

Федеральное агентство научных организаций  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт ядерных исследований Российской академии наук (ИЯИ РАН)

УТВЕРЖДАЮ

директор член-корр. РАН

Л.В.Кравчук

22 января 2018

УДК 621.384.6

№ государственной регистрации АААА-А16-116022510112-4

Инв.№

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Физика и техника ускорителей; физика пучков заряженных частиц  
(промежуточный за 2017 год)

Научный руководитель темы

заместитель директора по научной работе д.ф.-м.н.

Фещенко А.В.

22 января 2018

Москва 2018

## **СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ**

Руководитель темы

д.ф.-м.н. Фещенко А.В. (все разделы)

22 января 2018

## РЕФЕРАТ

Отчёт содержит: 26 с., 2 таблицы, 8 рисунков

Ключевые слова:

СИЛЬНОТОЧНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ, ИСТОЧНИК ПРОТОНОВ, ИНЖЕКТОР ПРОТОНОВ, АВТОМАТИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ, ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ ИОН, АДРОННЫЙ КОЛЛАЙДЕР, ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ, ФОРМА СГУСТКА, СВЕТИМОСТЬ ПУЧКА, КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ, ЯДЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ.

Линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН относится к классу сильноточных линейных ускорителей на средние энергии и является уникальной установкой национального и международного значения. Он является единственным в России ускорителем данного класса и самым крупным линейным ускорителем ионов водорода в Евроазиатском регионе. Со времени начала регулярной работы ускорителя на физические и прикладные задачи в 1993 году и по декабрь 2017 года проведено 128 сеансов, общей продолжительностью свыше 47000 часов, в том числе 4 сеанса продолжительностью свыше около 1700 часов в 2017 году. Для обеспечения работы ускорителя проводятся постоянные ремонтно-профилактические работы по поддержанию его работоспособности, а также работы по его модернизации.

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15: Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине. В 2017 году основные усилия были направлены на обеспечение, техническое обслуживание и модернизацию ускорителя и каналов транспортировки пучка экспериментального комплекса а также на расширение возможностей ускорителя.

Необходимость постоянного усовершенствования и модернизации систем ускорителя и экспериментального комплекса обусловлена рядом причин. Во-первых, изменением требований к параметрам пучка, во-вторых, необходимостью устранения отдельных, в ряде случаев существенных недостатков, которые обнаруживаются в процессе эксплуатации, и, в третьих, необходимостью перехода на новую элементную базу, новые приборы и комплектующие взамен снятых с производства. В ряде случаев модернизация

требует проведения всесторонних исследований. В 2017 году проводились работы по модернизации основных систем ускорителя, среди которых следует отметить систему ВЧ питания начальной части, инжекторы, систему диагностики ускоряющую систему основной части, большинство систем экспериментального комплекса, систему контроля и управления.

В 2017 году был создан экспериментальный стенд для исследования воздействия пучка протонов на узлы радиоэлектронной аппаратуры. Диапазон энергий пучка на стенде составляет от 20 МэВ до 209 МэВ. Энергия изменяется дискретно путем включения/отключения полей в ускоряющих резонаторах, а также путем установки дегрейдеров. Диапазон интенсивностей составляет от  $10^7$  протонов в одиночных импульсах до 1 мкА среднего тока. Обеспечено измерение интенсивности пучка, а также поперечных характеристик, включая положение, профили и распределение в поперечном сечении. Система позиционирования облучаемого объекта позволяет помещать его в заданную координату, а также механически сканировать в поперечной плоскости по заранее заданному алгоритму, что позволяет облучать объекты большого размера с требуемой однородностью.

Проведены испытания созданного стенда и продемонстрирована его работоспособность в двух сеансах работы ускорителя. Выполнены тестовые облучения нескольких образцов.

В процессе сооружения, запуска, эксплуатации и модернизации ускорителя был достигнут уникальный уровень понимания процессов в ускорителе и накоплен огромный опыт решения практических задач. Это обеспечило международное признание авторитета сотрудников Института и широкое применение их разработок не только в ИЯИ РАН, но и в ведущих ядерно-физических ускорительных научных центрах России и всего мира.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Реферат                                                                      | 3  |
| Введение                                                                     | 6  |
| 1 Линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН                                 | 8  |
| 1.1 Обеспечение работы ускорителя                                            | 9  |
| 1.1.1 Публикации                                                             | 17 |
| 1.2 Сотрудничество с российскими и зарубежными научными центрами.            |    |
| Разработка элементов ускорителей для российских и зарубежных научных центров | 18 |
| 1.2.1 Публикации                                                             | 24 |
| Заключение                                                                   | 26 |

## ВВЕДЕНИЕ

Линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН относится к классу сильноточных линейных ускорителей на средние энергии и является уникальной установкой национального и международного значения. Он является единственным в России ускорителем данного класса и самым крупным линейным ускорителем ионов водорода в Евроазиатском регионе. Со времени начала регулярной работы ускорителя на физические и прикладные задачи в 1993 году и по декабрь 2017 года проведено 128 сеансов, общей продолжительностью свыше 47000 часов, в том числе 4 сеанса продолжительностью около 1700 часов в 2017 году. Для обеспечения работы ускорителя проводятся постоянные ремонтно-профилактические работы по поддержанию его работоспособности, а также работы по его модернизации.

Необходимость постоянного усовершенствования и модернизации систем ускорителя и экспериментального комплекса обусловлена рядом причин. Во-первых, изменением требований к параметрам пучка, во-вторых, необходимостью устранения отдельных, в ряде случаев существенных недостатков, которые обнаруживаются в процессе эксплуатации, и, в третьих, необходимостью перехода на новую элементную базу, новые приборы и комплектующие взамен снятых с производства. В ряде случаев модернизация требует проведения всесторонних исследований. В 2017 году проводились работы по модернизации основных систем ускорителя, среди которых следует отметить систему ВЧ питания начальной части, инжекторы, систему диагностики ускоряющую систему основной части, большинство систем экспериментального комплекса, систему контроля и управления.

Выполнялись работы по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы, пункт 15. Современные проблемы ядерной физики, в том числе физики элементарных частиц и фундаментальных взаимодействий, включая физику нейтрино и астрофизические и космологические аспекты, а также физики атомного ядра, физики ускорителей заряженных частиц и детекторов, создание интенсивных источников нейтронов, мюонов, синхротронного излучения и их применения в науке, технологиях и медицине.

Работы проводились в следующих направлениях:

обеспечение работы ускорителя, в том числе получение необходимых разрешительных документов, проведение регулярных сеансов, модернизация и техническое обслуживание систем ускорителя и каналов транспортировки пучка экспериментального комплекса, расширение функциональных возможностей ускорителя;

участие в разработке методик и создании аппаратуры для других Российских и зарубежных ускорительных центров. Возможность такого участия обусловлена имеющимся уникальным уровнем понимания процессов в ускорителях и огромным опытом решения практических задач. В 2017 году проводились совместные работы, а также работы по договорам со следующими организациями: ОИЯИ, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ФГУП НПП ТОРИЙ, ЦЕРН, DESY (Германия), GSI (Германия), FRIB (Мичиганский университет, США), ESS (Швеция), FTSC (Англия).

## ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ИОНОВ ВОДОРОДА ИЯИ РАН

Отдел ускорительного комплекса

Руководитель работ д.ф.-м.н. А.В.Фещенко.

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию и в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2017 год.

# 1 ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАБОТЫ УСКОРИТЕЛЯ.

## Список исполнителей

|     |                                  |                          |
|-----|----------------------------------|--------------------------|
| 1.  | Белов Александр Степанович       | зав.лабораторией, к/н    |
| 2.  | Брагин Сергей Евгеньевич         | научный сотрудник        |
| 3.  | Брусова Наталья Ивановна         | вед.инженер-констр.      |
| 4.  | Быков Сергей Сергеевич           | лаборант                 |
| 5.  | Варламов Геннадий Владимирович   | вед.инженер-электроник   |
| 6.  | Васина Нина Гавриловна           | техник                   |
| 7.  | Венгер Ирина Романовна           | ст.инженер               |
| 8.  | Ветохов Вячеслав Михайлович      | начальник установки      |
| 9.  | Власов Максим Андреевич          | инженер по ЭУ            |
| 10. | Володкевич Ольга Михайловна      | научный сотрудник        |
| 11. | Гаврилов Сергей Александрович    | зав.лабораторией, к/н    |
| 12. | Гаврилова Наталья Николаевна     | вед.инженер по ЭУ        |
| 13. | Гаврилюк Юрий Яковлевич          | старший инженер          |
| 14. | Гайдаш Виктор Александрович      | вед.инженер-электроник   |
| 15. | Голубовский Станислав Евгеньевич | ст.инженер по ЭУ         |
| 16. | Горбатов Сергей Викторович       | газоэлектросв.бр. 0.5 ст |
| 17. | Горбатова Раиса Евгеньевна       | маш.насосн.устан.5 р.    |
| 18. | Горбунов Сергей Алексеевич       | вед.инженер по ЭУ        |
| 19. | Готовцев Юрий Николаевич         | ведущий инженер по ЭУ    |
| 20. | Грехов Олег Викторович           | нач-к службы             |
| 21. | Грехова Елена Дмитриевна         | вед.инженер по ЭУ        |
| 22. | Гречко Владимир Васильевич       | зам.гл.инж.ОУК           |
| 23. | Долгов Евгений Викторович        | начальник установок      |
| 24. | Жвакин Игорь Михайлович          | ст.инженер по ЭУ         |
| 25. | Железов Игорь Николаевич         | вед.инж.констр.0.5 ст.   |
| 26. | Зиновьев Геннадий Павлович       | зам.зав.отделом          |
| 27. | Зубец Валерий Николаевич         | научный сотрудник        |
| 28. | Калинин Юрий Жоржевич            | зав.сектором             |
| 29. | Калинина Татьяна Васильевна      | техник по ЭУ             |
| 30. | Калихов Борис Владимирович       | вед.инженер по ЭУ        |
| 31. | Калихов Владимир Борисович       | нач-к службы             |
| 32. | Кваша Адольф Иванович            | зав.сектором             |
| 33. | Киселев Юрий Васильевич          | зав.сектором             |
| 34. | Кленов Виктор Сергеевич          | научный сотрудник        |
| 35. | Кобзев Леонид Николаевич         | ст.инженер по ЭУ         |
| 36. | Колпак Николай Игнатьевич        | электромонтажник бр.     |
| 37. | Колунов Владимир Иванович        | электромонтажник бр.     |
| 38. | Колыхалов Николай Александрович  | вед.инженер по ЭУ        |
| 39. | Копин Владимир Сергеевич         | вед.инженер по ЭУ        |
| 40. | Краюшкин Дмитрий Игоревич        | ст.инженер по ЭУ         |
| 41. | Кузьмин Олег Спартакович         | вед.инженер по ЭУ        |
| 42. | Кутузов Валерий Александрович    | зав.сектором             |
| 43. | Лебедева Наталья Федоровна       | вед.инженер-электроник   |
| 44. | Леонтьев Владимир Николаевич     | заведующий сектором      |
| 45. | Лопатников Юрий Михайлович       | вед.инженер 0, 4 ставки  |
| 46. | Лопатовский Георгий Юрьевич      | вед.инженер по ЭУ        |
| 47. | Лоскутов Владимир Евгеньевич     | нач-к установок          |

|     |                                  |                          |
|-----|----------------------------------|--------------------------|
| 48. | Мартынов Александр Евгеньевич    | вакуумщик-испытат.       |
| 49. | Мельников Виктор Михайлович      | ст.инженер по ЭУ         |
| 50. | Микляев Дмитрий Викторович       | слесарь КИПиА 5 р.       |
| 51. | Мосунов Владимир Георгиевич      | нач-к установок          |
| 52. | Мочалов Николай Михайлович       | слесарь-ремонтник 6 р    |
| 53. | Набока Александр Николаевич      | нач-к установок          |
| 54. | Назаренко Валерия Витальевна     | вед.инженер-констр.      |
| 55. | Нечаева Лидия Поликарповна       | ст.н.с., к/н             |
| 56. | Никулин Евгений Семенович        | научный сотрудник        |
| 57. | Парамонов Валентин Витальевич    | вед.н.с., д/н            |
| 58. | Петров Андрей Юльевич            | ст.мех.сб.работ 4 р.     |
| 59. | Петров Геннадий Валентинович     | ведущий инженер по ЭУ    |
| 60. | Печенин Юрий Васильевич          | нач-к службы ЛМФ         |
| 61. | Прус Александр Михайлович        | вед.инженер по ЭУ        |
| 62. | Редькин Юрий Николаевич          | вед.инженер по ЭУ        |
| 63. | Рейнгардт-Никулин Петр Игоревич  | научный сотрудник        |
| 64. | Рижский Андрей Викторович        | вед.инженер по ЭУ        |
| 65. | Рыбаков Иван Викторович          | инженер 0,5 ставки       |
| 66. | Свириденко Михаил Павлович       | ст.инженер по ЭУ         |
| 67. | Семина Татьяна Васильевна        | старший лаборант         |
| 68. | Серов Валерий Львович            | главный инж.ОУК          |
| 69. | Сильниченко Владимир Николаевич  | вед.инженер по ЭУ        |
| 70. | Столяров Алексей Стефанович      | слесарь                  |
| 71. | Стрижов Анатолий Константинович  | начальник установок      |
| 72. | Таланин Юрий Алексеевич          | вед.инженер по ЭУ        |
| 73. | Тараничева Наталья Михайловна    | старший лаборант         |
| 74. | Толкачева Нина Сергеевна         | техник                   |
| 75. | Торопова Лариса Александровна    | инж.электр. 0,5 ст.      |
| 76. | Турбабин Александр Васильевич    | вед.инженер по ЭУ        |
| 77. | Фещенко Александр Владимирович   | зам. Директора Института |
| 78. | Филимонов Геннадий Александрович | ведущий инженер по ЭУ    |
| 79. | Фролов Олег Тимофеевич           | научный сотрудник        |
| 80. | Ханжина Татьяна Николаевна       | ст.инж.-констр.          |
| 81. | Чернов Юрий Викторович           | вед.инженер по ЭУ        |
| 82. | Шаталов Владимир Александрович   | вед.инженер-электроник   |
| 83. | Ярилин Александр Алексеевич      | начальник участка        |

В 2017 году на сильноточном линейном ускорителе ИЯИ РАН проведено четыре сеанса, направленных на разработку технологии получения радиоизотопов и наработку радиоизотопов, на исследования, модернизацию и расширение возможностей ускорительного комплекса, а также на выполнение физической программы Института. Общая продолжительность сеансов в 2017 году составила около 1700 часов. Нарботка ускорителя по программе получения радиоизотопов составила свыше 79000 мкА·часов при среднем токе пучка до 130 мкА и энергии 143 МэВ.

На выходе ускорителя создан экспериментальный стенд для исследования воздействия пучков протонов на узлы радиоэлектронной аппаратуры, показанный на рисунке 1.

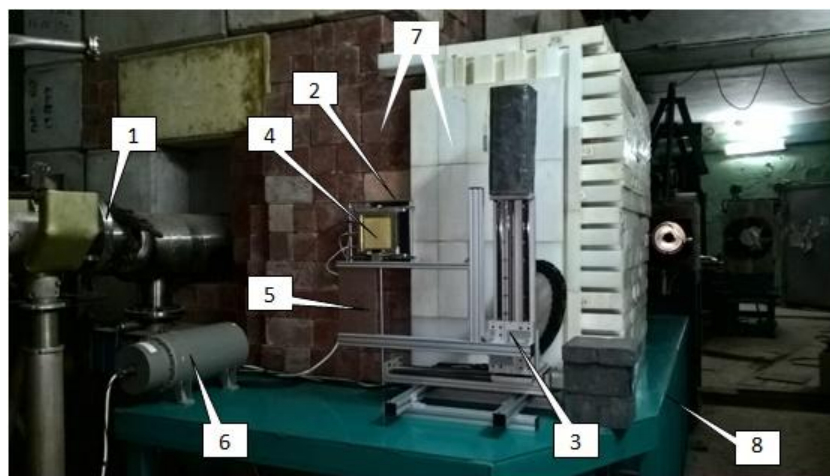


Рисунок 1 - Расположение оборудования экспериментального стенда (1 - выводное окно канала транспортировки, 2 – графитовый поглотитель, 3 – устройство двухкоординатного перемещения, 4 – мультианодный газовый счетчик, 5 – макет облучаемого изделия, 6 – нейтронный детектор, 7 – защита, 8 – опора).

Проведен комплекс исследований, позволивший обеспечить транспортировку и формирование на стенде пучка с требуемыми параметрами. Энергия пучка изменяется дискретно в диапазоне от 20 МэВ до 209 МэВ путем включения/отключения резонаторов, а также вводом дегрейдеров заданной толщины. Диапазон интенсивностей составляет от  $10^7$  протонов в одиночных импульсах до 1 мкА среднего тока. Обеспечено измерение интенсивности пучка, а также поперечных характеристик, включая положение, профили и распределение в поперечном сечении. Система позиционирования облучаемого объекта позволяет помещать его в заданную координату, а также механически сканировать в поперечной плоскости по заранее заданному алгоритму, что позволяет облучать объекты большого размера с требуемой однородностью. Сооружение стенда создало

дополнительные возможности использования ускорителя для исследований радиационной стойкости различных изделий и материалов, в том числе широкого спектра задач.

В 2017 году были подготовлены и поданы документы и материалы с целью получения санитарно-эпидемиологического заключения на ускоритель в органах Роспотребнадзора на очередной срок. По рекомендации Роспотребнадзора подготовленные материалы дополняются материалами по выбросам радиоактивных веществ. После этого был доработан проект выбросов, на него получено положительное экспертное заключение и он подан в органы Роспотребнадзора для получения на него санитарно-эпидемиологического заключения.

В 2017 году продолжались работы по техническому обслуживанию и модернизации основных систем ускорителя.

Так по системе инъекции выполнялись профилактические работы с высоковольтным оборудованием инжектора протонов, в том числе доливка трансформаторного масла в трансформатор 400 кВ и стойку диодной стабилизации, проверка электрической прочности трансформаторного масла, вакуумная откачка масла для снижения содержания примесей. Периодически проверялась работа защит и блокировок, выполнялась диагностика состояния высоковольтного оборудования инжектора протонов. Была выполнена модификация узла фильтра водорода и обеспечена герметичность системы напуска водорода в дуоплазматрон. Выполнен демонтаж неиспользуемого оборудования в пом. 09 модулятора высоковольтного напряжения инжектора протонов. Проведена доработка схемы высоковольтного ключа на тиристорах, предназначенного для замены тиратронов, используемых в схеме модулятора высоковольтного напряжения инжектора протонов. Разработаны и изготовлены два импульсных буферных блока для обеспечения запуска тиристорных сборок и другой аппаратуры генератора высоковольтных импульсов от вновь приобретенного генератора задержанных импульсов: восьмиканальные формирователи импульсов синхронизации, четырехканальный блок управления запуском тиристорных сборок. Выполнена замена трех тиратронов тиристорными высоковольтными сборками. Проведены испытания генератора высоковольтных импульсов инжектора протонов, в которых получена надежная работа установленных тиристорных сборок. Фотография модифицированных тиристорных сборок, установленных в помещении 09 модулятора высоковольтных импульсов, показана на рисунке 2.

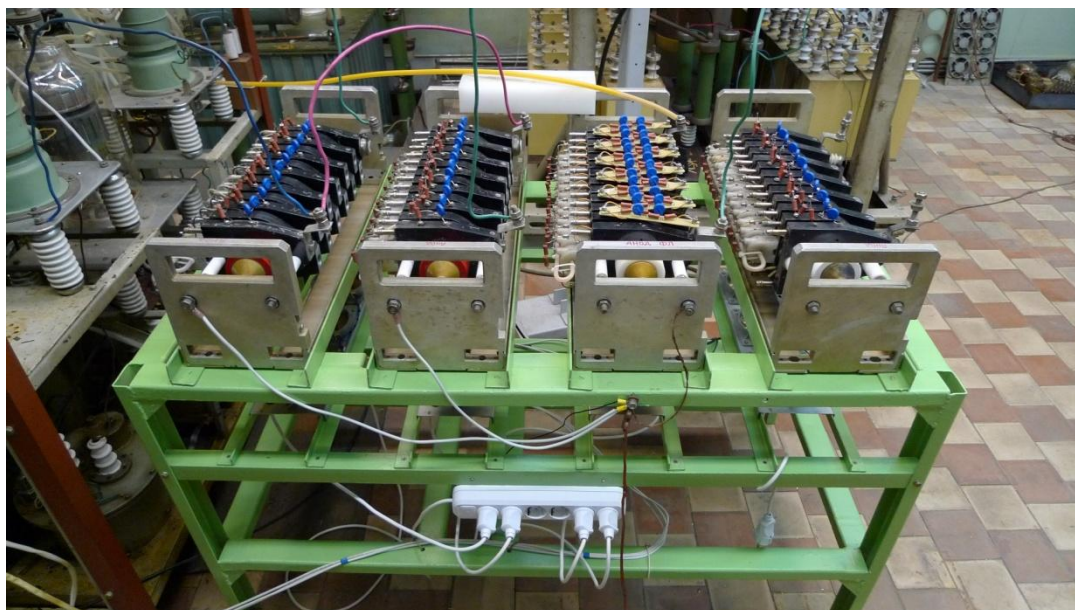


Рисунок 2 - Модифицированные тиристорные высоковольтные сборки для модулятора инжектора протонов.

Проведена модернизация стенда для испытаний источника отрицательных ионов на основе вакуумной камеры объемом 100 л и турбомолекулярного насоса VARIAN 3500. Разработан и изготовлен макетный экземпляр источника отрицательных ионов с осесимметричной геометрией газоразрядной камеры, эмиссионного отверстия и вытягивающего электрода. Произведена сборка и монтаж источника на фланце вакуумной камеры стенда источника отрицательных ионов. Произведен запуск источника в высоковольтном режиме без цезия. Для регистрации тока пучка собрана система измерения, включающая отклоняющий магнитный диполь и коллектор с запирающей сеткой. Проведены измерения вольт-амперных характеристик системы магнитный диполь-сетка-коллектор, из которых был сделан вывод об отсутствии заметного вклада в ток пучка сопутствующих электронов, вытягиваемых из эмиссионного отверстия совместно с отрицательными ионами. Этот результат является экспериментальным подтверждением ионно-оптических расчетов системы вытягивания, проведенных ранее. Выполнен анализ схем деления на два пучка ускоренного до энергии 50-200 МэВ пучка ионов Н<sup>-</sup> с использованием газовой и тонкопленочной мишеней. Выполнено исследование работы прецизионного емкостного делителя импульсного напряжения с амплитудой 400 кВ. Устранена нестабильность, связанная со свойствами высоковольтного плеча делителя. Результаты исследования имеют значение для стабилизации энергии пучка протонов из инжектора и, следовательно, для обеспечения устойчивой работы линейного ускорителя.

Выполнены измерения эмиттанса пучка на выходе инжектора протонов с разной фокусировкой на входе ускорительной трубки, как начало работы по измерениям степени компенсации пространственного заряда пучка протонов с энергией 400 кэВ. Выполнено исследование компенсации объемного заряда ионного пучка на выходе инжектора.

По вакуумной системе разработаны, изготовлены, смонтированы и запущены новые посты предварительной вакуумной откачки на инжекторе, на начальной части ускорителя, на третьем и пятом секторах основной части и на канале транспортировки на комплекс протонной терапии (проложены силовые и контрольные кабели, разработаны чертежи и изготовлены в опытном производстве узлы и детали постов, разработаны электрические схемы, собраны пульты местного и дистанционного управления постов). Выполнен текущий ремонт оборудования. Обеспечена передача информации о состоянии вакуума экспериментального комплекса в систему управления ускорителя. На изотопном комплексе выполнена замена выпускного окна, после отработки 450000 микроампер-часов в течение 5 лет. На экспериментальном комплексе проведена ревизия канала транспортировки на комплекс протонной терапии, демонтированы устройства, необходимость в которых в настоящее время отсутствует, что существенно упрощает условия транспортировки пучка. Начата замена вакуумных затворов и организация блокировок пучка от вакуумметров разделительных затворов.

По системе диагностики разработаны, изготовлены, смонтированы и налажены диагностические устройства для экспериментального стела для облучения изделий и материалов: индукционный датчик тока для контроля пучков с интенсивностью  $>5 \cdot 10^9$  протонов в импульсе, мультианодный газовый счетчик для регистрации импульсного тока, профиля и положения пучков с интенсивностью  $10^7 \div 10^{10}$  протонов в импульсе, люминесцентный экран и видеокамера для оптической регистрации положения и двумерного поперечного сечения пучка. На инжекционном тракте введены в эксплуатацию регулируемые поглотители пучка для формирования требуемой интенсивности на экспериментальном стенде вплоть до предела чувствительности ионизационной камеры. На экспериментальном комплексе модернизирована система индукционного мониторинга тока пучка, включая систему контроля потерь и блокировки по разности показаний индукционных датчиков. Модернизирована система измерения профилей пучка. Приобретены и смонтированы двадцать новых ионизационных камер, модернизирована система регистрации сигналов с камер. Выполненная модернизация позволяет осуществлять измерение импульсных, а не усредненных, как ранее, потерь пучка, что дает возможность создания системы быстрой аварийной защиты, которая отсутствует на

экспериментальном комплексе. Увеличено число каналов регистрации системы нейтронного мониторинга с 28 до 43

По системе фокусировки выполнен монтаж дополнительных корректоров на экспериментальном комплексе, а также разработана и введена в эксплуатацию система питания этих корректоров. Выполнены работы по вводу в рабочее состояние резервных источников питания экспериментального комплекса. Модернизирована система питания фокусирующих элементов инжекционного тракта ускорителя на основе современных источников питания, также разработана и введена в эксплуатацию система контроля токов фокусирующих соленоидов. Продолжены работы по изготовлению трубки дрейфа №184 на линзе на постоянных магнитах.

По ускоряющей системе продолжены работы по разработке нового ускоряющего резонатора типа CDS вместо первого ускоряющего резонатора с шайбами и диафрагмами. Завершен цикл отдельных исследований характеристик ускоряющей структуры CDS – оптимизация формы ячеек для обеспечения ВЧ эффективности, настройки ячеек до пайки, исследование возможности развития и способов подавления мультипакторного разряда, возможности применения и адаптации существующих мостовых устройств связи секций. Начата разработка окончательно варианта структуры и мостовых устройств с учетом результатов и взаимосвязи эффектов рассмотренных в предварительных исследованиях. Одновременно была выполнена работа по перераспределению поля по секциям существующего ускоряющего резонатора. Было снижено с поле в двух секция, в которых происходят пробои, относительно двух других надежно работающих секций, что при сохранении среднего уровня поля по резонатору, привело к увеличению надежности его работы.

По системе высокочастотного питания основной части ускорителя проводились работы по восстановлению трех каналов усиления с целью увеличения энергии пучка до 267 МэВ. На каналах 3-10, 3-11 и 4-1 проведены работы по ревизии, ремонту, наладке и модернизации оборудования. После завершения этих работ произведена тренировка соответствующих ускоряющих резонаторов и комплексная проверка и наладка ВЧ каналов совместно с системами авторегулирования при работе на резонаторы. Получены уровни поля в резонаторах близкие к номинальным при длительности импульсов поля около 200 мкс.

Проведена модернизация автоматизированной системы радиационного контроля связанная с дооснащением комплекса технических средств «Фрегат» (установка дополнительных семи датчиков гамма и четырех датчиков нейтронного излучения.

По системе контроля и управления с целью повышения надежности работы системы управление ускорителем и экспериментальным комплексом проведены монтаж, наладка и

тестирование новой гигабитной волоконно-оптической системы связи оборудования системы управления ускорителем и экспериментальным комплексом. Для обеспечения связи и управления экспериментальным стендом проведен монтаж, наладка и тестирование волоконно-оптических линий связи между стендом, пультовой стенда и системой управления ускорителем. Модернизированы автоматизированные системы измерений показаний нейтронных датчиков и измерений показаний с новых ионизационных камер в каналах транспортировки пучка экспериментального комплекса. Также выполнен комплекс работ по модернизации серверного компьютерного оборудования 3-го сектора системы управления и пульта управления ускорителем..

Наиболее сложные проблемы возникли в системе высокочастотного питания начальной части ускорителя. В последние несколько лет проводилась модернизация, вызванная отсутствием мощных модуляторных ламп. Ранее было принято решение о замене снятых с производства модуляторных ламп ГМИ-44А на генераторные лампы ГИ-71А. Модернизация была выполнена на трех из шести каналах усиления и была обеспечена надежная работа. К сожалению, на двух наиболее мощных каналах, а также не резервном канале, обеспечить надежную работу пока не удалось. Основная проблема заключается в том, что при пробоях в генераторах, фидере или генераторных лампах модуляторная лампа не закрывается при снятии открывающего импульса, что происходит к разряду формирующей линии и отключению канала. В настоящее время проблема исследуется, проводятся консультации с разработчиками ламп. Решение этой проблемы жизненно необходимо для обеспечения самого существования ускорителя.

### 1.1.1 ПУБЛИКАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах:

- 1) А. С. Белов, С. Е. Голубовский, В. Н. Зубец, Е. С. Никулин, О. Т. Фролов, “Стабилизация параметров фазового портрета пучка ионов водорода”, (Приборы и техника эксперимента, 2017, № 2, с. 5–13).
- 2) A. Belov S. Gavrilov, O. Frolov, L. Netchaeva, E. Nikulin, V.N. Zubets, “High sensitivity secondary ion energy analyzer”, submitted to JINST in December 2017.

Доклады на конференциях и школах

- 1) Рыбаков И.В., Парамонов В.В. “Методика контроля качества изготовления ускоряющей структуры”. (3-я Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии», 24-27 января 2017, Москва, НИЯУ МИФИ).
- 2) В.В. Парамонов, Л.В. Кравчук, И.В. Рыбаков. “Ввод ВЧ мощности в “ячейку связи” ускоряющего резонатора”. Доклад на XII международном семинаре по проблемам ускорителей заряженных частиц 03 - 08 сентября 2017 года, ОИЯИ, Алушта..
- 3) S. Gavrilov, P. Reinhardt-Nickoulin, A. Titov. “2D non-destructive transverse diagnostics by Beam Cross-Section Monitor.” Доклад на конференции International Beam Instrumentation Conference 2017 (IBIC17), East Lansing, MI, USA, August 20 – 25, 2017. (в печати).

## 2 СОТРУДНИЧЕСТВО С РОССИЙСКИМИ И ЗАРУБЕЖНЫМИ НАУЧНЫМИ ЦЕНТРАМИ. РАЗРАБОТКА ЭЛЕМЕНТОВ УСКОРИТЕЛЕЙ ДЛЯ РОССИЙСКИХ И ЗАРУБЕЖНЫХ НАУЧНЫХ ЦЕНТРОВ.

Список исполнителей:

|     |                                |                        |
|-----|--------------------------------|------------------------|
| 1.  | Белов Александр Степанович     | зав.лабораторией, к/н  |
| 2.  | Брагин Сергей Евгеньевич       | научный сотрудник      |
| 3.  | Брусова Наталья Ивановна       | вед.инженер-констр.    |
| 4.  | Венгер Ирина Романовна         | ст.инженер             |
| 5.  | Ветохов Вячеслав Михайлович    | начальник установки    |
| 6.  | Володкевич Ольга Михайловна    | научный сотрудник      |
| 7.  | Гаврилов Сергей Александрович  | зав.лабораторией, к/н  |
| 8.  | Гаврилюк Юрий Яковлевич        | старший инженер        |
| 9.  | Гайдаш Виктор Александрович    | вед.инженер-электроник |
| 10. | Готовцев Юрий Николаевич       | ведущий инженер по ЭУ  |
| 11. | Грехов Олег Викторович         | нач-к службы           |
| 12. | Грехова Елена Дмитриевна       | вед.инженер по ЭУ      |
| 13. | Гречко Владимир Васильевич     | зам.гл.инж.ОУК         |
| 14. | Жвакин Игорь Михайлович        | ст.инженер по ЭУ       |
| 15. | Железов Игорь Николаевич       | вед.инж.констр.        |
| 16. | Зиновьев Геннадий Павлович     | зам.зав.отделом        |
| 17. | Зубец Валерий Николаевич       | научный сотрудник      |
| 18. | Калинин Юрий Жоржевич          | зав.лабораторией, к/н  |
| 19. | Калихов Борис Владимирович     | вед.инженер по ЭУ      |
| 20. | Киселев Юрий Васильевич        | зав.лабораторией, к/н  |
| 21. | Кленов Виктор Сергеевич        | научный сотрудник      |
| 22. | Леонтьев Владимир Николаевич   | заведующий сектором    |
| 23. | Мартынов Александр Евгеньевич  | вакуумщик-испытат.     |
| 24. | Микляев Дмитрий Викторович     | слесарь КИПиА 4р.      |
| 25. | Набока Александр Николаевич    | нач-к установок        |
| 26. | Назаренко Валерия Витальевна   | вед.инженер-констр.    |
| 27. | Парамонов Валентин Витальевич  | вед.н.с.,д/н           |
| 28. | Рыбаков Иван Викторович        | инженер                |
| 29. | Серов Валерий Львович          | главный инж.ОУК        |
| 30. | Турбабин Александр Васильевич  | вед.инженер по ЭУ      |
| 31. | Фещенко Александр Владимирович | зам. директора         |

В 2017 году продолжались работы по совершенствованию источника поляризованных дейтронов и протонов, созданного и запущенного в эксплуатацию ранее в сотрудничестве ОИЯИ и ИЯИ РАН. На ускорителе ОИЯИ НУКЛОТРОН в феврале 2017 г. были выполнены эксперименты с ускоренным пучком поляризованных дейтронов, а также впервые на НУКЛОТРОНе было выполнено ускорение поляризованных протонов. В проведении сеанса участвовали сотрудники ИЯИ РАН. Источник показан на фото на рис. 3. В конце 2017 года был заключен новый договор на разработку и исследование узлов

источника поляризованных ионов с целью повышения интенсивности и поляризации поляризованных протонов и дейтронов.



Рисунок 3 - Источник поляризованных и неполяризованных дейтронов и протонов, установленный в инжекторном помещении НУКЛОТРОНа ОИЯИ. Источник был создан и запущен в эксплуатацию в сотрудничестве с ИЯИ РАН.

Также в рамках сотрудничества с ОИЯИ, разработан эскизный проект дебанчера для комплекса NICA на основе резонатора split ring. Разработанная конструкция по сочетанию физических, технологических, эксплуатационных и экономических характеристик превосходит возможные аналоги. Это позволило ИЯИ РАН выиграть тендер на изготовление дебанчера, которое начато едется в рамках договора с ОИЯИ.

В рамках соглашения с ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» в 2017 году начаты работы по созданию экспериментального стенда и исследованию воздействия пучков протонов на узлы радиоэлектронной аппаратуры. Создание стенда завершено, проведены пробные испытания отдельных образцов.

В рамках соглашения с ФГУП НПП ТОРИЙ на аппаратуре ускорителя проводились испытания мощных СВЧ приборов клистронов КИУ-40, выпускаемых данным предприятием.

В рамках соглашения с лабораторией ДЕЗИ, Цойтен, Германия продолжены работы по исследованию, разработке и запуску электродинамических систем стенда фотоинжектора для исследование формирования сгустков электронов сверхвысокой яркости. Проведены расчеты и сформулировано техническое предложение, реализованное на отклоняющей структуре TDS (изготовленной в ИЯИ РАН), позволившие

усовершенствовать систему термостабилизации TDS. Разработано предложение и рассчитаны параметры элемента согласования, реализованные в ДЕЗИ в волноводной линии системы ВЧ TDS, позволившее понизить уровень отраженной ВЧ мощности до допустимого уровня, определенного спецификацией примененного клистрона. В результате проведенных доработок изготовленная в ИЯИ РАН система TDS установки PITZ, ДЕЗИ, Цойтен, выведена на проектные параметры по отклоняющему напряжению, обеспечивающему пространственное разрешение при измерении характеристик коротких сгустков электронов.

В рамках соглашения с лабораторией ДЕЗИ, Гамбург, Германия проведена корректировка конструкторской документации для изготовления тестовых ячеек разработанного в ИЯИ РАН резонатора дефлектора установки REGAE. Тестовые ячейки изготовлены ДЕЗИ и специалистами ИЯИ проведены ВЧ измерения их характеристик. По откорректированной документации в ДЕЗИ с высоким качеством обработки поверхности изготовлены штатные ячейки, показанные на рисунке 4. Проведена ВЧ настройка резонатора, спаянного из ячеек высокотемпературным припоем. Резонатор подготовлен для монтажа на установке, ВЧ тренировке и вывода на проектные параметры.



Рисунок 4 - Штатные ячейки резонатора дефлектора для установки REGAE.

Завершено выполнение работ по теме «Исследование стабильности источника электронов с высокой частотой посылок для исследовательской установки CLARA/VELA при медленном изменении параметров резонатора», выполняемой по соглашению с лабораторией STFC, Даресбури, Англия. Результаты оформлены в отчете и переданы заказчику.

В 2017 продолжено сотрудничество с ЦЕРН. В частности продолжено участие в экспериментах CAST (CERN axion solar telescope) и AEGIS (Antihydrogen Experiment, Gravity, Interferometry, Spectroscopy). Также продолжены работы по разработке и созданию измерителей формы сгустков для линейного ускорителя Linac-4 ЦЕРН и исследованию продольного движения в ускорителе. В частности восстановлена работоспособность двух измерителей, которая была нарушена при их переносе в новые места на выходе ускорителя. Проведены тестовые измерения. При измерениях наблюдалась сильная модуляция фазового положения в течение импульса тока пучка, обусловленная нестабильностью полей в резонаторах вследствие нагрузки пучком. На рисунке 5 представлена эволюция формы сгустков на выходе ускорителя в стандартном режиме работы ускорителя. Видно, что в первой половине импульса тока пучка длительностью 60 мкс наблюдается сильная модуляция фазового положения сгустков. Фазовое положение сгустков стабилизируется к концу импульса.

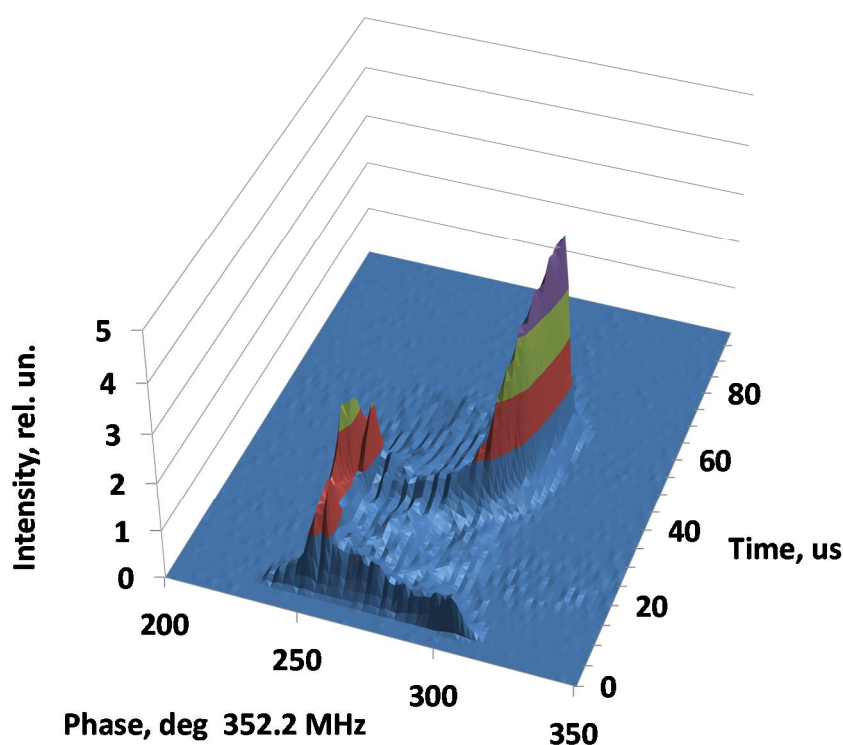


Рисунок 5 – Эволюция формы сгустков в течение импульса тока пучка.

В рамках соглашения с комплексом FRIB Мичиганского университета, США продолжались работы по созданию Измерителя Формы Сгустков для Комплекса пучков редких изотопов (FRIB) MSU». Завершено изготовление оборудования и в августе 2017 г. прибор был доставлен в FRIB, собран и подготовлен к лабораторным испытаниям (рис. 6)



Рисунок 6 – Сотрудник Института с собранным измерителем формы сгустков в чистом помещении для сборки оборудования ускорителя FRIB MSU.

Продолжались работы по созданию двух измерителей формы сгустков для линейного ускорителя Европейского нейтронного источника ESS. Завершено изготовление оборудования, выполнена сборка и лабораторные испытания обоих приборов, один из которых показан на рисунке 7.

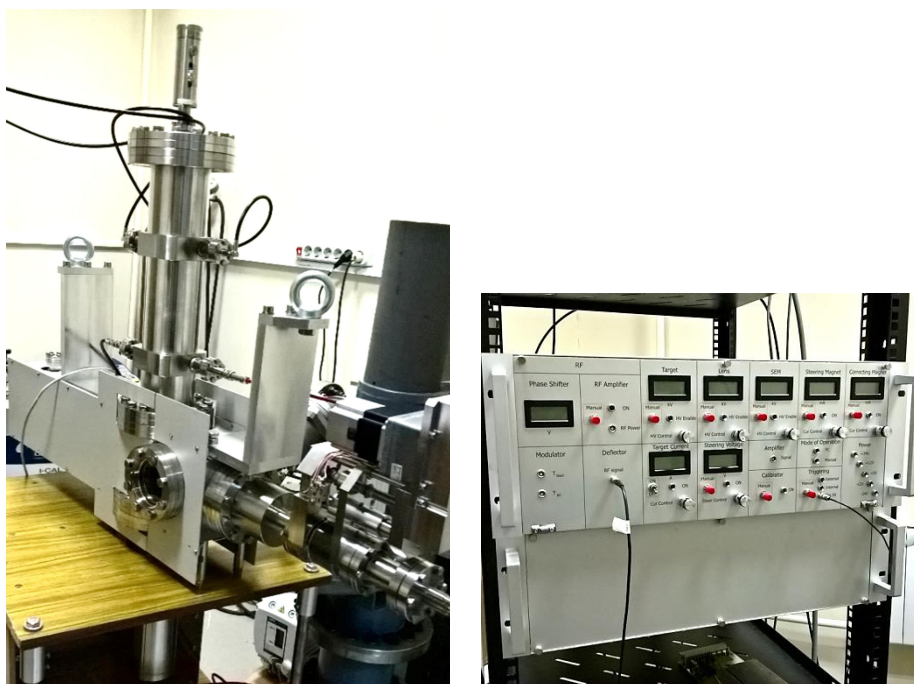


Рисунок 7 - Измерителей формы сгустков для ESS на испытательном стенде.

Особенностью данных двух приборов является использование двусторонних симметричных высокочастотных дефлекторов электронов (рис. 8), что улучшает

электронно-оптические свойства и, как следствие, повышает фазовое разрешение до величин лучше 1 градуса на частоте 352,2 МГц.

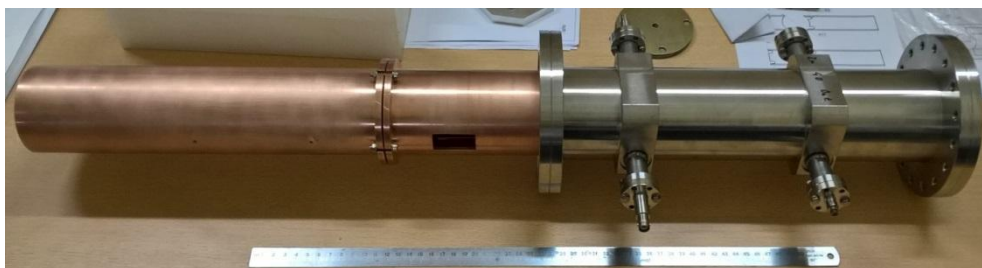


Рисунок 8 – Симметричный двусторонний дефлектор.

## 1.2.1 ПУБЛИКАЦИИ

### Публикации в рецензируемых журналах:

- 1) S. Gavrilov, A. Feschenko, D. Chermoshentsev, “Bunch Shape Monitors for modern ion linacs”, Journal of Instrumentation (JINST), <https://doi.org/10.1088/1748-0221/12/12/P12014>.
- 2) V. Paramonov, S. Philipp, I. Rybakov, A. Skassyrskaya, F. Stephan. “Design of an L-band normally conducting RF gun cavity for high peak and average RF power”. (Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 854 (2017) 113–126.
- 3) CAST Collaboration, (A. Belov, S. Gninenko from INR RAS), “New CAST limit on the axion–photon interaction”, arXiv:1705.02290v1 [hep-ex] 5 May 2017, Nature Physics, vol. 13, p. p. 584-591, published online: 1 may 2017, DOI: 10.1038/NPHYS4109.

### Доклады на конференциях и школах

- 1) S. Gavrilov, A. Feschenko. “Bunch Shape Monitors for modern ion linacs.” Доклад на конференции International Beam Instrumentation Conference 2017 (IBIC17), East Lansing, MI, USA, August 20 – 25, 2017 (в печати).
- 2) S. Gavrilov, A. Feschenko. ”Design and development of Bunch Shape Monitor for FRIB MSU”. Доклад на конференции International Beam Instrumentation Conference 2017 (IBIC17), East Lansing, MI, USA, August 20 – 25, 2017 (в печати).
- 3) Paramonov. V., Phillip S., Rybakov I., Skassyrskaya A., Stephan F. “Development of the L-band normal conducting RF gun cavity for high peak and average RF power”. (3-я Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии», 24-27 января 2017, Москва, НИЯУ МИФИ).
- 4) V.V. Fimushkin, A.V. Butenko, D.E. Donets, A.D. Kovalenko, L.V. Kutuzova, Yu.V. Prokofichev, V.B. Shutov (JINR), A.S. Belov, V.N. Zubets, A.V. Turbabin (INR RAS) “Polarized Ion Source for the JINR accelerator complex”, report on XVII workshop on high energy spin physics DSPIN 2017, Dubna, September 15, 2017.
- 5) M. Janek, V.P. Ladygin, V.V. Avdeichikov, A.V. Averyanov, A.S. Belov, V.V. Fimushkin и др. (всего 23) “Investigation of reactions using polarized and unpolarized deuteron beam at Nuclotron: current status and perspectives”, The European Physical Journal Conferences 138(2):01028, January 2017, DOI: 10.1051/epjconf/201713801028.
- 6) V.P.Ladygin, Yu.V.Gurchin,, A.S.Belov, A.V.Butenko, E.V.Chernykh и др.(всего 29), “First results on the measurements of the proton beam polarization at internal target at Nuclotron”, report on XVII WORKSHOP ON HIGH ENERGY

SPIN PHYSICS DSPIN2017, Dubna, September 15, 2017. [arXiv:1711.02850](https://arxiv.org/abs/1711.02850), 8 november 2017.

- 7) Ya.T.Skhomenko, V.P.Ladygin, A.S.Belov, E.V.Chernykh, D.Enache и др.(всего19), “Measurement of the deuteron beam polarization at internal target at Nuclotron for DSS experiment”, report on XVII WORKSHOP ON HIGH ENERGY SPIN PHYSICS DSPIN2017, Dubna, September 15, 2017. [arXiv:1711.03374](https://arxiv.org/abs/1711.03374), 9 november 2017.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отчёте представлены результаты фундаментальных и прикладных работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2017 год.

В 2017 году на сильноточном линейном ускорителе ИЯИ РАН проведено четыре сеанса, направленных на разработку технологии получения радиоизотопов и наработку радиоизотопов, на исследования, модернизацию и расширение возможностей ускорительного комплекса, а также на выполнение физической программы Института. Общая продолжительность сеансов в 2017 году составила около 1700 часов. Нарботка ускорителя по программе получения радиоизотопов составила свыше 79000 мкА·часов при среднем токе пучка до 130 мкА и энергии 143 МэВ.

На выходе ускорителя создан экспериментальный стенд для исследования воздействия пучков протонов на узлы радиоэлектронной аппаратуры

Успешная работа в 2017 году стала возможной благодаря постоянно проводимым работам по техническому обслуживанию и модернизации ускорителя и экспериментального комплекса, включая практически все их системы.

В процессе сооружения, запуска, эксплуатации и модернизации ускорителя был достигнут уникальный уровень понимания процессов в ускорителе и накоплен огромный опыт решения практических задач. Это обеспечило международное признание авторитета сотрудников Института и широкое применение их разработок не только в ИЯИ РАН, но и в ведущих ядерно-физических ускорительных научных центрах России и всего мира. В 2017 году проводились совместные работы, а также работы по договорам со следующими организациями: ОИЯИ, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», ФГУП НПП ТОРИЙ, ЦЕРН, DESY (Германия), GSI (Германия), FRIB (Мичиганский университет, США), ESS (Швеция), FTSC (Англия).

Полученные результаты находятся на уровне лучших мировых или превышают их и представляют собой существенное продвижение в фундаментальных и прикладных исследованиях.