

E-402

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

7-94-457

На правах рукописи

ЕРЕМИН

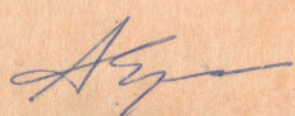
Александр Владимирович

СЕПАРАЦИЯ ПРОДУКТОВ РЕАКЦИЙ ПОЛНОГО
СЛИЯНИЯ НА ПУЧКЕ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ.
УСТАНОВКА ВАСИЛИСА

Специальность: 01.04.16 — физика атомного ядра
и элементарных частиц

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1994



Работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н.Флерова Объединенного института ядерных исследований, Дубна

Научные руководители:

доктор физико-математических наук
профессор

Г.М. Тер-Акопьян

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

Д.Д. Богданов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

В.А. Карнаухов

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

В.Д. Дмитриев

Ведущая организация:

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, г. Москва

Защита диссертации состоится "15" 02 1995 года
в "10" час на заседании специализированного совета
Д 047.01.05 при Лаборатории нейтронной физики и Лаборатории
ядерных реакций ОИЯИ (г.Дубна Московской области).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "13" 01 1995 года

Ученый секретарь
специализированного совета

ТАРАН Ю.В.

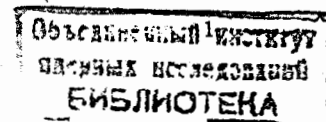
Общая характеристика работы

Актуальность темы

Реакции "горячего" слияния ядер (энергия возбуждения составного ядра $E^* \geq 40$ МэВ), приводящие к образованию продуктов испарения, около двух десятилетий (примерно до середины семидесятых годов) весьма интенсивно использовались в качестве основного метода получения и изучения свойств новых нуклидов с $Z \geq 100$ (см. обзоры [1,2] и ссылки в них). Начиная с середины 70-х, после обоснования метода "холодного" слияния ($E^* \approx 20$ МэВ) основные интересы в области получения и изучения процесса образования трансформиевых нуклидов сместились к реакциям "холодного" синтеза. Как известно, использование этих реакций позволило получить ряд новых трансформиевых нуклидов вплоть до элемента 109 и большое количество новых нейтронодефицитных изотопов трансформиевых ядер (см. обзоры [3,4] и ссылки в них).

Однако в последние годы наблюдается четко выраженное возрастание интереса к исследованиям возможностей реакций "горячего" ($E^* \geq 40$ МэВ) слияния для этой области ядер. Это связано, с одной стороны, с доступностью для реакций "холодного" синтеза только области нейтронодефицитных изотопов трансформиевых элементов, а также обнаруженными для предельно тяжелых систем взаимодействующих ядер существенными пороговыми ограничениями (запретами) на слияние при малых энергиях возбуждения. Все это приводит к быстрому падению сечений с ростом атомного номера Z компаунд ядра до значений $\approx 10^{-36}$ см² для $Z \approx 109-110$. С другой стороны, наблюдающееся в эксперименте большое количество предельных нейтронов в реакциях "горячего" слияния в трансформиевой области ядер дает основания для осторожного оптимизма. Кроме того, самостоятельный интерес представляет исследование характеристик "горячих" ядер с близкой к нулю величиной жидкокапельного барьера деления.

Проведение исследований в трансформиевой области ядер сильно осложняется малой величиной сечений образования продуктов и их относительно короткими временами жизни. Поэтому экспериментальные установки, предназначенные для работы в этой области ядерных реакций, должны отвечать следующим требованиям: высокая эффективность транспортировки ядер отдачи (продуктов реакций полного слияния) от мишени к детекторам, малое время транспортировки,



высокая степень очистки ядер отдачи от фоновых продуктов ядерных реакций и от ионов пучка. Наиболее полно всем перечисленным требованиям отвечают кинематические сепараторы продуктов реакций. Можно сказать, что это, бурно развивающееся в последнее десятилетие методическое направление, становится основным при изучении ядерных реакций и свойств нуклидов.

Целью настоящей работы являлось разработка и создание трехступенчатого электростатического сепаратора ВАСИЛИСА, измерение и оптимизация рабочих характеристик ионно-оптической системы и сепаратора в целом при работе в широком диапазоне масс бомбардирующих ионов ($16 \leq A \leq 40$), разработка методов калибровки и контроля параметров сепаратора, обеспечивающих его работу в длительных экспериментах, изучение закономерностей образования трансфермиевых ядер в реакциях "горячего" слияния в экспериментах на пучках тяжелых ионов с $A \leq 40$.

Научная новизна

Создан и работает на эксперимент первый в мировой практике трехступенчатый электростатический сепаратор ВАСИЛИСА, по своим параметрам не уступающий, а в ряде случаев превосходящий кинематические сепараторы, используемые в других научных центрах.

Проведен полный объем исследований рабочих характеристик ионно-оптической системы и сепаратора в целом на пучках ионов от ^{16}O до ^{40}Ca . Разработаны способы оптимизации и контроля параметров сепаратора, которые позволяют проводить длительные эксперименты с предельными интенсивностями пучков тяжелых ионов до 10^{13} част./сек. и чувствительностью до 10^{-35} см².

Получены новые экспериментальные данные для поперечных сечений образования нейтронодефицитных изотопов 102 и 105 элементов, позволяющие сделать вывод об отсутствии ограничений во входном канале для реакций полного слияния в асимметричных комбинациях налетающий ион – ядро мишени в области сильноделящихся ядер с большой энергией возбуждения ($E^* \geq 50$ МэВ), имеющих параметр делимости больше предельного.

Сделаны экспериментальные оценки вероятности выживания сильно возбужденного компаунд ядра, имеющего жидкокапельный барьер деления близкий к нулю, которые показывают, что на первых каскадах девозбуждения делительное время примерно равно времени испарения

нейтронов. Этот результат может рассматриваться как указание на то, что высокая энергия возбуждения компаунд ядер, образующихся в асимметричных реакциях полного слияния, не служит сильным ограничением в процессе выживания тяжелых ядер – остатков испарения.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Объем диссертации – 102 страницы машинописного текста, включая 21 рисунок, 14 таблиц и библиографический список из 100 наименований.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались на XXXVIII Совещании по Ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, Баку, 12–14 апреля 1988 г.; на международной конференции "Actinides – 89", Ташкент, 24–29 сентября 1989 г.; на международном симпозиуме Nikko 91, "Towards a Unified Picture of Nuclear Dynamics", Japan, 6–8 June, 1991; на международной конференции "6th International Conference on Nuclei far from Stability + 9th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants", Bernkastel-Kues, Germany, July 19–24, 1992; на международной школе–семинаре по физике тяжелых ионов, Дубна, 10–15 Мая 1993 г.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в 12 работах.

Содержание работы

В главе 1 дан краткий обзор типов и рабочих характеристик различных кинематических сепараторов, используемых в настоящее время в экспериментах по изучению продуктов реакций полного слияния на пучках тяжелых ионов. Приводится описание и принципы действия четырех основных типов кинематических сепараторов. Обсуждаются преимущества и недостатки, присущие каждому типу кинематических сепараторов.

В главе 2 приведено описание кинематического сепаратора ВАСИЛИСА, даны его технические характеристики. Сепаратор включает в себя мишенное устройство с вращающейся синхронизированной с частотой импульсов пучка циклотрона мишенью, систему сепарации, состоящую из трех электростатических конденсаторов, систему фокусировки, состоящую из двух триплетов квадрупольных линз, располо-

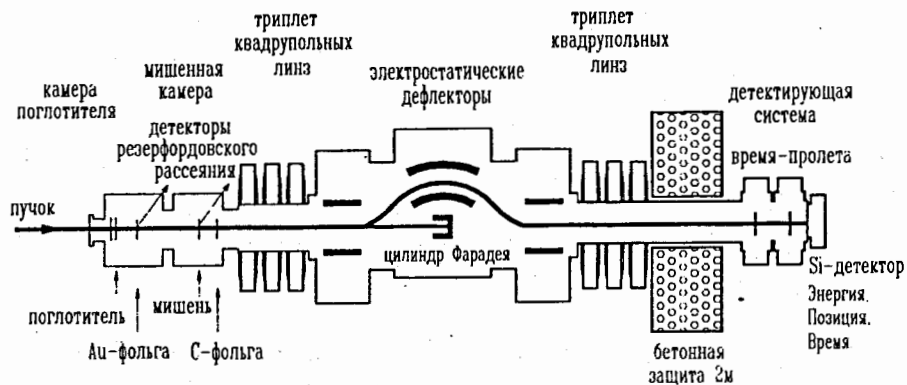


Рис. 1. Схема установки.

женных на оси пучка бомбардирующих ионов до и после системы сепарации и приемное устройство, состоящее из детекторов, регистрирующих ядра отдачи и продукты их радиоактивного распада. Схема установки представлена на рис. 1.

При создании установки ВАСИЛИСА мы руководствовались целью получить для широкого класса асимметричных реакций полного слияния эффективность сепарации $\epsilon_{\text{сеп}}$ 10 – 40 %. Угол захвата был выбран 15 мстерад ($\approx \pm 4^\circ$ в вертикальном и горизонтальном направлениях), что обеспечивает попадание в апертуру установки от 30% до 80% всех ядер отдачи, вылетевших из мишени. Согласно расчетам, ионно-оптическая система установки позволяет транспортировать ядра отдачи, попавшие во входной телесный угол, с относительной дисперсией по энергии $\Delta E/E \pm 10\%$ и в зарядовом диапазоне $\Delta q/q \pm 10\%$. Для широкого класса асимметричных реакций с использованием тяжелых ионов от кислорода до аргона эти параметры должны обеспечить необходимые эффективности сепарации от 3% до 30% соответственно.

Сепарация ЯО от пучка и фоновых продуктов осуществляется системой, состоящей из трех электростатических конденсаторов. ЯО отклоняются в первом конденсаторе на угол 8° и попадают в апертуру второго конденсатора, тогда как бомбардирующие ионы проходят через первый конденсатор практически не отклонившись и тормозятся в цилиндре Фарадея. Последующая сепарация ЯО от рассеянных ионов пучка ($E_p \ll E_I$) и других фоновых продуктов происходит во втором и

третьем электростатических конденсаторах. Максимальная дисперсия по энергии достигается в центральной плоскости сепаратора, которая является плоскостью симметрии второго электростатического конденсатора. Для повышения очистки от фоновых частиц после первого и второго электростатических диполей установлены дистанционно управляемые вертикальные диафрагмы, работающие как селекторы энергии.

Фокусирующая система установки ВАСИЛИСА состоит из двух триплетов широкоапертурных магнитных квадрупольных линз, расположенных до и после системы электростатической сепарации. Первый триплет, расположенный после мишени перед электростатическими конденсаторами, собирает выбитые из мишени ЯО и формирует их в квазипараллельный пучок. Второй триплет магнитных квадрупольных линз служит для фокусировки ЯО на детектирующее устройство, расположенное в фокальной плоскости сепаратора. Основные параметры сепаратора приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры установки ВАСИЛИСА

Максимальная интенсивность пучка	$1 \times 10^{13} \text{сек}^{-1}$
Размер мишени (диаметр)	10 мм
Толщина мишени	100–500 мкг/см ²
Угол захвата ЯО	$140 \times 140 \text{ мрад}^2$
Телесный угол	15 мстерад
Радиус апертуры магнитных линз	100 мм
Эффективная длина линз	350 мм
Максимальный градиент магнитного поля	10 Т/м
Расстояние между пластинами конденсаторов	150 мм
Эффективная длина I и III конденсаторов	470 мм
Эффективная длина II конденсатора	940 мм
Максимальная напряженность электрического поля	20 кВ/см
Расстояние от мишени до детекторов	12 м

Системы управления и контроля за работой узлов сепаратора расположены в измерительной комнате. Возможно как ручное так и автоматическое управление параметрами сепаратора.

Высоковольтная система сепаратора состоит из трех пар пластин deflectory, изготовленных из чистого алюминия АД0. Напряжение

на каждую пару пластин дефлекторов подается симметрично от отдельного источника высокого напряжения.

Вакуумная система сепаратора состоит из нескольких блоков, каждый из них откачивается турбомолекулярными насосами для получения безмасляного вакуума. Общий объем вакуумной системы составляет 4 м³.

Детектирующая система сепаратора состоит из двух время – пролетных детекторов и сборки кремниевых полупроводниковых детекторов и расположена за 2^х метровой бетонной стеной.

В качестве время – пролетных детекторов используется система из двух широкоапертурных (80 мм в диаметре) детекторов на основе прямоугольных микроканальных пластин размером 70мм×90 мм. Для увеличения эффективности регистрации сбор электронов осуществляется с обеих сторон эмиттера. Для медленных ядер отдачи с энергиями 10–30 МэВ и массовым числом около 200 временное разрешение составляет 0.5 наносекунд. Эффективность регистрации ядер отдачи одним временным детектором составляет 99.95%.

После прохождения время – пролетных детекторов, ядра отдачи вбиваются в сборку детекторов, состоящую из восьми позиционно – чувствительных кремниевых стрипов. Энергетическое разрешение детекторов для α -частиц с энергией 5.5 МэВ составляет 45 кэВ, позиционное разрешение составляет 0.5 мм для каждого стрипа.

В третьей главе приведены результаты исследований характеристик ионно–оптической системы и сепаратора в целом, описаны методы калибровки и контроля параметров сепаратора в процессе экспериментов. Для более полной иллюстрации возможностей сепаратора приведен краткий обзор экспериментов, выполненных до настоящего времени.

Важнейшим параметром, определяющим чувствительность экспериментальной установки и время, необходимое для проведения эксперимента, является эффективность сепарации, т.е. отношение числа ЯО, зарегистрированных детектором в фокальной плоскости сепаратора, к полному числу ЯО, образовавшихся и вылетевших из мишени.

Возможны два подхода при определении эффективности сепарации – расчетный, базирующийся на точных и подробных данных об ионно–оптических характеристиках элементов сепаратора и литературных полумпирических данных о зарядовых, энергетических и угловых рас-

пределениях ядер отдачи и эмпирический подход, основанный на большом количестве тестовых экспериментов по измерению зависимости эффективности сепарации от типа бомбардирующих ионов, толщины мишени, величины отклоняющих потенциалов на электростатических конденсаторах и режимов работы квадрупольных магнитных линз. На первом этапе работ по введению в эксплуатацию сепаратора ВАСИЛИСА второй вариант представлялся нам более предпочтительным, т.к. имевшиеся в литературе данные о зарядовых и угловых распределениях ЯО с энергиями 5 – 40 МэВ не обеспечивали необходимую для эксперимента точность расчета. По мере накопления экспериментальных данных стало возможным использование расчетного метода для выбора режима сепарации, т.к. было осуществлено фитирование параметров зарядовых и угловых распределений ЯО по полученным экспериментальным данным. Был создан и развит специальный компьютерный код на базе метода Монте–Карло. Программа включает в себя следующие параметры: эмиттанс пучка налетающих ионов, кинематику реакции, передачу импульса от испаряемых частиц – нейтронов, протонов и/или α -частиц ядру отдачи, рассеяние и потери энергии ЯО в мишени и фольгах, распределение ионного заряда ЯО, вместе с расчетами ионно–оптических параметров сепаратора в первом порядке приближения.

Экспериментальный поиск наилучших режимов сепарации ЯО и оптимизация режимов работы ионно–оптических элементов сепаратора обычно проводились в два этапа. На первом этапе настройка всех девяти элементов сепаратора (6 квадрупольных магнитных линз и 3 электростатических конденсатора) производилась по максимальному счету ЯО, попадающих в фокальную плоскость. При этом большое внимание уделялось соотношению эффект/фон, т.е. отношению счета ЯО к счету ионов, подобных пучку, за фиксированное время. Такой режим настройки сепаратора удобен тем, что позволяет проводить оптимизацию без задержек во времени. На втором этапе для настройки обычно использовались характерные α -линии продуктов реакций, вбитых в полупроводниковые детекторы в фокальной плоскости. В этом случае использовались относительно короткоживущие нуклиды ($T_{1/2} \leq 10$ –60 сек.). Такая настройка обычно применялась в том случае, когда сечения xn -каналов реакций были малы по сравнению с другими каналами и выделение соответствующих ЯО на время–пролетном спектре было

затруднено. Также такой способ применялся при настройке режима работы сепаратора на другие типы реакций (реакции малонуклонных передач, реакции многонуклонных передач и т.д.).

После оптимизации режимов работы элементов сепаратора проводится измерение эффективности сепарации ЯО. Для этого производится два последовательных облучения тестовой мишени при неизменной интенсивности пучка на мишени сепаратора и с набором одинакового интегрального потока ионов, прошедших через мишень, с регистрацией ЯО в фокальной плоскости сепаратора и в мишенной камере. Для регистрации ЯО в мишенной камере используется фольга (алюминий, 6 микрон), установленная на дистанционно управляемом штоке, которая после набора необходимого интегрального потока ионов перемещается к детектору, размещенному в мишенной камере и регистрирующему α -распад нуклидов, вбитых в фольгу.

Значения эффективности сепарации определяются из сравнения счета числа распадов для известных α - радиоактивных ядер отдачи, в детекторе, расположенном в фокальной плоскости сепаратора, и в детекторе, расположенном в мишенной камере. В обоих случаях регистрируются α -спектры и определяются периоды полураспада образовавшихся нуклидов.

Эффективность сепарации ϵ_{zn} для ЯО, образованных в реакциях с испарением нейтронов (реакции типа (HI, xn)) была измерена для большого набора асимметричных комбинаций налетающий ион (O, Ne, Mg, P, Ar) - ядро мишени (Dy, Er, Ta, W, Au, Pb), для толщин мишеней (w_t) от 0.1 до 1 мг/см². С увеличением толщины мишени выход ЯО возрастает, но эффективность сепарации ядер отдачи падает, поэтому при увеличении w_t больше некоторой предельной, число ЯО, попавших в фокальную плоскость не возрастает. Число фоновых продуктов, попадающих в фокальную плоскость сепаратора при увеличении толщины мишени возрастает, поэтому для каждой тестовой реакции экспериментальным путем, по числу ЯО, попавших в фокальную плоскость и соотношению эффект/фон подбиралась оптимальная толщина мишени.

Эффективность сепарации для специально подобранных тестовых реакций экспериментально измеряется во всех наших экспериментах, перед началом облучения рабочей мишени и после завершения облучения. В процессе длительных экспериментов (порядка одной недели и более) тестовые мишени используются для контроля параметров се-

Таблица 2. Измеренные значения эффективности сепарации ϵ_{zn} для различных тестовых реакций.

Реакция	w_t (мг/см ²)	ϵ_{zn} (%)	Расчет (%)
$^{197}\text{Au}(^{16}\text{O}, 4-5n)^{208,209}\text{Fr}$	0.22	3±1	3.5
$^{182}\text{W}(^{22}\text{Ne}, 4-5n)^{199m, 199g, 200}\text{Po}$	0.2	5±1	6
$^{181}\text{Ta}(^{24}\text{Mg}, 4-5n)^{200, 201}\text{At}$	0.2	8±1	9
$^{166}\text{Er}(^{31}\text{P}, 4n)^{193}\text{Bi}$	0.26	14±2	15
$^{164}\text{Dy}(^{40}\text{Ar}, 4-5n)^{199m, 199g, 200}\text{Po}$	0.28	25±3	28

паратора не реже одного раза в сутки. Для этого тестовая мишень устанавливается на дистанционно управляемом штоке и может быть поставлена под пучок после рабочей мишени без прерывания работы ускорителя и нарушения вакуума. Такой метод контроля эффективности сепарации позволяет измерять абсолютные сечения образования искоемых нуклидов с точностью до ± 50 %. Точность определения абсолютных сечений определяется ошибками в определении эффективности сепарации, неравномерностью в толщине мишеней и ошибками в измерении интенсивности пучков бомбардирующих ионов.

Значения эффективности сепарации для набора тестовых реакций приведены в таблице 2.

Всвязи с тем, что в процессе девозбуждения компаунд ядра доминирующими каналами, наряду с испарением нейтронов, являются каналы с испарением α -частиц, мы проводили специальные исследования эффективности сепарации для продуктов образующихся в $(HI, \alpha xn)$ реакциях - $\epsilon_{\alpha zn}$ для реакций с налетающими ионами $^{20,22}\text{Ne}$ и ^{24}Mg .

Для реакций $^{20,22}\text{Ne} + ^{197}\text{Au}$ отношение $\epsilon_{zn}/\epsilon_{\alpha zn}$ определялось прямо в процессе эксперимента из сравнения счетов α -распадов продуктов, образовавшихся в xn и αxn каналах реакций и вбитых в фокальный детектор и фольгу, расположенную в мишенной камере, соответственно. Нуклиды, образовавшиеся в xn и αxn каналах реакций легко различались благодаря большим различиям (порядка 1 МэВ) в энергиях α -распадов.

Для реакции $^{24}\text{Mg} + ^{197}\text{Au}$ прямое определение ϵ_{zn} невозможно из-за коротких периодов полураспада образующихся нуклидов $^{217,218}\text{Ra}$. Эффективность сепарации для этих продуктов определялась путем экстраполяции данных для ϵ_{zn} из реакций $\text{Ne} + \text{W}$, $\text{Ne} + \text{Au}$ и $\text{Mg} +$

Таблица 3. Измеренные значения отношения эффективностей сепарации $\epsilon_{zn}/\epsilon_{\alpha zn}$.

Реакция	w_t (мг/см ²)	$\epsilon_{zn}/\epsilon_{\alpha zn}$
²⁰ Ne+ ¹⁹⁷ Au	0.4	6.1±0.6
²² Ne+ ¹⁹⁷ Au	0.6	8.0±2.0
²⁴ Mg+ ¹⁸¹ Ta / ¹⁹⁷ Au	0.2	25.0±10.0
	0.8	12.0±2.5

Та. Эффективность сепарации для продуктов αzn каналов реакций $\epsilon_{\alpha zn}$ определялась из сравнения счета числа распадов для известных α - радиоактивных ядер отдачи, в детекторе, расположенном в фокальной плоскости сепаратора, и в детекторе, расположенном в мишенной камере. В таблице 3 представлены результаты измерений отношения $\epsilon_{zn}/\epsilon_{\alpha zn}$.

Другим важным параметром сепаратора является фактор подавления фоновых продуктов, попадающих в фокальную плоскость вместе с ЯО. В условиях реального эксперимента в пучке всегда присутствуют ионы с энергией от максимальной до практически нулевой. Это связано со взаимодействием части ионов пучка со стенками ионопровода, краями диафрагм, рамками мишеней и поглотителей. Т.к. в свою очередь средний заряд иона является функцией энергии, то в реальном пучке всегда будут присутствовать ионы с той электрической жесткостью, на которую настроен сепаратор, и реальный коэффициент очистки будет равен доле этой компоненты в полном энергетическом спектре пучка после мишени. Коэффициенты очистки от рассеянных ионов сильно зависят от качества пучка, выводимого из циклотрона и от коэффициента трассировки пучка от циклотрона до мишени сепаратора. При изменении коэффициента трассировки в 2 - 3 раза коэффициенты очистки могут измениться в 5 - 10 раз.

По сравнению с интенсивностью пучка на мишени сепаратора поток низкоэнергетичных ионов проходящих через время - пролетные детекторы в фокальной плоскости подавлен на фактор 10^8-10^{12} в зависимости от отношения масс налетающего иона и ядра мишени и от качества пучка циклотрона У-400. Использование метода антисовпадений между сигналами с время - пролетных детекторов и энергетическими сигналами с кремниевых детекторов позволяет разделить

Таблица 4. Факторы подавления фона от рассеянных ионов пучка.

Реакция	w_t (мг/см ²)	Фактор подавления
¹⁹⁷ Au(¹⁶ O,4-5n) ^{208,209} Fr	0.22	$10^{13}-10^{14}$
¹⁸² W(²² Ne,4-5n) ^{199m,199g,200} Po	0.2	$10^{12}-10^{13}$
¹⁸¹ Ta(²⁴ Mg,4-5n) ^{200,201} At	0.2	$5 \cdot 10^{11}-10^{12}$
¹⁶⁶ Er(³¹ P,4n) ¹⁹³ Bi	0.26	$5 \cdot 10^{10}-5 \cdot 10^{11}$
¹⁶⁴ Dy(⁴⁰ Ar,4-5n) ^{199m,199g,200} Po	0.28	$10^{10}-10^{11}$

импульсы от рассеянных частиц пучка, ядер отдачи и их α -распадов и дает дополнительный фактор очистки от фоновых низкоэнергетичных ионов порядка 100-1000. Полный фактор подавления рассеянных ионов пучка в фокальной плоскости сепаратора составляет $10^{10}-10^{14}$ и зависит от отношения масс бомбардирующего иона и ядра мишени, а также от качества пучка циклотрона У-400. Величины факторов подавления фона в фокальной плоскости сепаратора от рассеянных ионов пучка для реакций с различной масс - асимметрией приведены в таблице 4.

Реакции полного слияния с тяжелыми ионами сопровождаются большим набором реакций многонуклонных передач, имеющих сравнимые или даже гораздо большие сечения образования нуклидов - продуктов этих реакций, чем сечения образования ядер - испарительных продуктов. При получении ядер с $Z \geq 82$ проблема осложняется тем, что нуклиды, образовавшиеся в реакциях многонуклонных передач, очень часто имеют близкие к исследуемым ядрам энергии α -распада и времена жизни.

Благодаря сильным различиям в кинематике этих двух типов реакций (угловые и энергетические распределения) существует возможность эффективного подавления фона от продуктов реакций многонуклонных передач, благодаря селективности сепаратора по угловым и энергетическим распределениям ЯО. Для определения факторов подавления фона от продуктов реакций многонуклонных передач были изучены реакции ⁴⁰Ar+²³⁸U, ⁴⁰Ar+²⁰⁸Pb и ²²Ne+²⁴⁸Cm. На основании результатов экспериментов были определены нижние пределы для факторов подавления фона от продуктов реакций многонуклонных передач, сопутствующих этим реакциям (см. таблицу 5).

Сравнение величин эффективности сепарации и факторов подавле-

Таблица 5. Факторы подавления фона от реакций многонуклонных передач.

Реакция	w_t (мг/см ²)	Фактор подавления
$^{40}\text{Ar}+^{238}\text{U}$	0.5	2×10^4 (для ^{242}Cm) 8×10^4 (для ^{227}Th)
$^{40}\text{Ar}+^{208}\text{Pb}$	0.6	7×10^3 (для ^{211}Bi)
$^{22}\text{Ne}+^{248}\text{Cm}$	0.33	$\geq 4 \times 10^3$ (для ^{254}Fm)

ния фоновых продуктов реакций (см. таблицы 2,3 и 4) для сепаратора ВАСИЛИСА с данными для других кинематических сепараторов (см. обзорные работы [5,6]) показывает, что по этим параметрам наша установка по меньшей мере не уступает другим сепараторам и даже превосходит многие из них. Полученные факторы подавления фоновых продуктов, образующихся в различных каналах реакций многонуклонных передач, вместе с методом α - α корреляций, применяемым при идентификации исследуемых нуклидов, позволяют проводить эксперименты по синтезу и изучению свойств трансфермиевых элементов с использованием актинидных мишеней с чувствительностью не хуже 0.1 нанобарна.

В процессе экспериментов, проводившихся на сепараторе ВАСИЛИСА, регистрировались и изучались ЯО – продукты испарения компаунд ядер, образовывавшихся в широком наборе (более 20) комбинаций налетающий ион – ядро мишени. Систематически изучались закономерности поведения поперечных сечений образования, барьеры деления и вероятности выживания сильновозбужденных нейтронодефицитных ядер с атомными номерами $82 \leq Z \leq 105$. Высокая чувствительность и селективность сепаратора для медленных ЯО, образующихся в асимметричных реакциях полного слияния, позволила измерять функции возбуждения для ЯО, имеющих сечения образования в пределах до семи порядков по величине, и число испарившихся легких частиц от 3 до 11. В экспериментах регистрировались ЯО – продукты хп, рхп и α хп испарительных каналов реакций слияния в диапазоне энергий бомбардирующих ионов от кулоновского барьера до значений, соответствующих энергии возбуждения компаунд ядра более чем 100 МэВ.

На рис. 2 представлены максимальные значения поперечных сече-

ний образования, измеренные в экспериментах на сепараторе ВАСИЛИСА для каналов с испарением 4 и 5 нейтронов в реакциях с бомбардирующими ионами Ne, Mg и Al. На рисунке приведена небольшая часть экспериментальных данных, полученных на сепараторе, но тем не менее наглядно демонстрируется возможность проведения экспериментов по изучению ядер отдачи, образующихся с сечениями от десятков миллибарн до 0.1 нанобарна. Времена жизни исследовавшихся ЯО и их дочерних продуктов находятся в диапазоне от десятков минут до 5 микросекунд.

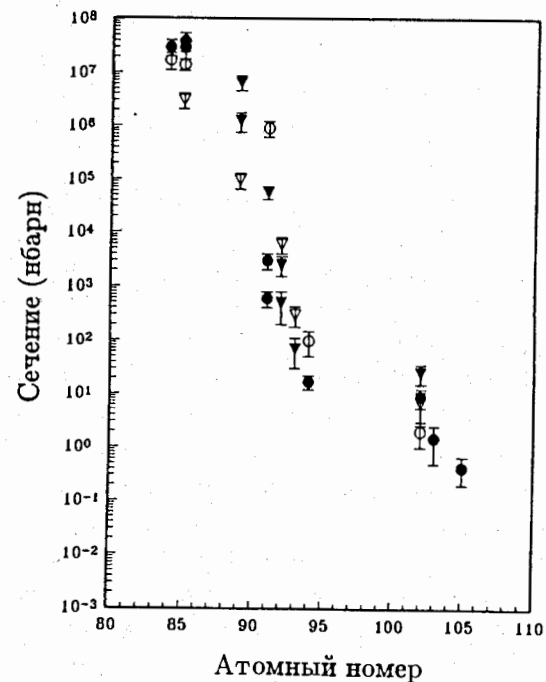


Рис. 2. Максимальные значения поперечных сечений образования, измеренные в экспериментах на сепараторе ВАСИЛИСА.

4n-канал: ○ – реакции с ионами Mg, Al; ▽ – реакции с ионами Ne;
5n-канал: ● – реакции с ионами Mg, Al; ▼ – реакции с ионами Ne.

В экспериментах на сепараторе ВАСИЛИСА было синтезировано 12 новых изотопов U, Np и Pu, изучены характеристики их α -распада. Также для ряда известных изотопов в области Ac – Pa были уточ-

нены данные об энергиях α -распада, относительных интенсивностях α -переходов и периодах полураспадов.

В заключение к сказанному выше хотелось бы подчеркнуть, что методика кинематического сепаратора представляется наиболее оптимальной для измерения абсолютных значений сечений продуктов полного слияния в реакциях с тяжелыми ионами. Это связано с отсутствием зависимости эффективности сепарации от химических свойств нуклидов, периодов их полураспада и интенсивности пучка ионов, большим динамическим диапазоном измеряемых сечений и высокой предельной чувствительностью, большой надежностью работы и относительной простотой контроля параметров установки во время эксперимента.

В четвертой главе приведены результаты экспериментов по измерению поперечных сечений образования нейтронодефицитных изотопов 102 и 105 элементов в реакциях с бомбардирующими ионами ^{22}Ne , ^{26}Mg , ^{27}Al и ^{31}P и мишенями ^{232}Th и $^{236,238}\text{U}$. Целью наших экспериментов было получение новых данных о сечениях образования ядер - продуктов испарения в реакциях "горячего" слияния, образующихся в процессе девозбуждения компаунд ядра с большой ($E^* \geq 40$ МэВ) энергией возбуждения; изучение ограничений во входном канале асимметричных реакций полного слияния, предсказанных в работе [6], в области сильноделящихся ядер, имеющих параметр делимости [7] больше предельного ($X_{arith} = 0.72$), и изучение вероятности выживания сильно возбужденного компаунд ядра, имеющего жидкокапельный барьер деления близкий к нулю.

Выбранные нами комбинации налетающий ион - ядро мишени добавили существенную часть данных к имеющемуся набору асимметричных реакций "горячего" слияния, приводящих к компаунд ядрам $^{258}\text{102}$ и $^{260}\text{102}$. Изменение среднего арифметического параметра делимости X_{arith} в этих комбинациях определяется различием конфигураций во входном канале реакций. Это позволило изучить зависимость барьера слияния от асимметрии во входном канале и влияние этой зависимости на сечения образования испарительных продуктов в различных реакциях. Сравнение экспериментальных данных с расчетами, основанными на компьютерном коде ALICE [8], показало хорошее согласие для 6n канала реакций. Расчет хорошо воспроизводит наблюдаемое в эксперименте уменьшение сечений для 4n и 5n каналов реакций при

переходе от бомбардирующих ионов ^{16}O к ^{22}Ne и ^{26}Mg без увеличения барьера слияния, что не подтверждает предположение о наличии эффекта типа "extra-extra push" [6] для барьеров слияния исследованных реакций.

Изучение реакций, приводящих к компаунд ядру $^{260}\text{102}$, с испарением вплоть до 8 нейтронов, позволило получить данные о вероятности выживания сильновозбужденного компаунд ядра и определить отношения Γ_n/Γ_{tot} из отношения сечений $\sigma_{(x+2)n}/\sigma_{xn}$, полученных для реакций, приводящих к компаунд ядрам $^{260}\text{102}$ и $^{258}\text{102}$. Полученные экспериментальные данные позволяют дать оценки отношения значений Γ_n/Γ_{tot} на начальной стадии процесса девозбуждения компаунд ядер $^{260}\text{102}$. В работе [9] были измерены сечения образования изотопа $^{252}\text{102}$, получавшегося из компаунд ядра $^{256}\text{102}$ в реакции $^{208}\text{Pb}(^{48}\text{Ca}, 4n)$. Оценка для максимума сечения образования, полученная в этих экспериментах, составляет величину около 20 нбарн. Нужно отметить, что 4n-реакция в этом случае не является подбарьерной. Величина сечения слияния в максимуме выхода изотопа $^{252}\text{102}$ для реакций с бомбардирующими ионами ^{48}Ca , ^{22}Ne и ^{26}Mg примерно одинакова и может быть оценена как (500-600) мбарн. В наших экспериментах по синтезу компаунд ядра $^{258}\text{102}$, максимум сечения образования для 6n-канала реакции, приводящего к изотопу $^{252}\text{102}$, составил 15 нбарн при использовании ионов ^{22}Ne и 8 нбарн для ^{26}Mg . Таким образом, усредненная по двум первым каскадам девозбуждения компаунд ядра $^{258}\text{102}$ величина отношения $\langle \Gamma_n/\Gamma_{tot} \rangle$ может быть оценена и составляет 0.7-0.9. Нормировка экспериментальных сечений на приведенные длины волн в зависимости от налетающей частицы уменьшит величину $\langle \Gamma_n/\Gamma_{tot} \rangle$ только на фактор 1.5-1.7, т.е. величина $\langle \Gamma_n/\Gamma_{tot} \rangle$ приблизительно составит 0.5. Из сравнения измеренных сечений образования изотопа $^{252}\text{102}$ в реакциях с испарением 8 нейтронов (мишень ^{238}U) и 6 нейтронов (мишень ^{236}U) усредненная по двум первым каскадам девозбуждения компаунд ядра $^{260}\text{102}$ величина отношения $\langle \Gamma_n/\Gamma_{tot} \rangle$ составляет 0.3-0.4. На рис. 3 представлены величины $\langle \Gamma_n/\Gamma_{tot} \rangle$ для компаунд ядер с атомными номерами $Z = 98, 100, 101$ и 102 , усредненные по первым двум каскадам девозбуждения ($E^* \approx 60-75$ МэВ). Оценка для величин $\langle \Gamma_n/\Gamma_{tot} \rangle$ проводилась на основании экспериментально измеренных сечений образования ядер - продуктов испарения.

Полученные результаты для величин $\langle \Gamma_n/\Gamma_{tot} \rangle$ могут рассматри-

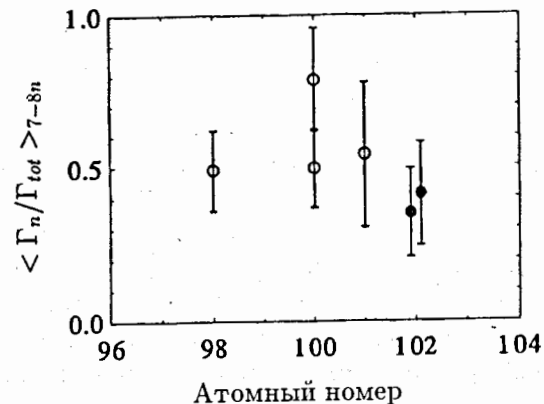


Рис. 3. Усредненные по первым каскадам девозбуждения ($E^* \approx 60-75$ МэВ) величины $\langle \Gamma_n / \Gamma_{tot} \rangle$ для компаундов ядер с атомными номерами $98 \leq Z \leq 102$.

ваться как указание на то, что высокая энергия возбуждения компаундов ядер, образующихся в асимметричных реакциях полного слияния, не приводит к очень сильным ограничениям в процессе выживания тяжелых ядер – остатков испарения.

Подобные выводы, правда на более качественном уровне, могут быть сделаны из сравнения экспериментальных данных для реакций $^{27}\text{Al} + ^{236}\text{U}$ и $^{50}\text{Ti} + ^{209}\text{Bi}$ [10]. Для обеих реакций измерены сечения образования одних и тех же ядер – испарительных остатков, т.е. изотопов $^{257,258}\text{105}$. Хотя энергия возбуждения компаунда ядра $^{263}\text{105}$ для реакций с мишенью ^{236}U примерно на 40 МэВ выше, чем энергия возбуждения компаунда ядра $^{259}\text{105}$ для реакций с мишенью ^{209}Bi , поперечные сечения для каналов с испарением нейтронов в реакциях "горячего" слияния всего лишь на порядок величины меньше, чем для реакций "холодного" слияния. Такой на первый взгляд неожиданный результат обусловлен влиянием двух факторов. Во-первых, большими значениями для вероятности испарения нейтронов $\langle \Gamma_n / \Gamma_{tot} \rangle$ при энергиях возбуждения $E^* \geq 20 - 40$ МэВ и, во-вторых, значительным увеличением динамических барьеров слияния для реакций "холодного" слияния в этой области ядер. Таким образом, есть все основания полагать, что реакции "горячего" слияния могут оказаться более перспективными для синтеза и исследования свойств новых нуклидов с $Z \geq 106$, чем

реакции "холодного" слияния.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертационной работе.

Основные результаты диссертации

1. Создан и работает на эксперимент на выведенных пучках циклотрона У-400 кинематический сепаратор ВАСИЛИСА, включающий в себя трехступенчатую систему электростатической сепарации продуктов реакций полного слияния от ионов пучка и других фоновых продуктов; фокусирующую систему, состоящую из двух триплетов электромагнитных квадрупольных линз; вращающуюся, синхронизированную с частотой работы ускорителя, мишень и детектирующий модуль.

2. Исследованы характеристики полностью оптической системы сепаратора ВАСИЛИСА. Величина эффективности сепарации ЯО, образующихся в реакциях с налетающими ионами от ^{16}O до ^{40}Ar , изменяется от 3 до 30%. Фактор подавления пучка полной энергии составил $> 10^{18}$, упруго-рассеянных ионов пучка с энергией 1–20 МэВ – от 10^{10} до 10^{13} , фоновых продуктов многонуклонных передач $4 \cdot 10^3$. Полученные характеристики дают возможность проведения на сепараторе экспериментов по синтезу и изучению свойств нейтронодефицитных изотопов трансфермиевых элементов в реакциях полного слияния для асимметричных комбинаций налетающий ион – ядро мишени с чувствительностью не хуже 0.1 нанобарн.

3. Разработаны способы оптимизации и контроля параметров сепаратора при подготовке экспериментов и в процессе их проведения. Эти методы позволяют устойчиво получать высокие значения эффективности сепарации ЯО и факторов подавления пучка, контролировать параметры работы сепаратора в течение длительных (более одной недели) экспериментов.

4. В экспериментах на сепараторе ВАСИЛИСА получены данные для поперечных сечений образования испарительных продуктов составных ядер $^{258}\text{102}$, $^{260}\text{102}$ и $^{263}\text{105}$ в реакциях $^{22}\text{Ne} + ^{236}\text{U}$, $^{26}\text{Mg} + ^{232}\text{Th}$, $^{22}\text{Ne} + ^{238}\text{U}$, $^{27}\text{Al} + ^{236}\text{U}$ и $^{31}\text{P} + ^{232}\text{Th}$. Полученные данные наглядно демонстрируют возможности использования метода "горячего" слияния для синтеза новых изотопов трансфермиевых элементов в реакциях с испарением 5–6 нейтронов.

5. Полученные оценки для ограничений во входном канале для реакций полного слияния с тяжелыми ионами в области сильнодефицитных

ядер с большой энергией возбуждения ($E^* \geq 50$ МэВ), имеющих параметр делимости X_{arith} больше предельного ($X_{arith}=0.72$), показывают, что экспериментальные данные не подтверждают предположение о наличии эффекта типа "extra-extra push" для барьеров слияния реакций с использованием асимметричных комбинаций налетающий ион – ядро мишени.

6. Экспериментальные данные позволяют дать оценки отношения значений Γ_n/Γ_{tot} на начальной стадии процесса девозбуждения сильно-делящихся ядер с $Z = 98 - 102$ с большой энергией возбуждения ($E^* \approx 60-75$ МэВ). Усредненная по двум первым каскадам девозбуждения ($E^* \approx 60$ МэВ) компаунд ядра $^{258}102$ величина отношения $\langle \Gamma_n/\Gamma_{tot} \rangle$ составляет 0.5. Усредненная по двум первым каскадам девозбуждения ($E^* \approx 75$ МэВ) компаунд ядра $^{260}102$ величина отношения $\langle \Gamma_n/\Gamma_{tot} \rangle$ составляет 0.3. Этот результат может рассматриваться как указание на то, что высокая энергия возбуждения компаунд ядер, образующихся в асимметричных реакциях полного слияния, не служит сильным ограничением в процессе выживания тяжелых ядер – остатков испарения.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Еремин А.В., Тарабрин В.А., Степанцов С.В., Обухов Ю.Л., Тер-Акопян Г.М., "Электростатический сепаратор продуктов реакций полного слияния на пучке тяжелых ионов установки ВАСИЛИСА."// Дубна, 1985, 7 с. /Сообщение Объед. ин-т ядерн. исслед., P15-85-786/

2. Андреев А.Н., Богданов Д.Д., Горшков В.А., Еремин А.В., Кабаченко А.П., Орлова О.А., Тер-Акопян Г.М., Чепигин В.И., "Исследование характеристик кинематического сепаратора ВАСИЛИСА."// Дубна, 1988, /Краткие сообщения ОИЯИ, N3[29]-88, с. 33-40./

3. Yeremin A.V., Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Gorshkov V.A., Ivanenko A.I., Kabachenko A.P., Rubinskaya L.A., Smirnova E.M., Stepantsov S.V., Voronkov E.N., Ter-Akopian G.M., "The VASSILISSA facility for electrostatic separation and study of complete fusion reaction products."// Nucl. Instr. and Meth. A., 1989, vol. 274, p. 528-532.

4. Yeremin A.V., Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Orlova O.A., Ter-Akopian G.M., Chepigin V.I., "The efficiency of the experimental setup VASSILISSA for separation of the nuclear reaction products."// Дубна, 1990, 10 с. /Препринт Объед. ин-т ядерн.

исслед.: E15-90-347./

5. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Cherepanov Ye.A., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Sagaidak R.N., Salamatin L.I., Ter-Akopian G.M. and Yeremin A.V., "Production of the 102 element isotopes in the $^{22}\text{Ne}+^{236}\text{U}$ and $^{26}\text{Mg}+^{232}\text{Th}$ reactions." Дубна, 1991, 24 с. /Препринт Объед. ин-т ядерн. исслед.: D7-91-481/.

6. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Cherepanov Ye.A., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Mikchajlov K.V., Muzychka Yu.A., Popeko G.S., Pustynnik B.I., Sagaidak R.N., Ter-Akopian G.M. and Yeremin A.V., "Studies of formation of fusion evaporation residues with $Z \geq 83$ in heavy ion reactions."// Дубна, 1991, 12 с. /Препринт Объед. ин-т ядерн. исслед.: E 15-91-411/.

7. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Oganessian Yu.Ts., Sagaidak R.N., Ter-Akopian G.M., Yeremin A.V., Heßberger F.P., Hofmann S., Ninov V., Florek M., Saro S., Veselsky M., "Investigation of the fusion reaction $^{27}\text{Al}+^{236}\text{U} \rightarrow ^{263}105$ at excitation energies of 57 MeV and 65 MeV."// Z. Phys. A., 1992, vol. 344, p. 225-226.

8. Yeremin A.V., Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Sagaidak R.N., Ter-Akopian G.M., "The kinematic separator VASSILISSA – present status."// FLNR JINR Scientific Report 1991-1992, Dubna, 1992, E7-93-57, p. 201-202.

9. Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Sagaidak R.N., Salamatin L.I., Ter-Akopian G.M., Yeremin A.V., "Cross sections of 102 element isotopes formation in the reactions of $^{22}\text{Ne}+^{236}\text{U}$ and $^{26}\text{Mg}+^{232}\text{Th}$."// Z. Phys. A., 1993, vol. 345, p. 389-394.

10. Sagaidak R.N., Yeremin A.V., "On ionic charge distributions of heavy evaporation residues."// FLNR JINR Scientific Report 1991-1992, Dubna, 1992, E7-93-57, p. 148-149.

11. Ter-Akopian G.M., Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Chepigin V.I., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Muzychka Yu.A., Popeko G.S., Pustynnik B.I., Saro S., Sagaidak R.N., Veselsky M., Yeremin A.V., "Production of $Z \geq 82$ Heavy Ion Fusion Evaporation Residues (ER) and Fissility of Heavy Nuclei."// Nucl. Physics A, 1993, vol. 553, p. 735c-738c.

12. Yeremin A.V., Andreyev A.N., Bogdanov D.D., Ter-Akopian G.M., Chepigin V.I., Gorshkov V.A., Kabachenko A.P., Malyshev O.N., Popeko A.G., Sagaidak R.N., Sharo S., Voronkov E.N., Taranenko A.V., Lavrent-

jev A.Yu., "The kinematic separator VASSILISSA – performance and experimental results."// Дубна, 1994, 22 с. /Препринт Объед. ин-т ядерн. исслед., E15-94-64/ Submitted to Nucl. Instr. and Meth. A.

Цитируемая литература

[1] Flerov G.N. and Ter-Akopian G.M., "Synthesis and study of atomic nuclei with $Z > 100$."// Prog. Part. Nucl. Phys., 1987, vol. 19, p. 197-239.

[2] Seaborg G.T. and Loveland W.D., "Transuranium nuclei."// In: "Treatise on Heavy Ion Science", vol. 4 "Extreme nuclear states.", p. 255-330, ed. by D.A. Bromley, Plenum Press, New-York, 1985.

[3] Münzenberg G., "Recent advances in the discovery of transuranium elements."// Rep. Prog. Phys., 1988, vol. 51, p. 57-104.

[4] Ильинов А.С., Оганесян Ю.Ц., Черепанов Е.А., "Образование слабозбужденных составных ядер и возможности синтеза тяжелых и сверхтяжелых элементов."// Ядерная физика, 1982, том 36, вып. 1, стр. 118-129.

[5] Münzenberg G., "In-flight separation of heavy ion beams."// Darmstadt, 1992, 50 p. /Preprint GSI, N 92-76./

[6] Armbruster P., "On the production of heavy elements by cold fusion: the elements 106 to 109."// Ann. Rev. Nucl. Part. Sci., 1985, vol. 35, p. 135-194.

[7] Blocki J.P., Feldmeier H., Swiatecki W.J., "Dynamical hindrance to compound-nucleus formation in heavy-ion reactions."// Nucl. Phys. A., 1986, vol. 459, p. 145-172.

[8] Muzychka Yu.A., Pustynnik B.I., "Hot fusion reaction cross-sections."// JINR Rapid Communications, 1991, N 4[61]-91, p. 54-59.

[9] Flerov G.N., Oganessian Yu.Ts., Pleve A.A., Pronin N.V., Tretyakov Yu.P., "Acceleration of ^{48}Ca ions and new possibilities of synthesizing superheavy elements."// Nucl. Phys. A, 1976, vol. 267, p. 359-364.

[10] Heßberger F.P., Münzenberg G., Hofmann S., Agarwal Y.K., Poppensieker K., Reisdorf W., Schmidt K.-H., Schneider J.R.H., Schneider W.F.W., Schött H.J., Armbruster P., Thuma B., Sahm C.-C., Vermeulen D., "The new isotopes $^{258}\text{105}$, $^{257}\text{105}$, ^{254}Lr and ^{253}Lr ."// Z. Phys. A, 1985, vol. 322, p. 557-566.

Рукопись поступила в издательский отдел
29 ноября 1994 года.