

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОГО СПЕКТРУ ПОТОКУ НЕЙТРОНІВ ІЗ КОНВЕРТОРІВ “ГАММА-КВАНТ-ФОТОНЕЙТРОН”

М.В. Стець, Д.І. Сікора, М.В. Гошовський, Г.Ф. Пітченко

Інститут електронної фізики Національної академії наук України,
88016, м. Ужгород, вул. Університетська, 21

Здійснена порівняльна оцінка енергетичної залежності “жорсткості” інтегрального енергетичного спектру (відношення $(n\gamma) / (n\mu)$ – та $(n\mu) / (n\mu - \text{компонент потоку нейтронів})$ нейтронів для конверторів “ γ -квант-фотонейтрон” модульного типу (матеріали конверторів: D_2O , Be, Ti, Fe, Zn, Se, Mo, Cd, In, Sb, Te, I, W, Hg, Pb. Експеримент здійснено для енергій прискорених електронів 14,71; 17,51; 18,21; 19, 41; 23,92 MeV мікротрона М-30. Для визначення активаційних інтегралів $(n\gamma)$ та $(n\mu) - \text{компонент потоку нейтронів}$ використано активаційні детектори Al та Si.

Проблематика. Одним із перспективних та необхідних напрямків розробок по вдосконаленню радіаційних та активаційних методів на основі первинного та вторинних випромінювань, і мікротрону, є роботизація, під якою розуміємо максимально допустиму автоматизацію технологічних операцій в умовах дії високоенергетичного випромінювання. Це передбачає, в свою чергу, жорстку стандартизацію і регламентацію всіх технологічних засобів і способів [1]. В багатьох задачах основними вузлами експериментальних опромінювальних установок є фотонейтронні конвертори – вузли, в яких відбувається ядерне перетворення-конвертація високоенергетичних гамма-квантів гальмівного випромінювання у фотонейтрони, які втрачають частину своєї енергії та імпульсу внаслідок взаємодії з матеріалом конвертора. Гальмівне випромінювання, в свою чергу, утворюється в матеріалі гальмівної мішені-конвертора прискорених електронів у гальмівні гамма-кванти. Сюди слід додати, що в процесі прискорення частина електронів втрачається (злітає з орбіт прискорення в середині камери мікротрона), створюючи фон мікротрона, в якому є і нейтронна компонента. Таким чином, з точки зору розробника таких установок, та дослідника, котрий ці

установки експлуатує, радіаційні поля, в котрих розміщаються досліджувані об’єкти, є досить складними.

Типовим виходом із таких експериментальних колізій є дослідження розподілів полів (наприклад розподілів потоків нейтронів) в кожному конкретному випадку. Практика засвідчує, що такі міри є недостатніми, бо не враховують всіх чинників, які діють в процесах радіаційних взаємодій, і є джерелами систематичних похибок.

Вказана проблематика є типовою в усіх ядерних установках, що зумовило, в свою чергу, розробку методів отримання їх інтегральних характеристик - характеристик, які дають оцінку таких установок в цілому [5, 6]. Підхід до стандартизації ядерно – фізичних експериментів для установок типу мікротрону, та відповідні експерименти розглянуто в [2-4]. Завважимо, що конкретизація змісту та об’єму таких досліджень на прискорювачі, де відбуваються (практично одночасно, і в одному приміщенні), процеси прискорення електронів, їх конвертація в гальмівні гамма-кванти, подальша їх конвертація в разі потреби, в нейтрони, є окремою, самостійною, та достатньо складною і тривалою задачею. Так, зокрема, дослідження інтегральних характеристик фотонейтронних конверторів включає в себе: вибір конкретної та технологічної

конструкції конверторів; вибір геометрії опромінення; вибір координат контрольних точок, площин, об'ємів; вибір вимірюваних (контрольних) параметрів; оцінка потоків нейтронів, зокрема: теплової (n, γ) – компоненти повного спектру нейтронів; резонансної ($n\gamma$) – компоненти повного спектру нейтронів; швидкої (np) – компоненти повного спектру нейтронів. Вибір контрольних точок, площин, об'ємів визначається типовими формами та розмірами досліджуваних зразків. Вибір контрольних параметрів визначається типовими аналітичними потребами задач та можливостями прискорювача, та вимірювального обладнання. Реалізований нами підхід до вибору, не в останню чергу, визначався потребами та можливостями активаційних методик, котрі виконуються на мікротроні, однак є типовим і для інших прискорювачів, та інших радіаційно-фізичних і радіаційно-хімічних задач.

Тут ми приводимо дані для порівняльної оцінки енергетичної залежності відношення активаційних інтегралів (np) / ($n\gamma$)– та (np) / (np) – компонент потоку нейтронів) із конверторів “ γ -квант-фотонейтрон” модульного типу (матеріали конверторів: D_2O , Be, Ti, Fe, Zn, Se, Mo, Cd, In, Sb, Te, I, W, Hg, Pb), та нейтронного фону мікротрону. Таке відношення прийнято називати “жорсткістю” енергетичного інтегрального спектра, позаяк є відношенням більш енергетичної компоненти енергетичного спектру, до менш енергетичної. Для оцінки “жорсткості” були визначені відношення - П3/П1 та П4/П3, де:

П1 – активаційний інтеграл: Al 27 ($n\gamma$) Al 28 (реакція на теплових та резонансних нейтронах; переріз реакції – 0,16 барн; резонансний інтеграл – 0,18 барн; енергія основного резонансу - 5800 eV); П3 - активаційний інтеграл: Al 27 (np) Al 28 (реакція на швидких нейтронах; поріг реакції – 1,83 MeV; переріз реакції – 74 мбарн (для нейтронів з енергією 14 MeV); П4 - активаційний інтеграл: Si 28 (np) Al 28 (реакція на швидких нейтронах; поріг реакції – 3,86 MeV; переріз реакції –

260 мбарн (для нейтронів з енергією 14 MeV).

Експеримент. Експерименти по визначенню енергетичних залежностей активаційних інтегралів потоків нейтронів та їх відношень, із конверторів виконувались на пучку гальмівних гамма – квантів (гальмівна мішень – тантал товщиною 1,5 мм) для енергій прискорених електронів E_e 14,71; 17,51; 18,21; 19,41; 23,92 MeV. Речовина конверторів розміщувалась в сталевих модулях розміром $3 \times 3 \times 3$ см³. Така модульна конструкція дозволяє стандартизувати упаковку конверторів, їх форму, розміри а також вимірювати геометрію і масу конвертора в певних одиницях l, d, h, де l – кількість модулів в довжину, d – кількість модулів в ширину, h – кількість модулів в висоту. Вимірювання активаційних інтегралів виконано для різних форм (мас) конверторів: $1 \times 1 \times 1$, $3 \times 1 \times 1$, $3 \times 3 \times 3$, та деяких інших. В цій роботі ми приводимо дані для форми $3 \times 1 \times 1$. Таким чином, отримані значення активаційних інтегралів є нормованими по формі, об'єму, та їх орієнтації по відношенню до осі пучка прискорених електронів.

Детальніше методика визначення активаційних інтегралів описана в [2-4].

Аналіз отриманих даних. Висновки.

Значення відношень нормованих на 1мкА активаційних інтегралів (рис.1-рис.16) приведено у систематизованому вигляді – у вигляді діаграм Excel 2002, на яких вказана апроксимація отриманих енергетичних залежностей – як лінійних (приведено рівняння), так і нелінійних (для поліномів 2, і більше, порядків; рівняння не приведено), на яких: y – це значення П3/П1 та П4/П3, відповідно; x – значення енергії прискорених електронів E_e (MeV). Вибір апроксимаційної залежності визначався максимізацією значення рівня апроксимації R^2 . Таке представлення є зручним для візуального порівняння. і дозволяє зробити певні висновки, зокрема: слабе монотонне зростання П3/П1 із зростанням енергії E_e ; досягнення певного насичення для значень П4/П3 (напр., Zn, Cd, Hg, Pb); це витікає із монотонного

зростання значень активаційних інтегралів, приведених в [4]; всі значення відношень знаходяться в приблизно однаковому інтервалі (0-4; 0-6; (для досягнутого значення похибок)); це – цікавий, і не зовсім очевидний факт, котрий не пояснюється монотонністю енергетичних залежностей активаційних інтегралів, а, в певній мірі, свідчить про відсутність якихось специфічних (в розглянутому діапазоні експериментальних умов) властивостей конструктивних матеріалів.

Зазначимо, що тут приведено значення активаційних інтегралів, не виправлених на фон (див рис.16). Розгляд масивів виправлених та віднормованих назначень, і їх взаємне порівняння - це цікава, але окрема тема; тут ми тільки відмітимо, що таке порівняння підтверджує необхідність отримання даних у максимально наближеному до реальних експериментальних умов вигляді, бо саме в таких умовах і здійснюється експеримент. Тут ми зауважимо, що якісно, та кількісно, узгодження із даними інших авторів (напр., [5,6]), є.

Значення отриманих відношень активаційних інтегралів не замінюють інтегральних спектрів, однак можуть бути використані для їх оцінки, та використані для їх відновлення (про проблеми відновлення спектрів нейтронів, та їх модельних розрахунків з фотонейтронних мішеней див. напр., [7,8]).

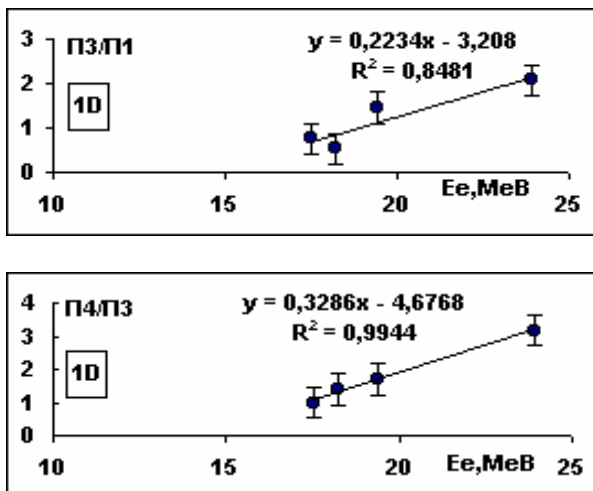


Рис.1. Енергетичні залежності для 1D (важка вода): вверху - для П3/П1[(np)/(nγ)]; внизу - для П4/П3[(np)/(np)].

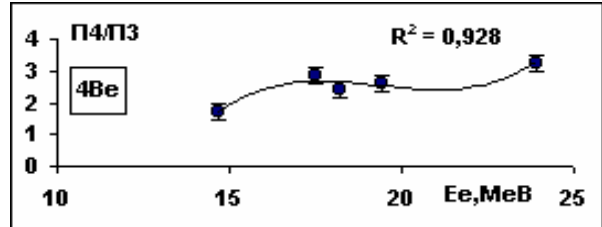
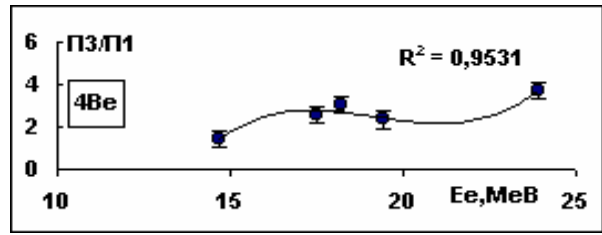


Рис.2. Енергетичні залежності для 4Be: вверху - для П3/П1[(np)/(nγ)]; внизу - для П4/П3[(np)/(np)].

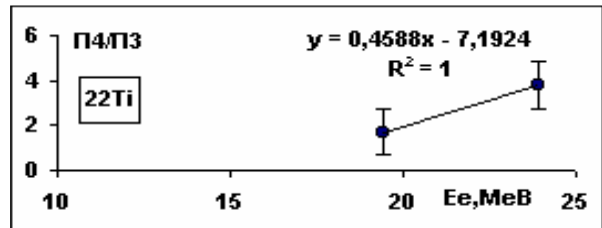
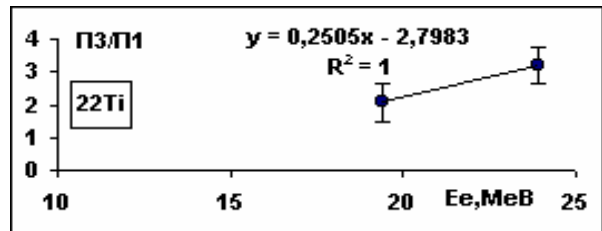


Рис.3. Енергетичні залежності для 22Ti: вверху - для П3/П1[(np)/(nγ)]; внизу - для П4/П3[(np)/(np)].

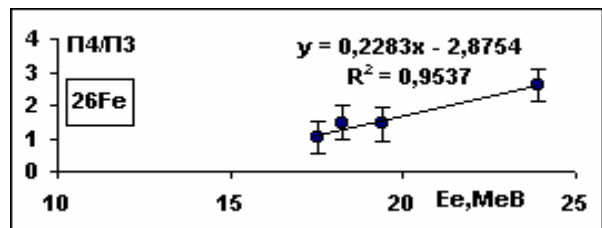
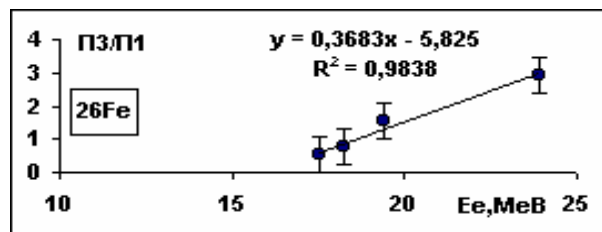


Рис.4. Енергетичні залежності для 26Fe (сталь): вверху - для П3/П1 [(np)/(nγ)]; внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

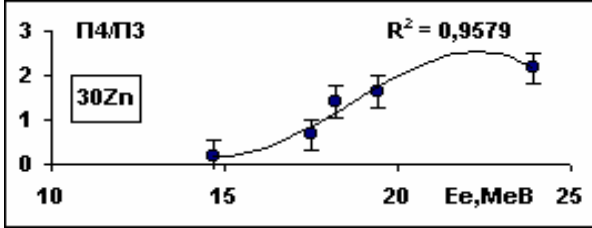
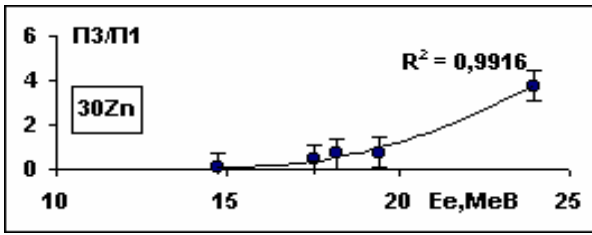


Рис.5. Енергетичні залежності для 30Zn:
вверху - для П3/П1 [(np)/(nγ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

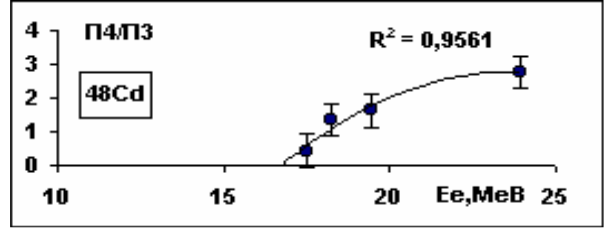
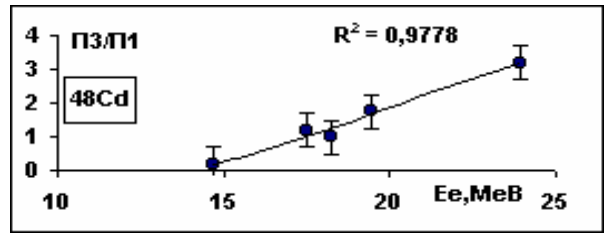


Рис.8. Енергетичні залежності для 48Cd:
вверху - для П3/П1 [(np)/(nγ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

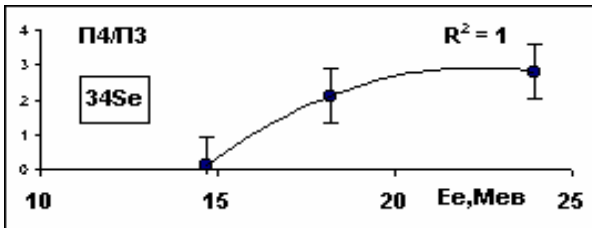
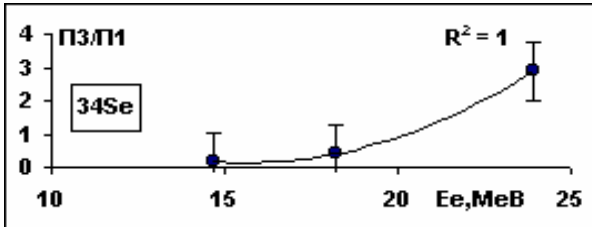


Рис.6. Енергетичні залежності для 34Se:
вверху - для П3/П1 [(np)/(nγ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

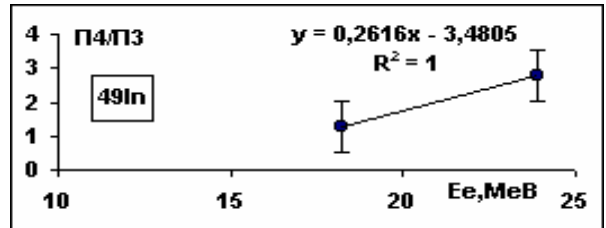
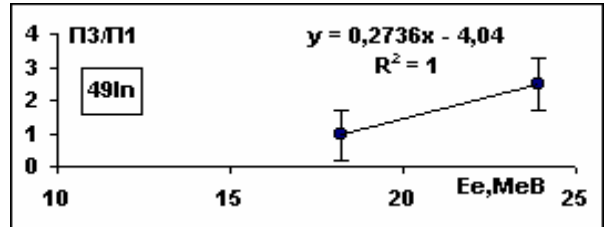


Рис.9. Енергетичні залежності для 49In:
вверху - для П3/П1 [(np)/(nγ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

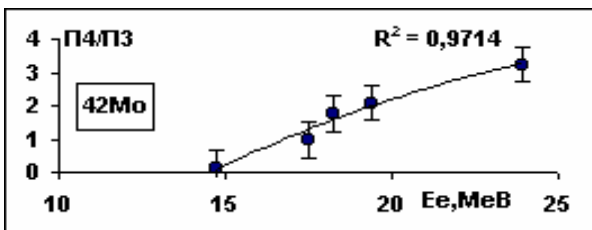
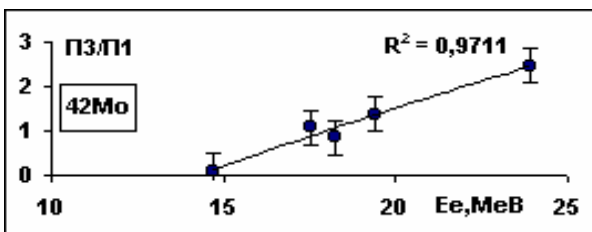


Рис.7. Енергетичні залежності для 42Mo:
вверху - для П3/П1 [(np)/(nγ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

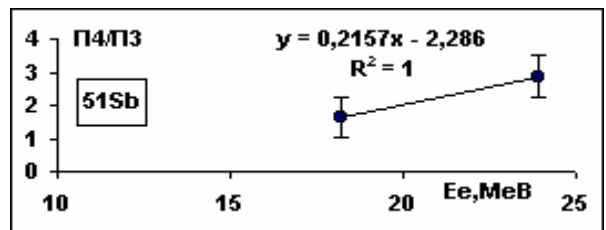
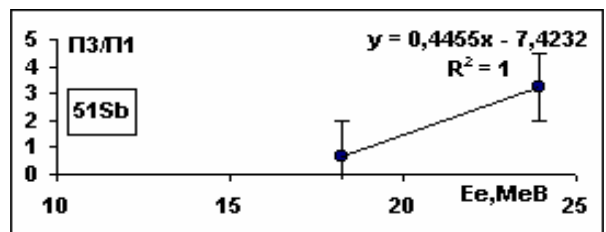


Рис.10. Енергетичні залежності для 51Sb:
вверху - для П3/П1 [(np)/(nγ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

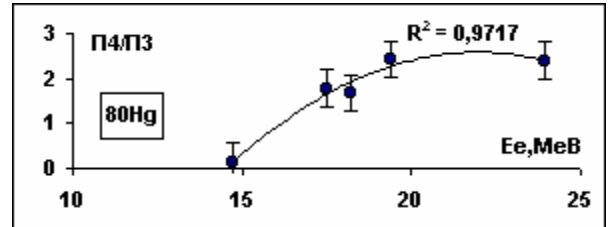
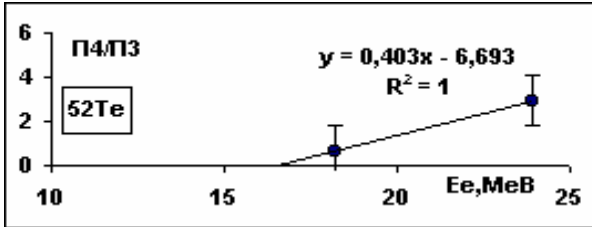
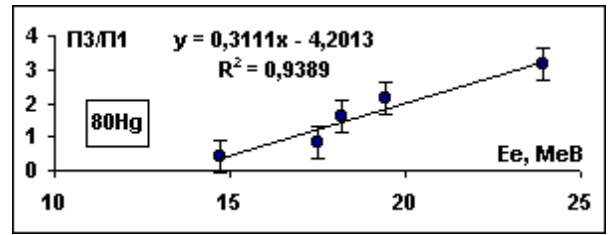
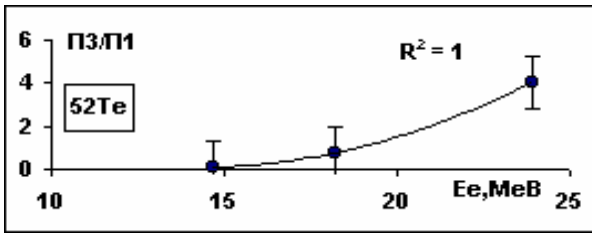


Рис.11. Енергетичні залежності для ^{52}Te :
вверху - для П3/П1 [(np)/(n γ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

Рис.14. Енергетичні залежності для ^{80}Hg :
вверху - для П3/П1 [(np)/(n γ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

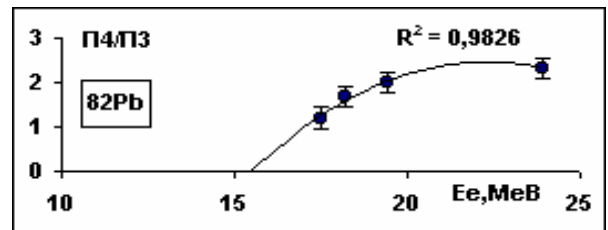
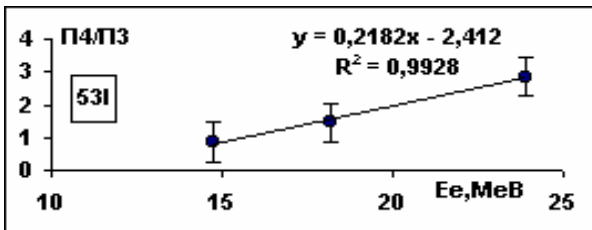
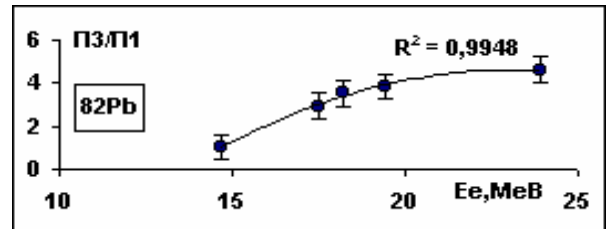
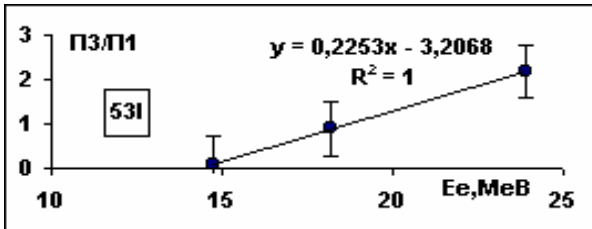


Рис.12. Енергетичні залежності для ^{53}I :
вверху - для П3/П1 [(np)/(n γ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

Рис.15. Енергетичні залежності для ^{82}Pb :
вверху - для П3/П1 [(np)/(n γ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

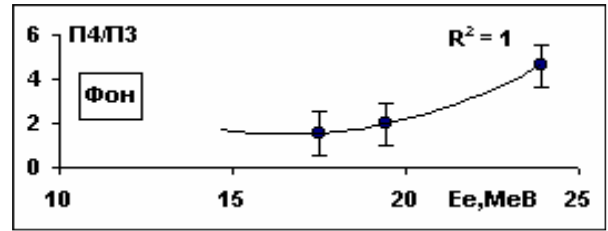
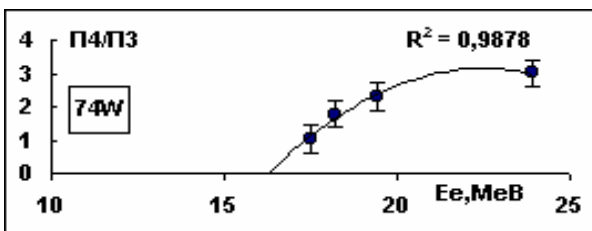
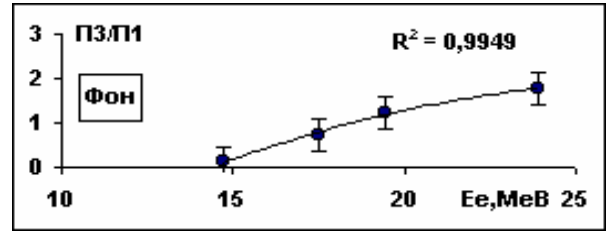
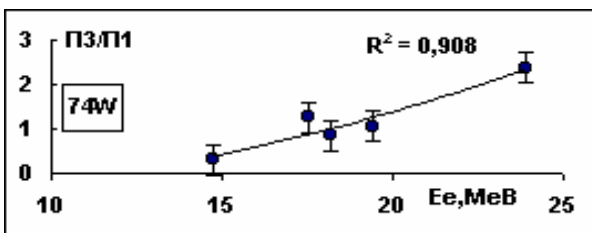


Рис.13. Енергетичні залежності для ^{74}W :
вверху - для П3/П1 [(np)/(n γ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

Рис.16. Енергетичні залежності для фону:
вверху - для П3/П1 [(np)/(n γ)];
внизу - для П4/П3 [(np)/(np)].

Література

1. Горячев И.В., Колеватов Ю.И. и др. Интегральные эксперименты в проблеме переноса ионизирующих излучений: Справочное руководство. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
2. Применение микротрона М-30 для изучения некоторых фотоядерных реакций области ЕІ-гигантского резонанса. Отчёт УжО ИЯИ АН УССР, № гос. регистр. 81044505, Ужгород, 1985, раздел 6.
3. Исследование процессов фото-возбуждения и распада ЕІ-гигантского резонанса атомных ядер. Отчёт №01.86005.9807 УжО ИЯИ АН УССР, Ужгород, 1989, С. 134-198.
4. Стець М.В., Сікора Д.І. Енергетичні залежності активаційних інтегралів ($n\gamma$)-та (np) – компонент потоку нейтронів із конверторів “квант-фотонейтрон” “в інтервалі енергій електронів 14-24 МеВ микротрону М-30 // Науковий вісник Ужгородського Університету. Сер. Фізика, 2005. - Вип.18. - С.47-56.
5. Ганжа А.П. Конверторы нейтронов электронных ускорителей // Деп-ВИНИТИ 1984. - 3 – 62 – 84.
6. Дробинин А.В и др. Фотонейтроны из толстых конверторов D_2O , Be и Pb при $E_{max}=15$ МеВ. Атомная энергия, т. 53, С. 398-399.
7. Исламгулов Р.Ф., Ларцев В.Д. Восстановление нейтронных спектров по активационным измерениям в виде N-сплайнов // Атомная энергия, 2008. - Т.104. - № 5. – С. 295-302.
8. Никифоров В.И., Уваров В.Л. Метод ускоренного моделирования генерации изотопов для фотоядерных технологий // Тезисы докладов 5 конф. по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям. – Харьков, 2007. – С. 56-57.

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE NEUTRON FLUENCE ENERGETIC SPECTRUM FROM THE “GAMMA-QUANT-PHOTONEUTRON” CONVERTORS

M.V. Stets, D.I. Sikora, M.V. Hoshovskij, G.F. Pitchenko

Institute of Electron Physics, Ukrainian National Academy of Sciences
21 Universitetska str., Uzhhorod, 88016, Ukraine

The integral spectrum “hardness” (relation $(np)/(n\gamma)$ - and $(np)/(np)$ – component of the neutron fluence) energetic dependence comparative evaluation for the modul type “gamma-quant-photon neutron” converters (D_2O , Be, Ti, Fe, Zn, Se, Mo, Cd, In, Sb, Te, I, W, Hg, Pb) is fulfilled. This experiment is realized in the microtron M -30 for the energy 14-24 MeV of the accelerated electrons. The Al- and Si- activation detectors for the activation integrals $(n\gamma)$ and (np) – components of the neutron fluence.