

K-603

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

13 - 9324

КОЛЕСНИК Виктор Григорьевич

ДОЗИРОВКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА ПУЗЫРЬКОВЫЕ КАМЕРЫ

Специальность - 05.14.11 -
электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)

Дубна 1975

Работа выполнялась в Лаборатории высоких энергий Объединенного института ядерных исследований и в Институте ядерной физики АН УзССР.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
профессор

М.И. Соловьев,

доктор физико-математических наук,
член-корр. АН УзССР, профессор

У.Т. Гулямов.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник

А.Ф. Писарев,

кандидат технических наук,

старший научный сотрудник

В.Ф. Сяколенко.

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Институт теоретической и экспериментальной физики (г. Москва).

Автореферат разослан "15" декабрь 1975 года.

Защита диссертации состоится "6" ноябрь 1976 года
на заседании Ученого совета Лаборатории высоких энергий.

Адрес: г. Дубна, Московской области, ОИЯИ, конференц-зал

Лаборатории высоких энергий.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических
наук,

старший научный сотрудник

М.Ф. Лихачев

13 - 9324

КОЛЕСНИК Виктор Григорьевич

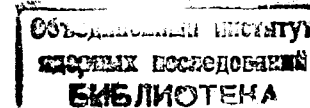
ДОЗИРОВКА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ
ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ НА ПУЗЫРЬКОВЫЕ КАМЕРЫ

Специальность - 05.14.11 -

электрофизические установки и ускорители

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

(Диссертация написана на русском языке)



В физике высоких энергий пока еще нет последовательной теории сильных взаимодействий. Для ее создания нужны экспериментальные результаты. Получение экспериментальных результатов имеет ряд трудностей. К их числу относится рост множественности заряженных частиц, что снижает качество информации, получаемой с пузырьковых камер. В камеру можно допускать строго ограниченные загрузки. Для разных камер они свои. Для оптимизации эксперимента загрузка должна быть равномерной от кадра к кадру, т.к. пустые и перегруженные кадры никакой информации не несут.

Осуществить дозировку специальным возмущением орбиты ускоренных протонов и коллимированием в канале не удастся.

Настоящая работа посвящена вопросам разработки и создания импульсных безжелезных магнитов и их применению при дозировке заряженных частиц высоких энергий в пузырьковых камерах. Рассмотрены вопросы сильноточных систем питания этих магнитов.

Диссертация состоит из четырех глав. В первой главе дан краткий обзор существующих систем дозировки числа частиц. Рассмотрены способы дозировки частиц на основе описанных ранее /3,4,5,6/ и построенных при участии автора импульсных магнитов.

На первом этапе изучались способы коммутирования сильноточных импульсов тока. Были рассмотрены вопросы коммутирования вакуумными и игнитронными разрядниками. Исследовались полупроводниковые силовые вентили в режимах импульсных перегрузок по току с "высокими" di/dt . Работа диодов анализировалась в схемах с игнитронными разрядниками и тиристорами. Так как время нарастания обратной полуволны тока в малоиндуктивной нагрузке может быть меньше времени закрывания тиристора и тем более игнитрона, то целесообразно использование последовательно включенного диода (неко-

торые типы диодов имеют способность восстанавливать запирающие свойства за 0,4 мкс). Включение диода в схемах таким способом позволяет получать вентиляемость в обратном направлении с повышенной частотой. "Захват" тока в магнитах осуществляется полупроводниковыми вентилями. Исследована работа вентиляей в схемах с крутизной нарастания тока $di/dt = 1 + 1,5$ кА/мкс на вентиль. Работа диодов в параллельном соединении проверена импульсами тока до 100 кА.

Работа тиристоров с большими токами на малоиндуктивные нагрузки связана с трудностями получения высоких di/dt . Как правило, для большинства типов тиристоров высокие di/dt являются причиной, приводящей к выходу из строя р-п-р-структуры. Локальное распространение тока приводит к перегреву участков структуры около электрода управления /7/. Одним из способов повышения di/dt в тиристорах без теплового разрушения является увеличение амплитуды и скорости нарастания управляющего сигнала. При увеличении тока управления до 5-20 А со скоростью нарастания 30 А/мкс (для ТЛ-150 6 класса) время задержки включения тиристоров уменьшается до 0,1-0,2 мкс. Для отдельных экземпляров задержка снижается до 20-30 нс.

Быстрое нарастание прямого тока через тиристор требует стабильности времени включения, что особенно важно при параллельном включении тиристоров. Разброс времени достигает нескольких мксек, что недопустимо при работе вентиля с большими перегрузками. Управление импульсом с длительностью переднего фронта 50 нс и амплитудой 20 А снижает разброс включения до 10 + 15 нс.

В результате исследований установлено, что для обеспечения нормальной работы тиристоров в импульсных режимах с большими

перегрузками по току желательно использование схем с захватом тока в индуктивной нагрузке. Такие схемы обеспечивают однополярный режим работы. При этом лавинные тиристоры ТЛ-150 выдерживают импульсы с $di/dt = 2$ кА/мкс длительностью 30-50 мкс. Тиристор при этом включается один раз через 7 + 8 с.

В первой главе также рассматриваются схемы для получения плоской вершины тока длительностью 5 мс и с крутизной нарастания 1200 А/мкс.

Во второй главе описан импульсный безжелезный магнит с системами питания и электроникой, обеспечивающей управление магнитом.

Было создано две модификации магнита. В первой в качестве отклоняющего устройства использовался одновитковый безжелезный контур, образованный двумя параллельно расположенными плоскими шинами сечением 130 x 11,6 мм² и длиной 7 м /8/. На эти шины разряжались три (и более) группы конденсаторов, заряжаемых до соответствующих напряжений. Во второй модификации - шины рассечены вдоль траектории частиц на 30 автономных сегментов, изолированных друг от друга. Эта модификация может применяться как для отклонения "лишних" частиц, так и для раскладки частиц в одной из плоскостей камеры. Каждый виток питается от своей индивидуальной системы, что позволяет включать их как все одновременно, так и каждый отдельно или группами со сдвигом во времени.

Такая система позволяет изменять конфигурацию поля в поперечном сечении.

Магнит работал с периодичностью 7-8 с. Подбором распределения тока в витках достигается достаточная однородность магнитного поля в рабочем объеме. Объем магнитного поля для обоих вариантов был одним и тем же - 7 x 13 x 700 см³. Напряженность магнит-

ного поля регулировалась от 100 до 5000 Э. Максимальное значение произведения магнитного поля на длину пролета частицы $H_{max} \cdot l = 3,5 \cdot 10^6$ Э x см. Ток в витках формируется несколькими конденсаторными батареями. Результирующая составляющая тока характеризует величину магнитного поля в рабочем объеме. Включение витков осуществляется программным устройством. При одновременном включении всех витков форма результирующей кривой будет повторять форму кривой для одного витка. При включении витков группами и по специальной программе форма кривой будет, естественно, отличаться от кривой для одного витка.

Длительность плато магнитного поля регулировалась от 4 до 7 мс. Длительность переднего фронта - ~ 10 мкс. В первой модификации фронт составлял ~ 5 мкс. В экспериментах используется вторая модификация магнита, как наиболее универсальная.

Одним из качеств магнита, составленного из автономных витков, является получение магнитных полей различной конфигурации в поперечном сечении. Задавая программное протекание токов по группам и отдельным виткам, можно менять форму нарастания тока и, соответственно, магнитного поля. Форма поля может быть постоянной в каждом цикле или изменяться в момент нарастания или спада тока в витках. В одном из режимов работы, когда все витки запараллелены, пучок фокусируется в одной плоскости.

Включение витков по I5 (через один) создает возможность двойного включения магнита на случай работы пузырьковой камеры с двумя расширениями за цикл. Магнит дважды отклоняет пучок. Длительность магнитного поля в каждом отклонении - ~ 5 мс.

Работа магнита в таком режиме показана на осциллограммах рис. I (а - на верхнем луче показаны импульсы пучка частиц, на-

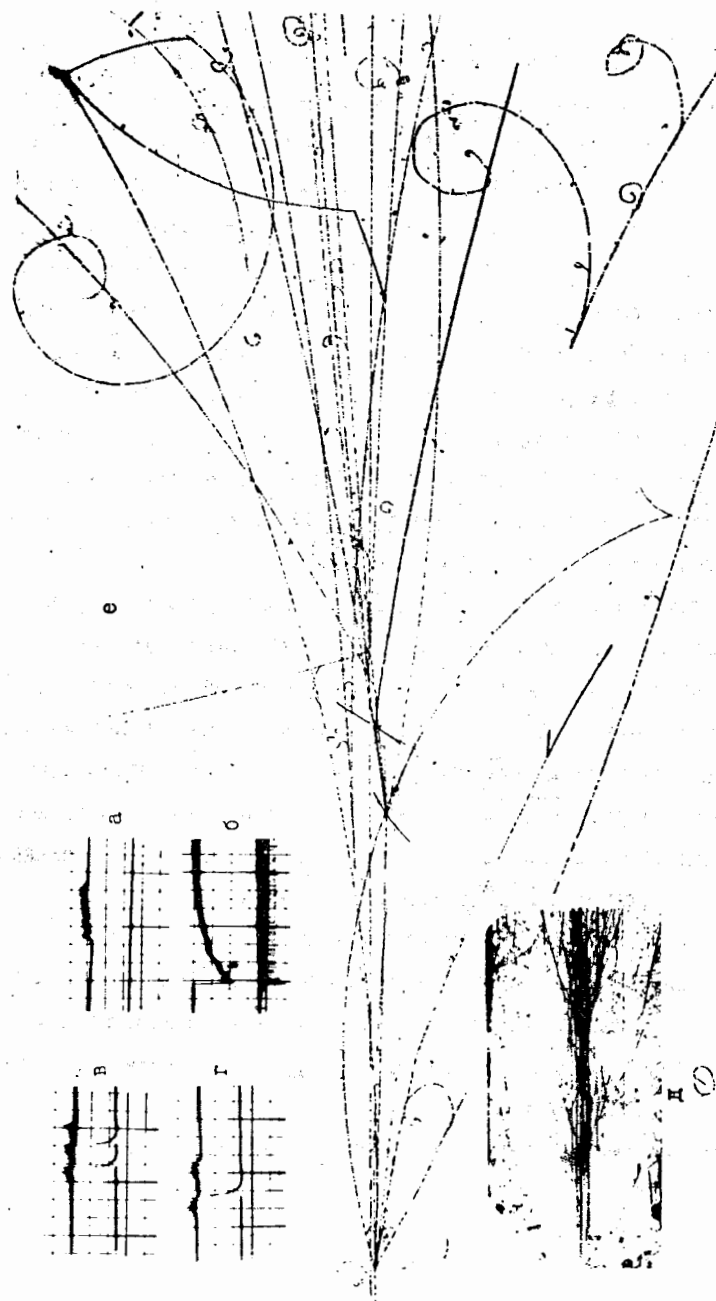


Рис. I

правляемых на пузырьковую камеру; б - на нижнем луче импульсы пучка частиц, на верхнем - импульс тока в магните; в - приход частиц пучка прерывается трижды, двумя включениями магнита; г - на верхнем луче приход частиц прерывается на время действия магнитного поля, образуя два максимума). Такие ступенчатые отклонения могут достигать 30 за время сброса частиц от ускорителя. Система питания смонтирована в 30-ти тиристорных блоках. Формирование импульса тока в одном витке состоит из нескольких групп конденсаторных батарей, разряжаемых через соответствующие тиристорные ключи. Конденсаторные батареи, заряжаемые до соответствующих напряжений, формируют передний фронт, плато и спад импульса тока. Разрядный ток в одном витке нарастает до 2000 А за 0,6 мкс и поддерживается в течение 5-7 мс.

Включение каждой последующей группы конденсаторов осуществляется в максимуме тока предыдущей батареи. Это создает условие беспрепятственного запираания тиристоров без перезарядки конденсаторов. На спадающей части ток в витке захватывается мощными высокочастотными вентилями. Конденсаторы и коммутирующие вентили работают в однополярном режиме. При включении всех 30-ти блоков ток в магните достигает 20 кА за 10-15 мкс. При максимальной зарядке батарей ток магнита может достигать 100 кА.

В экспериментах по коммутированию импульсов тока решены вопросы группового соединения тиристоров со скоростью нарастания тока до 1000 А/мкс на тиристор. Проведены расчеты необходимой напряженности магнитного поля и мощности питания магнита. Расчет согласуется с экспериментом.

Установка может быть также применена для работы на ускорителях на сотни ГэВ.

В третьей главе рассмотрен блиц-магнит (9) и его совместная работа с кикер-магнитом. Приведены некоторые результаты работы двух магнитов на канале протонов с импульсом 69 ГэВ/с.

Блиц-магнит выполнен в виде плоско-параллельного протяженного витка, составленного из 12-ти запараллеленных витков. Трубочатые проводники составляют виток с рабочим объемом магнитного поля $2 \times 13 \times 400 \text{ см}^3$.

Напряженность магнитного поля на оси регулируется от 100 до $32 \cdot 10^3 \text{ Э}$. Для отклонения пучка с импульсом 70 ГэВ/с отклоняющая способность достигает $H_{\text{max}} \cdot l = 12,8 \cdot 10^6 \text{ Э} \times \text{см}$. Длительность поля достигает в одном из режимов 200 мкс. Импульс тока в магните формируется тремя цепями конденсаторных батарей. Первая быстрая формирует передний фронт тока. Вторая и третья цепи формируют длительность импульса тока. Суммарный ток конденсаторных батарей, заряженных до 10 кВ, коммутируется через игнитрон и достигает 400 кА за 0,8 - 0,9 мкс.

Осциллограмма импульса тока в кикер-магните (верхний луч) и дозировка по две частицы (нижний луч) даны на рис.2а. Смещение пучка полем кикер-магнита в горизонтальной плоскости с энергией 69 ГэВ/с оказалось равным 2 см на базе 4,7 м, измеренной от точки выхода частиц из магнита до измерительного прибора. На рис. 2б дан горизонтальный профиль пучка при включенном (пунктиром) и выключенном (сплошная кривая) кикер-магните.

Магнитное поле в кикер-магните при этом измерении достигало 850 Гс (1,7 Гс на 1 А х виток).

Распределение числа частиц по циклам показано на рис. 3. По оси абсцисс отложено число частиц в цикле, по оси ординат - число циклов (а - без включения блиц-магнита, б - при включенном блиц-магните).

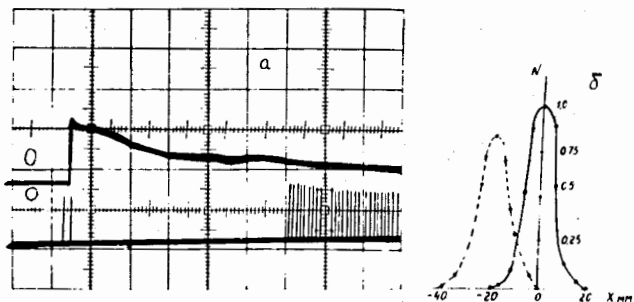


Рис.2. Осциллограмма импульса тока в кикер-магните - верхний луч, дозировка на две частицы - нижний луч - а; горизонтальный профиль пучка при включенном (пунктирная кривая) и выключенном (сплошная кривая) кикер-магните

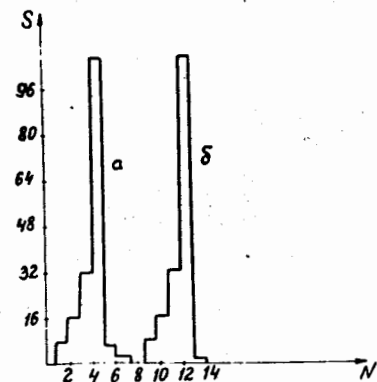


Рис.3. Распределение числа частиц по циклам, по N - число частиц в цикле, по S - число циклов (а - без включения частотного магнита, б- при включенном частотном магните)

В 75% циклов через камеру проходит заданное число частиц. Число циклов с числом частиц более установленной дозировки +I составляет несколько процентов.

Приведены распределения напряженности магнитного поля блинц- и кикер-магнитов.

Магнитное поле, создаваемое токами в одной шине

(запись в системе CGSE)

$$h_x(x, y) = \left\{ -\frac{1}{2}(x-d) \ln \frac{(x-d)^2 + y^2}{(x-d)^2 + (y-a)^2} - \frac{1}{2} x \ln \frac{x^2 + (y-a)^2}{x^2 + y^2} + (y-a) \left[\operatorname{arctg} \frac{x-d}{y-a} - \operatorname{arctg} \frac{x}{y-a} \right] + y \left[\operatorname{arctg} \frac{x}{y} - \operatorname{arctg} \frac{x-d}{y} \right] \right\} \frac{2j}{c};$$

$$h_y(x, y) = \left\{ \frac{1}{2}(y-a) \ln \frac{x^2 + (y-a)^2}{(x-d)^2 + (y-a)^2} + \frac{1}{2} y \ln \frac{(x-d)^2 + y^2}{x^2 + y^2} + (x-d) \left[\operatorname{arctg} \frac{y}{x-d} - \operatorname{arctg} \frac{y-a}{x-d} \right] + x \left[\operatorname{arctg} \frac{y-a}{x} - \operatorname{arctg} \frac{y}{x} \right] \right\} \frac{2j}{c};$$

Здесь j - плотность тока, пропускаемого через шину, геометрические размеры для кикер- и блинц-магнитов равны соответственно:

$$a = 13 \text{ см}; 13 \text{ см}$$

$$\alpha = 1,2 \text{ см}; 1 \text{ см}$$

$$b = 8,9 \text{ см}; 4 \text{ см}$$

Поле от двух шин с противоположно направленными токами получает- ся суммированием:

$$H_x = h_x(x, y) - h_x(b-x, y);$$

$$H_y = h_y(x, y) + h_y(b-x, y).$$

Расчетные данные собраны в таблицах (# I - кикер-магнит, ток 60 кА и # 2 - блинц-магнит, ток 400 кА). Результаты в таблицах

даны для индукции в смещенной системе координат:

$$x' = x - \frac{b}{2}; \quad y' = y - \frac{a}{2}.$$

Таблица № I

y (мм)	By (гаусс)		
	X = 0	X = ±10 (мм)	X = ±25 (мм)
-50	2979	3021	3171
-40	3371	3499	3741
-30	3685	3625	3944
-20	3841	3895	4012
-10	3918	3964	4015
0	3920	3985	41066
10	3918	3964	4015
20	3841	3895	4012
30	3685	3625	3944
40	3371	3499	3741
50	2979	3021	3171

Таблица № 2

y (мм)	By (гаусс)	
	X = 0	X = ± 5 (мм)
-60	19514	26019
-50	25043	28621
-40	29271	30573
-30	30897	31874
-20	32459	32491
-10	32495	32510
0	32524	32530
10	32495	32510
20	32459	32491
30	30897	31874
40	29271	30573
50	25043	28621
60	19514	26019

Специфической особенностью безжелезных протяженных магнитов является получение достаточно однородного магнитного поля в рабочем объеме. Для этого область поля должна иметь в 2-3 раза большую протяженность по вертикали, чем по горизонтали. В зазоре блинч-магнита наблюдается достаточно однородное поле по оси Y - 40 мм и по оси X - 15 мм.

Отклоняющее поле H_y начинает спадать после ± 30 мм. В кикер-магните H_y достаточно однородно в области ± 30 мм. Поле H_x имеет спад в центре магнита. Однородность поля H_x наблюдается в области ± 10 мм. Вдоль магнита магнитное поле достаточно однородно, так как нет факторов, вызывающих искажение поля. С одной стороны магнита, там, где витки разведены по сторонам для входа пучка, поле неоднородно. Существенного влияния эта неоднородность на частицы не оказывает, так как отношение объема неоднородного поля к объему достаточно однородного составляет $(6 \times 13 \times 7) \text{ см}^3 / (700 \times 13 \times 7) \text{ см}^3$.

Такая же неоднородность по протяженности наблюдается и у блинч-магнита, где это отношение составляет $(3 \times 13 \times 2) \text{ см}^3 / (400 \times 13 \times 2) \text{ см}^3$.

Расчетная величина магнитного поля в середине зазора ($I, 92 \text{ Гс}$ на 1 А-виток для кикер-магнита) практически совпадает со значением, полученным по данным опыта. На некоторое несоответствие расчетных и опытных величин влияет неточность измерения отклонения пучка из-за его значительной ширины.

Приведены результаты дозировки кикер-магнитом Π -мезонных пучков с энергией 40 и 69 БэВ.

На канале 4Б кикер-магнит располагался перед коллиматором и отклонял пучок в горизонтальной плоскости $/10/$. По ходу пучка через 10 м располагался коллиматор, на котором происходило поглощение отклоненного магнитом пучка. Размер пучка по горизонтали в

магните равнялся 6 см, а в коллиматоре - 1 см. При величине щели коллиматора, равной размеру пучка, полное поглощение Π -мезонов наблюдается при угле отклонения 2 мрад. При облучении пропановой камеры Π -мезонами с импульсом 40 ГэВ/с максимум вертикального профиля пучка сдвигается на 2 см.

На канале 7, транспортирующим упруго-рассеянные протоны с импульсом 69 ГэВ/с на пузырьковую камеру "Мирабель", кикер-магнит устанавливается в начале параллельного участка пучка длиной 300 м. На этой базе пучок с импульсом 69 ГэВ/с отклонялся кикер-магнитом более чем на 1 м и выходил за пределы апертуры канала и рабочего объема камеры.

Фотографии частиц в 2 м пропановой пузырьковой камере даны на рис. 1 (д - дозировка без кикер-магнита одними системами управления пучком ускорителя; е - дозировка с кикер-магнитом).

В четвертой главе рассмотрены случаи получения импульсов тока с глубокой аperiodичностью $/II/$. Работа управляемых и неуправляемых полупроводниковых вентилях в импульсных режимах с перегрузками со скоростью нарастания и амплитуде токов зависит от процессов, протекающих в системах импульсных магнитов. При условии сильной аperiodичности импульсные перегрузки полупроводниковых приборов становятся неопасными. Согласно выражениям (12), (13) и экспериментальным данным (описанным в главе 2), разрядные конденсаторы почти не перезаряжаются. Однополярный режим позволяет использовать электролитические конденсаторы.

Путем проочередного разряда и отклонения разрядных конденсаторов с одновременным подключением заряженных конденсаторов можно формировать импульс тока с передним фронтом произвольной формы. Отсутствие спада тока в нагрузке допускает безопасное зашпирание

тиристоров. Более того, в таких схемных решениях возможно использование более мощных коммутирующих приборов с "большими" временами записания. Поддержание тока в нагрузке на время записания коммутирующего прибора создает условие для рекуперации энергии.

Для получения импульсных магнитных полей напряженностью выше 30 кГс был разработан магнит с повышенной жесткостью конструкции, с объемом магнитного поля $\pi R^2 l = 3,14 \times 6,5^2 \times 700 \text{ см}^3$.

Магнит представляет собой полый цилиндр, рассеченный вдоль на две половины, причем рассечение сделано не до конца. Обе половины в электрическом отношении представляют собой малоиндуктивный низкоомный виток. Цилиндр - виток рассекается в продольном направлении рядами отверстий или канавок небольшого диаметра, профрезерованных вдоль. Формы полос, образованных между отверстиями, представляют собой слабо связанные электрически отдельные витки. На цилиндре-ионопроводе образуются токопроводящие линии с "малым" и "высоким" (ряды отверстий или канавки) сопротивлениями. К каждой линии с малым сопротивлением подключается тиристорная схема суммирования с конденсаторными батареями. Ширина и форма полос, образованных рядами отверстий или канавок, определяют конфигурацию магнитного поля и могут быть различны.

Форма магнитного поля задается программой срабатывания тиристорных блоков. Энергия конденсаторных батарей распределяется в ионопроводе согласно программе открывания тиристоров. Тиристоры открываются группами и создают большой и меньший ток на разных участках ионопровода. Это условие создает возможность в апертуре ионопровода плавно переходить от простой конфигурации поля к сложной, не только между циклами, но и в одном цикле.

Основные результаты работы:

1. Разработан комплекс аппаратуры, включающей несколько типов импульсных безжелезных магнитов с рабочим объемом магнитного поля $7 \times 13 \times 700 \text{ см}^3$, $2 \times 13 \times 400 \text{ см}^3$, $\pi R^2 l = 3,14 \times 6,5^2 \times 700 \text{ см}^3$.

2. Выведены формулы для получения токовых импульсов с заданной формой нарастания переднего фронта и формирования плоской вершины.

3. Дан анализ дозировки частиц высоких энергий на пузырьковые камеры.

4. Экспериментально показана возможность работы тиристоров и полупроводниковых вентилях с $di/dt = I \text{ кА/мкс}$ до амплитуды $I \text{ кА}$ на один вентиль. На основе анализа большого экспериментального материала разработаны высокоточные системы питания импульсных магнитов с применением тиристоров, полупроводниковых вентилях и ионитронных разрядников.

5. Изложен опыт работы по созданию протяженных безжелезных магнитов с длительностью нарастания импульса переднего фронта магнитного поля около 1 мксек . Скорость нарастания тока в блиц-магните достигает 400000 А/мкс . Отклоняющая способность на длину пролета частицы в магнитном поле достигает $12,8 \cdot 10^6 \text{ Э} \times \text{см}$. Максимальная протяженность плоской части импульса в кикер-магните достигает 5 мс .

6. Разработаны установки для дозировки пучков заряженных частиц высоких энергий. Получено распределение числа частиц на канале 4Б (ИФЭЗ, Серпухов) по результатам случайно выбранных 825 снимков пузырьковой камеры ТПК-500. Общее число первичных треков на снимках - 2277, число снимков без треков - 14, с перегрузкой треками снимков не оказалось. Распределение числа частиц по циклам

при дозировке на французскую водородную камеру "Мирабель" существенно уже распределения, полученного на канале 4Б, что связано с большой протяженностью канала и значительно лучшими фоновыми условиями. Полученные распределения по циклам на пузырьковых камерах ТПК-500 и "Мирабель" полностью отвечают требованиям их нормальной работы. При совместной работе блиц- и кикер-магнитов отклонение от дозировки составляет не более одной частицы. Проведено несколько сот тысяч циклов. Все блоки и устройства работали нормально.

7. Впервые предложен импульсный магнит для дозировки и управления частицами высоких энергий, состоящий из магнита и импульсного питания, отличающийся тем, что с целью получения магнитных полей в большом объеме, регулировки формы поля с крутым фронтом нарастания и спада в момент импульса, магнит состоит из рассеченного в продольном направлении ионопровода с неравномерной электропроводимостью, который обеспечивает на отдельных участках пропускание сильных импульсных токов, позволяющих изменять конфигурацию поля в поперечном направлении.

8. Работа /12/ признана изобретением и использована в ИФВЭ (Серпухов) и ОИЯИ (Дубна).

Основные материалы диссертации опубликованы в /8-12/.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- I. V.P.Balandin, N.G.Borisov et al. Nucl.Instr. and Meth., 20, 110 (1963).
2. M.Beauval. International Colloquium on Bubble Chamber. Heidelberg, CERN (1967), 67-26, Vol.1, p. 134-146.
3. В.Ф.Сиколенко. Препринт ОИЯИ 9-3378, Дубна (1967).
4. В.Ф.Сиколенко. Препринт ОИЯИ 13-3252, Дубна (1967).
5. E.Chesi and G.Petrucci, CERN/TC/200, 65-9 (1965).
6. A.Faltens, I.Barale. The Review of Scientific Instruments, 11, 1463 (1966).
7. M.Saegysa, H.Tanaka and K.Masuda. "The di/dt rating of thyristor" (in Japanese), Elec. Commun. Lab. Tech.1, vol.16, p. 45-57, January (1967).
8. У.Г.Гулямов, В.Г.Колесник, А.Г.Кочуров, В.Б.Льбович, Д.Н.Небольсин, М.И.Соловьев, Р.В.Тепляков. Препринт ОИЯИ 13-6186, Дубна (1972).
9. У.Г.Гулямов, Н.В.Захаров, А.И.Квасов, В.Г.Колесник, И.О.Лосский, М.И.Соловьев. Изв. АН Уз ССР, Серия физ.-мат., № 6, 1972.
10. А.Н.Алеев, Н.А.Галеев, В.М.Горшков, М.И.Грачев, У.Г.Гулямов, И.А.Данильченко, В.Г.Колесник и др. Препринт ИФВЭ 71-106, Серпухов, 1971.
11. У.Г.Гулямов, Н.В.Захаров, В.Г.Колесник. Изв. АН Уз ССР, сер. физ.-мат., № 6, 1973.
12. У.Г.Гулямов, В.Г.Колесник, М.И.Соловьев. ОИПОТЗ № 44, 1973. Авт.свид. № 405186.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 ноября 1975 года.