

**МОДЕРНІЗОВАНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯДЕРНИХ РЕАКЦІЙ НА ПРИСКОРЮВАЧІ У-240**

**В. І. Гранцев, В. О. Грашилін, Ю. О. Дей, М. І. Доронін, К. К. Кісурін,
О. М. Ковальов, В. І. Копачов, І. О. Мазний, О. М. Мофа, С. Є. Омельчук,
Г. П. Палкін, Б. А. Руденко, Л. С. Салтиков, В. Г. Савчук, В. С. Семенов,
Л. І. Слюсаренко, Б. Г. Стружко, В. А. Шитюк**

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

Описано структуру та елементи модернізованого експериментального комплексу для дослідження ядерних реакцій на прискорювачі У-240. Комплекс дозволяє здійснювати постановку різних типів фундаментальних досліджень, а також вирішувати практичні задачі. При створенні експериментального комплексу застосовано сучасні інформаційні технології, що дозволяє легко перебудовувати автоматизовані системи конкретних методик та розширювати їх обчислювальні можливості, підключати до них нові вузли.

Експериментальна база на прискорювачі У-240 створювалася наприкінці 70-х та початку 80-х років. На цій базі виконано багато експериментальних досліджень, отримано нові дані з ядерної спектроскопії та структури атомних ядер, динаміки малонуклонних систем, розподілу густини матерії в ядрах, поділу ядер тощо.

Швидкий розвиток електронної та комп'ютерної техніки вніс суттєві зміни в організацію експериментальних досліджень та обробку отриманих результатів, тому створена в свій час на прискорювачі У-240 інфраструктура почала гальмувати проведення експериментальних досліджень. Гостро постало питання про проведення радикальної реконструкції існуючої інфраструктури: створення нових експериментальних та електронних пристроїв, застосування нових інформаційних технологій. Створенню такої інфраструктури присвячено цю статтю.

В експериментальному комплексі застосовано сучасні інформаційні технології, що дозволяють легко перебудовувати автоматизовані системи конкретних методик та розширювати їх обчислювальні можливості, підключати до них нові вузли та проводити контроль за вимірюванням у будь-якому місці локальної мережі інституту. Структура та елементи комплексу дають змогу здійснювати постановку різних типів фундаментальних досліджень, а також вирішувати практичні задачі.

Структуру експериментального комплексу описано в розділі 1, а його складові елементи – в розділах 2 - 5. У розділі 6 наведено результати апробації вузлів експериментального комплексу на пучку протонів з енергією 35 МеВ. Розділ 7 присвячено опису експериментів, які можуть бути здійснені найближчим часом.

1. Структура експериментального комплексу

До складу експериментального комплексу входять експериментальна система з мережею пакетної комутації та вимірювальна система з мережею централізованого керування.

Експериментальна система та мережа пакетної комутації забезпечують: 1) транспортування, формування та діагностику пучка іонів із заданими параметрами на мішень, що знаходиться в камері розсіяння; 2) детектування спектрів різного типу частинок із мішені, що досліджується, та реєстрацію інтенсивності пучка прискорених іонів. Експериментальну систему розміщено на центральному іонопроводі в боксі № 2.

Комутуючий магніт, що знаходиться в боксі, дає можливість спрямовувати пучок іонів в один із двох бокових іонопроводів, розташованих під кутом 30° до центрального іонопроводу. На одному з них буде розміщено експериментальну камеру для вимірювання реакцій поділу ядер.

Обробку отриманих із детекторів сигналів згідно з методикою експерименту виконує вимірювальна система. Експериментальні методики створюються двох типів – постійно діюча та методика конкретного експерименту. Постійно діюча методика буде забезпечувати вимірювання та візуалізацію параметрів пучка прискорених іонів з періодичністю, яку задає експериментатор. Конкретних методик може бути декілька. Кожна методика знаходиться під керуванням персонального комп'ютера (ПК). Модулі вимірювальної системи розташовано як у боксі, так і у вимірювальному центрі.

Мережа централізованого керування об'єднує діючі методики в єдину систему, яка дозволяє накопичувати та зберігати інформацію, оперативно передавати її на робоче місце експериментатора та на пульт керування оператора У-240.

2. Експериментальна система

Експериментальна система включає: 1) центральну частину іонопроводу з пристроями для колімування й діагностики пучка іонів; 2) камеру розсіяння з дослідною мішенню та системою детектування частинок. Схематично експериментальну систему зображено на рис. 1.

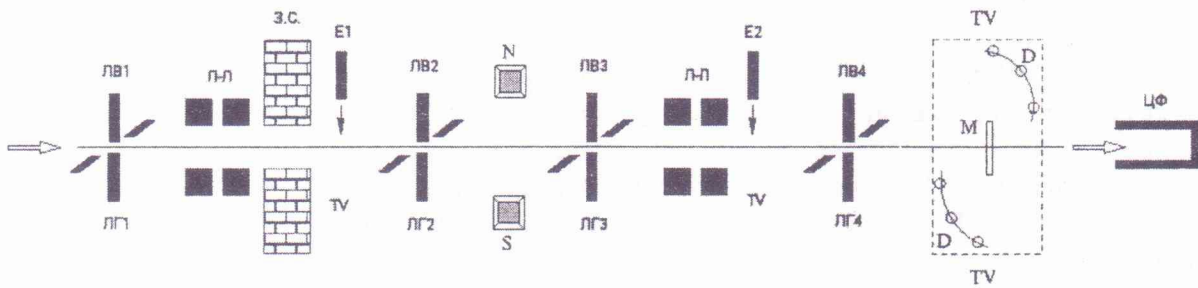


Рис. 1. Схема експериментальної системи:

З.С. – захисна стіна між лінзовим коридором та боксом № 2; Л-Л – квадрупольні лінзи; NS – комутуючий магніт; ЛВ1 - ЛВ4 – пробники з вертикальними щілинами; ЛГ1 - ЛГ4 – пробники з горизонтальними щілинами; Е1, Е2 – пробники «Екран»; D – детектори; ЦФ – циліндр Фарадея; TV – відеокамери спостереження.

2.1. Колімування та діагностики пучка іонів

Колімування пучка іонів здійснюється за допомогою щілин, які розташовано в пробниках ЛВ і ЛГ, та квадрупольних лінз. Елементи системи колімування та діагностики пучка іонів показано на рис. 1.

Першу пару пробників ЛВ і ЛГ розміщено за захисною стіною боксу, у лінзовому коридорі, для зменшення радіаційного фону. Три інші пари пробників ЛВ і ЛГ (ЛВ2 - ЛВ4, ЛГ2 - ЛГ4) знаходяться в іонопроводі, у боксі. Пробники ЛВ і ЛГ устанавлюються в іонопровід таким чином, щоб забезпечити незалежність їх руху. Пластини, що утворюють щілини, можна замінити. Це дає можливість вибрати оптимальні умови для колімування пучків різних типів частинок та різних енергій.

Вимірювання струму та візуальне спостереження за положенням та розмірами пучка здійснюється шляхом введення під пучок пробника «Екран» (Е1, Е2) та зняття з нього електричного та світлового сигналів. Пробник «Екран» виконано у вигляді прямокутної мідної пластини, що має сцинтиляційне покриття та масштабну сітку й розрахована на повне поглинання пучка.

В іонопроводі розміщено два пробники «Екран», перший – на вході в бокс (Е1), другий (Е2) – на вході в камеру розсіяння. На виході камери інтенсивність пучка реєструється циліндром Фарадея, з'єднаним з інтегратором струму. Передбачено візуальне спостереження за розміром пучка на мішені.

2.2. Камера розсіяння

Камера розсіяння – це металевий циліндр діаметром 820 та висотою 900 мм, закритий зверху (кришкою) та знизу (днищем). Кришка знімається для забезпечення доступу до детекторів, мішеней та апаратури, встановлених у камері. У центрі камери знаходиться шток, на якому кріпляться п'ять мішеней. Шток обертається навколо осі, що забезпечує встановлення мішені під різними кутами. Праворуч та ліворуч від штока за меридіанами встановлено дві дуги, на яких кріпляться детектори (телескопи). Дуги мають можливість обертатися навколо осі, яка проходить через центр камери розсіяння. На кожній дузі розміщено три детектори на різних азимутальних кутах: у площині реакції, у верхній та нижній півсферах. Для реєстрації частинок використовуються як напівпровідникові детектори, так і сцинтиляційні. Селекція типу частинок проводиться за методикою $\Delta E/E$. Обробку сигналів виконує вимірювальна система.

3. Мережа пакетної комутації

Бокс № 2, в якому виконується експеримент, є радіаційно небезпечним приміщенням, тому керування всіма пристроями, що знаходяться в боксі, здійснюється дистанційно з пульта У-240 та з вимірювального центру.

Побудовано дві мережі пакетної комутації: мережа пакетної комутації пробниками та мережа дистанційного керування елементами камери.

Мережа пакетної комутації пробниками об'єднує чотири пари пробників ЛВ і ЛГ та два пробники «Екран». Комутаційні функції виконує «Системний блок керування пробниками», розташований у лінзовому коридорі. Цей блок поєднано з «Пультот керування пробниками», що знаходиться на пульті оператора У-240. Спостереження за рухом пробників та фіксацію їх положення забезпечують пристрої, установлені безпосередньо на кожному пробнику. Електронну частину цих пристроїв умонтовано в «Пульт керування пробниками».

Поступовий рух штока, на якому встановлено дослідні мішені, та обертовий рух кронштейнів, на яких змонтовано дуги з детекторами, забезпечує мережа дистанційного керування елементами камери. Усі операції здійснює «Системний блок керування елементами камери», який знаходиться в боксі. «Системний блок керування елементами камери» складається з трьох модулів: «Мішені», «Дуга-1» (праворуч від напрямку пучка іонів) та «Дуга-2» (ліворуч). Ці модулі виконують відповідно функції: поступово зворотний рух штока з фіксацією положення заданої мішені; обертовий рух кронштейна з фіксацією кута в площині реакції. Керування модулями здійснюється з робочого місця експериментатора у вимірювальному центрі «Пультот керування елементами камери». Пульт також має відповідні модулі: «Мішені», «Дуга-1» та «Дуга-2».

4. Вимірювальна система

Для проведення експериментів, які планується виконати на прискорювачі У-240 найближчим часом, розроблено та створюється вимірювальна система з централізованим керуванням. До складу цього комплексу входять файловий сервер та три підсистеми: підсистема забезпечення експерименту; підсистема контролю параметрів пучка прискорювача; підсистема обробки експериментальних результатів.

Підсистема забезпечення експерименту реалізується у вигляді двох методик, що дають змогу проводити накопичення інклюзивних спектрів та спектрів багатопараметричних даних. Підсистема здійснює знімання сигналів із детектуючої апаратури, керує, аналізує, проводить попередню обробку та візуалізацію результатів.

Накопичення інклюзивних спектрів забезпечує стандартна схема з модернізованою частиною апаратури під керівництвом ПК, локального сітьового клієнта (ЛСК). Суттєве збільшення продуктивності підсистеми при накопиченні одномірних та двомірних спектрів досягається за рахунок використання модулів пам'яті з об'ємом пам'яті 512 К слів у стандарті КАМАК.

У схемі накопичення багатопараметричних даних зведено до мінімуму використання застарілих модулів типу “Вишня-200” з перспективою повної відмови від цього стандарту.

Аналогова обробка мікросекундних сигналів здійснюється модулями КАМАК типу “БАО-002”, які замінюють від п’яти до шести модулів застарілого типу.

Керування та формування наносекундних сигналів проводиться швидкісними модулями типу “Вишня-160”, розміщеними в боксі безпосередньо біля детекторів. Відбір N-кратних збігів реалізується програмованою матрицею збігу, яка принципово дозволяє відібрати всі можливі типи збігів одночасно. Однак реєстрацію збігів різної кратності доцільно проводити роздільно, так як інтенсивність подій залежить від N-кратності збігів. У даному випадку функцію кодувальника типу збігів виконує модуль ND-02, який дозволяє відібрати одночасно до восьми типів подій. Усю апаратуру розміщено в трьох крейтах КАМАК, один (у перспективі всі) з яких підключено до ПК. ПК забезпечує керування підсистемою за допомогою плати зв’язку з крейтом КАМАК.

Підсистема контролю параметрів пучка іонів – це окрема методика, що дозволяє визначити енергію прискорених іонів та часовий розподіл густини іонів. Експериментальну частину цієї методики розташовано в лінзовому коридорі.

Підсистему обробки експериментальних результатів побудовано у вигляді бібліотеки програм, які дають змогу обробляти як інклюзивні, так і кореляційні спектри.

Розташування елементів виміральної системи в мережі централізованого керування показано на рис. 2.

5. Мережа централізованого керування

Центральною ланкою мережі централізованого керування є файловий сервер, на який встановлено операційну систему FreeBSD. Він експортує свої ресурси клієнтам, забезпечує можливість використання зовнішніх, з точки зору клієнтів, запам’ятовуваних пристроїв великої ємності для зберігання даних експерименту; реалізує зв’язки з маршрутизатором сегмента для доступу в інші мережі.

ЛСК з крейтом КАМАК виконують попередню обробку експериментальної інформації та записують її на сітьовий диск, після чого вона стає доступною з будь-якого місця локальної мережі. Прикладне програмне забезпечення доповнено резидентною програмою “Telnet demon” та програмою підтримки сітьової файлової системи (NFS).

Прикладне програмне забезпечення комп’ютерів, розміщених на пульті оператора та на робочих місцях експериментаторів, дозволяє періодично зчитувати дані, отримані з файлового сервера, і виконує їх візуалізацію. Програмне забезпечення функціонує під керуванням ОС MS DOS чи Windows.

Кількість методик, що використовуються в експерименті, може бути змінено (приєднано нові методики, змінено структуру діючих) завдяки передбаченому гнучкому

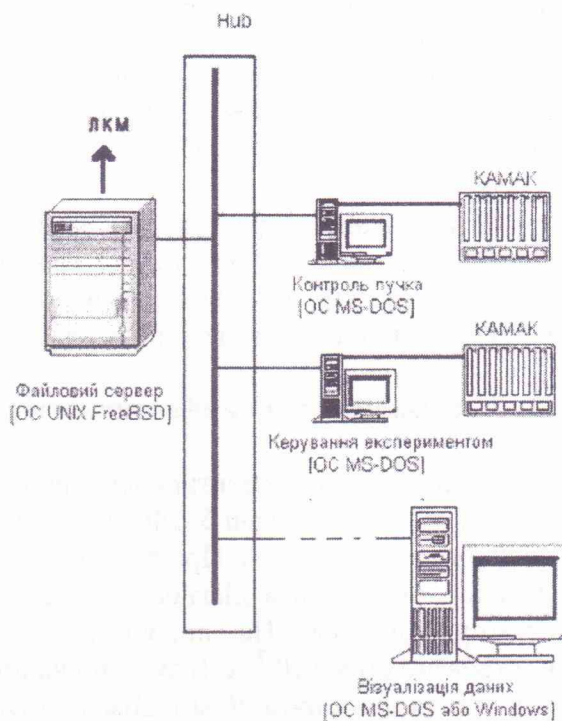


Рис. 2. Схема взаємодії базових елементів мережі керування експериментом.

підключенню кількості незалежних обчислювальних процесорів, які забезпечують методику проведення експерименту.

Обмін інформацією вимірювальних систем у мережі засновано на використанні технології “клієнт - сервер” або “клієнт - клієнт” у середовищі сітьової файлової системи. Це середовище дозволяє групі комп’ютерів мати прозорий доступ до загальних інформаційних ресурсів.

Розроблений підхід до реалізації досліджень на прискорювачі У-240 дає змогу застосовувати нові інформаційні технології, легко переналагоджувати автоматизовані системи конкретних методик, розширювати їх обчислювальні можливості, підключати до них нові вузли, проводити контроль над вимірюванням у будь-якому місці мережі інституту.

6. Випробування ефективності роботи експериментального комплексу

Випробування ефективності роботи створеного експериментального комплексу здійснено на прискорювачі У-240. З циклотрона було виведено пучок іонів водню з енергією 35 МеВ та струмом 10^{-5} А. При транспортуванні пучка іонів в експериментальне приміщення № 2 використовувалися діагностичні та колімуючі пристрої, розташовані в іонопроводі в лінзовому коридорі. На пробнику “Екран”, розташованому на вході в бокс, було зареєстровано струм 10^{-7} А. Візуально на пробнику Е1 при надходженні пучка спостерігалася кругла пляма діаметром 20 мм. Діагностика пучка на вході в камеру розсіяння, виконана за допомогою пробника Е2, показала, що інтенсивність та розміри пучка майже не змінилися. Пучок іонів після колімації спрямовувався на тонку дейтерієву мішень, що знаходилася в центрі камери розсіяння. Продукти ядерних реакцій реєструвалися сцинтиляційним детектором, струм – циліндром Фарадея, з’єднаним з інтегратором струму. В експерименті випробовувалася методика накопичення інклюзивних спектрів.

Проведені дослідження показали, що виведений з прискорювача пучок іонів придатний для проведення досліджень, а системи експериментального комплексу працюють ефективно.

7. Заплановані дослідження

Найбільш відпрацьованими режимами роботи У-240 є режими прискорення іонів водню, дейтерію та гелію. Ці режими легко відтворюються, тому на пучках цих іонів доцільно почати дослідження. З метою отримання нової інформації щодо властивостей ядер, динаміки малонуклонних систем, розподілу густини матерії в ядрах, поділу ядер на базі модернізованого експериментального комплексу планується виконати фундаментальні дослідження:

продовжити експериментальні дослідження три- й чотиричастинкових каналів реакції $d + d(^3\text{H}, ^3\text{He})$ та $\alpha + ^3\text{H}(d)$. Указані реакції є досить інформативними завдяки великій кількості відкритих каналів. У той же час вони є маловивченими з методичних причин. Ядерні реакції $d + ^3\text{H} (^3\text{He})$ та $\alpha + ^3\text{H} (^3\text{He})$ відкривають можливості для досліджень екзотичних утворень: $2n$, $3n$, $4n$, $^4\text{H}^*$, $^5\text{H}^*$, $^6\text{He}^*$ тощо. На даному етапі актуальними задачами є встановлення механізмів таких реакцій та перевірка теоретичних підходів. У реакціях $d + d$, $d + ^3\text{H} (^3\text{He})$ імовірними є процеси розщеплення як налітаючої частинки (d), так і ядра мішені (d , ^3H , ^3He). Ці дослідження будуть продовжені на розділених ізотопах різних елементів з метою отримання нової інформації про розподіл густини матерії в ядрах;

експериментально дослідити масові розподіли уламків поділу ядер ^{238}U протонами та α -частинками в широкому інтервалі енергій з метою вивчення особливостей утворення та розпаду ядер, що діляться.

Актуальність вищезазначених напрямків підтверджується періодичною появою в літературі нових робіт.

**МОДЕРНИЗИРОВАННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ НА УСКОРИТЕЛЕ У-240**

**В. И. Гранцев, В. А. Грашилин, Ю. А. Дей, М. И. Доронин, К. К. Кисурин, А. Н. Ковалев,
В. И. Копачев, И. А. Мазный, О. М. Мофа, С. Е. Омельчук, Г. П. Палкин, Б. А. Руденко,
Л. С. Салтыков, В. Г. Савчук, В. С. Семенов, Л. И. Слюсаренко, Б. Г. Стружко, В. А. Шитюк**

Описана структура и элементы модернизированного экспериментального комплекса для исследования ядерных реакций на ускорителе У-240. Комплекс позволяет осуществлять постановку разных типов фундаментальных исследований и решать практические задачи. При создании экспериментального комплекса использовались современные информационные технологии, позволяющие легко перестраивать автоматизированные системы конкретных методик и расширять их вычислительные возможности, подключая к ним новые узлы.

**MODIFIED EXPERIMENTAL COMPLEX FOR INVESTIGATION OF
NUCLEAR REACTIONS AT THE U-240 ACCELERATOR**

**V. I. Grantsev, V. O. Grashylin, Yu. O. Dey, M. I. Doronin, K. K. Kisurin, O. M. Kovalev,
V. I. Kopachev, I. O. Mazny, O. M. Mofa, S. E. Omelchuk, G. P. Palkin, B. A. Rudenko,
L. S. Saltykov, V. G. Savchuk, V. S. Semenov, L. I. Slyusarenko, B. G. Struzhko, V. A. Shytyuk**

The structure and elements of the experimental complex for investigation of nuclear reactions at the U-240 accelerator are described. The complex is designed for carrying out various fundamental studies as well as solving applied problems. Modern informational technologies used in the experimental complex allow easy rebuilding of computer-based systems of experimental technique, expand computational capabilities and add new elements.

Надійшла до редакції 26.03.04,
після доопрацювання – 06.05.04.