

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОРА ACCULINNA-2

*С. А. Крупко^{a,1}, С. Г. Белогуров^{a,б}, А. А. Безбах^{a,в},
Л. В. Григоренко^{a,б,з}, М. С. Головков^{a,в}, А. В. Горшков^а,
В. А. Горшков^а, Г. Каминьски^а, А. Г. Князев^а,
Е. Ю. Никольский^{а,з}, Ю. Л. Парфенова^а, С. А. Рымжанова^а,
Р. С. Слепнев^а, С. В. Степанцов^а, Г. М. Тер-Акопьян^{а,в},
А. С. Фомичев^{а,в}, В. Худоба^а, П. Г. Шаров^а*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, Москва

^в Государственный университет «Дубна», Дубна, Россия

^з Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Представлено обсуждение конструкции всех основных подсистем установки ACCULINNA-2: компонентов линии первичного пучка и оборудования для его диагностики, производящей мишени, поглотителей первичного пучка, оборудования для транспорта, очистки и диагностики вторичного пучка, высокочастотного фильтра для дополнительной очистки пучка, криогенной физической мишени, переднего спектрометра, автоматизированной системы управления.

Приведены характеристики вторичных пучков: угловое и пространственное распределения в финальном фокусе, качество идентификации ионов по спектру ΔE -ToF и выход искоемых изотопов, полученные в ходе экспериментов 2018–2020 гг. на первичных пучках ^{11}B (33,5 МэВ/нуклон), ^{15}N (49,3 МэВ/нуклон), ^{32}S (52,7 МэВ/нуклон) при настройке на вторичные пучки ^8He , ^9Li , ^{11}Li , ^{10}Be , ^{27}S и ^{26}P с различными энергиями. Проведено сравнение экспериментальных результатов с расчетами транспортировки вторичных пучков. Показано, что имеется возможность проведения экспериментов с легкими экзотическими ионами при высокой точности идентификации и измерения параметров налетающего иона на конденсированных мишенях из изотопов водорода и гелия.

A systematic discussion is given of the design of all key subsystems of the ACCULINNA-2 facility: components of the primary beam line and beam diagnostic equipment, production target, primary beam absorbers; equipment for transport, purification and diagnostics of the secondary beam, RF-filter for additional beam purification, cryogenic physical target, forward spectrometer, automated control system.

The characteristics of the secondary beam are presented, that are angular and spatial distribution in the final focus, identification quality of ions by ΔE -ToF method and the yields of the certain isotopes, obtained during the experiments in 2018–2020 with primary beams ^{11}B (33.5 A MeV), ^{15}N (49.3 A MeV), ^{32}S (52.7 A MeV) while set to secondary beams ^8He , ^9Li , ^{11}Li , ^{10}Be , ^{27}S and ^{26}P of the varied energies. Comparison of secondary beams transport with calculated

¹E-mail: krupko@jinr.ru

one has been performed. There is a possibility to carry out experiments with light exotic ions at high accuracy of detection and measurement of the parameters of the incident ion on condensed hydrogen and helium targets.

PACS: 29.27.Fh; 29.38.-c; 29.38.Db

ВВЕДЕНИЕ

Фрагмент-сепаратор (ФС) ACCULINNA-2 — одна из ведущих установок ЛЯР — предназначен для изучения структуры легких экзотических ядер и редких каналов их распада. Установка работает в комплексе с циклотроном У-400М (U-400M) [1], производящим интенсивные пучки стабильных легких изотопов. Реакции фрагментации или перезарядки ядер первичного пучка на бериллиевой производящей мишени приводят к образованию вторичных нейтронно- и протонно-избыточных ядер, из которых формируются радиоактивные пучки с энергией в несколько десятков МэВ/нуклон. Вторичные пучки формируются методом сепарации на лету (in-flight separation) и направляются на физическую мишень, размещаемую в конечном фокусе установки. Исследуемые экзотические ядра образуются в реакции изотопов вторичного пучка с веществом физической мишени.

В мире имеется несколько исследовательских центров, где проводятся эксперименты с радиоактивными пучками относительно низких энергий (до 100 МэВ/нуклон) методом сепарации на лету. Среди них центр в Мичиганском университете (США) FRIB (бывший NSCL) [2], GANIL (Франция) [3], RNC (RIKEN, Япония) [4] и INFN-LNS (Италия) [5]. В этих лабораториях решается свой круг специфических задач, во многом определяемый энергией вторичных пучков. Так, в научной программе комплекса FRIB значительный акцент сделан на поисках новых изотопов в малоизученных областях карты изотопов, где не достигнуты границы ядерной стабильности ($Z \geq 16$) [6]. В GANIL большое внимание уделяется измерениям радиусов ядер и сечений взаимодействия. В основном там рассматриваются реакции на тяжелых мишенях [7], хотя проводятся исследования и на легких мишенях, например, водородной [8]. В научной программе центра RIKEN значительное внимание уделено изучению экзотических ядер в реакции квазисвободного рассеяния. Поэтому в настоящее время большая часть экспериментов с пучками радиоактивных изотопов проводится при энергиях больше 100 МэВ/нуклон.

Таким образом, большинство крупных центров используют пучки более высоких энергий, в то время как в экспериментах на пучках радиоактивных изотопов с энергиями от 30 до 60 МэВ/нуклон (доступными для ACCULINNA-2) возможно решить целый ряд задач. В частности, при таких энергиях можно изучать структуру экзотических ядер в прямых реакциях в инверсной кинематике (реакции перезарядки, срыва или подхвата, а также передачи одного или нескольких нуклонов). Такие эксперименты требуют использования легких физических мишеней, состоящих из изотопов водорода и гелия.

ФС ACCULINNA-2 разработан с учетом опыта, полученного при работе на его предшественнике ФС ACCULINNA (далее ACCULINNA-1) [9, 10]. Была поставлена цель расширить энергетический диапазон, угловой и импульсный захват, повысить импульсное разрешение и качество идентификации ионов радиоактивных пучков. Концепция ACCULINNA-2 [11] была разработана в ЛЯР, сама установка изготов-

лена компанией SigmaPhi [12] с некоторой оптимизацией номенклатуры магнитов и начала работу в 2017 г. Эксперименты на ФС ACCULINNA-2 проводятся с 2018 г.

При создании ФС ACCULINNA-2 были установлены проектные условия и требования, учитывающие возможности циклотрона У-400М, ожидаемые после завершения модернизации, ведущейся в настоящее время. Согласно этим условиям первичные пучки $Z \leq 20$ имеют кинетическую энергию от 30 до 55 МэВ/нуклон и интенсивность до 10^{13} с^{-1} , размер пятна первичного пучка на производящей мишени 0,2 см, эмиттанс первичного пучка $15 \pi \text{ мм} \cdot \text{мрад}$. Линия вторичного пучка должна работать с энергией в интервале 15–40 МэВ/нуклон, обеспечивать импульсный захват $\pm 3\%$, угловой захват $(X) \pm 32 \times (Y) \pm 45 \text{ мрад}$, интенсивность — до $2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, магнитную жесткость до 3,9 Тл·м и высокую степень очистки вторичного пучка.

Кроме того, оборудование сепаратора должно быть вписано в существующее здание, вторичный пучок выведен из зала ускорителя в низкофоновое помещение. Должна быть обеспечена радиационная безопасность персонала и низкий фон как в физической кабине установки, так и в зоне свободного доступа вокруг нее. Оборудование для работы с тритиевыми криогенными физическими мишенями должно быть размещено на втором этаже физической кабины. Управление ФС, мониторинг и контроль за его подсистемами должны быть автоматизированы.

В связи с большим энергетическим, угловым и координатным разбросом вторичных ионов при проведении экспериментов необходимо проводить измерения координат и импульсов для каждого налетающего на физическую мишень иона. В экспериментальной зоне за физической мишенью должны разместиться передвижной передний спектрометр и стенка нейтронных детекторов.

Созданный комплекс (физическая кабина, фрагмент-сепаратор и экспериментальное оборудование) удовлетворяет поставленным требованиям. На сегодня опубликован ряд работ [13–15], где обсуждаются основные задачи, реализованная ионно-оптическая схема, ожидаемые характеристики ФС ACCULINNA-2 и некоторые проведенные эксперименты.

Цель данной публикации — дать полное представление о работе со вторичными пучками на ФС ACCULINNA-2. Будет показано, что имеется возможность проведения уникальных экспериментов на пучках легких экзотических ядер с точной идентификацией налетающего иона и измерением его кинематических параметров на мишенях из изотопов водорода и гелия.

В работе обсуждаются конструкции и особенности реализации основных подсистем установки ACCULINNA-2: компонентов линии первичного пучка и оборудования для его диагностики, производящей мишени, поглотителей первичного пучка, оборудования для транспорта, очистки и мониторинга вторичного пучка, высокочастотного фильтра для дополнительной очистки пучка, реакционной камеры и физической мишени, переднего спектрометра, автоматической системы мониторинга и управления (АСУ) как вакуумной и газовой системами, так и питанием пучковой оптики и детекторов.

Представлены характеристики вторичных пучков ${}^8\text{He}$, ${}^9\text{Li}$, ${}^{11}\text{Li}$, ${}^{10}\text{Be}$, ${}^{27}\text{S}$ и ${}^{26}\text{P}$, полученные в ходе экспериментов 2018–2020 гг. на первичных пучках ${}^{11}\text{B}$ (33,5 МэВ/нуклон), ${}^{15}\text{N}$ (49,3 МэВ/нуклон), ${}^{32}\text{S}$ (52,7 МэВ/нуклон), приводится сравнение экспериментально достигнутых результатов с расчетами транспортировки вторичных пучков.

1. ЛИНИЯ ПЕРВИЧНОГО ПУЧКА

Вывод пучка из циклотрона У-400М осуществляется путем перезарядки ускоренных ионов на фольге (происходит повышение магнитной жесткости ионов) и последующей их транспортировки через 2 магнитных канала и дипольный магнит вывода. Выведенный пучок имеет сечение, вытянутое по горизонтали.

Далее следует ряд квадруполов, фокусирующих пучок, и магнит разводки пучков. Горизонтальные апертуры квадруполов снижаются по ходу пучка от 14 см на выходе из магнита вывода до 6 см на входе в магнит разводки пучков, вертикальные апертуры составляют 6 см.

За магнитом разводки пучков начинается линия первичного пучка ФС ACCULINNA-2, предназначенная для транспортировки пучка до производящей мишени и фокусировки на ней и включающая в себя два поворотных магнита (BD1, BD2), семь квадруполов (BQ1–BQ7) и четыре корректирующих диполя (BST0–BST3). Диаметр ионпровода на этом участке 5,5 см, внутри поворотных диполей сечение представляет собой вытянутый по горизонтали прямоугольник 5,5 × 4 см. Схема линии первичного пучка показана в верхней правой части рис. 1.

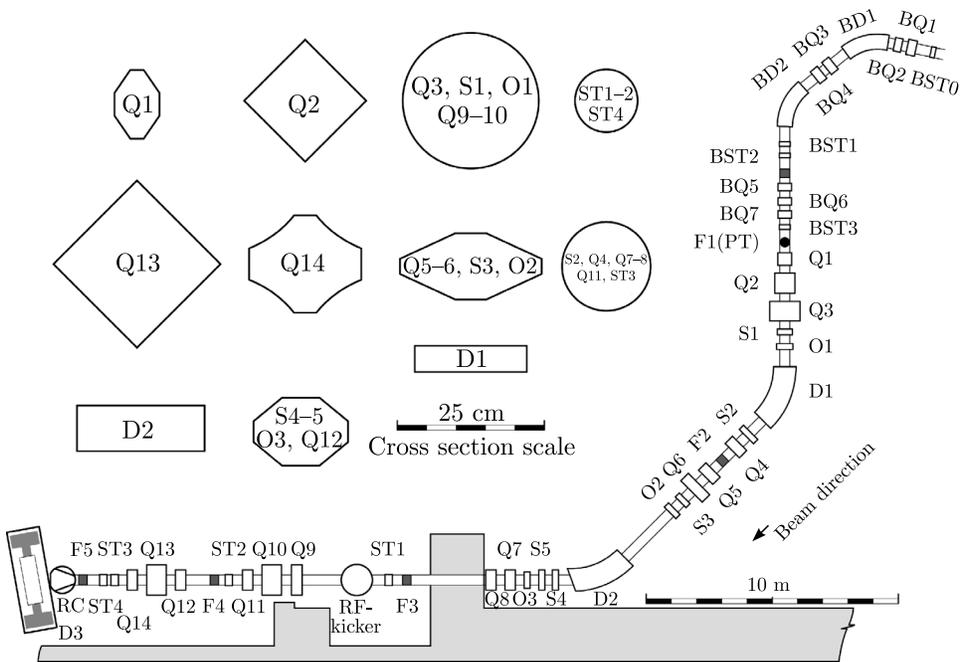


Рис. 1. Схема линии пучка фрагмент-сепаратора ACCULINNA-2 (нижняя и правая часть рисунка). Размеры изображенных объектов пропорциональны их действительным габаритам. Элементы от BST0 до BST3 образуют линию первичного пучка, FC — цилиндры Фарадея на ней. Линия вторичного пучка включает в себя элементы от производящей мишени (PT) в фокусе F1 до реакционной камеры (RC) в конечном фокусе F5. Серыми прямоугольниками обозначены диагностические боксы. В верхней левой части рисунка показаны сечения ионпровода внутри указанных элементов пучковой линии

Для настройки и оперативного контроля тока первичного пучка применяются водоохлаждаемые цилиндры Фарадея, установленные за каждым поворотным магнитом на линии первичного пучка: на линии вывода циклотрона, FC1 после магнита разводки пучков, диполей BD1 и BD2, а также FC4 сразу за производящей мишенью. Цилиндры оборудованы постоянными магнитами для подавления электронов вторичной эмиссии, что согласно оценкам позволяет измерить ток пучка с точностью не хуже 10 %.

1.1. Производящая мишень. В области фокальной плоскости сепаратора F1 компактно размещаются устройства, объединенные в узел производящей мишени (Production Target (PT), далее ПМ) и описанные ниже в порядке следования по пучку.

1. Профилметр для контроля наведения и фокусировки пучка на ПМ состоит из двух взаимно перпендикулярных рядов танталовых проволочек $\varnothing 100$ мкм, расположенных с шагом 0,133 см и перекрывающих область $2,1 \times 2,1$ см. Для индивидуального считывания вызванного пучком тока вторичной электронной эмиссии с проволочек используется многоканальный измеритель слабых токов POLAND [16] в диапазоне от 1 нА до 130 мкА. Головка профилметра смонтирована на пневмоприводе и помещается на 21 см выше по пучку от положения плоскости ПМ.

2. Система ограничивающих пучок охлаждаемых диафрагм, состоящая из сменной стационарной с диаметром отверстия 1,2 см и переключаемых дополнительных диафрагм, установленных на четырехпозиционном флажковом механизме с набором диаметров от 0,2 до 0,7 см. Все диафрагмы имеют рабочие части из меди и охлаждаются водой.

3. Узел вращения мишени с жидкостным охлаждением (рис. 2). Тело ПМ из бериллия выполнено в форме диска толщиной от 0,05 до 0,25 см, закрепленного на омы-

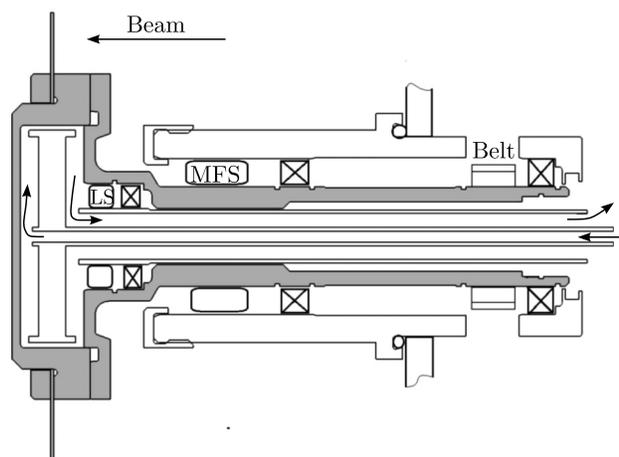


Рис. 2. Узел вращения ПМ. Бериллиевый диск, в который попадает пучок, образует тело мишени. Вращающаяся часть обозначена серым цветом. Поток охлаждающей жидкости показан стрелками. Закрытые подшипники обозначены перечеркнутыми наискось прямоугольниками. MFS — магнитно-жидкостное уплотнение на вакуум, LS — манжетное уплотнение на жидкость, Belt — привод вращения зубчатым ремнем

ваемой изнутри охлаждающей жидкостью (ОЖ) чашке узла. Вращение осуществляется зубчатым ремнем со стороны атмосферы через вакуумное магнитно-жидкостное уплотнение на неподвижный корпус. Жидкостный объем узла имеет центральную неподвижную часть для формирования циркуляции ОЖ и уплотняется с подвижной частью через манжету из полиуретана или высокомолекулярного полиэтилена (UHMW PE).

ОЖ на основе моноэтиленгликоля с антикоррозийными добавками циркулирует по контуру бак – насос – узел вращения – теплообменник – бак. Замкнутый контур необходим для снижения давления в узле вращения и ограничения загрязнения и коррозии системы.

Проектная тепловая нагрузка на узел вращения составляет 2 кВт. С учетом того, что в используемой мишени выделяется не более 30 % энергии пучка, допустимая по проекту тепловая нагрузка обладает более чем двукратным запасом даже с учетом ведущейся в настоящее время модернизации ускорителя У-400М. Максимальная долговременная тепловая нагрузка на ПМ, зафиксированная в экспериментах, составляла 700 Вт, суммарная наработка на 2 имеющихся взаимозаменяемых узла вращения достигла порядка 6000 ч при скорости вращения до 25 оборотов/с, при этом нарушений работоспособности узлов не наблюдалось.

4. Измеритель тока первичного пучка, прошедшего через мишень, собран на основе цилиндра Фарадея FC4, к которому прикреплен держатель танталовой фольги толщиной 4 мкм. Фольга и FC4 находятся в электрическом контакте и подключены ко входу пикоамперметра Keithley 6485. Для мониторинга пучка измеряется средний ток с фольги, установленной на пути пучка. Период записи тока в лог-файл АСУ варьируется от 1 до 100 с.

Измеряемый ток пропорционален интенсивности пучка, но его абсолютная величина, определяемая вторичной и тепловой эмиссией электронов, зависит от заряда и энергии ионов пучка, а также от интенсивности теплопотерь. Поэтому необходима калибровка тока фольги как меры тока пучка. Для калибровки на место фольги дистанционно вводится FC4. Кроме того, FC4 используется для оценки эффективности транспорта пучка. Сравнение токов, измеренных FC1 и FC4 при апертуре диафрагмы $\varnothing 0,5$ см, показывает, что, например, для пучков ^{11}B (33,5 МэВ/нуклон) и ^{15}N (49,3 МэВ/нуклон) полная эффективность транспорта и фокусировки на ПМ выведенного из циклотрона пучка достигает 85 %.

Все описанные выше устройства компактно расположены в специальной вакуумной камере, позволяющей быстро заменять части устройства или узел ПМ целиком, что важно для снижения облучения персонала, так как узел сильно активируется на пучке.

1.2. Поглотители первичного пучка. Линия вторичного пучка ФС настраивается на желаемый вторичный изотоп, поэтому оставшийся после прохождения ПМ первичный пучок, обладающий другой жесткостью, попадает на стенки элементов линии вторичного пучка, где поглощается, выделяя значительную энергию. Поглощение первичного пучка распределяется в основном между диафрагмой на входе в диполь D1, боковыми стенками камеры D1 и диафрагмой на выходе из D1. На эти детали приходится более 60 % тепловой нагрузки с возможной компактной локализацией, поэтому для облегчения отвода тепла они выполнены из меди и снабжены водяным охлаждением.

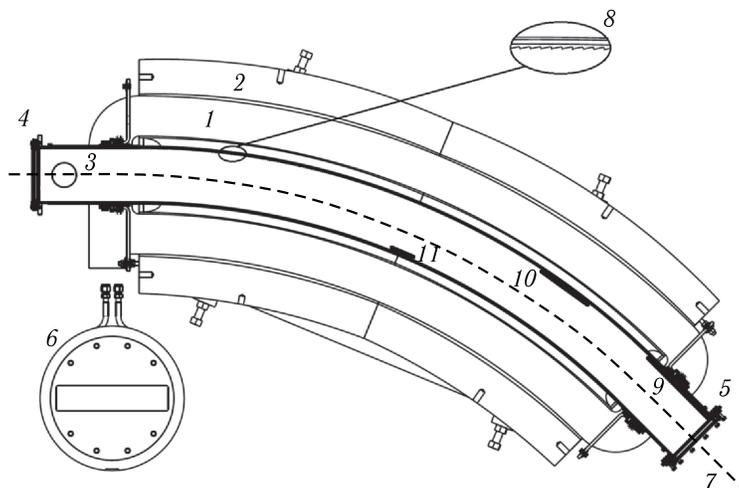


Рис. 3. Разрез дипольного магнита D1 с зонами останова первичного пучка: 1 — обмотка; 2 — ярмо магнита; 3 — вакуумная камера; охлаждаемые медные диафрагмы на входе 4 и выходе 5 магнита; 6 — вид на охлаждаемую диафрагму поперек пучка; 7 — ось вторичного пучка; 8 — увеличенный вид стенки охлаждаемого поглотителя первичного пучка в форме зубцов; 9 — область останова первичного пучка ^{20}Ne при настройке тракта на вторичный пучок ^{17}Ne с энергией 47,5 МэВ/нуклон; 10 — область останова первичного пучка ^{20}Ne при настройке тракта на вторичный пучок ^9C с энергией 25,8 МэВ/нуклон; 11 — область останова первичного пучка ^{15}N при настройке тракта на вторичный пучок ^{11}Li с энергией 35,9 МэВ/нуклон

На рис. 3 показано сечение D1, иллюстрирующее расположение и устройство поглотителей, а также примеры мест останова первичного пучка. Камера D1 имеет двойные боковые стенки, обеспечивающие водяное охлаждение внутренних медных поглотителей, в которых останавливается первичный пучок. Для уменьшения количества примесей, рождаемых первичным пучком в случае получения протонно-избыточных изотопов, стенка D1 с большим радиусом выполнена в форме зубцов (см. рис. 3). Такая форма призвана уменьшить вероятность попадания в линию вторичного пучка летящих под малыми углами высокоэнергичных продуктов взаимодействия первичного пучка со стенкой камеры магнита.

При проектировании сепаратора была заложена возможность установки всех диафрагирующих элементов в исполнении как для нейтронно-, так и для протонно-избыточных пучков. Первое исполнение характеризуется значительной толщиной элементов и цилиндрической формой протяженных отверстий, а второе — острыми и гладкими краями малой протяженности. Отличие обусловлено тем, что нейтронно-избыточные изотопы имеют магнитную жесткость выше, чем у первичного пучка, и потери энергии первичным пучком в толстом поглотителе улучшают очистку, а протонно-избыточные изотопы имеют магнитную жесткость ниже, чем у первичного пучка, вследствие чего множество перерассеянных изотопов могут проходить ФС, давая значительное количество примесей в составе коктейля вторичного пучка. Поэтому минимизация протяженности диафрагм (меньше вещества для рассеяния) дает лучшую очистку протонно-избыточных пучков.

2. ЛИНИЯ ВТОРИЧНОГО ПУЧКА

В основу компоновки ФС ACCULINNA-2 была положена модификация популярной схемы симметричного ахромата, примененной, например, в RIPS/Big-RIBS (RIBF, RIKEN, Япония), FRS/Super-FRS (FAIR, GSI, Германия), A1900 (FRIB, MSU, США). Реализованная схема представлена на рис. 1, там же показаны сечения на различных участках ионопровода. Высокие значения импульсного и углового захватов достигаются за счет больших поперечных сечений магнитных элементов. Обсуждение магнитно-оптических расчетов можно найти в [14].

Пучок радиоактивных ядер, рождаемых на производящей мишени в F1, захватывается короткофокусным триплетом квадруполей Q1–Q3, проводится через секступоль S1, окуполь O1 и далее транспортируется через дипольный магнит D1, после которого, пройдя через S2 и Q4, попадает в плоскость дисперсионного фокуса F2 (дисперсия составляет $2 \text{ см}/(\%B\rho)$), где установлен ахроматический клин из бериллия. Далее пучок через последовательность Q5, Q6, S3, O2 проходит во второй дипольный магнит D2 и через последовательность S4, S5, O3, Q7, Q8 выходит из зала циклотрона У-400М в низкофоновую экспериментальную кабину.

Вне зала расположен ахроматический фокус F3, за ним стоят корректирующий магнит ST1, высокочастотный (ВЧ) фильтр (RF-kicker, см. п. 2.3), триплет квадруполей Q9–Q11 и ST2, после которых пучок приходит в фокус F4. Затем последовательность Q12–Q14, ST3, ST4 приводит пучок в ахроматический фокус F5, в котором в цилиндрической реакционной камере диаметром 100 см и высотой 40 см устанавливается физическая мишень. Ось цилиндрической камеры ориентирована вертикально.

Таким образом, ACCULINNA-2 является асимметричным ахроматом на двух диполях с прямолинейным участком, выводящим вторичный пучок из циклотронного зала в низкофоновую зону. Все магниты как первичной, так и вторичной линий теплые, выполнены из шихтованного железа. Диполи D и квадруполи Q имеют прямое водяное охлаждение обмоток, остальные магнитные элементы охлаждаются естественным путем.

Юстировка всех элементов установки и контроль геометрической стабильности выполняется с помощью лазер-трекера LEICA AT401 и ПО Polyworks, что обеспечивает точность $\pm 100 \text{ мкм}$.

Магнитная система ФС настраивается на получение максимальной интенсивности заданного изотопа с фокусировкой на физической мишени в F5 при условии обеспечения приемлемой чистоты пучка. Большой эмиттанс транспортируемого вторичного пучка приводит к необходимости использования широкоапертурного ионопровода и создания требуемого магнитного поля в достаточно протяженных областях пространства, что требует магнитов большого размера. Например, наиболее крупный квадруполь Q13 имеет апертуру $\varnothing 24 \text{ см}$, массу 5,5 т и позволяет обеспечить постоянный в пределах 0,33% градиент поля в области диаметром 24 см. Отметим, что использование мультиполюсных магнитов позволяет улучшить эффективность транспорта вторичного пучка с $Z > 5$ на 10–20% за счет уменьшения aberrаций.

2.1. Диагностические боксы. Диагностические боксы (ДБ) — вакуумные камеры, имеющие сечение $30 \times 30 \text{ см}$, снабженные портами стандарта ISO-K DN100 и DN160. ДБ имеют собственную систему юстировки, используются для размещения детекторов, диафрагм и поглотителей, а также регулируемых шторками предметных

щелей. ДБ установлены на линии первичного пучка после BD2, а также в фокусах F2, F3, F4 и F5 линии вторичного пучка.

Непосредственно перед всеми ДБ, кроме расположенного в фокусе F4, размещены шибберные задвижки и вакуумное оборудование, позволяющие секционировать вакуумный объем ионопровода. Для защиты измерительного оборудования от наводок и паразитных токов перед ДБ в фокусах F3 и F5 имеются гальванические развязки от частей ионопровода, лежащих выше по пучку.

2.2. Щели и клинья в линии вторичного пучка. Помимо описанного ниже оборудования для диагностики вторичного пучка в некоторых ДБ установлены устройства диафрагмирования и замедления вторичного пучка.

В дисперсионном фокусе F2 установлена диафрагма с вытянутым по горизонтали прямоугольным отверстием $13,6 \times 4,8$ см, на которой в тепловом контакте закреплен ахроматический бериллиевый клиновидный поглотитель. Доступны поглотители с номинальными толщинами в середине 500 мкм (угол 0,89 мрад), 750 мкм (угол 1,34 мрад), 1000 мкм (угол 1,79 мрад) и далее до 3000 мкм с шагом 500 мкм. Толщины поглотителей отличаются в каждой точке от проектных значений не более чем на 20 мкм. Для ограничения захвата сепаратора по магнитной жесткости предусмотрены подвижные шторки, формирующие вертикальную щель. Правая и левая шторки позиционируются независимо и имеют горизонтальный ход более 6,8 см, что соответствует импульсному захвату $\pm 3,4\%$.

В ахроматическом фокусе F3 установлена диафрагма размером 14×6 см, а шторки имеют горизонтальный ход во всю ширину диафрагмы. Здесь положение иона по горизонтальной оси находится в зависимости от $A^{5/2}/Z^{3/2}$. Это соотношение является результатом комбинации $B_p - \Delta E - B_p$ очистки при прохождении D1, затем потерь энергии в поглотителе и далее прохождения D2.

В фокусе F4 предусмотрена установка горизонтальной щели с регулируемым по вертикали положением шторок, необходимой при работе с ВЧ-фильтром.

Для привода всех шторок используются присоединенные через вакуумный интерфейс шаговые двигатели с дистанционным управлением. Шторки изготовлены из нержавеющей стали в двух вариантах: для протонно- и нейтронно-избыточных вторичных пучков.

2.3. Высокочастотный фильтр. Сразу за фокусом F3 установлен изготовленный компанией SigmaPhi [12] в сотрудничестве с компаниями NTG, QUI и Cosylab ВЧ-фильтр (RF-kicker). Этот прибор предназначен для удаления с основной траектории вторичного пучка всех ионов, движущихся со скоростью, значительно отличающейся от скорости полезного протонно-избыточного иона. Очистка происходит за счет подбора фазы высокочастотных колебаний электрического поля в зазоре, через который проходит вторичный пучок так, чтобы полезный ион проходил на гребне волны. Корректирующие магниты ST1 и ST2 служат для компенсации вертикального смещения пучка электрическим полем в ВЧ-фильтре. Описание принципа работы ВЧ-фильтра на примере аналогичного устройства см. в [17].

Общий вид ВЧ-фильтра показан на рис. 4. В основе конструкции лежит коаксиальная полость, имеющая образованную плоскими круглыми электродами сосредоточенную емкость на конце центрального электрода. Грубая подстройка частоты реализуется изменением геометрии нижнего электрода, заключающемся в синхронном вертикальном движении двух круговых сегментов при неподвижном положении

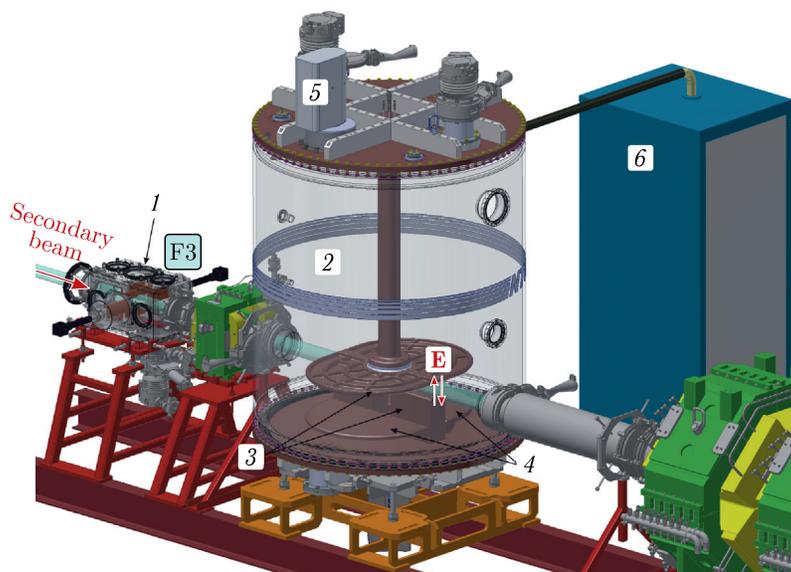


Рис. 4. Компонка F3 и устройство ВЧ-фильтра: 1 — камера с подвижными горизонтальными шторками и времяпролетным детектором; 2 — оболочка ВЧ-фильтра; 3 — основные электроды; 4 — электроды грубой настройки; 5 — механизм точной подстройки; 6 — ВЧ-усилитель

прямоугольной центральной части размером 70×12 см. Центральная часть нижнего электрода образует постоянный зазор высотой 7 см, через который проходит пучок. ВЧ-фильтр гальванически развязан с основным ионопроводом. В фокусе F4 предусмотрена горизонтальная щель с регулируемым по вертикали положением шторок, обеспечивающая поглощение нежелательных ионов, покинувших главную траекторию после прохождения ВЧ-фильтра. Пример расчета эффективности очистки с помощью ВЧ-фильтра можно найти в [14].

После установки прибора были выполнены тесты на добротность (Q), а также испытания с ручным управлением на высокой мощности в импульсном режиме со скважностью 2%. Например, при частоте 15,11 МГц и мощности 9,5 кВт измерено значение $Q = 7200$. Для сравнения укажем, что из электродинамических расчетов, выполненных разработчиком, следует, что амплитуда напряжения между отклоняющимися электродами при частоте 14,482 МГц и прямой мощности 9,907 кВт должна достигнуть 129,7 кВ при добротности $Q = 6613$.

В настоящее время ведется балансировка системы охлаждения резонатора, автоматизация управления ВЧ-фильтром и разработка защиты от рентгеновского излучения, возникающего при работе резонатора. Ввод устройства в эксплуатацию будет осуществлен по завершении реконструкции циклотрона У-400М.

2.4. Диагностика вторичного пучка. Диагностика вторичного пучка осуществляется детектором пучковых частиц путем регистрации каждого налетающего иона, что позволяет получать детальные пространственные и импульсные распределения пучка в области фокуса F5, где расположена физическая мишень. Детектор пучковых частиц, подробно описанный в [18], состоит из двух времяпролетных и двух трековых станций. В основе каждой из времяпролетных станций лежит сцинтиляционный пла-

стик BC-418 толщиной от 25 до 250 мкм, считываемый четырьмя ФЭУ Hamamatsu R7600U-200. Сцинтилляционная пластина, матированная с обеих сторон, образует одно из оснований светособирающего полого цилиндрического объема. Другое основание образовано пленкой из алюминизированного майлара толщиной 3,5 мкм. Такая же пленка покрывает внешнюю сторону пластика. Образующая поверхность светособирающего объема высотой 3 см покрыта зеркальным отражателем, за исключением той части, которая занята фотокатодами ФЭУ (рис. 5, а).

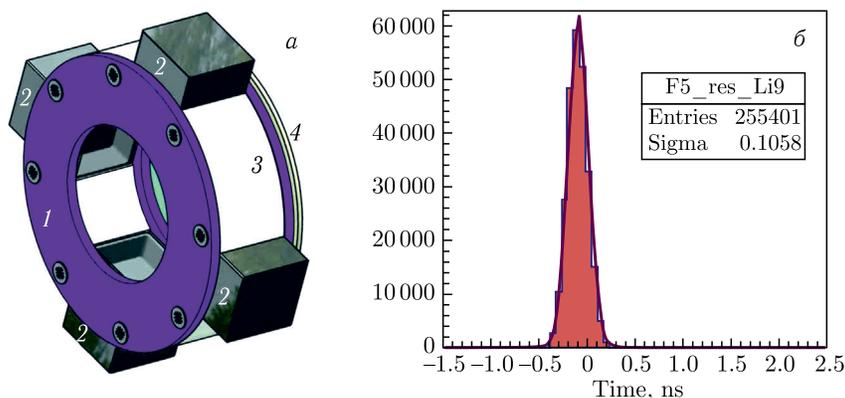


Рис. 5. а) Времяпролетная станция детектора пучковых частиц: 1 — прижимное кольцо с входным окном из алюминизированного майлара толщиной 3,5 мкм; 2 — ФЭУ; 3 — сцинтилляционная пластина; 4 — прижимное кольцо с выходным окном из алюминизированного майлара толщиной 3,5 мкм. б) Распределение величины $\Delta = (T_1 + T_3)/2 - (T_2 + T_4)/2$ (разница времен между парами противостоящих ФЭУ) для времяпролетной станции, расположенной в фокусе F5 для пучка ${}^9\text{Li}$

Две времяпролетные станции расположены в ДБ выше по пучку от физической мишени в фокусах F3 и F5 на расстоянии 12,35 м друг от друга. Они позволяют получить информацию как о времени пролета каждого иона, так и о величине потерь энергии в сцинтилляционной пластине, что дает возможность идентифицировать ион и измерить его кинетическую энергию.

Временная привязка, формируемая i -й времяпролетной станцией, определяется в простейшем случае как $T_i = (1/4) \sum_{j=1}^4 T_{ij}$, где T_{ij} — временная метка с j -го ФЭУ i -й станции. Для измерения времени пролета необходимо прокалибровать задержку D между временными привязками, формируемыми двумя времяпролетными станциями. Процедура калибровки описана в [18].

Временное разрешение станции можно определить по распределению следующей, построенной из временных меток i -й станции, величины: $\Delta_i = (T_{i1} + T_{i3})/2 - (T_{i2} + T_{i4})/2$. Для частичной компенсации зависимости времени сбора света от координат точки прохождения ионом сцинтилляционной пластины временные отметки с ФЭУ, расположенных напротив друг друга, входят в выражение с одним знаком. Полученное таким образом разрешение составляет для разных ионов от 80 до 200 пс (RMS) (см. рис. 5, б). Заметный вклад в полученное разрешение вносят зависимость формы сигнала от точки прохождения иона через сцинтилляционную пластину

и некомпенсированная использованием формирователя со следящим порогом зависимость момента формирования временной привязки от амплитуды.

В области фокуса F5 после второй времяпролетной станции на 93,8 см выше по пучку от физической мишени расположена первая трековая станция. Вторая такая же станция расположена в реакционной камере на 27 см выше по пучку от физической мишени. Каждая станция представляет собой многопроволочную пропорциональную камеру, реализованную как объем, заполненный газом CF_4 под давлением и при температуре окружающей среды, и состоит из следующих слоев по ходу пучка: вакуумное окно из каптона 25,4 мкм, катод из нержавеющей стали 6 мкм, массив из 32 вертикальных вольфрамовых проволочек диаметром 20 мкм, расположенных с шагом 0,125 см, два катода, массив из 32 горизонтальных проволочек, катод, вакуумное окно. Протяженность станции вдоль пучка составляет 8,5 см.

Качество идентификации ионов в детекторе пучковых частиц обсуждается в соответствии с п. 7.2. Точность идентификации определяется в первую очередь погрешностью измерения энергетических потерь, которая зависит от многократного рассеяния ионов, неравномерности толщины сцинтилляционной пластины (± 10 мкм), неоднородности светосбора (т. е. зависимости коэффициента светосбора от места прохождения частицы через сцинтилляционную пластину).

Анализ экспериментальных данных и моделирование с помощью пакета Expert-Root [19] показывает (на примере пучка ${}^8\text{He}$ с энергией $E = 21,5$ МэВ/нуклон), что точность восстановления параметров иона в серединной плоскости мишени с помощью детектора пучковых частиц характеризуется следующими значениями (ПШПВ): $\Delta E_{\text{кин}} = 0,7$ МэВ, $\Delta X = \Delta Y = 0,17$ см, $\Delta \Theta_x = \Delta \Theta_y = 5$ мрад.

Детектор пучковых частиц позволяет справляться с потоком до $2 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, интегрирован в систему считывания и сбора данных MBS [20,21], реализованную в стандарте VME. При частоте следования сгустков ионов из циклотрона 14–18 МГц события, в которых регистрируются более одной пучковой частицы, составляют не более 13% от полного числа событий и отбрасываются при анализе данных.

Для сохранения в экспериментальных данных информации о пучке реализован так называемый пучковый триггер. Каждый n -й ион (n выбирается в диапазоне от 0 до 1024) запускает запись события, в которой содержатся временные отметки и амплитуды каждого ФЭУ времяпролетных станций, значения счетчиков сигналов с каждой из времяпролетных станций, обнуляемые после записи предыдущего события, амплитуды и временные отметки сигналов трековых станций, значения микросекундного таймера, позволяющие определить время события относительно глобального времени закрытия файла с данными. Помимо пучкового триггера запись событий инициируется так называемым экспериментальным триггером, формируемым на основе сигналов детекторов продуктов реакций.

3. КРИОГЕННАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ МИШЕНЬ

Имеющееся на ФС ACCULINNA-2 криогенное оборудование позволяет получать конденсированные физические мишени из водорода и дейтерия, а также из стабильных изотопов гелия. Для долговременного хранения водорода и дейтерия используются урангидридные ловушки. Подробно работа с криогенными мишенями рассмотрена в [22].

Конструкция мишенной криогенной ячейки показана на рис. 6. Полезный объем ячейки 1 ограничен фольгой из нержавеющей стали 2 толщиной 6 мкм и диаметром 2,5 см. Номинальная толщина ячейки составляет от 0,06 до 0,6 см. Дальнейшее увеличение толщины ячейки привело бы к неприемлемому снижению качества восстановления кинематических характеристик реакции за счет падения точности локализации точки взаимодействия пучкового иона с ядрами мишени.

Ячейка окружена тепловым экраном 3, его внутренний объем геометрически замкнут, но не герметичен. Перпендикулярные пучку окна теплового экрана 4, выполненные из алюминизированного майлара толщиной 3,5 мкм, отстоят от окон ячейки на 2 см.

Охлаждение ячейки и теплового экрана осуществляется двухступенчатой криоголовкой Leybold COOLPOWER 7/25. Тепловой экран подсоединен к фланцу первой ступени криоголовки, а ячейка — к фланцу второй ступени 5 через резистивный нагреватель 6. На корпусе ячейки установлены 1 или 2 диодных кремниевых термодатчика 7, что позволяет стабилизировать ячейку при температуре 12–30 К и получить как жидкий, так и твердый водород или дейтерий.

Варьируя геометрической толщиной ячейки, давлением и температурой газа, можно получить желаемую толщину водородной мишени в диапазоне до $2 \cdot 10^{22}$ атом/см². Для изотопов гелия из-за недостижимости конденсированных фаз толщина ограничена значением $1,5 \cdot 10^{20}$ атом/см².

Также ведутся работы по созданию новой мишени с жидким тритием. Работы основаны на опыте эксплуатации подобной мишени на ФС ACCULINNA-1 [23]. Новая мишень, рассчитанная на объем до 1 см³ жидкого трития (чистота > 97%, активность < 10¹⁴ Бк), будет окружена двумя слоями фольги из нержавеющей стали толщиной 8,5–10 мкм каждый. Реакционная камера при работе с тритием герметично отделяется от ионопровода окном из каптона диаметром 6 см и толщиной 12,5 мкм. Толщина тритиевой мишени диаметром $\varnothing 2,5$ см может достигать $3 \cdot 10^{21}$ атом/см².

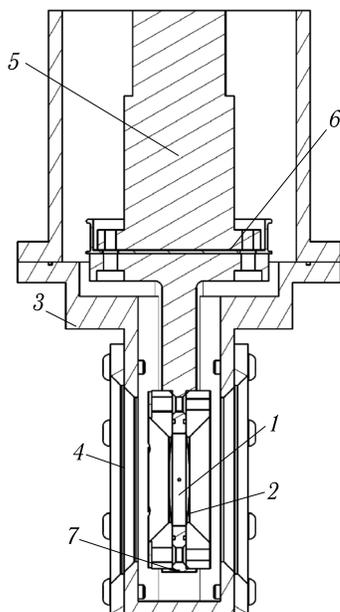


Рис. 6. Физическая мишень. 1 — полезный объем; 2 — фольга из нержавеющей стали; 3 — тепловой экран; 4 — окно теплового экрана; 5 — меньший цилиндр криоголовки; 6 — пленочный нагреватель; 7 — диодный кремниевый термодатчик

4. ПЕРЕДНИЙ СПЕКТРОМЕТР

При исследовании на ФС ACCULINNA-2 многонуклонных распадов нестабильных протонно- и нейтронно-избыточных ядер, таких как ⁶Be, ⁸C, ¹²O, ¹⁶Ne, ¹⁹Mg, ²¹Si, ²⁶S и ^{6,7}H, ¹⁰He, ¹³Li, ^{16–18}Be, ²²C, ²⁶O, возникает необходимость одновременной регистрации каждой из нескольких частиц, летящих под малыми углами к оси пучка.

Для разнесения частиц в пространстве, их идентификации и измерения импульсов предназначен передний спектрометр.

Основой переднего спектрометра является дипольный магнит, изготовленный компанией SigmaPhi и введенный в эксплуатацию в 2017 г. Магнит имеет сердечник О-типа размерами $325 \times 158 \times 33$ см и седловидные обмотки, полная масса вместе с подставкой около 20 т. Номинальная магнитная индукция составляет 1,2 Тл, максимальная — 1,4 Тл при эффективной длине поля 53 см. Помещаемая в зазор магнита вакуумная камера может иметь ширину до 52 см и высоту до 18 см.

Магнит установлен с поворотом на 10° вокруг вертикальной оси на специальных точных рельсах, позволяющих перемещать его вдоль оси пучка, сохраняя поперечное положение не хуже ± 200 мкм. Подставка магнита позволяет двигать магнит по оси x' (рис. 7), смещая его центр от оси пучка на дистанцию от 0 до 18 см. В рабочем положении магнит размещается на дистанции 90–200 см от центра реакционной камеры до начала полюса магнита. Позади магнита внутри вакуумной камеры могут быть установлены детекторы заряженных частиц, а снаружи — стенка нейтронных детекторов [24, 25]. В нерабочем положении магнит откатывают на 4 м по пучку, что позволяет разместить стенку нейтронных детекторов между ним и реакционной камерой.

Проиллюстрируем использование переднего спектрометра на примере планируемого эксперимента по изучению ядра ${}^7\text{H}$ через его четырехнейтронный распад ${}^7\text{H} \rightarrow {}^3\text{H} + 4n$ (см. рис. 7). Наличие несвязанных состояний у изотопа ${}^7\text{H}$ продемонстрировано, например, в [26, 27]. Пучок ядер ${}^8\text{He}$ с энергией 200 МэВ облучает криоген-

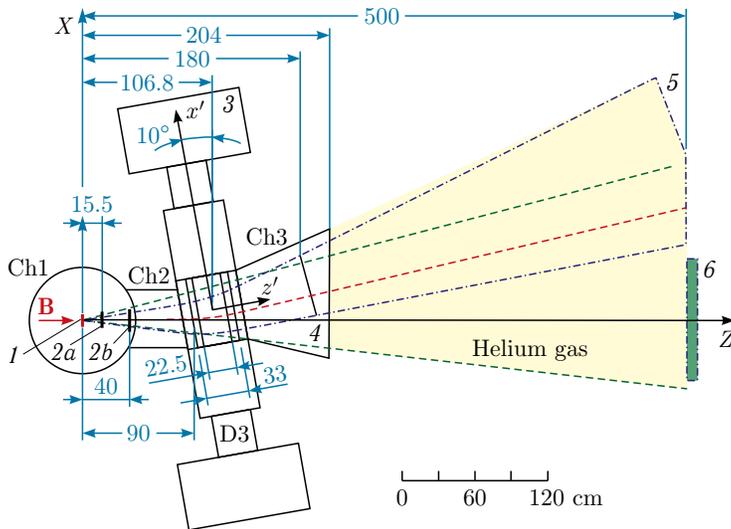


Рис. 7. Схема эксперимента с применением магнита D3 по изучению $4n$ -распада ядер ${}^7\text{H}$, получаемых в реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$ на пучке ядер ${}^8\text{He}$ с энергией 200 МэВ: В — пучок; Ch1 — реакционная камера, вмещающая мишень 1 (дейтерий D_2) и кольцевые кремниевые детекторы 2a, 2b; 3 — магнит D3; Ch2, Ch3 — вакуумные камеры с окнами из нержавеющей стали толщиной 100 мкм; 4, 5 — сцинтилляционные детекторы; 6 — массив нейтронных детекторов

ную дейтериевую мишень 1. Телескоп 2a регистрирует ядра отдачи ${}^3\text{He}$, испущенные из мишени в интервале углов $5\text{--}30^\circ$ в системе центра масс реакции ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He}){}^7\text{H}$. Кольцевым двусторонним кремниевым детектором 2b измеряется угол вылета и удельная потеря энергии ядра ${}^3\text{H}$, зарегистрированного в совпадении с сигналом от ядра отдачи ${}^3\text{He}$. Заряженные частицы, отклоненные диполем 3 от оси пучка, проходят через детекторы 4, установленные перед выходом из камеры ChZ . На расстоянии 5 м от мишени установлены пластиковые сцинтилляционные детекторы 5 для измерения времени пролета заряженных частиц. Нейтронная стенка 6 с поперечным размером 1 м и высотой 74 см составлена из сцинтилляторов, описанных в [25]. При анализе экспериментальных данных будет использоваться информация об энерговыделениях в детекторах, временах пролета и о траекториях частиц в магнитном поле.

5. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

Для обеспечения безопасной и согласованной работы всех подсистем установки даже при отключении питания, а также для мониторинга множества параметров и синхронизации всех задействованных в эксперименте компьютеров используется автоматизированная система управления (АСУ).

К АСУ подключены следующие подсистемы и элементы инфраструктуры:

1) источники питания с мониторами токов для магнитов (управляются отдельным ПК);

2) вакуумная система: измерители вакуума, вакуумные насосы, вентили и шибберные задвижки;

3) контроль производящей мишени и охлаждаемых устройств: датчик вращения и частотный преобразователь, датчики протока жидкости в замкнутом контуре охлаждения ПМ, в контурах охлаждения диафрагм и поглотителей первичного пучка;

4) управление ФС: логический сигнал положения шиббера, расположенного перед ДБ в F1 и управляемого АСУ циклотрона, пневмоприводы, измерители токов первичного пучка, шаговые двигатели щелей;

5) газовая система для многопроволочных пропорциональных камер: вентили с датчиками положения и датчики давления;

6) газовакуумная система для криогенной физической мишени: контроллер низких температур LakeShore 335, к которому подключены датчики температуры и нагреватели криоячейки, а также нагреватели ловушек для водорода и дейтерия;

7) высоковольтное питание времяпролетных и трековых станций детектора пучка, а также детекторов продуктов реакций;

8) управление ВЧ-фильтром с отдельного ПК.

Система сбора данных с детекторов не связана напрямую с обсуждаемой АСУ.

Построение АСУ опиралось на следующие подходы.

- Разделение функций блокировки и управления/отображения/записи.
- Система блокировок выполнена на аппаратном уровне с помощью программируемых реле с использованием логических линий связи 24 В. В случае аварии время реакции не более 30 мс (с учетом времени введения цилиндра Фарадея для перекрытия первичного пучка до 1 с).

- АСУ генерирует общий сигнал готовности установки A2-ready, разрешающий ввод пучка в установку и учитывающий наличие вакуума, исправность систем охлаждения и питания магнитов, исправность узла вращения мишени. В отсутствие этого сигнала АСУ ускорителя автоматически вводит на пути пучка цилиндр Фарадея FC1 и перекрывает шибер, находящийся перед производящей мишенью.

- Последовательные и параллельные интерфейсы цифровых данных используются для задания желаемых режимов, мониторинга и протоколирования показаний датчиков на ПК. При попытке оператора установки дать команду управления, которая может привести к аварийной ситуации и повреждению оборудования, она будет заблокирована аппаратной частью АСУ, и вся система останется в работоспособном состоянии.

- Графический интерфейс системы, реализованный с помощью LabView, обеспечивает информирование оператора о параметрах работы системы и предупреждает о возникновении нестандартных ситуаций.

- Удаленный мониторинг системы возможен с любого устройства с выходом в интернет через веб-интерфейс. При возникновении нестандартной ситуации в системе предусмотрены настраиваемые оповещения по электронной почте. Реализован безопасный дистанционный доступ для управления.

Опыт эксплуатации АСУ в 2017–2020 гг. показал надежность, безопасность и достаточность реализованного решения на данном этапе. В настоящее время ведется работа по подключению к АСУ собственной системы управления ВЧ-фильтром, добавлению дистанционной смены клина в F2 и снижению участия оператора в наблюдении за работой установки.

6. РАДИАЦИОННАЯ ЗАЩИТА

Получение вторичных пучков с последующим их выводом за пределы ускорительного зала потребовало выполнения ряда мероприятий по обеспечению радиационной безопасности.

Основными источниками ионизирующего излучения при работе ФС ACCULINNA-2 являются взаимодействия интенсивного первичного пучка с веществом диафрагмы, производящей мишени и поглотителя пучка. Для обеспечения допустимого уровня мощности дозы в физической кабине установки и других помещениях, примыкающих к залу ускорителя У-400М, была построена бетонная защита ФС и модифицированы откатные защитные ворота, ведущие в зал циклотрона.

Дизайн защиты опирался на расчеты, выполненные с помощью пакета программ FLUKA [28, 29]. Достаточность выстроенной защиты подтверждается дозиметрическими измерениями при работе ACCULINNA-2. В качестве примера на рис. 8 показано распределение мощности дозы при одном из наиболее неблагоприятных режимов работы, когда ФС настроен на работу с вторичным пучком ${}^9\text{Li}$ с энергией 29,0 МэВ/нуклон, при этом первичный пучок ${}^{11}\text{B}$ с энергией 33,4 МэВ/нуклон направляется близко к выходу из магнита D1, что ухудшает радиационный фон в зале ускорителя.

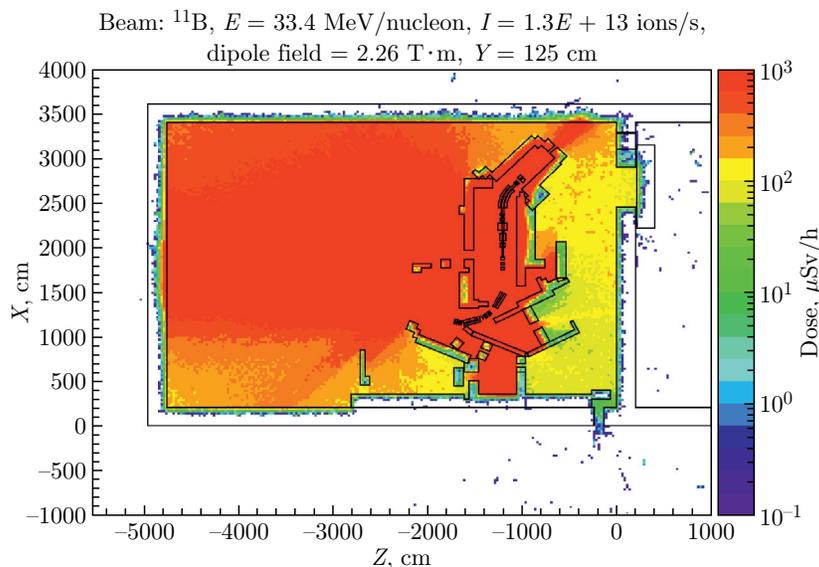


Рис. 8. Распределение мощности дозы при одном из наиболее неблагоприятных режимов работы, когда ФС настроен на ^9Li с энергией 29,0 МэВ/нуклон и первичный пучок ^{11}B с энергией 33,4 МэВ/нуклон останавливается близко к выходу из магнита D1

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ФС ACCULINNA-2

Первая после ввода ФС ACCULINNA-2 в эксплуатацию серия измерений в 2018–2020 гг. проводилась с первичными пучками ^{11}B (33,5 МэВ/нуклон), ^{15}N (49,3 МэВ/нуклон) и ^{32}S (52,7 МэВ/нуклон), взаимодействовавшими с тонкой бериллиевой мишенью. Были получены как нейтронно-избыточные, так и протонно-избыточные вторичные пучки. Достигнутые параметры пучков и условия их получения отображены в таблице.

Первоначальная настройка линии вторичного пучка была выполнена на максимальный выход вторичного изотопа ^8He , получаемого из первичного пучка ^{11}B . Далее для перехода на другие первичные и вторичные пучки устанавливалась желаемая жесткость магнита D2, а остальные магнитные элементы настраивались на максимальный выход искомого иона в F5. Отдельно настраивался магнит D1. Остальные элементы были разделены на три группы, в каждой из которых токи изменялись пропорционально (см. схему элементов на рис. 1). Деление на группы обусловлено тем, что, переходя из одной группы в другую, пучок изменял жесткость, пересекая последовательно клин, расположенный в F2, и первую станцию времяпролетного детектора, расположенную в F3. Таким образом, элементы от Q1 до Q4 образуют первую группу, от Q5 до Q8 — вторую, а от Q9 до Q14 — третью.

7.1. Форма вторичного пучка. На примере вторичного пучка ^8He с энергией 27,5 МэВ/нуклон, полученного из первичного пучка ^{11}B , обсудим согласие ожидаемых и наблюдаемых угловых и пространственных распределений ионов в фокусе F5. Для сравнения с расчетом установленные токи магнитных элементов закладывались

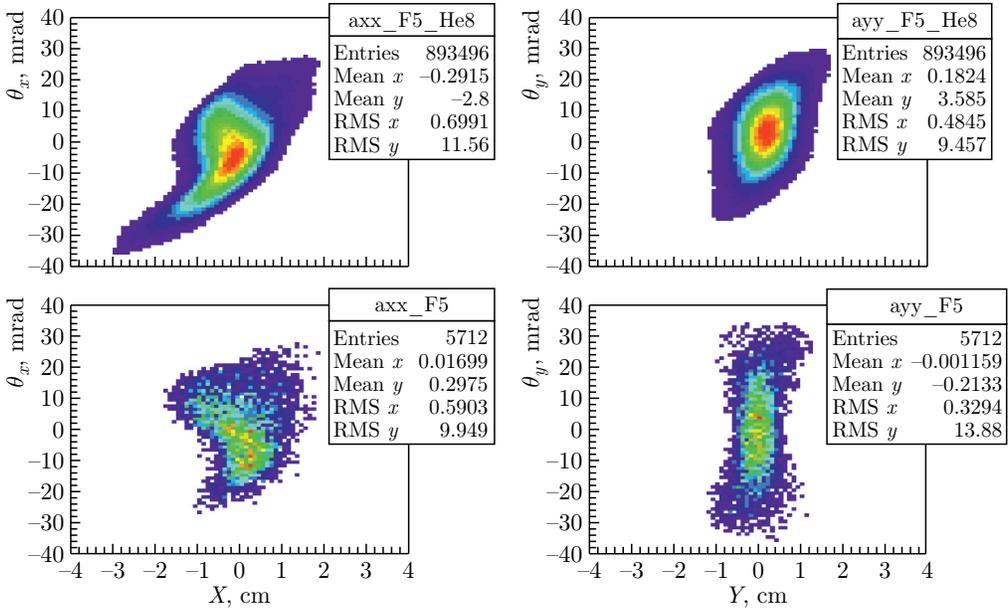


Рис. 9. Экспериментальные (верхний ряд) и расчетные (нижний ряд) распределения вторичного пучка ${}^8\text{He}$ с энергией 27,5 МэВ/нуклон, полученного из первичного пучка ${}^{11}\text{B}$ на фазовых плоскостях $X-X'$ (слева) и $Y-Y'$ (справа) в соответствующих кроссоверах вблизи фокальной плоскости F5. Продольные координаты и значения эмиттансов (RMS) в кроссоверах: $Z_{x \text{ эксп}} = -40$ см, $\epsilon_{x \text{ эксп}} = 61,5\pi$ мм · мрад; $Z_{y \text{ эксп}} = -20$ см, $\epsilon_{y \text{ эксп}} = 39,6\pi$ мм · мрад; $Z_{x \text{ расч}} = 0$, $\epsilon_{x \text{ расч}} = 58,7\pi$ мм · мрад; $Z_{y \text{ расч}} = 75$ см, $\epsilon_{y \text{ расч}} = 45,7\pi$ мм · мрад

в расчет тракта по программе МОСАДИ [30]. Магнитные поля всех магнитов определены по проектным (расчетным) калибровкам, за исключением диполей, для которых имеются соответствующие измерения.

Экспериментальные и расчетные распределения пучка в фазовых плоскостях $X-X'$ и $Y-Y'$ в соответствующих кроссоверах (плоскостях наименьшего сечения пучка в проекции на соответствующую ось) показаны на рис. 9. Можно заметить, что расчетные и измеренные значения эмиттанса совпадают с точностью до 15%, при этом положения соответствующих кроссоверов различаются на несколько десятков сантиметров, что говорит о необходимости более качественной калибровки магнитных элементов. Отметим, что в целом расчеты с проектными значениями калибровочных коэффициентов демонстрируют приемлемое для первого приближения согласие с экспериментом.

7.2. Идентификация частиц пучка. Для иллюстрации возможностей идентификации вторичных пучков на рис. 10 показан идентификационный спектр ΔE -ToF при настройке на ${}^{27}\text{S}$ при жесткости $D2 = 1,35$ Тл · м, полученный при взаимодействии первичного пучка ${}^{32}\text{S}$ с энергией 52,7 МэВ/нуклон с бериллиевой производящей мишенью толщиной 500 мкм, импульсном захвате $\Delta P \pm 1\%$ при толщине бериллиевого клина 500 мкм. По вертикали отложена сумма потерь в обеих время-пролетных станциях детектора пучковых частиц. Видно, что присутствует большое

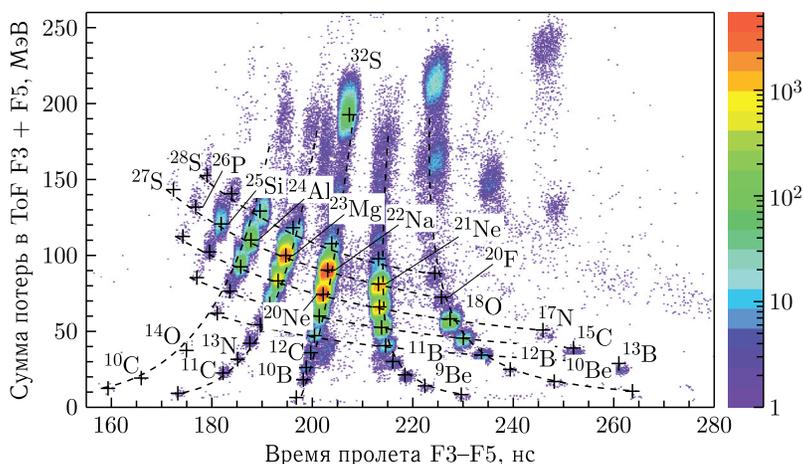


Рис. 10. Идентификационный спектр ΔE -ToF «коктейля» ионов при настройке на ^{27}S , полученный при жесткости $D2 = 1,35$ Тл·м, $\Delta P \pm 1\%$, толщине производящей бериллиевой мишени 500 мкм, толщине бериллиевого клина 500 мкм, толщине сцинтилляционных пластин 125 мкм. Первичный пучок ^{32}S с энергией 52,7 МэВ/нуклон. Крестиками обозначены расчетные положения центров локусов нуклидов для заданной жесткости $D2$. Обратим внимание на отсутствие событий в локусах нуклидов ^8Be , ^9B и ^{16}F , не имеющих связанных состояний

количество вторичных ионов, при этом на краях диаграммы локусы (месторасположение событий регистрации определенного изотопа) нуклидов хорошо разделены, в то время как в центральной части имеются заметные перекрытия локусов. Наблюдаемая картина говорит о целесообразности дальнейшей очистки пучка с использованием ВЧ-фильтра.

На той же диаграмме показаны расчетные положения центров некоторых локусов, полученных при заданной жесткости $D2$. Видно, что наблюдаемые локусы в целом хорошо согласуются с расчетными, однако в области малых значений времени пролета расчет систематически недооценивает величину энерговыделения, а в области больших значений времени — переоценивает. Вероятно, таким образом проявляется несовершенство применяемой математической модели ионизационных потерь H-base из Lise++, опирающейся на данные по потерям водорода в области низких энергий, опубликованных в [31].

7.3. Выходы вторичных ионов. Для всех исследованных вторичных пучков в фокальной плоскости F5 проведены измерения выхода и чистоты при нескольких значениях энергии. Измерение интенсивности первичного пучка пикоамперметром Keithley 6485 описано в разд. 1. Запись тока осуществлялась каждые 10 с. Флуктуации последовательных значений не превышают $\pm 5\%$. Система считывания и сбора данных регистрировала события от каждого тысячного иона, при этом экспериментальный триггер не использовался. Выход изотопа определялся как доля событий в соответствующем локусе на ΔE -ToF спектре, умноженная на значение счетчика импульсов с времяпролетной станции, находящейся в F5, и деленная на интеграл тока первичного пучка.

Результаты показаны на рис. 11 и приведены в таблице.

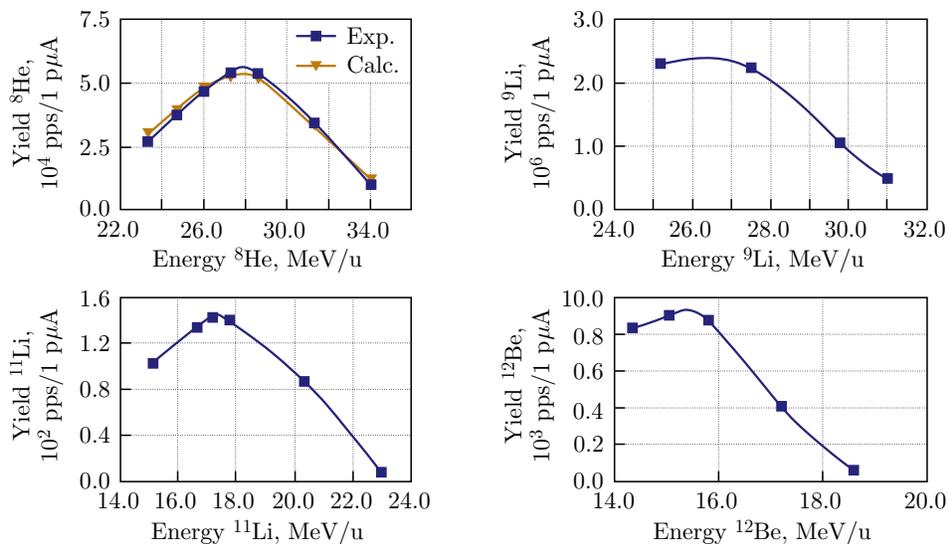


Рис. 11. Зависимость выхода вторичных ионов от энергии, измеренная в финальном фокусе F5

Максимальный измеренный приведенный выход вторичных ионов и их процентное содержание в коктейльном пучке (чистота) при данной настройке

Ион	E , МэВ/ нуклон	Первичный пучок	Мишень+ клин, мкм	$\pm \Delta p$, %	Выход, (ион/с)/ мкА частиц	Выход, ион/ион	Чис- тота, %
^8He	28,6	^{11}B 33,6 МэВ/нуклон	Be(1000)+ Be(1000)	3,25	$4,7 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^{-9}$	95,4
^9Li	25,2			2,00	$1,7 \cdot 10^6$	$2,7 \cdot 10^{-7}$	97,9
^{11}Li	17,7			3,25	$1,1 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^{-11}$	1,5
^{12}Be	15,1			3,25	$6,1 \cdot 10^3$	$9,8 \cdot 10^{-10}$	23,3
$^{10}\text{Be}^1$	45,0	^{15}N 49,3 МэВ/нуклон	Be(1000)+ Be(1000)	1,25	$2,3 \cdot 10^6$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	78,4
$^{27}\text{S}^2$	28,2	^{32}S 52,7 МэВ/нуклон	Be(500)+ Be(500)	0,75	$1,6 \cdot 10^1$	$2,6 \cdot 10^{-12}$	0,002
^{26}P	26,7				$8,5 \cdot 10^1$	$1,4 \cdot 10^{-11}$	0,012
^{25}Si	25,0				$2,9 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^{-10}$	0,56

¹ Для ^{10}Be измерений зависимости выхода от энергии не производилось.
² Изотопы ^{25}Si и ^{26}P получены как сопутствующие при настройке на ^{27}S .

Подробное исследование выходов вторичных пучков, доступных на ACCULINNA-2, и применимости различных теоретических моделей для описания выходов будет выполнено после завершения реконструкции циклотрона У-400М.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены конструкции всех основных подсистем установки ACCULINNA-2: компонентов линии первичного пучка и оборудования для его диагностики, системы диафрагмирования и производящей мишени, поглотителя первич-

ного пучка, ионно-оптической линии вторичного пучка, системы предметных щелей и клиновидного поглотителя, диагностики вторичного пучка, высокочастотного фильтра для дополнительной очистки пучка, реакционной камеры и криогенной физической мишени, дипольного магнита переднего спектрометра, предназначенного для разделения и измерения продуктов реакции, летящих под малыми углами к направлению пучка, автоматизированной системы управления, объединяющей контроль и мониторинг перечисленных подсистем установки.

Представлены характеристики вторичных пучков: угловое и пространственное распределение в финальном фокусе, качество идентификации ионов по ΔE -ToF спектру и выход искомым изотопам ^8He , ^9Li , ^{11}Li , ^{10}Be , ^{27}S и ^{26}P при настройках на несколько значений энергии, полученные в ходе экспериментов 2018–2020 гг. на первичных пучках ^{11}B (33,5 МэВ/нуклон), ^{15}N (49,3 МэВ/нуклон), ^{32}S (52,7 МэВ/нуклон). Проведено сравнение экспериментальных результатов с расчетами транспортировки вторичных пучков. Показано, что имеется возможность проведения экспериментов с легкими экзотическими ионами при высокой точности идентификации и измерения параметров налетающего иона на конденсированных мишенях из изотопов водорода и гелия.

Благодарности. Авторы благодарят профессора Ю. Ц. Оганесяна за плодотворные обсуждения научной программы исследований с радиоактивными пучками, С. Н. Дмитриева, С. И. Сидорчука и службу главного инженера ЛЯР за всестороннюю помощь в реализации проекта, В. Бикмана и других сотрудников компании SigmaPhi, внесших важный вклад в создание и запуск установки, а также О. Б. Тарасова за ценные консультации и Д. Бьяаре за значительный вклад в создание установки АСУ.

Работа проводилась при частичной поддержке РФФИ (грант № 22-12-00054) и научной программы НЦФМ по направлению № 8 «Физика изотопов водорода».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. U-400M Accelerator, FLNR JINR. <http://flerovlab.jinr.ru/u400m-accelerator-complex/>.
2. Facility for Rare Isotope Beams at Michigan State University. <https://frib.msu.edu/>.
3. SPIRAL2 at GANIL, Caen, France. <http://ganil-spiral2.eu/>.
4. RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science (RNC). <https://www.riken.jp/en/research/labs/rnc/>.
5. *Cuttone G., Celona L., Chines F., Cosentino G., Messina E., Re M., Rizzo D., Scuderi V., Tudisco F., Amato A., Calabretta L., De Luca G., Pappalardo A., Passarello S., Rifugiato D., Rovelli A.* EXCYT: The RIB Project at INFN-LNS // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2007. V. 261, No. 1. P. 1040–1043; The Application of Accelerators in Research and Industry; <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.04.142>.
6. *Gade A., Sherrill B.M.* NSCL and FRIB at Michigan State University: Nuclear Science at the Limits of Stability // *Physica Scripta.* 2016. V. 91, No. 5. P. 053003; <https://dx.doi.org/10.1088/0031-8949/91/5/053003>.
7. *Lewitowicz M.* Physics with SPIRAL and SPIRAL 2 Status of the EURISOL Project // *Nucl. Phys. A.* 2004. V. 734. P. 645–653; <https://doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.01.118>.
8. *Dolégieviez P., Gillibert A., Mittag W., Mougeot X., Obertelli A., de Oliveira F., Ozille M., Robillard P., Roussel-Chomaz P., Savajols H.* A Cryogenic Target for Direct Reaction Studies with Exotic Beams // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2006. V. 564, No. 1. P. 32–37; <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.03.027>.

9. *Rodin A., Stepanov S., Bogdanov D., Golovkov M., Fomichev A., Sidorchuk S., Slepnev R., Wolski R., Ter-Akopian G., Oganessian Yu., Yukhimchuk A., Perevozchikov V., Vinogradov Y., Grishechkin S., Demin A., Zlatoustovskiy S., Kuryakin A., Fil'chagin S., Ilkaev R.* Status of ACCULINNA Beam Line // Nucl. Instr. Meth. B. 2003. V.204. P.114–118; 14th Intern. Conf. on Electromagn. Isotope Separators and Techniques Related to Their Applications; [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(02\)01897-9](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(02)01897-9).
10. *Grigorenko L. V., Golovkov M. S., Krupko S. A., Sidorchuk S. I., Ter-Akopian G. M., Fomichev A. S., Chudoba V.* Studies of Light Exotic Nuclei in the Vicinity of Neutron and Proton Drip Lines at FLNR JINR // Phys. Usp. 2016. V.59, No.4. P.321–366. <https://ufn.ru/en/articles/2016/4/a>.
11. *Fomichev A. S., Ter-Akopian G. M., Chudoba V., Daniel A. V., Golovkov M. S., Gorshkov V. A., Grigorenko L. V., Krupko S. A., Oganessian Yu. Ts., Sidorchuk S. I., Slepnev R. S., Stepanov S. V., Wolski R., Ershov S. N., Lukyanov V. K., Danilin B. V., Korsheninnikov A. A., Goldberg V. Z., Mukha I. G., Pfitzner M., Simon H., Shchepunov V. A., Tarasov O. B., Timofeyuk N. K., Zhukov M. V.* Fragment Separator ACCULINNA-2. Letter of Intent. JINR Commun. E13-2008-168. Dubna, 2008.
12. SigmaPhi. <http://www.sigmaphi.fr/>.
13. *Fomichev A. S., Ter-Akopian G. M., Bezbakh A. A., Chudoba V., Egorova I. A., Golovkov M. S., Gorshkov V. A., Grigorenko L. V., Kaminski G., Krupko S. A., Oganessian Yu. Ts., Parfenova Yu. L., Sidorchuk S. I., Slepnev R. S., Stepanov S. V., Sharov P. G., Wolski R., Ershov S. N., Lukyanov V. K., Korsheninnikov A. A., Kuzmin E. A., Nikolskii E. Yu., Goldberg V. Z., Mukha I. G., Pfitzner M., Simon H., Tarasov O. B., Timofeyuk N. K., Yukhimchuk A. A., Zhukov M. V.* Long-Range Plans for Research with Radioactive Ion Beams at JINR. JINR Commun. E7-2012-73. Dubna, 2012.
14. *Fomichev A. S., Grigorenko L. V., Krupko S. A., Stepanov S. V., Ter-Akopian G. M.* The ACCULINNA-2 Project: The Physics Case and Technical Challenges // Eur. Phys. J. A. 2018. V. 54, No. 6. P.97; <https://doi.org/10.1140/epja/i2018-12528-0>.
15. *Kaminski G., Zalewski B., Belogurov S., Bezbakh A., Biare D., Chudoba V., Fomichev A., Gazeeva E., Golovkov M., Gorshkov A., Grigorenko L., Kostyleva D., Krupko S., Muzalevsky I., Nikolskii E., Parfenova Y., Plucinski P., Quynh A., Serikov A., Sidorchuk S., Slepnev R., Sharov P., Szymkiewicz P., Swiercz A., Stepanov S., Ter-Akopian G., Wolski R.* Status of the New Fragment Separator ACCULINNA-2 and First Experiments // Nucl. Instr. Meth. B. 2020. V. 463. P. 504–507; <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.03.042>.
16. POLAND – Low Current Profile Measurement Readout System. Rep.: GSI-SR2013-FG-CS-13 / Executor: S. Löchner, J. Adamczewski-Musch, H. Bräuning, J. Frühauf, N. Kurz, S. Linev, M. Minami, S. Witthaus. 2014; <http://dx.doi.org/10.15120/GR-2014-1-FG-CS-13>.
17. *Yamada K., Motobayashi T., Tanihata I.* RF Deflector System for Proton-Rich RI Beams in RIKEN // Nucl. Phys. A. 2004. V. 746. P. 156–160; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nuclphysa.2004.09.064>.
18. *Krupko S. A., Abakumov A. M., Belogurov S. G., Bezbakh A. A., Golovkov M. S., Gorshkov A. V., Gorshkov V. A., Rymzhanova S. A., Slepnev R. S., Fomichev A. S.* Diagnostics of the Secondary Beam at the ACCULINNA-2 Fragment Separator // Phys. Part. Nucl. Lett. 2023. V. 20, No. 5. P. 1035–1045; <https://doi.org/10.1134/S1547477123050485>.
19. ExpertRoot Framework. <http://er.jinr.ru/index.html>.
20. MBS Multi Branch System DAQ. <http://www.gsi.de/mbs>.
21. *Slepnev R. S., Bezbakh A. A., Golovkov M. S., Gorshkov A. V., Gorshkov V. A., Daniel A. V., Kaminski G., Krupko S. A., Martjanov A. S., Sidorchuk S. I., Chudoba V., Fomichev A. S.* VME-based Data Acquisition System for Multiparameter Measurements // Instrum. Exp. Tech. 2012. V. 55, No. 6. P. 645–650; <https://doi.org/10.1134/S0020441212050065>.

22. Krupko S. A., Bezbakh A. A., Gorshkov A. V., Ter-Akopian G. M., Fomichev A. S. System of Cryogenic Physical Targets for the ACCULINNA-2 Facility // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2024. V. 21, No. 1. P. 60–67; <https://doi.org/10.1134/S1547477124010084>.
23. Yukhimchuk A., Perevozchikov V., Apasov V., Aryutkin V., Vinogradov Yu., Vikharev M., Ganchuk N., Golubkov A., Grishechkin S., Demin A., Zlatoustovskiy S., Karyakin G., Klisch V., Kononenko A., Kukolkin A., Kuryakin A., Lobanov V., Malkov I., Matveev S., Rozhkov V., Safronov V., Solyankin V., Traokin V., Tumkin D., Fil'chagin S., Oganessian Yu., Rodin A., Bogdanov D., Golovkov M., Fomichev A., Sidorchuk S., Slepnev R., Stepantsov S., Ter-Akopian G., Wolski R. Tritium Target for Research in Exotic Neutron-Excess Nuclei // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2003. V. 513, No. 3. P. 439–447; <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2003.06.002>.
24. Bezbakh A. A., Belogurov S. G., Wolski R., Gazeeva E. M., Golovkov M. S., Gorshkov A. V., Kaminski G., Kozlov M. Yu., Krupko S. A., Muzalevskiy I. A., Nikolskii E. Yu., Ovcharenko E. V., Slepnev R. S., Ter-Akopian G. M., Fomichev A. S., Chudoba V., Sharov P. G., Schetinin V. N. A Neutron Spectrometer for Experiments with Radioactive Beams on the ACCULINNA-2 Fragment Separator // *Instrum. Exp. Techn.* 2018. V. 61, No. 5. P. 631–638; <https://doi.org/10.1134/S0020441218050032>.
25. Bezbakh A. A., Belogurov S. G., Chudoba V., Fomichev A. S., Gorshkov A. V., Grigorenko L. V., Kaminski G., Khirk M. S., Knyazev A. G., Krupko S. A., Mauey B., Muzalevskii I. A., Nikolskii E. Yu., Quynh A. M., Sharov P. G., Slepnev R. S., Stepantsov S. V., Ter-Akopian G. M., Wolski R. Detector Array for the ${}^7\text{H}$ Nucleus Multi-Neutron Decay Study // *Nucl. Lett.* 2023. V. 20, No. 4. P. 629–636; <https://doi.org/10.1134/S154747712304009X>.
26. Bezbakh A. A., Chudoba V., Krupko S. A., Belogurov S. G., Biare D., Fomichev A. S., Gazeeva E. M., Gorshkov A. V., Grigorenko L. V., Kaminski G., Kiselev O. A., Kostyleva D. A., Kozlov M. Yu., Mauey B., Mukha I., Muzalevskii I. A., Nikolskii E. Yu., Parfenova Y. L., Piatek W., Quynh A. M., Schetinin V. N., Serikov A., Sidorchuk S. I., Sharov P. G., Slepnev R. S., Stepantsov S. V., Swiercz A., Szymkiewicz P., Ter-Akopian G. M., Wolski R., Zalewski B., Zhukov M. V. Evidence for the First Excited State of ${}^7\text{H}$ // *Phys. Rev. Lett.* 2020. V. 124. P. 022502; <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.124.022502>.
27. Muzalevskii I. A., Bezbakh A. A., Nikolskii E. Y., Chudoba V., Krupko S. A., Belogurov S. G., Biare D., Fomichev A. S., Gazeeva E. M., Gorshkov A. V., Grigorenko L. V., Kaminski G., Kiselev O., Kostyleva D. A., Kozlov M. Y., Mauey B., Mukha I., Parfenova Yu. L., Piatek W., Quynh A. M., Schetinin V. N., Serikov A., Sidorchuk S. I., Sharov P. G., Shulgina N. B., Slepnev R. S., Stepantsov S. V., Swiercz A., Szymkiewicz P., Ter-Akopian G. M., Wolski R., Zalewski B., Zhukov M. V. Resonant States in ${}^7\text{H}$: Experimental Studies of the ${}^2\text{H}({}^8\text{He}, {}^3\text{He})$ Reaction // *Phys. Rev. C.* 2021. V. 103. P. 044313; <https://doi.org/10.1103/PhysRevC.103.044313>.
28. FLUKA Multi-Purpose Code. <https://fluka.cern>.
29. Battistoni G., Boehlen T., Cerutti F., Chin P., Esposito L., Fassó A., Ferrari A., Lechner A., Empl A., Mairani A., Merighetti A., Ortega P., Ranft J., Roesler S., Sala P., Vlachoudis V., Smirnov G. Overview of the FLUKA Code // *Ann. Nucl. Energy.* 2015. V. 82. P. 10–18; <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.11.007>.
30. Iwasa N., Weick H., Geissel H. New Features of the Monte-Carlo Code MOCADI // *Nucl. Instr. Meth. B.* 2011. V. 269, No. 8. P. 752–758; <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.02.007>.
31. Ziegler J., Biersack J., Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids Stopping and Ranges of Ions in Matter. Pergamon, 1985. <https://books.google.ru/books?id=xclwQgAACA AJ>.