УТВЕРЖДАЮ

Директор ЛЯР ОИЯИ

С.И. Сидорчук

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

"23" июня 2023 г.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

**Научно-технического совета**

**Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ**

по диссертации **Соловьева Дмитрия Игоревича** «Расчетные и экспериментальные характеристики нового газонаполненного сепаратора DGFRS-2 и моделирование ионной оптики газонаполненного сверхпроводящего соленоида GASSOL», представленной на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики.

Диссертационная работа выполнена в Лаборатории ядерных реакций им. Г.Н. Флерова Объединенного института ядерных исследований (ЛЯР ОИЯИ). В период подготовки диссертации Соловьев Д.И. являлся сотрудником ОИЯИ и работал в должности младшего научного сотрудника. Диссертационная работа была представлена Соловьевым Д.И. на Общелабораторном семинаре ЛЯР 19 июня 2023 г. В работе семинара приняли участие 31 сотрудник Лаборатории ядерных реакций и 1 сотрудник Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ. По результатам обсуждения было подготовлено **следующее заключение**:

**Актуальность работы.**

Одним из важнейших направлений в современной ядерной физике является исследование ядер сверхтяжелых элементов (СТЭ). После открытия в ЛЯР новых элементов от Fl до Og (Z=114 – 118) и синтеза более 50 новых самых тяжелых изотопов элементов Lr – Og встала задача существенного повышения чувствительности экспериментальных исследований физических и химических свойств ядер, расположенных за границами области известных нуклидов – новых элементов тяжелее Og, новых более нейтронодефицитных и нейтронообогащенных ядер, а также для более глубокого изучения известных ядер.

Наряду с созданием нового циклотрона ДЦ-280 с интенсивностью ускоряемых частиц на порядок превышающей возможности циклотрона У-400, необходимо было ввести в эксплуатацию новый газонаполненный сепаратор DGFRS-2, отличающийся от его предшественника DGFRS вдвое большей трансмиссией и на два порядка большим фактором подавления фоновых частиц.

Для изучения химических свойств элементов на более высоком экспериментальном уровне необходимо было разработать новый газонаполненный сверхпроводящий соленоид GASSOL.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Создан набор программ для проведения автоматической калибровки многострипового детектора, определения статистической и систематической погрешности измерения энергии альфа-частиц, off-line анализа данных и поиска коррелированных цепочек распада тяжелых ядер. Программа использована в тестовых опытах 170Er(48Ca,4n)214Ra, 174Yb(48Ca,5n)217Th и 206Pb(48Са,2n)252No и экспериментах по синтезу изотопов Ds (Z = 110), Cn (Z=112), Fl (Z=114) и Mc (Z=115), проведенных на Фабрике СТЭ.
2. Исследованы экспериментальные характеристики DGFRS-2 в тестовых реакциях 170Er(48Ca,4n)214Ra, 174Yb(48Ca,5n)217Th и 206Pb(48Са,2n)252No. Проведен выбор оптимальных значений оптических элементов сепаратора. Измерены дисперсии дипольных магнитов, распределения синтезированных в различных реакциях ядер в фокальной плоскости DGFRS-2, фактор подавления фоновых частиц, зависимость трансмиссии сепаратора от давления газа. Определено оптимальное давление газа, при котором достигается максимальная трансмиссия.
3. Проанализировано поведение зарядов тяжелых ионов в водороде в зависимости от их скорости. Предложена новая систематика для описания среднего значения заряда при различных давлениях.
4. Разработаны и имплементированы новые алгоритмы моделирования в структуру Geant4, создана программа для описания образования тяжелых атомов в мишени и движения ионов в среде разреженного водорода под действием магнитных полей оптических элементов сепаратора. Проведены расчеты для выбора оптимальных параметров магнитов сепаратора DGFRS-2 в разных экспериментах, вычислены характеристики сепаратора (дисперсия дипольных магнитов, трансмиссия сепаратора при разной толщине мишени, зависимость размеров изображения ионов в фокальной плоскости от давления газа).
5. Проведено сравнение экспериментальных характеристик сепаратора с результатами расчетов и продемонстрировано их хорошее согласие. Созданная программа была использована при выборе параметров магнитов в экспериментах синтезу изотопов Ds (Z = 110), Cn (Z=112), Fl (Z=114) и Mc (Z=115) в реакциях полного слияния 232Th+48Ca, 238U+48Ca, 242Pu+48Ca и 243Am+48Ca, проведенных на Фабрике СТЭ.
6. На основе расчетной модели DGFRS-2 создана модель сверхпроводящего газонаполненного соленоида GASSOL. Проведено моделирование траекторий СТЭ в GASSOL, сделаны оценки размера изображения СТЭ в фокальной плоскости установки. Оценены возможности установки по изучению химических свойств СТЭ. На основе анализа траекторий, предложен новый способ подавления продуктов фоновых реакций.

**Научная новизна работы.**

1. Доработаны и имплементированы в структуру Geant4 методы моделирования кинематики реакции полного слияния в мишени и движения полученных ионов с учетом перезарядки в разреженном газе. Созданная на их основе расчетная модель сепаратора хорошо воспроизводит полученные экспериментальные данные.
2. Определены экспериментально и на основе расчетов характеристики нового газонаполненного сепаратора DGFRS-2. Исследовано влияние токов в магнитных элементах и давления газа на трансмиссию и размеры изображения синтезированных ядер в фокальной плоскости.
3. Предложены новые формулы для описания среднего значения заряда тяжелых ионов, движущихся с различной скоростью в разреженном водороде при различных давлениях.
4. Рассчитана ионная оптика нового газонаполненного соленоида GASSOL для изучения сверхтяжелых элементов. Обоснован новый способ подавления фоновых частиц в соленоидальных сепараторах.

**Личный вклад автора.** Автор принимал активное участие в постановке экспериментов по изучению сепаратора DGFRS-2. Лично автором были разработаны программы по анализу данных и калибровке детекторов установки. В совместной работе с коллегами автором были разработаны методы определения оптимальных параметров магнитных элементов сепаратора на основе экспериментальных данных.

Расчетная модель сепаратора создавалась в сотрудничестве с Коврижных Н.Д. при определяющей роли автора. Анализ результатов расчета и сравнение с экспериментальными данными проводилось лично автором.

Расчетная модель GASSOL создавалась в сотрудничестве с Коврижных Н.Д. при определяющей роли автора. Оценка количества атомов СТЭ на криодетекторах проводилась лично автором. Разработка новой сепарирующей системы на основе статичной турбины проводилась в сотрудничестве с Казариновым Н.Ю. и Гульбекяном Г.Г. при определяющей роли автора.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов обеспечивается хорошим согласием экспериментальных и расчетных характеристик сепаратора, а также результатами экспериментов по синтезу 115 элемента, продемонстрировавшими в два раза более высокую трансмиссию сепаратора по сравнению с DGFRS. Расчетная эффективность и размеры изображения ядер в фокальной плоскости установки GASSOL дает схожие результаты с экспериментальными данными установки SOLITAIRE, использующей сверхпроводящий соленоид для изучения реакций полного слияния с образованием более легких ядер.

**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.

Изучение химических свойств элементов является важной задачей атомной физики, позволяющей лучше понять изменение структуры электронных оболочек под влиянием релятивистского эффекта. Новый сепаратор GASSOL предлагает повышенные возможности для изучения химических свойств СТЭ, расчеты показывают, что за счет малых размеров изображения в фокальной плоскости эффективность эксперимента может быть значительно увеличена.

**Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем:** соискатель является соавтором 11 научных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 6 работ, из них 6 – в изданиях, рекомендованных ВАК и включенных в системы цитирования Scopus и/или WebofScience.

Основные результаты работы представлены в следующих публикациях:

1. **D.I. Solovyev**, N.D. Kovrizhnykh, *Simulations of recoil trajectories in Dubna Gas-Filled Recoil Separator 2 by Geant4 toolkit*, Journal of Instrumentation 17 (2022).

3. Yu.Ts. *Oganessian*, V.K. Utyonkov, A.G. Popeko, **D.I. Solovyev**, et. al, *DGFRS-2 –A gas-filled recoil separator for the Dubna Super Heavy Element Factory,* Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1033 (2022) 166640.

2. **D.I. Solovyev**, N.D. *Kovrizhnykh*, G.G. Gulbekyan et.al, *Simulation of ion optics in a gas-filled solenoid GASSOL*, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1052 (2023) 168263.

4. Yu.Ts. *Oganessian*, V.K. Utyonkov, **D.I. Solovyev**, et. al, *Average charge states of heavy ions in rarefied hydrogen,* Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1048 (2023) 167978.

5. **D.I. Solovyev**, N. D. Kovrizhnykh, V. K. Utyonkov, et. al, *Simulated and experimental characteristics of a gas-filled recoil separator DGFRS-2*, Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, Volume 87, Issue 8, 2023.

6. Yu. Ts. Oganessian, V. K. Utyonkov, N. D. Kovrizhnykh, F. Sh. Abdullin, S. N. Dmitriev, D. Ibadullayev, M. G. Itkis, D. A. Kuznetsov, O. V. Petrushkin, A. V. Podshibiakin, A. N. Polyakov, A. G. Popeko, R. N. Sagaidak, L. Schlattauer, I. V. Shirokovski, V. D. Shubin, M. V. Shumeiko, **D. I. Solovyev**, Yu. S. Tsyganov, A. A. Voinov, V. G. Subbotin, A. Yu. Bodrov, A. V. Sabel’nikov, A. V. Khalkin, V. B. Zlokazov, K. P. Rykaczewski, T. T. King, J. B. Roberto, N. T. Brewer, R. K. Grzywacz, Z. G. Gan, Z. Y. Zhang, M. H. Huang, and H. B. Yang, *First experiment at the Super Heavy Element Factory: High cross section of 288Mc in the 243Am+48Ca reaction and identification of the new isotope 264Lr.* Phys. Rev. C 106, L031301 (2022).

Диссертация «Расчетные и экспериментальные характеристики нового газонаполненного сепаратора DGFRS-2 и моделирование ионной оптики газонаполненного сверхпроводящего соленоида GASSOL» Соловьева Дмитрия Игоревича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.2 – приборы и методы экспериментальной физики.

г. Дубна, 23 июня 2023 г.

В.К. Утенков

председатель НТС ЛЯР