

ФУНКЦИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ РЕАКЦИЙ, ПРОТЕКАЮЩИХ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ УСКОРЕННЫХ ДЕЙТРОНОВ С ЯДРАМИ ^{194}Pt ВБЛИЗИ КУЛОНОВСКОГО БАРЬЕРА

А. А. Кулько^а, Н. К. Скобелев^а, В. Крога^б, Ю. Э. Пенионжкевич^а,
Я. Мразек^б, В. Бурьян^б, З. Гонс^б, Е. Шимечкова^б, Ш. Пискорж^б,
А. Куглер^б, Н. А. Демёхина^а, Ю. Г. Соболев^а, Т. В. Чувильская^в,
А. А. Широкова^в, К. Кутербеков^г

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт ядерной физики АН ЧР, Ржеж, Чешская Республика

^в Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына Московского
государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

^г Евразийский национальный университет, Астана

На выведенном пучке циклотрона У-120М Института ядерной физики АН Чешской Республики в Ржеже проведены эксперименты по облучению мишеней из естественной Pt и ^{194}Pt , обогащенной дейтронами с энергиями 11,7 и 16,4 МэВ. В реакциях $^{\text{nat}}\text{Pt} + d$ и $^{194}\text{Pt} + d$ измерены сечения образования изотопов ^{194}Au , ^{195}Au и $^{195\text{m}}\text{Pt}$ вблизи кулоновского барьера реакции. Проведены расчеты сечений образования этих же изотопов для различных энергий дейтронов с использованием программ EMPIRE 2.18 и TALYS 1.2. Расчетные значения сечений образования изотопов ^{194}Au , ^{195}Au и $^{195\text{m}}\text{Pt}$ со стандартным набором параметров, заложенных в программы, не могут достаточно надежно описать измеренные функции возбуждения для реакций в исследуемой области энергий дейтронов.

Experiments were carried out at the U-120M cyclotron of the Nuclear Physics Institute of the Czech Republic in Řež using extracted beams of deuterons with energies of 11.7 and 16.4 MeV. The irradiated targets were made of natural Pt and of enriched ^{194}Pt . For the two reactions $^{\text{nat}}\text{Pt} + d$ and $^{194}\text{Pt} + d$ cross sections for the production of the isotopes ^{194}Au , ^{195}Au and $^{195\text{m}}\text{Pt}$ near the Coulomb barrier were measured. Also, calculations of these cross sections at different energies of the deuteron beam were performed with the programs EMPIRE 2.18 and TALYS 1.2. The values calculated for the cross sections with a standard set of parameters cannot reliably describe the measured excitation functions for the reactions in studied range of deuteron energy.

PACS: 25.40.-h; 25.70.Jj; 25.70.Hi

ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты с мишенями естественного изотопного состава дают необходимую информацию о механизме взаимодействия, характерном в целом для данного элемента, и не позволяют исследовать отдельные каналы реакций, зависящие от нуклонного состава взаимодействующих ядер. Измерения с использованием разделенных изотопов в качестве мишеней проводятся для определения влияния кулоновского барьера и энергии связи нуклонов, изучения изотопической зависимости ядерных характеристик, тестирования расчетов в рамках различных моделей, а также получения сведений о плотности уровней и их заселенности в реакциях. Изготовление мишеней с высокой степенью содержания отдельных изотопов требует дорогостоящей технологии и более детальных и тщательных измерений.

Выполнение экспериментов такого типа на пучках ускоренных частиц способствует совершенствованию методов ускорения ионов, технологии изготовления тонких мишеней из радиационно-стойких и термостойких материалов. Длительные эксперименты на радиоактивных пучках малой интенсивности (10^5 – 10^7 с⁻¹) и пучках заряженных частиц большой интенсивности (10^{12} с⁻¹ и выше) стимулируют совершенствование методов измерения потоков ускоренных частиц и контроля их интенсивности. Редкие распады образующихся в реакциях радиоактивных атомных ядер и малые интенсивности наведенной активности продуктов реакций в облучаемых мишенях заставляют создавать все более совершенные методики регистрации редких распадов и низкой активности.

Наши исследования реакций на мишенях из обогащенного изотопа платины — ¹⁹⁴Pt — были предприняты с целью изучения прямых процессов, протекающих на пучках легких слабосвязанных ядер, таких как дейтроны, ⁶He, ⁶Li.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментов на разделенных изотопах Pt, в частности ¹⁹⁴Pt, использовались тонкие мишени из ¹⁹⁴Pt (обогащение свыше 80%), изготовленные методом электрохимического осаждения из раствора платины в хлористо-водородной кислоте на подложку из титановой фольги толщиной 2,1 мкм. Вещество осаждалось на подложке площадью 1,22 см². После осаждения вещества каждая мишень прокаливалась. Количество вещества определялось взвешиванием и пересчитывалось на изотопное содержание ¹⁹⁴Pt. Было изготовлено десять мишеней из Pt с плотностью слоя от 0,55 до 0,9 мг/см². Дополнительная проверка на содержание ¹⁹⁴Pt в мишенях и их толщину проводилась методом рентгенофлуоресцентного анализа.

Эксперименты были проведены на выведенном пучке дейтронов циклотрона У-120М Института ядерной физики АН Чешской Республики в Ржеже с использованием активационной методики [1]. Облучены две сборки мишеней пучком дейтронов с начальной энергией 11,7 и 16,4 МэВ соответственно. Ускоренный пучок дейтронов был сфокусирован до размера 5 × 5 мм. Энергия дейтронов определялась с помощью магнитного монохроматора, через который пропускался пучок. Первоначальный энергетический разброс пучка был меньше 100 кэВ. Энергетический разброс также был измерен с помощью полупроводниковых Si-детекторов по упругому пику рассеянных дейтронов на мишени из Au и составил величину ±0,1 МэВ. В центре реакционной камеры на пути пучка

дейтронов устанавливались сборки мишеней, состоящих из фольг естественной Pt толщиной 3 мкм и из ^{194}Pt различной толщины (от 0,5 до 0,9 мг/см²), нанесенных на титановые подложки толщиной 2,1 мкм. В качестве мониторинговой реакции использовалась реакция $^{nat}\text{Ti}(d, x)^{48}\text{V}$ [2]. В сборке между мишенями для сброса энергии дейтронов устанавливались Al-фольги различной толщины — от 5 до 50 мкм. Средняя энергия падающих дейтронов и их энергетический разброс в каждой фольге были рассчитаны с помощью кода SRIM 2011 [3] и программы LISE++ [4]. В рассматриваемых сборках мишеней из Pt проводилось снижение энергии дейтронов с 11,7 до 2 МэВ в одной и с 16,4 до 10 МэВ в другой. Ток пучка дейтронов, прошедших через сборку, измерялся с помощью цилиндра Фарадея. Сведения о собранном в цилиндре Фарадея заряде автоматически записывались в память системы сбора данных каждую минуту. В данных экспериментах мы ограничились относительно низкой интенсивностью дейтронов (от 1 до 10 нА), что позволило практически сразу после облучения мишеней начать измерения наведенной в них

Таблица 1. Характеристики распада исследуемых изотопов [5]

Ядро-продукт	$T_{1/2}$	E_γ , кэВ	I_γ , %
^{48}V	15,97 сут	944,104	7,76
		983,517	99,98
		1312,096	97,5
^{195m}Pt	4,02 сут	98,85	11,4
		129,7	2,83
^{194}Au	38,02 ч	328,455	61
		293,545	10,4
^{195}Au	186,09 сут	98,85	10,9
^{195m}Au	30,5 с	261,75	68

активности. Цикл облучения каждой сборки длился от 4 до 8 ч. После окончания облучения активность, наведенная в мишенях из ^{nat}Pt и ^{194}Pt на Ti-подложке, измерялась несколько раз с учетом периодов полураспада регистрируемых изотопов. Измерения были начаты спустя 30 мин после окончания облучения. Все измерения проводились на предварительно откалиброванном HPGe-детекторе с 50 %-й эффективностью по отношению к NaI и разрешением (ПШПВ) 1,8 кэВ для энергии γ -квантов 1,3 МэВ. Образовавшиеся продукты ядерных реакций идентифицировались по энергии характерных γ -линий и периодам полураспада этих ядер. В табл. 1 приведены значения энергий и интенсивностей γ -переходов, а также периодов полураспада изотопов Au, Pt и V, использовавшиеся для идентификации и определения их выходов [5]. Расчет сечений образования продуктов ядерных реакций V, Au и Pt проводился по методике, описанной в работе [1].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для дополнительного контроля интенсивности потока дейтронов, прошедшего через сборку мишеней, была измерена мониторинговая реакция $^{nat}\text{Ti}(d, x)^{48}\text{V}$. На рис. 1 приведены значения сечений мониторинговой реакции $^{nat}\text{Ti}(d, x)^{48}\text{V}$, измеренных в настоящей работе, и функция возбуждения образования ^{48}V , рекомендованная для стандартизации в [2]. Из сравнения видно, что измеренные нами сечения реакции ^{48}V находятся в хорошем согласии с рекомендованными значениями.

На рис. 2 представлен γ -спектр, полученный при измерении наведенной активности в мишени из ^{194}Pt , нанесенной на титановую подложку. В представленном γ -спектре четко выделяются изотопы, образовавшиеся при облучении в ^{194}Pt -мишени и на Ti-подложке.

На рис. 3 приведены функции возбуждения образования изотопов ^{194}Au и ^{195}Au в реакциях на дейтронах при облучении мишеней из $^{\text{nat}}\text{Pt}$. Изотоп ^{195}Pt стабилен, поэтому его выход был измерен нами на $^{\text{nat}}\text{Pt}$ только в изомерном состоянии (^{195m}Pt) (рис. 4). Значения сечений реакций (рис. 3, 4), измеренных в настоящей работе на мишенях из $^{\text{nat}}\text{Pt}$ (^{198}Pt — 7,2 %, ^{196}Pt — 25,3 %, ^{195}Pt — 33,8 %, ^{194}Pt — 32,9 %, ^{192}Pt — 0,8 %), находятся в хорошем согласии с ранее опубликованными данными [6, 7]. Из функций возбуждения (рис. 3, 4) нельзя определить величины сечений для реакций (d, p) , (d, n) и $(d, 2n)$ на отдельных изотопах, поэтому нами были проведены измерения сечений этих реакций только на одном из изотопов платины — ^{194}Pt (обогащение свыше 80 %). Необходимо отметить, что при измерении наведенной активности в режиме off-line невозможно было выделить образование относительно короткоживущего изотопа ^{195m}Au в изомерном состоянии ($T_{1/2} = 30,5$ с), а также определить выход стабильного изотопа ^{195}Pt , образовавшегося в (d, p) -реакции.

На рис. 5, а и б приведены сечения реакций $^{194}\text{Pt}(d, n)^{195}\text{Au}$, $^{194}\text{Pt}(d, 2n)^{194}\text{Au}$ и $^{194}\text{Pt}(d, p)^{195m}\text{Pt}$ в зависимости от энергии бомбардирующих дейтронов. Механизм ре-

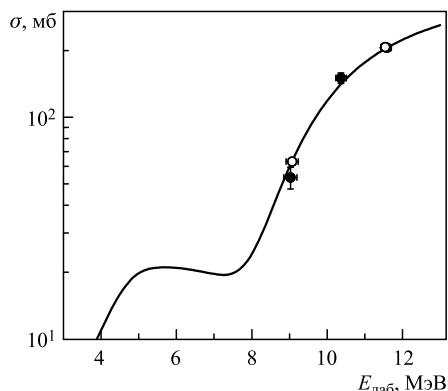


Рис. 1. Мониторная реакция $^{\text{nat}}\text{Ti}(d, x)^{48}\text{V}$. ●, ○ — данные настоящего эксперимента, кривая — рекомендованные значения [3]

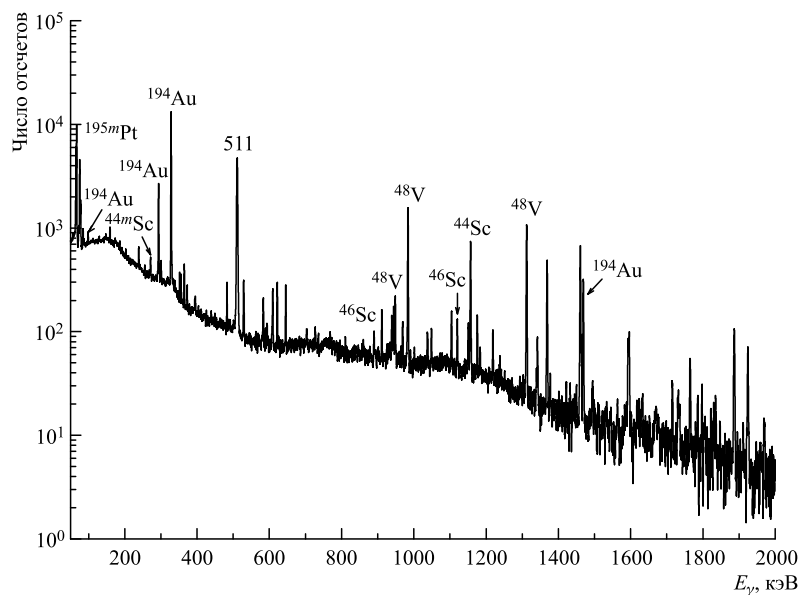


Рис. 2. Гамма-спектр, полученный при измерении мишени из ^{194}Pt на титановой подложке в течение 1 ч, облученной дейтронами с энергией 14 МэВ

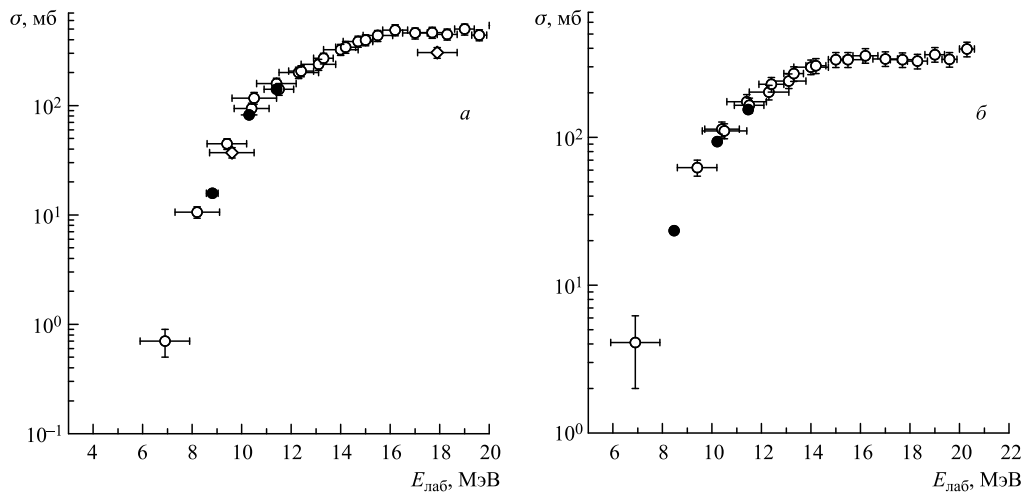


Рис. 3. Функции возбуждения для реакций ${}^{\text{nat}}\text{Pt}(d, x){}^{194}\text{Au}$ (а) и ${}^{\text{nat}}\text{Pt}(d, x){}^{195}\text{Au}$ (б). ● — результаты настоящей работы; ○ — данные из работ [6, 7]

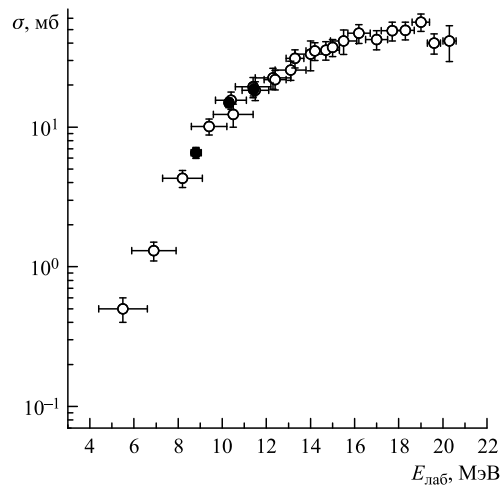


Рис. 4. Функция возбуждения для реакции ${}^{\text{nat}}\text{Pt}(d, x){}^{195m}\text{Pt}$. ● — результаты настоящей работы; ○ — данные работы [6]

акции (d, n) включает как образование составного ядра с последующим испарением нейтрона, так и захват протона из дейтрона. Последний канал реакции на тяжелых мишенях характеризуется меньшим сечением, чем на легких. При этом в случае тяжелых ядер-мишеней в $(d, 2n)$ -реакциях не наблюдается ярко выраженного максимума вблизи кулоновского барьера (см. рис. 5, а). Реакция $(d, 2n)$ обычно протекает через составное ядро, и ее максимум наблюдается при более высокой энергии возбуждения, чем для (d, n) -реакции. Функция возбуждения для (d, p) -реакции, с образованием ${}^{195m}\text{Pt}$ (рис. 5, б),

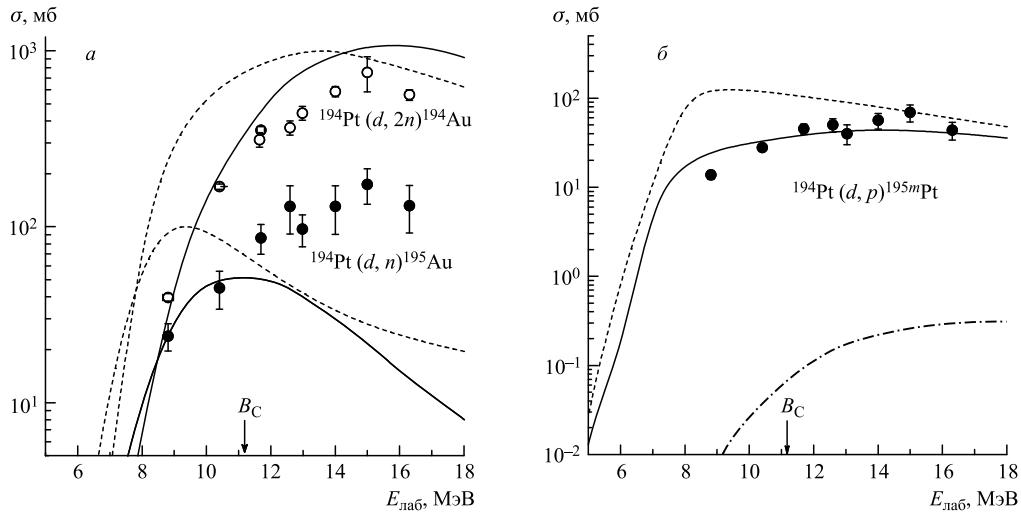


Рис. 5. а) Функции возбуждения для реакций $^{194}\text{Pt}(d, n)^{195}\text{Au}$ (●) и $^{194}\text{Pt}(d, 2n)^{194}\text{Au}$ (○) и их сравнение с теоретическими расчетами по программе EMPIRE 2.18 (сплошные кривые) и TALYS 1.2 (пунктирные). б) Функция возбуждения для реакции $^{194}\text{Pt}(d, p)^{195m}\text{Pt}$ (●) и ее сравнение с теоретическими расчетами по программе TALYS 1.2 (сплошная кривая — для ^{195m}Pt , пунктирная — для ^{195g}Pt) и EMPIRE 2.18 (штрихпунктирная кривая — для ^{195m}Pt)

имеет максимум вблизи кулоновского барьера ($B_C \approx 11,18$ МэВ), как и в случае других прямых реакций такого типа. Это объясняется тем фактом, что для слабосвязанных ядер эти реакции протекают в основном при касательных взаимодействиях.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 2 приведены значения Q для реакций, рассчитанные с помощью Q -калькулятора [8], которые могут протекать при взаимодействии дейтронов с ядрами ^{nat}Pt в рассматриваемом в эксперименте диапазоне энергий налетающих частиц.

Сравнительный анализ сечений образования ^{194}Au , ^{195}Au и ^{195m}Pt , полученных при бомбардировке дейтронами ^{nat}Pt и ^{194}Pt , показывает, что в указанном диапазоне энергий дейтронов ^{194}Au может образоваться в основном в реакции $^{194}\text{Pt}(d, 2n)$. Вклад реакций $^{195}\text{Pt}(d, 3n)^{194}\text{Au}$ и $^{196}\text{Pt}(d, 4n)^{194}\text{Au}$ в этом диапазоне энергий будет мал из-за больших отрицательных значений Q реакций. ^{195}Au может образоваться в реакциях $^{194}\text{Pt}(d, n)$ и $^{195}\text{Pt}(d, 2n)$. Этим объясняется относительно большое сечение образования этого изотопа (см. рис. 3, б). В работе [6] также приведена функция возбуждения для реакции $^{nat}\text{Pt}(d, x)^{195m}\text{Pt}$. Основной вклад в образование ^{195m}Pt вносят реакции $^{194}\text{Pt}(d, p)$ и $^{195}\text{Pt}(d, pn)$. Максимумы функций возбуждения реакций с образованием ^{195m}Pt на ^{nat}Pt и ^{194}Pt несколько смещены по энергии. В случае ^{nat}Pt максимум смещен в сторону больших энергий, так как с ростом энергии дейтронов значительный вклад может давать также реакция $^{195}\text{Pt}(d, d')$.

На рис. 5, а и б также приведены результаты модельных расчетов сечений образования изотопов ^{194}Au , ^{195}Au и ^{195m}Pt в реакции $^{194}\text{Pt} + d$ с использованием программ

Таблица 2. Значения Q реакции на изотопах платины для различных реакций на дейтронах [8]

Реакция	Q , МэВ
^{194}Pt (33 %)	
$^{194}\text{Pt}(d, p)^{195m}\text{Pt}$	3,88
$^{194}\text{Pt}(d, n)^{195}\text{Au}$	2,87
$^{194}\text{Pt}(d, 2n)^{194}\text{Au}$	-5,51
^{195}Pt (33,8 %)	
$^{195}\text{Pt}(d, 2n)^{195}\text{Au}$	-3,23
$^{195}\text{Pt}(d, 3n)^{194}\text{Au}$	-11,16
^{196}Pt (25,3 %)	
$^{196}\text{Pt}(d, 3n)^{195}\text{Au}$	-11,16
$^{196}\text{Pt}(d, 4n)^{194}\text{Au}$	-19,53

EMPIRE 2.18 [9] и TALYS 1.2 [10]. Из сравнения экспериментальных данных с расчетными видно, что эти программы (со стандартным набором параметров) не могут достаточно надежно описать измеренные функции возбуждения исследованных реакций в рассматриваемом диапазоне энергий. Код EMPIRE 2.18 неплохо описывает вид функций возбуждения вблизи кулоновского барьера реакции. Если с ростом энергии дейтронов описание реакции $(d, 2n)$ с использованием кода EMPIRE 2.18 можно считать удовлетворительным, то для реакции (d, n) с образованием ^{195}Au расчеты дают заниженные значения. Расчеты сечений этих реакций по программе TALYS 1.2 со стандартными заложенными в эту программу параметрами вообще не дают согласия с экспериментальными значениями сечений практически во всем диапазоне рассматриваемых энергий дейтронов. Трудности интерпретации реакций на дейтронах в рамках обычных механизмов ядерных реакций были недавно продемонстрированы

в работах [11, 12], где было показано, что для согласия с экспериментом в расчеты сечений реакций (d, p) и (d, n) в существующих модельных подходах необходимо учитывать неполное слияние и слияние после развала дейтрона.

При сравнении экспериментальных и расчетных по коду TALYS 1.2 сечений (d, p) -реакции с образованием ^{195m}Pt (рис. 5, б) наблюдается качественное согласие теории с экспериментом, за исключением подбарьерной области энергий. Обращают на себя внимание относительно большие сечения образования ^{195m}Pt по сравнению с сечениями образования изотопов ^{196m}Au , ^{198m}Au [6, 7]. Сечение образования ^{195}Pt в основном состоянии (^{195g}Pt) невозможно измерить, так как изотоп ^{195g}Pt стабилен. Исходя из литературных данных о сечениях (d, p) -реакций на тяжелых мишенях может быть сделана оценка полного сечения образования ^{195}Pt в области энергий вблизи кулоновского барьера. Принимая во внимание, что в этой массовой области сечение (d, p) -реакции должно быть в три-четыре раза выше, чем сечение (d, n) -реакции, которое было определено нами для энергии дейтронов 11,7 МэВ равным ~ 80 мб, можно дать оценку сечения (d, p) -реакции с образованием изотопа $^{195(m+g)}\text{Pt} \sim 240$ мб. Это значение близко к величине сечения, измеренного для реакции $^{197}\text{Au}(d, p)^{198}\text{Au}$ [13].

В работах [14, 15] было показано, что в реакциях с ядрами ^6Li дейтронный кластер проявляет себя как свободная частица. Интересно поэтому провести изучение и сравнение аналогичных по механизму реакций с образованием изотопов ^{194}Au и ^{195}Au , протекающих при бомбардировке мишеней из обогащенной ^{194}Pt не только дейтронами, но и ионами ^6Li .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В реакции $^{194}\text{Pt} + d$ вблизи кулоновского барьера измерены сечения образования изотопов ^{194}Au , ^{195}Au и ^{195m}Pt . Проведены расчеты сечений образования этих же изотопов для различных энергий дейтрона с использованием кодов EMPIRE 2.18 [10] и

TALYS 1.2 [11]. Из сравнения данных (рис. 5) видно, что со стандартным набором параметров расчетные значения сечений не могут достаточно надежно описать измеренные функции возбуждения. Аналогичные результаты были получены при сравнении расчетных и экспериментальных данных для реакций $^{45}\text{Sc} + d$ [1]. Код EMPIRE 2.18 неплохо описывает вид функций возбуждения реакции $(d, 2n)$ при энергиях вблизи кулоновского барьера реакции и выше. Однако для реакции (d, n) с образованием ^{195}Au расчеты по коду EMPIRE 2.18 дают заниженные значения. Расчеты по коду TALYS 1.2 для этих каналов реакции со стандартными значениями параметров не согласуются с экспериментальными значениями сечений практически во всем диапазоне рассматриваемых энергий дейтронов. Однако при сравнении расчетных и экспериментальных сечений (d, p) -реакции с образованием ^{195m}Pt (рис. 5, б) можно видеть, что, за исключением энергии дейтронов в подбарьерной области, наблюдается качественное согласие с расчетами по коду TALYS 1.2.

По-видимому, для более корректного описания экспериментальных данных в теоретических расчетах нужно учитывать вклад прямых каналов реакций и захвата продуктов стриппинга и развала [11, 12].

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 10-02-271а, 09-02-00196а, а также гранта полномочного представителя Правительства Чешской Республики в ОИЯИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Skobelev N. K. et al. Excitation Functions for the Radionuclide ^{46}Sc , Produced in the Irradiation of ^{45}Sc with Deuterons and ^6He // J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 2011. V. 38. P. 035106.
2. Tárkányi F. et al. // IAEA-TECDOC-1211. Beam Monitors Reaction. Coordinated Research Project. Vienna: IAEA, 2001. P. 77–80. Updated version, January 2007; <http://www-nds.iaea.org/medical>.
3. Ziegler J. F., Biersack J. P., Ziegler M. D. SRIM — The Stopping and Range of Ions in Matter, SRIM Code. <http://www.srim.org/>.
4. Tarasov O. B., Bazin D. LISE++: Radioactive Beam Production with In-Flight Separators // Nucl. Instr. Meth. B. 2008. V. 266. P. 4657; <http://groups.nsl.msu.edu/lise/>.
5. Chu S. Y. F., Ekström L. P., Firestone R. B. The Lund/LBL Nuclear Data, Search Version. 1999. <http://nucldata.nuclear.lu.se/nucldata/toi/>.
6. Tárkányi F. et al. Activation Cross-Sections of Deuteron Induced Reactions on Platinum // Nucl. Instr. Meth. B. 2004. V. 226. P. 490.
7. Ditrói F. et al. Excitation Functions of Long Lived Products in Deuteron Induced Nuclear Reactions on Platinum up to 40 MeV // Nucl. Instr. Meth. B. 2006. V. 243. P. 20.
8. <http://www.nndc.bnl.gov/qcalc/>
9. Kalbach C. Preequilibrium Reactions with Complex Particle Channels // Phys. Rev. C. 2005. V. 71. P. 034606; <http://www.talys.eu/>.
10. Herman M. et al. EMPIRE: Nuclear Reaction Model Code System for Data Evaluation // Nucl. Data Sheets. 2007. V. 108. P. 2655. <http://www-nds.iaea.org/empire218/>.
11. Avrigeanu M., Avrigeanu V. Deuteron Breakup Effects on Activation Cross Sections at Low and Medium Energies // J. Phys.: Conf. Ser. 2010. V. 205. P. 012014.
12. Šimecková E. et al. Low and Medium Energy Deuteron-Induced Reactions on $^{63,65}\text{Cu}$ Nuclei // Phys. Rev. C. 2011. V. 84. P. 014605.

13. *Casella V.* Radiochemical Studies of Some Low and Medium-Energy Nuclear Reactions Produced by Accelerated Triton, Deuteron and Proton. Report LA-5830-T. 1975.
14. *Скобелев Н. К. и др.* Функции возбуждения реакций полного и неполного слияния ${}^6\text{Li}$ с ядрами Pt // Письма в ЭЧАЯ. 2009. Т. 6, № 3(152). С. 342.
15. *Penionzhkevich Yu. E. et al.* Peculiarities of Nuclear Reactions Induced by ${}^6\text{He}$ and ${}^6\text{Li}$ Nuclei near the Coulomb Barrier // J. Mod. Phys. E. 2008. V. 17. P. 2349.

Получено 12 декабря 2011 г.