

УДК 539.17

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ ЛЕГКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В РЕАКЦИЯХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 30 МэВ НА ЯДРЕ ^{58}Ni

^{1,2)} Жолдыбаев Т.К., ^{1,3)} Муқан Ж., ¹⁾ Садыков Б.М., ^{1,2)} Насурлла М., ¹⁾ Дуйсебаев Б.А.,
⁴⁾ Садуев Н.О., ²⁾ Дуйсенбаева А.Ж., ²⁾ Жумадилов И., ³⁾ Байбекова Н.

¹⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

²⁾ Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

³⁾ Евразийский Национальный Университет им. Гумилева, Астана, Казахстан

⁴⁾ Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа, Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Работа связана с изучением инклюзивных спектров вторичных протонов, возникающих при взаимодействии протонов с энергией 30,0 МэВ с ядром ^{58}Ni . Получены дважды-дифференциальные и интегральные сечения реакций (р, хр) с дальнейшим определением полного парциального сечения. Анализ экспериментальных спектров выполнен на основе модифицированной версии экситонной модели предравновесного распада в рамках расчетной программы PRECO-2006. Определены вклады равновесного, предравновесного и прямого механизмов в формирование интегрального сечения. Результаты эксперимента могут быть использованы при разработке новых подходов в теории ядерных реакций, а также при разработке безопасных и безотходных гибридных атомных электростанций.

ВВЕДЕНИЕ

В теории ядерных реакций рассматривались, в основном, два предельных подхода – механизм образования составного ядра и прямых ядерных реакций. Однако исследования последних десятилетий привели к веским аргументам в пользу реализации специфических процессов, реализуемых в реакциях до образования составного ядра в классическом его понимании, в объяснении которых традиционные представления о механизмах реакций оказались не состоятельными. В реакциях, инициируемых γ -квантами, нуклонами и более сложными частицами вплоть до тяжелых ионов, вклад компоненты сечения, расположенный на энергетической шкале непосредственно за характерным максвелловским распределением, связанным с эмиссией частиц из равновесного состояния, оказался значительным, а в ряде процессов определяющим в формировании полного сечения (рисунок 1).

Развитие концепции механизма предравновесного распада ядер является актуальной задачей теории ядерных реакций и непосредственно связано с получением отсутствующих к настоящему времени прецизионных экспериментальных данных по дифференциальным, дважды дифференциальным и интегральным сечениям в реакциях с различными типами частиц во входном канале. Роль новых ядерно-физических экспериментов является ключевой как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях, связанных, в частности, с разработкой электро-ядерных установок (Accelerator Driven System, ADS) для ядерной трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов атомной промышленности и производства энергии [2]. Физический сценарий подобной системы предусматривает экспериментальные данные по ключевым параметрам взаимодействия нуклидов

и нуклонов – сечениям, энергетическим спектрам и угловым распределениям продуктов реакций, которые могут выступать в качестве агентов инициирующих реакции с испусканием нейтронов, необходимых для работы ADS [3]. В этом аспекте наиболее актуальным остаются определение величины сечений в области энергии протонов вблизи 30 МэВ. При этой энергии открыто много каналов реакций, а полное сечение реакций для исследуемых ядер достигает своего максимума (рисунок 2).

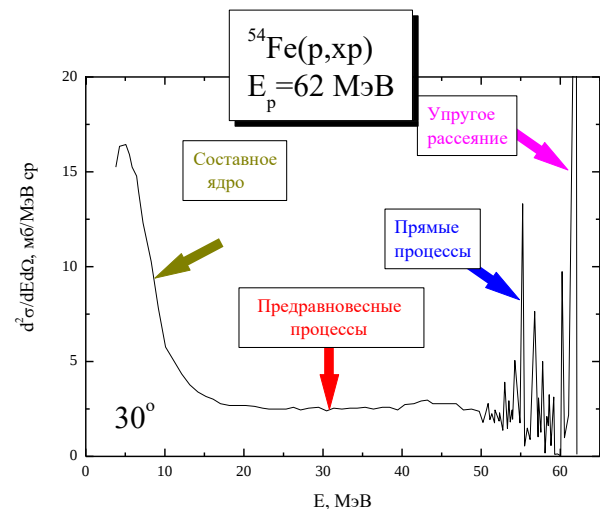


Рисунок 1. Сечения вылета протонов в зависимости от энергии возбуждения (экспериментальные данные из работы [1])

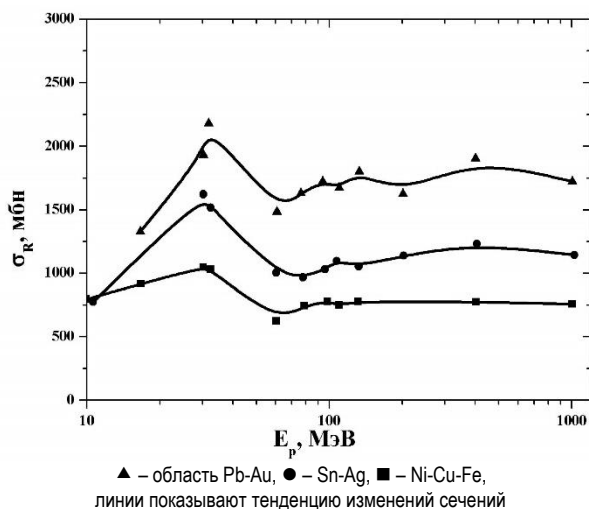


Рисунок 2. Зависимость экспериментальных полных сечений реакций (экспериментальные данные взяты из [4-7]) от энергии налетающих протонов для трех массовых областей

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Измерения сечений ядерных реакций ^{58}Ni (p, xp) были выполнены на изохронном циклотроне У-150М ИЯФ [8]. Исследовались инклюзивные энергетические спектры и угловые распределения протонов из реакций (p, xp) при энергиях налетающих протонов 30 МэВ. Камера рассеяния установлена на расстоянии 23,9 м от выхода пучка циклотрона. Максимальная угловая неопределенность системы коллиматоров, расположенной непосредственно перед камерой рассеяния, обеспечивала линейные размеры пучка на мишени ~3 мм. Юстировка камеры рассеяния относительно оси ионопровода осуществлялась оптическими методами. Спектрометр частиц располагался на вращающейся крышке камеры рассеяния под углом 10° к плоскости реакции и мог быть установлен относительно оси пучка под углами $\theta_{\text{ЛС}} = 10^\circ \div 170^\circ$ с точностью $0,1^\circ$. Для определения числа частиц, падаю-

щих на мишень, применялась система цилиндр Фарадея – интегратор тока. Основные характеристики условий эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики условий эксперимента

Телескоп ΔE -E	Толщина детектора		Телесный угол, мкср	Реакция	Углы регистрации, $\Delta\theta=15^\circ$
	ΔE , мкм	E, мкм			
Si-CsI(Tl)	100	25000	$26,2 \pm 0,3$	^{58}Ni (p, xp)	$30^\circ \pm 135^\circ$

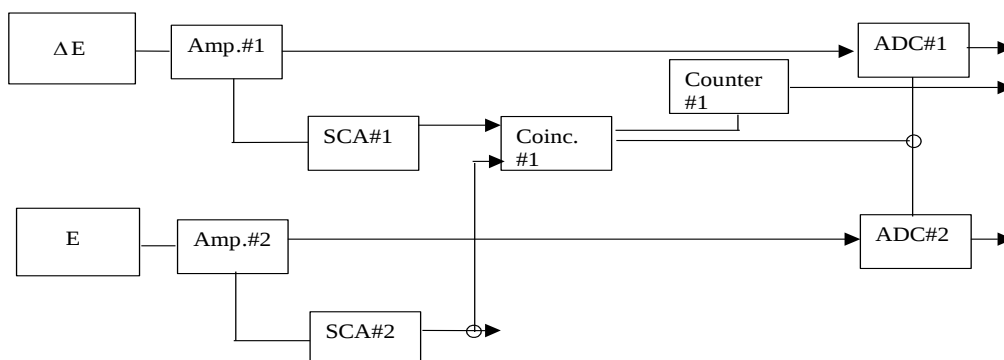
В качестве исследуемого ядра-мишени был выбран ^{58}Ni как кандидат конструкционного элемента любых современных ядерных установок. Характеристики мишени приведены в таблице 2. Толщина мишени контролировалась по потерям энергии α -частиц от тройного α -источника $^{241,243}\text{Am} + ^{244}\text{Cm}$.

Таблица 2. Характеристика мишени

Материал	Толщина, мг/см ²	Обогащение, %
^{58}Ni	3,3	98

При взаимодействии протонов с ядрами мишени открыто много каналов реакций и регистрацию интересующих нас продуктов реакций приходится вести в условиях большого фона других конкурирующих процессов. Для выделения нужного сорта частиц использовался метод регистрации двух параметров детектируемой частицы: удельной ионизации (dE/dx) и полной энергии (E). Блок-схема электроники ΔE -E – методики приведена на рисунке 3.

Систематические ошибки сечений обусловлены, главным образом, погрешностями в определении толщины мишени ($< 5\%$), калибровки интегратора тока (1%) и телесного угла спектрометра ($1,3\%$). Энергия пучка ускоренных частиц измерялась с точностью $1,2\%$. Величина отношения числа отсчетов монитора к интегратору сохранялась постоянной в пределах 1% . Полная систематическая ошибка не превышала 8% .



Amp. #1, #2 – спектроскопический усилитель; SCA #1, #2 – одноканальный анализатор; Coinc. #1 – схема совпадений; Counter #1 – пересчетная схема; ADC #1, #2 – амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП)

Рисунок 3. Блок-схема электроники ΔE -E методики

Статистическая ошибка, величина которой зависела от типа и энергии регистрируемых частиц, изменялась для протонов от 1 % в низкоэнергетической до 10 % в высокоэнергетической областях энергий.

Для калибровки Е-детектора кинетическая энергия частицы, соответствующая номеру канала X, определялась по известным состояниям остаточных ядер (мишени ^{12}C , CH_2). Вычитая из нее потерю энергии частицы в мишени и ΔE -детекторе, находилось значение энергии, поглощенной Е-детектором. Такая функция, связывающая номер канала в линейных спектрах с энергией поглощенной в Е-детекторе, называется опорной калибровкой. Зная ее, и восстановив по данной остаточной энергии потери в ΔE -детекторе, можно получить энергию частицы перед попаданием в телескоп детекторов. Затем, прибавив к последней потери в мишени, находим энергию частицы, покинувшей ядро.

После интегрирования по углу дважды-дифференциальных сечений было получено интегральное сечение рассматриваемой реакции. На рисунках 4 и 5 представлены дважды-дифференциальные и интегральные спектры реакций ^{58}Ni (p, xp). Определенное из них парциальное сечение реакции приведено в таблице 3.

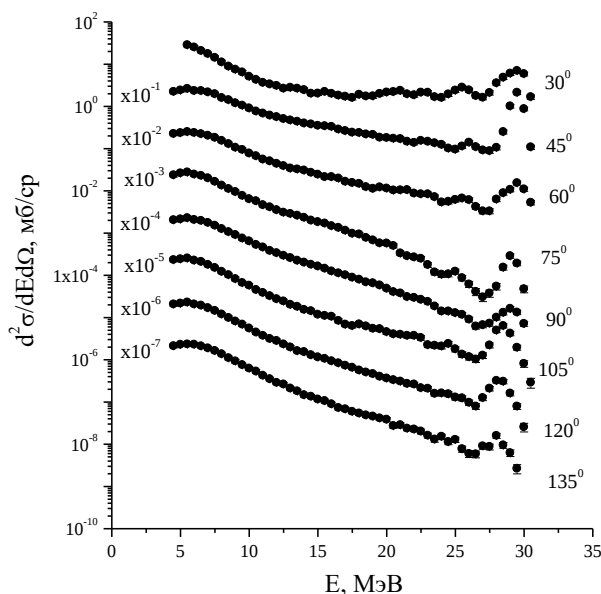
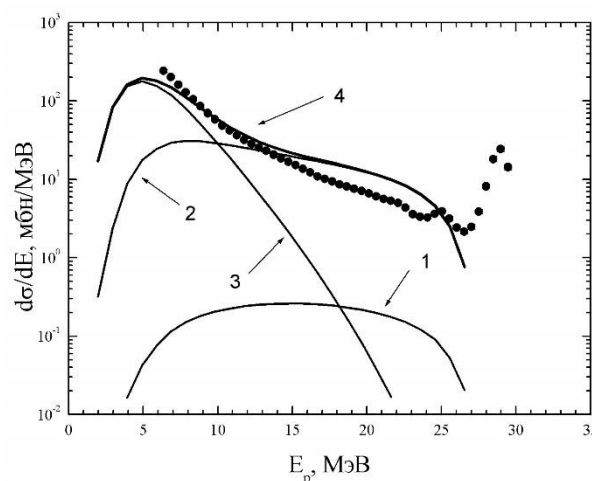


Рисунок 4. Экспериментальные дважды-дифференциальные сечения реакций (p, xp) на ядре ^{58}Ni

Анализ экспериментальных результатов реакций (p, xp) на ядре ^{58}Ni выполнен в рамках экситонной модели распада ядер, которая по своей сути является статистическим подходом, описывающим переход возбужденного ядра в равновесное состояние. Она широко используется при интерпретации многих экспериментальных результатов. Одним из достоинств модели является то, что кинетические уравнения, на которых она основана, описывают весь процесс релаксации возбужденной ядерной системы, начиная от

простейших квазичастичных конфигураций и заканчивая установлением статистического равновесия. Это, в частности, позволяет по-новому взглянуть на ставший уже традиционным механизм испускания частиц из составного ядра. Разработанные быстрые методы решения кинетических уравнений открыли возможность изучения многочастичной эмиссии частиц. Модель описывает одновременно энергетические спектры не только нуклонов, но и сложных частиц, а современные ее версии включают также описание и угловых распределений.

Первый вариант экситонной модели был предложен Griffin J.J. [9]. Ядро в ней трактуется как система фермионов со слабым двухчастичным остаточным взаимодействием, а возбужденные состояния классифицируются числом квазичастиц (экситонов) $n=p+h$, где p – число частиц выше энергии Ферми ϵ_F , h – число дырок ниже ϵ_F . Реакция протекает от исходной стадии с числом экситонов p_0 через промежуточные в направлении увеличения числа экситонов до значения $\bar{n}$, характеризующего состояние составного ядра, при котором в системе достигается статистическое равновесие. При этом на каждой её стадии существует возможность эмиссии частиц в конечные открытые каналы реакции.



точки – эксперимент; линии – теоретический анализ:
1 – одноступенчатый процесс передачи нуклона; 2 – предравновесный процесс; 3 – равновесный процесс; 4 – полное сечение

Рисунок 5. Интегральные сечения реакций (p, xp) на ядре ^{58}Ni

Таблица 3. Экспериментальные парциальные сечения реакций (p, xp) на ядре ^{58}Ni

Реакция	Энергетический диапазон, МэВ	σ , (мб)
^{58}Ni (p, xp)	5–30	712 ± 10

В рамках этой модели принимается, что ядро имеет набор эквидистантных одночастичных состояний, а состояния ядра в целом характеризуются числом частиц p (выше уровня Ферми) и дырок h (ниже уровня Ферми). Взаимодействие, в результате которого ядро переходит из одного состояния в другое, счита-

ется двухчастичным и достаточно слабым, чтобы можно было применить теорию возмущений при вычислении вероятностей переходов. Энергия системы сохраняется. В двухкомпонентной модели протонные и нейтронные степени свободы учитываются раздельно.

Теоретический анализ экспериментальных результатов был выполнен в рамках модифицированной версии экситонной модели. При анализе экспериментальных данных исследуемых реакций использовалась написанная на языке Фортран программа *PRECO-2006* [10]. Во всех расчетах (программа *PRECO-2006*) в качестве исходной бралась $(p_\pi, h_\pi, p_\nu, h_\nu) = (1, 0, 0, 0)$ частично-дырочная конфигурация. Нормировочный коэффициент K_g принимался равным 15 МэВ. При параметризации квадрата матричных элементов использовались значения нормировочных констант: $K_{\pi\pi}:K_{\pi\nu}:K_{\nu\nu}=2200:900:900 \text{ МэВ}^2$. Эти значения параметров являются рекомендованными в программе *PRECO-2006*. При определении $\sigma_{a,pre}$ использовались параметры оптического потенциала Becchetti-Greenlees [11] для протонов.

На рисунке 5 приведено сравнение теоретических и экспериментальных данных по интегральным сечениям реакций (p, xp) на ядре ^{58}Ni . Получено удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных значений в области энергий, соответствующих предравновесному механизму. Из сравнения интегральных спектров следует, что основной вклад в жесткую часть интегрального сечения реакций (p, xp)

на всех исследуемых ядрах обусловлен предравновесным механизмом. Вклад одноступенчатых механизмов в реакции (p, xp) незначителен. Испарительная (низкоэнергетическая) часть сечения в рамках используемой версии экситонной модели коррелирует с результатами расчетов в рамках формализма распада составного ядра Вайскопфа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые измерены экспериментальные дважды-дифференциальные и интегральные спектры протонов в широком диапазоне энергий и углов из реакций, инициированных протонами с энергией 30 МэВ на ядре ^{58}Ni . Определены экспериментальные парциальные сечения исследованной реакции. Выполнен теоретический расчет экспериментальных инклюзивных спектров указанных реакций в рамках экситонной модели предравновесного распада. Сечения в реакциях (p, xp) на исследованных ядрах при энергии протонов 30 МэВ в высокоэнергетической области преимущественно формируются механизмом предравновесного распада, а в низкоэнергетической – механизмом распада из составного ядра. Вклад одноступенчатых прямых процессов является незначительным. Полученные экспериментальные результаты восполняют базу ядерных данных по сечениям реакций и могут быть использованы при конструировании безопасных и безотходных гибридных ядерно-энергетических установок.

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования научных, научно-технических программ МОН РК, грант BR05236494.

ЛИТЕРАТУРА

- Bertrad F.E. and Peelle R.W. Complete hydrogen and helium particle spectra from 30 to 60 MeV proton bombardment of nuclei with $A=12$ to 129 and comparison with the intranuclear cascade model // *Phys. Rev.* – 1973. – N 3. – P. 1045–1064.
- Риволь Ж.-П. Электроядерная установка для уничтожения ядерных отходов // *УФН.* – 2003. – Т. 173, Вып. 7. – С. 747–755.
- Герасимов А.С., Киселев Г.В. Научно-технические проблемы создания электроядерных установок для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и одновременного производства энергии (российский опыт) // *ЭЧАЯ.* – 2001. – Вып. 1, №32. – С. 143–188.
- McGill W.F., Carlson R.F., Short T.H., Cameron J.M., Richardson J., Slaus I., van Oers W.T.H., Verba J.W., Margaziotis D.J., Doherty P. Measurements of the proton total reaction cross section for light nuclei between 20 and 48 MeV // *Phys. Rev.* – 1974. – Vol. C10, № 6. – P. 2237–2246.
- Menet J.J.H., Gross E.E., Malanify J.J., Zucker A. Total-reaction-cross-section measurements for 30–60 MeV protons and imaginary optical potential // *Phys. Rev.* – 1971. – Vol. C4, № 4. – P. 1114–1129.
- Wilkins B.D., Igo G. 10-MeV Proton Reaction Cross Sections for Several Elements // *Phys. Rev.* – 1963. – Vol. 129. – P. 2198–2206.
- Dicello J.F., Igo G.J., Roush M.L. Proton Total Reaction Cross Sections for 22 Isotopes of Ti, Fe, Ni, Cu, Zn, Zr, and Sn at 14.5 MeV // *Phys.Rev.* – 1967. – Vol.157. – P.1001-1015.
- Арзуманов А.А., Неменов Л.М., Анисимов О.И. и др. Изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов // *Изв. АН КазССР, сер. физ.-мат.* – 1973. – № 4. – С.6-15.
- Griffin J.J. Statistical model of intermediate structure // *Phys.Rev. Lett.* – 1966. – Vol. 17. – P. 478–481.
- Kalbach C., PRECO-2006: Program for Calculating Pre-equilibrium and Direct Reaction Double Differential Cross-Sections // *LA-10248-MS*, February 2006.
- Becchetti F. D., Greenlees G.W. Nucleon-nucleus optical-model parameters, $A340$, $E<50 \text{ MeV}$ // *Phys. Rev.* – 1969. – C 182. – P.1190–1209.

**^{58}Ni ЯДРОСЫНДА ЭНЕРГИЯСЫ 30 МэВ ПРОТОНДАР ӘСЕРІНЕН БОЛАТЫН РЕАКЦИЯЛАРДАҒЫ
ЗАРЯДТАЛҒАН ЖЕҢІЛ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ЭМИССИЯСЫН ЗЕРТТЕУ**

^{1,2)} Т.К. Жолдыбаев, ^{1,3)} Ж. Мукан, ¹⁾ Б.М. Садыков, ^{1,2)} М. Насурлла, ¹⁾ Б.А. Дуйсебаев,
⁴⁾ Н.О. Садуев, ²⁾ А.Ж. Дуйсенбаева, ²⁾ И. Жумадилов, ³⁾ Н. Байбекова

¹⁾ *Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

²⁾ *ал-Фараби ат. Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан*

³⁾ *Гумилев ат. Еуразия Ұлттық Университеті, Нұр-Сұлтан, Қазақстан*

⁴⁾ *Ашық түрдегі Ұлттық Нанотехнологиялық зертхана, ал-Фараби ат.
Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан*

Жұмыс энергиясы 30 МэВ протондардың ^{58}Ni ядросымен әсерлесуінде пайда болатын екінші протондардың инклюзивті спектрлерін зерттеумен байланысты. (p, xp) реакциясының екінші ретті дифференциалдық және интегралдық қималары толық парциалды қиманы ары қарайғы анықтаумен алынды. Тәжірибелік спектрлерді талдау *PRECO-2006* есептеуіш бағдарламасы аясында тепе-теңдік алдындағы ыдыраудың экситонды моделінің өзгертілген нұсқасы негізінде жасалынды. Тепе-теңдік, тепе-теңдік алдындағы және тура механизмдердің интегралды қиманы құрудағы үлестері анықталды. Эксперимент нәтижелері ядролық реакциялар теориясын әзірлеуде, сондай-ақ қауіпсіз әрі қалдықсыз гибриді атом электрстанцияларын әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

**INVESTIGATION OF THE EMISSION OF LIGHT CHARGED PARTICLES IN REACTIONS
INITIATED BY PROTONS WITH 30 MeV ENERGY AT ^{58}Ni NUCLEUS**

^{1,2)} T.K. Zholdybayev, ^{1,3)} Zh. Mukan, ¹⁾ B.M. Sadykov, ^{1,2)} M. Nassurlla, ¹⁾ B.A. Duysebayev,
⁴⁾ N.O. Saduyev, ²⁾ A.Zh. Duysenbayeva, ²⁾ I. Zhumadilov, ³⁾ N. Baybekova

¹⁾ *Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

³⁾ *Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

⁴⁾ *National Nanotechnology Laboratory of Open Type,
al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

The work related to the study of the inclusive spectra of secondary protons produced in the interaction of protons with energies of 30.0 MeV with the nucleus ^{58}Ni . Double-differential and integral cross sections of (p, xp) reaction have been received with further determination of their total partial cross sections. The analysis of the experimental spectra is based on a modified version of the exciton model of pre-equilibrium decay in the frame of code *PRECO-2006*. The contributions of compound, preequilibrium and direct mechanisms to the formation of the integral cross section are calculated. The experimental results can be used in developing new approaches in theory of nuclear reactions, as well as the design of safe and non-waste hybrid nuclear power plants.