**ПРОЕКТ** УТВЕРЖДАЮ

Директор ЛЯР ОИЯИ

С.И. Сидорчук

«…..» апреля 2024 г. «

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Научно-технического совета

Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флёрова

Объединённого института ядерных исследований

по диссертационной работе **Попеко Андрея Георгиевича** «Разработка электромагнитных in-flight сепараторов для изучения свойств сверхтяжёлых ядер», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.2. - приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертационная работа была выполнена в Лаборатории ядерных реакций им.  Г.Н. Флёрова Объединённого института ядерных исследований.

Основные результаты работы были представлены Попеко А.Г. на общелабораторном семинаре ЛЯР 19 апреля 2024 г. По результатам обсуждения было подготовлено настоящее заключение.

**Цель работы:** разработка электромагнитных сепараторов, обладающих высокой скоростью разделения продуктов ядерных реакций полного слияния, высокой эффективностью транспорта продуктов к детектирующим устройствам и обеспечивающих значительное подавление продуктов фоновых реакций.

**Степень разработанности темы исследования:** результаты работы доведены до практической реализации: на основании алгоритмов оптимизации настройки сепараторов созданы компьютерные коды, используемые при проведении экспериментов, предложены и реализованы схемы модернизации существующей установки ВАСИЛИСА – создания селектора скоростей SHELS и новых газонаполненных сепараторов ГНС-2 и ГНС-3 для Фабрики сверхтяжелых элементов (СТЭ), которые реализованы в «металле» и успешно эксплуатируются.

**Результаты и положения, выносимые на защиту:**

1. Разработаны компьютерные Монте-Карло программы, моделирующие процесс образования и прохождения продуктов реакций полного слияния через вещество мишени; программы учитывают кинематику реакции, испарение из составного ядра нейтронов, протонов, α-частиц; рассеяние, потерю энергии и зарядовое состояние остатка испарения при движении через мишень и перезарядную фольгу.
2. На основании программы моделирования разработан алгоритм оптимизации настройки фокусирующих систем сепараторов по максимальному выходу, обеспечивающий увеличение трансмиссии продуктов реакций на 20 – 50% по сравнению с известными алгоритмами.
3. На основании результатов измерений предложены формулы для оценки средних зарядов ионов, движущихся в разреженных водороде и гелии, предложенные систематики позволили обосновать преимущества использования водорода в качестве рабочего газа.
4. Предложенные алгоритмы использованы при проектировании новых сепараторов для выбора, оптимизации ионно-оптических схем и определения характеристик элементов:

* предложена и реализована ионно-оптическая схема трансформации электростатического сепаратора ВАСИЛИСА в селектор скоростей, обладающий повышенной эффективностью транспорта продуктов асимметричных реакций слияния.
* предложены и реализованы ионно-оптические схемы газонаполненных сепараторов ГНС-2 и ГНС-3 для Фабрики СТЭ, обеспечивших увеличение эффективности транспорта продуктов реакций более чем в 2 раза и снижение фона более чем в 200 раз.

**Научная новизна:** научная новизна работы заключается в развитии методик разделения продуктов ядерных реакций для изучения свойств тяжёлых и сверхтяжёлых изотопов, разработке новых алгоритмов оптимизации настройки электромагнитных сепараторов, позволивших существенно повысить эффективность проведения экспериментов. Наличие новых разработок позволяет расширить исследования в области ядерной спектроскопии, а также химических свойств новых элементов.

Практическая значимость работы:Характеристики сепаратора являются важнейшей составляющей при планировании экспериментов. На основе вычисленной трансмиссии происходит анализ возможностей постановки эксперимента, определение необходимой дозы пучка, времени проведения эксперимента и числа синтезированных ядер.

Созданная модель позволяет определять оптимальные параметры магнитных элементов сепаратора для исследования различных реакций и достигать высокой эффективности работы сепаратора.

**Личный вклад автора:** автор принимал непосредственное участие в анализе возможных ионно-оптических схем сепараторов с целью выбора наиболее оптимальных вариантов, в сопровождении инженерного проектирования и монтажа новых установок. Автор участвовал в планировании, организации и проведении тестовых экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных данных, подготовке публикаций и докладов на конференции. При непосредственном участии автора был реконструирован сепаратор ВАСИЛИСА, создан селектор скоростей SHELS, были построены, протестированы и введены в эксплуатацию новые экспериментальные установки – газонаполненные сепараторы ГНС-2 и ГНС-3 для «Фабрики СТЭ».

Научно-методические работы по тематике диссертации, выполненные с участием автора, неоднократно отмечались премиями на конкурсах ОИЯИ.

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем: соискатель является соавтором более 200 научных работ, основные положения и выводы диссертационного исследования изложены в 18 публикациях, в том числе 18 - в рецензируемых изданиях, индексируемых международными базами данных.

**Список публикаций автора по теме диссертационной работы**

1. Ю.Ц. Оганесян, Ю.В. Лобанов, **А.Г. Попеко**, и др. *Газонаполненный магнитный сепаратор продуктов ядерных реакций на пучке тяжёлых ионов.* Труды международной школы-семинара по физике тяжёлых ионов. Дубна, 3 – 12 октября 1989. ОИЯИ, 1990. № D7-90-142. С. 44–51.
2. Yu.Ts. Oganessian, Yu.V. Lobanov, **A.G. Popeko**, et. al. *The average equilibrium charge-states of heavy ions with Z > 60 stripped in He and H2.* Zeitschrift für Physik D - Atoms, Molecules and Clusters. 1991. Vol. 21(1), no. S357–S358.
3. Yu.Ts. Oganessian, Yu.V. Lobanov, **A.G. Popeko**, et. al. *An attempt to synthesize element 110 in the reaction 40Ar + 236U and identify it using a gas-filled separator*. Proceedings of the 6th Int. Conf. on Nuclei Far From Stability and 9th Int. Conf. on Atomic Masses and Fundamental Constants. Bernkastel-Kues, Germany, 1992. Journal of Physics: Conference Series. 1992. Vol. 132. P. 429 – 432.
4. A.V. Yeremin, A.N. Andreyev, … **A.G. Popeko**, и др. *The kinematic separator VASSILISSA performance and experimental results.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 1994. Vol. 350(3). P. 608 – 617.
5. **A.G. Popeko**, O.N. Malyshev, R.N. Sagaidak, A.V. Yeremin. *Monte-Carlo simulation of ion trajectories in the kinematic recoil separator VASSILISSA.* Nuclear Instr. and Methods in Physics Research B. 1997. Vol. 126(1-4). P. 294 – 296.
6. A.V. Yeremin, D.D. Bogdanov, V.I. Chepigin, … **A.G. Popeko**, et. al. *The electrostatic separator VASSILISSA performance and experimental results.* Nuclear Instr. and Methods in Physics Research B. 1997. Vol. 126(1-4). P. 329 – 333.
7. **A.G. Popeko**, O.N. Malyshev, A.V. Yeremin, S. Hofmann. *Monte-Carlo optimization of the transmission of recoil separators*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A. 1999. Vol. 427(1–2). P. 166 – 169.
8. Yu.Ts. Oganessian, A.V. Yeremin, **A.G. Popeko**, et.al. *Synthesis of nuclei of the superheavy element 114 in reactions induced by 48Ca.* Nature. - 1999. - Vol. 400. P. 242 – 245.
9. Yu.Ts. Oganessian, M.G. Itkis, **A.G. Popeko**, V.K. Utyonkov, A.V. Yeremin. *Synthesis of superheavy elements with 48Ca beams.* Nuclear Physics A. 2001. Vol. 682(1-4). P. 108 – 113.
10. **A.G. Popeko**, O.N. Malyshev, A.V. Yeremin, et. al. *In-beam separation and mass determination of superheavy nuclei. Part I.* Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 2003. - Vol. 510(3). P. 371 – 376.
11. A.V. Yeremin, A.V. Belozerov, … **A.G. Popeko**, et. al. *The upgrade of the kinematic separator VASSILISSA - experimental results and plans.* Physics of Atomic Nuclei. 2003. Vol. 66(6). P. 1042 – 1052.
12. А.В. Еремин, **А.Г. Попеко**. *Сепарация и идентификация продуктов реакций полного слияния, дальнейшее развитие методов (определение массы тяжёлых ядер)*. Физика элементарных частиц и атомного ядра. 2004. Т. 35. № 4. с. 480 – 497.
13. A. Yeremin, O. Malyshev, **A. Popeko**, et. al. *Project of the experimental setup dedicated for gamma and electron spectroscopy of heavy nuclei at FLNR JINR*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2008. Vol. 266(1–4). P. 4137 – 4142.
14. А.В. Еремин, **А.Г. Попеко**, и др. *Первые экспериментальные тесты модернизированного сепаратора «ВАСИЛИСА»*. Физика элементарных частиц и атомного ядра. Письма. 2015. Т. 12(1). - с. 63 – 73.
15. **A.G. Popeko**, A.V. Yeremin, et. al. *Separator for Heavy ELement Spectroscopy – velocity filter SHELS*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2016. Vol. 376(1). P. 140 – 143.
16. **A.G. Popeko**. *On-line separators for the Dubna Superheavy Element Factory*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2016. Vol. 376(1). P. 144 – 149.
17. S. Hofmann, … **A.G. Popeko**, et. al. *Review of even element super-heavy nuclei and search for element 120.* The European Physical Journal A. 2016. Vol. 52(6). P. 180(1 – 34).
18. Yu.Ts. Oganessian, V.K. Utyonkov, **A.G. Popeko**, et. al. DGFRS-2 - *A gas-filled recoil separator for the Dubna Super Heavy Element Factory*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 2022. Vol. 1033. Article No. 166640.

**Результаты, являющиеся основой диссертации, неоднократно докладывались на международных конференциях:**

* Международная школа-семинар по физике тяжёлых ионов. Дубна, РФ, 3 – 12 октября 1989,
* V International Conference on the Physics of Highly Charged ions, Gieβen, Germany, September 10 – 14, 1990,
* 6th International Conference on Nuclei far from Stability + 9th International Conference on Atomic Masses and Fundamental Constants, Bernkastel-Kues, July 19 – 24, 1992, Germany,
* XIII-th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications (EMIS-13), Bad Dürkheim, Germany, September 23 – 27, 1996,
* XV-th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications (EMIS-2007), Deauville, France, 24 – 29 June 2007,
* Colloques GANIL, Belgodère, Corsica, France, 25 – 30 September 2011,
* International conference «Nuclear Physics: Presence and Future», Boppard, Germany, 29 May – 05 June, 2013
* First International African Symposium on Exotic Nuclei, Cape Town, South Africa, 2 – 6 December 2013,
* The 8th APCTP-BLTP JINR Joint Workshop, Jeju Island, Korea, 29 June – 4 July 2014,
* 27-th International Conference of the International Nuclear Target Development Society (INTDS-2014) Tokyo, Japan, August 31 – September 5, 2014,
* International Symposium «Superheavy Nuclei», A & M University, College Station, Texas, USA, 31.03 – 02.04, 2015,
* XVII-th International Conference on Electromagnetic Isotope Separators and Related Topics (EMIS-2015), Grand Rapids, MI, U.S.A., 11 – 15 May 2015,
* NUSTAR Annual Meeting, GSI, Darmstadt Germany 29.02 – 04.03.2016,
* 3-rd International Symposium «SHE-2017», Kazimierz Dolny, Poland, 10 – 14 September, 2017,
* 41-st European Cyclotron Progress Meeting JINR, Dubna, Russia, 02 – 06 September 2018,
* NUSTAR Annual Meeting, GSI, Darmstadt, Germany, 25.02 – 01.03.2019,
* XXI Менделеевский конгресс по общей и прикладной химии, Санкт-Петербург, РФ, 9 – 13 сентября 2019,
* NUSTAR Annual Meeting, GSI, Darmstadt, Germany, 02.03 – 06.03.2020.

Диссертационная работа **Попеко А.Г.** «Разработка электромагнитных in-flight сепараторов для изучения свойств сверхтяжёлых ядер», представленная на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, рекомендуется к защите по специальности 1.3.2. - приборы и методы экспериментальной физики.

Дубна,

«……» апреля 2024 г.

Председатель НТС ЛЯР В.К. Утенков