

ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ТЕСТЫ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО СЕПАРАТОРА ВАСИЛИСА

*А. В. Еремин^{а,1}, А. Г. Попеко^а, О. Н. Малышев^а,
А. Лопез-Мартенс^б, К. Хошильд^б, О. Дорво^в, Б. Галл^в,
В. И. Чепигин^а, А. И. Свирихин^а, А. В. Исаев^а, Е. А. Сокол^а,
М. Л. Челноков^а, А. Н. Кузнецов^а, А. А. Кузнецова^а, А. В. Белозеров^а,
К. Резинкина^б, Ф. Дешери^в, Ф. Ле Бланк^в, Ж. Пио^г, Дж. Гелот^д,
Д. Тонев^е, Е. Стефанова^е, Д. Пантелика^ж, К. Нита^ж,
Б. Андел^з, С. Мулинс^и, П. Джонс^и, С. Нтшангазе^и*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б CSNSM, IN2P3-CNRS, Орсе, Франция

^в IPHC, IN2P3-CNRS, Страсбург, Франция

^г GANIL, Кан, Франция

^д IVAC, Нью-Дели, Индия

^е ИЯИЯЭ, София

^ж IFIN, Бухарест

^з Университет им. Я. Коменского, Братислава

^и Лаборатория ускорительных и прикладных наук, Кейптаун, ЮАР

Приведены результаты первых экспериментальных тестов модернизированного сепаратора ВАСИЛИСА с использованием ускоренных ионов ^{22}Ne . Получены данные о коэффициентах трансмиссии ядер отдачи, синтезируемых в асимметричных комбинациях налетающий ион – ядро мишени. Полностью подтверждены ионно-оптические расчеты, заложенные в проект модернизации сепаратора.

The results of the first experimental tests of the modernized VASSILISSA separator with the use of accelerated ^{22}Ne ions are presented. Data have been obtained on the transmission coefficients of recoil nuclei synthesized in asymmetric combinations of the incident ion and target nuclei. Estimates from ion optical calculations performed in the design phase of the project of modernization of the separator are completely confirmed.

PACS: 23.60.+e; 25.70Gh; 29.30.-h; 29.40.Gx

¹E-mail: eremin@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

За прошедшие десятилетия для исследования поперечных сечений образования и свойств радиоактивного распада изотопов трансурановых элементов использовались различные типы реакций и методы идентификации. В наиболее удачных методиках при синтезе сверхтяжелых элементов использовались экспериментальные установки с кинематическим отделением ядер отдачи от фоновых продуктов, а также корреляционная обработка экспериментальных данных для генетически связанных распадов материнское ядро – дочернее ядро. Корреляционные цепочки имплантированных в детектор ядер отдачи приводят в область известных изотопов, что необходимо для достоверной идентификации материнского ядра. В будущем экспериментальная техника как для сепарации ядер отдачи, так и для регистрации различных видов излучений, испускаемых исследуемыми ядрами, может быть улучшена, что даст новые возможности для изучения и поиска новых изотопов и получения новых данных о распадах известных ядер.

В последние годы рентгеновская и γ -спектметрия все более широко применяется в экспериментах по изучению свойств радиоактивного распада трансфермиевых элементов. Вследствие невысокой эффективности регистрации (несколько процентов), большого набора возможных энергий рентгеновских и γ -квантов, частично перекрывающихся для различных химических элементов, рентгеновские и γ -детекторы могут использоваться только как дополнительные методы идентификации. γ -детектирующие системы оказываются чрезвычайно продуктивными в экспериментах по синтезу и изучению свойств радиоактивного распада тяжелых ядер в комбинации с детекторами, регистрирующими α - и β -распад тяжелых ядер, и, будучи расположенными в фокальной плоскости сепаратора ядер отдачи, имеют фоновые загрузки на много порядков меньше, чем в экспериментах без использования сепараторов. Поэтому одним из основных направлений является совершенствование экспериментальных методик и проведение экспериментальных исследований с использованием самых последних разработок в области детектирующих систем.

В течение последних 25 лет кинематический сепаратор ядер отдачи ВАСИЛИСА (VASSILISSA) [1–3] использовался для исследования поперечных сечений образования и свойств радиоактивного распада ядер — остатков испарения (ЯО), синтезируемых в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами, ускоренными на циклотроне У-400 ЛЯР ОИЯИ. В результате экспериментов, проведенных с использованием сепаратора ВАСИЛИСА, был синтезирован ряд новых изотопов трансактинидных элементов и измерены поперечные сечения их образования. В ходе экспериментальной работы был набран большой объем данных относительно поперечных сечений формирования ЯО, синтезируемых в асимметричных реакциях [4].

В 2004 г. на сепараторе ВАСИЛИСА были начаты эксперименты по детальному исследованию свойств радиоактивного распада и изучению структуры ядерных уровней изотопов трансфермиевых элементов. В сотрудничестве с группой физиков из институтов Франции (CSNSM, Орсе, и IPHC, Страсбург) на сепараторе ВАСИЛИСА была создана комбинированная детектирующая установка GABRIELA (Gamma Alpha Beta Recoil Investigations with the ELectromagnetic Analyzer), состоящая из семи Ge-детекторов для регистрации рентгеновских и γ -квантов, испускаемых исследуемыми ядрами, а также сборки из мультистриповых кремниевых детекторов, обеспечивающих регистрацию осколков спонтанного деления, α - и β -излучений в геометрии, близкой к 4π [5].

В процессе экспериментов исследовались свойства распада и структура изотопов No и Lr, синтезируемых в реакциях $^{48}\text{Ca} + ^{207,208}\text{Pb} \rightarrow ^{255,256}\text{No}^*$, $^{48}\text{Ca} + ^{209}\text{Bi} \rightarrow ^{257}\text{Lr}^*$, а также их дочерних ядер [6–9]. Особый интерес для спектроскопических исследований представляют нейтроноизбыточные изотопы элементов в области No–Sg, где существует переход от нейтронной подоболочки $N = 152$ к подоболочке с $N = 162$, а сечения образования этих изотопов достаточно высоки. Попытка использовать асимметричную комбинацию $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U} \rightarrow ^{260}\text{No}^*$ для исследования свойств нейтроноизбыточных изотопов нобелия–фермия показала, что несмотря на высокую интенсивность пучков ускоренных ионов ^{22}Ne (до 10^{13} част./с) и достаточно большое сечение образования (порядка 100 нб) для получения приемлемой статистики необходимо существенное (примерно в три раза, т. е. до величины 10–15 %) повышение эффективности транспортировки медленных ЯО от мишени кинематического сепаратора до фокальных детекторов. В этом случае для исследования нейтроноизбыточных изотопов 104-го и 105-го элементов с использованием ЯО- α - γ и ЯО- α - β совпадений достаточная статистика может быть получена в эксперименте продолжительностью около 1 мес.

Накопленный опыт позволил сформулировать требования для модернизации сепаратора ВАСИЛИСА, сделать ионно-оптические расчеты и спроектировать необходимое оборудование [10–12]. В начале 2013 г. новый кинематический сепаратор (SHELS, Separator for Heavy Element Spectroscopy) прошел вакуумные и высоковольтные тесты.

В настоящей работе представлены результаты первых экспериментальных тестов сепаратора SHELS с использованием ускоренных ионов ^{22}Ne , проведенных в мае-июле 2013 г.

ОПИСАНИЕ УСТАНОВКИ

Синтез нейтроноизбыточных изотопов трансфермиевых элементов в реакциях полного слияния возможен только с использованием асимметричных комбинаций налетающий ион – ядро мишени. В этом случае в основном используются бомбардирующие ионы типа $^{16,18}\text{O}$ и $^{20,22}\text{Ne}$ совместно с мишенями из изотопов урана и трансурановых элементов. Сечения образования ядер — остатков испарения в подобных реакциях достаточно велики (сотни пикобарн – десятки нанобарн) [13], но вследствие малой скорости после вылета из мишени ЯО имеют очень широкие зарядовые, угловые и энергетические распределения [2, 14], что приводит к резкому уменьшению коэффициента трансмиссии таких ЯО для любого кинематического сепаратора.

Ионно-оптические расчеты, проведенные с использованием метода, описанного в работе [14], показали, что у сепаратора ВАСИЛИСА основным местом, ограничивающим прохождение медленных ЯО, являются электростатические дефлекторы. Расстояние между пластинами дефлекторов составляет 15 см, эффективная длина среднего дефлектора — 91 см, первого и третьего — 47 см [1, 2]. Новая ионно-оптическая схема модернизированного сепаратора предполагает замену электростатического сепаратора (фильтра энергий) на последовательное чередование электростатических и магнитных полей (фильтр скоростей), рис. 1.

Конструкция крепления пластин дефлекторов позволяет менять расстояние между ними от 10 до 20 см (рис. 2, слева). При изучении симметричных реакций типа $^{136}\text{Xe} + ^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{272}\text{Hs}^*$ имеется возможность, сдвинув пластины, получить напряженность электростатического поля 40 кВ/см (для сепаратора ВАСИЛИСА максимальное значение

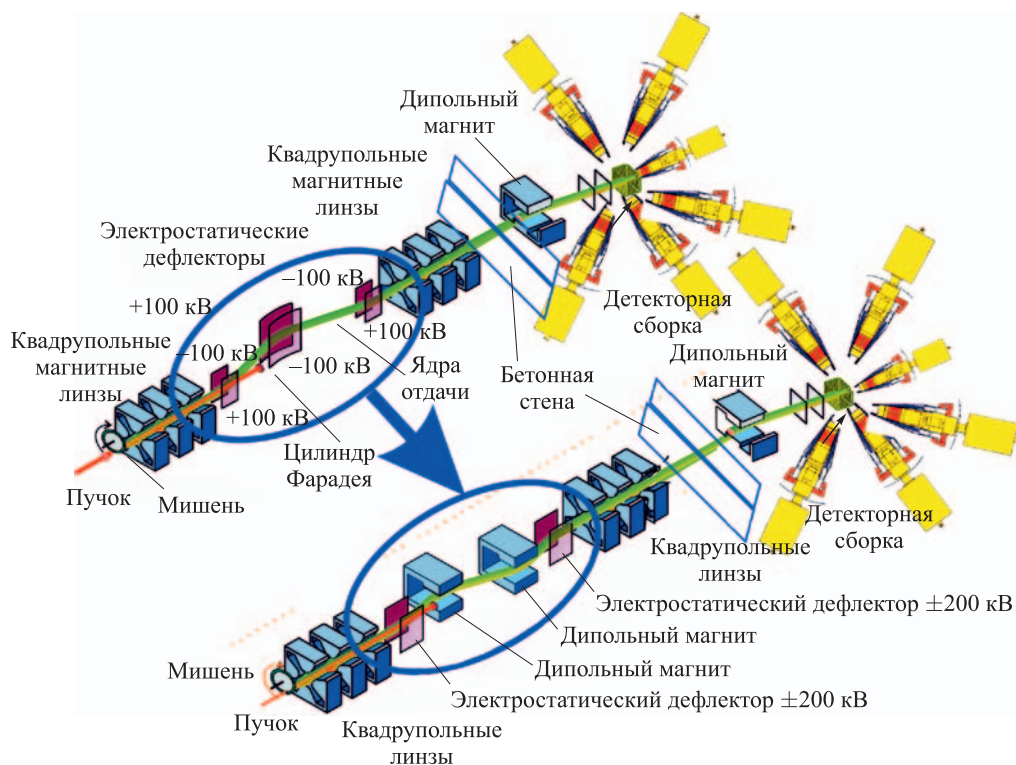


Рис. 1. Схема модернизации сепаратора. Сепарирующая часть, состоящая из трех электростатических deflectоров, заменена на комбинацию электростатических и магнитных полей — фильтр скоростей



Рис. 2. Слева — электростатические deflectоры, конструкция которых позволяет менять расстояние между пластинами; справа — модернизированный сепаратор, готовый к проведению экспериментов

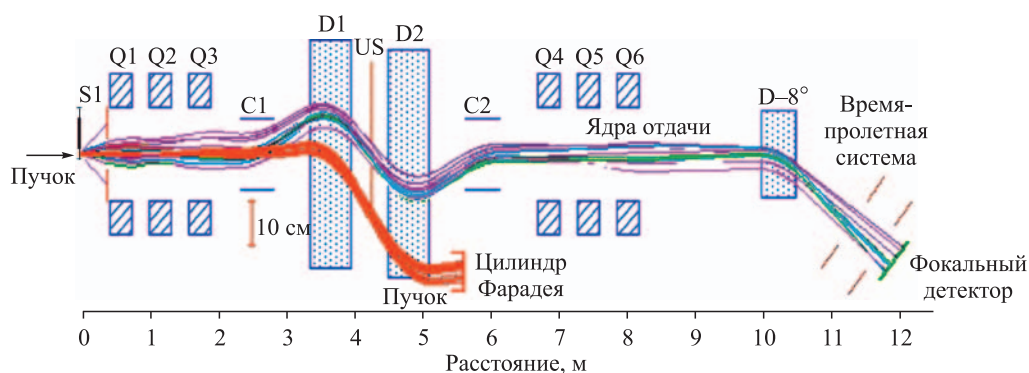


Рис. 3. Расчетные огибающие траекторий ядер отдачи и пучка ускоренных ионов для реакции полного слияния $^{22}\text{Ne} + ^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{220}\text{Ra}^*$

было 20 кВ/см). Для асимметричных комбинаций расстояние между пластинами устанавливается 20 см, эффективная длина дефлекторов в этом случае составляет величину 66 см.

Расчеты показывают, что новая ионно-оптическая схема — фильтр скоростей позволяет существенно увеличить эффективность транспортировки исследуемых продуктов реакций полного слияния по сравнению с предшествующим вариантом (рис. 3).

Модernизированный сепаратор ВАСИЛИСА–SHELS выполнен по схеме QQQ-E-D-D-E-QQQ-D (Q — квадрупольная линза, E — электростатический дефлектор, D — дипольный магнит). Для расчетов была выбрана типичная асимметричная реакция $^{22}\text{Ne} + ^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{220}\text{Ra}^*$, которая часто применяется как тестовая, для нее с использованием сепаратора ВАСИЛИСА были детально измерены сечения образования изотопов Ra [15]. В соответствии с расчетами в угловой акцептанс установки (положение S1 на рис. 3) попадают примерно 30% ядер отдачи, образовавшихся в мишени в результате вышеупомянутой реакции полного слияния. При размере фокального детектора 60×60 мм в нем оказывается 20% ядер, попавших в апертуру установки (6% от общего количества образовавшихся ЯО). Для сепаратора ВАСИЛИСА эта величина составляла 10%, т. е. примерно 3% от общего числа ЯО. При увеличении размера фокального детектора до 100×100 мм количество ЯО, вбитых в детектор, увеличивается до 32% от числа попавших в апертуру установки (14% от общего количества образовавшихся ЯО).

Как уже отмечалось выше, важным моментом является совершенствование детектирующей системы GABRIELA с целью увеличения эффективности детектирования γ -квантов и конверсионных электронов, испускаемых исследуемыми ядрами [16]. Повышение эффективности детектирования γ -квантов в три раза (от 10 до 30% в энергетическом диапазоне 100–200 кэВ) позволяет повышать вероятность определения α – γ -корреляций и, соответственно, изучать структуру уровней и наличие изомерных состояний для изотопов более тяжелых элементов, имеющих сечения образования в реакциях полного слияния с тяжелыми ионами вплоть до нескольких пикобарн. Усовершенствование детектирующей системы сепаратора запланировано в 2014–2015 гг.

Монтажные работы, юстировка ионно-оптических элементов модернизированного сепаратора завершились осенью 2012 г. Вакуумные и высоковольтные испытания были успешно завершены к весне 2013 г.

Ввод в эксплуатацию сепаратора ядер отдачи SHELS состоялся в мае 2013 г. Первичные измерения эффективности трансмиссии и настройка ионно-оптических элементов сепаратора производились с использованием α -источника, находящегося в позиции мишени. С использованием α -источника было измерено, на сколько увеличился угловой акцептанс установки. Увеличение, по сравнению со старой геометрией установки, составило фактор 2.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В мае-июле 2013 г. на ускорителе У-400 ЛЯР ОИЯИ были проведены первые тестовые эксперименты по измерениям эффективности транспортировки ядер отдачи с мишенями ^{198}Pt и ^{197}Au . Вращающаяся мишень ^{198}Pt была изготовлена методом электроосаждения, имела толщину $0,25 \text{ мг/см}^2$, толщина Ti-подложки составляла $1,6 \text{ мкм}$. Неподвижная мишень ^{197}Au располагалась на 5 см ближе к входу сепаратора, была изготовлена методом напыления на $1,5\text{-мкм}$ Ti-подложку, имела толщину $0,25 \text{ мг/см}^2$. В качестве фокального детектора использовался двусторонний многостриповый кремниевый детектор размером $60 \times 60 \text{ мм}$, 48×48 стрипов [17].

В качестве тестовых использовались следующие реакции полного слияния: $^{22}\text{Ne}(^{238}\text{U}, 4-5n)^{255-256}\text{No}$, $^{22}\text{Ne}(^{208}\text{Pb}, 4n)^{226}\text{U}$ и $^{22}\text{Ne}(^{206}\text{Pb}, 4n)^{224}\text{U}$.

На рис. 4 приведен спектр α -частиц, испускаемых при распаде изотопов, синтезируемых в реакции полного слияния $^{22}\text{Ne} + ^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{220}\text{Ra}^*$. Полученное в ходе экспериментов разрешение фокального детектора составило 20 кэВ (для одного стрипа) при комнатной температуре детектора.

Определение эффективности транспортировки ядер отдачи чрезвычайно важно для последующего определения поперечных сечений образования ядер — остатков испарения. Для модернизированного сепаратора этот параметр может быть найден путем сравнения с экспериментальными данными, полученными ранее. Так, в случае реакции $^{22}\text{Ne} + ^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{220}\text{Ra}^*$ (рис. 5) из сравнения с имеющимися данными [15] для сечений

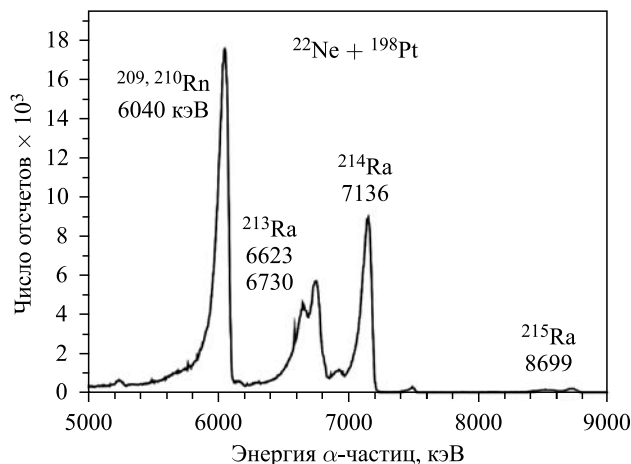


Рис. 4. Спектр α -частиц, испускаемых при распаде изотопов, синтезируемых в реакции полного слияния $^{22}\text{Ne} + ^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{220}\text{Ra}^*$

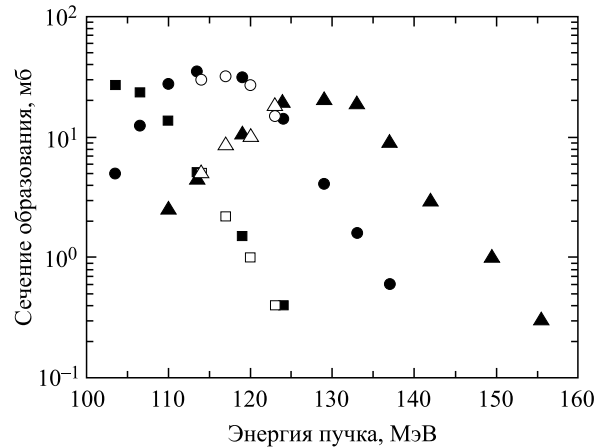


Рис. 5. Сравнение полученных ранее данных для сечений образования изотопов $^{213,214,215}\text{Ra}$ (темные символы: \blacksquare — 5n-канал, \bullet — 6n-канал, \blacktriangle — 7n-канал) с данными для вновь измеренных сечений образования для этих изотопов в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{220}\text{Ra}^*$ (светлые символы)

образование изотопов $^{213,214,215}\text{Ra}$ (темные символы) и измеренными выходами для этих изотопов в экспериментах 2013 г. (светлые символы) дает оценку эффективности транспортировки ЯО 3,5–5 % для каналов с испарением 5–7 нейтронов.

Такой разброс оценок эффективности транспортировки ЯО может быть объяснен как достаточно большой ошибкой ($\pm 40\%$) в определении абсолютных величин сечений образования, с которыми сравнивались полученные в тестовых экспериментах данные, так и точностью измерения энергии бомбардирующих частиц (примерно 1 %).

На рис. 6 приведен спектр α -частиц, испускаемых при распаде изотопов, синтезируемых в реакции полного слияния $^{22}\text{Ne} + ^{197}\text{Au} \rightarrow ^{219}\text{Ac}^*$. Пик с энергией 6040 кэВ

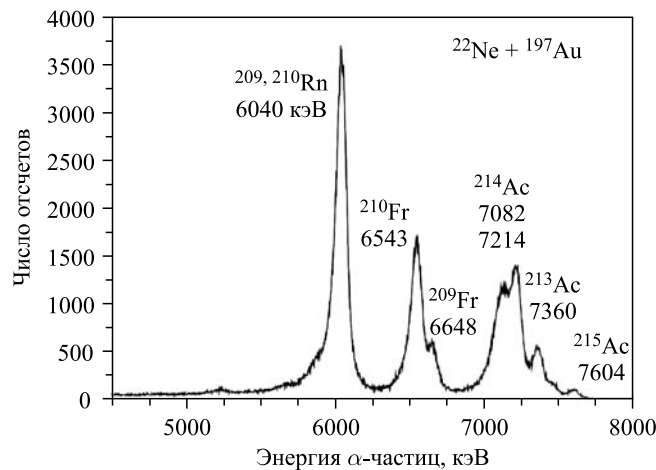


Рис. 6. Спектр α -частиц, испускаемых при распаде изотопов, синтезируемых в реакции полного слияния $^{22}\text{Ne} + ^{197}\text{Au} \rightarrow ^{219}\text{Ac}^*$

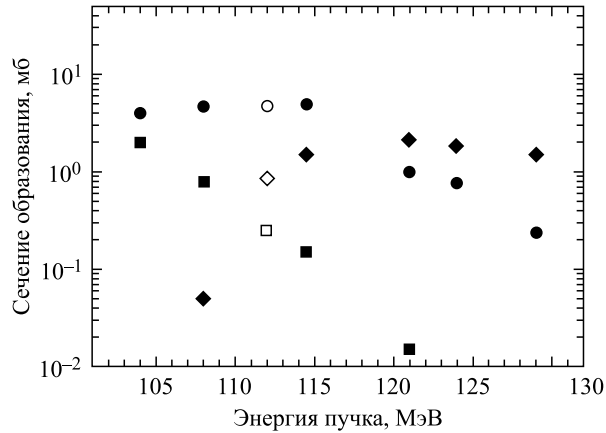


Рис. 7. Сравнение полученных ранее данных для сечений образования изотопов $^{213,214,215}\text{Ac}$ (темные символы: \blacksquare — $4n$ -канал, \bullet — $5n$ -канал, \blacktriangle — $6n$ -канал) с данными для вновь измеренных сечений образования для этих изотопов в реакции $^{22}\text{Ne} + ^{197}\text{Au} \rightarrow ^{219}\text{Ac}^*$

обусловлен распадом долгоживущих изотопов $^{209,210}\text{Rn}$, образовавшихся в исследовавшейся ранее другой тестовой реакции.

В случае реакции $^{22}\text{Ne} + ^{197}\text{Au} \rightarrow ^{219}\text{Ac}^*$ (рис. 7) из сравнения с полученными ранее данными [18] для сечений образования изотопов $^{213,214,215}\text{Ac}$ (темные символы) и измеренными выходами для этих изотопов в экспериментах 2013 г. (светлые символы) было получено значение величины эффективности транспортировки ЯО, равное $(6,5 \pm 3)\%$ для каналов с испарением разного количества нейтронов.

Измеренные экспериментально величины эффективности транспортировки для старого и модернизированного сепараторов приведены в таблице совместно с расчетными значениями, полученными с использованием программ для расчета параметров сепаратора [14, 19].

В среднем измеренная эффективность транспортировки ядер отдачи составила 5–6 %, что соответствует увеличению эффективности транспортировки модернизированного сепаратора примерно в два раза. Размер детектора в фокальной плоскости составлял 60×60 мм. В 2014 г. планируется установить фокальный детектор размером 100×100 мм, что позволит еще увеличить эффективность сбора ядер отдачи.

Измеренные экспериментально величины эффективности транспортировки для старого и модернизированного сепараторов, сравнение с расчетными данными

Реакция	Энергия пучка, МэВ	Толщина мишени, мг/см ²	Эффективность транспортировки ЯО		
			Старая	Новая	Расчет
$^{22}\text{Ne}(^{197}\text{Au}, 4-6n)^{213-215}\text{Ac}$	120	0,25 (металл)	0,03	0,065	0,14 ¹
$^{22}\text{Ne}(^{198}\text{Pt}, 5-7n)^{213-215}\text{Ra}$	115–125	0,25 (металл)	0,035	0,035–0,05	0,14 ¹

¹Расчет проводился для фокального детектора размером 100×100 мм.

Обеспечиваемая сепаратором эффективность трансмиссии ЯО, синтезируемых в асимметричных комбинациях, позволяет набирать достаточную статистику за относительно короткое время, что даст возможность приступить к изучению структуры ядер вблизи подболочки $N = 162$. Эти данные представляют исключительный интерес для оценок свойств изотопов сверхтяжелых элементов.

Следует отметить, что создание современных многопараметрических детектирующих систем в фокальной плоскости сепаратора в настоящее время позволяет проводить детальное изучение свойств радиоактивного распада ядер, имеющих сечения образования не менее 100 пб, с использованием методов спектрометрии нейтронов, α -частиц, γ -квантов и электронов.

В планах экспериментов с использованием модернизированного сепаратора и детектирующей системы GABRIELA стоит продолжение исследований К-изомерных состояний четно-четных изотопов 102-го и 104-го элементов, для которых можно набрать приемлемую статистику при длительности экспериментов не более 1 мес. Также планируется изучение структуры более нейтроноизбыточных изотопов Fm, No с использованием мишени ^{238}U , изучение нейтроноизбыточных изотопов $^{259,261}\text{Rf}$, образующихся в реакциях полного слияния $^{242}\text{Pu}(^{22}\text{Ne}, 4, 5n)^{259,260}\text{Rf}$. При длительности эксперимента порядка 1 мес будет набираться достаточная статистика для использования ЯО- γ - и ЯО-электрон-совпадений для изучения схем уровней изотопов 102-го и 104-го элементов. На рис. 8 приведены данные относительно существующей на сегодняшний момент спектроскопической информации для изотопов трансураниевых элементов [20]. Хорошо видно, что для детальных исследований структуры трансфермиевых изотопов с использованием сепаратора SHELS и детектирующей системы GABRIELA имеется еще очень много возможностей.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-02-12003 и № 14-02-91051) и Французского национального агентства исследований (гранты ANR-06-BLAN-0034-01 и ANR-12-BS05-0013).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yeremin A. V. et al.* The VASSILISSA Facility for Electrostatic Separation and Study of Complete Fusion Reaction Products // Nucl. Instr. Meth. A. 1989. V. 274. P. 528–532.
2. *Yeremin A. V. et al.* The Kinematic Separator VASSILISSA — Performance and Experimental Results // Nucl. Instr. Meth. A. 1994. V. 350. P. 608–617.
3. *Yeremin A. V. et al.* The Electrostatic Separator VASSILISSA — Performance and Experimental Results // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. V. 126. P. 329–333.
4. *Yeremin A. V. et al.* The Upgrade of the Kinematic Separator VASSILISSA — Experimental Results and Plans // Phys. At. Nucl. 2003. V. 66. P. 1042–1052.
5. *Hauschild K. et al.* GABRIELA: A New Detector Array for γ -Ray and Conversion Electron Spectroscopy of Transfermium Elements // Nucl. Instr. Meth. A. 2006. V. 560. P. 388–394.
6. *Lopez-Martens A. et al.* Detailed Spectroscopy of ^{249}Fm // Phys. Rev. C. 2006. V. 74. P. 044303-1–044303-9.
7. *Lopez-Martens A. et al.* Isomeric States in ^{253}No // Eur. Phys. J. A. 2007. V. 32. P. 245–250.
8. *Hauschild K. et al.* High-K, $T_{1/2} = 1.4(1)$ ms, Isomeric State in ^{255}Lr // Phys. Rev. C. 2008. V. 78. P. 021302(R).

9. Lopez-Martens A. et al. Spectroscopy of ^{253}No and Its Daughters // Nucl. Phys. A. 2011. V. 852. P. 15–35.
10. Yeregin A. et al. Project of the Experimental Setup Dedicated for Gamma and Electron Spectroscopy of Heavy Nuclei at FLNR JINR // Nucl. Instr. Meth. B. 2008. V. 266. P. 4137–4142.
11. Yeregin A. et al. Development of the Experimental Setup Dedicated for Alpha, Gamma and Electron Spectroscopy of Heavy Nuclei at FLNR JINR // Intern. Symp. on Exotic Nuclei «EXON-2009», JINR, RIKEN, GSI, GANIL, Sochi, Russia, Sept. 27 – Oct. 3, 2009.
12. Yeregin A. et al. SHELS — Separator for Heavy ELEMENT Spectroscopy // 4th Intern. Conf. on the Chemistry and Physics of the Transactinide Elements (TAN 11), Sochi, Russia, Sept. 5–11, 2011.
13. Еремин А. В. Закономерности образования и вероятности выживания компаунд-ядер в области $Z \geq 82$. Изучение реакций полного слияния с тяжелыми ионами на кинематическом сепараторе ВАСИЛИСА // ЭЧАЯ. 2007. Т. 38, вып. 4. С. 939–999.
14. Popoko A. G. et al. Monte-Carlo Simulation of Ion Trajectories in Kinematic Recoil Separator VASSILISSA // Nucl. Instr. Meth. B. 1997. V. 126. P. 294–296.
15. Andreyev A. N. et al. Decay Widths of Highly Excited Ra Compound Nuclei // Nucl. Phys. A. 1997. V. 620. P. 229–248.
16. Popoko A. et al. SHELS — Separator for Heavy ELEMENTS Spectroscopy // The First Intern. African Symp. on Exotic Nuclei (IASEN2013), iThemba LABS, Cape Town, South Africa, Dec. 2–6, 2013.
17. Исаев А. В. и др. Первое применение двухстороннего многострипового Si-детектора в проекте GABRIELA // ПТЭ. 2011. Т. 1. С. 43–48.
18. Андреев А. Н. и др. Измерение сечений реакций с испарением легких частиц в канале полного слияния при облучении Au и Pb ионами Ne // ЯФ. 1989. Т. 50, вып. 9. С. 619–624.
19. GICOSY Ion Optics Program. <http://www-linux.gsi.de/~weick/gicosy/>.
20. Herzberg R.-D., Greenlees P. T. In-Beam and Decay Spectroscopy of Transfermium Nuclei // Progress in Part. Nucl. Phys. 2008. V. 61. P. 674–720.