

І. П. Дряпаченко¹, В. Є. Ковтун², Е. М. Можжухін¹, В. В. Осташко¹,
Ю. М. Павленко¹, О. І. Рундель¹, А. Ф. Шаров¹

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ

² Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна, Харків

ОБНОВЛЕННЯ МЕТОДИК ВИМІРЮВАНЬ НА ПУЧКУ ТАНДЕМ-ГЕНЕРАТОРА ЕГП-10К З ВИКОРИСТАННЯМ ЦИФРОВОЇ ТЕХНІКИ

Протягом останніх 10 років на електростатичному перезарядному прискорювачі ЕГП-10К ІЯД НАН України з використанням виведених пучків іонів водню (протонів та дейтронів) виконано ряд фундаментальних та прикладних досліджень. Останнім часом реалізується програма оптимізації характеристик прискорювача, перш за все основних – енергії та інтенсивності виведеного пучка. Одночасно створено умови, які відкривають нові можливості як для транспортування та використання пучка прискорювача завдяки створенню додаткових ділянок іонопроводу та реакційних камер, так і для вимірювань і обробки експериментальних даних, зокрема у відновленому вимірювальному центрі попереднього однокаскадного прискорювача ЕГ-5. У даній роботі наведено результати модернізації інфраструктури експериментальних досліджень на пучках прискорювача ЕГП-10К з використанням новітніх пристроїв та сучасної цифрової техніки для діагностики пучків, реєстрації продуктів реакцій та візуалізації отриманих даних.

Ключові слова: тандем-генератор, пучки іонів водню, діагностика пучків заряджених частинок, візуалізація просторових розподілів пучків, багатопараметричні вимірювання, аналіз експериментальних даних, віддалений контроль вимірювань.

Вступ

На електростатичному перезарядному прискорювачі ЕГП-10К ІЯД НАН України (тандем-генераторі) з моменту його запуску були досягнуті близькі до проектних параметри виведеного пучка іонів ізотопів водню (протонів та дейтронів): енергія частинок – до 8 МеВ (за проектом 10 МеВ), виведений струм – до кількох мікроампер. Були створені умови для проведення фундаментальних і прикладних досліджень. Зокрема, досліджувались процеси пружного й непружного розсіяння в області підбар'єрних енергій, реакції кулонівського розщеплення дейтронів (див., наприклад, [1 - 6]), реакції зриву нейтрона тощо. Експериментальні дані отримувались із використанням універсальної багатоканальної установки, що дає змогу реєструвати інклюзивні та ексклюзивні спектри різноманітних продуктів реакцій (заряджених частинок, нейтронів, γ -квантів) за допомогою комп'ютеризованої методики накопичення, сортування та запису багатопараметричної статистичної інформації. Принципи побудови вказаної методики викладено в [7].

Можливості використання тандем-генератора для подальших фундаментальних і прикладних ядерно-фізичних досліджень далеко не вичерпані. Але за об'єктивних причин деградації матеріально-технічної бази та зростаючого кадрового дефіциту тандем-генератор до цього часу працює в режимі важкого відновлення необхідних параметрів виведеного пучка. Протягом останніх

декількох місяців вдалося досягти певних успіхів у подоланні негативних тенденцій і здійснити ряд заходів із модернізації систем забезпечення та супроводу ядерно-фізичних експериментів. У даній роботі наведено результати перших кроків цифрового осучаснення інфраструктури експериментальних досліджень на пучку тандем-генератора ЕГП-10К.

Основна частина

Системи візуалізації

Необхідність діагностики виведеного пучка прискорювача, у тому числі і візуальної, не потребує доказів. Її забезпечення вимагає певного доступу до пучка та відсутності впливу на його параметри під час проведення експериментів. У багатьох випадках діагностика пучків заряджених частинок здійснюється за допомогою різної форми та розмірів електричноізолюваних діафрагм, пелюсткових ламелей, пробників та інших елементів, в яких є отвір для проходження основної частини пучка. Для кількісного аналізу параметрів транспортування пучка порівнюються інтенсивності центральної і периферійної частин пучка, що поглинається колімуючим елементом діагностики, з'єднаним через вакуумний конектор із вимірювальним пристроєм. На тандем-генераторі в існуючій до цього часу системі діагностики візуальний контроль наявності, інтенсивності та положення пучка здійснювався за допомогою стаціонарної телевізійної чотирика-

нальної установки з виносними чорно-білими ТВ-камерами, установленими поблизу елементів діагностики (за прозорими вакуумованими вікнами), виготовлених із кварцу або з нанесеним на поверхню люмінофором.

Нещодавно систему візуальної діагностики пучка на прискорювачі ЕПП-10К було доповнено декількома сучасними цифровими WEB-камерами. Це повністю автономні Wi-Fi (або приєднані за допомоги стандартної лінії зв'язку) пристрої, які під оболонкою Windows легко інкорпуються після присвоєння мережної адреси в ту чи іншу мережу. Допоміжне програмне забезпечення дає змогу одночасно отримувати зображення та зв'язок для керування з будь-якою з 32 цифрових камер. Серед великої кількості функціональних можливостей та опцій налаштування камер насамперед слід відзначити можливість миттєвого, безперервного чи за заданим часовим алгоритмом запису зображення з монітора комп'ютера. Такі опції системи візуалізації є зручними для технологічної підтримки роботи оператора та супроводу прискорювача. Перевага в кольоровому зображенні має не тільки психологічне значення, а й забезпечує чітку ідентифікацію "серцевини" пучка та локальних неоднорідностей просторового розподілу пучка.

Інформація з усіх увімкнених відеокamer доступна з будь-якого комп'ютера в мережі ІЯД НАН України, на якому інстальоване відповідне програмне забезпечення (D-Link). Ця опція вже довела свою доцільність і необхідність в організації робіт на тандем-генераторі.

Системи накопичення та обробки експериментальних даних

До останнього часу в експериментах на тандем-генераторі для отримання та аналізу багатопараметричної спектроскопічної інформації стосовно процесів ядерної взаємодії використовувалась комп'ютеризована методика, що є подібною до викладеної в [7]. Обрана універсальна блок-схема електроніки дозволяє при мінімальних змінах логіки її запуску зчитувати та накопичувати інформацію про амплітудні розподіли, що відповідають інклюзивним спектрам продуктів взаємодії з восьми телескопів ΔE - E детекторів або амплітудні та часові розподіли кореляційних подій з восьми пар телескопів (ексклюзивні спектри двох чи трьох продуктів взаємодії). Ключовими елементами системи є контролер крейта САМАС ФК4410-1, плата зв'язку цього контролера із системним блоком керуючого комп'ютера та програмне забезпечення.

Керуюча системою накопичення програма працює під DOS-оболонкою з відповідними обмеженнями щодо сучасних інтерфейсних можливостей. Зокрема, слід відзначити практичну неможливість віддаленого керування експериментом та віддаленої візуалізації в режимі on-line різного типу накопичуваних гістограм, у тому числі й таких, що були б корисні оператору прискорювача для контролю проведення експерименту.

Певні нарікання викликає й DOS-програма off-line аналізу (сортування) накопиченої інформації з доволі громіздким алгоритмом запуску, неякісним інтерфейсом та відсутністю можливості швидкої зміни алгоритму сортування.

До перших кроків модернізації даної методики слід віднести вдосконалення алгоритмів аналізу багатопараметричної статистичної інформації в режимі off-line. Модифіковане з урахуванням можливостей сучасної комп'ютерної техніки програмне забезпечення під оболонкою операційної системи Windows дозволяє частково автоматизувати різні етапи обробки даних – від побудови спектрів до отримання значень диференціальних перерізів багаточастинкових реакцій. Розширено можливості багатопараметричного відбору кореляційних подій за різними критеріями та візуалізації отриманих даних, зокрема у вигляді двовимірних матриць великої розмірності (1024×1024), що суттєво поліпшує процедуру розділення внесків зареєстрованих частинок різної маси в ΔE - E спектрах (див., наприклад, [10]) та внесків різних каналів тричастинкових реакцій в кореляційних E_1 - E_2 спектрах. У розробленому раніше алгоритмі могли аналізуватись двовимірні матриці (спектри) з розмірністю, що не перевищує 128×128 каналів. Тому досягнення максимальної роздільної здатності, наприклад за масами зареєстрованих частинок, вимагало поетапної і трудомісткої „мозаїчної” процедури аналізу двовимірних матриць, що вимірювались із дискретністю 1024×1024 каналів. Це значно ускладнювало аналіз даних. Модифіковане програмне забезпечення було використано при дослідженні механізмів взаємодії дейтронів з ядрами різної маси при підбар'єрних енергіях [10, 11]. Із наведених на рис. 1 спектрів видно, що внески протонів і розсіяних дейтронів, які з метою зниження енергетичного порога реєстрації вимірювалися за допомогою тонкого (20 мкм) ΔE -детектора, можна розділити за умови аналізу двовимірних ΔE - E спектрів із розмірністю не меншою, ніж 512×512 каналів.

Важливим кроком модернізації систем вимірювань на тандем-генераторі було відновлення функціонування ще одного вимірювального

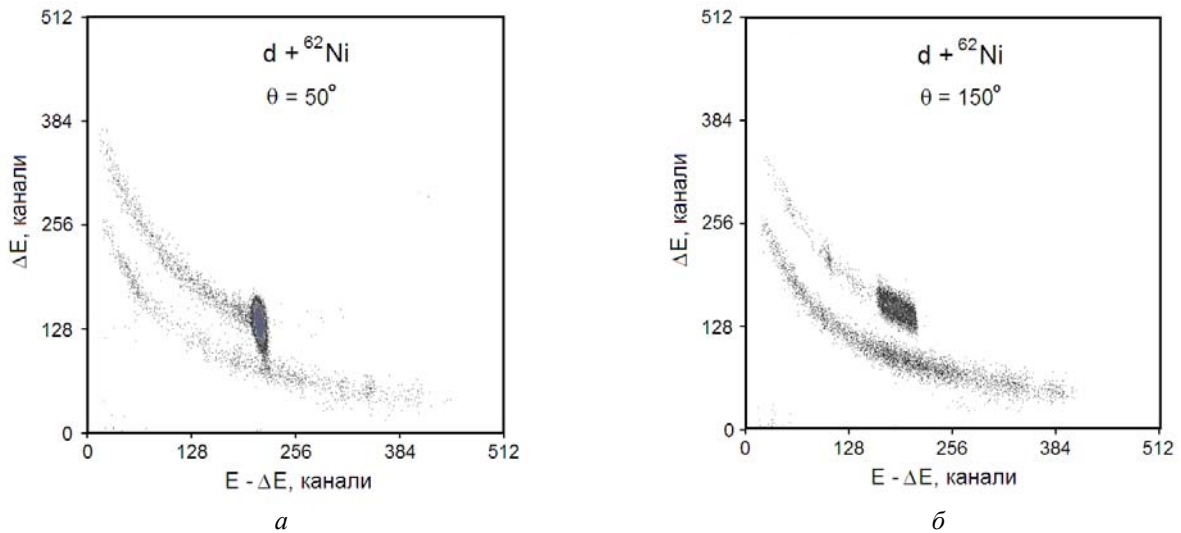


Рис. 1. Двовимірні ΔE - E -спектри продуктів взаємодії $d + {}^{62}\text{Ni}$, що вимірювалися на тандем-генераторі ЕГП-10К при енергії дейтронів $E_d = 5,16$ MeV під кутами $\theta_d = 50^\circ$ (а) і $\theta_d = 150^\circ$ (б).

Спектри отримано за допомогою модифікованого алгоритму аналізу багатопараметричних даних.

центру, який не використовувався з часу зупинки однокаскадного електростатичного генератора ЕГ-5 (з напругою на кондукторі 5 МВ й енергією пучка до 5 MeV) і його заміни на двокаскадний перезарядний прискорювач з тією ж напругою на кондукторі, але вдвічі більшою енергією пучка. Відновлено лінії зв'язку (сигнальні кабелі) установок в експериментальному боксі з апаратурою в приміщенні вимірювального центру, відремонтовано ряд електронних блоків, придбано і введено в дію сучасні цифрові блоки напруги зміщення для напівпровідникових детекторів тощо.

Розроблено та тестовано першу версію нової комп'ютеризованої системи накопичення даних під оболонкою операційної системи Windows (у

будь-якій з останніх версій). Основою системи є контролер крейта САМАС СС02 [12], який інкорпорується в поширену Windows-програму National Instruments LabVIEW. В якості результатів тестових вимірювань на рис. 2 наведено спектри пружного розсіяння протонів на поліетиленовій плівці (CH_2) для двох значень енергії протонного пучка. Спектри вимірювалися у новій реакційній камері, установленій в експериментальному боксі тандем-генератора, з використанням напівпровідникового детектора завтовшки 500 мкм. Після підсилення амплітудно-цифрове перетворення сигналів здійснювалось за допомогою електронного модуля АЦП, установленного в керованому контролером СС02 крейті САМАС.

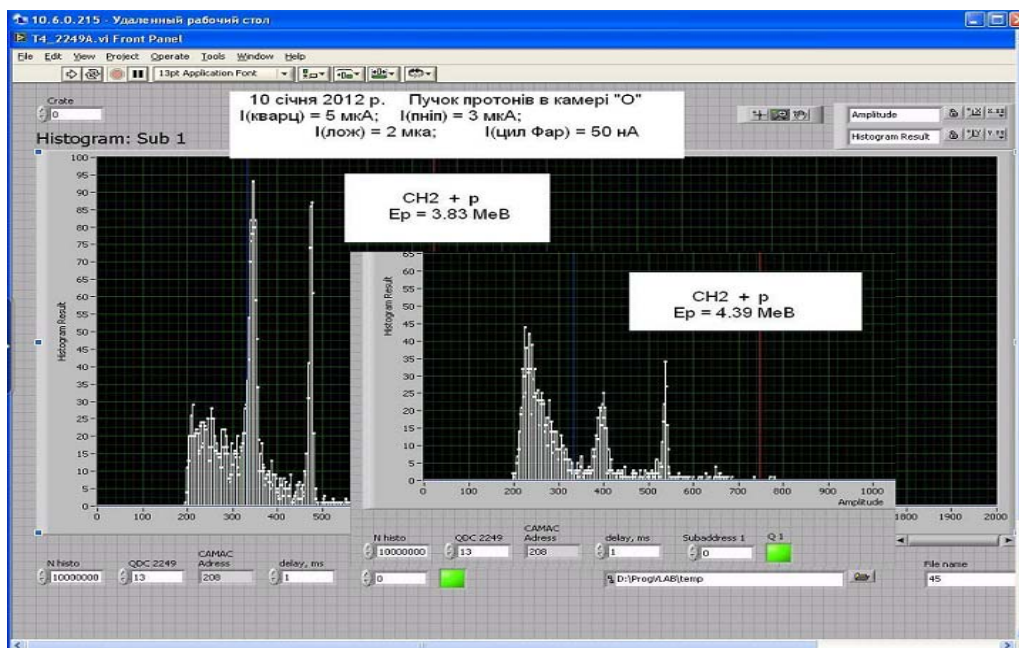


Рис. 2. Спектри заряджених частинок – продуктів бомбардування мішені CH_2 протонами з енергією $E_p = 3,83$ MeV (зліва) і $4,39$ MeV (справа).

Головна перевага нової системи – використання стандартної оболонки Windows з її потужними можливостями різноманітних зв'язків мережі, що забезпечує доступ до керування експериментом з будь-якого комп'ютера у відповідній мережі. Застосування контролера СС02 з програмою LabVIEW дає змогу здійснювати контроль за проведенням експерименту безпосередньо з пульта прискорювача, дистанційне керування вимірюваннями (запуск і зупинку, зміну параметрів налаштування вимірювальної системи тощо) та візуалізацію різних контрольних гістограм з робочого місця дослідника за умови використання стандартної опції “доступу до віддаленого робочого столу”.

Допоміжні засоби

Підвищенню ефективності експериментальних досліджень на прискорювачі ЕГП-10К сприяло також використання ряду новітніх цифрових пристроїв допоміжного призначення. Зокрема, зручним інструментом для синхронізації різних сигналів мікросекундного та наносекундного діапазонів став двоканальний цифровий осцилограф з пам'яттю і смугою пропускання 200 МГц, завдяки якому значно зросла швидкість налагодження електроніки для багатопараметричних

вимірювань. Слід відзначити, що цей сучасний прилад забезпечений засобами збереження та передачі осцилограм на сучасні носії (через USB-порт) чи безпосередньо на комп'ютер. Програмне забезпечення осцилографа дає можливість отримати на комп'ютері керуючий інтерфейс і, таким чином, можливість віддаленого керування процесом налагодження вимірювальної системи або контролю за ходом вимірювань, що обговорювалось вище.

При виготовленні різних мішеней, у тому числі й перезарядних мішеней (надтонких вуглецевих плівок) для тандем-генератора, стався в нагоді цифровий USB-мікроскоп із 200-кратним збільшенням, який приєднується до будь-якого комп'ютера через USB-порт, що забезпечує можливість використання багатьох опцій цього приладу для візуалізації об'єкта та збереження зображень (рис. 3). Контроль товщини та елементного складу перезарядних мішеней планується здійснювати за допомогою зворотного резерфордівського розсіяння протонного пучка прискорювача й нової комп'ютеризованої системи накопичення даних із використанням контролера крейта САМАС СС02 і операційної системи Windows.



Рис. 3. З'єднаний із комп'ютером цифровий мікроскоп (зліва). Зображення двох різних ділянок поверхні тонкої плівки CH_2 , що ілюструють можливості виявлення її дефектів (справа).

Точність і швидкість монтажних та юстувальних процедур на прискорювачі зросла завдяки використанню таких цифрових приладів як лазерна рулетка та штангенциркуль. Цифрова лазер-

на рулетка довела свою ефективність при юстуванні аналізуючого магніту, забезпечуючи контроль пересування цього багатотонного пристрою з міліметровою точністю.

Висновки

Таким чином, оновлено й розширено інфраструктуру для виконання фундаментальних і прикладних досліджень із використанням виведеного пучка електростатичного перезарядного прискорювача ЕГП-10К. Завдяки вжитим заходам відкрились нові можливості для транспортування та використання пучка прискорювача, а також для багатопараметричних вимірювань перерізів ядерних реакцій та обробки експериментальних даних.

Особливо важливим є перехід на цифрові технології візуалізації просторових параметрів пучка та його діагностики з багатоканальним контролем та доступом до системи діагностики в ме-

режі. Досягнута також можливість мережного доступу до прецизійного контролю якості пучка на мішені за енергетичним спектром продуктів ядерних реакцій, що вимірюються одним із детекторів, установленим у реакційній камері.

Дана робота частково виконувалась за фінансової підтримки в рамках цільової комплексної програми наукових досліджень НАН України «Науково-технічний супровід розвитку ядерної енергетики та застосування радіаційних технологій у галузях економіки».

Автори висловлюють подяку всім співробітникам тандем-генератора ЕГП-10К за сприяння у виконанні даної роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дряпаченко І.П., Можжухін Е.М. Розсіяння та реакції пучків протонів та дейтронів з енергією 1.6 - 7.3 МеВ кievського тандему ЕГП-10К // Ядерні та радіаційні технології. - 2004. - Т. 4, № 2. - С. 76.
2. Дряпаченко І.П., Кацубо Л.П., Козерацька Г.М., Можжухін Е.М. Прискорення іонів азоту в тандемі ЕГП-10К // Ядерні та радіаційні технології. - 2006. - Т. 6, № 3 - 4. - С. 21.
3. Павленко Ю.М., Теренецький К.О., Вербицький В.П. та ін. Пружне розсіяння дейтронів ядрами ^{58}Ni та ^{124}Sn при підбар'єрних енергіях // Щорічник-2007. - К.: Ін-т ядерних дослід., 2008. - С. 44.
4. Бондаренко В.Б., Дряпаченко І.П., Кацубо Л.П. та ін. Виготовлення та дослідження складу ізотопних безпідкладкових мішеней підвищеної чистоти та радіаційної стійкості для прецизійних ядерно-фізичних досліджень // Ядерна фізика та енергетика. - 2007. - № 1(19). - С. 145.
5. Dryarachenko I., Mozhzhukhin E., Salo V., Voronov O. Accelerator Beam Method for Fast Neutron Scintillation Tests // LUMDETR 2009 (Krakow, Poland, 12 - 17 July 2009): Book of Abstracts. - P. 307.
6. Павленко Ю.М., Теренецький К.О., Вербицький В.П. та ін. Розщеплення дейтронів ядрами ^{58}Ni та ^{208}Pb при підбар'єрних енергіях $E_d=7,3$ МеВ // VIII конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (Харків, 22 - 26 лютого 2010 р.).
7. Павленко Ю.М., Кива В.О., Коломісць І.М. та ін. Методика багатопараметричних кореляційних вимірювань для досліджень ядерних реакцій // Зб. наук. праць Ін-ту ядерних дослід. - 2005. - № 2 (15). - С. 151.
8. Павленко Ю.М., Теренецький К.О., Вербицький В.П. та ін. Пружне розсіяння дейтронів ядрами ^{58}Ni та ^{124}Sn при підбар'єрних енергіях // Щорічник-2007. - К.: Ін-т ядерних дослід., 2008. - С. 44.
9. Павленко Ю.М., Теренецький К.О., Вербицький В.П. та ін. Пружне розсіяння та розщеплення дейтронів ядрами ^{58}Ni та ^{124}Sn при підбар'єрних енергіях // VI конференція з фізики високих енергій, ядерної фізики та прискорювачів (Харків, 25 - 29 лютого 2008 р.).
10. Pavlenko Yu.M., Terenetsky K.O., Verbitsky V.P. et al. Deuterons interaction with nuclei ^{208}Pb at sub-barrier energies // Ядерна фізика та енергетика. - 2010. - Т. 11, № 4. - С. 400.
11. Павленко Ю.М., Теренецький К.О., Вербицький В.П. та др. Подбар'єрное взаимодействие дейтронов с ядрами $^{58,62}\text{Ni}$ // 61 Междунар. конф. по проблемам ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра «Ядро-2011» (Саров, Россия 10 - 14 окт. 2011 г.) - С. 79 (принято в печать в Изв. РАН, сер. физ.).
12. Лященко В.Н., Турчин А.А., Перминов А.И., Рева С.Н. Контроллер крейта СС02. Руководство пользователя / Лаборатория интеллектуальных электронных систем, кафедра электроники и управляющих систем Национального университета им. В. Н. Каразина. - Харьков, 2006. - 70 с.

И. П. Дряпаченко, В. Е. Ковтун, Э. Н. Можжухин, В. В. Осташко,
Ю. Н. Павленко, А. И. Рундель, А. Ф. Шаров

ОБНОВЛЕНИЕ МЕТОДИК ИЗМЕРЕНИЙ НА ПУЧКЕ ТАНДЕМ-ГЕНЕРАТОРА ЭГП-10К С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИФРОВОЙ ТЕХНИКИ

В течение последних 10 лет на электростатическом перезарядном ускорителе ЭГП-10К ИЯИ НАН Украины с использованием пучков протонов и дейтронов выполнено ряд фундаментальных и прикладных исследований. В настоящее время реализуется программа оптимизации характеристик ускорителя, в первую очередь основных - энергии и интенсивности выведенного пучка. Одновременно расширены возможности транспортировки и использования пучка ускорителя благодаря созданию дополнительных участков ионопровода и реакционных ка-

мер, а также измерений и обработки экспериментальных данных, в частности в восстановленном измерительном центре предыдущего однокаскадного ускорителя ЭГ-5. В данной работе приведены результаты модернизации инфраструктуры экспериментальных исследований на пучках ускорителя ЭГП-10К с использованием новейших устройств и современной цифровой техники для диагностики пучков, регистрации продуктов реакций и визуализации полученных данных.

Ключевые слова: тандем-генератор, пучки ионов водорода, диагностика пучков заряженных частиц, визуализация пространственных распределений пучков, многопараметрические измерения, анализ экспериментальных данных, удаленный контроль измерений.

**I. P. Dryapachenko, V. E. Kovtun, E. M. Mozhzhukhin, V. V. Ostashko,
Yu. M. Pavlenko, O. I. Rundel, A. F. Sharov**

**MEASUREMENT METHODS UPDATING FOR TANDEM-GENERATOR EGP-10K
WITH USING OF DIGITAL TECHNOLOGY**

During the last 10 years a number of fundamental and applied research at the electrostatic charge-exchange accelerator EGP-10K INR NAS with the proton and deuteron beams were performed. Currently, the program of optimization of the accelerator parameters, especially – the energy and intensity of the beam has being implemented. At the same time the possibilities of the transport and use of the accelerator beam through the creation of additional sections of beam tube and reaction chambers, as well as the possibilities of the measurements and data processing particularly, in the reconstructed measuring center of the previous single-stage accelerator EG-5, were improved. This paper presents the results of modernization of infrastructure of the experimental studies with the beams of the accelerator EGP-10K using the latest equipment and modern digital technique for beam diagnostics, registration of the reaction products and visualization of the obtained data.

Keywords: tandem-generator, beams of hydrogen ions, diagnostics of charged particles beams, visualization of beam spatial distributions, multi-parameters measurements, experimental data analysis, remote control of measurements.

Надійшла 09.02.2012

Received 09.02.2012