

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИЯИ РАН)

УДК 539.1, 539.12, 539.123

Рег. № АААА-А16-116022510114-8

Рег. №

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИЯИ РАН,
чл.-корр. РАН

_____ Л.В. Кравчук

«31» января 2019 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ
АААА-А16-116022510114-8
ФИЗИКА И ТЕХНИКА УСКОРИТЕЛЕЙ; ФИЗИКА ПУЧКОВ
ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
(промежуточный за 2018 год)

Руководитель НИР,
Заместитель директора ИЯИ РАН,
д.ф.-м.н.

_____ А.В. Фещенко
«31» января 2019 г.

Москва 2019 г.

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель НИР, заместитель
директора ИЯИ РАН, д.ф-м.н. _____ 31.01.2019 А.В. Фещенко
подпись, дата (все разделы)

Исполнитель, заместитель
директора ИЯИ РАН, д.ф-м.н. _____ 31.01.2019 А.В. Фещенко
подпись, дата (все разделы)

Реферат

Отчёт содержит: 18 с., 6 рис.

Ключевые слова: СИЛЬНОТОЧНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ, ИСТОЧНИКИ ЧАСТИЦ, ИНЖЕКТОР ПРОТОНОВ, АВТОМАТИЗАЦИЯ УСКОРИТЕЛЯ, ДИАГНОСТИКА ПУЧКОВ, КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ ПУЧКОВ, ВЧ ПИТАНИЕ

Задача «Сильноточный линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН. Обеспечение работы. Обеспечение работы ускорителя в круглосуточных сеансах. Текущий ремонт оборудования ускорителя. Модернизация оборудования ускорителя. Развитие методов настройки ускорителя. Повышение параметров ускорителя. Расширение возможностей ускорителя. Участие в работах по физике ускорителей в российских и зарубежных лабораториях».

Линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН относится к классу сильноточных линейных ускорителей на средние энергии и совместно с экспериментальным комплексом 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 2018 года проведено 132 сеанса, общей продолжительностью около 48100 часов, в том числе 4 сеанса продолжительностью свыше 1016 часов в 2018 году, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. В 2018 году в результате проведенного комплекса работ по модернизации и совершенствованию систем ускорителя энергия была увеличена до 267 МэВ. Обеспечена работа ускорителя на комплекс по наработке радиоизотопов, установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПП, а также на разработанный и созданный экспериментальный стенд для исследования воздействия ускоренного пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры. Работы проводились с энергиями от 49 МэВ до 267 МэВ при интенсивности пучка от единичных импульсов с числом частиц 10^7 в импульсе на экспериментальный стенд до десятков микроампер среднего тока на установки РАДЭКС и ИН-06. Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и модернизации оборудования ускорителя и каналов экспериментального комплекса.

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

Список исполнителей	2
Реферат	3
Введение	6
1 Основные результаты	7
1.1 Обеспечение работы ускорителя	7
1.2 Увеличение энергии до 267 МэВ	9
1.3 Модернизация оборудования и систем ускорителя	10
Заключение	16
Список публикаций	17

Введение

Линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН относится к классу высокоточных линейных ускорителей на средние энергии и совместно с экспериментальным комплексом 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 2018 года проведено 132 сеанса, общей продолжительностью около 48100 часов, в том числе 4 сеанса продолжительностью свыше 1016 часов в 2018 году, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. В 2018 году в результате проведенного комплекса работ по модернизации и совершенствованию систем ускорителя энергия была увеличена до 267 МэВ. Обеспечена работа ускорителя на комплекс по наработке радиоизотопов, установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПТ, а также на разработанный и созданный экспериментальный стенд для исследования воздействия ускоренного пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры. Работы проводились с энергиями от 49 МэВ до 267 МэВ при интенсивности пучка от единичных импульсов с числом частиц 10^7 в импульсе на экспериментальный стенд до десятков микроампер среднего тока на установки РАДЭКС и ИН-06. Обеспечение работы ускорителя стало возможным благодаря постоянно проводимому техническому обслуживанию и модернизации оборудования ускорителя и каналов экспериментального комплекса.

Необходимость постоянного совершенствования 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 2018 году проводились работы по модернизации большинства систем ускорителя, среди которых следует отметить систему ВЧ питания начальной части, инжекторы, ускоряющую систему основной части, большинство систем экспериментального комплекса, систему контроля и управления.

В 2018 году получено в Роспотребнадзоре санитарно-эпидемиологического заключения на линейный ускоритель - осуществление деятельности в области использования источников ионизирующего излучения (генерирующие, закрытые).

1 Основные результаты

1.1 Обеспечение работы ускорителя

Со времени начала регулярной работы ускорителя на физические и прикладные задачи в 1993 году и по декабрь 2018 года проведено 132 сеанса, общей продолжительностью около 48100 часов, в том числе 4 сеанса продолжительностью свыше 1016 часов в 2018 году, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. В 2018 году в результате проведенного комплекса работ по модернизации и совершенствованию систем ускорителя энергия была увеличена до 267 МэВ. Обеспечена работа ускорителя на комплекс по наработке радиоизотопов, установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПТ, а также на разработанный и созданный экспериментальный стенд для исследования воздействия ускоренного пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры.

Работы проводились с энергиями от 49 МэВ до 267 МэВ при интенсивности пучка от единичных импульсов с числом частиц 10^7 в импульсе на экспериментальный стенд до десятков микроампер среднего тока на установки РАДЭКС и ИН-06. Длительность импульса регулировалась в зависимости от задачи в диапазоне от $0,3 \div 180$ мкс. Частота повторения импульсов – от единичных до 50 Гц.

В 2018 году в Роспотребнадзоре получено санитарно-эпидемиологического заключения на линейный ускоритель - осуществление деятельности в области использования источников ионизирующего излучения (генерирующие, закрытые).

Недостаточность финансирования не позволяет в полном объеме проводить профилактические ремонты оборудования и инженерных коммуникаций, что приводит к авариям и срыву сеансов работы ускорителя. Так авария на магистральном трубопроводе технической воды диаметром 700 мм привела к остановке первого сеанса в феврале 2018 года. После временного ремонта, выполненного в условиях дефицита времени и средств в феврале-марте, был проведен полноценный сеанс в марте-апреле. Однако в апреле авария на трубопроводе произошла вновь и была устранена лишь к сентябрю. В процессе устранения аварии была выполнена замена более сотни метров труб диаметром 700 мм уложенных в земле на глубине 6 метров. Отсутствие технической воды для охлаждения ускорителя не позволяет проводить не только сеансы работы ускорителя, но и многие другие профилактические и наладочные работы на оборудовании.

После ликвидации аварии до конца года были успешно проведены два сеанса в ноябре и декабре, что позволило программу года выполнить в целом успешно. В качестве

демонстрации на рисунках 1÷3 приведена информация о пучке при работе на три экспериментальные установки.

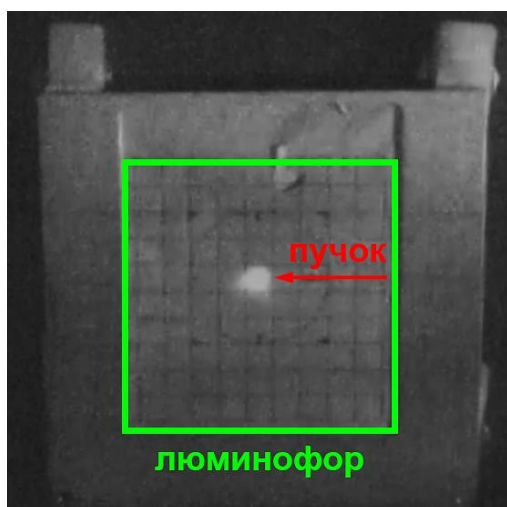


Рисунок 1 - Пучок протонов с энергией 209 МэВ на люминесцентном экране (1 клетка = 10 мм) на входе в графитовый коллиматор (Ø 10 мм) на входе в облучательный зал комплекса протонной терапии.

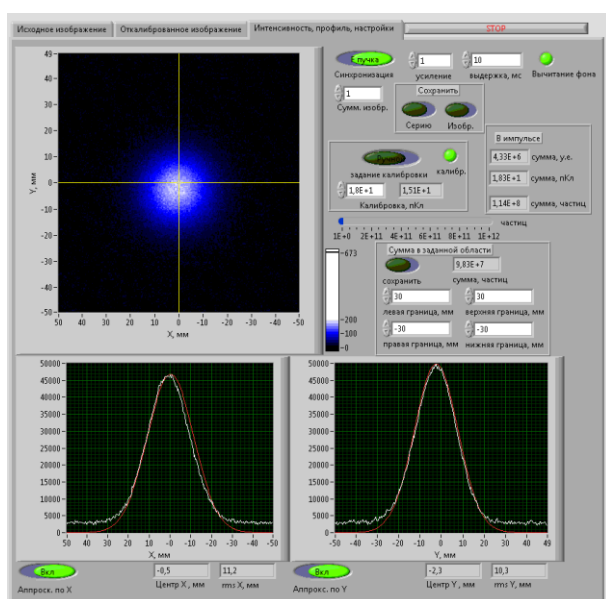


Рисунок 2 - Пучок протонов с энергией 92 МэВ и интенсивностью 10^8 частиц в импульсе на экспериментальном стенде для исследования воздействия пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры. Изображение на люминесцентном экране и результаты обработки изображения

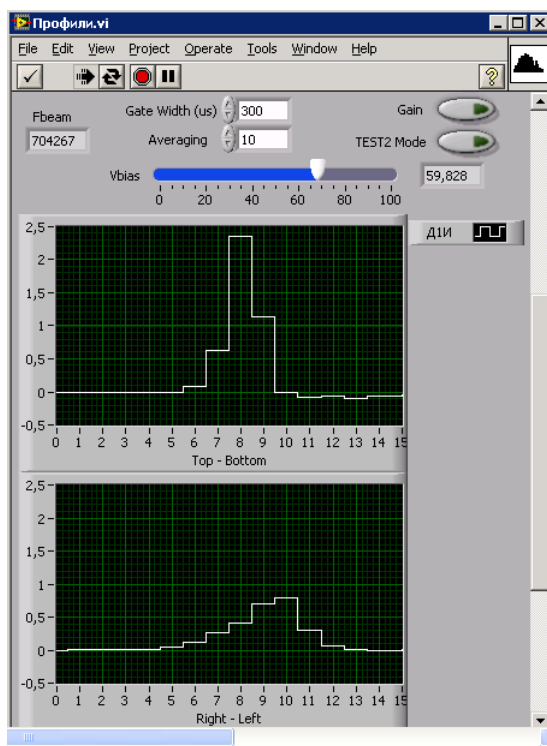


Рисунок 3 - Поперечные профили пучка протонов с энергией 267 МэВ на входе в нейтронный источник ИН-06.

1.2 Увеличение энергии до 267 МэВ.

Согласно плану в 2018 году предполагалось увеличение рабочей энергии до 247 МэВ. Однако план был перевыполнен, и в декабрьском сеансе энергия была увеличена до 267 МэВ. Для этого был выполнен целый комплекс подготовительных работ, среди которых основными являются модернизация, ревизия и наладка оборудования системы трех каналов усиления системы ВЧ питания основной части ускорителя, ревизия, тренировка, подготовка трех ускоряющих резонаторов с шайбами и диафрагмами, доработка системы питания электромагнитных элементов вплоть до экспериментальных установок, доработка системы контроля и методик настройки с пучком.

В качестве демонстрации на рис. 1 приведены результаты настройки одного из трех резонаторов с пучком – реализации времяпролетной дельта-Т процедуры. Следует обратить внимание на отклонение энергии менее 5 кэВ, что подтверждает высокое качество настройки не только настраиваемого резонатора, но и всех предыдущих.

Работы с энергией 267 МэВ велись на установки ИН-06 и РАДЭКС.

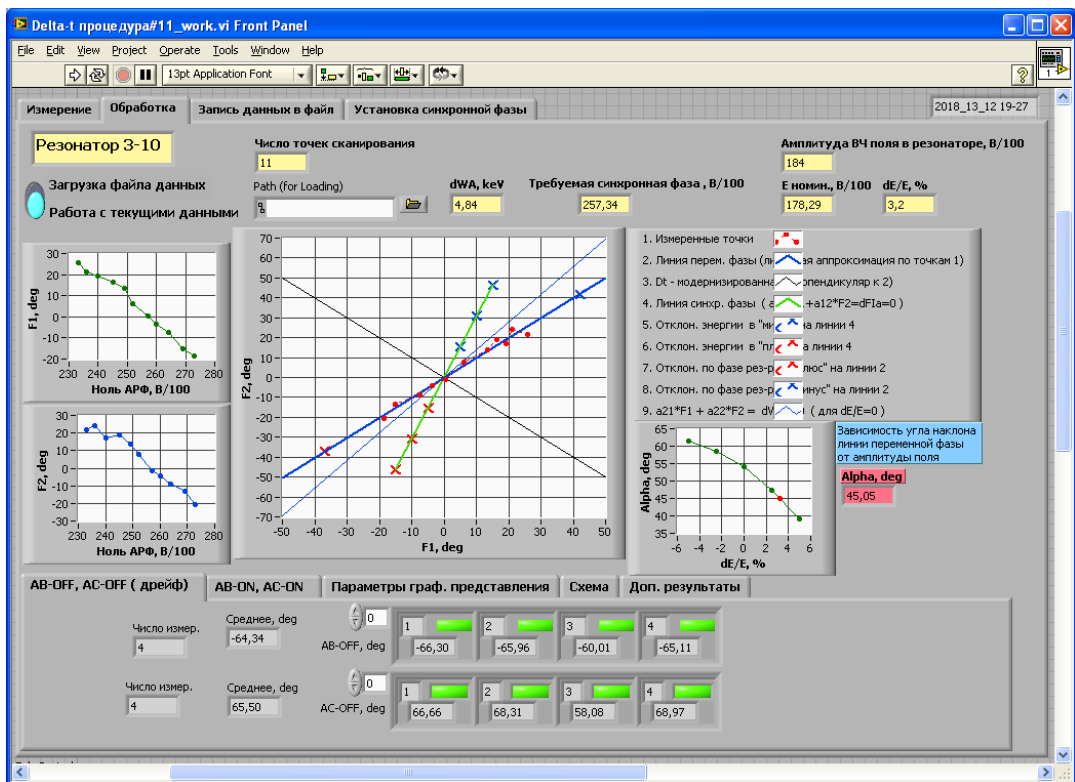


Рисунок 4 - Экспериментальные результаты установки амплитуды и фазы ускоряющего поля в ускоряющем резонаторе с выходной энергией 228 МэВ.

1.3 Модернизация оборудования и систем ускорителя.

В течение 2018 года проводилась модернизация основных систем ускорителя.

Так на инжекторном комплексе завершен переход на тиристорные ключи вместо тиратронов в генераторе высоковольтных импульсов и достигнута его надежная работа. Продолжены исследования компенсации пространственного заряда пучка протонов на выходе инжектора. Разработан усовершенствованный вариант спектрометра энергии вторичных ионов. Продолжены исследования источника отрицательных ионов водорода новой конструкции с осесимметричной геометрией газоразрядной камеры, эмиссионного отверстия и вытягивающего электрода без подачи цезия в разрядную камеру источника ионов. Для оценки характеристик пучка ионов H-минус разработано и испытано устройство для регистрации поперечного эмиттанса пучка непосредственно на выходе из источника. Устройство позволяет регистрировать эмиттанс пучка с энергией, начиная от 7 кэВ. Паразитная засветка от плазмы газового разряда вычитается геометрическим и цифровым способами.

По системе диагностики модернизирована система ввода-вывода профилометров и система сбора и обработки данных. Начаты работы по модернизации системы фазометрии на

3-м и 4-м секторах ускорителя для проведения времяпролетных процедур измерения энергии пучка и настройки фазы поля в резонаторах.

По системе питания электромагнитного оборудования начата модернизация системы питания соленоидов инжекционного тракта протонов, продолжена модернизация системы питания электромагнитного оборудования каналов транспортировки экспериментального комплекса. Разработана и введена в действие система косвенного контроля температуры обмоток трубок дрейфа по их сопротивлению. Продолжены работы по созданию трубки дрейфа с фокусирующей линзой на постоянных магнитах.

По вакуумной системе разработаны, установлены и введены в строй новые посты высоковакуумной откачки, включая их системы питания и управления на втором секторе ускорителя. Установлены новые вакуумные затворы на каналах экспериментального комплекса. Обеспечена передача информации о токах магниторазрядных насосов в систему контроля ускорителя.

В рамках задачи увеличения энергии проводилась модернизация оборудования на каналах усиления четвертого сектора в объеме, который был ранее реализован на каналах 3-его сектора.

По ускоряющей системе продолжены работы по разработке ускоряющего резонатора на основе структуры CDS для замены первого ускоряющего резонатора с шайбами и диафрагмами основной части ускорителя. Проводились разработка, исследование и оптимизация узла сопряжения секций структуры CDS и мостовых устройств на основе прямоугольного волновода с целью оптимизации характеристик резонатора в целом.

Однако, основные проблемы по модернизации оборудования ускорителя относятся к системе ВЧ питания начальной части.

Для системы ВЧ питания резонаторов начальной части ускорителя ИЯИ РАН в свое время была разработана лампа ГМИ-44А с магнитной ловушкой, которая выполняла три функции:

- импульсное анодное питание выходных ВЧ каскадов, обеспечивающих требуемый уровень ускоряющих ВЧ полей в резонаторах ускорителя;
- стабилизацию ускоряющих полей;
- защиту ламп выходных ВЧ каскадов при пробоях в колебательной системе или фидере возбуждения резонатора.

Последняя функция стала возможной, поскольку для модуляторной лампы с магнитной ловушкой характерна низкая величина сеточного тока (1-2А). Характерная осциллограмма при работе системы защиты приведена на рис.5

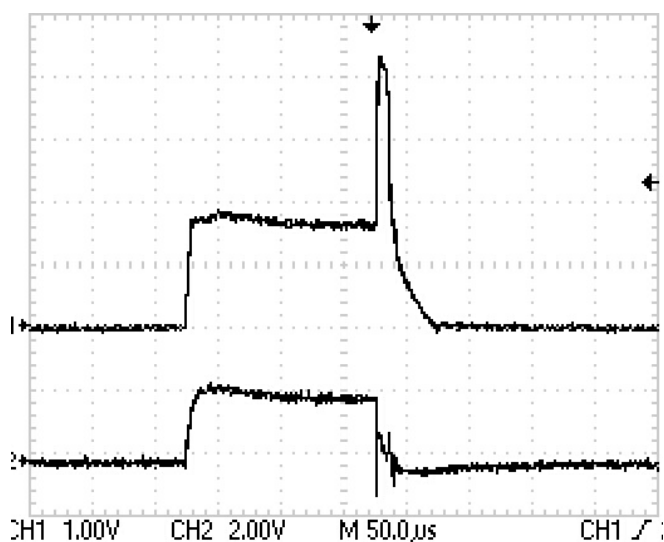


Рисунок 5 - Осциллограммы, характерные для работы последовательной системы защиты с лампой ГМИ-44А (верхний луч - постоянная составляющая анодного тока выходного ВЧ каскада, нижний - импульсное анодное напряжение)

К сожалению, выпуск ламп ГМИ-44А прекращён 20 лет назад, запасы ламп, созданные в 80-е годы прошлого столетия, закончились и в последние четыре года в качестве модулирующей лампы используется генераторный триод ГИ-71А, вот уже 10 лет работающий в выходных ВЧ каскадах после прекращения выпуска более мощных генераторных триодов ГИ-54А.

Несколько лет назад были начаты работы по переходу вместо модуляторных ламп ГМИ-44А на лампы ГИ-71А. Предварительные испытания показали, что последовательная система защиты с лампой ГИ-71А не работает так, как это имеет место с лампой ГМИ-44А (см. рис.5) и, к сожалению, за прошедшие два года ситуация не изменилась. Тем не менее, механизм процессов, приводящий к отключению канала усиления стал более понятен. Всё начинается с пробоя в выходном ВЧ каскаде, источником которого могут три события:

- внутриламповые искрения;
- пробой в анодно-сеточном контуре;
- прерывание ВЧ возбуждения лампы ГИ-71А в выходном ВЧ каскаде.

Последнее связано с тем, что в каждом канале усиления ВЧ возбуждение от мощного задающего устройства (МЗУ) проходит через транзисторный ВЧ усилитель, механические фазовращатели и два ламповых ВЧ каскада с автономным модулятором. Сбой запуска автономного модулятора или искрения в контактной системе механического фазовращателя или в ламповых ВЧ каскадах могут привести к кратковременному пропаданию импульса возбуждения выходных ВЧ каскадов (выходной и предвыходной ВЧ каскады подключены к одному модулятору). При этом лампа ГИ-71А выходного ВЧ каскада оказывается под

высоким напряжением, накалом и без смещения, что неизбежно приведёт или к внутри ламповому возбуждению или к пробую.

На рис.6 приведена упрощённая схема сеточной цепи модуляторной лампы с паразитными ёмкостями импульсного трансформатора ИТ (С1 и С2), заряженных до выходного импульсного напряжения U_{m1} (25-30 кВ), конденсатором отрицательного смещения С3 (-1-1,5 кВ) и ёмкостью С4 длинного ВВ кабеля между искусственной формирующей линией и анодом модуляторной лампы, заряженной до величины постоянного анодного напряжения (35-40 кВ).

Сопротивление R4 представляет эквивалентное сопротивление лампы ГИ-71А выходного ВЧ каскада по постоянной составляющей анодного тока, сопротивление R3 – волновое сопротивление искусственной формирующей линии (ИФЛ) – накопителя в анодной цепи модуляторной лампы.

В первые несколько микросекунд после пробоя (замыкания переключателя S1) в первую очередь разряжается ёмкость С2, в то время как разряд ёмкости С1 происходит через резисторы R1 и R2. В результате на сетке лампы относительно катода кратковременно возникает напряжение, существенно превышающее допустимое (1-2 кВ), промежуток сетка-катод пробивается, и ёмкость С3 начинает разряжаться через вторичную обмотку ИТ, поддерживая модуляторную лампу в открытом состоянии.

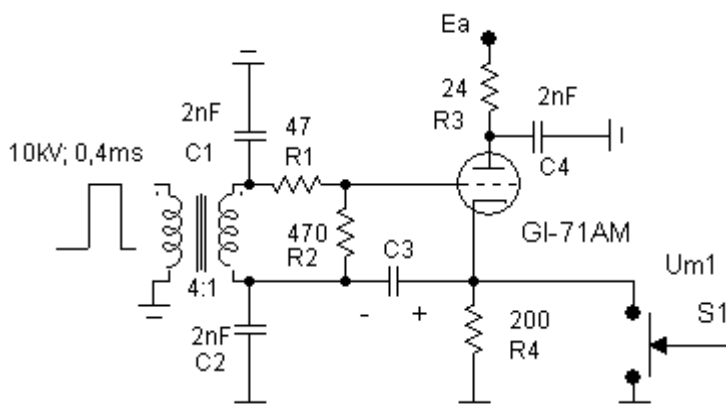


Рисунок 6 – Упрощенная схема сеточной цепи модуляторной лампы в момент пробоя нагрузки – выходного ВЧ каскада.

Представленная схема качественно объясняет процессы, предшествующие пробую промежутка сетка – катод лампы ГИ-71АМ и последующему переходу лампы в открытое состояние вплоть до полного разряда ИФЛ.

Следует отметить, что, как следует из рис.5, последовательная система защиты прерывает запуск модулятора с запаздыванием на несколько мкс, связанным в основном с задержкой прохождения сигнала через измерительный элемент - трансформатор тока, и ВВ импульсный трансформатор. Поэтому в момент пробоя в выходном ВЧ каскаде модуляторная лампа находится в открытом состоянии. При этом ёмкость С4 поддерживает ВН на аноде лампы, что приводит к перераспределению анодного и сеточного токов: анодный ток возрастает, а сеточный снижается. Это, в свою очередь, из-за наличия индуктивности вторичной обмотки ИТ, приводит к скачку напряжения на сетке, превышающего допустимый уровень.

Таким образом, энергия, накопленная в паразитных емкостях С2 и С4, а также в индуктивности ИТ являются источниками перенапряжений и пробоев промежутка сетка-катод модуляторной лампы, причём из-за сеточного тока модуляторной лампы ГИ-71А в 20-30 раз превышающего ток ГМИ-44А, энергия, накопленная в индуктивности вторичной обмотки ИТ, возрастает почти на три порядка.

То, что именно пробой является причиной бесконтрольного увеличения тока через модуляторную лампу вплоть до величины тока эмиссии 1-1,5 кА, подтверждаются следующими процессами и измерениями:

- Разрядом конденсатора отрицательного смещения модуляторной лампы через промежуток сетка-катод и вторичную обмотку ИТ [2], что приводит к срабатыванию защиты в цепи питания выпрямителя смещения. Это подтверждается осциллограммой импульса на первичной обмотке ИТ. Таким образом, конденсатор отрицательного смещения после пробоя в лампе становится источником обратного тока промежутка сетка-катод. Вследствие этого лампа ГИ-71АМ остаётся открытой вплоть до полного разряда ИФЛ, или отключения модулятора по цепям блокировки.

- Установка в цепь разряда конденсатора смещения резистора 1-2 кОм, зашунтированного диодом, обеспечивающим прохождение рабочего сеточного тока, прекращает срабатывание сигнализации и нормализует осциллограмму импульса в первичной обмотке ИТ. Однако, процесс разряда конденсатора после пробоя не изменяется и лампа продолжает оставаться открытой вплоть до полного разряда ИФЛ.

- Регулярным выходом из строя узла высоковольтного соединения ИТ с сеткой лампы, что свидетельствует о недопустимо больших перенапряжениях именно на сетке лампы ГИ-71АМ в момент пробоя в выходном ВЧ каскаде.

Проведенные исследования позволили приблизиться к пониманию происходящих процессов. Предпринимаемые меры показали улучшение работы каналов в ноябрьском

сеансе 2018 г. по сравнению с апрельским сеансом, однако это может быть связано и с результатом длительной тренировки каналов.

Заключение

В отчёте представлены результаты работ, проведённых по государственному заданию в соответствии с планом научных исследований ИЯИ РАН на 2018 год по обеспечению работы, развитию и модернизации сильноточного линейного ускорителя ионов водорода ИЯИ РАН.

План работ на 2018 год выполнен полностью. В 2018 году проведено 4 сеанса продолжительностью свыше 1016 часов, направленных на выполнение государственного задания, программ РАН, планов и научной программы Института, соглашений со сторонними организациями. В 2018 году в результате проведенного комплекса работ по модернизации и совершенствованию систем ускорителя энергия была увеличена с 209 МэВ до 267 МэВ. Обеспечена работа ускорителя на комплекс по наработке радиоизотопов, установки экспериментального комплекса РАДЭКС, ИН-06 и КПТ, а также на разработанный и созданный экспериментальный стенд для исследования воздействия ускоренного пучка на узлы радиоэлектронной аппаратуры. Работы проводились с энергиями от 49 МэВ до 267 МэВ при интенсивности пучка от единичных импульсов с числом частиц 10^7 в импульсе на экспериментальный стенд до десятков микроампер среднего тока на установки РАДЭКС и ИН-06.

Успешная работа в 2018 году стала возможной благодаря постоянно проводимым работам по техническому обслуживанию и модернизации ускорителя и экспериментального комплекса, включая практически все их системы.

Список публикаций

1. И.В. Рыбаков, В.В. Парамонов Сравнение способов подавления мультипакторного разряда в ячейках связи ускоряющей структуры CDS IV Международная конференция <Лазерные и плазменные технологии ЛАПЛАЗ 2018>, <http://conf.laplas/mephi.ru>, стр. 360.
2. А.А. Завадцев, Н.И. Брусова, А.В. Буланов, А.В. Бутенко, М.А. Гусарова, Д.А. Завадцев, Ю.Ж. Калинин, Л.В. Кравчук, В.В. Парамонов, И.В. Рыбаков, Е.А.Савин, Н.П. Собенин, Е.М. Сыресин, Д.В. Чуранов Разработка дебанчера инжекционной части ускорительного комплекса NICA IV Международная конференция «Лазерные и плазменные технологии ЛАПЛАЗ 2018», <http://conf.laplas/mephi.ru>, стр. 367.
3. D. Zavadtsev, D. Churanov, Y. Kalinin, L. Kravchuk, V. Paramonov, A. Zavadtsev, A. Butenko, A. Smirnov, E. Syresin Construction and RF Test of Debuncher for Light Ion Line of Injector System in Ion Collider NICA Proc. RuPAC 2018, TUPCA25, p.197, 2018.
4. I.V. Rybakov, V.V. Paramonov Study of the Non-Uniform Coupled System Model of CDS Section and Waveguide Segment Based on Multimode Approximation Proc. RuPAC 2018, WEPSB10, p.301, 2018.
5. V. Rybakov, V.V. Paramonov Comparison of the techniques for multipactor discharge damping in coupling cells of CDS accelerating structure Ядерная физика и инжиниринг, Physics of Atomic Nuclei, 2018, Vol. 81, No. 11, pp. 1–4.
6. V. V. Paramonov, L. V. Kravchuk, and I. V. Rybakov Input of RF Power into Coupling Element of Accelerating Cavity Письма в ЭЧАЯ, Physics of Particles and Nuclei Letters, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 915–918, 2018.
7. S. Gavrilov, A. Melnikov, A. Titov Beam diagnostics and instrumentation for proton irradiation facility at INR RAS linac Proceedings of International Beam Instrumentation Conference IBIC 18, Shanghai, China, September 9-13, 2018.
8. С. А. Гаврилов, Л. Н. Латышева, С. Г. Лебедев, Н. М. Соболевский, А. В. Фещенко Стенд для изучения воздействия протонного облучения на микросхемы: оценка потоков частиц, активации и мощности дозы Поверхность, 2018, № 10, с. 102 – 107. http://www.issp.ac.ru/journal/surface/2018/Poverh10_18.pdf.
9. S. Gavrilov et al Proton irradiation facility at INR RAS linac Proceedings of XXVI Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2018, Protvino, Russia, October 1–5, 2018. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2018/index.html>.
10. D. Chermoshentsev, A. Feschenko, S. Gavrilov Influence of mechanical vibrations on the phase resolution of bunch shape monitor Proceedings of XXVI Russian Particle Accelerator

Conference RuPAC-2018, Protvino, Russia, October 1–5, 2018.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2018/index.html>.

11. Melnikov, S. Gavrilov Multinode gas counter for low intensity beam diagnostics at the INR linac Proceedings of XXVI Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2018, Protvino, Russia, October 1–5, 2018.
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2018/index.html>.

12. Titov, S. Gavrilov Luminescent diagnostics for low intensity proton beams at INR RAS linac Proceedings of XXVI Russian Particle Accelerator Conference RuPAC-2018, Protvino, Russia, October 1–5, 2018. <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2018/index.html>.

13. A. Belov, D. Chermoshentsev, S. Gavrilov, O. Frolov, L. Netchaeva, E. Nikulin, V. Zubets High responsivity secondary ion energy analyzer”. 2018_JINST_13_T05001 DOI: 10.1088/1748-0221/13/05/T05001.

14. В.С. Кленов, Б.А. Фролов Численное моделирование ионно-оптических систем вытягивания, ускорения и согласования с радиочастотным квадрупольным ускорителем для пучка отрицательных ионов водорода, ЖТФ, 2018, том 88, вып. 5 стр. 649-654.

15. С.Брагин, О.Володкевич, С.Гаврилов, О.Грехов, Ю.Калинин, Ю.Киселев, В.Серов, А.Фещенко, Л.Латышева, С.Лебедев, Н.Соболевский (ИЯИ РАН), П.Цедрик, О.Подгорная, Д.Арбузников, С.Цибряев, С.Разиньков, Е.Прохоров («РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, Россия) Создание стенда протонного облучения на линейном ускорителе ИЯИ РАН IV Международная конференция «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (ЛаПлаз-2018, Москва, Россия, 30января-1февраля 2018), <http://conf.laplas/mephi.ru>

16. S.E.Bragin, V.S.Klenov, O.M.Volodkevich, V.N.Zubets H-minus Ion Source Emittance Measuring Device The 6th International symposium on Negative Ions, Beams and Sources (NIBS'18), Novosibirsk, Russia, September 3-7, 2018

17. S.E.Bragin, V.S.Klenov, O.M.Volodkevich, V.N.Zubets Low Energy “Pepper-Pot” Emittance Measuring Device Proceedings of XXVI Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC-2018, Protvino, Russia, October 1-5, 2018, pp.456-458.

18. S.Bragin, A.Feschchenko, V.Gaidash, S.Gavrilov, O.Grekhov, Y.Kalinin, Y.Kiselev, V.Serov, O.Volodkevich, S.Lebedev, A.Melnikov, A.Titov, (INR RAS), D.Arbuznikov, O.Podgornaya, E.Prokhorov, S.Razinkov, P.Tsedrik, S.Tsibryaev (RFNC, All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov, Russia) Proton Irradiation Facility at INR RAS Linac. Proceedings of XXVI Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC-2018, Protvino, Russia, October 1-5, 2018, pp.142-144), accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2018/papers/frcamh02.pdf