Німеччині, Чехії, Україні та інших країнах (О. А. Федорович, А. Г. Борисенко, Є. Г. Костін та ін., ЛПТ ВФП, ВФПТ; В. М. Пугач, О. С. Ковальчук та ін., ВФВЕ).

Досліджено оптичні та транспортні властивості неідеальної плазми імпульсних розрядів у воді (Л. Л. Пасічник, П. Д. Старчик, О. А. Федорович, О. Ю. Попов, ВФП, ВПТ).

Виявлено явище турбулентного перемішування плазми імпульсних електричних розрядів у рідинах, з'ясовано його природу і вплив на властивості таких розрядів. Визначено термодинамічні властивості неідеальної плазми підводних розрядів (Л. Л. Пасічник, П. Д. Старчик, О. А. Федорович, П. В. Порицький, Л. М. Войтенко, О. В. Кононов).

Розроблено спосіб управління опором плазмового каналу висковольтних розрядів у воді, а також спосіб оптимізації вводу електричної енергії в плазмовий канал імпульсних розрядів у воді (А. Ю. Попов, П. Д. Старчик, О. А. Федорович, ВФП, ВПТ).

Експериментально показано, що зі збільшенням швидкості внеску в плазмовий канал імпульсних розрядів у воді збільшуються втрати на електромагнітне випромінювання у видимому та ультрафіолетовому діапазоні випромінювання. Втрати на випромінювання можуть досягати 50 %, що різко зменшує коефіцієнт корисної дії (ККД) електрогідравлічних установок. За результатами цих вимірювань для збільшення ККД розрядно-імпульсних установок Інститут імпульсних процесів і технологій АН України замінив іскрові розряди у воді на електрохімічні вибухи, які ініціюються висковольтним електричним розрядом (Л. Л. Пасічник, П. Д. Старчик, О. А. Федорович, А. Ю. Попов, ВФП, ВПТ).

Експериментально показано, що в щільній плазмі імпульсних розрядів у воді при високих концентраціях (до 10^{22} см^{-3}) із спектрів випромінювання зникають всі лінії як випромінювання, так і поглинання. Вони починають появлятися в міру зниження концентрації електронів у щільній плазмі, досліджено їхню динаміку в міру релаксації плазми. У щільній плазмі порушується закон Больцмана для заселення спектральних рівнів атомів і стають непридатними методики вимірювань температури, якими користуються в розрідженій плазмі. Одержано емпіричну формулу залежності величини «оптичної щільності» (різниця між потенціалом іонізації атома і потенціалом збудження верхнього рівня останньої спостережуваної лінії) від концентрації електронів у плазмі в діапазоні від 10^{17} до 10^{22} см^{-3} і діапазоні температур 5000 - 45000 К. Одержавши в певний момент часу значення величини «оптичної щільності», можна визначити концентрацію електронів у плазмі на поверхні плазмового каналу. Це поки що єдина методика визначення концентрації електронів у щільній (неідеальній) плазмі (О. А. Федорович, ВПТ, ВФПТ).

Одержано зменшення випромінювальної (поглинальної) здатності щільної воднево-кисневої плазми майже в 100 разів порівняно з теоретичними розрахунками при концентрації електронів у плазмі $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Величина зменшення випромінювальної здатності щільної плазми залежить від концентрації електронів у плазмі і зменшується зі зменшенням концентрації електронів. Досліджено динаміку цього явища при зміні концентрації електронів від $3 \cdot 10^{19}$ до 10^{17} см^{-3} . Цей ефект пов'язаний з нереалізацією ліній водню та кисню в спектрах випромінювання (поглинання) в щільній плазмі внаслідок дії мікрополів у плазмі. Величини напруженостей мікрополів при високих концентраціях електронів стають близькими до величин внутрішньоатомних напруженостей електричних полів між ядром та електроном. Нереалізація ліній у щільній плазмі спостерігається не тільки для ліній водню та кисню, а також для ліній атомів усіх металів, у тому числі й тих, які планувалось використовувати як «загорнювачі» в газофазних ядерних реакторах. Отримані результати необхідно враховувати при розробці газофазних ядерних реакторів та космічних двигунів з газофазними ядерними двигунами (О. А. Федорович, ВФПТ).

Експериментально досліджено залежність коефіцієнтів розпаду щільної плазми від концентрації електронів у ній та одержано емпіричну формулу залежності коефіцієнта розпаду від концентрації електронів у діапазоні $10^{15} - 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Показано зменшення експериментально одержаних коефіцієнтів розпаду в густій плазмі порівняно з теоретичними розрахунками по формулах для класичної плазми до шести порядків. При зниженні концентрації плазми до 10^{15} см^{-3} експериментальні результати коефіцієнтів розпаду збігаються з теоретично розрахованими. Цей ефект також пов'язаний із зменшенням кількості рівнів у спектрах атомів унаслідок дії на них великих напруженостей мікрополів у щільній плазмі (О. А. Федорович, Л. М. Войтенко, ЛПТ ВФП, ВФПТ, ВФП та ПТ).

Експериментально одержано провал інтенсивності спектра випромінювання в 4 - 10 разів на ділянці спектра шириною близько 100 нм у видимому діапазоні спектра при вибухах вольфрамових провідників діаметром 300 мкм. Цей провал інтенсивності переміщується в міру розпаду плазми в червону область й ідентифікується як різке зменшення випромінювання щільної плазми на довжинах хвиль, що відповідає плазмовій частоті. Це дало змогу визначити концентрацію електронів у щільній плазмі (О. А. Федорович, ВФПТ).

Одержано суттєву залежність швидкості травлення кремнію від енергії іонів у плазмохімічному реакторі. При енергіях іонів більше 200 еВ відбувається розпилення технологічних шарів і нанесення їх на оброблювані поверхні, що призводить до зменшення в декілька разів швидкості травлення кремнію (В. В. Гладковський, Б. П. Полозов, О. А. Федорович, ВФПТ).



Академік АН СРСР Б. Б. Кадомцев у гостях у відділі фізики плазми. Експериментальний зал у корпусі № 105 (1982 р.). Зліва направо: Л. Л. Пасічник, Б. Б. Кадомцев, В. А. Саєнко



Зліва направо: А. Г. Борисенко, В. А. Саєнко, В. В. Усталов, М. Є. Свавільний, О. А. Федорович – учасники від ІЯД останнього Всесоюзного міжгалузевого наукового-технічного семінару «Фізичні основи і нові напрямки плазмової технології в мікроелектроніці», Махачкала, 1990 р.

Разом із Всесоюзним НДІ хроматографії (Москва) досліджено катафорез в електричному розряді у водні і гелії при високому тиску та розроблено пристрій для очистки благородних газів від домішок, що дало змогу на порядок зменшити кількість домішок у газі-носії хроматографів і на порядок підвищити чутливість хроматографічного аналізу газів (О. А. Федорович, ВПТ; В. Л. Будович, Б. П. Охотніков та ін., Всесоюзний НДІ хроматографії, Москва).

Спільно з Московським енергетичним інститутом виміряно розподіл температури вибухаючого мідного провідника та мікродуг, що виникають при цьому за умов, характерних для спрацювання запобіжників. Це дозволило розробити малогабаритні електричні запобіжники (О. А. Федорович, ВПТ; В. Л. Будович, І. П. Кужекін, О. С. Бізяєв, Московський енергетичний інститут, Москва).

Разом з СКБ ММС ІК АН УРСР розроблено спосіб металізації отворів багатошарових друкованих плат, при якому вдалося замінити 13 «мокрих» процесів на один плазмовий, значно покращити якість пістонів і спростити технологічний процес виготовлення багатошарових друкованих плат. Впроваджено в СКБ ММС ІК АН УРСР (Л. Л. Пасічник, В. Ф. Семенюк, О. А. Федорович та ін., ВФП, ВПТ; О. О. Снегур, В. О. Грабенко та ін., СКБ ММС ІК АН УРСР). За впровадження авторського свідоцтва у виробництво автори одержали нагрудні знаки «Изобретатель СССР».

У співробітництві з НДІ «Оріон» уперше в Україні було розроблено замкнутий цикл промислового виробництва швидкісних р-і-п діодів. Діоди, виготовлені на основі карбіду кремнію, здатні комутувати НВЧ сигнали потужністю 2 кВт з часом переключення $\leq 35 \cdot 10^{-9}$ с і працювали при температурах до 500 °С (О. А. Федорович, А. Г. Борисенко, Б. П. Полозов, ЛПТ ВФП; М. С. Болтовець та ін., НДІ «Оріон», Київ).

Співробітниками відділів було розроблено фізико-технічні основи, створено та впроваджено у виробництво ряд прототипів плазмових джерел та відповідні технології для плазмохімічного травлення і обробки матеріалів, нанесення тонких плівок різноманітних матеріалів для потреб нано- і мікроелектроніки (ВФП, ВПТ, ВФПТ).

Впроваджено у виробництво ряд плазмохімічних пристроїв різного призначення та плазмових технологій на підприємствах України, республіки Білорусь та в інших країнах (О. А. Федорович із співавторами, ВПТ № 17 СКТБ з ЕВ ІЯД, ЛПТ ВФП).

За дослідження явища просвітлення плазмових хвильових бар'єрів унаслідок лінійних кінетичних ефектів співробітникам ВФП

Л. І. Романюку, М. Є. Свасильному, В. В. Усталову та співробітникам ВТП В. М. Ораєвському і В. В. Лиситченку в 1979 р. присуджено Державну премію УРСР.

ВИПСКА З ПОСТАНОВИ ЦЕНТРАЛЬНОГО КОМПІТЕТУ КОМПАРТІ УКРАЇНИ
І РАДИ МІНІСТРІВ УКРАЇНСЬКОЇ РСР

від 7 грудня 1979 року

«ПРО ПРИСУДЖЕННЯ ДЕРЖАВНИХ ПРЕМІЙ УКРАЇНСЬКОЇ РСР
В ГАЛУЗІ НАУКИ І ТЕХНІКИ 1979 РОКУ»

Центральний Комітет Компартії України і Рада Міністрів Української РСР,
розглянувши подання Комітету по Державним преміям Української РСР в галузі
науки і техніки при Раді Міністрів УРСР, ПОСТАНОВЛЯЮТЬ присудити Державні
премії Української РСР 1979 року:

1. **ОРАЄВСЬКОМУ** Віктору Михайловичу, д. ф.-м. н., начальнику відділу науко-
во-виробничого обслуговування «Енергія», **МОІСЕЄВУ** Сечено Самійловичу, д. ф.-м. н.,
РОХІНУ Миколі Сергійовичу, к. ф.-м. н., старшому науковому співробітнику,
ПОДЯНИЦЬКОМУ Олександрові Андрійовичу, молодшому науковому співробітнику,
працівникам Харківського фізико-технічного інституту Академії наук УРСР,
РОМАНЮКУ Леоніду Івановичу, к. ф.-м. н., старшому науковому співробітнику,
УСТАЛОВУ Валентину Васильовичу, к. ф.-м. н., молодшому науковому співробітнику,
СВАСИЛЬНОМУ Миколі Євгеновичу, старшому інженеру, **ЛІСИТЧЕНКУ** Віктору
Васильовичу, інженеру, працівникам Інституту термич досліджень Академії наук
УРСР, **ХРАТОВУ** Володимиру Івановичу, к. ф.-м. н., завідувачу кафедрою,
ФІЛІПЕНКУ Владиславу Юхимовичу, старшому науковому співробітнику, працівни-
кам Харківського державного університету ім. О. М. Горького, — за роботу «Про-
єктування плазмових акумуляторів висхідних лінійних акумулятивних ефектів».



ДИПЛОМ

ЛАУРЕАТА ДЕРЖАВНОЇ ПРЕМІЇ
УКРАЇНСЬКОЇ РСР

У 2007 р. розробки відділу були представлені на міжнародній виставці в Ганновері (Німеччина).

У 2004 - 2018 рр. співробітники відділу/лабораторії брали участь у всіх всеукраїнських виставках «Барвіста Україна» та фестивалів «Наука – виробництво», а також міжнародних виставках «Нанотехнології», «Наука. Інновації. Технології», Міжнародному форумі «Innovation Market», «Hi-Tech Expo. Високі технології», виставці у Верховній Раді України у 2016 р. та ін. У 2006 р. ЛПТ ВФП була нагороджена Дипломом Президії НАН України за активну участь у загальнодержавній виставковій акції «Барвіста Україна».

У 2013 р. за розробки, представлені на виставці, присвяченій 95-річчю з дня заснування Національної академії



Учасники конференції по розрядах у воді, Миколаїв, 1984 р. Зліва направо: П. Д. Старчик (ІЯД), Є. В. Кривицький (ПКБ електрогідравліки АН УРСР, Миколаїв), Л. Л. Пасічник (ІЯД), О. І. Вовченко (ПКБ електрогідравліки АН УРСР, Миколаїв)

наук України, відділом отримано Грамоту Президії НАН України. Також О. А. Федорович представив одну з 12 доповідей на «Круглому столі», присвяченому ювілею. Було отримано 6 грамот та дипломів. У цьому ж році О. А. Федорович був удостоєний Диплома Міжнародної академії рейтингових технологій і соціології «Золота фортуна» та нагороджений медаллю «Трудова слава».

Співробітниками відділу опубліковано понад 1500 робіт. Випущено одну монографію, один підручник для ВУЗів та декілька науково-популярних брошур.

Список найбільш важливих публікацій відділу.

1. А.А. Гурин, Л.Л. Пасечник, А.С. Попович. *Диффузия плазмы в магнитном поле* (К.: Наук. думка, 1979) 268 с.
2. І.Ю. Проценко, В.А. Саєнко. *Тонкі металеві плівки (технологія та властивості)* (Суми: СумДУ, 2002) 188 с.
3. В.В. Лиситченко, Л.И. Романюк, В.В. Усталов. Исследование прозрачности волнового барьера для электронных плазменных волн в магнитоактивной плазме. ЖЭТФ 71, 2(8) (1976) 537.
4. V.G. Naumovets, L.L. Pasechnik, A.S. Popovich. Spatial structure of oscillations arising from drift-dissipative instability in a bounded plasma. In: Proc. X ICPIG (Oxford, 1971) p. 299.
5. В.Ф. Вирко, Г.С. Кириченко, В.Б. Таранов, Е.Г. Филоненко, К.П. Шамрай. Получение плотной плазмы в разряде на электронном циклотронном резонансе. Электронная техника. Сер. 7 5(174) (1992) 47.
6. V.M. Lashkin. Stable three-dimensional modon soliton in plasmas. Phys. Rev. E 96(3) (2017) 032211.
7. Е.Г. Костин. Применение ионизированного парового потока при осаждении пленок металлов в вакууме для модификации их структуры и морфологии поверхности. Металлофизика и новейшие технологии 30(4) (2008) 485.
8. V.N. Pavlenko, V.G. Panchenko. Scattering of electromagnetic waves in a magnetized plasma with an HF pump. J. Plasma Physics 67(5) (2002) 309.
9. В.Л. Будович, Охотников Б.П., Федорович О.А. Катафорез в электрическом разряде при высоком давлении. ЖТФ 57(4) (1987) 802.
10. О.А. Федорович. Экспериментальные исследования оптических свойств НП в диапазоне концентраций электронов $10^{17} \text{ см}^{-3} \leq N_e \leq 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Теплофизика высоких температур 52(4) (2014) 524.

11. M.S. Boltovets, O.A. Fedorovich, A.Y. Avksentiev, A.E. Belyaev, A.G. Borisenko, R.V. Konakova et al. High-Temperature Contacts to GaN and SiC Based on TiBx Nanostructure Layers. *Materials Science Forum* 483 - 485 (2005) 1061.
12. V. Pugatch, O. Fedorovich, M. Borysova, H. Franz et al. Micro-strip metal detector for the beam profile monitoring. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 581 (2007) 531.
13. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. The empirical formula of dependence of factor of disintegration of nonideal plasma for electrons concentration. *Problems of Atomic Science and Technology*. 1 (2011). Series: Plasma Physics (17) 122.
14. O.A. Fedorovich, L.M. Voitenko. Lifetime of the electron in dense plasma. *Ukr. J. Phys.* 62(6) (2017) 489.
15. Пат. на винахід № 111418. Детектор заряджених частинок та іонізуючих випромінювань і спосіб його виготовлення (В.М. Пугач, О.А. Федорович, В.О. Петряков, О.С. Ковальчук, Є.Г. Костін) Опубл. 25.04.2016, Бюл. № 8/2016.
16. А. с. №1081819. Способ металлизации отверстий печатных плат (В.М. Коновал, Л.Л. Пасечник, А.Ю. Попов, В.Ф. Семенюк, О.А. Федорович, В.А. Грабенко и др.) Бюллетень изобретений и открытый 11 (1984).
17. А. с. № 1602338. Проводник для инициирования электрического разряда в жидкости (А.Ю. Попов, П.Д. Старчик, О.А. Федорович) Дата регистрации 22.06.1990.

Плазмохімічний реактор із замкнутим дрейфом електронів. Впроваджено: ВАТ «Квазар», Київ, 1995 р.; ТОВ «Аналітик», дочірнє підприємство фірми «Motorolla», США, 2000 р.; ДП Мінський НДІ радіоматеріалів, Мінськ, Білорусь, 2004 р.; два ПХР ОКБ ВО «Планета», Новгород, 1990, 1991 рр.; ПКБ авіабудування, Раменське Московської обл., 1990 р. (ВПТ СКТБ з ЕВ, ЛПТ ВФП)

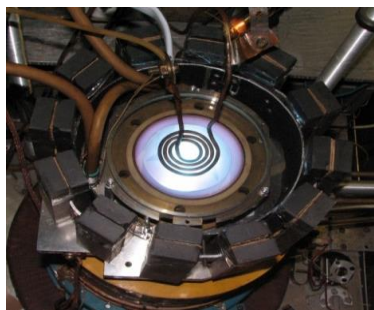




Низькоенергетичний плазмохімічний реактор для створення ізоляції в сонячних елементах. Два ПХР впроваджено на ВАТ «Квазар», 2006, 2007 рр. За продуктивністю в 2,5 раза перевершує кращий зарубіжний аналог при вищій якості ізоляції і зменшенні пошкоджень робочої поверхні сонячних елементів. Один ПХР дозволяє обробляти 1200 пластин діаметром 150 мм за годину (ЛПТ ВФП)



Установка нанесення тонких плівок з високою адгезією з будь-яких металів, включаючи молібден, тантал, вольфрам, та металевих-газових сполук на підкладки з різних матеріалів. Випаровування матеріалів проводиться за допомогою електронно-променевої гармати. Нанесення металевих плівок проводиться у вакуумі 10^{-5} торр. Одержують чисті металеві плівки без домішок залишкових газів у розрядній камері. Питомий опір плівок практично збігається з питомим опором матеріалу, що випаровується (ВПТ, ВФП та ПТ)



Вістлерівський розряд (з індуктивним об'ємно-хвильовим збудженням плазми) з торцевою антеною (ВФП)

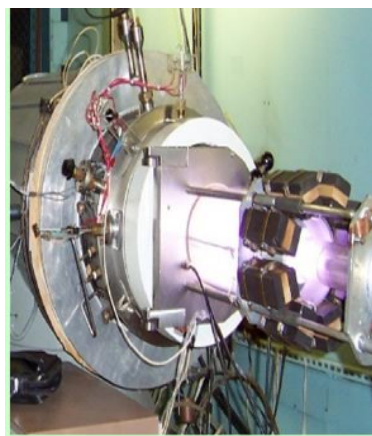
Низькоенергетичний плазмохімічний реактор з керованою енергією іонів. Можна проводити плазмо-хімічне травлення матеріалів мікроелектроніки з діаметром пластин до 200 мм. Впроваджено в НДІ точного машинобудування, Зеленоград, 1990 р. (ВПТ)



Плазмохімічний реактор для травлення фоторезистів з вістлерівським збудженням плазми. Одночасно можна обробляти 48 пластин діаметром 100 мм. Впроваджено на ВАТ «Квазар», 1995 р. (ВПТ)

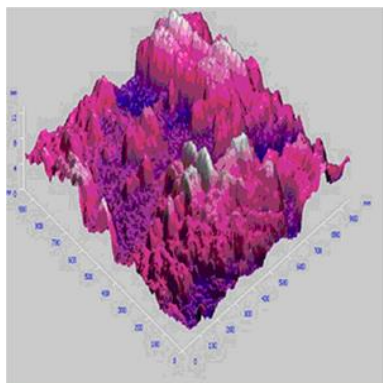


Вістлерівський розряд (з індуктивним об'ємно-хвильовим збудженням плазми) з постійними магнітами (ВФП)

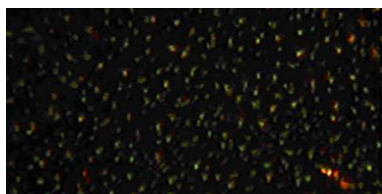




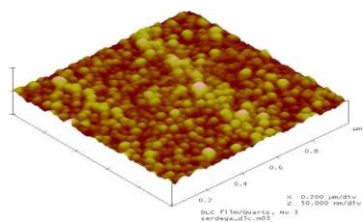
Плазмове джерело для нанесення плівок з високою адгезією (впроваджено в НДІ «ОРІОН», Київ, та СКБ ВО «ПЛАНЕТА», Новгород, 1990 р. (ВФП та ВПТ))



Металеві наноструктури, нанесені на підкладку (ВФП)



a

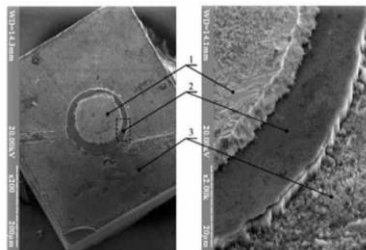


б

Фотографії алмазних наноструктур:

a – оптичним мікроскопом; *б* – атомно-силовим мікроскопом (ВФПТ)

Спільно з НДІ «Оріон» уперше в Україні було розроблено замкнутий цикл промислового виробництва швидкісних р-і-п діодів. Діоди здатні комутувати НВЧ сигнали потужністю 2 кВт з часом переключення $\leq 35 \cdot 10^{-9}$ с і працювати при температурах до 500 °С (ЛПТ ВФП)



Фотографія чипа 4HSiC р-і-п діода:
а – чип під кутом 45°;

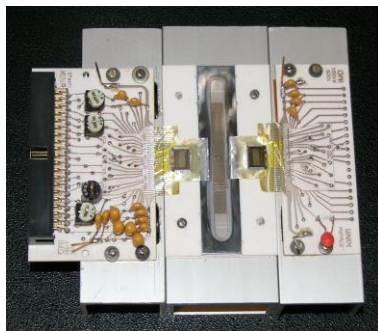
б - збільшений фрагмент меза-структури:

1 - контактна площадка до р +-області;

2 - р +-п меза-структура;

3 - високолегована п +- підкладка.

Радіаційно-стійкий «прозорий» мікρο-стріповий металевий детектор з 1024 стріпами для магнітних мас-спектрометрів з просторовим розділенням 50 мкм. Випробуваний в Інституті прикладної фізики НАН України, Суми (ЛПТ ВФП)



MMD: 16 sectors, 1 μm thick



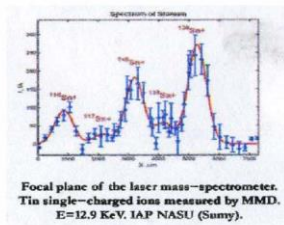
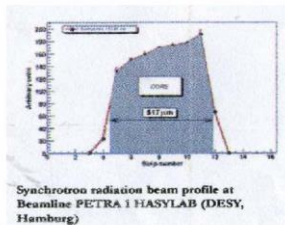
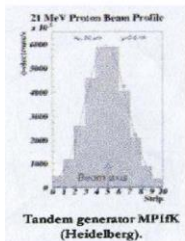
MMD 32 strips

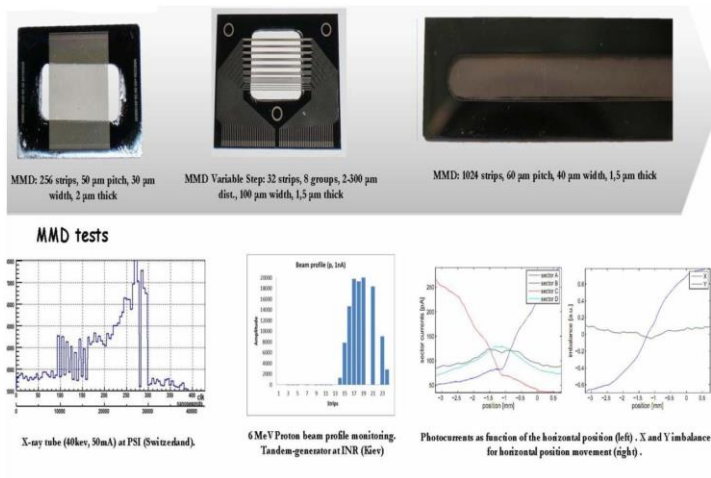


MMD: 64 strips, 100 μm pitch, 40 μm width, 1 μm thick



MMD: 128 strips, 30 μm pitch, 10 μm width, 1 μm thick





«Прозорі» для іонізуючих випромінювань, радіаційно-стійкі мікростріпові металеві детектори різного призначення та результати випробувань їх на ядерних об'єктах Європи та України

СЕКЦІЯ ЯДЕРНОЇ, РАДІАЦІЙНОЇ ТА ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ

ЦЕНТР ЕКОЛОГІЧНИХ ПРОБЛЕМ АТОМНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Початком розвитку радіоекологічних та радіобіологічних досліджень в ІЯД можна вважати створення у квітні 1979 р. неструктурної лабораторії радіаційної біофізики у відділі атомної енергетики.

Керівником зазначеної лабораторії було призначено к.м.н. Віталія Костянтиновича Чумака, який до цього часу завідував відділом радіаційної безпеки та техніки безпеки. За рішенням ученої ради ІЯД від 2 вересня 1985 р. та згідно з Постановою Президії АН УРСР № 289 від 10 липня 1985 р. лабораторія радіаційної біофізики була реорганізована у відділ радіаційної екології (ВРЕ), керівником якої став В. К. Чумак. До складу ВРЕ увійшли: лабораторія екологічної експертизи, першим керівником якої у 1986 р. став к.т.н.



В. К. Чумак (у центрі)

Є. П. Буравльов; група радіаційних прогнозів (керівник П. Б. Білоусова); група фізико-хімічних методів досліджень (керівник В. В. Бабенко); служба забезпечення радіобіологічних експериментів (керівник В. З. Ейдлін) та група математичного забезпечення. Провідними спеціалістами ВРЕ були к.г.н. Г. О. Бекірова, Л. В. Близнюкова, к.м.н. О. В. Блохіна, В. І. Богорад, к.е.н. Л. А. Кримська, Т. В. Литвинська, О. А. Макаровська, к.б.н. В. І. Паламарчук, к.б.н. О. В. Сваричевська, к.т.н. О. В. Святун та ін.

Центр екологічних проблем атомної енергетики (ЦЕП) у складі ІЯД АН УРСР був створений у 1985 р. (Постанова Президії АН УРСР № 289 від 10 липня 1985 р.) на базі відділу радіаційної екології. Першим керівником ЦЕП став В. К. Чумак.

До 26 квітня 1986 р. науковцями ЦЕП було проведено ряд важливих досліджень, а саме: вивчення впливу ЧАЕС на навколишнє природне середовище та оцінка можливих способів використання «скидного тепла»; вивчення особливостей переходу радіонуклідів станційного походження в різні сільськогосподарські рослини, проведене в

районі будівництва Південно-Українського енергокомплексу; радіаційно-гігієнічна оцінка можливості використання водойми-охолоджувача ЧАЕС для цілей промислового виборозведення; оцінка можливих доз опромінення населення внаслідок надходження радіонуклідів станційного походження до водної системи р. Дунай; прогнозування радіаційного впливу виносу радіонуклідів з р. Дунай на радіоактивність навколишнього природного середовища в районі водопровідного тракту Дунай - Дніпро та ін.



Співробітники ЦЕП у Чорнобилі

З перших днів після аварії на ЧАЕС співробітники ЦЕП брали активну участь у роботах з мінімізації наслідків аварії. На той період ЦЕП (одна з небагатьох наукових установ) був оснащений високочутливим гамма-спектрометричним та дозиметричним устаткуванням. Були розпочаті дослідження вмісту аварійних радіонуклідів у зразках ґрунту, рослинності, води та продуктів харчування («Розробка та впровадження методів контролю харчових продуктів і фуражу на радіометричній апаратурі радіологічних лабораторій», 1986 р.; «Еколого-економічна оцінка впливу аварії на ЧАЕС на рекреацію та рекреаційні ресурси», 1988 р.).

Співробітниками ЦЕП разом з іншими відділами та СКТБ з ЄВ ІЯД було виконано великий обсяг робіт щодо визначення рівнів радіоактивного забруднення 30-км зони ЧАЕС та території України довгоіснуючими радіонуклідами ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$ та ^{241}Am з метою вибору оптимальних оперативних дій для мінімізації негативних наслідків аварії («Аналіз радіаційної обстановки, що склалася в результа-

ті аварії на території УРСР, прогноз можливих доз опромінення населення», 1988 р.).

Відразу після аварії також розпочалися дослідження забруднення радіонуклідами аварійного походження води та донних відкладів у водоймі-охолоджувачі ЧАЕС та їхнє накопичення в рибі та водоростях («Радіоекологічні аспекти забруднення водного середовища після аварії на ЧАЕС», 1987 р.). Ці дослідження продовжуються і сьогодні. У ЦЕП накопичено величезний матеріал з цієї тематики.

З 1987 р. виконувалися вимірювання вмісту аварійних радіонуклідів у лікарняно-технічній сировині з Вінницької, Житомирської, Рівненської та інших областей України.

У 1990 - 1995 рр. ЦЕП очолював д.б.н. Григорій Миколайович Коваль. У 1991 р. до складу ЦЕП увійшли науковці з відділу радіаційної безпеки і він був реорганізований у центр екологічних проблем атомної енергетики (ЦЕПАЕ). Рішенням ученої ради ІЯД від 19 листопада 1991 р. було затверджено нову структуру ЦЕПАЕ. До складу ЦЕПАЕ увійшли лабораторія радіоекологічного моніторингу (н.с. О. В. Сваричевська, м.н.с. О. Л. Зарубін, 3 інженери і 5 техніків); лабораторія контактних і дистанційних методів досліджень (с.н.с. І. С. Єремєєв, с.н.с. І. В. Матящук, 11 інженерів та 6 технологів); лабораторія екологічних оцінок та прогнозу (с.н.с. Г. О. Бекірова, с.н.с. Г. М. Нікітіна, с.н.с. О. М. Грищенко, с.н.с. Л. А. Кримська, 4 інженери і технік); лабораторія зони впливу ЧАЕС (завідувач В. П. Пугачевський, інженер, 3 техніки та 2 дезактиваторники); лабораторія радіобіології (с.н.с. І. О. Павленко, с.н.с. Г. Г. Істоміна, с.н.с. Ю. П. Гриневич, с.н.с. Л. К. Бездробна, н.с. І. П. Дрозд, 5 інженерів та технік); лабораторія радіаційно-гігієнічних оцінок (провідн.н.с. Л. Б. Пінчук, с.н.с. О. В. Блохін, с.н.с. В. І. Паламарчук і технік); сектор апаратурного та матеріального забезпечення (завідувач А. І. Головач, 3 інженери, 2 техніки); сектор віварію (інженер, технік та дезактиваторник).



Г. М. Коваль
(1946 - 2003)

ЦЕПАЕ брав безпосередню участь у виконанні та координував дослідження, які проводилися багатьма науковими установами АН України в рамках програми «Екологія зони впливу ЧАЕС», що виконувалася протягом 1989 - 1992 рр.

У 1987 - 1995 рр. проводилося комплексне санітарно-гігієнічне обстеження населених пунктів 30-км зони ЧАЕС, в які повернулися «самосели», виконувалися роботи за тематиками «Аналіз спектрів крові опромінених тварин з метою ранньої діагностики променевих неоплазм» (1992); «Відновлення радіаційної ситуації методом ретроспективної дозиметрії і вивчення міграції радіонуклідів по трофічних ланцюгах, що ведуть до людини в наземних та водних екосистемах» (1995).



В. В. Тришин

З 1996 р. дотепер завідувачем ЦЕПАЕ є к.ф.-м.н. Володимир Васильович Тришин (заступник к.ф.-м.н. О. В. Гайдар). Під його керівництвом проведено великий обсяг робіт за напрямками радіоекологічних та радіобіологічних досліджень, мінімізації впливу на довкілля об'єктів, що використовують ядерні та радіаційні технології, розвитку ядерної криміналістики в Україні та ін. За цей час було виконано роботи за темами «Міграція природних та штучних техногенних радіонуклідів у компонентах наземних та водних екосистем різних ґрунтово-кліматичних зон України» (1995 - 1999); «Дослідження впливу

АЕС на регіональні екосистеми для побудови моделі управління радіаційним станом «АЕС - навколишнє середовище» (2000 - 2002); «Дослідження міграції радіонуклідів в природному середовищі та прогноз радіоекологічного стану в зонах впливу АЕС та інших підприємств ядерного паливного циклу» (2002 - 2005); «Створення пілотної установки для автоматичного безперервного контролю радіоактивності води першого контуру дослідницького ядерного реактора ВВР-М» (1 липня 2011 - 31 грудня 2012 рр.); «Проведення дослідження джерел іонізуючого випромінювання, вилучених із сховища ДНВП «РІУС»» (18 січня - 31 грудня 2012 р.); «Створення комплексу з переробки РАО ЗАЕС. Реконструкція. Розробка проектно-кошторисної документації. Проектна оцінка впливу на НС» (2011 - 2012).

Однією з практичних задач, що постійно виконуються ЦЕПАЕ, є регламентні дослідження для оцінки впливу дослідницького ядерного реактора ВВР-М та тритієвих лабораторій ІЯД на об'єкти навколишнього природного середовища в санітарно-захисній зоні та зоні спостереження. Результати радіаційного контролю об'єктів навколишнього природного середовища в зоні впли-



О. В. Святун, І. О. Павленко,
О. В. Сваричевська

ву ДЯР ВВР-М та тритієвих лабораторій ІЯД свідчать, що за період спостережень не було виявлено збільшення вмісту радіоактивних речовин у контрольованих параметрах порівняно з рівнями, характерними для Києва, що підтверджує безпечність їхньої експлуатації для навколишнього середовища та населення.

З урахуванням нагальної потреби розвитку в Україні сучасних методів для своєчасної діагностики та ефективного лікування онкологічних захворювань співробітники ЦЕПАЕ беруть активну участь у роботах, спрямованих на створення вітчизняних радіофармпрепаратів та експериментальної бази для доклінічного дослідження їх (лабораторія радіонуклідів та радіофармпрепаратів).

Також виконуються розрахунки систем біологічного захисту для центрів ядерної медицини та оцінки їхнього впливу на навколишнє середовище з урахуванням технічних характеристик сучасного обладнання для ядерної медицини, визначення параметрів джерел іонізуючого випромінювання та розрахунку ефективних захисних бар'єрів, оцінки викидів та скидів радіоактивних речовин як при нормальній експлуатації, так і в умовах проектних та запроектних аварій. При оцінці впливу на довкілля та населення, яке проживає на прилеглих територіях, використовуються сучасні методи аналізу даних, у тому числі просторово-розподіленої інформації.

Для досліджень у галузі нейтронзахватної терапії виготовлено вузли та проведено монтаж пілотної установки для опромінення для нейтронзахватної синовектомії (НЗС) на 5-му горизонтальному каналі реактора. Адаптовано методики синтезу нано- і мікрочастинок з метою створення нейтронзахватних агентів для НЗС («Створення експериментальної бази нейтронзахватної терапії ортопедичних захворювань на дослідницькому реакторі ВВР-М» (2007 - 2008). Створено установку для нейтронного опромінення біологічних об'єктів *in vitro* при заданій температурі. Конструкція установки передбачає розширення її можливостей таким чином, щоб за її допомогою можна було проводити дослідження *in vitro* із застосуванням трьох методів терапії: нейтронзахватної, фотодинамічної і гіпертермічної та їхніх довільних комбінацій («Створення радіаційно-опромінювальної установки та новітніх магніточутливих нанокompозитів для нейтронзахватної терапії і медичної діагностики»).



В. В. Тришин і А. М. Берлізов

вдіграє важливу роль у посиленні регулюючого контролю та протидії контрабанди ядерних та інших радіоактивних матеріалів. Постановою Уряду України № 813 від 2 червня 2003 р. на ІЯД покладено виконання функцій головної експертної організації з питань дослідження та визначення характеристик радіоактивних матеріалів, вилучених з незаконного обігу.

На сьогодні в ІЯД створено потужний центр ядерно-криміналістичних досліджень, проведено численні навчання, у тому числі міжнародні, а також міжнародну конференцію експертів з ядерної криміналістики ITWG-16 (Київ, 2011). У вересні 2016 р. було створено лабораторію ядерної криміналістики.

За ініціативою В. В. Тришина започатковано ядерно-криміналістичні дослідження в Україні. Ядерна криміналістика – напрямок прикладної ядерної фізики, спрямований на аналіз вилучених з незаконного обігу радіоактивних матеріалів з метою встановлення джерела їхнього походження та шляхів надходження в незаконний обіг. Вона

У рамках міжнародних проектів та за підтримки НАН України і КМ України було отримано сучасне високотехнологічне обладнання, зокрема для мас-спектрометрії (мас-спектрометр з індуктивно зв'язаною плазмою ICP-MS Element-2 Thermo Scientific з приставкою для лазерної абляції та відповідною інфраструктурою); електронний скануючий мікроскоп (ZEISS Research-18) з детектором для енергодисперсійного елементного аналізу зразків; радіометричне, дозиметричне та гамма-, альфа-спектрометричне обладнання; мобільну лабораторію, оснащену необхідним обладнанням для проведення комплексних радіологічних досліджень на місці інциденту.

Робота в ЦЕПАЕ для багатьох спеціалістів стала основою, що дало змогу набути нові знання і отримати досвід наукової роботи у сфері радіоекології. У подальшому вони змогли їх використати на ключових посадах у державних структурах радіоекологічного профілю. У теперішній час вони є висококваліфікованими спеціалістами та визнаними експертами, яких залучають до робіт в українських та міжнародних проектах, зокрема О. А. Макаровська, яка протягом багатьох років була заступником голови Державної інспекції ядерного регулювання (ДІЯР) України, а нині працює в МАГАТЕ, де також тривалий час працює колишній заступник завідувача ЦЕПАЕ А. М. Берлізов, Л. В. Близнюкова (працювала завідувачем відділу в Міністерстві еко-



Тренінг МАГАТЕ в ІЯД



О. В. Гайдар (праворуч)

логії і природних ресурсів України, а нині очолює Департамент поводження з РАВ в НТЦ при НАЕК «Енергоатом» України), В. І. Богорад і Т. В. Литвинська (начальник та заступник начальника відділу радіаційного захисту ДНТЦ ЯРБ ДІЯР України).

Персональний склад ЦЕПАЕ – 34 співробітники, серед них 19 наукових працівників, у тому числі 8 кандидатів наук. До складу ЦЕПАЕ входять 3 лабораторії: лабораторія радіонуклідів та радіофармпрепаратів, лабораторія фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань та лабораторія ядерної криміналістики.

Лабораторія радіонуклідів та радіофармпрепаратів

У 2003 р. за результатами реорганізації структури інституту та СКТБ з ЕВ ІЯД НАН України (далі – СКТБ з ЕВ) у складі ЦЕПАЕ було створено лабораторію радіонуклідів та радіофармпрепаратів, до якої увійшли фахівці відділу радіоактивних та стабільних ізотопів СКТБ.



В. А. Агеєв

Відділ радіоактивних та стабільних ізотопів було створено у складі СКТБ з ЕВ у 1979 р. У відділі було організовано радіохімічні лабораторії I та III класів. Очолив цей відділ провідний фахівець України в галузі радіохімії В. А. Агеєв. У лабораторії плідно працювали співробітники інституту, зокрема: А. Д. Саженок, Л. А. Кузіна, Н. Г. Павленко, О. О. Одінцов, С. Л. Вирічек, В. А. Сацюк, М. О. Посохов.

У 1982 - 1985 рр. згідно з Постановою РМ СРСР та ЦК КПРС В. А. Агеєв керував виконанням робіт з організації в Україні на базі ІЯД регіонального центру з виробництва радіофармацевтичних препаратів для ядерної медицини. За результатами цих робіт уперше в СРСР було орга-

нізовано випуск радіофармацевтичних препаратів на основі радіонуклідів ^{123}I та ^{201}Tl .

Розроблені методики було опубліковано у фахових наукових виданнях та захищено авторськими свідоцтвами СРСР та патентами іно-

земних держав. Для практичної реалізації програми виробництва радіофармпрепаратів на основі ^{123}I та ^{201}Tl було спроектовано та побудовано в корпусі № 113 та у першому боксі на циклотроні У-240 «гарячі камери» з копіюючими маніпуляторами, що дало змогу проводити роботи з відкритими радіоактивними речовинами за I класом. Зокрема, роботи щодо створення приймальної станції опромінених мішеней на циклотроні У-240 виконувалися І. М. Тягуновим.

З перших днів Чорнобильської аварії (з 2-го травня 1986 р.) колектив відділу брав активну і безпосередню участь у проведенні робіт з ліквідації наслідків аварії на 4-му енергоблоці ЧАЕС. Співробітниками відділу було виконано кілька тисяч радіохімічних аналізів проб ґрунту, води, продуктів харчування та інших об'єктів навколишнього середовища для визначення рівнів забруднення радіоактивними ізотопами ^{90}Sr , ^{131}I , ^{144}Ce , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am та ^{244}Cm .

У відділі вперше було розроблено унікальні методики визначення ^{90}Sr , ^{144}Ce , ^{137}Cs та трансуранових елементів в об'єктах навколишнього середовища з одної наважки проби. Застосування цих методик дозволило вирішити дві найважливіші проблеми на той час: про необхідність відселення мешканців Києва та побудови каналу між річками Прип'ять та Дніпро. За виконання цих робіт керівник відділу В. А. Агеєв та О. О. Одінцов були нагороджені Грамотами Державної комісії з ліквідації наслідків Чорнобильської аварії. У 1986 р. В. А. Агеєва також було нагороджено орденом «Знак Пошани».

У подальшому В. А. Агеєв разом із с.н.с. ЦЕПАЕ Є. Б. Льовшиним були керівниками програми Мінчорнобиля України «Трансуранові елементи в зоні відчуження». Отримані результати дозволили побудувати детальні карти забруднення ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am зони відчуження та оглядові карти для всієї території України, які увійшли до Національного атласу України. Ці роботи також дозволили прогнозувати поведінку довгоіснуючих радіонуклідів в об'єктах навколишнього середовища та їхню потенційну небезпеку для населення.

Після 2003 р. в лабораторії радіонуклідів та радіофармпрепаратів розпочалися розробки технологій отримання радіофармацевтичних препаратів на основі ^{131}I та $^{99\text{m}}\text{Tc}$, які широко використовуються в сучасній ядерній медицині для діагностики та лікування ряду захворювань. Слід зазначити, що потреба в препараті натрію йодиду (^{131}I) значно зросла після Чорнобильської аварії у зв'язку із збільшенням кількості онкологічних захворювань щитоподібної залози у населення України. Наявність дослідницького ядерного реактора ВВР-М ІЯД

дозволяє організувати власне виробництво ^{131}I та $^{99\text{m}}\text{Tc}$ на базі лабораторії радіонуклідів та радіофармпрепаратів.

З метою започаткування виробництва вітчизняних радіофармпрепаратів (РФП) та контролю їхньої якості виконано великий обсяг робіт, зокрема: розроблено оригінальне технологічне обладнання для роботи з високоактивними зразками, опроміненими в ядерному реакторі; розроблено технологію отримання РФП натрію йодиду (^{131}I), фізико-хімічні характеристики якого відповідають вимогам Європейської фармакопеї; розроблено технологію отримання цирконій-молібденового гелю для заповнення хроматографічних колонок, портативного $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ генератора; розроблено конструкцію такого портативного генератора для використання безпосередньо в медичному закладі. Фізико-хімічні характеристики РФП натрію пертехнетату ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), який отримується за допомогою генератора, також відповідають вимогам Європейської фармакопеї.

У рамках проведення реконструкції радіохімічної лабораторії та приведення її стану у відповідність вимогам GMP змонтовано та підготовлено для роботи припливно-витяжна вентиляція, проведено ремонт приміщень, придбано технологічне обладнання, хімікати, лабораторний посуд; проведено доклінічні випробування виготовлених експериментальних партій РФП натрію йодиду (^{131}I) та натрію пертехнетату ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) на експериментальних тваринах, що засвідчило відповідність розроблених препаратів референтним препаратам фірми «ПОЛАТОМ» (Польща), які зареєстровано в Україні. Для забезпечення робіт з виробництва РФП було створено лабораторію для доклінічних випробувань РФП на лабораторних тваринах, завершуються роботи із створення лабораторії мікробіологічного контролю якості та умов виробництва.

Лабораторія фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань

У 1972 р. за постановою Президії АН УРСР з метою розробки і виготовлення експериментальних і дослідних зразків установок, приладів, апаратури, нестандартного фізичного обладнання на замовлення відділів і лабораторій в ІЯД АН УРСР було створено дослідне виробництво.

У зазначений період було засновано лабораторію для переробки радіоактивного ізотопу водню. З 1979 р. лабораторія увійшла до складу СКТБ з ЕВ як окремий підрозділ «Відділ ізотопної та радіаційної техніки» (відділ № 12). Його очолив к.ф.-м.н. Микола Федорович Коломієць. Очолений М. Ф. Коломійцем відділ у 1987 р. уже налічував

100 працівників, із них 58 осіб інженерно-технічного персоналу та 42 робітники. Відділ був поділений на 6 секторів: розробки ізотопних приладів (керівник В. М. Червінський); технології ізотопних виробів (керівник В. С. Голубєв); технології нейтронних трубок (керівник В. А. Войтенко); випробування і модернізації нейтронних трубок (керівник к.т.н. В. М. Гулько); випробувань і конструювання радіоізотопної техніки (керівник Ю. О. Сидоров); модернізації технологічного обладнання (керівник І. А. Мицик). Трохи пізніше, у 1992 р., структуру відділу розширили два головних конструктора проекту – к.т.н. Б. В. Михайленко та к.ф.-м.н. П. П. Голокоз.

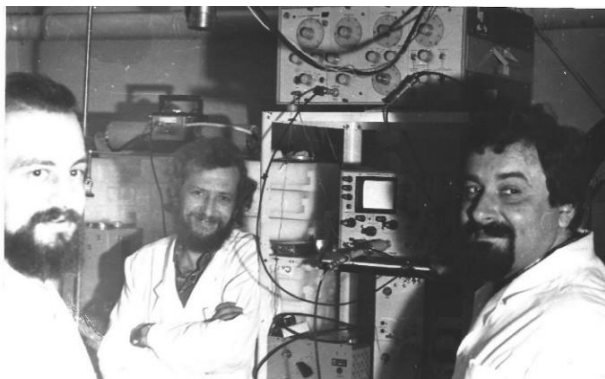


М. Ф. Коломієць
(1943 - 2018)

Серед значних науково-технічних досягнень слід виділити дослідження характеристик несамостійного та самостійного вакуумного розряду в парах матеріалу анода, що дало змогу отримувати частково іонізовані парові потоки ряду рідкісних металів, таких як скандій, титан, цирконій, та металів актиноїдів – від 58 до 71 елементів періодичної системи. Оптимізація розряду у вакуумно-дуговому режимі дала змогу досягти коефіцієнта іонізації парових потоків до 30 %. Таким чином, відкрилась можливість створювати високоадгезивні тонкі плівки вищезгаданих металів підвищеної чистоти на металевих та інших підкладках великої площі їхньої поверхні, що у свою чергу розкрило горизонти для отримання тонких плівок тритидів цих металів (метало-тритієві структури) методом прямого гідрування. У підсумку було створено різноманітні типи нейтроноутворюючих надійних високоінтенсивних та термостійких метало-тритієвих мішеней для прискорювачів заряджених частинок. Це дозволило отримати рекордний у світі вихід нейтронів ($>10^{13} \text{ c}^{-1}$) на нейтронному генераторі «СНЕГ» (Росія).

За розробки нейтроноутворюючих метало-тритієвих мішеней та запаяних прискорювальних трубок для генерації нейтронів, що увійшли до розробки «Источник», М. Ф. Коломієць був удостоєний Державної премії УРСР у галузі науки і техніки в 1986 р.

У 1986 р. у відділі сформувалась група молодих учених під керівництвом к.т.н. Б. В. Михайленка, до якої входили В. М. Гулько, Л. В. Михайлов, К. І. Яковлев, які стали основними розробниками газонаповнених прискорювальних нейтронних трубок з різними типами



В. М. Гулько, К. І. Яковлев, Б. В. Михайленко

джерел іонів. Після серії досліджень та модифікацій було створено нейтронні прискорювальні трубки серії НТГ з широким діапазоном частот і довжини імпульсів: НТГ-2, 19, 20 з іонним джерелом Пеннінга для свердловинної апаратури діаметром 90 мм з нейтронним потоком більше $2 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$; НТГ-3 з орбітронним іонним джерелом для свердловин і промислової апаратури; потужні трубки НТГ-4, НТГ-10 і НТГ-16 для промислових і лабораторних генераторів з потоком нейтронів до 10^{10} с^{-1} з різними оригінальними типами джерел іонів; нейтронна трубка НТГ-5 з протяжною мішенню довжиною 1 м для апаратури пошуку вибухових речовин і небезпечних матеріалів, що є унікальною у світі; нейтронна трубка НТГ-18 для використання у свердловинній апаратурі діаметром 42 мм. Було розроблено і виготовлено генератори нейтронів, зокрема високовольтні джерела прискорюючої напруги для лабораторних генераторів ГН-01, ГН-03, свердловинних генераторів серії ІНС діаметром 90 і 42 мм на базі трубок НТГ-2, 3, 16, 18, 20.

Групою молодих дослідників В. А. Войтенка, О. В. Коваленка, В. В. Скурського під керівництвом головного конструктора проекту П. П. Голокоза були обрані нові напрямки наукового пошуку застосування тритієвих джерел, результати якого відображені в ряді виконаних науково-дослідних тем: дослідження аномалій аероіонного клімату в зонах радіоактивного забруднення ЧАЕС; дослідження процесів термодифузії важких ізотопів водню в металевих та полімерних матеріалах; розробка тритієвих автономних довгострокових джерел живлення приладів мікроелектроніки.

Окремо слід зазначити великий внесок у розвиток відділу групи провідних технологів і конструкторів к.т.н. В. А. Зражевського,

В. С. Голубєва, В. М. Рогозіна, Г. Я. Мінчука та ін., які забезпечували виконання конструкторських робіт, організацію виробництва, поставку експериментів, дослідження фізико-технічних характеристик виробів на основі тритію.

Серед найбільш вагомих розробок відділу слід вважати створення малогабаритних запаяних прискорювальних трубок. Дослідження та розробки малогабаритних запаяних прискорювальних трубок для генерації термоядерних Д-Т-нейтронів з енергією 14,5 МеВ були спрямовані на створення зразків цих трубок для використання в генераторах нейтронів лабораторного, промислового та свердловинного призначення в апаратурі нейтронно-активаційного аналізу, пошуку вибухових речовин та наркотиків нейтронними методами, імпульсного нейтронного каротажу геологічних та промислових свердловин пошуку та видобутку корисних копалин тощо. Прискорювальні трубки вакуумного типу, створені раніше для спеціального призначення, не задовольняли вимог, що були висунуті до них при використанні в цивільній апаратурі через низький термін служби, нестабільність нейтронного виходу, вузький частотний діапазон та недостатній нейтронний вихід тощо, що значно обмежувало методичні можливості апаратури цього класу.

Найбільш оптимальними та уніфікованими виявились газонаповнені прискорювальні трубки типу НТГ, що працюють на змішаних тритій-дейтерієвих пучках. Запропонований та здійснений М. Ф. Коломіємцем перехід від традиційного металоскляного до металокерамічного варіанта конструкції газонаповнених прискорювальних трубок дав змогу значно підвищити надійність класу приладів, для яких були призначені ці трубки. Це спонукало до створення ряду нестандартного науково-технологічного устаткування та обладнання відповідних приміщень, що увійшли до науково-технологічного комплексу «Тритієва лабораторія». В оновленій лабораторії з'явилася можливість проводити замкнутий цикл досліджень, розробок, виробництва та випробувань малогабаритних запаяних прискорювальних трубок для генерації Д-Т-нейтронів та ізотопної і радіаційної техніки на основі тритію.

За створення комплексу «Тритієва лабораторія» М. Ф. Коломієць у 2000 р. був удруге удостоєний Державної премії України у галузі науки і техніки.

З 2001 р. відділ ізотопної та радіаційної техніки набув нового статусу – лабораторія фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань (ЛФТПДЯВ) відділу ядерної фізики ІЯД НАН України.

Слід зазначити, що на цей час у лабораторії вже було налагоджене виробництво цілого ряду видів продукції на основі тритію:

тритієві і дейтерієві мішені для генерації нейтронів;

тритієві джерела бета-випромінювання різноманітних модифікацій та призначення;

радіоізотопні прилади на базі тритієвих джерел бета-випромінювання;

джерела рентгенівського випромінювання на основі тритидів металів;

напівпровідникові перетворювачі енергії бета-випромінювання тритію в електричну енергію;

мічені тритієм зразки для дослідження в різноманітних областях науки і техніки;

зразки іонізаторів газового середовища з метою захисту від шкідливого впливу статичної електрики та впливу на мікроклімат замкнених об'ємів;

нейтронні трубки на основі $T(d, n)^4He$ реакції.



В. М. Рогозін



О. В. Коваленко

У 2011 р. головним технологом лабораторії В. М. Рогозіним було здійснено розробку технологічного процесу регенерації тритію з технологічного браку та радіоактивних відходів для повторного його використання. Він експериментально довів необхідність створення спеціальної технологічної вакуумної установки для регенерації і очистки тритію на базі наявного технологічного обладнання.

З 2013 р. лабораторію очолює к.т.н. Олександр Васильович Коваленко. Під його керівництвом у лабораторії проводяться науково-технічні дослідження, спрямовані на розробку технологій мінімізації проникнення техногенного тритію в оточуюче середовище та розробку технології регенерації тритію з джерел, що відпрацювали призначений термін служби, очищення отриманого тритію для повторного його використання та зменшення вмісту тритію у радіоактивних відходах.

Лабораторія ядерної криміналістики

Лабораторія була організована у вересні 2016 р. Керівник лабораторії Ігор Андрійович Малюк. Головним завданням лабораторії є надання експертної підтримки при здійсненні заходів з протидії незаконному обігу ядерних та інших радіоактивних матеріалів, надання експертних висновків на доручення органів центральної влади.

Європейська Комісія виступила з пропозицією щодо створення регіональної мережі ядерно-криміналістичних лабораторій з базовою лабораторією в ІЯД. Ця ідея знайшла підтримку в Україні, а також в інших країнах об'єднання ГУАМ. Роботи за проектом було розпочато у 2015 р. науково-дослідними експертними організаціями Грузії, України, Азербайджану та Молдови. Партнерська підтримка виконанню такого проекту надається Європейською Комісією, технічним консультантом проекту виступає Об'єднаний дослідницький центр Європейської Комісії.



І. А. Малюк



М. В. Стрільчук

Даний проект має на меті створення мережі ядерно-криміналістичних лабораторій у регіоні ГУАМ, зокрема розширення базових технічних та інформаційних можливостей національних експертних

лабораторій у кожній країні-учасниці, а також створення базису для взаємної підтримки і кооперації в даній області досліджень. Задачами ядерно-криміналістичних лабораторій буде надання експертної підтримки при здійсненні заходів на місці вилучення ядерного або радіоактивного матеріалу, надання експертної підтримки правоохоронним органам у ході кримінального розслідування, а також надання експертної підтримки іншим національним установам, що залучені до протидії незаконному обігу та ядерній контрабанді.



І. А. Малюк і Ю. М. Лобач



О. В. Божок

З огляду на більші технічні можливості та високу кваліфікацію фахівців в ІЯД була створена регіональна ядерно-криміналістична лабораторія. Досвід експертів та передові аналітичні можливості регіональної лабораторії є доступними експертним організаціям, що входять до ядерно-криміналістичної мережі країн-членів ГУАМ. Будуть підписані угоди про проведення спільних досліджень, а також розроблені відповідні механізми і процедури для обміну дослідними зразками та результатами аналізів.

У 2018 р. лабораторія ядерної криміналістики ІЯД була акредитована у Національному агентстві з акредитації України відповідно до вимог ДСТУ ISO/IEC 17025:2006 у сфері випробування ядерних та інших радіоактивних матеріалів.

Фахівцями ЦЕПАЕ створено базу даних для ядерної криміналістики в Україні, авторизований on-line доступ до якої мають фахівці з організацій, які відповідно до постанови КМ України задіяні до протидії незаконному обігу радіоактивних матеріалів в Україні.

Основні напрямки досліджень ЦЕПАЕ:

розробка аналітичних методів (радіохімічних, альфа-, гамма-спектрометричних, нейтронно-активаційних, рентген-флуоресцентних, мас-спектрометричних), визначення вмісту радіонуклідів і важких металів в об'єктах навколишнього середовища (НС);

створення на основі ГІС-технологій карт радіоактивного забруднення територій, що постраждали внаслідок аварії на ЧАЕС, та комплексних систем моніторингу в зонах спостереження підприємств ядерного паливного циклу (ЯПЦ);

дослідження міграції радіонуклідів в об'єктах НС;

оцінка впливу на НС радіаційних технологій та підприємств ЯПЦ;

прогнозування дозових навантажень на населення, яке проживає в зонах впливу підприємств ЯПЦ та центрів ядерної медицини;

планування зняття з експлуатації енергетичних і дослідницьких ядерних реакторів;

радіаційний моніторинг в зоні спостереження ядерно-фізичних установок ІЯД;

розробка автоматизованих методів контролю радіоактивності води першого контуру енергетичних та дослідницьких ядерних реакторів;

розробка технологій та організація виробництва радіоактивних ізотопів для медицини;

ядерно-криміналістичні дослідження. Експертиза ядерних матеріалів та інших радіоактивних речовин, виявлених поза межами регулюючого контролю;

дослідження адсорбційних властивостей речовин і матеріалів по відношенню до тритію;

моделювання кругообігу тритію в НС;

розробка технології для створення бар'єрів до проникнення тритію із забруднених відкритих водойм у підземні води.

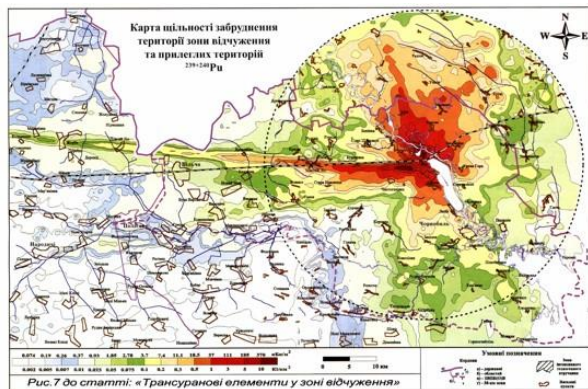
Основні наукові досягнення та науково-технічні розробки ЦЕПАЕ:

розроблено оригінальні методики визначення вмісту ^{90}Sr , $^{238-240}\text{Pu}$, ^{241}Am та гамма-випромінюючих радіонуклідів у зразках об'єктів НС, забруднених унаслідок аварії на ЧАЕС;

на основі геостатистичного аналізу результатів радіаційного моніторингу створено детальні карти забруднення радіонуклідами ^{137}Cs ,

^{90}Sr , $^{238-240}\text{Pu}$ та ^{241}Am . Проведено аналіз впливу ландшафтних факторів на формування полів радіоактивного забруднення;

розроблено том «Оцінка впливу на навколишнє середовище» (ОВНС) проекту будівництва Центру з переробки і захоронення РАВ низької і середньої активності на базі комплексу виробництв «Вектор»;



БЮЛЕТЕНЬ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ЗОНИ ВІДЧУЖЕННЯ ТА ЗОНИ БЕЗУМОВНОГО (ДОБОВ'ЯЗКОВОГО) ВІДСЕЛЕННЯ, №13, 1999 р.

Карта забруднення території зони відчуження ЧАЕС ізотопами плутонію

створено методологію оцінки ефективності й достатності систем радіаційного моніторингу в зонах спостереження АЕС на основі детерміністичного і статистичного підходів;

досліджено коефіцієнти переходу радіонуклідів станційного походження в сільськогосподарську продукцію в районі розташування Південно-Української АЕС;

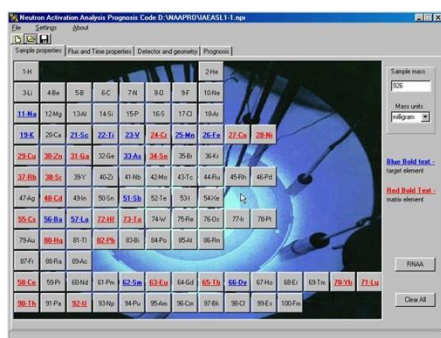
з використанням сучасних ГІС розроблено систему супроводу радіоекологічного моніторингу в районах розташування діючих АЕС України;

створено систему багаторічного радіаційного моніторингу в зоні спостереження ДЯР ВВР-М. Результати вимірювань вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr у зразках ґрунту, відібраних зі спостережних свердловин на території майданчика реактора ВВР-М, свідчать про відсутність техногенного впливу експлуатації реактора на забруднення ґрунтів та цілісність резервуарів з рідкими РАВ;

проведено аналіз результатів радіаційного контролю за впливом дослідницького ядерного реактора ВВР-М на навколишнє природне середовище за останні 10 років;

розроблено ОВНС комплексів з переробки твердих та рідких РАВ на Південно-Українській і Запорізькій АЕС;

створено програму NAAPRO для прогнозування та оптимізації результатів інструментальних та радіохімічних методів нейтронно-активаційного аналізу. Розроблено швидкий і точний двокроковий алгоритм моделювання гамма-спектрів від об'ємних екранованих джерел гамма- і бета-випромінювання та довільних NaI(Tl) і HPGe детекторів. Створений алгоритм реалізовано у вигляді веб-програм, Easy Monte Carlo та Gamma Spectrum Generator, що доступні через інтернет-портал Європейської Комісії www.nucleonica.net. Експериментальна валідація створених засобів моделювання була проведена з використанням стандартних екранованих джерел гамма-випромінювання та ядерних матеріалів;



розроблено методики визначення легких мікроелементів (Al, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Mo) та мікроелементів рідкісноземельної групи (Sm, Eu, Gd) в об'єктах навколишнього середовища та уранвмісних матеріалах з використанням мас-спектрометра з індуктивно зв'язаною плазмою Element-2;

проведено дослідження вмісту мікродомішок у зразках уранового концентрату українського виробництва з метою отримання атрибутивних ознак для використання в ядерній криміналістиці;

створено промислові тритієві нейтралізатори статичної електрики, які ефективно застосовуються у технологічних процесах виробництва різноманітних діелектричних плівкових, порошкоподібних та інших матеріалів, що суттєво знижує ймовірність виникнення вибухів та пожеж, підвищує продуктивність виробництва, покращує умови праці виробничого персоналу;

розроблено ряд метало-третієвих мішеней для отримання нейтронів на прискорювачах заряджених частинок, у тому числі з рекордним у світі виходом нейтронів – 10^{13} c^{-1} ;

створено портативні генератори нейтронів на основі мініатюрних запаяних прискорювальних трубок у лабораторному та свердловинному варіантах. За допомогою таких приладів є можливість з великою точністю експресним методом визначати на родовищах вміст нафти та газу, золота та інших дорогоцінних і рідких металів, а також вміст різноманітних шкідливих елементів в об'єктах навколишнього середовища тощо.

Перспективи подальших досліджень:

розробка технології отримання натрію йодиду (^{131}I) у капсулах та проведення досліджень їх на біоеквівалентність;

розробка технології зміни кольору безбарвних топазів при опроміненні їх реакторними нейтронами;

дослідження впливу радіаційних та ядерних технологій на навколишнє середовище;

розробка нових аналітичних методів визначення атрибутивних характеристик ядерних та інших радіоактивних матеріалів;

дослідження процесів формування техногенного забруднення в межах великого агломераційного комплексу за рахунок надходження важких металів та радіонуклідів у навколишнє середовище;

організація та проведення практичних навчань з ядерної криміналістики для експертів з країн-членів ГУАМ;

розробка інформаційних технологій для обміну даними між експертами регіональної мережі ядерно-криміналістичних лабораторій країн-членів ГУАМ;

дослідження спектра та щільності потоку нейтронів в активній зоні дослідницького реактора ВВР-М ІЯД;

розробка матеріалів для отримання дозвільної документації на виробництво РФП натрію йодид (^{131}I) та портативних генераторів $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$;

розробка документів для отримання ліцензій для використання, виробництва та транспортування, затвердження технічного і технологічного регламентів в ДП «Фармакопейний центр»;

розробка генератора нейтронів на базі малогабаритної прискорювальної трубки НТГ-2 на основі $\text{D(d, n)}^3\text{He}$ -реакції;

уведення в експлуатацію технологічної установки для регенерації радіоізотопу тритію з некондиційних виробів, що відпрацювали призначений термін служби, та розробка технологічного процесу здійснення регенерації та очистки тритію, що дає можливість повторного його використання та зменшує вміст тритію у РАВ. Розробка технології очистки регенованого тритію від домішок також дає змогу створити технологічний канал для напрацювання тритію в ядерному реакторі за реакцією $^6\text{Li} + \text{n} = \text{T} + ^4\text{He}$;

дослідження адсорбційних властивостей речовин і матеріалів по відношенню до тритію.

Державні премії.

Державна премія УРСР за досягнення в області науки і техніки 1986 р. за розробки нейтроноутворюючих метало-тритієвих мішеней та запаяних прискорювальних трубок для генерації нейтронів (М. Ф. Коломієць).

Державна премія України в галузі науки і техніки 1999 р. за цикл наукових праць «Закономірності та аномальні явища в ядерних процесах» (І. М. Вишневський, В. О. Желтоножський, М. І. Заїка, Ю. В. Кібкало, О. Ф. Німець, Ю. М. Павленко, В. В. Тришин).

Державна премія України в галузі науки і техніки 2000 р. за роботу «Розробка і створення апаратурних комплексів та їх застосування в ядерній фізиці, енергетиці та інших галузях науки і техніки» (М. Ф. Коломієць).

Державна премія України в галузі науки і техніки 2006 р. за роботу «Розробка приладів та систем контролю, організація їх промислового виробництва та впровадження нових технологій радіаційної безпеки» (А. М. Берлізов, О. Ф. Рудик).

Державні нагороди.

Орденем «Знак Пошани» у 1986 р. нагороджено В. А. Агєєва.

Орденем «Дружби народів» у 1986 р. нагороджено В. К. Чумака.

Почесною грамотою Верховної Ради України у 2006 р. нагороджено В. А. Агєєва.

Співробітництво з вітчизняними науковими установами.

ЦЕПАЕ активно співпрацює з вітчизняними науковими установами, зокрема: Національним центром радіаційної медицини АМН України; Інститутом експериментальної патології, онкології і радіобіології ім. Р. Є. Кавецького НАН України; Інститутом гідробіології НАН України; Інститутом проблем безпеки атомних станцій НАН України; Чорнобильським центром з проблем ядерної безпеки, радіоактивних відходів та радіоекології при КМУ; ДСП «Екоцентр» (Чорнобиль); Інститутом

мікробіології і вірусології імені Д. К. Заболотного НАН України.

Міжнародне співробітництво.

Дослідницький проект J71011 «Оцінка впливу дослідницького реактора ВВР-М ІЯД НАН України в умовах нормальної експлуатації та при аварійних ситуаціях» у рамках координаційного дослідницького проекту МАГАТЕ «Оцінка параметрів джерела й транспорту радіонуклідів з урахуванням параметрів конфайменту/контайменту та викиду у навколишнє природне середовище у випадку дослідницького ядерного реактора».

Національний проект Програми технічного співробітництва МАГАТЕ UKR6012 «Strengthening Capabilities for Production of Radiopharmaceuticals for Healthcare».

Фахівці ЦЕПАЕ беруть активну участь у міжнародних проектах та спільних дослідженнях з провідними закордонними науковими центрами (Інститут трансуранових елементів, Німеччина; Ліверморська Національна Лабораторія, США) та виконанні міжнародних проектів у галузі ядерної криміналістики.

За підтримки Об'єднаного дослідницького центру Європейської Комісії в ЦЕПАЕ проводилися дослідження за контрактами:

«Підвищення спроможності аналізу конфіскованих ядерних матеріалів та радіоактивних речовин в ІЯД НАН України» (Контракт № 211625-2008-09A08-XNP-NFS). У рамках контракту ІЯД отримав сучасний мас-спектрометр з індуктивно-зв'язаною плазмою (ICP-MS Element-2) для проведення поглибленого аналізу ядерних матеріалів.

«Впровадження заходів з боротьби з незаконним переміщенням радіаційних та ядерних матеріалів в Україні» (Контракт № 211897-2008-11A08-XNP-NFS). У ході виконання контракту було впроваджено ефективні заходи боротьби з незаконним переміщенням радіоактивних та ядерних матеріалів в Україні. ІЯД отримав мобільну лабораторію для характеристики ядерних матеріалів та джерел іонізуючого випромінювання на місці інциденту.

У рамках проектів Українського науково-технологічного центру (УНТЦ) у ЦЕПАЕ проводилися такі дослідження:

«Підвищення національних можливостей з ядерно-криміналістичної експертизи». У рамках проекту було розроблено навчальні матеріали та проведено практичні тренінги для провідних експертів з ядерної криміналістики з країн-членів ГУАМ.

«Дослідження атрибутивних ознак різних урановмісних матеріалів». За результатами проекту було визначено атрибутивні характеристики зразків уранових руд, проміжних продуктів їхньої переробки на ДП «Східний гірничо-збагачувальний комбінат» та вихідного продукту – U_3O_8 . Розроблено методики досліджень із використанням сучасного аналітичного обладнання, у тому числі отриманого за проектами міжнародної технічної допомоги.

«Створення бази даних для ядерної криміналістики в Україні». У результаті виконання проекту в ІЯД НАН України створено пілотний проект бази даних для ядерної криміналістики в Україні та архів ядерних та інших радіоактивних матеріалів, вилучених з незаконного обігу в Україні.

«Створення регіональної мережі з ядерно-криміналістичної експертизи». У результаті виконання проекту була створена мережа ядерно-криміналістичних лабораторій країн-членів ГУАМ, а в ІЯД НАН України була створена регіональна ядерно-криміналістична лабораторія.

Участь в організації та проведенні міжнародних заходів у сфері ядерної криміналістики:

Засідання Міжнародної технічної робочої групи з ядерної експертизи ITWG-16 (Київ, 2011).

Навчальний курс з практичних аспектів ядерної криміналістичної експертизи (2013).

Підсумкова робоча нарада щодо виконання проектів TACIS (2013).

Навчальний тренінг «Практичні аспекти ядерної криміналістичної експертизи» (2014, 2019).

Літня школа з ядерної криміналістики для студентів з країн-членів ГУАМ (2019).

Список найбільш важливих публікацій ЦЕПАНЕ.

1. В.М. Гулько, А.А. Ключников, Н.Ф. Коломиец, Л.В. Михайлов, А.Е. Шиканов. *Ионно-вакуумные приборы для генерации нейтронов в электронной технике* (К.: Техніка, 1988) 136 с.
2. І.М. Вишневський, Г.П. Гайдар, О.В. Коваленко, Т.В. Ковалінська, М.Ф. Коломієць, А.І. Липська, П.Г. Литовченко, В.І. Сахно, В.М. Шевель. *Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України* (К.: Ін-т ядерних дослідж., 2014) 176 с.
3. Г.Н. Коваль, И.П. Дрозд, Е.В. Сваричевская, Т.Д. Бочманова, Л.В. Близнюкова. Динамика параметров радиозокологической ситуации в г. Киеве до и после аварии на ЧАЭС. Доклады АН Украины 1 (1994) 114.
4. Атлас. Україна. Радіоактивне забруднення. Розроблено ТОВ «Інтелектуальні Системи ГЕО» на замовлення Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи (К., 2002) 46 с.
5. В.В. Тришин, А.Н. Берлизов, А.В. Гайдар, Е.В. Сваричевская и др. Экологические аспекты переработки твердых радиоактивных отходов на Южно-Украинской АЭС. Ядерная и радиационная безопасность 3 (2003) 98.
6. Y. Lobach. Development of the Decommissioning Planning System for the WWR-M Reactor. In: Planning, Management and Organizational Aspects in Decommissioning of Nuclear Facilities. IAEA-TECDOC-1702 (Vienna, 2013) p. 215.
7. В.В. Тришин, В.А. Агеев, В.М. Шевель, Л.К. Бездробна. Розробка технологій та організація виробництва радіофармацевтичних препаратів в ІЯД НАНУ. Український радіологічний журнал 19(3) (2011) 329.
8. A.V. Shevchenko, V.V. Lashneva, V.A. Dubok, E.V. Dudnik, V.V. Tsukrenko, A.K. Ruban, V.V. Trishin, I.A. Malyuk. Synthesis of nanocrystalline zirconia-based powder for surgery implants and study of radionuclides content in it. Funct. Mater. 21(4) (2014) 476.
9. В.В. Тришин, А.В. Гайдар, Е.В. Сваричевская. Экологические аспекты переработки радиоактивных отходов на Запорожской АЭС. Ядерная та радіаційна безпека 2 (2015) 47.
10. В.М. Гулько, Б.В. Михайленко, К.И. Яковлев и др. Малогабаритная запаянная нейтронная трубка типа НТГ-3. ПТЭ 3 (1990) 48.
11. A.M. Berlizov, A.D. Sajeniouk. A Technique for Strontium-90, Plutonium and Americium Isotope Content Determination in Environmental

- Samples. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 263(2) (2005) 307.
12. A.M. Berlizov. A Monte Carlo Approach to True-Coincidence Summing Correction Factor Calculation for Gamma-Ray Spectrometry Applications. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 264 (1) (2005) 169.
 13. A.N. Berlizov, V.K. Basenko, R.H. Filby, I.A. Malyuk. Current Status and Prospects of Development of the NAAPRO Code. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 271(2) (2007) 353.
 14. A.N. Berlizov, O.B. Blum, R.H. Filby, I.A. Malyuk. Testing applicability of black poplar bark to heavy metal air pollution monitoring in urban and industrial regions. Science of the Total Environment 372 (2007) 693.
 15. A. Berlizov, R. Gunnink, J. Zsigrai, C.T. Nguyen. Performance testing of the upgraded isotopic multi-group analysis code MGAU. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 575(3) (2007) 498.
 16. A.N. Berlizov, I.A. Malyuk, A.D. Sajeniouk, V.V. Tryshyn, V.V. Petrov, A.I. Savin, S. Abousahl, G. Rasmussen, I.I. Sadikov, F.A. Tashimova. Transuranium Elements and Fission Products in Technological Channels of Unit No. 2 of Chernobyl Nuclear Power Plant. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry 277(1) (2008) 49.
 17. А.Н. Берлизов, И.А. Малюк, А.Ф. Рудык, Р.В. Чиж. Непрерывный контроль состояния барьеров безопасности водо-водяных реакторов методом гамма-спектрометрии высокого разрешения. Ядерна фізика та енергетика 10(4) (2009) 387.
 18. А. с. № 1468275 от 15.11.88. Импульсная нейтронная трубка (Б.В. Михайленко, В.М. Гулько, К.И. Яковлев и др.) Не публ. Приоритет 29.07.87.
 19. А. с. № 1589859 (СССР) от 1.05.90. Газонаполненная нейтронная трубка (В.М. Гулько, Н.Ф. Коломиец, К.И. Яковлев и др.) Не публ. Приоритет 11.04.88.
 20. Пат. 66563 UA, МПК H05H 5/00, G21G 4/00/. Прискорювальна газонаповнена нейтронна трубка (Г.М. Веремейченко, О.В. Коваленко, М.Ф. Коломієць, В.М. Рогозін); заявник та власник патенту ІЯД НАН України. – № у 201107275; заявл. 08.06.2011; опубл. 10.01.2012. Бюл. №1.
 21. Пат. 75722 UA, МПК H05H 5/00, G21G 4/00/. Прискорювальна газодинамічна нейтронна трубка (Г.М. Веремейченко, О.В. Коваленко, М.Ф. Коломієць, В.М. Рогозін); заявник та власник патенту ІЯД НАН України. – № у 201206750; заявл. 01.06.2012; опубл. 10.12.2012. Бюл. № 23.

ВІДДІЛ РАДІОБІОЛОГІЇ ТА РАДІОЕКОЛОГІЇ



А. І. Липська



Л. К. Бездробна

Євген Юхимович Чеботарьов із своїм учнем д.б.н., проф. Ярославом Івановичем Серкізом.

Дослідники-радіобіологи вивчали особливості дії нейтронів різних енергій на біологічні об'єкти з метою встановлення основних фундаментальних радіобіологічних закономірностей, визначення відносної біологічної ефективності, подальшої розробки методів ней-

Відділ радіобіології та радіоекології було створено у 2009 р. на базі ЦЕПАЕ з метою консолідації наукових кадрів з радіобіології та радіоекології. З 2009 р. і до цього часу відділом керує д.б.н. Алла Іванівна Липська.

На даний час у відділі працює 17 співробітників, з них 3 доктори і 7 кандидатів наук.

До складу відділу входить лабораторія радіаційної цитогенетики та доклінічного випробування радіофармпрепаратів, яку очолює к.б.н. Лариса Костянтинівна Бездробна.

Унікальні ядерно-фізичні установки ІЯД (ВВР-М, циклотрони У-120 та У-240) були базою для проведення спільних радіобіологічних досліджень науковцями багатьох НДІ України (Інституту фізіології імені О. О. Богомольця НАН України, Інституту мікробіології та вірусології НАН України, Інституту проблем онкології ім. Р. Є. Кавецького НАН України) та колишнього СРСР (Інституту біофізики АМН СРСР).

Серед них відомі вчені, засновники радіобіологічної наукової школи України – д.м.н., проф., заслужений діяч науки і техніки України

тронної терапії злоякісних пухлин та захисту людини від дії іонізуючих випромінювань.

Під керівництвом завідувача відділу радіаційної безпеки, д.б.н., заслуженого діяча науки і техніки України Григорія Миколайовича Ковалю дослідження з фізико-дозиметричних і радіобіологічних аспектів нейтронної терапії набули нового розвитку. Разом з радіобіологами інституту та лікарями-онкологами експериментально доведено можливість використання пучка швидких нейтронів ($E_{\text{ср}} = 6 \text{ MeV}$) циклотрона У-120 та створено на його основі перший у Радянському Союзі медико-біологічний комплекс для дистанційної нейтронної терапії онкологічних хворих.



Я. І. Серкіз
(1938 - 2009)



Г. М. Коваль



І. П. Дрозд

Новий поштовх розвитку радіобіології в інституті надала Чорнобильська катастрофа. За ініціативи Г. М. Ковалю у 1992 р. у структурі відділу радіаційної безпеки було створено лабораторію радіобіології, яку очолив Іван Петрович Дрозд (зараз д.б.н., провідн.н.с. відділу).

Основним напрямком досліджень лабораторії було вивчення особливостей внутрішнього опромінення, ретроспективна оцінка дозових навантажень на населення радіаційно забруднених територій.

У 1993 р. Г. М. Коваль очолив ЦЕПАЕ, в який було структурно переведено лабораторію радіобіології, згодом керівником ЦЕПАЕ став заступник директора ІЯД В. В. Тришин.

У 1994 р. завідувачем лабораторії було призначено Л. К. Бездробну. Під її керівництвом було створено спеціалізовану лабораторну базу для доклінічного тестування радіофармацевтичних препаратів, виробництво яких планується на базі реакторних нейтронів інституту.

Значний внесок у розвиток радіаційної гематології в інституті зробила Л. Б. Пінчук, яка тривалий час очолювала секцію радіоекології та радіобіології вченої ради ІЯД.

У відділі виконуються дослідження: ранніх та віддалених наслідків впливу різних видів та режимів іонізуючого опромінення на тварин і людину; кінетики та процесів дозоутворення за надходження до організму радіонуклідів різної тропності; процесів міграції техногенних радіонуклідів та їхніх фізико-хімічних форм на територіях з різним рівнем радіаційного забруднення; ядерно-фізичних характеристик паливних частинок із зони відчуження ЧАЕС; динаміки накопичення аварійних радіонуклідів та біологічних ефектів в окремих представників водних та наземних екосистем зони відчуження ЧАЕС; цитогенетичної біодозиметрії/біоіндикації променевого ураження людини; впливу малих доз іонізуючого випромінювання на генетичний матеріал (на рівні хромосом) соматичних клітин людини за умов професійної діяльності та проживання на радіаційно-забруднених територіях; проводиться розробка методичних засад оцінки та прогнозу індивідуальної радіаційної чутливості людини та доклінічне дослідження радіофармацевтичних препаратів.

Основні наукові досягнення:

експериментально досліджено специфічні просторово-часові характеристики процесів дозоутворення та радіобіологічні ефекти у лабораторних щурів за різних режимів надходження ^{137}Cs , ^{90}Sr та ^{131}I до організму;

розроблено методику оцінки доз опромінення клітин крові та розраховано дозові коефіцієнти за надходження ізотопу до організму;

установлено, що одноразове часткове блокування щитоподібної залози стабільним йодом не має суттєвого радіозахисного та профілактичного ефекту: доза на щитоподібній залозі при цьому не знижується, зменшується лише потужність дози. Для ефективного захисту органу від переопромінення необхідний тривалий прийом стабільного йоду;

розроблено програмно-математичний комплекс ідентифікації параметрів кінетики радіонуклідів ^{137}Cs та ^{90}Sr за різних режимів надходження їх до організму ссавців;

досліджено динаміку розвитку та інтенсивність вільнорадикальних процесів в організмі лабораторних щурів за внутрішнього, зовнішнього та комбінованого опромінення. Обґрунтовано можливість

оцінки окисного метаболізму у кістковому мозку на основі дослідження периферичної крові хемілюмінесцентним методом;

експериментально досліджено динаміку вмісту ^{131}I у плоді на різних стадіях ембріогенезу за введення ізотопу вагітним самкам лабораторних щурів, запропоновано спосіб розрахунку поглиненої дози від інкорпорованого ^{131}I на щитоподібну залозу плоду;

виявлено трансгенераційні цито- та генотоксичні ефекти інкорпорованого ^{131}I у нащадків опромінених лабораторних щурів;

досліджено радіобіологічні ефекти та дозові навантаження в ряді поколінь мишоподібних гризунів з природних біотопів зони відчуження ЧАЕС, виявлено істотні порушення в критичних системах організму;

проведено багаторічні дослідження ізотопного складу та процесів міграції техногенних радіонуклідів аварійного викиду в ґрунтах зони відчуження ЧАЕС;

досліджено забруднення лісових екосистем радіонуклідами після аварій на АЕС (ЧАЕС, Україна; Фукусіма Даїчі, Японія); сезонні зміни питомої активності ^{137}Cs у різних лісових об'єктах;

розроблено нерадіохімічну методику одночасного вимірювання вмісту ^{137}Cs і ^{90}Sr в зразках навколишнього середовища та біологічних об'єктах;

виявлено явище радіотропізму у мікроміцетів із зони відчуження ЧАЕС та експериментально доведено їхній вплив на процеси трансформації паливних частинок;

проведено багаторічні дослідження розподілу техногенних радіонуклідів по органах і тканинах риб з водою зони відчуження ЧАЕС із різним рівнем радіоактивного забруднення, виявлено видові особливості та закономірності накопичення їх;

досліджено залежність фізико-хімічних параметрів плазматичних мембран лімфоцитів крові від дози постійного низькоінтенсивного зовнішнього гамма-опромінення щурів. Виявлено зміни спектральних характеристик мембран, що не мали монотонного характеру в діапазоні доз 1,5 - 100 сГр та індивідуальні особливості розвитку радіаційної відповіді при дозах до 30 сГр;

досліджено динаміку частоти радіаційно-індукованих мікроядер, аберацій хромосом у лімфоцитах крові самопоселенців зони відчуження ЧАЕС упродовж 1998 - 2010 рр. Виявлено достовірне перевищення показників порівняно з жителями контрольного регіону. Показано більшу радіочутливість осіб молодшого та середнього віку. Виявлено цитогенетичні маркери присутності альфа-випромінюючих трансуранових елементів в організмі;

досліджено цитогенетичні ефекти у постійного персоналу підприємств зони відчуження ЧАЕС. Виявлено збільшення частоти мікроядер, аберацій хромосом у лімфоцитах крові порівняно з особами, які не мають професійних контактів з джерелами іонізуючого випромінювання;

проведено цитогенетичний моніторинг груп підрядного персоналу ДСП ЧАЕС, який виконував роботи зі спорудження нового конфайнмента. За частотою маркерів радіаційного впливу виявлено випадки неврахованого методами фізичної дозиметрії наднормативного опромінення деяких осіб. Розраховано біологічні дози їхнього опромінення;

проведено доклінічне тестування радіофармпрепаратів натрію йодиду (^{131}I) та елюату натрію пертехнетату $^{99\text{m}}\text{Tc}$, напрацьованих в ІЯД. Показано їхню біоеквівалентність референтним препаратам виробництва радіоізотопного центру POLATOM (Польща). Спільно з відділенням ядерної медицини Національного інституту раку МОЗ України розроблено протокол клінічного випробування радіофармпрепаратів натрію йодиду (^{131}I);

проведено обстеження в когортах умовно здорових донорів, онкологічних хворих та підрядного персоналу зони відчуження ЧАЕС з використанням удосконаленої методики цитогенетичної оцінки індивідуальної радіаційної чутливості людини. Визначено критерії ідентифікації осіб з підвищеною радіочутливістю на хромосомному рівні соматичних клітин людини;

розроблено неінвазивну експрес-методику оцінки індивідуальної радіорезистентності людини за загальносистемними показниками та визначено критерії професійного добору для роботи з джерелами іонізуючого випромінювання;

здійснено цитогенетичний супровід променевої терапії онкологічних хворих за різних режимів опромінення (у співпраці з науково-дослідним відділенням радіаційної онкології Національного інституту раку МОЗ України).

Перспективи подальших досліджень:

вивчення віддалених радіоекологічних та біологічних наслідків аварійного радіонуклідного забруднення навколишнього середовища з використанням нових методичних підходів та статистичного аналізу;

дослідження особливостей впливу хронічного опромінення в малих дозах на організм тварин та людини;

удосконалення біологічної дозиметрії/індикації променевої дії на людину з використанням молекулярно-генетичних маркерів пошкодження та репарації ДНК;



Співробітники відділу радіобіології та радіоекології, 2019 р.

розробка методів прогностичної оцінки індивідуальної радіочутливості людини на основі цитогенетичних та молекулярних маркерів;
радіобіологічний супровід розробки та впровадження новітніх технологій радіаційної та ядерної медицини;

проведення доклінічного випробування вітчизняних радіофармпрепаратів, зокрема ^{99m}Tc та натрію йодиду (^{131}I);

дослідження та апробація нових засобів профілактики та корекції радіаційних уражень людини на основі біологічно активних речовин, ентеросорбентів тощо.

Державні нагороди.

Відзнака Верховної Ради України «20 років НКРЗУ» (Національна комісія з радіаційного захисту населення України) при Верховній Раді України (Н. М. Рябченко).

Ювілейна почесна грамота на честь 100-річчя Національної академії наук України, 2018 р. (І. П. Дрозд, Л. К. Бездробна, О. А. Сова).

Пам'ятна відзнака Національної академії наук України (А. І. Липська).

Подяка Державної служби експортного контролю України з врученням Пам'ятної відзнаки Держекспортконтролю (А. І. Липська і Н. М. Рябченко).

Міжнародна співпраця.

У відділі виконувались роботи за грантом УНТЦ (Великобританія) «Виробництво радіоізотопів для медичного використання в Україні (мобільні генератори)» (спільно з ЦЕПАЕ). Проведено доклінічне тестування радіофармпрепаратів натрію йодиду (^{131}I) та елюату натрію пертехнетату (^{99m}Tc), напрацьованих в ІЯД. Показано їхню біоеквівалентність референтним препаратам виробництва радіоізотопного центру POLATOM (Польща). Розроблено протокол клінічного випробування радіофармпрепаратів натрію йодиду (^{131}I) за гранту УНТЦ (США) «Моніторинг радіоактивного забруднення лісових екосистем після аварії на ЧАЕС», досліджено особливості переходу ^{137}Cs по ланцюгу «грунт - вищі гриби» після аварії на ЧАЕС та АЕС Фукусіма Даїчі.

Відділ проводить успішну наукову діяльність з Fukushima University (Японія) в рамках меморандуму про наукове співробітництво.

Монографії.

1. Н.Н. Жданова, В.А. Захарченко, ... М.В. Желтоножская. *Микобиота Украинского Полесья: последствия Чернобыльской катастрофы* (К.: Наук. думка, 2013) 384 с.
2. І.М. Вишневецький, Г.П. Гайдар, О.В. Коваленко, Т.В. Ковалінська, М.Ф. Коломієць, А.І. Липська, П.Г. Литовченко, В.І. Сахно, В.М. Ше-

вель. *Радіаційні та ядерні технології в Інституті ядерних досліджень НАН України* (К.: Ін-т ядерних дослідж., 2014) 176 с.

3. И.П. Дрозд, А.И. Липская. *Облучение лабораторных крыс. Дозообразование и реакция-ответ организма* (Saarbrucken, Deutschland: Lap Lambert Academic Publishing, 2014) 217 с.
4. И.П. Дрозд, М.Ю. Гридчук, И.О. Мукалов. *Определение индивидуальной радиорезистентности человека* (Saarbrucken, Deutschland: Lap Lambert Academic Publishing, 2014) 197 с.
5. И.П. Дрозд. *Последствия чернобыльской аварии и управление радиационными рисками* (Saarbrucken: Lap Lambert Academic Publishing, 2015) 218 с.
6. Д.А. Вишневский, Н.Е. Зарубина, О.Л. Зарубин. *Радиоэкологический мониторинг лесов в ситуации крупной радиационной аварии* (К.: ТОВ «СІК ГРУП УКРАЇНА», 2015) 125 с.



Последствия
чернобыльской аварии
и управление
радиационными
рисками

LAP LAMBERT

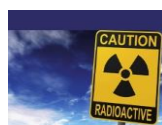


Облучение
лабораторных крыс.
Дозообразование и
реакция-ответ
организма

LAP LAMBERT



КНИЖКА



Определение
индивидуальной
радиорезистентности
человека

LAP LAMBERT

Патенти на корисну модель.

1. Спосіб ідентифікації параметрів кінетики ізотопів ^{137}Cs та ^{90}Sr за різних режимів їх надходження до організму ссавців (І. П. Дрозд, А. І. Липська, М. В. Найчук, В. І. Пастушенко) Оpubл. 12.01.2016. Бюл. № 1.
2. Спосіб одночасного оперативного вимірювання ^{90}Sr та ^{137}Cs в біооб'єктах малого розміру без використання радіохімії (М. В. Желтоножська, Н. В. Куліч, А. І. Липська, В. І. Ніколаєв) Оpubл. 10.05.2016. Бюл. № 9.
3. Спосіб спектроскопічної реєстрації активності ^{90}Sr (В. А. Желтоножський, М. В. Желтоножська, Н. В. Куліч, Д. М. Бондарьков) Оpubл. 26.12.2016. Бюл. № 24.
4. Спосіб розрахунку поглиненої дози від інкорпорованого ^{131}I на щитоподібну залозу плоду лабораторних шурів (І. П. Дрозд, А. І. Липська, В. В. Тально, Е. М. Прохорова) Оpubл. 10.01.2017. Бюл. № 1.
5. Спосіб моделювання опромінення радіоактивними ізотопами *in vitro* зразків крові ссавців і людини (І. П. Дрозд, А. І. Липська, В. А. Курочкіна, Л. К. Бездробна, В. І. Федорченко) Оpubл. 11.02.2019. Бюл. № 3.

НАВЧАЛЬНИЙ ЦЕНТР З ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ, ОБЛІКУ ТА КОНТРОЛЮ ЯДЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ІМЕНІ ДЖОРДЖА КУЗМИЧА (НЦДК)



В. І. Гаврилюк

Відділ створений 8 жовтня 1998 р. Керує відділом к.ф.-м.н. Віктор Іванович Гаврилюк.

НЦДК створений з метою здійснення досліджень у сфері фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів і на виконання розпорядження Кабінету Міністрів України «Про перелік завдань, покладених на Науковий центр «Інститут ядерних досліджень» № 488-р від 3 вересня 1997 р. Наказом по ІЯД відділу присвоєно ім'я керівника американської групи з надання допомоги Україні зі створення державних систем фізичного захисту, обліку

та контролю ядерних матеріалів Джорджа Кузмича. Важливу роль у становленні НЦДК відіграли фінансова, матеріально-технічна й методична допомога Міністерства енергетики США, що надавалася за Угодою між Державним комітетом України з ядерної та радіаційної безпеки і Міністерством оборони Сполучених Штатів Америки відносно розвитку державної системи контролю, обліку і фізичного захисту ядерних матеріалів з метою запобігання розповсюдженню ядерної зброї з України, що є імплементаційною до Угоди між Україною і Сполученими Штатами Америки щодо надання допомоги Україні в ліквідації стратегічної ядерної зброї, а також запобігання розповсюдженню зброї масового знищення від 25 жовтня 1993 р.

Основні завданнями НЦДК:

здійснення системного підходу до організації навчання з підтримання та підвищення кваліфікації фахівців з фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів;

розроблення навчальних планів і програм підтримання та підвищення кваліфікації з фізичного захисту ядерних установок, ядерних матеріалів, обліку й контролю ядерних матеріалів, культури захищеності, комп'ютерної безпеки;

розроблення матеріалів навчальних курсів (план курсу, підручник, посібник для практичних занять, презентаційні матеріали);

розроблення проектів нормативно-правових актів з фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів, культури захищеності;

надання консультативної допомоги з питань фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів організаціям й окремим фахівцям, причетним до фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів;

проведення робочих нарад з питань аналізу достатності й ефективності чинних нормативно-правових актів з фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів із запрошенням на наради представників органів державного регулювання, державного управління, фахівців з фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів;

розповсюдження досвіду, набутого у сфері фізичного захисту ядерних установок і ядерних матеріалів, обліку й контролю ядерних матеріалів, на види діяльності, пов'язані із забезпеченням захисту об'єктів підвищеної небезпеки.

При виконанні своїх завдань НЦДК взаємодіє з підрозділами Державної інспекції ядерного регулювання України, Міністерства енергетики та вугільної промисловості України, Державною службою України з надзвичайних ситуацій, Державного агентства України з управління зоною відчуження, Національної академії наук України, Головного управління Національної гвардії України (НГУ), Національної поліції України, експлуатуючих організацій, інших ліцензіатів, а також з провідними українськими фахівцями з фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів.

НЦДК реалізує покладені на ІЯД завдання з організації та проведення навчальної підготовки з підвищення кваліфікації спеціалістів на підставі ліцензії Міністерства освіти і науки України на підвищення кваліфікації фахівців за спеціальністю 143 «Атомна енергетика», галузь знань 14 «Енергетична інженерія» відповідно до наказу Мініс-



Навчальні посібники з фізичного захисту для підрозділів НГУ

терства освіти і науки України № 3022-л «Про ліцензування освітньої діяльності» від 13 грудня 2018 р. і ліцензії Держатомрегулювання України на право провадження діяльності з підвищення кваліфікації фахівців з фізичного захисту ядерних установок, ядерних матеріалів, радіоактивних відходів, інших джерел іонізуючого випромінювання, серія АВ № 534669 від 26 травня 2010 р.

Співробітники відділу працюють над: удосконаленням нормативно-правової бази України у сфері фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів, виконують науково-дослідні роботи, спрямовані на розроблення рекомендацій щодо реалізації міжнародних зобов'язань і законів України з фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів, проводять курси з підвищення кваліфікації з фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів, надають консультативну допомогу з питань фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів організаціям й окремим фахівцям, причетним до фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів, розповсюджують кращий вітчизняний та світовий досвід, набутий у сфері фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів.

Проекти нормативно-правових актів, розроблені НЦДК, успішно пройшли міжнародну експертизу, погодження українськими зацікавленими державними органами й уведені у дію постановами Кабінету Міністрів України, наказами Державної інспекції ядерного регулювання України, інших міністерств і відомств. Загалом було введено в дію 27 нормативно-правових актів.

У штаті НЦДК 8 викладачів, з яких 3 кандидати наук (В. І. Гаврилюк, к.ф.-м.н., О. П. Романова, к.б.н., В. І. Киришук, к.ф.-м.н.). До читання лекцій та проведення практичних занять за тематикою навчальних програм залучаються, крім співробітників НЦДК, науковці ІЯД, державні службовці Держатомрегулювання України, Міненерговугілля України, військовослужбовці НГУ, фахівці з фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів атомних електростанцій та інших ядерних установок України.

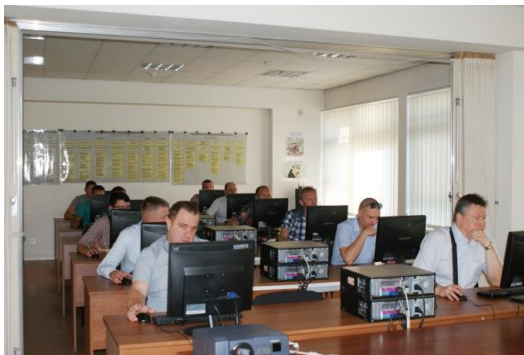
За роки роботи НЦДК розробив навчальні матеріали курсів з фізичного захисту для фахівців підрозділів фізичного захисту (22 курси), з обліку й контролю ядерних матеріалів (9 курсів), для організацій, які мають отримати ліцензію у сфері використання ядерної енергії (1 курс), для інспекторів Держатомрегулювання України (4 курси).



О. П. Романова



В. І. Кирищук



Навчальний курс «Методологія оцінки вразливості»



Навчальний курс «Неруйнівні методи аналізу ядерних матеріалів»

З 2015 р. НЦДК за підтримки Міноборони США в рамках Програми зі спільного зменшення загрози розробляє навчальні курси й проводить навчання особового складу підрозділів НГУ, які здійснюють охорону ядерних установок і ядерних матеріалів, а з 2019 р. й інших правоохоронних органів. На сьогоднішній день НЦДК має розроблені, прочитані й удосконалені навчальні курси з фізичного захисту: 24 – для особового складу підрозділів з охорони НГУ; 2 – для персоналу Національної поліції України, 3 – для співробітників АТЦ при СБУ, які беруть участь у реагуванні на кризові ситуації, пов'язані з ядерними й іншими радіоактивними матеріалами. Також НЦДК розробив навчальні матеріали й провів навчання за трьома темами для персоналу УкрДО «Радон», який виконує функції фізичного захисту. Загалом у рамках цієї Програми НЦДК провів 66 курсів (17 виїзних, на базі в/ч АЕС), на яких було навчено 1533 особи.



Навчально-тренувальний майданчик
«Комплекс інженерно-технічних засобів системи фізичного захисту»

Отже, за роки роботи НЦДК провів близько 300 національних навчальних курсів з фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів, на яких підвищили свою кваліфікацію майже 5300 українських фахівців з 216 установ і організацій.

НЦДК бере участь у проведенні навчальних курсів, що організовуються та проводяться на базі НЦДК МАГАТЕ, відповідними структурами Європейської Комісії, національними лабораторіями Міненерго США. За 20 років у НЦДК було проведено 30 подібних навчальних курсів, в яких взяли участь близько 800 іноземних слухачів майже з 30 країн світу.

Потенціал НЦДК використовується міжнародними установами й організаціями інших країн для проведення регіональних і національних навчальних курсів, семінарів і робочих нарад для фахівців з ядерної та радіаційної безпеки, фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів країн Центральної Європи, СНД та Балтії.

Навчальний центр є офіційно зареєстрованим членом мережі національних і регіональних навчальних центрів для навчання та досліджень у сфері фізичної ядерної безпеки (NSSC)/Центрів передового досвіду на базі порталу МАГАТЕ NUSEC.

З 2003 р. НЦДК проводить щорічні українські конференції з фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів. Метою конференцій є обмін досвідом і забезпечення збереження знань у сфері фізичного захисту, обліку й контролю ядерних матеріалів шляхом передавання їх молодим фахівцям і студентам. У конференціях, крім українських фахівців, беруть участь фахівці США, Швеції, Норвегії, Німеччини, Японії, Литви, Білорусі, Узбекистану, Казахстану та інших країн.

НЦДК має сучасну матеріально-технічну базу для здійснення навчального процесу.

Крім лекційних аудиторій у НЦДК є:

- навчально-тренувальний майданчик «Комплекс інженерно-технічних засобів системи фізичного захисту»;

- клас Інтерактивного навчального комплексу «Атомна електростанція з елементами системи фізичного захисту»;

- лабораторія неруйнівного аналізу;

- клас обліку й контролю ядерних матеріалів;

- комп'ютерний клас на 24 посадкових місця;

- лабораторія комп'ютерної безпеки;

- лабораторія радіаційного контролю.



Інтерактивний навчальний комплекс
«Атомна електростанція
з елементами системи
фізичного захисту»

НАУКОВО-ОРГАНІЗАЦІЙНІ ПІДРОЗДІЛИ

Науково-організаційний відділ

Основні завдання відділу:

науково-інформаційна робота в інституті; формування науково-інформаційних ресурсів та організація ефективного використання їх, насамперед у процесі науково-інформаційного супроводу науково-дослідних робіт та навчального процесу в аспірантурі інституту;

виконання поточних питань з науково-організаційної роботи відповідно до розпоряджень Президії НАН України і дирекції інституту;

підготовка щорічних звітів про науково-технічну діяльність інституту та роботу аспірантури в Президію НАН України, МОН України та Державне статуправління;

організація міжнародного співробітництва між інститутом і міжнародними ядерними центрами;

оформлення матеріалів, необхідних для виїзду у службові відрядження та на стажування працівників інституту;

підготовка до видання журналу «Ядерна фізика та енергетика», тез та програм щорічної наукової конференції інституту;

аналіз та експертиза запитів науково-дослідних робіт з фундаментальних та прикладних досліджень, що подаються на розгляд ученої ради і пропонуються до виконання за рахунок бюджетного фінансування;

підготовка та подання звітно-інформаційних матеріалів з НДР до Президії НАН України, МОН України та УкрІНТЕІ;

підготовка довідково-інформаційних матеріалів з питань науково-дослідної діяльності інституту для подання за місцем вимоги та висвітлення діяльності інституту в ЗМІ;

організація та проведення загально-інститутських наукових заходів (загальних зборів, щорічних наукових конференцій), екскурсій представників і делегацій сторонніх організацій на ядерно-фізичні установки інституту.

Керує відділом учений секретар інституту Наталія Леонідівна Дорошко.

У різні часи посаду ученого секретаря інституту обіймали Віктор Степанович Прокопенко, Юрій Вікторович Маковецький, Валерій Михайлович Пугач, Петро Леонтійович Шмарін, Юрій Олегович Васильєв, Валентина Дмитрівна Чеснокова, Федір Олексійович Іванюк, Володимир Васильович Осташко.

Відділ ліцензування, систем якості та радіаційної безпеки

Основні завдання відділу:

реалізація політики керівництва інституту з якості та управління діяльністю в галузі використання ядерної енергії;

управління процесами ліцензування діяльності інституту при використанні, виробництві та перевезенні джерел іонізуючого випромінювання;

реалізація політики керівництва інституту в галузі захисту інтелектуальної власності, методичне керівництво процесом патентних досліджень;

забезпечення контролю стану радіаційної безпеки та стану охорони праці в умовах практичної діяльності в інституті;

розробка програм навчання та організація навчання персоналу з питань радіаційної безпеки при використанні, виробництві та перевезенні джерел іонізаційних випромінювань;

забезпечення атестації робочих місць за умовами праці при виконанні робіт із джерелами іонізуючих випромінювань та дії радіаційних факторів.

Керує відділом Геннадій Якович Мінчук.

Планово-виробничий відділ

Основні завдання відділу:

узгодження планів фінансування та контроль за використанням їх; планування робіт з договірної тематики;

методичне керівництво структурними підрозділами інституту з питань оплати праці та заробітної плати;

розробка та узгодження штатного розпису інституту;

всебічний щомісячний аналіз фінансової діяльності інституту;

складання статистичної та іншої звітності.

Керує відділом Наталія Миколаївна Алексеїк.

У різні часи посаду завідувача планово-виробничого відділу обіймали Неля Августівна Ковбатьок, Лі Миколаївна Клопотнюк, Станіслав Климович Овчаренко.

Видавнича діяльність ІЯД НАН України

В інституті протягом 1971 - 2005 рр. було видано близько 800 препринтів за тематикою інституту.

У 2007 - 2013 рр. інститут видавав Щорічники (KINR Activity Reports), в яких коротко підсумовувались результати, отримані в інституті за минулий рік [1].

ІЯД неодноразово проводив наукові міжнародні, національні та щорічні інститутські конференції за тематикою інституту. До початку заходів готувалися та видавалися тези доповідей, а потім матеріали конференцій.

У 1999 р. ІЯД заснував наукове видання «Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень». Свідоцтво про державну реєстрацію було отримане 25 березня 1999 р. [2], а перший номер вийшов у 2000 р. Наприкінці 2005 р. збірник було перереєстровано на журнал «Ядерна фізика та енергетика» [3].

Журнал публікує роботи з ядерної фізики, атомної енергетики, радіаційної фізики, фізики плазми, радіобіології, радіоекології, техніки та методів експерименту. У журналі публікуються рецензовані статті, які є завершеними роботами, що містять нові результати теоретичних та експериментальних досліджень або є оглядами сучасного стану та актуальних проблем у відповідних галузях і становлять інтерес для наукових співробітників, інженерів, аспірантів та студентів старших курсів вузів.

Статті приймаються українською, англійською та російською мовами¹.

Від часу започаткування журналу і до червня 2017 р. головним редактором його був І. М. Вишневський, акад. НАН України, проф., д.ф.-м.н. Відтоді головним редактором є В. І. Слісенко, чл.-кор. НАН України, д.ф.-м.н. У різні часи відповідальними секретарями редколегії журналу були: А. П. Трофименко, В. П. Вербицький і В. І. Третяк – дотепер. Від самого початку існування журналу літературним редактором його є Л. М. Троян, а технічним секретарем О. Д. Григоренко.

Редакційна колегія журналу на сьогодні складається із 40 членів, 30 з яких представляють Україну (Київ, Славутич, Суми, Чабани), серед них: 2 академіки НАН України, 1 академік НААН України,

¹ Відповідно до Закону України «Про забезпечення функціонування української мови як державної» 2704-VIII від 25.04.2019 р. [4], ст. 22, наукові видання мають публікуватися державною мовою, англійською мовою та/або іншими офіційними мовами Європейського Союзу. Російська мова до останніх не належить. Процес переходу має завершитись до 16.07.2020 р.

6 членів-кореспондентів НАН України. Міжнародна секція редакційної колегії складається з 10 членів (країни в алфавітному порядку: Білорусь, Італія, Німеччина, Польща, Росія, США, Франція) [5].

З 2000 р. по грудень 2019 р. вийшло 68 випусків журналу, в яких було опубліковано 1141 статей. Усі статті доступні на сайті журналу [6] (старі випуски № 1 – 16 за 2000 – 2005 рр. було відскановано й викладено у 2018 р.). «Ядерна фізика та енергетика» є журналом відкритого доступу (з ліцензією CC BY-NC 4.0). Авторські права зберігаються за авторами.

На рис. 1 показано розподіл статей за тематикою: з 1141 статті 409 були присвячені ядерній фізиці (~36 %), 110 – атомній енергетиці (~10 %), 88 – радіаційній фізиці (~8 %), 46 – фізиці плазми (~4%²), 303 – радіаційній біології та екології (~26 %) і 185 – техніці та методам експерименту (~16 %).

Розподіл статей за мовами показано на рис. 2: з 1141 статті 488 опубліковано українською (~42 %), 422 – російською (~38 %) і 231 – англійською (~20 %) мовами.

На рис. 3 показано статистику та географію візитів до інтернет-сторінки журналу. З 31 серпня 2017 р. по 31 грудня 2019 р. (за останні 28 місяців) журнал відвідали читачі з 96 країн світу (приблизно 12000 візитів та 29000 переглядів головної сторінки – близько 1000 переглядів за місяць).

Географія авторів статей представлена близько 30 країнами (Австрія, Бельгія, Болгарія, Великобританія, Греція, Єгипет, Індія, Індонезія, Ірак, Іспанія, Італія, Казахстан, Китай, Марокко, Монголія, Німеччина, Польща, Португалія, Росія, Румунія, Словаччина, США, Туреччина, Україна, Франція, Швейцарія, Швеція, Чехія, Японія).

Видання індексується у двох основних наукометричних базах: Scopus (починаючи з 2008 р.) та Web of Science (Emerging Sources Citation Index, ESCI, починаючи з 2017 р.). Журнал представлено також в DOAJ (Directory of Open Access Journals), INIS (International Nuclear Information System), інформаційній системі EBSCO, Національній бібліотеці України імені В. І. Вернадського та ін. За наказом Міністерства освіти та науки України № 1218 від 7 листопада 2018 р. журнал включено до категорії «А» Переліку наукових фахових видань України.

Журнал має ідентифікатор DOI (Digital Object Identifier): 10.15407/jnpae. З 2015 р. всім статтям присвоюється індивідуальний індекс DOI.

² Тематика фізики плазми з 2006 по 2019 рр. в журналі відсутня.

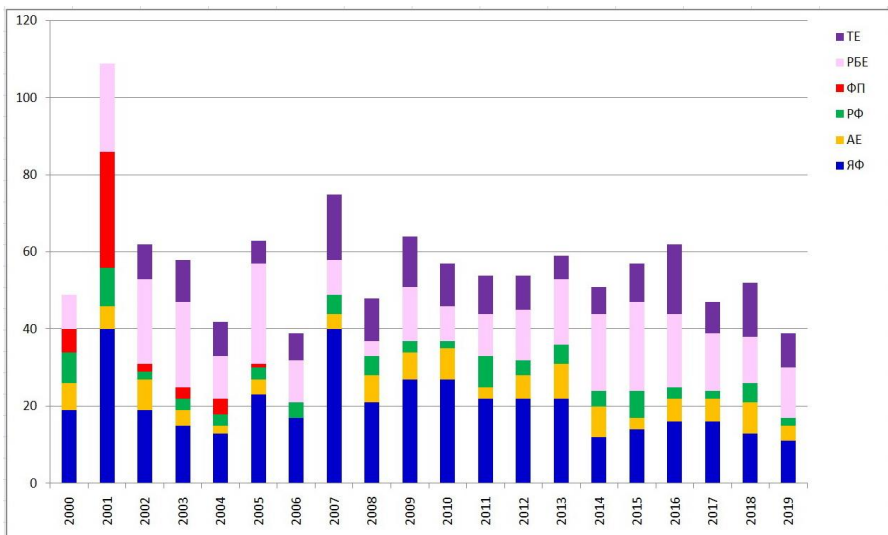


Рис. 1. Розподіл публікацій у журналі за тематикою: ядерна фізика (ЯФ, темно-синій), атомна енергетика (АЕ, жовтий), радіаційна фізика (РФ, зелений), фізика плазми (ФП, червоний), радіаційна біологія та екологія (РБЕ, світло-фіолетовий), техніка експерименту (ТЕ, фіолетовий). Дані за 2019 р. неповні.

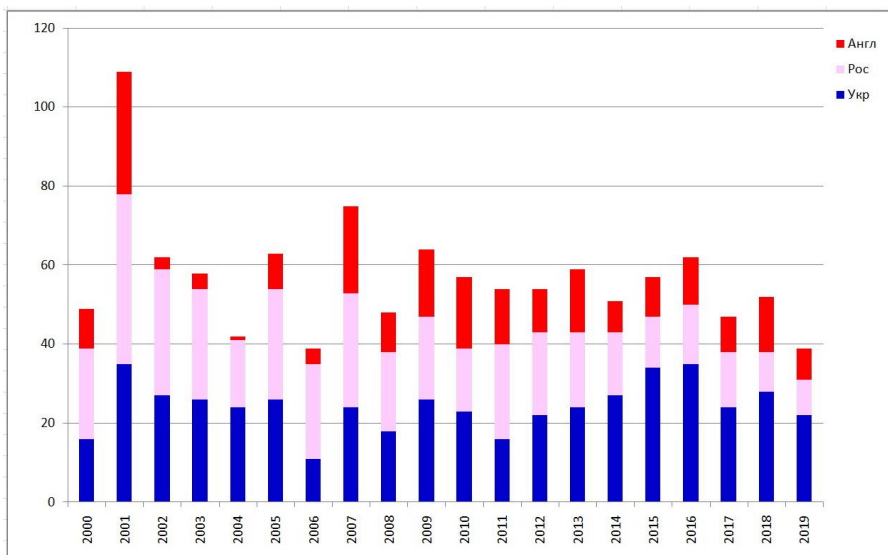
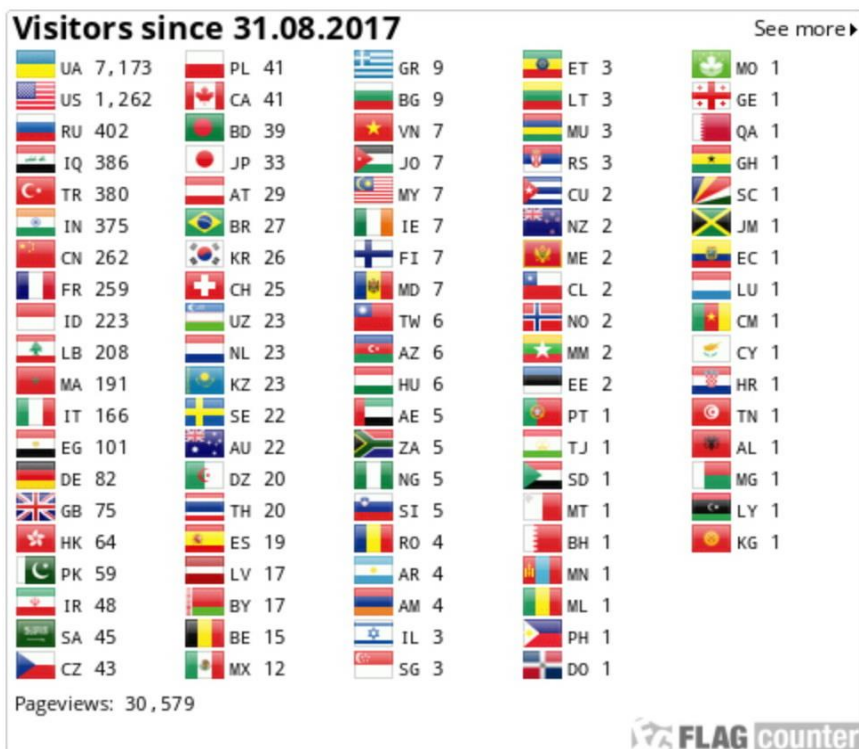


Рис. 2. Розподіл публікацій у журналі за мовами: українська (темно-синій), російська (світло-фіолетовий) і англійська (червоний). Дані за 2019 р. неповні.



a



б

Рис. 3. Статистика (а) та географія (б) візитів до інтернет-сторінки журналу.

Числові показники, що характеризують журнал та його значимість у світовому науковому процесі, на сьогодні є такими:

CiteScore, визначається Scopus за рік Y як число цитувань C на статті, опубліковані в журналі за 3 попередні роки, поділене на число цих статей P :

$$CS_Y = (C_{Y-1} + C_{Y-2} + C_{Y-3}) / (P_{Y-1} + P_{Y-2} + P_{Y-3});$$

CS за останній рік: $CS_{2018} = 0,21$;

SJR (Scimago Journal Rank), враховує значимість журналів, де посилались на ваші статті; $SJR_{2018} = 0,201$;

SNIP (Source Normalized Impact per Paper), враховує тематику журналу і дає можливість порівнювати журнали із різних областей науки, $SNIP_{2018} = 0,399$;

H-індекс (або індекс Хірша [7]), базується одночасно на кількості статей журналу (або установи, або окремого науковця) та їхньому цитуванні (науковець, або установа, або журнал має H-індекс, що дорівнює N , якщо в нього є N статей, на які є N або більше посилань). На 2018 р. журнал має $H_{2018} = 5$.

Усі ці показники є доволі скромними, і редакційна колегія прикладає зусилля, щоб їх поліпшити.

Список посилань:

1. http://www.kinr.kiev.ua/Annual_report/annual_report.html
2. http://jnpe.kinr.kiev.ua/Certificate_Zbirnyk.pdf
3. http://jnpe.kinr.kiev.ua/img/Certificate_JNPAE.pdf
4. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2704-19>
5. <http://jnpe.kinr.kiev.ua/ed-board.html>
6. <http://jnpe.kinr.kiev.ua/>
7. J.E. Hirsch. An index to quantify an individual's scientific research output. Proc. Natl. Acad. Sci. 102 (2005) 16569.

ДОПОМІЖНІ ПІДРОЗДІЛИ

Підтримка в належному стані інфраструктури інституту та створення належних умов праці науковців, ведення бухгалтерського обліку і звітності (головний бухгалтер Людмила Володимирівна Буткова), забезпечення охорони інституту, матеріально-технічне забезпечення (завідувач відділу матеріально-технічного забезпечення Ольга Костянтинівна Крючкова), ведення кадрового обліку (завідувач відділу кадрів Наталія Костянтинівна Варфоломєєва) та безліч інших господарських функцій покладено на допоміжні підрозділи.

Координацію роботи цих підрозділів здійснюють заступник директора інституту із загальних питань Олександр Миколайович Рясний та головний інженер інституту Леонід Миколайович Кучеря.

Заступниками директора інституту із загальних питань у різні часи були Борис Олександрович Косарєв, Олексій Родіонович Кучеренко, Олександр Юрійович Есаулов, Василь Олександрович Лавриненко, Олександр Васильович Коваленко.

Головними інженерами інституту працювали Євген Андрійович Галкін, Володимир Іванович Савчук, Костянтин Костянтинович Кисурін.

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РОЗРОБКИ

В інституті розроблено низку радіаційних та ядерних технологій, виробів і приладів для запровадження в різних сферах економіки, у тому числі:

зкладах охорони здоров'я (знезараження інфікованих стоків; мікростріпові детектори радіації для ядерної медицини; адронна терапія на базі циклотронів інституту; радіобіологічний супровід впровадження нових методів радіотерапії та ядерної медицини; засоби профілактики та модифікації променевих уражень людини; виробництво радіоактивних ізотопів для медичного застосування; доклінічні випробування радіофармацевтичних препаратів);

будівництві (радіаційна модифікація будівельних матеріалів);

харчовій промисловості (променеві технології обробки продуктів харчування);

текстильній промисловості (радіоізотопні нейтралізатори статичної електрики);

хімічній промисловості (методи та засоби низькофонових вимірювань радіоактивного забруднення матеріалів; радіоізотопні нейтралізатори статичної електрики);

видобувній промисловості, геології (малогабаритні нейтронні трубки для нейтронного каротажу та нейтронно-активаційного аналізу);

мікроелектронній промисловості (плазмохімічні реактори та нові плазмохімічні технології травлення матеріалів для мікроелектроніки з мікронними, суб- та наномікронними розмірами; мікромеханіки, НВЧ-техніки, обчислювальної техніки, телекомунікаційних систем, детекторів іонізуючих випромінювань та ін.; синтез нанорозмірних алмазних, алмазоподібних плівок та структур; розробка та виготовлення мікростріпових детекторів іонізуючих випромінювань різного призначення; розробка та виготовлення різних типів напівпровідникових детекторів для дозиметрії та спектрометрії ядерних випромінювань; розробка рекомендацій підвищення термічної і радіаційної стійкості матеріалів, детекторних структур та інших приладів на основі напівпровідників; прогнозування їхніх основних характеристик в умовах дії зовнішніх екстремальних полів).

Капсули натрію йодиду (^{131}I)

Натрій йодид (^{131}I) – радіофармпрепарат, використовується в ядерній медицині для діагностики і терапії раку щитоподібної залози та його метастазів.

Технічні характеристики.

Виготовляється за одностадійною термографічною технологією виділення ^{131}I з металевого телуру, опроміненого нейтронами реактора ВВР-М ІЯД НАН України. Вихід ^{131}I з матеріалу мішені перевищує 70 %. Кінцевий продукт є розчином натрію йодиду (^{131}I) без носія, який диспергований на поверхні твердого інертного носія, що міститься всередині желатинових капсул.

Фізико-хімічні характеристики натрію йодиду (^{131}I) відповідають вимогам Європейської фармакопеї.

Концентрація радіоактивності, МБк/мл	37 ÷ 1100
Чистота радіонукліду, %	99,99
Радіохімічна чистота, %	> 97
Хімічна чистота, ppm Te	< 1
Кислотність, pH	7 ÷ 10

Переваги: в Україні не виробляється. Дешевший за зарубіжні аналоги.

Розробник: центр екологічних проблем атомної енергетики.

Елюат натрію пертехнетату ($^{99\text{m}}\text{Tc}$)

Натрій пертехнетат ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) – радіофармпрепарат, найбільш широко використовується в ядерній медицині для діагностики пухлин різних локалізацій і непухлинної патології організму.

Технічні характеристики.

Виготовляється за нейтронно-активаційною технологією отримання натрію пертехнетату ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) з використанням стаціонарного екстракційного центробіжного генератора, розташованого в «гарячих камерах» дослідницького ядерного реактора ВВР-М ІЯД НАН України. Фізико-хімічні характеристики натрію пертехнетату ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) відповідають вимогам Європейської фармакопеї.





Переваги: в Україні не виробляється. Дешевший за зарубіжні аналоги.

Розробник: центр екологічних проблем атомної енергетики.

Портативний генератор $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$

Портативний генератор $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ призначений для використання безпосередньо в медичних закладах. Натрій пертехнетат ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) – радіофармпрепарат, найбільш широко використовується в ядерній медицині для діагностики пухлин різних локалізацій і непухлинної патології організму.



Технічні характеристики.

Робочим матеріалом генератора є Mo-Zr -гель, що синтезується з використанням ^{99}Mo , який отримується при опроміненні природного оксиду молібдену нейтронами реактора ВВР-М ІЯД НАН України. Фізико-хімічні характеристики портативного генератора $^{99}\text{Mo}/^{99\text{m}}\text{Tc}$ відповідають вимогам Європейської фармакопеї.

Переваги: в Україні не виробляється. Дешевший за зарубіжні аналоги.

Розробник: центр екологічних проблем атомної енергетики.

Розчин натрію йодиду (^{131}I)

Натрій йодид (^{131}I) – радіофармпрепарат, використовується в ядерній медицині для діагностики і терапії раку щитоподібної залози та його метастазів.

Технічні характеристики.

Виготовляється за одностадійною термографічною технологією виділення ^{131}I з металевого телуру, опроміненого нейтронами реактора ВВР-М ІЯД НАН України. Вихід ^{131}I з матеріалу мішені перевищує 70 %. Кінцевий продукт – розчин для перорального застосування.

Фізико-хімічні характеристики натрію йодиду (^{131}I) відповідають вимогам Європейської фармакопеї.

Переваги: в Україні не виробляється. Дешевший за зарубіжні аналоги.

Розробник: центр екологічних проблем атомної енергетики.

Радіонуклід ^{82}Sr

Радіонуклід ^{82}Sr використовують для створення генераторів $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$, які застосовують у кардіодіагностиці.

Технічні характеристики.

Установка та технологія базуються на унікальному ізохронному циклотроні У-240 з використанням опромінення мішені RbCl протонами з енергією 70 MeV. Генератор $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$ може використовуватися в технології позитронно-емісійної томографії без заміни протягом одного місяця.



Переваги: не виробляється в Україні. Дешевший за зарубіжні аналоги. Дає можливість виключити необхідність наявності циклотрона та радіохімічної лабораторії в клініках, що суттєво здешевлює кардіодіагностику.

Розробник: відділ ядерних реакцій.

Електрофізичний комплекс для нейтронної терапії

Комплекс призначений для генерації нейтронів з метою реалізації найбільш сучасних методик лікування раку з використанням реакцій, що виникають між радіаційно-чутливими медикаментами та нейтронами NCT (Neutron Capture Therapy). Такі методики доступні медицині лише при наявності складної і унікальної ядерно-фізичної техніки.



Технічні характеристики.

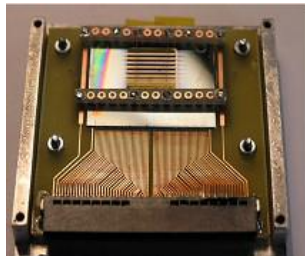
Комплекс базується на чотирьох потужних електрофізичних установках ІЯД, здатних генерувати потоки нейтронів різної щільності та енергії відповідної до потреб сучасної ядерної медицини. Такий комплекс здатен обслуговувати до 600 пацієнтів щорічно.

Переваги: комплекс не має аналогів в Україні. Не поступається сучасним зарубіжним центрам нейтронної терапії.

Розробник: відділ структури ядра.

Металеві мікροстріпові детектори радіації, «прозорі» для випромінювання

Мікροстріпові детектори призначені для медицини (радіаційна терапія), науково-технічних пристроїв на основі прискорювачів та синхротронів, мас-спектрометрів, дифракційної рентгенографії, моніторингу поперечного розподілу іонних пучків, фокусування пучків заряджених частинок тощо.



Технічні характеристики.

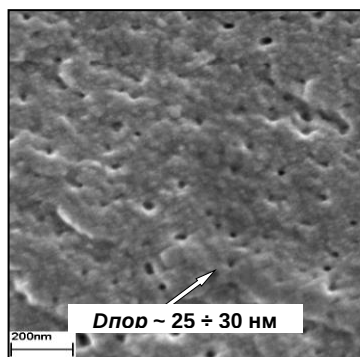
Радіаційна стійкість 100 ГГр, просторова роздільна здатність - кілька мікрон, прозорість – товщина близько 1 мк. Розроблено серію металевих мікростріпових детекторів: секторні на 16 секторів, зі змінним кроком (32 стріпи, 8 груп), на 128, 256, 1024 стріпи з різним кроком і товщиною та інші типи.

Переваги: не мають аналогів у світі. Є «прозорими» для випромінювання.

Розробник: відділ фізики плазми та плазмових технологій.

Нанопористі фільтруючі матеріали

Нанопористі фільтруючі матеріали на основі трекових ядерних мембран використовуються в новітніх ультрафільтраційних процесах, зокрема в медицині при гемодіалізі, електротехнічній промисловості при виробництві хімічних джерел електроенергії, у метрології для очищення газів, у харчовій промисловості для напівпрозорих упаковок та ін.



Технічні характеристики.

Технологія базується на бомбардуванні полімерних матеріалів потоками важких заряджених частинок з наступним пікохвильовим опроміненням. Відрізняється від аналогічних використанням іонного циклотрона У-120 та електронного прискорювача 4 МеВ. Продуктивність до 800 м² матеріалу на місяць. Енергія іонів 24 МеВ і вище. Діаметр отворів 25 - 30 нм.

Переваги: в Україні не виробляються. Дешевші за зарубіжні аналоги.

Розробник: відділ структури ядра.

Технологія радіаційної модифікації композитних орґано-мінеральних цементуючих систем

Призначена для підвищення гідрофобності, корозійної стійкості та міцності бетонних конструкцій, виробів з азбоцементу та інших орґано-мінеральних цементуючих систем для об'єктів з екстремальними умовами експлуатації.



Технічні характеристики.

Технологія базується на прискорювачі електронів серії «Електроніка». Середня енергія електронів до 10 MeV, споживання електричної потужності 110 кВт. Продуктивність 1,5 тис. т на рік.

Переваги: технологія не має аналогів в Україні. Дешевша за зарубіжні аналоги.

Розробник: відділ структури ядра.

Вимірювач зольності радіометричний



Призначений для оперативного вимірювання зольності вугілля у штабелях або транспортних засобах (вагонах, автомобілях тощо) радіометричним методом.

Технічні характеристики.

Управління вимірювачем здійснюється дистанційно за допомогою пульта-смартфона ОС Андроїд. Передача даних по Bluetooth. Довжина вимірювача 0,8 м, діаметр 0,05 м, ширина 0,34 м, маса 2,5 кг. Діапазон вимірювання зольності від 3 до 80 %. Час вимірювання встановлюється

користувачем у діапазоні від 10 до 10000 с. Робочий діапазон температур від -20 до $+40$ °С. Вологість вугілля при вимірюванні будь-яка.

Переваги: комерційні аналоги в Україні відсутні. Вимірювання зольності займає декілька хвилин, що дає змогу проводити вимірювання в польових умовах, не звертаючись до лабораторії і заощаджуючи час.

Розробник: відділ структури ядра.

Аероіонна технологія виробництва харчових продуктів

Для енергоефективного виробництва харчових продуктів, стійких до зберігання без будь-яких хімічних консервантів чи стабілізаторів.

Технічні характеристики.

Технологія базується на електрофізичних генераторах низькоенергетичних іонів повітря (аероіонів) власної спеціальної розробки. Продуктивність 90 т на рік, енергія іонів 20 - 50 кеВ, споживання електричної потужності 150 Вт.

Технологія реалізується при звичайній кімнатній температурі та нерегульованій вологості.



Переваги: технологія не має аналогів в Україні. Від зарубіжних аналогів відрізняється меншим енергоспоживанням, меншою вартістю і простотою використання. Підвищує гігієну виробництва і не впливає на екологію.

Розробник: відділ структури ядра.

Малогабаритний сцинтиляційний гамма-спектрометр для аналізу харчових продуктів та будівельних матеріалів

Гамма-спектрометр призначений для визначення техногенних радіонуклідів (^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{60}Co тощо) у харчових продуктах та встановлення радіаційного класу будівельних матеріалів.

Технічні характеристики.



Ширина, мм	180
Кристал NaI(Tl), мм	Ø25 × 25
Діапазон реєстрації енергії, кеВ	50 - 3000
Кількість каналів	1024
Роздільна здатність по лінії 662 кеВ	не більше 10 %
Посудина Марінеллі, л	0,5
Товщина захисту, мм	15, 25
Маса, кг	12
Інтерфейс	USB
Мінімальна вимірювана активність ^{137}Cs за годину на пробу, Бк	17

Переваги: комерційні аналоги в Україні відсутні. Прилад може замінити дорогий спектрометр з більш чутливим і відповідно більш дорогим детекторним блоком і масивним свинцевим захистом при визначенні радіаційного класу будівельних матеріалів та техногенних радіонуклідів у харчових продуктах.

Розробник: відділ структури ядра.

Технологія пікохвильової пастеризації харчових продуктів

Призначена для пастеризації та консервації продуктів харчування радіаційними пікохвильовими технологіями без будь-яких хімічних речовин з метою запобігання втрат продуктів при зберіганні та для захисту споживачів від інфекційних захворювань.



Технічні характеристики.

Технологія базується на прискорювачі електронів серії «Електроніка». Продуктивність 7500 т на рік, середня енергія електронів 5 МеВ, споживання електричної потужності 75 кВт.

Переваги: технологія не має аналогів в Україні. Дешевша за зарубіжні аналоги.

Розробник: відділ структури ядра.

Джерела бета-випромінювання тритієві модифіковані типу БИТР-М

Призначені для застосування в генераторах іонів (нейтралізаторах).

Технічні характеристики.

Тип	Іонізаційний струм, нА, не менше	Активність, ГБк (Ки), не більше
БИТР-М1	41,7	17,4 (0,47)
БИТР-М2	101,8	42,5 (1,15)
БИТР-М3	216,2	90,3 (2,44)
БИТР-М4	342,6	143,1 (3,87)
БИТР-М5	37,9	15,8 (0,43)
БИТР-М6	140,6	58,7 (1,59)
БИТР-М7	9,8	4,1 (0,11)
БИТР-М7а	4,9	2,05 (0,055)

Закрите джерело іонізуючого випромінювання. Термін служби 8 років.

Переваги: фізико-технічні характеристики відповідають кращим світовим стандартам при значно нижчій ціні.

Розробник: лабораторія фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань.

Іонізатор повітря аеродинамічний ИВА-Т

Призначений для утворення в закритих об'ємах необхідної концентрації негативних і позитивних іонів із заданим ступенем уніполярності. Застосовується для іонізації повітря в камерах інкубаторів, тваринницьких приміщеннях тощо.

Технічні характеристики.

Іонізаційний струм на виході не менше 50 нА.



Переваги: іонізатор не має аналогів у світі. Простота і зручність в експлуатації, термін служби більше 8 років, екологічна чистота, висока ефективність, що є поза конкуренцією з іншими видами іонізаторів.

Розробник: лабораторія фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань.

Нейтралізатор статичної електрики тритісвий аеродинамічний типу НТАД

Аеродинамічний нейтралізатор призначений для зняття електростатичних зарядів з фоточутливих матеріалів та в місцях, де пасивні нейтралізатори технічно неможливо розмістити.

Технічні характеристики.



Іонізаційний струм на виході, нА, не менше	50
Сумарна активність установлених джерел, ТБк (Ки), у межах	0,296 - 0,555 (8 - 15)
Напруга живлення, В	222 - 233
Споживана потужність, Вт, не більше	18
Струм, мА, не більше	95
Габаритні розміри, мм, не більше:	
довжина	130
ширина	133
висота	50
Маса, кг, не більше	0,75
Термін служби, років	8

Переваги: висока ефективність, компактність, простота й зручність в експлуатації, надійність і довговічність, широкий спектр областей застосування, низькі витрати й екологічна чистота.

Розробник: лабораторія фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань.

Нейтралізатор статичної електрики тритісвий продувний типу НТП

Призначений для усунення прояву електростатичних зарядів, що виникають при переробці сипучих матеріалів, які сильно електризуються.

Технічні характеристики.

	НТП-8	НТП-16	НТП-24
Іонізаційний струм з робочої поверхні, мкА, не менше	25,9	51,9	77,8
Сумарна активність установлених джерел, ТБк (Ки), не більше	10,84 (293)	21,70 (586)	32,51 (879)
Габаритні розміри, мм, не більше:			
довжина	56	96	136
ширина	146	146	146
висота	194	194	194
Термін служби, років	8	8	8

Переваги: висока ефективність і повна автономність (на відміну від високовольтних та індукційних), компактність, простота й зручність в експлуатації, надійність і довговічність, можливість експлуатації у вибухонебезпечних й пожежонебезпечних умовах, відсутність необхідності в джерелах живлення, широкий спектр областей застосування, низькі витрати й екологічна чистота.

Розробник: лабораторія фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань.



Нейтралізатор тритієвий статичної електрики типу НТСЕ

Призначений для нейтралізації зарядів статичної електрики, що утворювалися на плівкових і листових матеріалах, папері, тканинах тощо.

Технічні характеристики.

Нейтралізатор НТСЕ являє собою пенал, у який поміщено плати з укріпленими на них тритієвими джерелами бета-випромінювання типу БИТр-М за ТУ 05540132.015-97, закритий запобіжною сіткою.

Іонізаційний струм з робочої поверхні нейтралізаторів типу НТСЕ-1, ..., 50 (цифрами позначено кількість джерел типу БИТр-М), не менше (0,216 - 10,81) мкА. Термін служби 8 років.



Переваги: висока ефективність і повна автономність (на відміну від високовольтних та індукційних), компактність, простота й зручність в експлуатації, надійність і довговічність, можливість експлуатації у вибухонебезпечних й пожежонебезпечних умовах, відсутність необхідності в джерелах живлення, широкий спектр областей застосування, низькі витрати й екологічна чистота.

Розробник: лабораторія фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань.

Генератор нейтронів на основі малогабаритної прискорювальної нейтронної трубки типу НТГ-2М

Призначений для здійснення імпульсного нейтронного каротажу свердловин при розвідці та контролюванні видобутку нафто-газових родовищ корисних копалин.

Технічні характеристики.



Максимальна енергія нейтронів, МеВ	14
Максимальна активність тритію, ГБк	488,4
Мінімальний середній вихід нейтронів, с ⁻¹ :	
після виготовлення	2·10 ⁸
після 200 год роботи	5·10 ⁷
Частота нейтронних імпульсів, кГц	0,05 - 20
Прискорювальна напруга, кВ	100
Мінімальна індукція поздовжнього магнітного поля, мТл	20
Напруга накалу катода іонного джерела, В	1
Амплітуда імпульсів живлення анода іонного джерела, В	< 500
Напруга нагрівача сховища ДТ-суміші, В	< 6
Споживана потужність, Вт	< 35
Робоча температура, К	283 - 423
Розміри, мм:	
максимальний діаметр трубки (без магніту)	29
діаметр електрода високої напруги	19
довжина	155
Призначений термін служби, роки	2
Термін роботи, год	200

Переваги: кращий за генератори нейтронів на трубках ТНТ-1411 російського виробництва

Розробник: лабораторія фізико-технічних проблем джерел ядерних випромінювань.

Плазмохімічний реактор для створення ізоляції ФЕП

Призначений для використання в галузі сонячної енергетики при виробництві фотоелектричних перетворювачів.

Технічні характеристики.

Цикл обробки 30 хв. Одноточасна обробка 60 пластин розмірами $125 \times 125 \text{ мм}^2$ і $150 \times 150 \text{ мм}^2$, товщиною 210 мкм. Напруженість магнітного поля 100 Е, потужність генератора 1,5 кВт на частоті 13,56 МГц.

Переваги: перевищує в 2,4 раза за продуктивністю кращі зарубіжні аналоги при вищій якості обробки.

Розробник: відділ фізики плазми та плазмових технологій.



Плазмохімічний реактор з керованою енергією іонів

Призначений для прецизійної обробки виробів мікро- та наноелектроніки, НВЧ, обчислювальної техніки та ін.

Технічні характеристики.

Керована енергія іонів від 20 до 800 еВ. Можлива обробка пластин діаметром до 200 мм. Швидкість анізотропного травлення, мкм/хв: Si – 0,7; W – 0,2; Au – 0,03; Al – 0,4; SiO₂ – 0,2; SiC – 0,15; Ti – 1,0; Pt – 0,015; Ge – 4,0; GaAs – 0,1; Si₃N₄ – 0,2; TiN – 0,2; GaN – 0,07. Швидкість ізотропного травлення, мкм/хв: GaAs – 0,5, однієї пластини Si – 3. Робочий тиск 10^{-3} - 10^{-1} мм рт. ст., анізотропія травлення 10. Нерівномірність травлення $\pm 5\%$. Напруженість магнітного поля 20 - 200 Е.

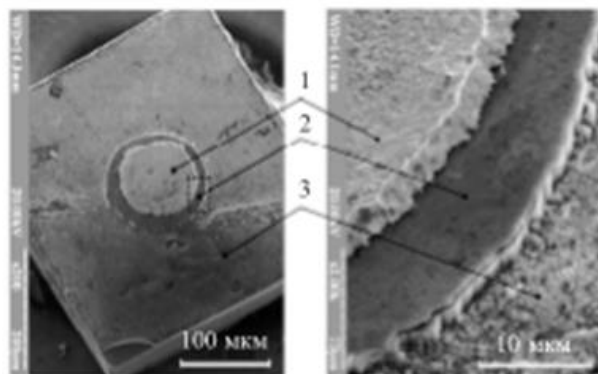
Переваги: не має аналогів. Розроблено технології плазмохімічного травлення більшості матеріалів, які зустрічаються в мікросхемах різного призначення, включаючи карбід кремнію та нітрид галію, та інших нано- та мікроструктур.

Розробник: відділ фізики плазми та плазмових технологій.



Швидкодіючий діод

Призначений для комутації сигналів в НВЧ приладах.



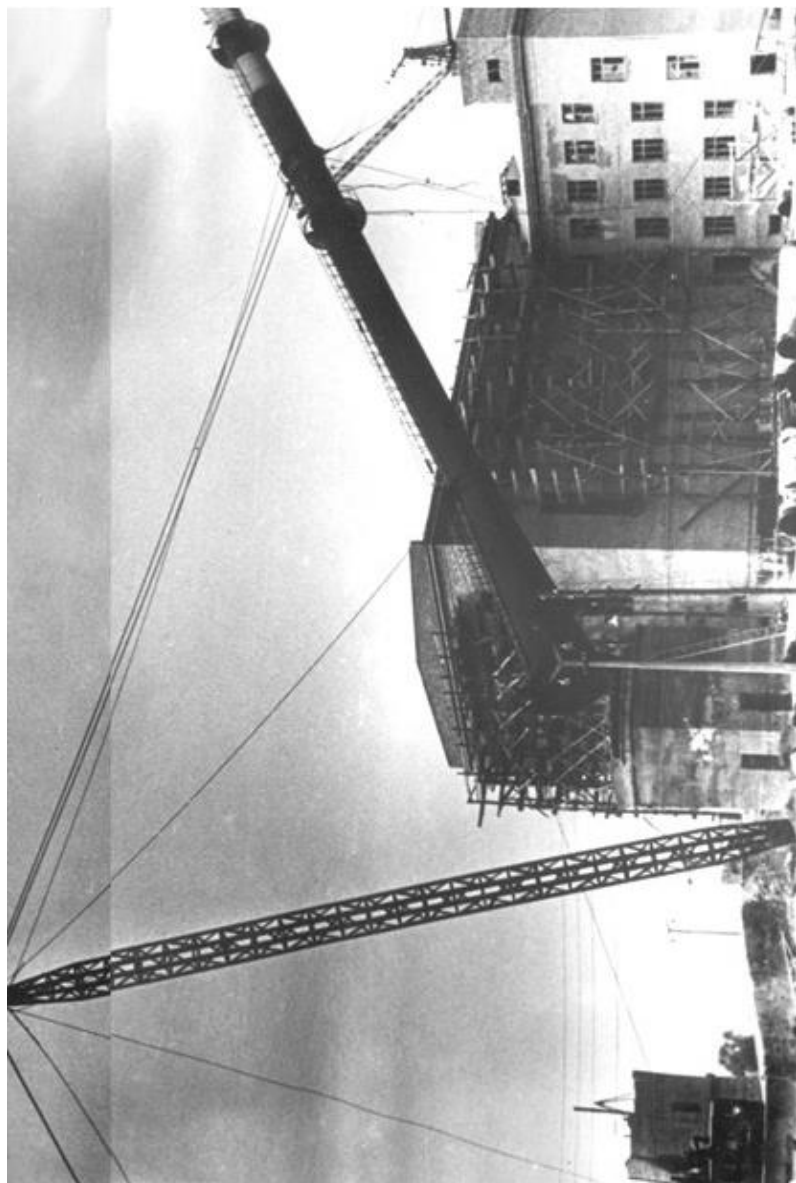
Технічні характеристики.

Діод типу р-і-п на основі карбідокремнієвої мезаструктури. Комутація НВЧ-сигналів потужністю до 2 кВт. Діоди можуть функціонувати при температурі до 500 °С. При кімнатній температурі діоди мають зворотну напругу 630 В, а при 500 °С – 250 В.

Переваги: кращий від зарубіжних аналогів за потужністю та робочою температурою.

Розробник: відділ фізики плазми та плазмових технологій.

ДЕЩО З ІСТОРІЇ...



Будівництво дослідницького ядерного реактора



Початок будівництва ізохронного циклотрона У-240



Отримано перший пучок на У-240. 20 березня 1976 р.



Оргкомітет Міжнародної конференції з ядерної фізики, 1994 р.



Учасники Міжнародної конференції
«Актуальні проблеми ядерної фізики та атомної енергетики», 2006 р.



Відкриття Міжнародної конференції
«Актуальні проблеми ядерної фізики та атомної енергетики», 2008 р.

ЗМІСТ

Передмова.....	3
Коротка історія та основні досягнення.....	6
Наукові підрозділи	
<i>Секція ядерної фізики, фізики елементарних частинок і високих енергій</i>	
Відділ теорії ядра.....	26
Відділ ядерних реакцій.....	38
Лабораторія ядерної електроніки та інформаційних технологій.....	43
Прискорювачі.....	48
Відділ фізики високих енергій.....	57
Відділ структури ядра.....	62
Відділ фізики лептонів.....	68
Відділ фізики важких іонів.....	74
Відділ теорії ядерних процесів.....	79
<i>Секція ядерної енергетики</i>	
Відділ дослідницького ядерного реактора.....	87
Лабораторія нейтронної фізики.....	94
Дослідницький ядерний реактор ВВР-М.....	97
Відділ проблем дозиметрії ядерних реакторів.....	102
<i>Секція радіаційної фізики та реакторного матеріалознавства</i>	
Відділ теоретичної фізики.....	106
Відділ радіаційної фізики.....	117
Відділ радіаційного матеріалознавства.....	133
<i>Секція фізики плазми та керованого термоядерного синтезу</i>	
Відділ теорії ядерного синтезу.....	139
Відділ фізики плазми та плазмових технологій.....	152
<i>Секція ядерної, радіаційної та техногенно-екологічної безпеки</i>	
Центр екологічних проблем атомної енергетики.....	171
Відділ радіобіології та радіоекології.....	196
Навчальний центр з фізичного захисту, обліку та контролю ядерних матеріалів імені Джорджа Кузмича.....	204
Науково-організаційні підрозділи.....	210
Видавнича діяльність ІЯД НАН України.....	212
Допоміжні підрозділи.....	217
Науково-технічні розробки	218
	239

Науково-популярне видання

ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ НАН УКРАЇНИ

50 РОКІВ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ЗВЕРШЕНЬ

Редактор *Л. М. Троян*

Комп'ютерна верстка *О. Д. Григоренко*

Підп. до друку 30.01.2020. Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 13,6.

Тираж 250 пр. Зам. № 1.

Інститут ядерних досліджень НАН України,
просп. Науки, 47, м. Київ, 03028, тел. 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.