

# ЗАРЯДОВІ ЗАЛЕЖНОСТІ ЖОРСТКОСТІ ІНТЕГРАЛЬНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО СПЕКТРУ 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  
88017, м. Ужгород, вул. Університетська, 21

Приведено експериментальні дані зарядових залежностей жорсткості інтегрального енергетичного спектру нейтронів (відношення активаційних інтегралів ( $n\gamma$ )- та ( $np$ )- компонент потоку нейтронів) для конверторів “гамма-квант-фотонейтрон” модульного типу (матеріали конверторів:  $D_2O$ , Be, Fe, Zn, Se, Mo, Cd, In, Sb, Te, I, W, Hg, Pb) та нейтронного фону прискорювача мікротрона М-30. Експеримент здійснено в інтервалі енергій прискорених електронів 14 - 24 МеВ. Для визначення активаційних інтегралів ( $n\gamma$ )- та ( $np$ )- компонент потоку нейтронів здійснено опромінення та гамма-спектрометрію активаційних детекторів Al, Si та Mn.

Експериментальні дослідження конверторів “ $\gamma$ -квант-фотонейтрон”, в яких відбувається конвертування гамма-квантів гальмівного випромінювання в фотонейтрони, залишаються актуальною проблемою. Про складність, об’єм, а також про експериментальні дані по цій проблемі, виконані на мікротроні М-30 ІЕФ НАН України повідомлено в [1-5].

Зараз ми приводимо дані (систематизовані в графічному представленні) для порівняльної оцінки зарядових залежностей (залежностей від атомного номера  $Z$  матеріалу конвертора) жорсткості інтегрального енергетичного спектру нейтронів (відношення активаційних інтегралів ( $n\gamma$ )- та ( $np$ )- компонент потоку нейтронів), із конверторів “гамма-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.

**Експеримент.** Визначались наступні активаційні інтегралі, нормовані на 1 мкА струму прискорених електронів (нейтронний фон мікротрона не віднімався):

П1д – активаційний інтеграл із значенням  $\sigma$  ( $n\gamma$ ) 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 еВ);

П2д - активаційний інтеграл із значенням  $\sigma$  ( $n\gamma$ ) 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 еВ-( $n\gamma$ )-компонента потоку нейтронів;

П3д - активаційний інтеграл із значенням  $\sigma$  ( $np$ ) для реакції Al 27 ( $np$ ) Mg 27 (реакція на швидких нейтронах; поріг реакції – 1,83 МеВ; переріз реакції – 74 мбарн (для нейтронів з енергією 14 МеВ);

П4д - активаційний інтеграл із значенням  $\sigma$  ( $np$ ) для реакції Si 28 ( $np$ ) Al 28 (реакція на швидких нейтронах; поріг реакції – 3,86 МеВ; переріз реакції – 260 мбарн (для нейтронів з енергією 14 МеВ).

На основі значень активаційних інтегралів П1д, П2д, П3д, П4д розраховано та побудовано значення жорсткостей:

$$Ж31 = П3 / П1,$$

$$Ж43 = П4 / П3,$$

$$Ж12 = П1 / П2,$$

від значень заряду  $Z$  матеріалу конверторів для енергій 14,71; 17,51; 18,21; 19,41; 23,92 МеВ.

Дані приведено на рис. 1 - рис. 17.

Розміри конверторів (в одиницях модулів (див [1-3])) -  $3 \cdot 1 \cdot 1$  (рис. 1 - рис. 13).

На рис. 13 - рис. 15 приведені дані для форми  $1 \cdot 1 \cdot 1$  (енергія 23,92 МеВ); на рис. 16 - рис. 17 приведені дані для форми  $3 \cdot 3 \cdot 3$  (енергія 23,92 МеВ).

Значення Ж31, Ж43, Ж12 для відношень П1д, П2д, П3д, П4д позначені на рисунках світлими значками (фон не віднімався).

Нейтронний фон мікротрона (нейтронний фон “прискорювач + гальмівна мішень”) є технологічним фактором, і є функцією від енергії. Тому на рис. 1 - рис. 17 приведені, для порівняння, і відповідні значення Ж31, Ж43, Ж12 для відношень П1дф, П2дф, П3дф, П4дф (нейтронний фон віднімався), які позначені на рисунках темними значками.

#### Аналіз отриманих даних.

**Висновки.** Аналіз приведених тут даних вказує на те, що, не дивлячись на відносно велику похибку відношень (на рівні 25%; на рис. - вертикальні лінії), залежності Ж31, Ж43, Ж12 мають певну структуру, зокрема, в області біля  $Z=50$ . Можна відмітити також немонотонний хід цих зарядових залежностей.

Це означає, що нами (відносно простою методикою) реєструється факт - енергетичний спектр нейтронів в наслідок їх взаємодії з речовиною конвертора зазнає певних змін в різних областях діапазону енергій нейтронів – області енергій резонансів, які в цих областях дають суттєвий вклад в канал  $(n\gamma)$ -реакцій та в області більш високих енергій нейтронів (енергії вище порогів  $(np)$ -реакцій).

В прикладних задачах, зокрема в задачах нейтронно-активаційного аналізу (НАА), така інформація про можливість трансформації енергетичного спектра має важливе значення, тому що безпосередньо свідчить про можливість зміни співвідношення двох основних аналітичних в НАА ядерних реакцій:  $(n\gamma)$  та  $(np)$ .

Таким чином, зрозуміло, що зміна матеріалу конвертора (зміна  $Z$ ) призводить до зміни жорсткості спектра нейтронів, а це, в певних випадках, є до-

статньою умовою для вирішення задач НАА.

Важливим фактом, на який потрібно шукати відповідь в експериментальному вираженні – це пошук масштабу (розмірів) конверторів, при яких трансформації спектру нейтронів (жорсткості) стають помітними і практично застосовними. В порівнянні з розмірами таких установок, як ядерні реактори, розміри наших конверторів непорівняно малі. В порівнянні з мішенями (товщини менше 1 мм), на яких досліджують ядерні реакції, наші конвертори, навпаки, великі. На рис. 14 - рис. 17 приведені значення залежностей жорсткостей для деяких інших розмірів конверторів, які підтверджують, що зміни в спектрі фіксуються і для них. Таким чином, вибраний нами масштаб є задовільним. Окрім цього видно, що форма (розміри) конвертора теж є фактором впливу на значення жорсткості.

Залежність спектру нейтронів (і, відповідно жорсткостей) від атомного номера  $Z$  матеріала – відомий факт. Кількісна і стандартизована оцінка динаміки такої зміни в конверторах досліджених нами масштабів, яка може бути використана в практичних цілях – це, на наш погляд, є, в певній мірі, новим.

Як видно із даних, приведених на рис. 1 - рис. 17, значення жорсткості змінюються в інтервалі 0 – 12, причому жорсткість зростає із зростанням енергії.

Відносно невеликий діапазон зміни жорсткості свідчить про відомий факт, що стартовий енергетичний спектр фотонейтронів формується в речовині конвертора в наслідок ядерної  $(\gamma n)$ - реакції, в якій, в залежності від  $Z$  конвертора, із зростанням енергії гальмівних гамма-квантів, зростає кількість надтеплових нейтронів. Всі наступні трансформації цього стартового спектру призводять до сповільнення цих нейтронів, і відносно невеликі.

Завважимо, що на відміну від більш “радикальних” засобів зміни спектру, напр., з використанням Cd-, В- та інших фільтрів, тут суттєвої втрати нейтронів нема.

Як видно, в деяких випадках потрібно враховувати вплив нейтронного фону на значення жорсткостей.

З технічної точки зору, зміна значень енергії прискорених електронів і/або конвертора не є складною. Складним залишається вибір напрямку та ступені зміни цих факторів. Складність, в свою чергу, зобумовлена складністю і різноманітністю задач НАА. Ця складність часто вимагає керованої зміни жорсткості - співвідношення (n $\gamma$ )- та (np)- компонент потоку нейтронів одночасно у “різних” напрямках. Це – оптимізаційні задачі, для вирішення яких потрібен апріорний масив даних, зокрема отриманих нами.

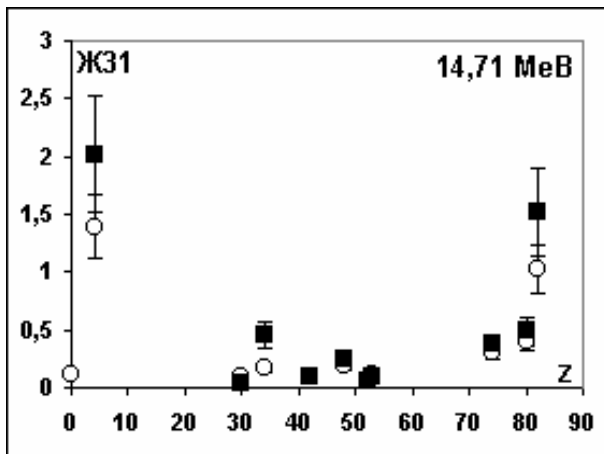


Рис. 1. Залежність жорсткості Ж31=П3/П1 від атомного номера Z конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

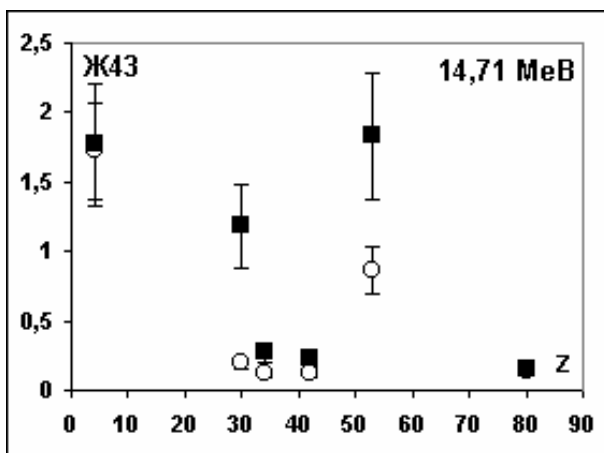


Рис. 2 Залежність жорсткості Ж43=П4/П3 від атомного номера Z конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

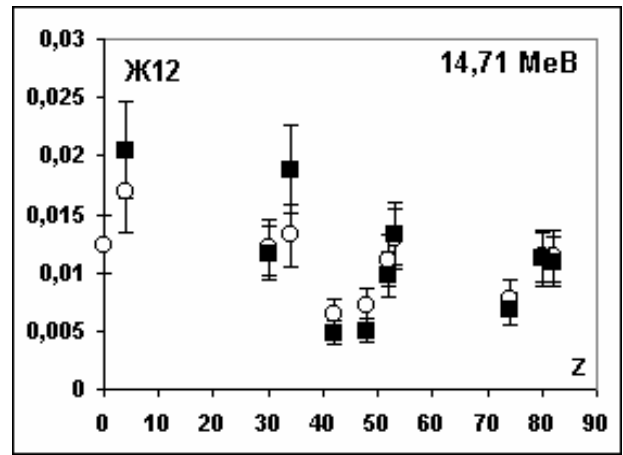


Рис. 3. Залежність жорсткості Ж12=П1/П2 від атомного номера Z конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

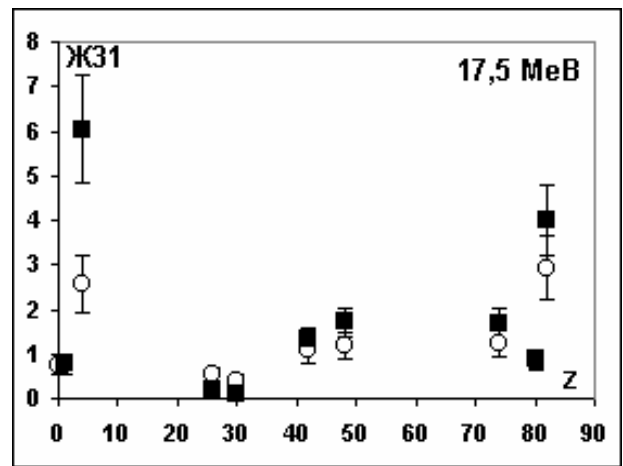


Рис. 4. Залежність жорсткості Ж31=П3/П1 від атомного номера Z конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

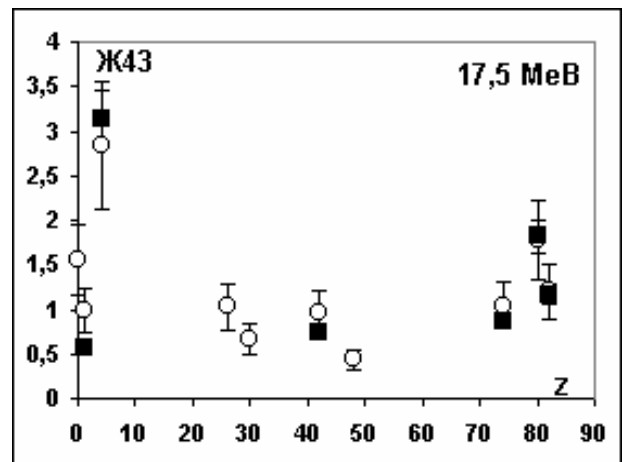


Рис. 5. Залежність жорсткості Ж43=П4/П3 від атомного номера Z конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

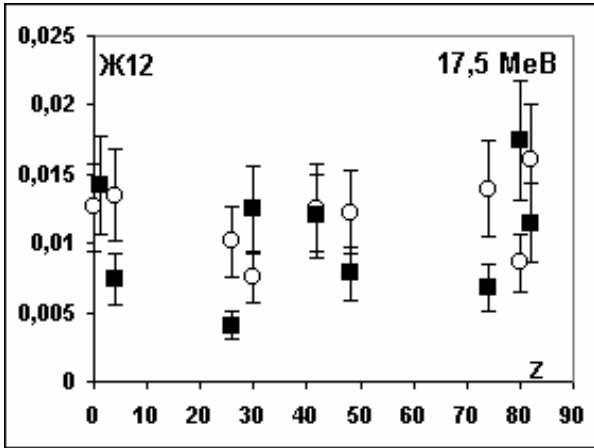


Рис. 6. Залежність жорсткості  $Ж_{12}=\Pi_1/\Pi_2$  від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

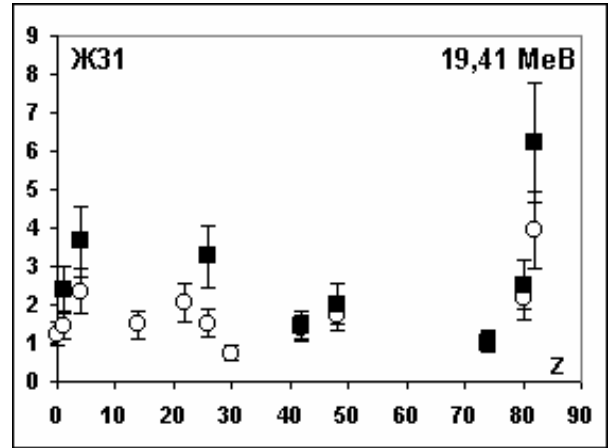


Рис. 9. Залежність жорсткості  $Ж_{31}=\Pi_3/\Pi_1$  від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

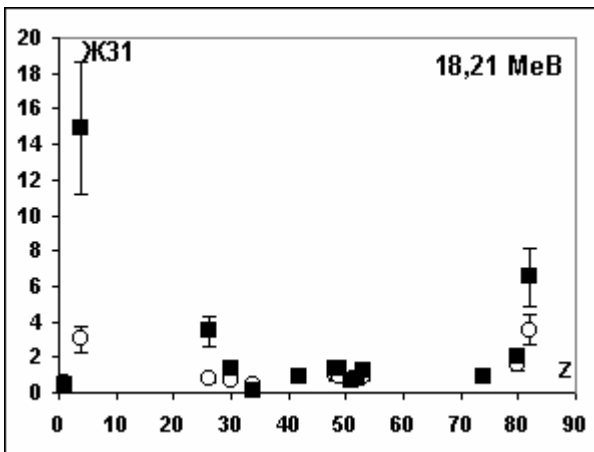


Рис. 7. Залежність жорсткості  $Ж_{31}=\Pi_3/\Pi_1$  від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

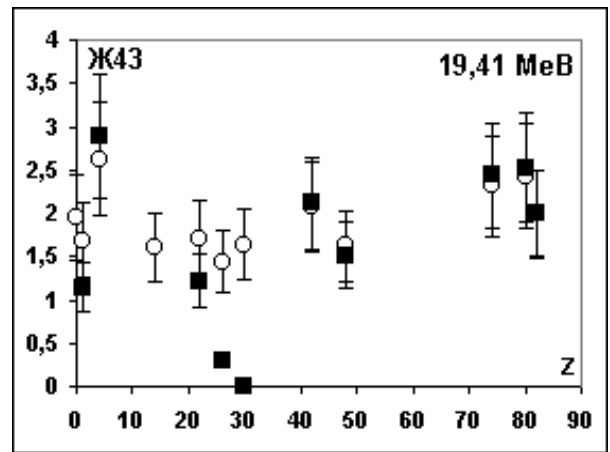


Рис. 10. Залежність жорсткості  $Ж_{43}=\Pi_4/\Pi_3$  від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

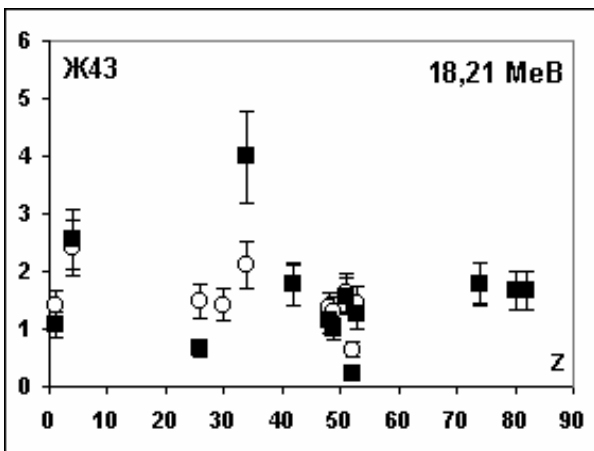


Рис. 8. Залежність жорсткості  $Ж_{43}=\Pi_4/\Pi_3$  від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

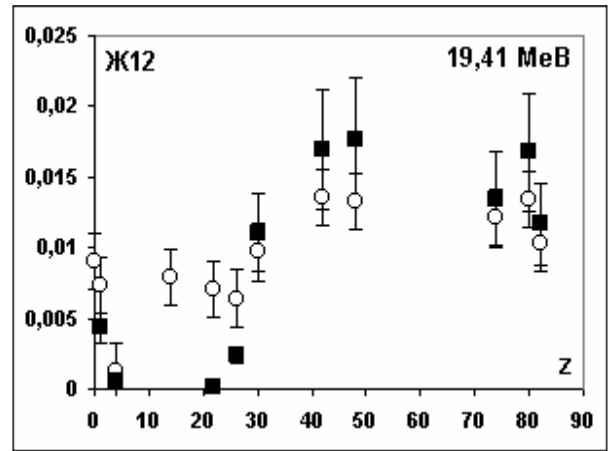


Рис. 11. Залежність жорсткості  $Ж_{12}=\Pi_1/\Pi_2$  від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

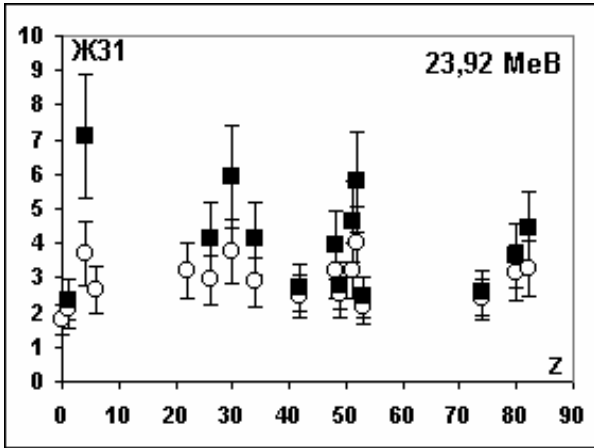


Рис. 12. Залежність жорсткості Ж31=П3/П1 від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

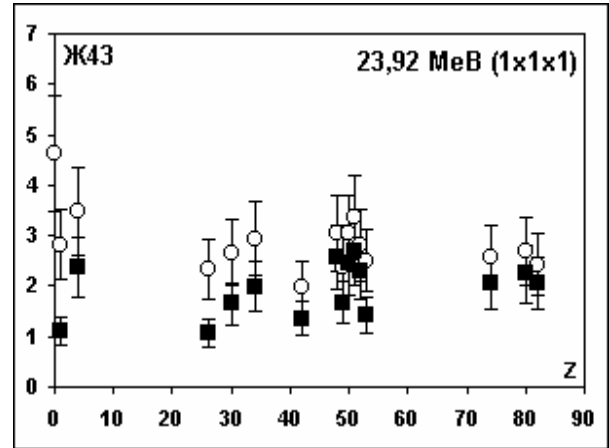


Рис. 15. Залежність жорсткості Ж43=П4/П3 від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

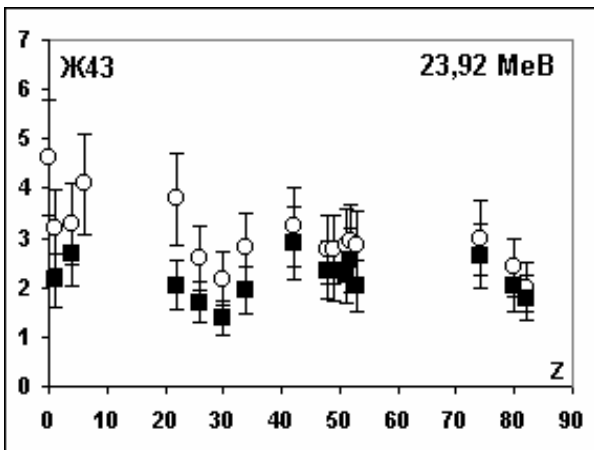


Рис. 13. Залежність жорсткості Ж43=П4/П3 від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

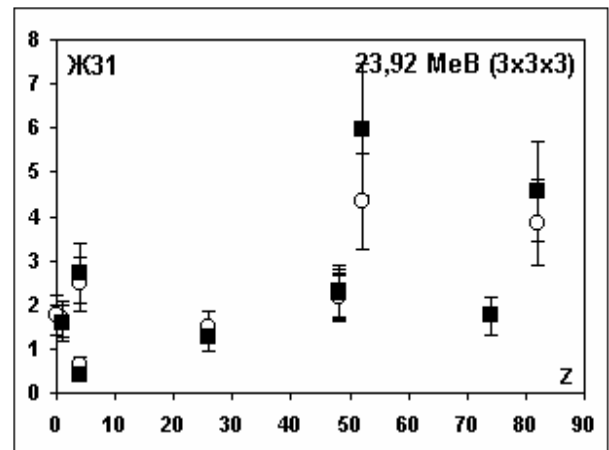


Рис. 16. Залежність жорсткості Ж31=П3/П1 від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

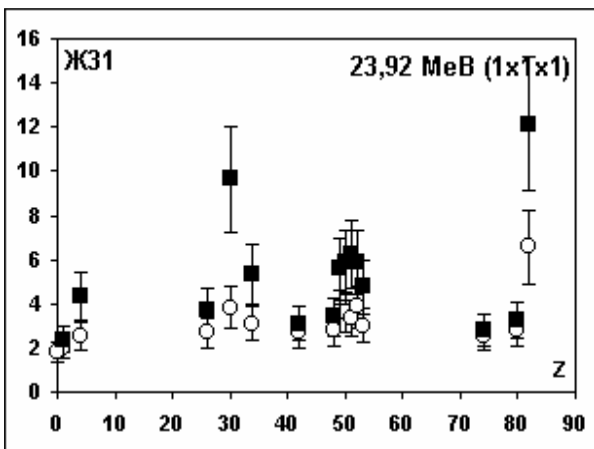


Рис. 14. Залежність жорсткості Ж31=П3/П1 від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

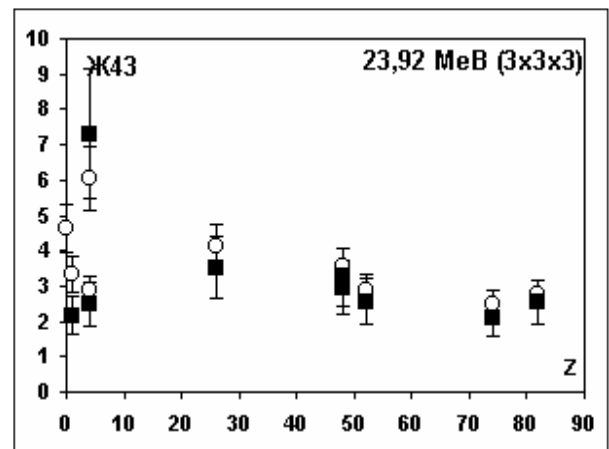


Рис. 17. Залежність жорсткості Ж43=П4/П3 від атомного номера  $Z$  конвертора (темні значки - без фону; світлі значки - з фоном).

### Література

1. Применение микротрона М-30 для изучения некоторых фотоядерных реакций области Е1-гигантского резонанса. Отчёт УжО ИЯИ АН УССР, № гос. регистр. 81044505, Ужгород, 1985, раздел б.
2. Исследование процессов фото-возбуждения и распада Е1-гигантского резонанса атомных ядер. Отчёт №01.86005.9807 УжО ИЯИ АН УССР, г. Ужгород, 1989. – С. 134-198.
3. 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.
4. Стець М.В., Сікора Д.І., Гошовський М.В., Пітченко Г.Ф. Експериментальна оцінка енергетичного спектру потоку нейтронів із конверторів “гамма-квант-фотонейтрон” // Науковий вісник Ужгородського університету. Сер. Фізика. – 2008. - Вип.23. - С. 69-74.
5. Стець М.В., Сікора Д.І., Гошовський М.В., Пітченко Г.Ф., Гайніш Й.Й. Зарядові залежності активаційних інтегралів ( $n\gamma$ )- та ( $np$ )- компонент потоку нейтронів із конверторів “гамма-квант-фотонейтрон” // Науковий вісник Ужгородського університету. Сер. Фізика. – 2008. - Вип.23. - С. 79-84.

## CHARGE DEPENDENCES OF HARDNESS OF NEUTRON INTEGRAL ENERGY SPECTRUM FROM THE “GAMMA-QUANTUM-PHOTONEUTRON” CONVERTERS

**M.V. Stets, D.I. Sikora, M.V. Hoshovsky, G.F. Pitchenko**

Institute of Electron Physics, Ukrainian National Academy of Sciences  
21 Universitetska street, 88017 Uzhhorod

The experimental data on the charge dependences of hardness of neutron integral energy spectrum (i.e. ratio of activation integrals of the ( $n\gamma$ )- and ( $np$ )- components of neutron flux) for the module-type “gamma-quantum-photoneutron” converters (converter materials:  $D_2O$ , Be, Fe, Zn, Se, Mo, Cd, In, Sb, Te, I, W, Hg, Pb) and an M-30 microtron accelerator background are presented. The experiment was carried out within the 14–24 MeV accelerated electron energy range. To determine the activation integrals of the ( $n\gamma$ )- and ( $np$ )- components of neutron flux, irradiation and gamma-spectrometry of the activation Al, Si and Mn detectors have been performed.

# **ЗАРЯДОВЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ЖЕСТКОСТИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА НЕЙТРОНОВ ИЗ КОНВЕРТОРОВ «ГАММА-КВАНТ-ФОТОНЕЙТРОН»**

**М.В. Стец, Д.И. Сикора, М.В. Гошовский, Г.Ф. Питченко**

Институт электронной физики Национальной академии наук Украины,  
88017, г. Ужгород, ул. Университетская, 21

Приведены экспериментальные зарядовые зависимости жесткости интегрального энергетического спектра нейтронов (жесткость-отношение активационных интегралов  $(n\gamma)$ - та  $(n\beta)$ - компонент потока нейтронов) для конверторов “гамма-квант-фотонейтрон” модульного типа (материалы конверторов:  $D_2O$ , Be, Fe, Zn, Se, Mo, Cd, In, Sb, Te, I, W, Hg, Pb), и нейтронного фона ускорителя электронов микротрона М-30. Эксперимент выполнен в интервале энергий ускоренных электронов 14 - 24 МэВ. Для определения активационных интегралов  $(n\gamma)$ - та  $(n\beta)$ - компонент потока нейтронов выполнено облучение и гамма-спектрометрию активационных детекторов Al, Si и Mn.