

ЕНЕРГЕТИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ АКТИВАЦІЙНИХ ІНТЕГРАЛІВ $(n\gamma)$ - ТА $(n\beta)$ - КОМПОНЕНТ ПОТОКУ НЕЙТРОНІВ ІЗ КОНВЕРТОРІВ “ γ -КВАНТ-ФОТОНЕЙТРОН” В ІНТЕРВАЛІ ЕНЕРГІЙ ЕЛЕКТРОНІВ 14-24 МеВ МІКРОТРОНУ М-30

М.В. Стець, Д.І. Сікора.

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

Приведено експериментальні дані по дослідженню конверторів “ γ -квант-фотонейтрон” модульного типу (матеріали конверторів: D_2O , Be, Fe, Zn, Se, Mo, Cd, In, Sb, Te, I, W, Hg, Pb; розміри одного модуля $3 \times 3 \times 3$ см), як джерела нейтронів для вирішення практичних задач активаційного аналізу на мікротроні М-30 ІЕФ НАНУ. Для визначення активаційних інтегралів $(n\gamma)$ - та $(n\beta)$ – компонент потоку нейтронів використано активаційні детектори Si (SiO_2 ; реакція $Si^{28}(n\beta)Al^{28}$) та Al (реакція $Al^{27}(n\gamma)Al^{28}$; реакція $Al^{27}(n\beta)Mg^{27}$), які були розташовані на відстані 10 см від осі конвертора та під кутом 90° до осі пучка гальмівних гамма-квантів. Здійснена оцінка енергетичної залежності “жорсткості” спектра нейтронів (відношення $(n\gamma)/(n\beta)$ – та $(n\beta)/(n\beta)$ компонент). Експеримент здійснено для енергій прискорених електронів 14,71; 17,51; 18,21; 19, 41; 23,93 МеВ

Проблематика

На даний час виконаний достатньо великий об’єм робіт по вивченню основних процесів, що відбуваються при взаємодії первинного випромінювання електронних прискорювачів – пучка прискорених електронів різних енергій – з речовиною. Тут можна вказати на ті напрямки досліджень, які мають безпосереднє відношення до такої предметної області, як активаційний аналіз (АА). Це, перш за все, роботи по дослідженню процесів конверсії “електрон – нейтрон”, “електрон – гальмівний квант”, “гальмівний квант – нейтрон”. Огляд робіт по напрямку, пов’язаному з вивченням процесів формування енергетичних спектрів фотонейтронів, приведений в [1-3]. Достатньо повну уяву про основні напрямки розвитку фотоядерних методів АА, в тому числі і методів, що використовують різні типи випромінювання, дає робота [1]. В цих роботах приведені і теоретичні

розрахунки в різних модельних і емпіричних припущеннях.

Одним із перспективних та необхідних напрямків розробок по вдосконаленню методів АА на базі мікротрону є роботизація АА, яка передбачає жорстку стандартизацію і регламентацію всіх технологічних засобів і способів. Стосовно етапів випромінювання, це означає стандартизацію як конструктивів випромінювальних вузлів, так і самих випромінювальних процедур. Не менш важливим є і стандартизоване представлення основних характеристик випромінювання що використовується, в тому числі і таких інтегральних параметрів, як потоки теплової, резонансної і швидкої компонент потоку фотонейтронів. Стандартизація ядерно – фізичних експериментів детально розглянута в [9]. Стандартизоване вимірювання і представлення інтегральних характеристик випромінювальних процедур і вузлів передбачає його подальшу реалізацію в

виді файлу даних. Природнім є використання відомої ядерно – фізичної експериментальної і розрахункової інформації.

Експериментальне дослідження способів управління потоками фотонейтронів в випромінювальних установках доцільно розділити на два етапи:

- дослідження інтегральних характеристик фотонейтронних конверторів;
- дослідження альбедних методів формування нейтронних потоків.

Дослідження інтегральних характеристик фотонейтронних конверторів включає в себе, зокрема:

- 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;
- оцінка “жорсткості” (вмісту більш енергетичної компоненти в повному спектрі нейтронів) потоку нейтронів ;
- стандартизована зміна інтегральних характеристик.

На величину, спектральний склад та просторовий розподіл потоків нейтронів одночасно діють декілька факторів: величина струму прискорених електронів, максимальна енергія $E_{\gamma\max}$ гальмівного випромінювання (котра визначається і рівна енергії E_e прискорених електронів), тип матеріалу (атомний номер Z), форма та маса конвертора, тощо. Зауважимо, що більш правильним є використання терміну “нейтрон”, оскільки в процесах формування потоків їх спектральний склад змінюється, в тому числі і за рахунок $(n2n), -(nn), - (n\gamma)$ – реакцій. З методичної точки зору дослідження

впливу цих факторів доцільно організувати наступним чином, як:

вимірювання потоків нейтронів і їх відношень (або інших величин з ними пов'язаних), як функцій від Z конвертора (E_e , форма конвертора = конст.);

вимірювання потоків нейтронів і їх відношень (або інших величин з ними пов'язаних), як функцій від E_e (Z конвертора, форма конвертора = конст.);

вимірювання потоків нейтронів і їх відношень (або інших величин з ними пов'язаних), як функцій від форми конвертора (E_e , Z конвертора = конст.),

для енергії прискорених електронів $E_e=10+24$ MeV.

Пропонований об'єм експериментальних досліджень досить великий. Частина отриманих даних приведена в [5-8].

Тут ми розглянемо експерименти по визначенню енергетичних залежностей активаційних інтегралів потоків нейтронів із конверторів для різних енергій прискорених електронів мікротрону М-30.

Вибір контрольних параметрів та схеми розрахунків

Для випадку гамма – спектрометричного супроводу дослідження (а саме ним ми будемо користуватися), спектр нейтронів $f(E, E_{MAX})$ знаходиться у виразі:

$$[f\sigma] = \int_{E_{op}}^{E_{max}} f(E, E_{max}) \cdot \sigma \cdot (E, E_{max}) \cdot dE = \Delta S \left(\frac{N_a}{M} \cdot c \cdot K \cdot \Theta \cdot n \cdot \varepsilon \frac{\Omega}{4\pi} \cdot \beta \cdot \Pi_K \right) \quad (1)$$

де:

$$\Pi_K = \frac{1}{\lambda} \cdot (1 - e^{-\lambda \cdot T_i}) \cdot e^{-\lambda T_b} \cdot (1 - e^{-\lambda T_c})$$

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}}$$

$$\Delta S = \sum_{i=l}^{i=n} N_i - \Phi;$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} - \text{стала розпаду};$$

$T_{1/2}$ – період напіврозпаду досліджуваного гамма – активного нукліду (ГАН);

T_i – тривалість опромінення;

T_D – тривалість охолодження;

T_C – тривалість виміру;

$\sigma(E)$ – переріз відповідної ядерної реакції;

ΔS – площа фотопіка;

Φ – площа під фотопіком,

n – квантовий вихід лінії з енергією E_γ ,

i залежить від дози D опромінення.

Для мікротрона (та інших прискорювачів електронів) $D = k \cdot I \cdot T_i$, де k – коефіцієнт пропорційності; I – струм прискорених електронів. Оскільки доза D в різних експериментальних циклах, як правило різна, виконується нормування експериментальних даних на певну нормовану дозу, наприклад на дозу $D_n = 1 \text{ мкА} \cdot T_i$. Тоді спектр $f_n = f \cdot D_n / D$ [12]. Підставивши вираз для f_n в (1), отримаємо:

$$[f_n \sigma] = \Delta S \left(\frac{N_a}{M} \cdot c \cdot K \cdot \Theta \cdot n \cdot \varepsilon \cdot \frac{\Omega}{4\pi} \cdot \beta \cdot P_K \right) * \frac{D_n}{D} \quad (2)$$

$f_n \sigma = P$ – активаційний інтеграл, котрий може бути визначений експерименталь-

но, i , як видно, залежить від значень f_n та перерізів σ . В нашому випадку визначались активаційні інтеграли:

P_1 – активаційний інтеграл із значенням σ ($n\gamma$) для реакції 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- ($n\gamma$)-компонента потоку нейтронів;

P_2 – активаційний інтеграл із значенням σ ($n\gamma$) для реакції Mn 55 ($n\gamma$) Mn 56 (реакція на теплових та резонансних нейтронах; переріз реакції – 14 барн; резонансний інтеграл – 14 барн; енергія основного резонансу – 337 eV- ($n\gamma$)-компонента потоку нейтронів;

(Прим. В даній роботі результати для активаційних інтегралів P_2 не приведені)

P_3 – активаційний інтеграл із значенням σ (np) для реакції Al 27 (np) Al 28 (реакція на швидких нейтронах; поріг

реакції – 1,83 MeV; переріз реакції – 74 мбарн (для нейтронів з енергією 14 MeV- (np)-компонента потоку нейтронів;

P_4 – активаційний інтеграл із значенням σ (np) для реакції Si 28 (np) Al 28 (реакція на швидких нейтронах; поріг реакції – 3,86 MeV; переріз реакції – 260 мбарн (для нейтронів з енергією 14 MeV- (np)-компонента потоку нейтронів [5].

Експеримент

Експерименти по визначенню енергетичних залежностей активаційних інтегралів потоків нейтронів 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; 23,93 MeV. В якості фотонейтронних конверторів використані D_2O , Be, Fe, Zn, Se, Mo, Cd, In, Sb, Te, I, W, Hg, Pb. Речовина конверторів розміщувалась в сталевих модулях розміром $3 \times 3 \times 3 \text{ см}^3$. Така модульна конструкція дозволяє стандартизувати як упаковку конверторів, їх форму, розміри, так і 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: $1 \times 1 \times 1, 3 \times 1 \times 1, 3 \times 3 \times 3$. В якості активаційних детекторів (АД) використовувались (див. попередній пункт) Al (реакція Al 27 ($n\gamma$) Al 28) – ($n\gamma$) – компонента потоку нейтронів, (активаційний інтеграл P_1); Al (реакція Al 27 (np) Mg 27 – (np) – компонента потоку нейтронів (активаційний інтеграл P_3); SiO_2 (реакція Si 28 (np) Al 28) – (np) – компонента потоку нейтронів (активаційний інтеграл P_4). АД розташувалися в плоскій касеті, що обертається на відстані 10 см від осі пучка гальмівних квантів, під кутом 90° до осі пучка. Цим задавалась контрольна площина вимірювання. Окремо вимірювався фон (нейтронний фон “прискорювач + гальмівна мішень”).

Вимірювання наведеної гамма – активності АД виконувались на GE (Li) – детекторі ДГДК – 45, та аналізаторі N TA – 512В. Для первинної обробки гамма – спектрів використовувалась мікро – ЕВМ ДЗ – 28. Для визначення $[f_n\sigma]$ використані лінії 1779 KeV (n=100%) Al 28 та лінія 843,76 KeV (n=71,5%) Mg27. Для визначення дози електронів Д використовувався монітор вторинної емісії електронів.

Аналіз експериментальних даних

Залежності активаційних інтегралів Π_1, Π_3, Π_4 потоків нейтронів від енергії прискорених електронів E_e приведені на рис. 1-4. Отримавши значення Π_1, Π_3, Π_4 , можна здійснити оцінку “жорсткості” потоку нейтронів. Енергетичні залежності відношень: Π_3/Π_1 (Al 27 (np)/ Al 27 (n γ)); Π_4/Π_3 (Si 28 (np)/Al 27 (np)); Π_4/Π_1 (Si 28(np)/Al 27 (n γ)), які можна інтерпретувати як величини, що характеризують “жорсткість” спектра нейтронів. як в області енергій швидких нейтронів (Π_4/Π_3), теплових і резонансних нейтронів (Π_1/Π_2), так і енергетичних відрізків (np) – та (n γ) – компонент повного спектру нейтронів (Π_3/Π_1), приведено в таблиці 1. Як і параметри $\Pi_1 \div \Pi_4$, так і їх відношення можуть бути використані в якості цільових функцій розробки методик АА.

Обмеження. При організації та проведенні експерименту і обробці експериментальних даних було допущено певні обмеження, метою яких було спрощення досить трудоемних процедур вимірів та обробки даних (без втрати якості). Це, зокрема.

1. Здійснено нормування на електронну дозу Д, тобто дозу, що відповідає струму 1 мкА. Це спрощення не міняє суті нормування, коли використовується нормування на одиницю експозиційної (Рентген) або поглиненої (Грей) дози. Зв'язок між експозиційною дозою (Рентген), струмом I та енергією E для мікротрона приведено в [11].

2. Не здійснено нормування значень активаційних інтегралів на кількість молів

речовини конвертора, оскільки акцент зроблено на форму (розміри $1 \times d \times xh$) конвертора. В колонці 3 таблиці 1 приведено значення N кількості молів в конверторах розмірами $1 \times 1 \times 1$.

3. Не врахована геометрія “контрольна площа - конвертор”. Для відстані R=10 см від осі конвертора до площини де знаходились АД, і значення діаметра АД $d=1$ см, величина відносного тілесного кута буде рівною $1,25 \times 10^{-3}$. Таким чином значення активаційних інтегралів будуть більшими у 800 разів; відповідно в стільки разів збільшиться значення потоків нейтронів (нейтрон/с). Ця оцінка справедлива для конвертора $1 \times 1 \times 1$. Для конверторів інших форм розрахунків відносних тілесних кутів є досить обтяжливим.

Похибки. Крім похибок, пов'язаних з наявністю нейтронного фону, вкажемо на інші джерела похибок експерименту: - неточність позиціонування контрольної площини з АД;

-поглинання гамма – квантів з опромінених АД при їх спектрометрії;

-неточність позиціонування АД на детекторі;

-неточність співосності “вісь пучка гальмівних квантів – вісь конвертора”;

-нестабільність струму живлення магнітного поля мікротрона;

-нестабільність струму прискорених електронів.

Суттєвим джерелом похибок являється статистична похибка, величина якої залежить від величини площі ΔS ППП, що являється аналітичним параметром в цих експериментах, і складає 30 – 50% для нижнього діапазону енергій E_e і невеликих мас конверторів. Ця обставина враховувалася шляхом повторних вимірювань. Разом з тим гладкість залежностей параметрів $\Pi_1 \div \Pi_4$ дозволяє оцінювати сумарну похибку в ≤ 30 % (за винятком деяких “вилітаючих” експериментальних точок), що є достатнім для дослідження більшості розглядуваних матеріалів конверторів, і енергій E_e .

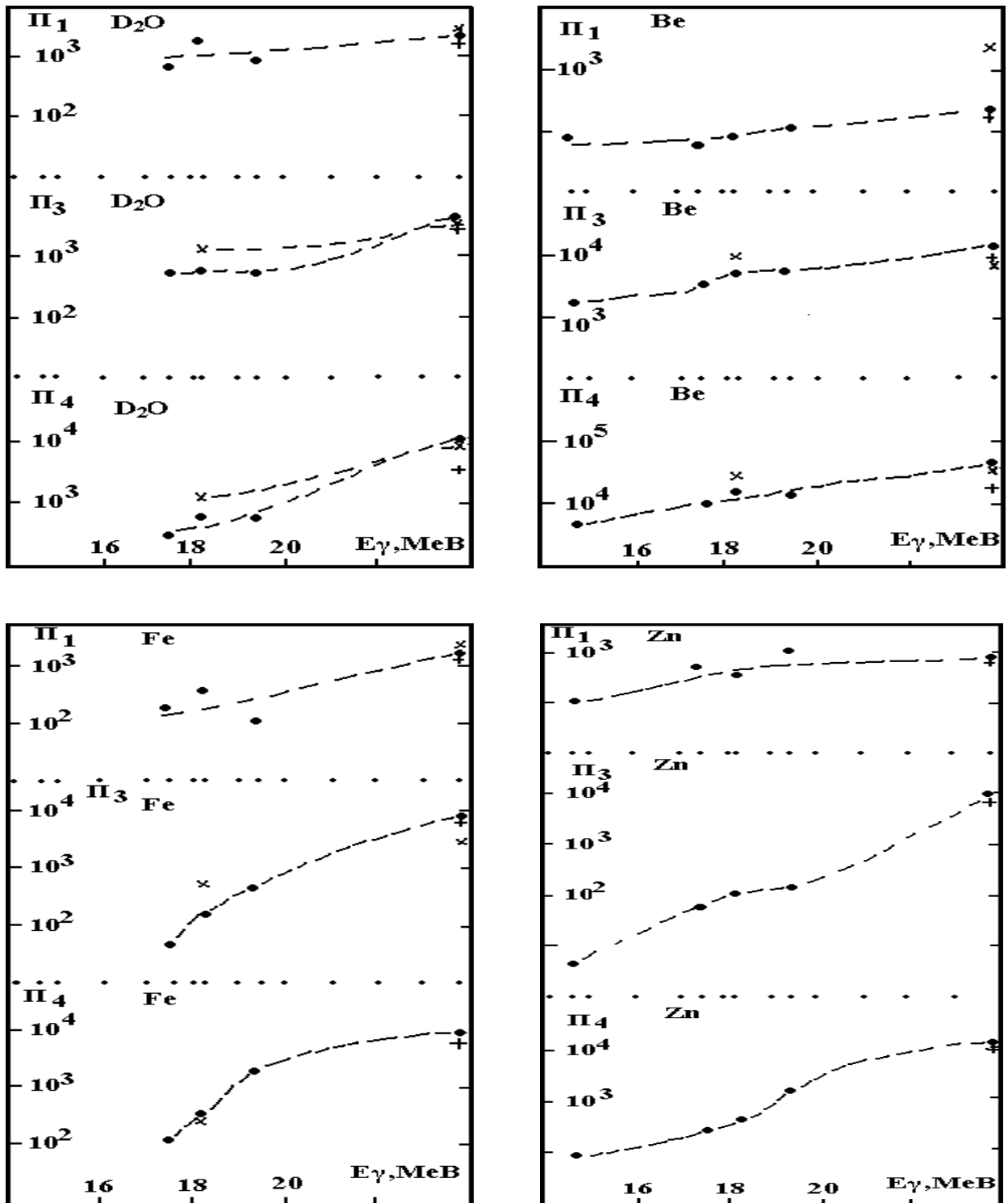


Рис 1. Енергетичні залежності активаційних інтегралів Π_1 (реакція Al 27 ($n\gamma$) Al 28); Π_3 (реакція Al 27 ($n\gamma$) Mg 27) Π_4 (реакція Si28 ($n\gamma$)Al 28) для D₂O, Be, Fe, Zn.

Позначення: ● – форма 3x1x1; + - форма 1x1x1; x – форма 3x3x3; штрихова лінія – можливий хід залежностей. Розмірність активаційного інтегралу Π – нейтр•барн/с•см²

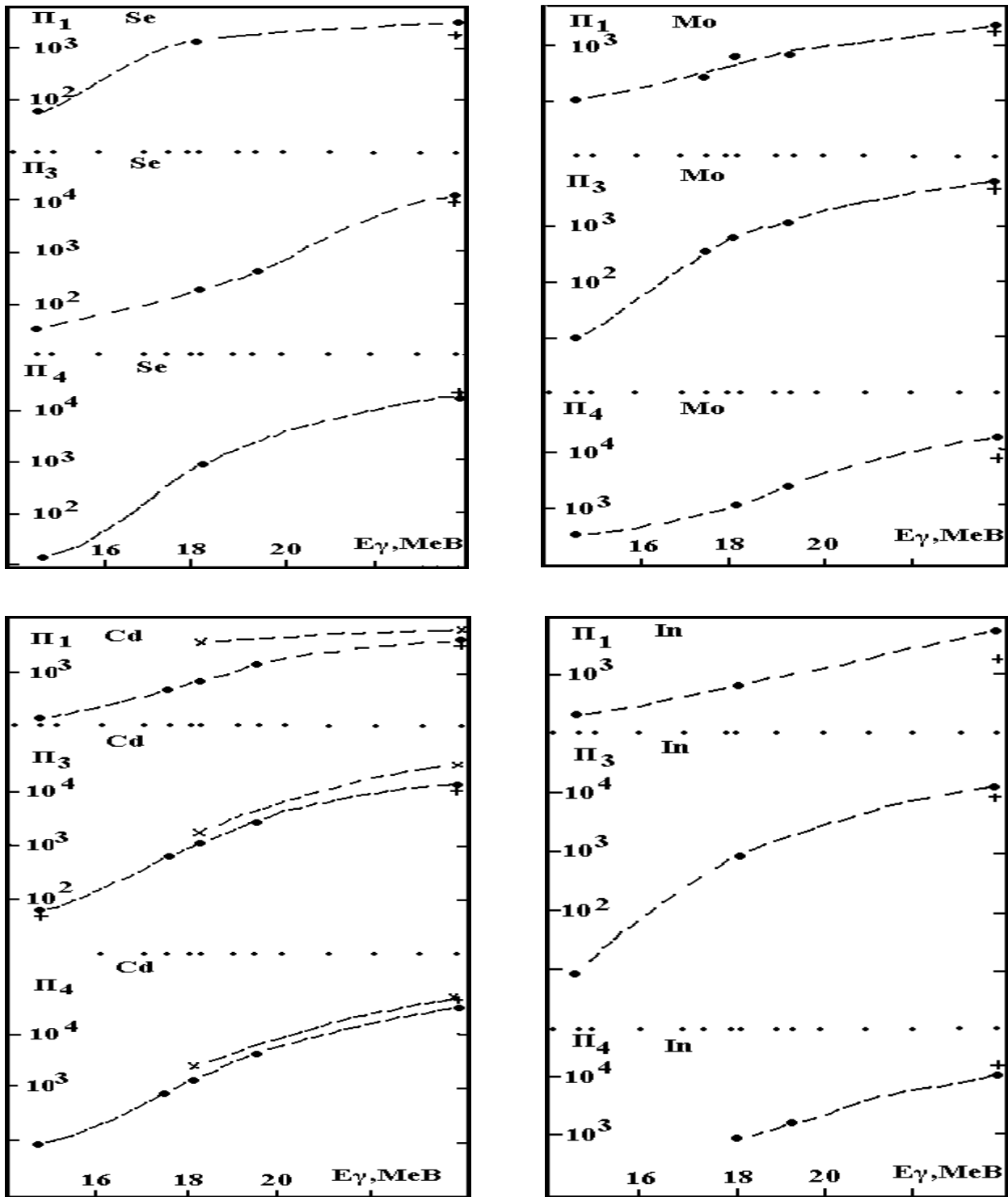


Рис 2. Енергетичні залежності активаційних інтегралів Π_1 (реакція Al 27 ($n\gamma$) Al 28); Π_3 (реакція Al 27 (np) Mg 27) Π_4 (реакція Si28 (np)Al 28) для Se, Mo, Cd, In.
 Позначення: \bullet – форма 3x1x1; $+$ – форма 1x1x1; \times – форма 3x3x3; штрихова лінія – можливий хід залежностей. Розмірність активаційного інтегралу Π – нейтр•барн/с•см².

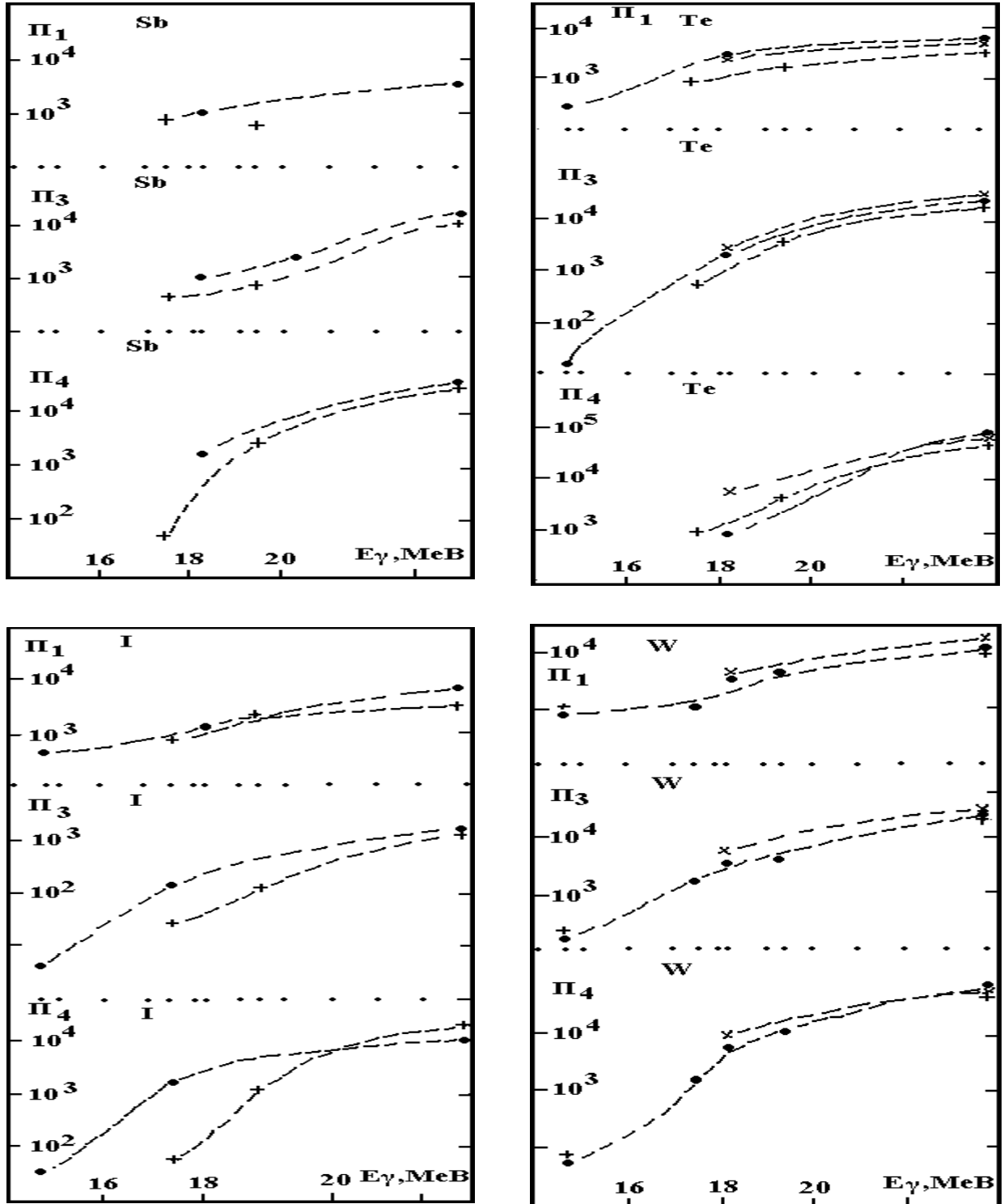


Рис 3. Енергетичні залежності активаційних інтегралів Π_1 (реакція Al 27 ($n\gamma$) Al 28); Π_3 (реакція Al 27 ($n\gamma$) Mg 27) Π_4 (реакція Si28 ($n\gamma$) Al 28) для Sb, Te, I, W.

Позначення: ● – форма 3x1x1; + - форма 1x1x1; x – форма 3x3x3; штрихова лінія – можливий хід залежностей. Розмірність активаційного інтегралу Π – нейтр•барн/с•см².

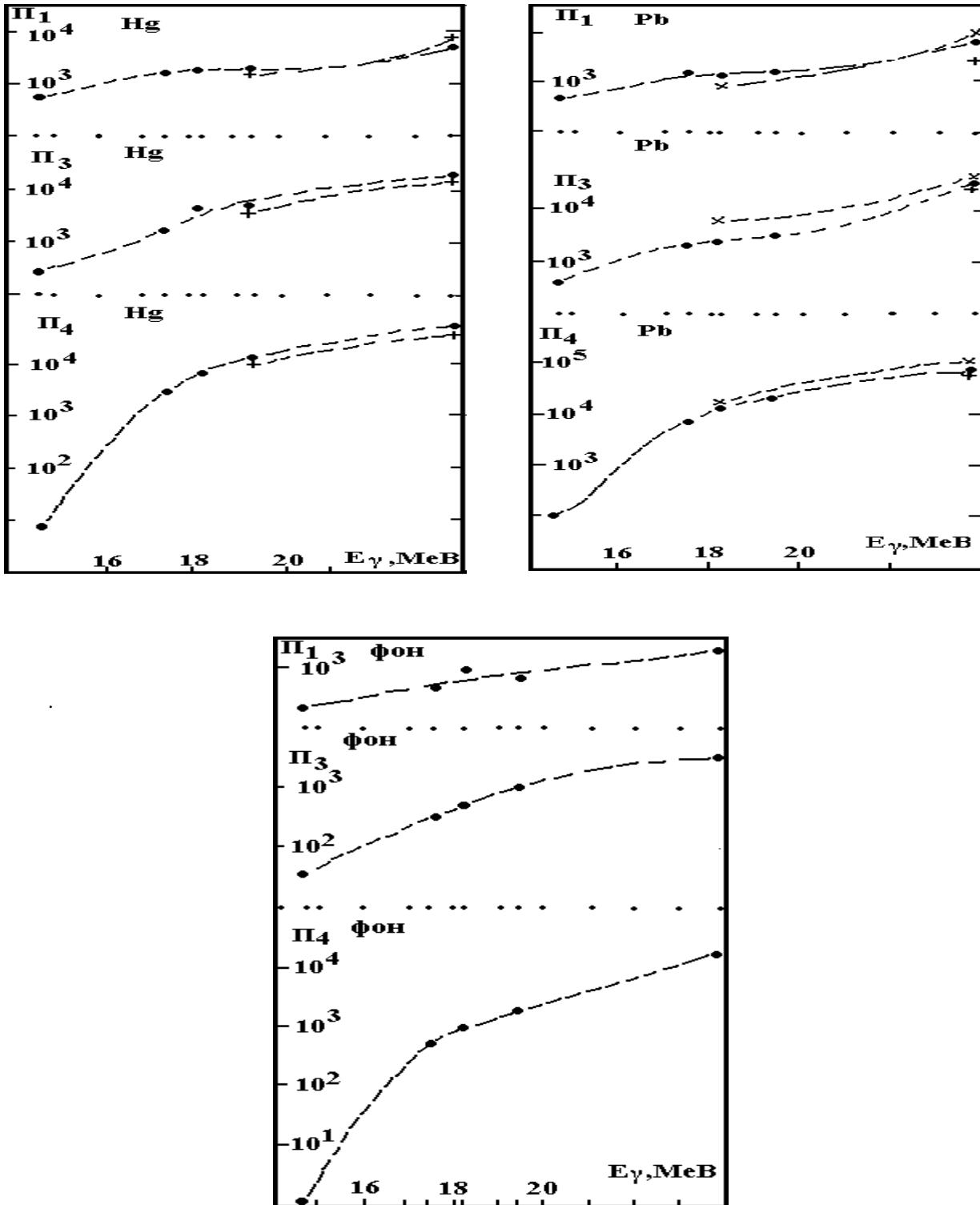


Рис 4. Енергетичні залежності активаційних інтегралів Π_1 (реакція Al 27 ($n\gamma$) Al 28); Π_3 (реакція Al 27 (np) Mg 27) Π_4 (реакція Si28 (np)Al 28) для Hg, Pb, та фону (нейтронного фону системи “мікротрон-гальмівна мішень”);

Позначення \bullet – форма $3 \times 1 \times 1$; $+$ – форма $1 \times 1 \times 1$; \times – форма $3 \times 3 \times 3$; штрихова лінія – можливий хід залежностей. Розмірність активаційного інтегралу Π – $\text{нейтр} \cdot \text{барн} / \text{с} \cdot \text{см}^2$

Таблиця 1

Оцінка енергетичної залежності “жорсткості” потоку нейтронів з конверторів (форма 3x1x1)

1 Z	2	3 N	4 14,71 MeV Π ₃ /Π ₁ Π ₄ /Π ₁ Π ₄ /Π ₃	5 17,51 MeV Π ₃ /Π ₁ Π ₄ /Π ₁ Π ₄ /Π ₃	6 18,21 MeV Π ₃ /Π ₁ Π ₄ /Π ₁ Π ₄ /Π ₃	7 19,41 MeV Π ₃ /Π ₁ Π ₄ /Π ₁ Π ₄ /Π ₃	8 23,93 MeV Π ₃ /Π ₁ Π ₄ /Π ₁ Π ₄ /Π ₃
1	D ₂ O	1,9	0,18 0,28 1,58	0,71 0,45 0,63	0,73 0,63 0,89	0,63 0,8 1,26	2,16 5,4 2,51
4	Be	1,75	3,16 8,42 2,66	3,98 14,5 3,76	5,63 14,5 2,66	4,44 11,2 2,51	8,02 17,9 2,24
26	Fe	3,77	0,01 0,01 1	0,32 0,8 2,52	0,79 1,78 2,25	1,59 5,6 3,55	4,31 4,8 1,12
30	Zn	1,88	0,04 0,8 17,8	0,18 0,9 5,04	0,25 1,26 5,01	0,4 2,5 6,3	12,6 17,8 1,41
34	Se	0,65	0,52 0,22 0,42	0,16 0,71 4,46	0,18 0,8 1,46	0,28 1,26 4,46	3,98 5,6 1,41
42	Mo	5,12	0,9 3,16 3,51	0,94 2,24 2,37	1,19 2,23 1,88	1,5 3,0 2,0	2,24 7,1 3,16
48	Cd	1,37	0,25 0,08 0,32	1,41 1,58 1,12	1,78 2,0 1,12	2,24 3,16 1,41	3,76 8,9 2,37
49	In	1,33	0,03 0,06 1,6	0,8 0,93 1,17	1,19 1,19 1,0	2,0 1,8 0,9	2,51 2,0 0,79
51	Sb	0,6	2,52 0,13 0,05	1,19 1,33 1,12	1,0 1,78 1,78	1,0 3,17 3,17	4,47 11,2 2,51
52	Te	0,54	0,05 0,51 1,07	0,56 1,58 2,82	0,79 2,0 2,51	1,41 3,55 2,51	3,76 13,3 3,55
53	I	0,35	0,11 0,09 0,83	1,68 1,78 1,06	2,11 2,11 1,0	2,51 2,51 1,0	2,51 1,78 0,71
74	W	1,16	0,2 0,06 0,28	1,0 1,26 1,26	1,41 2,0 1,41	1,26 3,64 2,24	2,51 7,07 2,82
80	Hg	1,34	0,53 0,01 0,02	1,11 1,77 1,58	1,63 3,2 2,0	2,32 5,8 2,51	3,25 9,2 2,82
82	Pb	0,65	0,71 0,18 0,25	1,58 5,62 3,76	1,78 7,94 4,47	2,57 12,9 3,16	6,31 11,2 1,72
-	Фон	-	0,18 0,01 0,03	0,71 1,19 1,68	0,79 1,5 1,88	1,26 2,66 2,24	1,78 8,91 5,01

Література

1. Ковалёв В.П. Вторичные излучения ускорителей электронов. М., Атомиздат, 1979.
2. Власов Н.А. Нейтроны. М., Наука, 1971. 552 стр.
3. Ганжа А.П. Конверторы нейтронов электронных ускорителей. Деп. ВИНТИ – 3 – 62 – 84, 1984.
4. Дробинин А.В и др. Фотонейтроны из толстых конверторов D_2O , Be и Pb при $E_{max}=15$ MeV. Атомная энергия, т. 53, стр. 398-399.
5. 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.
6. Исследование процессов фотовозбуждения и распада ЕІ-гигантского резонанса атомных ядер. Отчёт №01.86005.9807 УжО ИЯИ АН УССР, Ужгород, 1989, с. 134-198.
7. Звіт. Дослідження процесів розпаду високозбуджених колективних станів атомних ядер в області енергій падаючих гамма-квантів 4-20 MeV. Ужгород 1993.
8. M. Stets, D. Sikora, M. Goshovskij in. “4-th European conference on accelerators in Applied Research and Technology. Program and abstracts. August 29 – September 2, 1995, Zurich, Switzerland”. А-76.
9. И.В. Горячев, Ю.И. Колеватов, и др. Интегральные эксперименты в проблеме переноса ионизирующих излучений: Справочное руководство. – М. Энергоатомиздат, 1985. – 272 с.
10. Гусев Н.Г., Дмитриев П.П. Квантовые излучения радиоактивных нуклидов. М., Атомиздат, 1977. 400 с.
11. С. П. Капица, В.Н. Мелехин. Микротрон., М. Наука, 1969, 212 стр.
12. Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов. Взаимодействие электромагнитного излучения с атомными ядрами. М., Издательство Московского университета. 1979. 216 с.

ENERGY DEPENDENCES OF (n γ)- AND (np)- COMPONENTS OF NEUTRON FLUXES FROM “ γ -QUANTUM-PHOTONEUTRON” CONVERTERS WITHIN THE 14 – 24 MeV ELECTRON ENERGY RANGE OF AN M – 30 MICROTRON

M.V. Stets, D.I. Sikora

Institute of electron physics Ukrainian National Academy of Science , 88016, Uzhgorod,
Universitetska st., 21

The experimental data on the studies of the modular-type “ γ -quantum-photon neutron” converter (converter materials: D_2O , Be, Fe, Zn, Se, Mo, Cd, In, Sb, Te, I, W, Hg, Pb; unit module dimensions – 3x3x3 cm) as a neutron source for solving the applied problems of activation analysis at an M-30 microtron are presented. The activation detectors Si (SiO_2 : reaction $Si^{28}(np) Al^{28}$) and Al (reaction $Al^{27}(n\gamma) Al^{28}$; reaction $Al^{27}(np) Mg^{27}$) placed 10 cm from the converter axis and at the 90° angle with respect to the Bremsstrahlung gamma-quanta beam axis were used to determine the activation integrals of (n γ)- and (np)-components neutron flux. The energy dependence of neutron spectrum “rigidity” ((n γ)/(np)- and (np)/(np) component ratio) has been estimated. The experiment was carried out for the 14,71, 17,51; 18,21; 19, 41; 23,93 MeV “accelerated electron energies” .