

О работе ускорителя У-70 и модернизации его систем

А.Г. Афонин, В.П. Воеводин, М.Н. Горохов, А.С. Гуревич, Д.А. Демиховский, А.Д. Ермолаев, В.В. Жаренов, В.А. Зенин, Н.А. Игнашин, А.А. Кардаш, В.В. Комаров, В.В. Лапин, В.Г. Лапыгин, Г.А. Лосев, Ю.В. Миличенко, А.В. Минченко, В.Д. Рудько, И.И. Сулыгин, С.Э. Сытов, В.А. Тепляков, В.И. Терехов, Е.Ф. Троянов, Ю.С. Федотов

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

Введение

В состав ускорительного комплекса в ИФВЭ входят: линейный ускоритель на 30 МэВ, быстроцикличный бустер на энергию 1.5 ГэВ и основной ускоритель – протонный синхротрон на энергию 70 ГэВ. Ускоритель был запущен в 1967 году и проработал уже 33 года. Параметры ускорителя и основные особенности его работы неоднократно докладывались на предыдущих совещаниях. Последнее сообщение о работе ускорителя ИФВЭ было сделано, в частности, на 14-м Совещании по ускорителям в 1994 г. [1]. В настоящем докладе излагаются в основном результаты работы ускорителя за последние годы.

Этот период характеризовался значительными усилиями, направленными на модернизацию систем ускорительного комплекса, параллельно с обеспечением работы ускорителя на физические эксперименты.

Программа работ по реконструкции ускорителя включала в себя следующие основные направления:

1. Создание нового линейного ускорителя.
2. Замена вакуумной камеры У-70.
3. Создание системы перезарядной инжекции.
4. Создание резерва корректирующих обмоток У-70.
5. Модернизация систем радиоэлектроники.
6. Создание новой системы управления.

Помимо этого, возрастающие требования со стороны физиков-экспериментаторов заставляют постоянно улучшать работу систем вывода пучка и находить новые режимы.

1. Статистика работы ускорителя

Распределение суммарного времени работы ускорителя по годам представлено на рис. 1. Отчетливо видно снижение времени работы, начиная с 1991 г. В 1995 г. ускоритель не работал из-за проблем, связанных с электроэнергией. Типичная величина простоев ускорителя из-за отказа систем равна 15%. Простои 1985 г. (30%) естественны – это первый год работы ускорителя с бустером. Повышенные простои последних двух лет связаны в основном с отказами септум-магнитов системы вывода. Величина рабочей интенсивности ускорителя определяется программой проводимых экспериментов и в течение последних 5 лет находится на уровне $2.2 \div 10 \cdot 10^{12}$ прот / цикл.

Ускоритель работает в режиме двух сеансов в год. Длительность каждого сеанса У-70 составляет около двух месяцев, при этом запуск линейного ускорителя, бустера и вакуумной системы У-70 начинается за две недели до начала работы У-70 с пучком. На запуск У-70, наладку и исследование режимов его работы в каждом сеансе отводится 10–12 суток.

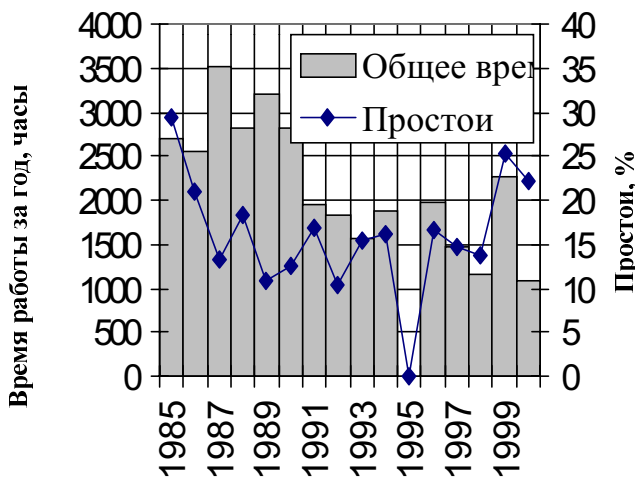


Рис. 1. Время работы ускорителя за год и простои систем. Данные 2000 г. относятся к 1-му сеансу.

и вакуумной системы У-70 начинается за две недели до начала работы У-70 с пучком. На запуск У-70, наладку и исследование режимов его работы в каждом сеансе отводится 10–12 суток.

2. Работа линейного ускорителя

Инжектор бустера – линейный ускоритель на 30 МэВ, вся ускоряющая структура которого основана на принципе высокочастотной квадрупольной фокусировки, – проработал на ускорительный комплекс около 16 лет. Длительная работа ускорителя показала, что структура такого типа надежно работает при рабочих напряженностях полей на поверхности электродов, равных в начальной части 230 кВ/см, а в основной части, где используются электроды типа “рогов”, – 380 кВ/см. При этом суммарный (по всем пяти секциям ускорителя) процент пробоев не превышает 0.1%, а в течение длительных периодов ускоряющие секции работают практически без пробоев.

Подобная работа достигается без применения каких-либо специальных мер и технологий и при достаточно частых напусках атмосферы в объемы резонаторов. Перед работой на комплекс проводится ВЧ-тренировка в течение двух-трех суток при рабочих уровнях ВЧ-полей в резонаторах. В каждом физическом сеансе линейный ускоритель работает непрерывно в течение 60–70 суток. Типичная величина тока на выходе ускорителя составляет 40–60 мА. При использовании средств компенсации подсадов ВЧ-поля ускоренный ток может быть увеличен до 80–90 мА. Все простои и различные поломки в системах связаны в основном со старением отдельных узлов и элементов и с недостатками некоторых технических и конструкторских решений.

Существующий инжектор сооружался как демонстрационная установка, задачей которой было проверить возможность долговременной работы нового типа ускорителя в рабочих условиях. Эта задача выполнена. Нет простоев, которые определялись бы используемым принципом фокусировки и структурой ускоряющего канала. Таким образом, данный тип ускорителя, канал которого состоит лишь из металлических электродов, является наиболее простым и малогабаритным ускорителем ионов в районе энергий порядка нескольких десятков МэВ и может успешно применяться. Однако, поскольку многие системы ускорителя, включая модельный вариант резонатора, устарели, принято решение о сооружении нового ускорителя. Сейчас идет разработка и сооружение нового ускорителя на 30 МэВ, который состоит из 5 секций:

1 секция (НЧУ)	– 1.77 МэВ,
2 секция	– 7.25 МэВ,
3 секция	– 15.1 МэВ,
4 секция	– 23.32 МэВ,
5 секция	– 30.02 МэВ.

К настоящему времени 1-я секция изготовлена, на ней получен ток пучка 120 мА. Вторая секция изготовлена и испытана на малом токе (25 мА), получено 100%-ное прохождение пучка. Заканчивается изготовление 3-й секции и начато изготовление 4-й секции, начато проектирование 5-й секции.

3. Работа бустера

Бустер работает в составе ускорительного комплекса ИФВЭ с 1985 года. Рабочая величина конечной энергии составляет 1.32 ГэВ. Бустер работает в пакетно-импульсном режиме с 32 импульсами в пачке, из которых первые 3 являются тренировочными (для выхода систем на стационарный режим). Применяется многооборотная инжекция. В зависимости от режима работы в бустере за один цикл может быть ускорено от $2 \cdot 10^{11}$ до $9 \cdot 10^{11}$ протонов. Пиковая интенсивность, которая характеризует возможности бустера в настоящее время, составляет $1 \cdot 10^{12}$ прот./цикл. Эмиттанс пучка на входе в бустер составляет 40 п. мм.мрад. При многооборотной инжекции эффективный горизонтальный эмиттанс накопленного пучка возрастает до 400 п. мм. мрад. При токе линейного ускорителя 50 мА эффективность многооборотной инжекции составляет 70%. Такую же величину имеет эффективность квазиadiaбатического захвата в режим ускорения, но при увеличении тока инжекции захват падает из-за роста начального импульсного разброса. Ускоренный пучок имеет эмиттансы $E_x \cdot E_z = 25\pi \cdot 14\pi$ мм. мрад. В вертикальном направлении эмиттанс пучка изменяется с ростом энергии без каких-либо особенностей. В горизонтальном направлении наблюдается снижение динамического акцептанса на 25–30%, что приводит в процессе группировки (к 3-й мс) к потере частиц с большими начальными амплитудами бетатронных колебаний.

При работе на У-70 регулируется как число частиц в сгустке за счет режима инжекции, так и количество переводимых сгустков. Система синхронизации позволяет производить заполнение сепаратрис У-70 в произвольном порядке. При работе У-70 с неполным числом сгустков (режим малой интенсивности) предусмотрена возможность использования оставшихся импульсов пачки либо для работ по исследованиям бустера, либо для прикладных исследований. При этом режимы работы бустера на У-70 и «на себя» полностью независимы (так называемый режим внутриапакетного программирования, предусмотренный в системе

управления). Для проведения прикладных исследований освоен режим вывода в диапазоне энергий 200 МэВ – 1.3 ГэВ.

Основное оборудование бустера обладает хорошей надежностью. Типичный уровень простоев при работе на физические исследования составляет (5 ± 2) %. Наибольший вклад в простои ($1 \div 4$ %) дают системы питания ударных магнитов вывода, работающие при предельных для высоковольтного кабеля нагрузках. В настоящее время изготавливается и будет использоваться в качестве формирующих и передающих линий для ударных магнитов новый кабель с повышенным рабочим напряжением (60 кВ допустимого напряжения вместо 40 кВ). За годы, прошедшие с момента запуска ускорителя, большинство технологических систем было модернизировано. К настоящему времени не видно систематического процесса выхода из строя какого-либо однотипного оборудования. Тем не менее, с целью резервирования ведутся работы по изготовлению уникальных узлов, выход из строя которых может приводить к длительной остановке комплекса.

Для обеспечения необходимого качества инжектируемого пучка и повышения интенсивности пучка бустера ведутся работы по созданию режима перезарядной инжекции. Разработан источник ионов H^+ , изготовлены магниты и узлы вакуумной камеры участка инжекции, разработана технология и изготовлена партия пленочных перезарядных мишеней, ведется изготовление систем питания ионного источника. Часть систем находится в стадии разработки.

4. Работа и развитие ускорителя У-70

Начиная с 1994 года, велись работы по замене вакуумной камеры У-70. Старая (гофрированная) вакуумная камера при работе с высокой интенсивностью приводила к возникновению продольной неустойчивости на частоте 6 ГГц, которая вызывала такой рост продольного эмиттанта, что пучок с интенсивностью выше $2 \cdot 10^{13}$ прот / цикл уже не мог поместиться в апертуру вакуумной камеры.

Другой причиной замены вакуумной камеры была необходимость улучшения вакуума и повышения надежности работы вакуумной системы.

Для изготовления вакуумной камеры в промышленности были заказаны трубы из нержавеющей стали, имеющие эллиптическое сечение с размерами апертуры 200x100 мм для основной части камер и 240x100 мм для расширенных камер участков вывода; толщина стенки 3 мм. Сами камеры также изготавливались в промышленности. Монтаж камер велся по мере поступления их очередной партии и был в основном завершен в 1997 году. Монтажные работы проводились в течение летних остановок ускорителя, в перерывах между сеансами. Поскольку камеры вносят существенные искажения в магнитное поле, обусловленные вихревыми токами, при монтаже очередной партии проводилась локальная коррекция магнитного поля.

На новой вакуумной камере предусмотрено удвоение числа высоковакуумных насосов (сейчас смонтировано 160 насосов). Увеличения количества источников питания не потребовалось, поскольку применено параллельное питание пары насосов от одного источника. Изготовлены и установлены новые посты предварительной откачки на базе турбомолекулярных насосов, которые заменили старые посты с паромасляными насосами. К сожалению, ввод новых постов задержался, в результате камера оказалась загрязненной маслом, и сейчас ведутся работы по ее очистке с помощью аргонной обработки.

Измерения в последних сеансах показали, что с новой камерой вакуум улучшился примерно вдвое. Среднее давление в камере У-70 около $4.3 \cdot 10^{-7}$ Тор, хотя на наиболее нагруженном оборудованием участке вывода оно превышает 10^{-6} Тор.

В состав новой камеры вошли пикап-электроды новой системы измерения орбиты, электронная аппаратура для которой была разработана в сотрудничестве с ЦЕРН и используется с 1996 г.

Одной из важных работ, связанных с обеспечением надежности работы ускорительного комплекса, было изготовление резерва полюсных корректирующих обмоток. Полюсные обмотки блоков, особенно находящихся в районе установки внутренних мишеней и септум-магнитов, подвержены сильному облучению. Кроме того, на проводники обмоток действуют значительные механические нагрузки. Это приводит к разрушению изоляции, выполненной на основе эпоксидного компаунда, и к необходимости замены обмоток. К началу работ по замене вакуумной камеры около 20 обмоток имели повреждения. В ИФВЭ было изготовлено 50 резервных полюсных обмоток для блоков всех типов, и при монтаже вакуумных камер одновременно заменялись все обмотки с дефектами.

Замена вакуумной камеры заметно отразилась на поведении пучка. Пропала микроволновая неустойчивость, и до критической энергии пучок в продольном направлении следует адиабатическому закону (а при малой интенсивности – до конца цикла). Вместе с тем появилась новая особенность – продольные квадрупольные колебания, которые возбуждаются при подходе к критической энергии и продолжаются до конца цикла. На возникновение этих колебаний сильно влияет способ заполнения периметра ускорителя пучком: они минимальны при равномерном заполнении и максимальны при заполнении половины азимута. Сейчас

для подавления этого эффекта используется принудительное увеличение длины сгустка перед критической энергией с помощью резонатора, возбуждаемого на частоте 200 МГц. На рис. 2 показаны кривые интенсивности, сигнала пикового детектора (который пропорционален пиковой продольной плотности пучка) и сигнал огибающей напряжения ВЧ-резонатора. Видно заметное уменьшение продольной плотности и уменьшение амплитуды квадратурных колебаний при включении ВЧ.

Другой эффект, связанный с заменой вакуумной камеры, – это увеличение потерь пучка при накоплении на плато инжекции. Потери увеличиваются при росте интенсивности от 15% при ускорении $9 \cdot 10^{12}$ прот/цикл до 28% при ускорении $1.45 \cdot 10^{13}$. Эффект связан с уменьшенной вертикальной апертурой у новой камеры (100 мм у новой камеры и 115 мм – у старой) и значительными искажениями орбиты по вертикали (± 10 мм), для устранения которых необходима юстировка положения блоков электромагнита. В этих условиях пучок заполняет весь имеющийся вертикальный акцептанс (40 л.мм.мрад), и потери неизбежны.

Практически каждый сеанс при запуске ускорителя проверяется возможность получения интенсивности ускоренного пучка на уровне $1.3 - 1.4 \cdot 10^{13}$ прот/цикл, с запасом достаточной для выполнения физической программы.

5. Работа систем вывода

Для обеспечения программы физических исследований и собственных исследований ускорителя используются следующие режимы систем вывода пучков:

- Однооборотный быстрый вывод произвольного числа банчей (от 1 до 29) во всем диапазоне ускоряемой интенсивности.
- Резонансный медленный вывод протонов в диапазоне интенсивности $5 \cdot 10^{11} - 1 \cdot 10^{13}$ с длительностью до 1.7 сек.
- Медленный вывод протонов с помощью изогнутых монокристаллов в диапазоне интенсивности $1 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^{11}$ с длительностью до 1.7 сек.
- Нерезонансный медленный вывод протонов, упруго рассеянных на внутренних мишенях.
- Вывод вторичных частиц с внутренних мишеней.

В последнее время все исследования проводятся на плато магнитного поля 12 кГс при энергии 70 ГэВ. Комплекс систем вывода может обеспечивать несколько комбинаций работы, включающих в себя все режимы. Общее количество экспериментов, проводимых одновременно в цикле, достигает семи. Быстрый вывод при работе на физический эксперимент потребляет до $1.3 \cdot 10^{13}$ протонов/цикл. Однако, в связи с сокращением числа экспериментов, использующих такой режим вывода, он обеспечивает, как правило, собственные нужды ускорителя, вывода пучков в зону поглощения. Схема быстрого вывода и его технические характеристики за последние годы не претерпели изменений. Что касается медленного вывода, то с 1996 года введена новая схема вывода [2].

Используемые трассы показаны на рис. 3. Переход к новой схеме стал возможен после замены импульсного септум-магнита системы быстрого вывода в прямолинейном промежутке 24 на новый магнит, характеристики которого позволяют работать с длительностью тока до 1.7 сек. Однако реальная длительность при работе в сеансах не превышает 0.75 сек, так как обычно плато магнитного поля делится на две части: одна используется для медленного вывода, другая – для работы внутренних мишеней. Эффективность медленного вывода определяется в основном потерями на первых элементах системы: на электростатическом дефлекторе ЭСД106 и на септум-магните ОМ-24. При толщине токовой перегородки ОМ-24, равной 2.4 мм, с этим магнитом была достигнута эффективность до 90%.

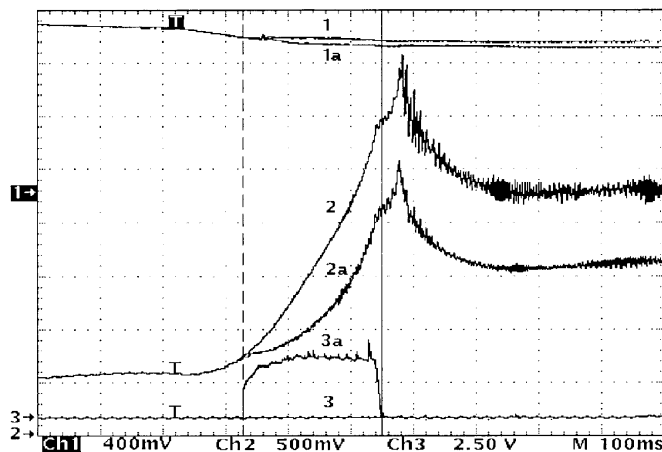


Рис. 2. Сигнал интенсивности (1), пикового детектора (2) и огибающей ВЧ-напряжения 200 МГц (3); а – ВЧ включено.

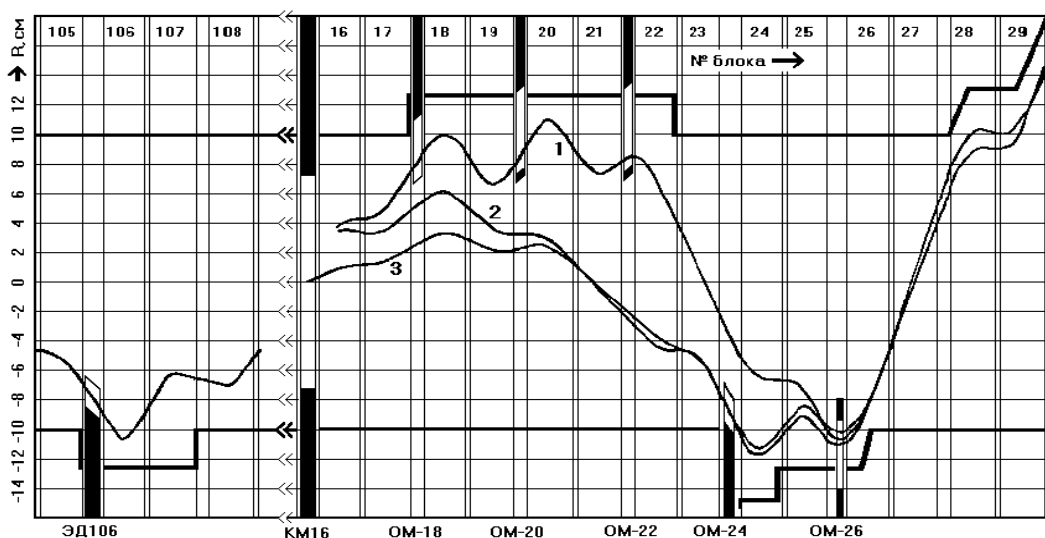
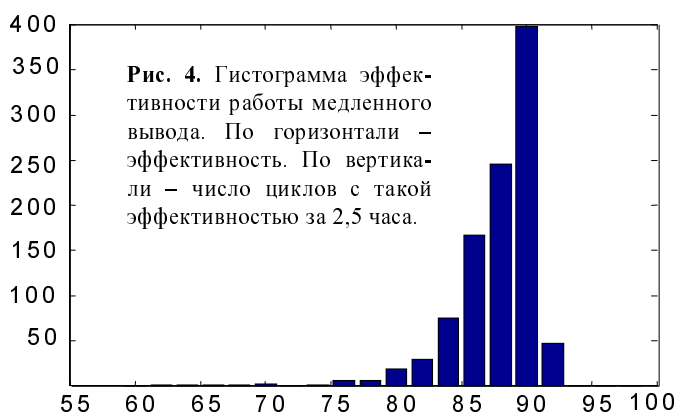


Рис. 3. Трассы медленного и быстрого вывода пучка. ЭД – электростатический дефлектор; КМ – кикер-магнит системы быстрого вывода; ОМ – септум-магниты. 1 – «старая» трасса медленного вывода через септум-магниты ОМ18, ОМ20, ОМ22, ОМ26. 2 – новая трасса медленного вывода через септум-магниты ОМ24, ОМ26. 3 – трасса быстрого вывода.



На рис. 4 представлена гистограмма эффективности медленного вывода в одном из сеансов работы ускорителя. Новая схема вывода позволила сократить число септум-магнитов с 5 до 3, что сократило число "горячих" мест на ускорителе и позволило упростить процедуру настройки и поддержания рабочих режимов.

Для повышения эффективности медленного вывода рассматривается возможность модернизации системы путем включения в структуру У-70 в районе первого выводного элемента ЭД106 двух дополнительных квадрупольных линз [3]. Что касается качества временной структуры медленного вывода рассматривается возможность модернизации системы путем включения в структуру У-70 в районе первого выводного элемента ЭД106 двух дополнительных квадрупольных линз [3].

но выводимого пучка, то в последние годы на ускорителе ИФВЭ продолжались работы по снижению пульсаций токов в системах ускорителя. Однако практика работы медленного вывода показала, что это не привело к существенному снижению пульсаций в выводимом пучке.

Принципиальным методом, который используется для уменьшения пульсаций, является метод фазового смещения. Физическая основа этого метода заключается в существенном увеличении локальной скорости наведения пучка на резонанс путем проталкивания пучка через щели между пустыми ВЧ-сепаратрисами, создаваемыми специальной ВЧ-станцией, работающей на частоте 200 МГц [4]. Первые результаты по использованию этого метода и анализ этих результатов можно найти в [5, 6]. Коэффициент подавления пульсаций составил 3.4. Это увеличило среднее эффективное время вывода с 0.75 при обычном режиме наведения до 0.97 при использовании станции 200 МГц и наведении пучка на резонанс наклоном основного магнитного поля.

На рис. 5 представлены осциллограммы сбросов для режимов наведения квадрупольной линзой и методом фазового смещения. Следует заметить, что эффективность подавления пульсаций сильно зависит от величины выводимой интенсивности. Экспериментально определенный порог, при котором в нашем случае этот метод перестает быть эффективным, равен $7 \cdot 10^{12}$. При большей интенсивности при выключении ВЧ-ускоряющего поля на плато магнитного поля за счет взаимодействия высокоинтенсивного пучка с резонансными элементами ускорителя возникают сильные неустойчивости (эффект самогруппировки пучка), и при этом снижается эффективность вывода и ухудшается временная структура выводимого пучка. Исследуются различные методы борьбы с этим эффектом.

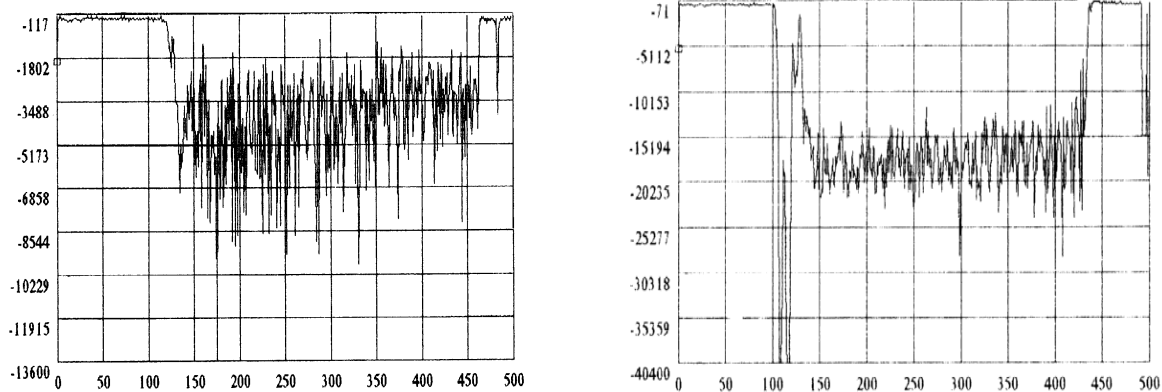
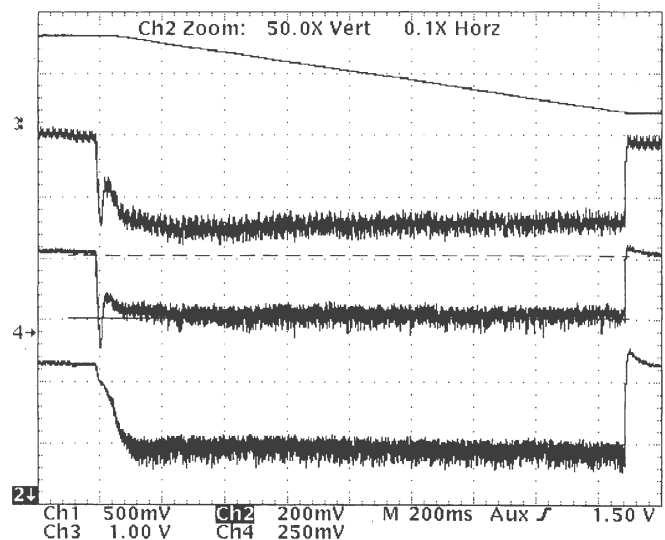


Рис. 5. Структура пучка при медленном выводе. Слева – при наведении на резонанс с помощью квадрупольной линзы. Справа – при использовании фазового смещения. Развертка – в мс.

Рис. 6. Структура пучка при одновременном выводе с помощью внутренних мишеней и кристалла. Сверху вниз – сигнал интенсивности ускорителя; сигнал монитора кристалла 19; сигнал монитора мишени 24; сигнал монитора мишени 27.



На ускорителе ИФВЭ ведутся активные исследования по использованию изогнутых монокристаллов для вывода протонов для физического эксперимента. Так, в последнее время [7, 8, 9] была получена эффективность вывода около 65% при выводе интенсивности до $6 \cdot 10^{11}$ (кратковременно – до $1 \cdot 10^{12}$ прот/цикл). На основе полученных результатов создан режим одновременного в цикле вывода протонов с помощью изогнутого монокристалла, размещенного в прямолинейном промежутке №19, а также с двух внутренних мишеней, работающих в режиме наведения, и одной мишени, работающей в "тени". Проведено два длительных сеанса работы в таком режиме. Средняя эффективность вывода протонов кристаллом составила 45%, интенсивность – до $6 \cdot 10^{11}$, длительность растяжки – 1.7 сек. Режим обеспечивал высокое качество пучка всем потребителям (рис. 6). Кроме этого, исходя из требований физического эксперимента, такой режим позволял оперативно менять интенсивность вывода от $1 \cdot 10^{10}$ до $6 \cdot 10^{11}$ протонов/цикл. Кратковременно (в течение 12 часов) осуществлялся вывод пучка с интенсивностью $\sim 10^{12}$ протонов/цикл. Возможность длительной работы с такой или большей интенсивностью требует дополнительных исследований.

На ускорителе У-70 продолжались работы по расширению диапазона интенсивности вывода протонов дифракционным методом. Используя в качестве первого выводного элемента ЭД106, удалось поднять интенсивность до $5 \cdot 10^{10}$ [10]. Применение кристаллов для вывода пучка низкой и промежуточной интенсивности представляется, однако, более перспективным направлением.

В настоящее время основными задачами по проблемам вывода являются повышение интенсивности медленного вывода до уровня $1.3 \cdot 10^{13}$ при эффективности вывода не ниже 95% и высоком качестве пучка и развитие режимов вывода с помощью изогнутых кристаллов.

6. Система управления

В последние годы ведутся интенсивные работы по замене старых средств управления, которые создавались на протяжении длительного времени отдельно для каждой установки. Им на смену приходит единая СУ, строящаяся на современных вычислительных, коммуникационных и информационных средствах и технологиях и которая охватывает линейный ускоритель ЛУ-30, бустер, системы основного ускорителя У-70 и системы вывода пучка. Работы выполняются в сотрудничестве с ЦЕРН.

Структура СУ У-70 спроектирована в виде распределенной иерархической вычислительной системы, состоящей из *трех уровней*:

- Верхний уровень включает в себя мощные компьютеры (различного рода серверы) и средства общения операторов с системой управления (Х-терминалы и персональные ЭВМ), взаимодействующие между собой и со средним уровнем через локальную сеть Ethernet. Компьютеры верхнего уровня образуют информационный центр СУ У-70 и выполняют сложные задачи обработки массивов данных.
- Средний уровень состоит из шести компьютеров переднего края (КПК), каждый из которых представляет собой микроЭВМ и один-два контроллера многоотводной магистрали MIL1553, собранные в крейте стандарта VME. КПК обеспечивают обмен данными между верхним и нижним уровнями СУ У-70, сопрягая информационные потоки между разнотипными коммуникационными средами (Ethernet и MIL1553).
- Нижний уровень образуют многочисленные контроллеры оборудования (КО), подключенные к многоотводной магистрали MIL1553 (до 30 КО на одну магистраль), которые выполняют задачи управления в реальном масштабе времени.

К настоящему времени завершен монтаж, наладка и ввод в эксплуатацию вычислительной техники и сетевого оборудования верхнего уровня. На среднем уровне задействованы четыре из шести КПК, проложены по проектным трассам и налажены семь из девяти магистралей MIL1553 с ответвителями для подключения КО. На нижнем уровне создана общая таймерная система, синхронизирующая работу КО с циклом ускорителя. Введены в действие КО, к которым подключены 30 крейтов СУММА, обслуживающих оборудование бустера. Переведена на работу от новой СУ система коррекции У-70, создана система обмена аналоговой информацией между удаленными точками комплекса.

В начинающемся сеансе новыми средствами управления будут охвачены 30 источников питания магнитной оптики, профилометры и мониторы потерь систем вывода. Дальнейшее развитие системы управления У-70 пойдет по двум направлениям: наращивание нижнего уровня (ввод в эксплуатацию новых КО) и расширение возможностей интерфейса с оператором.

Заключение

Ускорительный комплекс У-70 обеспечивает выполнение программы физических исследований на установках ИФВЭ. Выполнен значительный объем работ по модернизации оборудования ускорителя и реализации новых режимов. Имеется много незавершенных работ, выполнение которых необходимо как для обеспечения долговременной работы ускорителя, так и для расширения его возможностей.

К числу этих работ в первую очередь следует отнести:

- создание нового инжектора;
- реализация перезарядной инъекции;
- модернизация систем радиоэлектроники для работы с большой интенсивностью;
- снижение потерь частиц при ускорении в У-70;
- реализация схемы высокоэффективного медленного вывода, улучшение структуры пучка;
- создание системы управления;
- систематическая модернизация всех систем ускорительного комплекса.

Эти задачи составляют основу программы нашей работы на ближайшее время.

Следует выразить искреннюю благодарность всем сотрудникам отделения ускорителя, которые в сегодняшних непростых условиях обеспечивают работоспособность и развитие У-70.

Литература

1. А.А. Асеев, А.Г. Афонин, Д.А. Демиховский и др. Состояние и развитие ускорительного комплекса ИФВЭ. - Труды XIV совещания по ускорителям. Протвино, 1994, т.4, с. 151.
2. А.Г.Афонин, В.И.Дианов, А.В.Максимов. Оптимизация схемы вывода протонного пучка из У-70. Труды XIII совещания по ускорителям. Дубна, 1992, т.2, с. 275.

3. Ю.Г. Каршев, А.В. Максимов, Е.Ф. Троянов, Ю.С. Федотов. Модернизация системы медленного вывода из У-70. Настоящее совещание.
4. А.Г. Афонин, А.В. Максимов, И.И. Сулыгин, Е.Ф. Троянов. Эксперименты по улучшению временной структуры пучка при медленном выводе. – Труды XIV совещания по ускорителям. Протвино, 1994, т. 4, с. 159.
5. А.В.Максимов. Анализ экспериментальных результатов по улучшению низкочастотной временной структуры пучка медленного вывода на ускорителе ИФВЭ. Препринт ИФВЭ 95-99. Протвино, 1995.
6. А.В. Максимов. Некоторые аспекты использования метода фазового смещения для улучшения временной структуры пучка медленного вывода на ускорителе ИФВЭ. – Труды XIV совещания по ускорителям. Протвино, 1994, т.2, стр.295.
7. А.Г. Афонин, В.М. Бирюков, В.А. Гаврилушкин и др. Первые результаты экспериментов по высокоэффективному выводу протонов с помощью изогнутого монокристалла. Письма в ЖЭТФ, 1998. т.67, вып.10, с. 741.
8. A.G. Afonin, A.A. Arkhipenko, V.I. Baranov et al. High-efficiency multipass extraction of 70 GeV protons”. Phys. Lettr.B435 (1998).
9. V.I. Kotov, A.G. Afonin, V.M. Biryukov et al. Application of Bent Crystals at IHEP 70 GeV Accelerator. Proceed. of EPAC 2000, Vienna.
10. А.А. Асеев, М.Ю. Горин. Нерезонансный медленный вывод протонов на установку комплекса меченых нейтрино. – Труды XV совещания по ускорителям. Протвино, 1996, т.2, с. 291.