

ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ АНАЛИЗАТОРЕ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ (МАВР)

*В. А. Зернышкин¹, В. А. Маслов, Ю. Э. Пенионжкевич,
В. И. Казача, И. В. Колесов, О. Б. Тарасов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты моделирования траекторий движения заряженных частиц в магнитном анализаторе высокого разрешения (МАВР), являющемся новой установкой для очищения продуктов ядерных реакций со стабильными и радиоактивными ядрами на ускорителе У-400. Разработан программный комплекс MAVRPC, дающий возможность расчета фокальной плоскости анализатора, подбора оптимальных полей квадрупольей и магнитов, расчета телесного угла установки.

The results of simulating the trajectories of motion of charged particles in a high-resolution magnetic analyzer (MAVR) are presented. MAVR is a new facility for purifying nuclear products of reactions with stable and radioactive nuclei at the U-400 accelerator. The MAVRPC software package is developed. MAVRPC gives the possibility of calculating the focal plane of the analyzer, selecting the optimal fields of quadrupoles and magnets, and calculating the solid angle of the facility.

PACS: 29.50.+v; 29.30.Aj

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных направлений научной деятельности Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ является исследование механизма ядерных реакций со стабильными и радиоактивными пучками ускоренных ядер, а также изучение свойств ядер, расположенных у границ нуклонной стабильности. Эксперименты проводятся на циклотронах ЛЯР — У-400, У-400М, а также в кооперации с другими научными центрами — GANIL (Франция) [4], RIKEN (Япония), Q3D (Германия) [5, 6]. Во всех экспериментах используются магнитные спектрометры и сепараторы, позволяющие получать высокую степень очистки первичного пучка и сепарировать продукты реакций с высоким разрешением по импульсу, а соответственно, энергетическим и массовым разрешением.

Впервые метод магнитного анализа был применен в ЛЯР ОИЯИ В. В. Волковым в 1970 г. при изучении реакций многонуклонных передач и получении новых нейтроноизбыточных изотопов легких элементов. Так, при облучении ^{232}Th ионами ^{18}O был зарегистрирован изотоп ^{22}O , что указывало на его ядерную устойчивость [7]. Одновременно были обнаружены новые нейтроноизбыточные нуклиды ^{20}N и ^{18}C , образование

¹E-mail: 94zernyshkin@gmail.com

которых было связано реакциям обмена нуклонами между столкнувшимися ядрами. Были зарегистрированы самые тяжелые из известных изотопы бора и бериллия ^{14}B и ^{12}Be [8]. В этих работах использовался комбинированный метод детектирования, основанный на методе магнитного анализа и методе dE-E.

В ЛЯР ОИЯИ с использованием магнитного анализатора МСП-144 [2] были проведены исследования по изучению стабильности и структуры супернейтроноизбыточных ядер легчайших элементов (^{7-10}He , ^{9-11}Li , $^{12-14}\text{Be}$). С применением метода недостающих масс была исследована структура тяжелых изотопов этих ядер, определена их энергия связи и стабильность. Впервые были получены данные об энергетических уровнях в ядрах $^{7,8,9}\text{He}$, $^{10,11}\text{Li}$, ^{13}Be [5, 6].

Новые возможности для этих исследований открылись с запуском ускорительного комплекса радиоактивных пучков DRIBs. Здесь на новом экспериментальном уровне (относительно высокая интенсивность радиоактивных пучков, хорошее импульсное разрешение магнитного спектрометра МСП-144) были начаты исследования реакций с ядрами ^6He вблизи барьерной области энергий. Интенсивность пучка ^6He на физической мишени составила $(3-5) \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. Монохроматизация энергии вторичного пучка с использованием МСП-144 и двух магнитов снижения позволила измерить функции возбуждения реакций слияния и передачи нейтронов с ядрами ^6He с точностью не хуже 300 кэВ [9]. Впервые были получены интересные результаты, свидетельствующие о возможности глубокоподбарьерного слияния ядер ^6He с нейтроном гало с другими тяжелыми ядрами [10–12]. Результаты измерения сечений слияния с ядрами ^4He с образованием того же составного ядра, что и в случае с ^6He , показали, что имеется сильное отличие механизмов взаимодействия этих двух соседних легких ядер. Интересные результаты были получены с использованием МСП-144 для реакций передачи с участием слабосвязанных ядер (передача одного и двух нейтронов с ядра ^6He [9] и дейтрона — с ядра ^6Li [13]). В обоих случаях максимумы сечений реакций передачи наблюдались при энергии, соответствующей кулоновскому барьеру взаимодействия, а в случае передачи нейтронов от ^6He сечение достигало величины, превышающей 1 б. Эти результаты стимулировали развитие подобных исследований во многих научных центрах и имеют фундаментальное значение для ядерной физики и астрофизики. Необходимо заметить, что все эти эксперименты проводились в тесной коллаборации с физиками из стран-участниц ОИЯИ: ИЯФ АН ЧР (NPI ASCR) — Ржеж, Чешская Республика, ИФЯТ (IFIN-HH) — Бухарест, Румыния, ИЯФ ПАН (NINP PAS) — Краков, Польша и др.

Предполагаемая программа исследований на спектрометре включает в себя:

- 1) определение нуклонной стабильности/нестабильности экзотических ядер;
- 2) измерение массы этих ядер с использованием метода недостающей массы;
- 3) исследование возбужденных состояний и резонансов в экзотических ядрах;
- 4) поиск кластерных состояний в легких ядрах.

Для решения этих задач и предполагается использовать магнитный анализатор высокого разрешения (установка МАВР) [1].

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Магнитный анализатор высокого разрешения (установка МАВР) включает в себя усовершенствованную магнитно-оптическую систему на основе магнита МСП-144, дублета

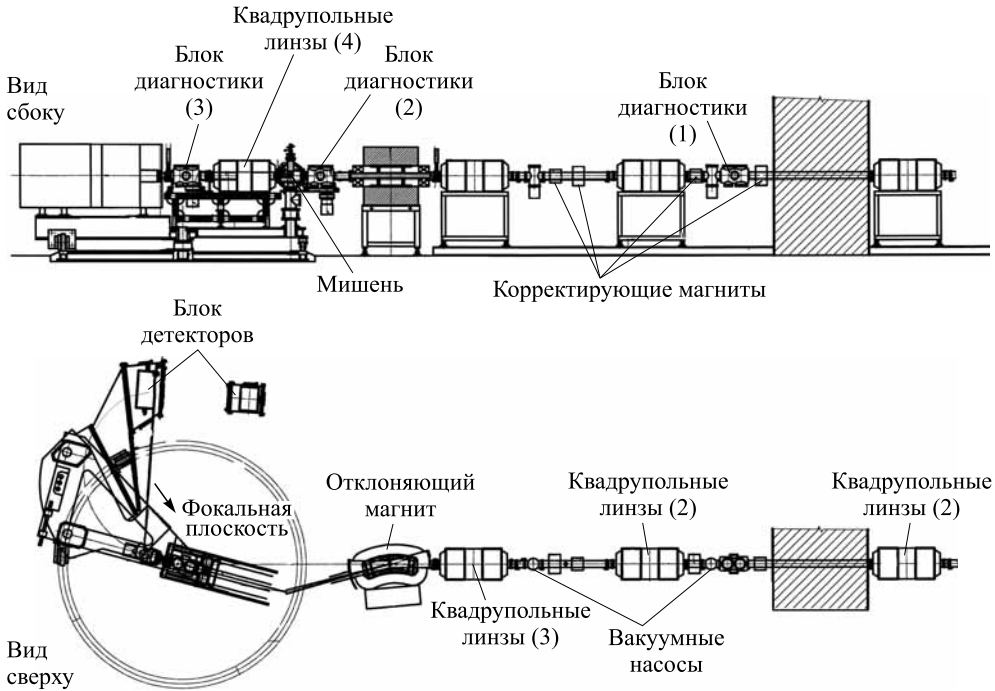


Рис. 1. Схема магнитно-оптической системы отвода, соединяющей анализатор МАВР и ускоритель У-400

квадрупольных линз (Q1–Q2), установленных перед магнитным спектрометром, и блока детекторов, расположенного в фокальной плоскости анализатора. Это позволяет увеличить телесный угол спектрометра по сравнению с МСП-144.

Анализатор МАВР расположен в экспериментальном зале ускорителя У-400. Магнитно-оптическая система отвода, соединяющая анализатор МАВР и ускоритель У-400, представлена на рис. 1.

Схема анализатора МАВР представлена на рис. 2.

Мишень, облучаемая выведенным из циклотрона пучком ионов, находится на расстоянии $d_1 = 2576$ мм от передней грани первого поворотного магнита спектрометра. Расстояние от мишени до первой квадрупольной линзы $r_1 = 307$ мм, между квадруполями $r_2 = 180$ мм. Эффективная длина самих квадрупольных линз составляет $r_{\text{eff}} = 350$ мм. Расстояние между второй квадрупольной линзой и шторками на входе в магнит $r_3 = 873$ мм. Магнит анализатора состоит из двух областей. В первой области магнитное поле в 1,55 раз меньше магнитного поля во второй области. Угол поворота в первом магните ϕ_1 составляет 60° , угол поворота во втором магните ϕ_2 — 51° . Таким образом, полный угол поворота регистрируемой частицы составляет 111° . Расстояние между полюсами в первом магните равно 47 мм, а во втором магните — 30 мм.

В фокальной плоскости анализатора устанавливается детекторная система, которая позволяет регистрировать и идентифицировать продукты ядерных реакций по заряду Q , атомному номеру Z и массе A с высокой абсолютной точностью посредством изме-

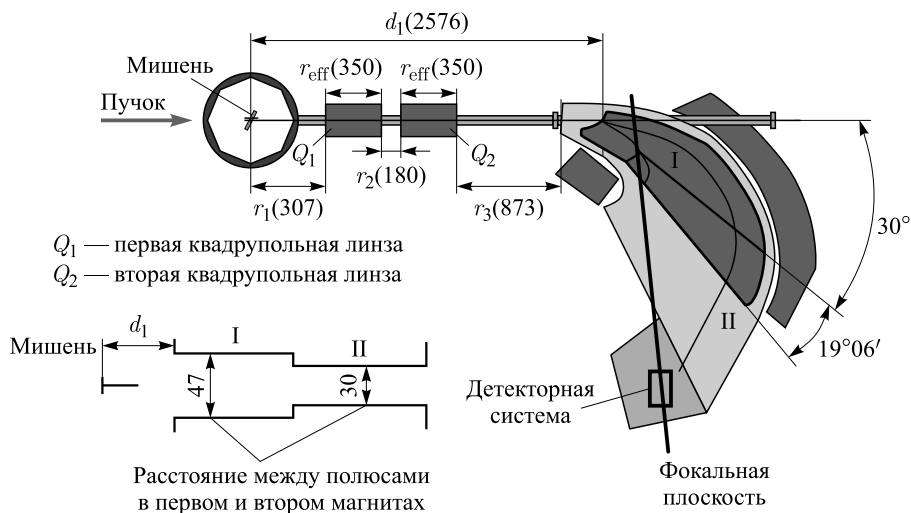


Рис. 2. Схема магнитного анализатора высокого разрешения (МАВР)

Таблица 1. Основные параметры анализатора МАВР

Расстояние между полюсами первого магнита, мм	47
Расстояние между полюсами второго магнита, мм	30
Максимальная магнитная жесткость $B\rho$, Тл·м	1,5
Угол фокальной плоскости, °	38–40
Длина фокальной плоскости, м	1,9
Импульсное разрешение $\Delta p/p$	$1 \cdot 10^{-4}$
Энергетическое разрешение $\Delta E/E$	$5 \cdot 10^{-4}$
Радиус средней траектории R , м	1,25
Телесный угол, мср	До 30
Суммарный угол поворота частицы в анализаторе, град	111

рения потерь энергии (ΔE), времени пролета (T) и полной энергии частиц (E), для чего необходимо воспроизводить траекторию движения частиц в анализаторе. Для решения этих задач предполагается использовать различные типы детекторов от дрейфовой позиционно-чувствительной камеры до стриповых полупроводниковых детекторов.

Модернизированный магнитный анализатор обладает высоким импульсным разрешением ($\Delta p/p \sim 10^{-4}$), большим углом поворота (111°) и длинной фокальной плоскостью (1,9 м). С помощью этого анализатора регистрируются продукты ядерных реакций с высоким разрешением по заряду ($\Delta Z/Z \sim 1/60$), что особенно важно для разделения тяжелых продуктов ядерных реакций. Основные параметры анализатора МАВР представлены в табл. 1.

2. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС MAVRCS

Использование дублета квадрупольных линз в схеме анализатора приводит к зависимости положения фокальной плоскости магнита от полей квадрупольных линз. В связи с этим

Таблица 2. MAVRPC

Название программы	Входные параметры	Выходные параметры
MSP144pc	$B1, B2$	$S_0, \alpha, TU_{\text{MCP-144}}$
MAVR_1	Z, A, E (МэВ), S_0, α	$Q1, Q2, B1, B2, TU$
MAVR_2	Z, A, E (МэВ), $Q1, Q2, B1, B2$	S_0, α, TU

был разработан программный комплекс MAVRPC, позволяющий рассчитывать положение фокальной плоскости и размер телесного угла установки в зависимости от параметров исследуемых частиц. Программный комплекс MAVRPC реализован на специализированной платформе COSY INFINITY [3], предназначенной для проектирования оптических систем, в частности, спектрометров и ускорителей. В основу COSY INFINITY положены методы дифференциальной алгебры: каждый элемент оптической системы задается своей матрицей перехода, что и определяет поведение частиц при прохождении через него. Зависимость положения фокальной плоскости от полей квадрупольей объясняется тем, что матрицы перехода квадрупольей зависят от градиента индукции квадрупольей, а следовательно, и матрица перехода всего анализатора зависит от полей квадрупольей.

Программный комплекс MAVRPC состоит из трех программ (MAVR_1, MAVR_2, MSP144pc), описание которых представлено в табл. 2.

2.1. MSP144pc. Программа MSP144pc предназначена для расчета телесного угла и положения фокальной плоскости спектрометра MCP-144.

На входе программы пользователь задает значение полей магнитов анализатора: $B1$ [Тл], $B2$ [Тл], и в результате программа рассчитывает положение фокальной плоскости ($S_0 = 1,02$ м, $\alpha = 38,17^\circ$), а также значения телесного угла ($TU_{\text{MCP-144}} = 1,3$ мср) спектрометра MCP-144.

Необходимо заметить, что отсутствие квадрупольных линз в анализаторе MCP-144 приводит к фиксации положения фокальной плоскости для любых полей двухкаскадного магнита.

В табл. 3 представлено сравнение технических характеристик фокальной плоскости спектрометра MCP-144 с параметрами, рассчитанными в программе MSP144pc. Расчеты согласуются с техническими характеристиками в пределах погрешностей.

Таблица 3. Значения расчетных и технических параметров фокальной плоскости анализатора MCP-144

Значение параметров	$S_0, \text{ м}$	$\alpha, ^\circ$
Расчетное	$1,02 \pm 0,10$	$38,17 \pm 3,00$
Техническое	1,1	41

Величина телесного угла спектрометра MCP-144, рассчитанная в программе MSP144pc, составляет 1,3 мср и в дальнейшем используется для оценки увеличения телесного угла анализатора нового поколения (MABP).

2.2. MAVR_1. Программа MAVR_1 предназначена для расчета полей магнитов и квадрупольей, телесного угла анализатора MABP. На вход программы пользователь должен задать следующие параметры.

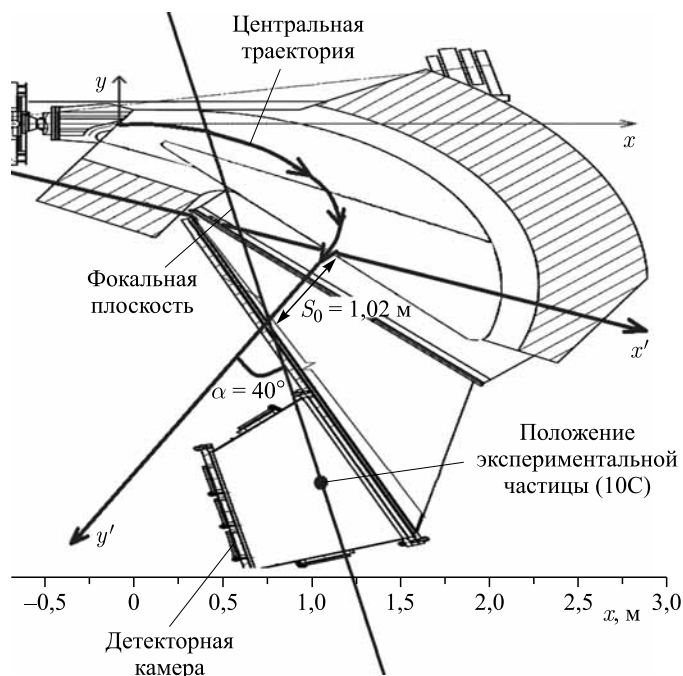


Рис. 3. Графическая интерпретация расчета фокальной плоскости и положения экспериментальной частицы

1) Заряд (Z), атомную массу (A) и энергию (E в МэВ) частицы, проходящей магнитный анализатор по центральной траектории (рис. 3).

2) S_0 — расстояние, которое проходит центральная частица, вылетев из магнита, до фокальной плоскости; α — угол наклона фокальной плоскости к траектории центральной частицы после магнита. Задание этих двух параметров позволяет однозначно определить положение фокальной плоскости анализатора (см. рис. 3).

Программа подбирает оптимальные поля магнитов и квадрупольных линз анализатора, соответствующие входным данным, выдавая на выходе значения следующих параметров:

- 1) поля первой и второй квадрупольных линз: $Q1$ [Тл], $Q2$ [Тл].
- 2) поля первого и второго каскадов магнита анализатора: $B1$ [Тл], $B2$ [Тл].
- 3) расчетное значение телесного угла анализатора МАВР: TU .

2.3. MAVR_2. Программа MAVR_2 предназначена для расчета положения фокальной плоскости и телесного угла анализатора. На входе программы пользователь задает следующие параметры.

1) Заряд (Z), атомную массу (A) и энергию (E в МэВ) частицы, проходящей магнитный анализатор по центральной траектории (см. рис. 3).

- 2) Поля первой и второй квадрупольных линз: $Q1$ [Тл], $Q2$ [Тл].
- 3) Поля первого и второго каскадов магнита анализатора: $B1$ [Тл], $B2$ [Тл].

В результате, в программе рассчитываются положения фокальной плоскости и телесный угол анализатора, соответствующие входным данным, с выдачей значений следующих параметров:

Таблица 4. Расчет траекторий движения заряженных частиц в магнитном анализаторе высокого разрешения (МАВР)

Центральная частица	Энергия центральной частицы E, A МэВ	$B1, Tл$	$B2, Tл$	$Q1, Tл$	$Q2, Tл$	$S_0, м$	$\alpha, ^\circ$	Расчетный телесный угол $TU, мср$	Увеличение телесного угла по сравнению с МСП-144
4He	10	0,73	1,13	0,1633	0,221	0,6	35	3,96	3
4He	10	0,73	1,13	0,362	0,361	1,1	30	3,6	2,77
4He	10	0,73	1,13	0,161	0,242	0,2	25	3	2,3
^{11}Li	10	1,34	2,07	0,5	0,13	0,95	40	2,7	2,1
8B	10	0,58	0,9	0,4	0,15	0,93	40	3,1	2,4

1) S_0 — расстояние, которое проходит центральная частица, вылетев из магнита, до фокальной плоскости; α — угол наклона фокальной плоскости к траектории центральной частицы после магнита (см. рис. 3).

2) Расчетное значение телесного угла анализатора МАВР: TU .

Графическая интерпретация расчетов положения фокальной плоскости выполнена в пакетах численного анализа данных Excel и Origin (см. рис. 3).

С помощью программ MAVR_1 и MAVR_2 проведен расчет траекторий движения заряженных частиц в магнитном анализаторе высокого разрешения (МАВР), вычислены параметры оптимальных положений фокальной плоскости анализатора для разных полей квадрупольей и магнитов (табл. 4).

Расчеты показывают, что для фокальных плоскостей анализатора, проходящих через детекторную камеру (см. рис. 3), увеличение телесного угла анализатора МАВР по сравнению с анализатором МСП-144 достигает трех раз.

3. ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА MAVRPC

Тестирование проведено путем сравнения результатов работы программного комплекса MAVRPC с результатами моделирования методом Монте-Карло в программе LISE++ [14].

Программа LISE++ была разработана для расчета передачи и выхода продуктов реакций, полученных и собранных в спектрометре. Этот код позволяет моделировать эксперимент, начиная от параметров реакционного механизма и заканчивая регистрацией продуктов, выбранных спектрометром. Программа позволяет быстро оптимизировать параметры спектрометра до или во время эксперимента.

Методика тестирования программного комплекса MAVRPC включала в себя два этапа.

На первом этапе в программе MAVR_1 были рассчитаны оптимальные значения полей квадрупольей ($Q1 = 0,33568$ Тл, $Q2 = 0,35760$ Тл) и полей магнитов ($B1 = 0,73$ Тл; $B2 = 1,13$ Тл), соответствующие заданной пользователем фокальной плоскости ($S_0 = 1$ м, $\alpha = 30$), в качестве центральной частицы была выбрана α -частица ($Z = 2$, $A = 4$) с энергией $E = 40$ МэВ.

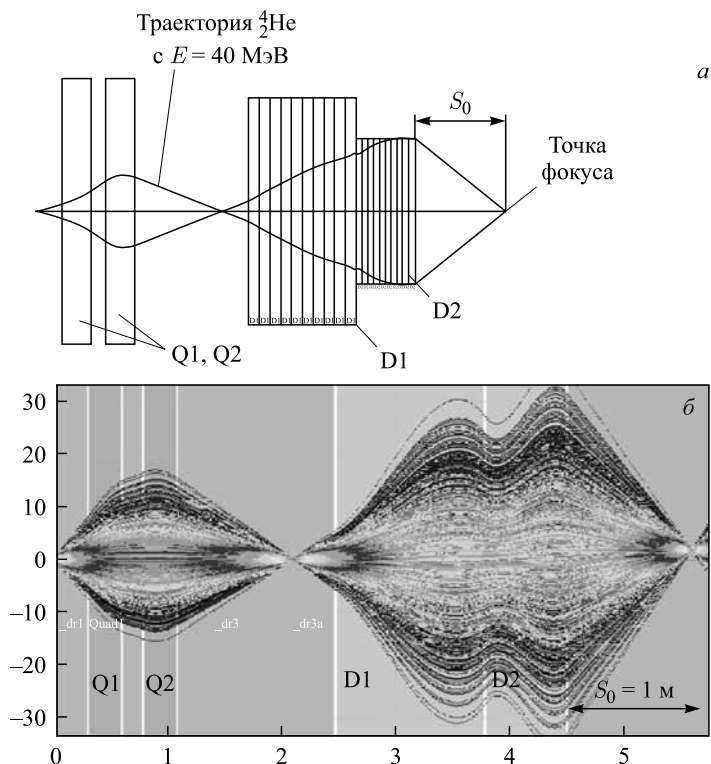


Рис. 4. Траектории движения α -частиц с энергией 40 МэВ в анализаторе МАВР: а) рассчитанные в программном комплексе MAVRPC; б) смоделированные методом Монте-Карло в программе LISE++. Q1, Q2 — квадрупольные линзы; D1 — первый магнит; D2 — второй магнит

Расчетный телесный угол установки: $TU = 4,0642$ мср, что в 3,1 раза больше расчетного телесного угла анализатора МСП-144.

На втором этапе тестирования было проведено моделирование методом Монте-Карло траекторий прохождения α -частицы с энергией 40 МэВ через анализатор МАВР в программе LISE++. При этом поля магнитов и квадрупольных линз были зафиксированы ранее вычисленными значениями в программном комплексе MAVRPC ($Q1 = 0,33568$ Тл, $Q2 = 0,35760$ Тл, $B1 = 0,73$ Тл; $B2 = 1,13$ Тл). В результате моделирования получена величина $S_{0\text{LISE++}} = 1$ м — расстояние, проходимое центральной частицей до фокальной плоскости, после вылета из магнита.

Таким образом, полученные при моделировании результаты фокусировки ($S_{0\text{LISE++}} = 1$ м) α -частиц с энергией 40 МэВ с высокой точностью соответствуют расчетной фокусировке ($S_0 = 1$ м) программного комплекса MAVRPC.

На рис. 4 представлены траектории движения α -частиц с энергией 40 МэВ в анализаторе МАВР: рассчитанные в программном комплексе MAVRPC (рис. а), смоделированные методом Монте-Карло в программе LISE++ (рис. б). Общий вид траекторий совпадает.

Таблица 5. Основные результаты тестирования комплекса MAVRPC

Этап	Программа	Центральная частица	$B1$, Тл	$B2$, Тл	$Q1$, Тл	$Q2$, Тл	S_0 , м	α , °
I	MAVRPC	${}^4\text{He}$, $E = 40$ МэВ	0,73	1,13	0,34	0,36	1	30
II	LISE++	${}^4\text{He}$, $E = 40$ МэВ	0,73	1,13	0,34	0,36	1	—

В табл. 5 представлены основные результаты тестирования программного комплекса MAVRPC.

Необходимо отметить, что программный комплекс MAVRPC, в отличие от LISE++, дает возможность оценки угла наклона фокальной плоскости анализатора к траектории движения центральной частицы (α), что важно для однозначного определения положения фокальной плоскости спектрометра и позиции детекторов в ходе эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, был проведен расчет траекторий движения заряженных частиц в магнитном анализаторе высокого разрешения (МABP), выполненный в программном комплексе MAVRPC.

Расчеты показали, что для фокальных плоскостей анализатора, проходящих через детекторную камеру, увеличение телесного угла анализатора МABP по сравнению с анализатором МСП-144 может достигать трех раз, импульсное разрешение $\Delta p/p \sim 1 \cdot 10^{-4}$, энергетическое разрешение $\Delta E/E \sim 5 \cdot 10^{-4}$, продукты ядерных реакций регистрируются с высоким разрешением по заряду ($\Delta Z/Z \sim 1/60$).

Настоящая работа выполнена при поддержке грантом РФФИ № 17-12-01170, грантами полномочных представителей правительств Чешской Республики, Республики Польши и Казахстана в ОИЯИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maslov V. A., Kazacha V. I., Kolesov I. V., Lukyanov S. M., Melnikov V. N., Osipov N. F., Penionzhkevich Yu. E., Skobelev N. K., Sobolev Yu. G., Voskoboinik E. I. // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 724. P. 012033.
2. Skobelev N. K. et al. // Nucl. Instr. Meth. 2005. V. 227. P. 471.
3. <http://www.cosyinfinity.org/>
4. Lukyanov S. M. et al. // J. Phys. G (London). 2002. V. 28. P. L41.
5. Калтакчиева Р. Г., Пенионжкевич Ю. Э. // ЭЧАЯ. 2002. Т. 33, вып. 6. С. 1247–1307.
6. Penionzhkevich Yu. E., Kalpakchieva R. G., Lukyanov S. M. // Nucl. Phys. A. 2003. V. 722. P. 170c–175c.
7. Artukh A. G., Gridnev G. F., Mikheev V. L., Volkov V. V., Wilczynski J. // Nucl. Phys. A. 1972. V. 192. P. 170.
8. Artukh A. G., Avdeichikov V. V., Ero J., Gridnev G. F., Mikheev V. L., Volkov V. V., Wilczynski J. // Nucl. Phys. A. 1971. V. 160. P. 511.

9. *Penionzhkevich Yu. E., Astabatyán R. A., Demekhina N. A., Gulbekian G. G., Kalpakchieva R. G., Kulko A. A., Lukyanov S. M., Markaryan E. R., Maslov V. A., Muzychka Yu. A., Oganessian Yu. Ts., Revenko R. V., Skobelev N. K., Sobolev Yu. G., Testov D. A., Zholdybaev T.* // *Eur. Phys. J. A.* 2007. V. 31. P. 185–194.
10. *Penionzhkevich Yu. E., Muzychka Yu. A., Lukyanov S. M., Kalpakchieva R. G., Skobelev N. K., Pere-lygin V. P., Sobolev Yu. G., Mikhailov L. V., Ugryumov V. Yu., Vincour V., Dlouhy Z., Kostov L., Mrazek Ya., Poroshin N. O.* // *Yad. Fiz.* 2002. V. 65. P. 1603; *Phys. At. Nucl.* 2002. V. 65. P. 1563.
11. *Penionzhkevich Yu. E., Astabatyán R. A., Demekhina N. A., Dlouhy Z., Kalpakchieva R. G., Kulko A. A., Lobastov S. P., Lukyanov S. M., Markaryan E. R., Maslov V. A., Muzychka Yu. A., Oganessian Yu. Ts., Rassadov D. N., Skobelev N. K., Sobolev Yu. G., Ugryumov V. Yu., Vincour J., Zholdybaev T.* // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2006. V. 3. P. 362.
12. *Lukyanov S. M., Penionzhkevich Yu. E., Astabatyán R. A., Demekhina N. A., Dlouhy Z., Ivanov M. P., Kalpakchieva R., Kulko A. A., Markarian E. R., Maslov V. A., Revenko R. V., Skobelev N. K., Smirnov V. I., Sobolev Yu. G., Trazska W., Khlebnikov S. V.* // *Phys. Lett. B.* 2009. V. 670. P. 321–324.
13. *Penionzhkevich Yu. E., Kalpakchieva R. G., Kulko A. A., Lukyanov S. M., Maslov V. A., Sko-belev N. K.* // *Intern. J. Mod. Phys. E.* 2008. V. 17, No. 10. P. 2349–2353.
14. <http://lise.nslc.msu.edu/lise.html>

Получено 12 марта 2018 г.