

3588

Экз. чит. зала 122

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 3588



Р. Анджеяк, Е. М. Андреев, А. П. Бирюков,
И. М. Василевский, В. В. Вишняков, Ю. Н. Зыкин,
З. Женчикевич, Н. Д. Крахотин, В. И. Никаноров,
А. Ф. Писарев, Н. С. Толстой, А. А. Тяпкин, В. М. Шешунов

ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ ПРОБЛЕМ

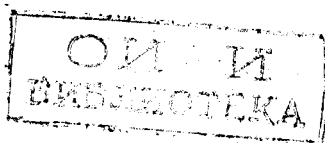
ОПИСАНИЕ
ПЯТИМЕТРОВОГО МАГНИТНОГО ИСКРОВОГО
СПЕКТРОМЕТРА,
СООРУЖАЕМОГО ОБЪЕДИНЕННЫМ ИНСТИТУТОМ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

1967.

13 - 3588

Р.Анджеяк, Е.М.Андреев, А.П.Бирюков,
И.М.Василевский, В.В.Вишняков, Ю.Н.Зыкин,
З.Женчикевич, Н.Д.Крахотин, В.И.Никаноров,
А.Ф.Писарев, Н.С.Толстой, А.А.Тяпкин, В.М.Шешунов

ОПИСАНИЕ
ПЯТИМЕТРОВОГО МАГНИТНОГО ИСКРОВОГО
СПЕКТРОМЕТРА,
СООРУЖАЕМОГО ОБЪЕДИНЕННЫМ ИНСТИТУТОМ
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ



ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в экспериментах, проводимых на ускорителях частиц высоких энергий, резко возросло количество работ, выполненных с помощью искровых камер, благодаря целому ряду бесспорных преимуществ последних. Успешная разработка искровых камер с автоматическим съемом информации способствовала еще более широкому внедрению этой методики в исследования частиц высоких энергий. Правда, область экспериментального изучения многочастичных каналов неупругих взаимодействий частиц при больших энергиях, по крайней мере в настоящее время, остается еще труднодоступной для искровых камер с нефотографической регистрацией событий. До последних лет, когда в экспериментах стали использоваться магнитные искровые спектрометры, в исследованиях неупругих взаимодействий частиц высоких энергий безраздельно господствовали пузырьковые камеры.

Следует, однако, указать, что применение методики искровых камер в магнитном поле даже без автоматического съема информации для исследований неупругих взаимодействий частиц при высоких энергиях открывает по сравнению с методикой пузырьковых камер ряд новых возможностей. Такая методика обеспечивает, например, следующие преимущества:

1. Возможность проведения исследований на несепарированных пучках вторичных частиц.
2. Возможность регистрации нескольких событий взаимодействия за один импульс излучения ускорителя.
3. Возможность эффективной регистрации гамма-квантов без снижения точности измерения импульсов заряженных частиц.
4. Возможность полной автоматизации измерений, так как на снимке отсутствуют не относящиеся к взаимодействию треки частиц.

5. Возможность за счет выбора соответствующей системы управления регистрировать взаимодействия только определенного вида.

Целесообразность использования методики искровых камер в магнитном поле для исследования многочастичных каналов неупругих соударений при энергиях серпуховского протонного ускорителя была подробно обоснована в предложении польского физика Р. Сосновского в 1965 году. Камерный комитет ОИЯИ в мае 1965 года обсудил и одобрил предложение польской группы (М. Даныш, Р. Сосновский, М. Шептышка и др.) о создании в ОИЯИ магнитного искрового спектрометра для исследований на серпуховском синхротроне на 70 ГэВ. Это предложение было затем одобрено XVIII Сессией Ученого совета ОИЯИ. Для разработки МИС в июле 1965 года дирекцией ОИЯИ был создан специальный отдел в составе ЛЯП ОИЯИ.

Сооружаемый в ОИЯИ магнитный искровой спектрометр представляет собой универсальную установку для широкого класса исследований неупругих процессов при высоких энергиях^{х)}. В частности, в отличие от методики обычных счетчиков магнитный спектрометр позволит регистрировать резонансные состояния частиц при их совместном образовании.

Принципиальная схема разрабатываемого в ОИЯИ магнитного искрового спектрометра сохраняет основные особенности предложения Р. Сосновского. В частности, выбран вариант спектрометра, позволяющий обеспечить достаточную точность измерения импульса заряженных частиц в области до 50 ГэВ/с и высокую эффективность регистрации γ -квантов от распада нейтральных частиц. Для этой цели принята конструкция электродов искровых камер с малым количеством материала в центральной части и специальная система конверторов, расположенных в периферической части спектрометра. Для получения высокой эффективности регистрации γ -квантов от распада вторичных частиц потребовалось, естественно, обеспечить наличие конверторов как слева и справа, так и сверху и снизу от центральной части спектрометра. В связи с этим пришлось выбрать достаточно большой вертикальный размер рабочего объема магнитного поля. Для уменьшения числа гамма-квантов, способных выйти из установки минуя конверторы, потребовалось достаточно плотно расположить большое число

х) В настоящее время МИС ОИЯИ предполагается расположить на пучке 4В. На этом пучке возможно проводить изучение неупругих взаимодействий с отрицательными пионами и каонами, а также с антипротонами. Предложения по конкретным экспериментам на этом пучке будут опубликованы.

отдельных искровых камер с конверторами. Плотное расположение искровых камер в спектрометре обеспечивает также более надежное определение принадлежности искр отдельным трекам при большом числе заряженных частиц, образующихся в одном акте соударения. Выбор искровых камер, дающих наклонные (до 45°) к направлению электрического поля искровые каналы, позволяет при регистрации гамма-квантов отдельной камерой определить место распада нейтральной частицы.

Выбранная форма модулей искровых камер, близкая к квадрату, позволяет также эффективно регистрировать продукты распада вторичных частиц.

Таким образом, основная особенность проектируемого искрового спектрометра состоит в эффективной регистрации гамма-квантов и продуктов распада нестабильных частиц. Благодаря этому значительно расширяются возможности спектрометрической методики для исследований неупругих соударений частиц при высоких энергиях. Так, например, уже сама по себе регистрация образующихся в реакциях нейтральных пионов без оценки их энергии позволяет более надежно проводить идентификацию различных реакций и более точно определять энергетический баланс наблюдаемых взаимодействий, что особенно важно для обнаружения резонансных состояний.

II. ИСКРОВЫЕ КАМЕРЫ, СИСТЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПИТАНИЯ И СИСТЕМА НЕПРЕРЫВНОЙ ОЧИСТКИ ГАЗА

Главным требованием, которому должны удовлетворять искровые камеры спектрометра, является их высокая ливневая эффективность. Под термином ливневая эффективность понимается способность камеры регистрировать несколько частиц, одновременно проходящих через ее объем. Применительно к разрабатываемому спектрометру частиц это требование сводится к необходимости регистрировать в камерах одновременно 10-15 частиц. Вероятность регистрации такого числа частиц должна составлять $\approx 100\%$.

Из многих исследований с искровыми камерами известно, что эффективность регистрации нескольких частиц в одном промежутке камеры при заданных параметрах импульса сильно зависит от величины межэлектродного зазора. Так,

при зазоре 5-10 мм эффективность регистрации одной частицы близка к 100%, двух частиц - 80-90% и быстро падает с увеличением числа частиц. В камерах же с зазором 5 см и более эффективность одновременной регистрации многих частиц практически равна 100% и не зависит от числа частиц. Указанная зависимость ливневой эффективности искровой камеры от величины межэлектродного зазора находит хорошее качественное объяснение в рамках флуктуационной теории развития разряда по следу частицы.

Таким образом, одновременная регистрация в спектрометре 10-15 частиц может быть легко осуществлена при использовании искровых камер с большим зазором. Однако, к сожалению, такой путь решения задачи в рассматриваемом случае является неприемлемым, так как камеры с большим межэлектродным промежутком обладают большим временем памяти и по этой причине не могут использоваться в экспериментах на ускорителях, где фоновая загрузка аппаратуры обычно бывает велика. Очевидно, что одновременно достигнуть достаточно высокой ливневой эффективности и малого времени памяти можно лишь при компромиссном подходе к решению задачи. Ряд качественных соображений и некоторые данные о работе камер со средними межэлектродными зазорами (20-50 мм) указывают, что высокая эффективность одновременной регистрации 10-15 частиц и малое время памяти ($\sim 4 \cdot 10^{-7}$ сек при использовании очищающего поля) могут быть достигнуты в камере с зазором 25-30 мм при работе в стримерном или предстримерном режиме. Эти соображения и легли в основу первоначальной разработки искровых камер для спектрометра. Более поздние исследования моделей камеры на частицах космического излучения подтвердили разумность такого подхода. Окончательный размер межэлектродного зазора модуля камеры был принят равным 30 мм.

§ 1. Конструкция модуля камеры

Общий вид модуля камеры показан на рис. 1. Размеры модуля приняты равными 1400 x 1200 x 30 мм³. Центральная часть электродов выполняется из алюминиевой фольги толщиной 0,1 мм. Эта толщина выбрана из условия обеспечения достаточной жесткости и герметичности электрода и получения минимальной

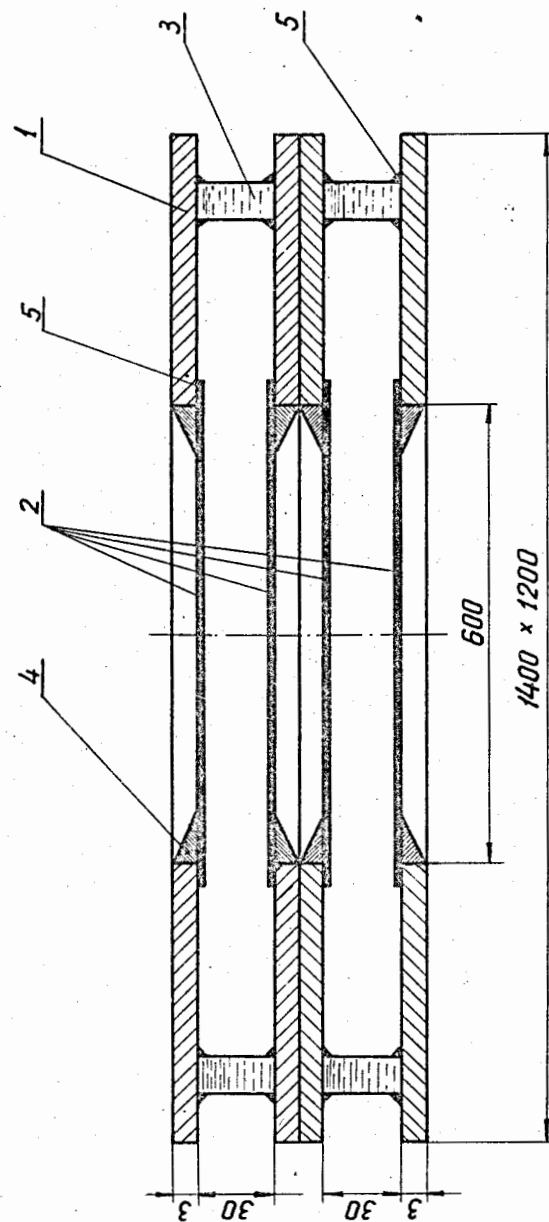


Рис. 1. Конструкция модуля камеры. 1 - пералюминиевый электрод, 2 - алюминиевая фольга, 3 - рамка из стекла, 4 - слой из аквадага, 5 - слой из эпоксидной смолы.

погрешности в измерении импульса частиц, возникающей из-за многократного рассеяния. Диаметр фольговой части электрода равен 600 мм. Остальная часть электрода выполняется из дюралюминиевого листа толщиной 3 мм. Боковые стенки камеры представляют собой рамку, склеенную с помощью эпоксидной смолы из полосок плоского оптического стекла. Полоски нарезаются на специальном станке, разработанном для этих целей.

§ 2. Технология изготовления электродов

Фольга наклеивается на дюралюминиевую основу электрода в предварительно натянутом состоянии. Натяжение фольги осуществляется с помощью механического устройства, конструкция которого показана на рис. 2. Принцип действия устройства хорошо ясен из этого рисунка. После окончания полимеризации эпоксидной смолы электрод снимается с устройства и лишняя часть фольги срезается. Для обеспечения электрического контакта между фольгой и дюралюминиевой основой электрода внешний край склейки покрывается проводящим слоем аквадага (см. рис. 1).

§ 3. Наполнение модуля камеры газом

Исходя из требования получения высокой ливневой эффективности регистрации частиц наполнение модулей будет производиться смесью газов, состоящей из 99,7% неона и 0,3% аргона. Для наполнения модулей разработан специальный вакуумный бокс на два модуля.

§ 4. Система очистки и контроля газа

При работе искрового спектрометра следует ожидать, что начальная смесь газов будет непрерывно загрязняться примесями, выделяемыми внутренними поверхностями камер, а также за счет возможного неконтролируемого натекания газа из атмосферы. Поэтому для поддержания необходимой чистоты начальной газовой смеси весь объем газа в спектрометре будет непрерывно очищаться.

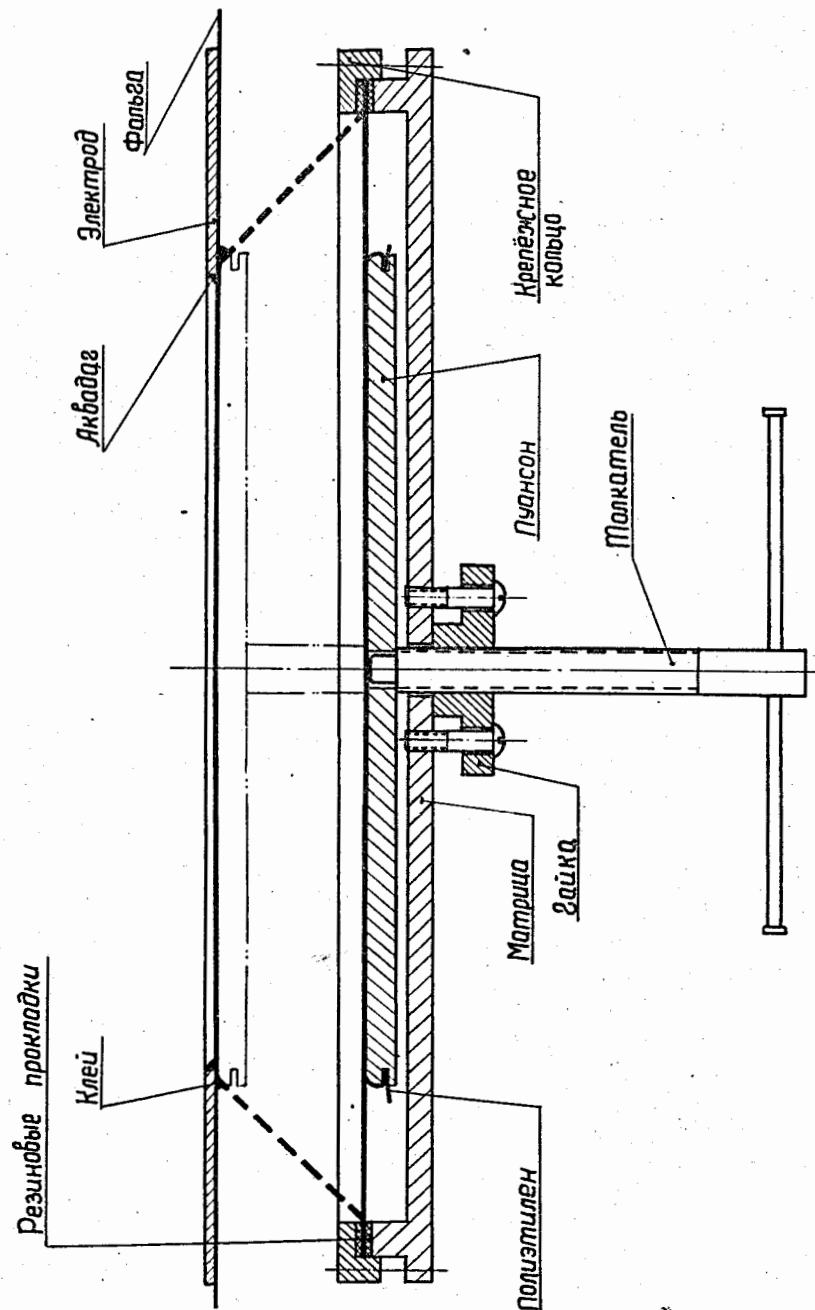


Рис. 2. Устройство для натяжения фольги на электроде.

Для этих целей разрабатывается замкнутая система очистки и контроля газа. Блок-схема этой системы показана на рис. 3.

Очистка газа от загрязняющих примесей будет осуществляться путем химического поглощения этих примесей кальцием, нагретым до температуры 450°C . Кальций размещается в колонке очистки в виде мелкой стружки. Прокатка газа через колонку производится газовым насосом мембранного типа, обеспечивающим избыточное давление газа перед колонкой $\approx 0,5$ атм. Нагретый и очищенный газ поступает в воздушный термостат для снижения температуры с 450° до 20°C . Термостат устроен в виде вентиляционного колодца, в центре которого проходит змеевик с газовой смесью. В системе очистки предусмотрен компенсатор давления, который будет выравнивать давление газовой смеси в камерах спектрометра до давления воздушной атмосферы. Конструктивно компенсатор будет представлять собой пятидесятилитровый газовый резервуар, стенки которого выполнены из двухслойной полиэтиленовой пленки толщиной 0,1 мм.

Контроль чистоты газа предполагается осуществлять методом периодического электрического пробоя газа, циркулирующего в системе очистки. В таком методе, как известно, амплитуда импульса, необходимая для электрического пробоя газа, сильно зависит от его состава. Поэтому, зная пробойное напряжение для начальной рабочей газовой смеси и сравнивая с ним напряжение пробоя очищаемого газа, можно судить о степени отклонения чистоты этого газа от исходной смеси. Схема контроля чистоты газа изображена на рис. 4.

§ 5. Система импульсного питания спектрометра

А. Частота срабатывания спектрометра

Исходя из разумно допустимой скорости управляемой перетяжки пленки в фотоаппарате, было принято, что среднее число срабатываний спектрометра за время цикла выхода частиц из ускорителя будет около 10. При длительности цикла в 0,8 сек частота срабатывания спектрометра составит около 12 гц. Руководствуясь перспективами развития методики регистрации треков при создании системы импульсного питания спектрометра была принята максимальная частота срабатывания около 50 гц.

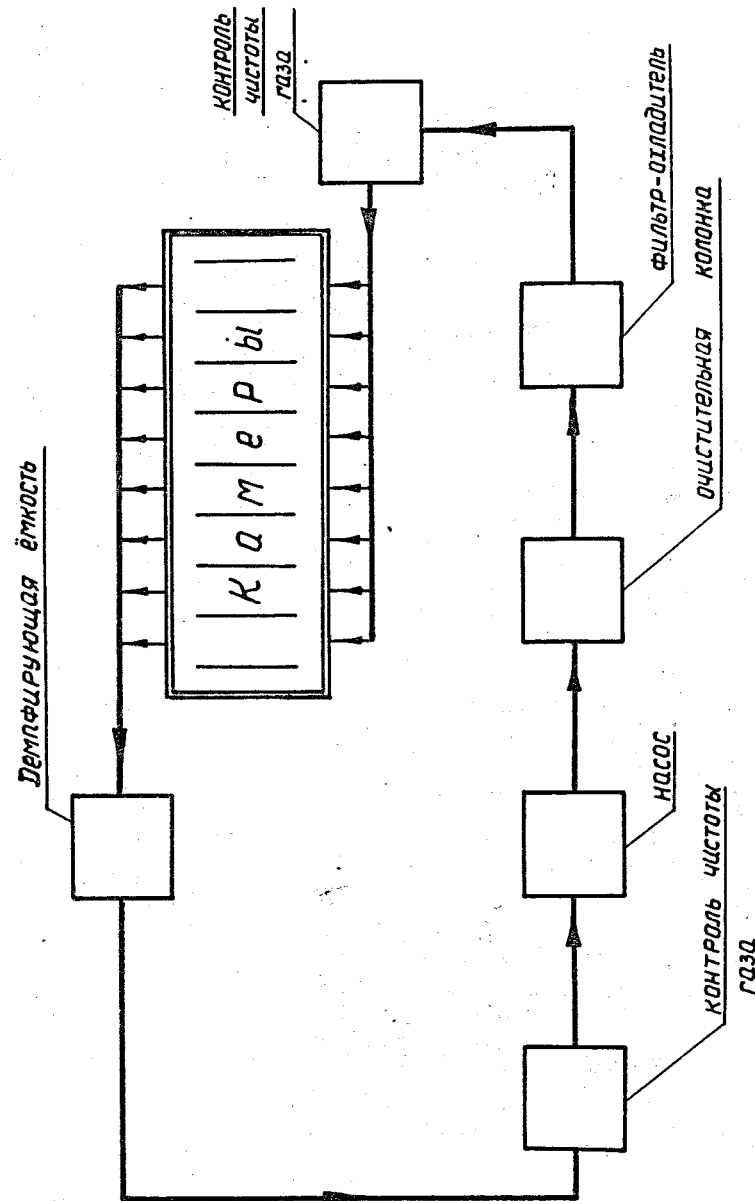


Рис. 3. Схема непрерывной очистки газа в спектрометре.

Б. Схема импульсного питания камер спектрометра

1. Краткое описание

Блок-схема питания показана на рис. 5. Как видно из этого рисунка, каждая пара модулей спектрометра питается отдельным генератором ($\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{25}$). Эти генераторы выполнены по схеме двухступенчатого генератора Маркса, рассчитанного на напряжение 40 кв и ток 5–10 ка. Все генераторы запускаются одновременно импульсами 10 кв от схемы параллельного поджига, состоящей из воздушного импульсного разрядника и блока параллельного размножения импульсов. В свою очередь, это устройство управляется импульсом с амплитудой 10 в от мастер-схемы.

Питание генераторов $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{25}$ постоянным напряжением ведется стандартным выпрямителем на 20 кв. В токовой цепи питания стоит электронный ключ на импульсном разряднике, осуществляющий подключение для зарядки генераторов $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{25}$ по сигналу от схем параллельного поджига.

Наблюдение за срабатыванием каждого генератора $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{25}$ ведется посредством специальной системы контроля.

2. Генераторы импульсов $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{25}$

Общее число генераторов в схеме, как показано на рис. 5, равно 25. Каждый из генераторов, как уже упоминалось, предназначен для питания двух модулей, имеющих суммарную электрическую емкость около 1 нф. Для обеспечения удовлетворительного коэффициента использования генератора ($> 0,9$) емкость генератора в импульсе должна составлять ≈ 10 нф или 20 нф на одну рабочую ступень.

Схема генератора Γ показана на рис. 6. Каждая из емкостей C_1 и C_2 состоит из двух параллельно соединенных емкостей типа КВИ по 10 нф и 20 кв, P_1 и P_2 - силовоточные импульсные разрядники, коммутирующие заряд генератора, P_3 - разрядник, предназначенный для обострения переднего фронта импульсов, поступающих на модули спектрометра. По цепи $R_6 - R_7$ осуществляется подача очищающего поля на модули, а по цепи $R_6 - C_3 - L$ - контроль срабатывания генератора. Сопротивление R_8 служит для формирования спада импульсов.

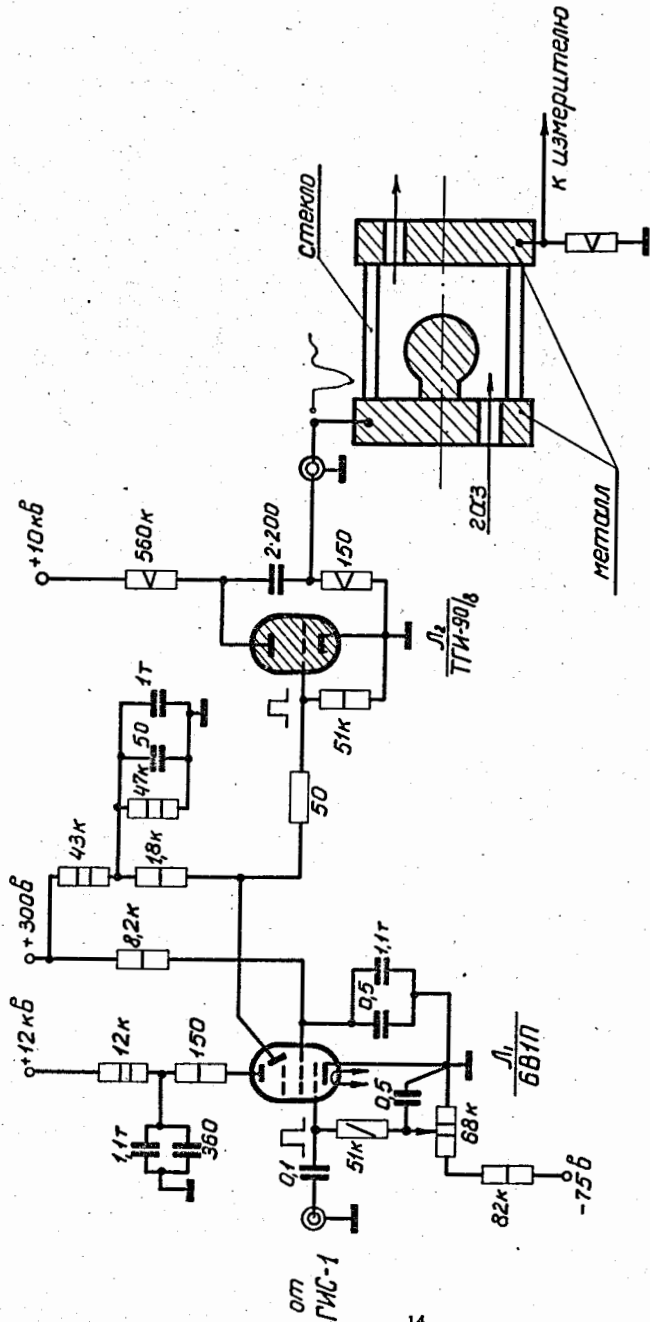


Рис. 4. Схема контроля чистоты газа.

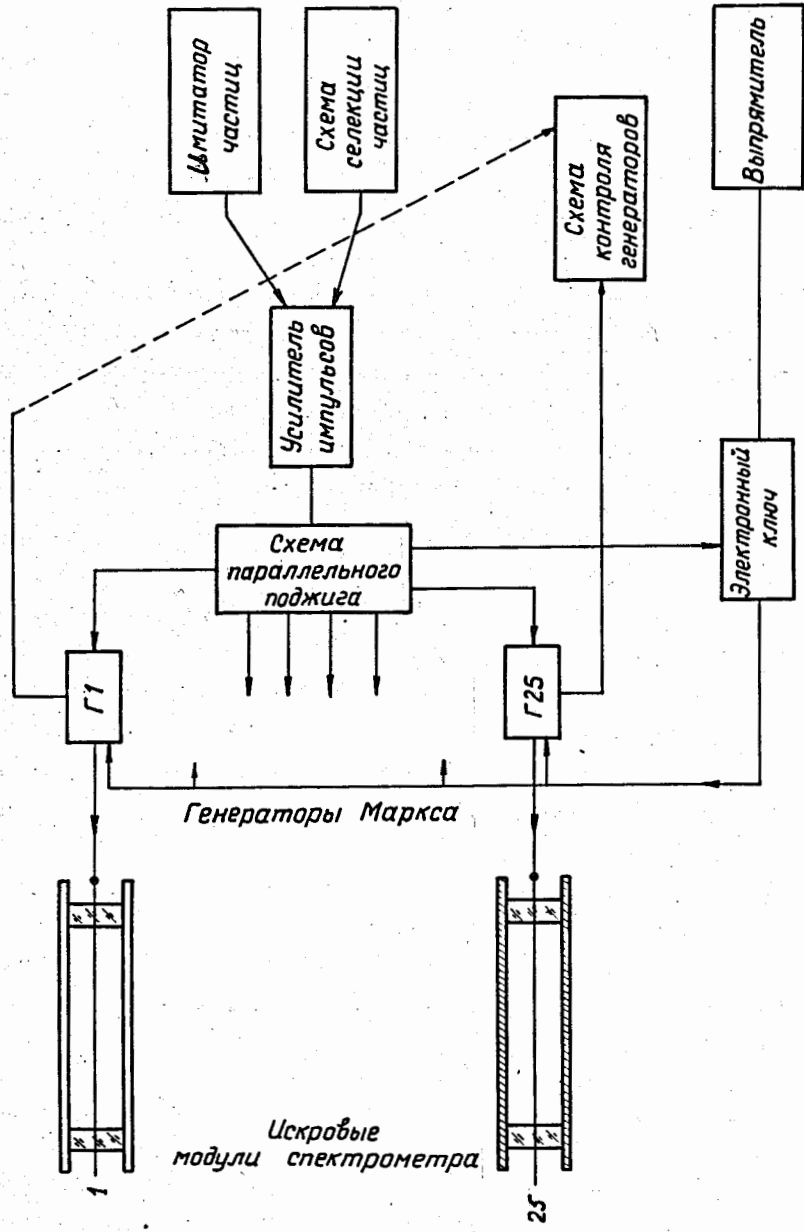


Рис. 5. Блок-схема импульсного питания камер спектрометра.

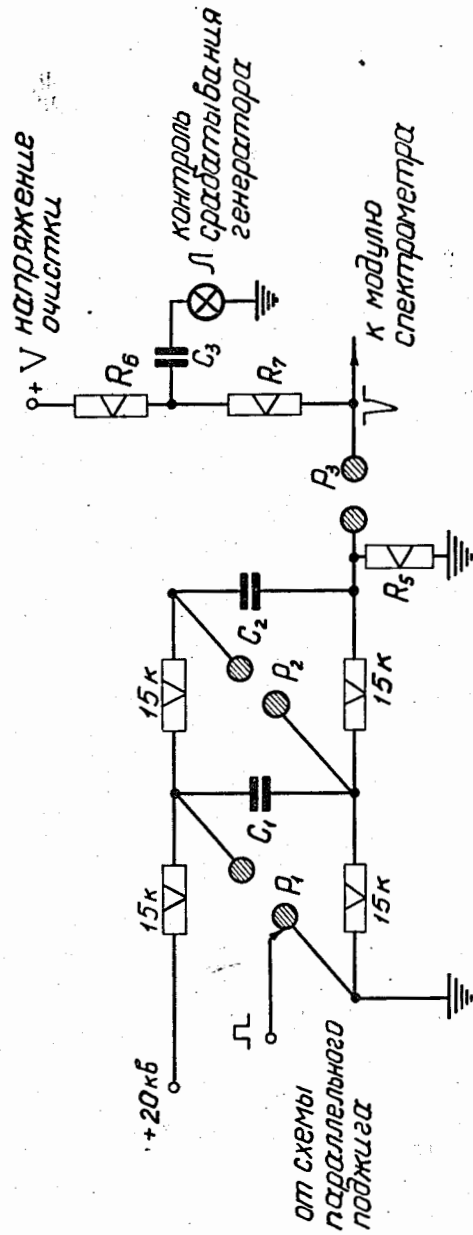


Рис. 6. Схема двухступенчатого генератора импульсов Маркса на 40 кв.

Рассмотрим теперь основные соотношения, которыми описывается работа генератора и системы генератор-камера, и определим параметры рассматриваемых генераторов.

3. Схема гашения генераторов $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{25}$

Малая величина сопротивлений в цепях зарядки генераторов $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{25}$ не позволяет разрядникам P_1 и P_2 гаситься самостоятельно после каждого срабатывания. Поэтому для принудительного гашения дуги в них используется, как указывалось выше, специальная схема-электронный ключ (см. рис. 10), коммутирующий ток зарядки всех генераторов. Ключ открывается с некоторой задержкой после срабатывания генераторов и их гашения. Максимальный ток зарядки (см. приложение 1), протекающий через разрядник, равен $i_{\max} = 20$ а, средний ток $-40 \cdot 10^{-3} \times 25 = 1,0$ а. По мере роста и восстановления потенциала на генераторах напряжение на разряднике падает, и он гасится. Сопротивление R , включенное параллельно разряднику, служит для пропускания вспомогательного тока, компенсирующего утечку в генераторах.

4. Схема параллельного поджига

Для одновременного запуска $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{25}$ разработан импульсный RC-генератор на 10 кв, схема которого показана на рис. 7. Принцип работы такого типа генератора хорошо известен в литературе и здесь не обсуждается. Сопротивление R , стоящее в цепи заряда емкостей C_1, C_2, \dots, C_{25} , выбрано из условия:

$$R \sum C_i = \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{f} \quad (\text{II.1})$$

Средний ток, потребляемый этим генератором от источника питания в период регистрации частиц, равен

$$\bar{i} = \frac{\sum Q}{0,3} = \frac{n \cdot 25 \cdot C \cdot f \cdot 0,3}{0,3}$$

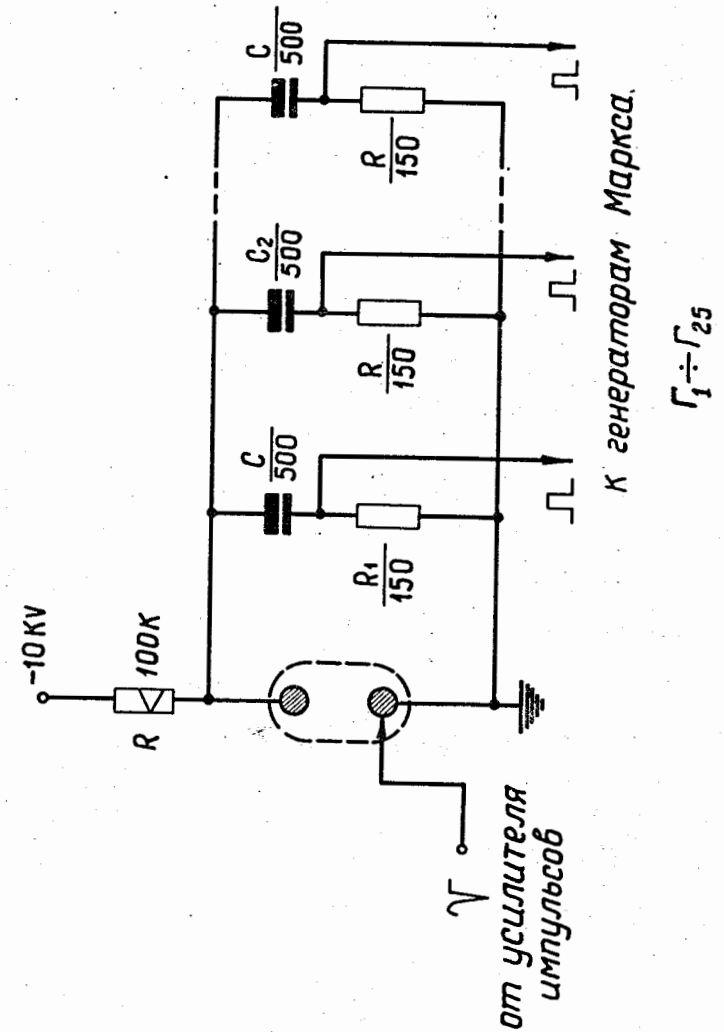


Рис. 7. Схема параллельного запуска генераторов $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_{25}$.

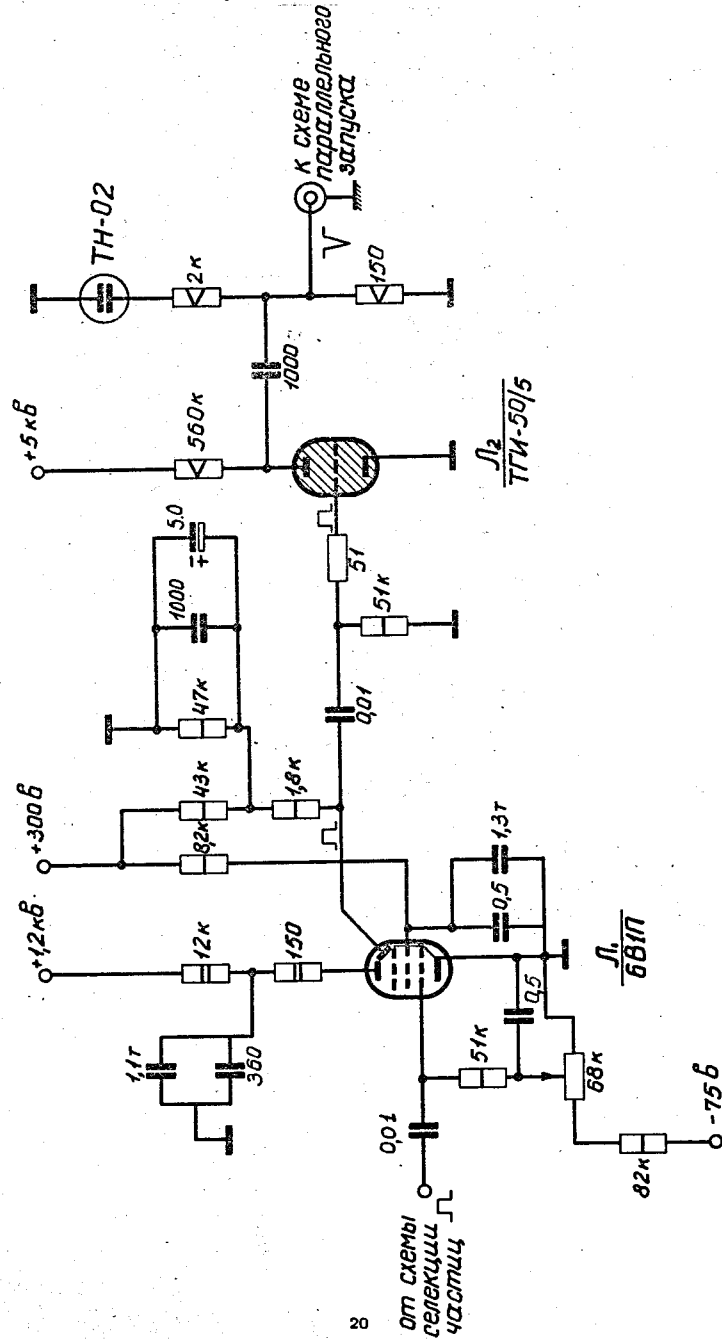


Рис. 8. Схема предусилителя импульсов.

Подставляя в эту формулу значения величины $u = 10$ кв, $C = 0,5$ нф и $f = 50$ гц, получим:

$$\bar{i} = 6,3 \cdot 10^{-3} \text{ а.}$$

5. Схема предусилителя

Импульс, поступающий от мастер-схемы, имеет амплитуду 10 в. Для его усиления до величины 5 кв, необходимой для запуска импульсного разрядника в схеме параллельного поджига, используется двухкаскадная схема усиления. В этой схеме (см. рис. 8) входной импульс поступает на лампу со вторичной эмиссией 6В1П и усиливается до величины 400 в. Амплитуда этого сигнала достаточна для надежного запуска тиратрона ТГИ-50/5, на котором вырабатывается импульс с амплитудой 5 кв.

6. Блок задержки импульсов

Принципальный вид этой схемы показан на рис. 8. Схема представляет собой мультивибратор с одним устойчивым состоянием. Время задержки прохождения импульса регулируется в пределах $10^{-3} - 10^{-2}$ сек путем изменения величины смещения на одной половине лампы 6В1П.

7. Источники питания

А. Питание схемы параллельного поджига

Как уже указывалось, средний ток, потребляемый этой схемой, в момент регистрации частиц в спектрометре, составляет 6,3 ма. Напряжение на источнике должно регулироваться в пределах 0-15 кв. Этим параметрам наилучшим образом удовлетворяет стандартный выпрямитель на 20 кв и 10 ма. Для дополнительного сглаживания пульсации напряжения, возникающей из-за импульсного характера зарядки генератора параллельного поджига, к выходу указанного выпрямителя подключается дополнительный конденсатор типа КБГП на 2 мкф и 10 кв.

При расчете этих генераторов было установлено (см. приложение 1), что средний ток, потребляемый одним генератором от источника питания в период регистрации частиц, равен 40 ма. С учетом одновременной работы двадцати пяти генераторов расход тока составит $40 \cdot 10^{-3} \text{ а} \cdot 25 = 1,0 \text{ а}$. Это значение тока получено в предположении средней частоты срабатывания генераторов $f = 50 \text{ гц}$. В качестве источника напряжения для питания рассматриваемых генераторов принят стандартный выпрямитель, обеспечивающий ток в нагрузке 1,5 а при напряжении 20 кв.

8. Полная схема импульсного питания спектрометра

Выше рассмотрены отдельные узлы блок-схемы питания искровых камер спектрометра. Ниже, на рис. 10 приводится полная ее принципиальная схема, куда включены также схема генератора импульсов, имитирующая частоту срабатывания спектрометра 7,15 и 22 раза на пучке частиц, и другие вспомогательные схемы. Средняя суммарная мощность, потребляемая от сети электронными схемами, составит около 5 ква.

8.6. Импульсные воздушные разрядники

Одним из наиболее ответственных элементов в схеме импульсного питания искровых камер спектрометра является управляемый импульсный разрядник. Такой разрядник должен удовлетворять требованиям большой долговечности (несколько миллионов срабатываний), малому времени включения ($\approx 10^{-7}$ сек) и быстрому нарастанию тока (≈ 10 нсек). Он должен также надежно включаться от входных импульсов ≈ 5 кв и коммутировать токи ≈ 10 ка с частотой ≈ 150 гц при напряжении 10–20 кв. К сожалению, в настоящее время промышленность не выпускает разрядников, характеристики которых были бы близки к указанным. Поэтому для решения этой задачи в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ были изготовлены и исследованы различные варианты разрядников. Наиболее полно при этом были изучены характеристики следующих четырех конструкций разряд-

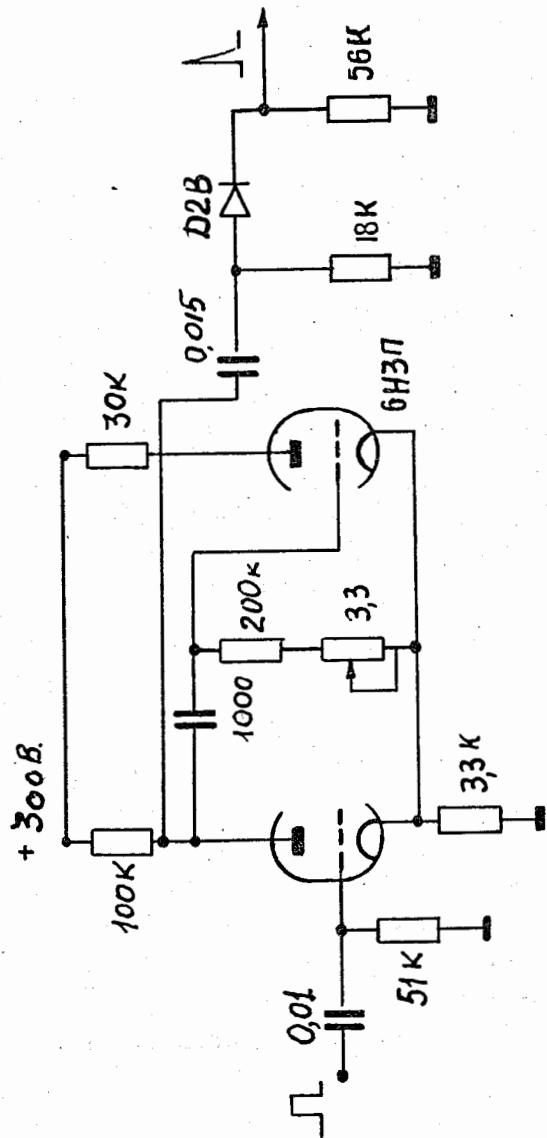


Рис. 8. Блок задержки импульсов.

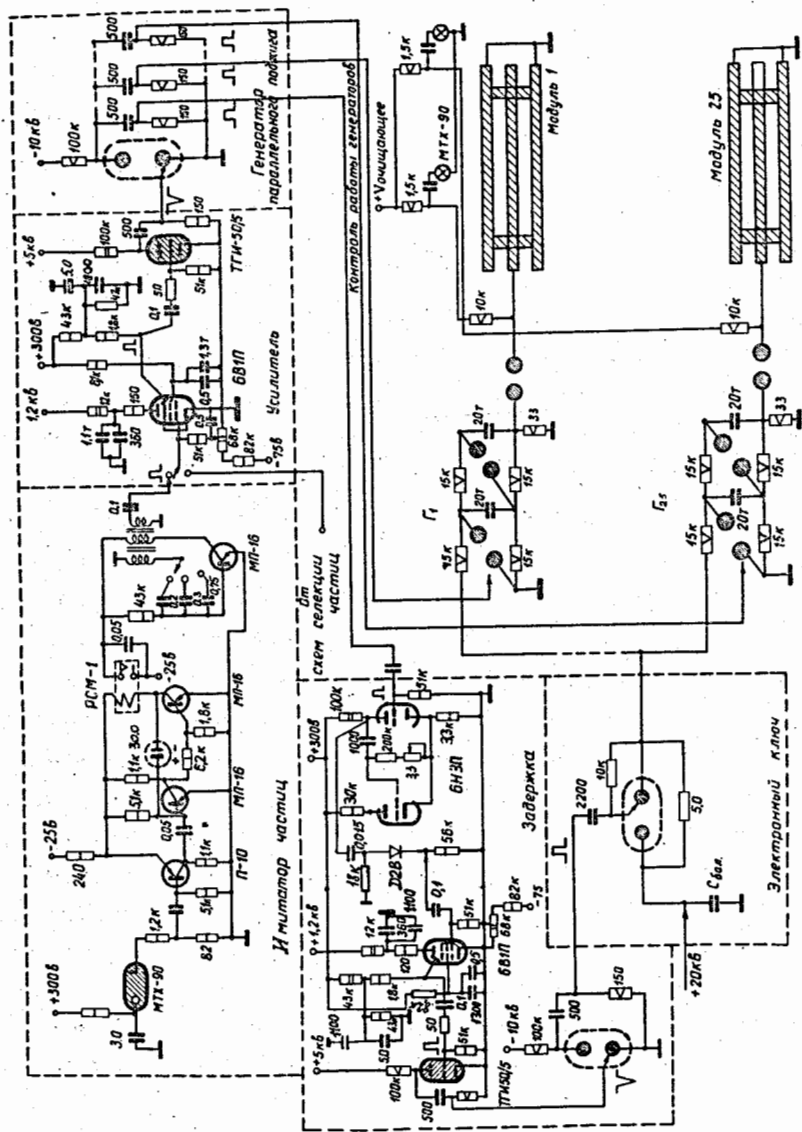


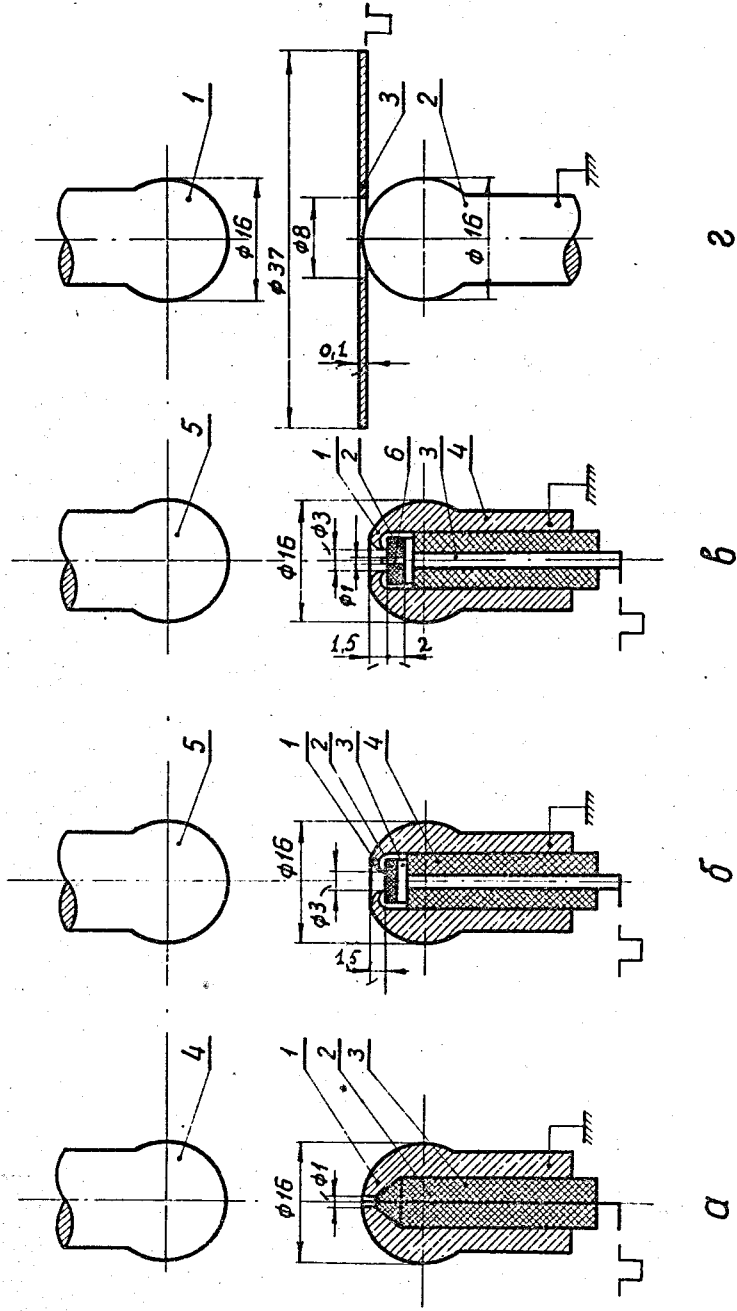
Рис. 10. Полная схема импульсного питания спектрометра.

ников: с 1) игольчатой системой поджига, 2) закрытой, 3) открытой системами поджига и 4) плоской кольцевой системой поджига. Конструкции этих разрядников показаны на рис. 11. Испытания разрядников производились по схеме, изображенной на рис. 12.

Исследования, выполненные в стандартных условиях, показали, что при анодном напряжении 11 кв и поджигающем импульсе 5 кв время нарастания тока у всех разрядников оказалось приблизительно одинаковым и составляло 10 нсек, а время задержки образования разряда — 50 нсек (см. кривые на рис. 13). Величина коммутирующего заряда в опытах равнялась $2,5 \cdot 10^{-5}$ кул.

Исследовалась также долговечность указанных разрядников. Было установлено, что разрядники с открытой и закрытой системами поджига после 100 тысяч срабатываний имели сильное разрушение в поджигающем электроде и практически переставали работать после 100–200 тысяч включений. Разрядники игольчатого типа могли срабатывать 400–500 тысяч раз, после чего их запуск становился неустойчивым. Разборка этих разрядников и осмотр их элементов показали, что после указанного количества включений промежуток между иглой и катодом был сильно загрязнен различными окислами, образовавшимися в каналах разряда. Эти окислы создавали проводящие мостики между иглой и катодом, которые и нарушали нормальную работу системы поджига.

Наиболее удачным оказался разрядник последнего типа — с кольцевой системой поджига. В отличие от предыдущих разрядников для него не удалось установить предельного числа срабатываний, так как после 3–4 миллионов включений разрядник продолжал устойчиво работать без каких-либо заметных изменений. Последнее объясняется, по-видимому, следующими причинами. Во-первых, в этом типе разрядника основной канал разряда и поджигающий канал разделены пространственно, что определенно способствует увеличению долговечности поджигающего электрода. Во-вторых, зазор между плоским поджигающим электродом и сферическим катодом открыт с двух сторон, что облегчает естественное удаление окислов из этого промежутка звуковой волной, идущей из канала основного разряда. В-третьих, при кольцевой системе поджига места возникновения поджигающих разрядов непрерывно изменяются по периметру кольца, что предохраняет край поджигающего электрода от быстрого разрушения. И, наконец, в-четвертых, при заземленном катоде и одинаковой полярности (в опыте отрицательной)



а б в

Рис. 11. Воздушно-импульсные разрядники с различной системой поджига. Electroды выполнены из нержавеющей стали. а) иглообразная система: 1 - катод, 2 - поджигающий электрод, 3 - изолятор, 4 - анод; б) закрытая система: 1 - катод, 2 - диэлектрическая пластинка, 3 - поджигающий электрод, 4 - изолятор, 5 - анод; в) открытая система: 1-5 то же, что и 1-5 на рис. б, 6 - поджигающая игла; г) плоско-кольцевая система: 1 - анод, 2 - катод, 3 - поджигающий электрод.

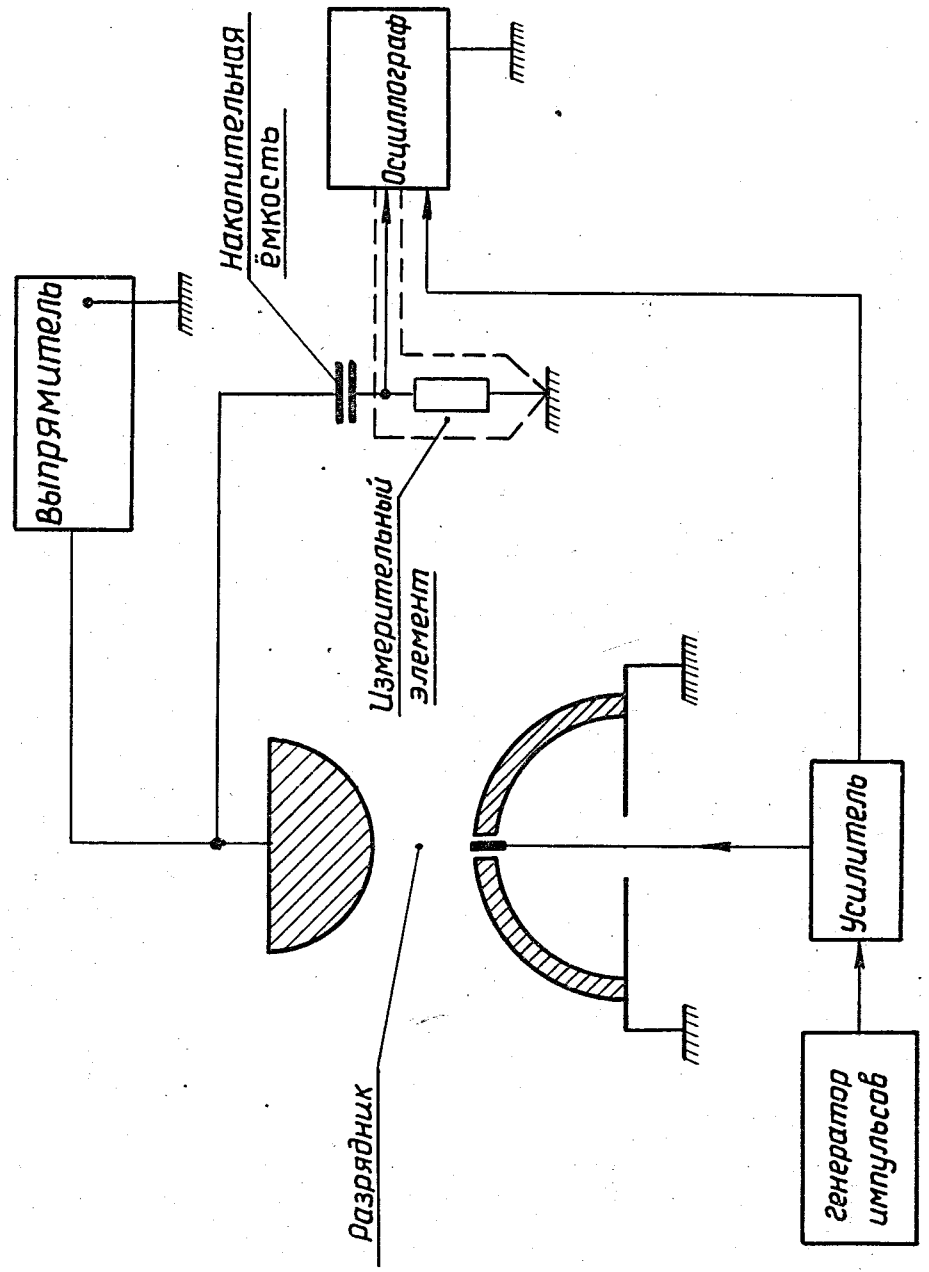


Рис. 12. Схема испытания разрядников.

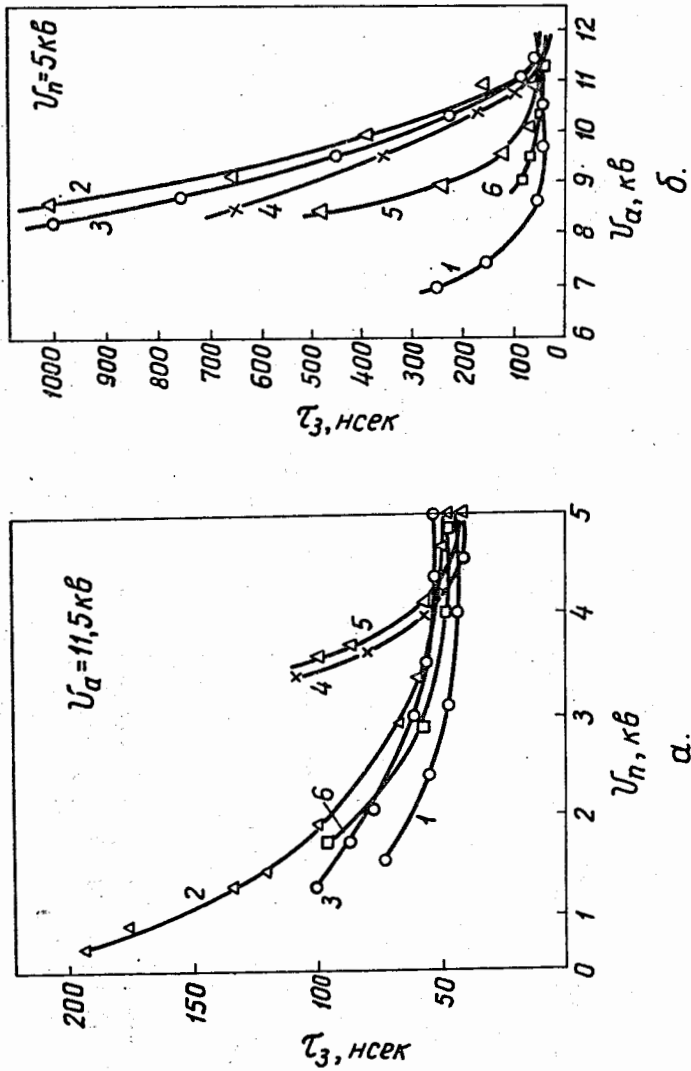


Рис. 13. Зависимость времени запаздывания τ_3 включения разрядника от напряжения анодного питания U_a и амплитуды поджигающего импульса U_c . а) зависимость τ_3 от U_a . 1 - игольчатая система поджига, 2 - поджиг через титанат-барьерную пластинку, 3 - поджиг через слюдяную пластинку, 4 - открытый поджиг по поверхности слюды, 5 - поджиг по поверхности стеклянной шайбы, 6 - кольцевая система поджига, 7) зависимость τ_3 от U_a . Обозначения на кривых те же, что и на рис.а.

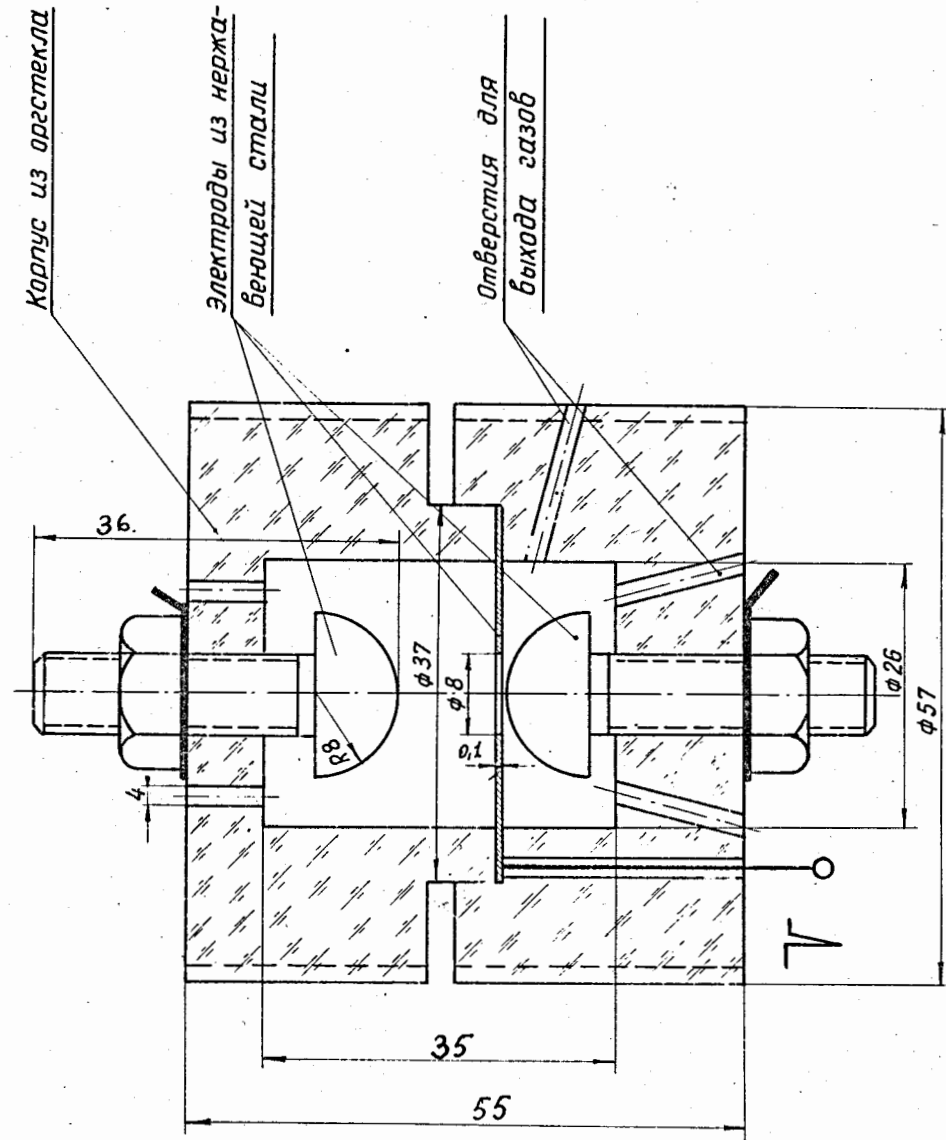


Рис. 14. Устройство разрядника с кольцевой системой поджига.

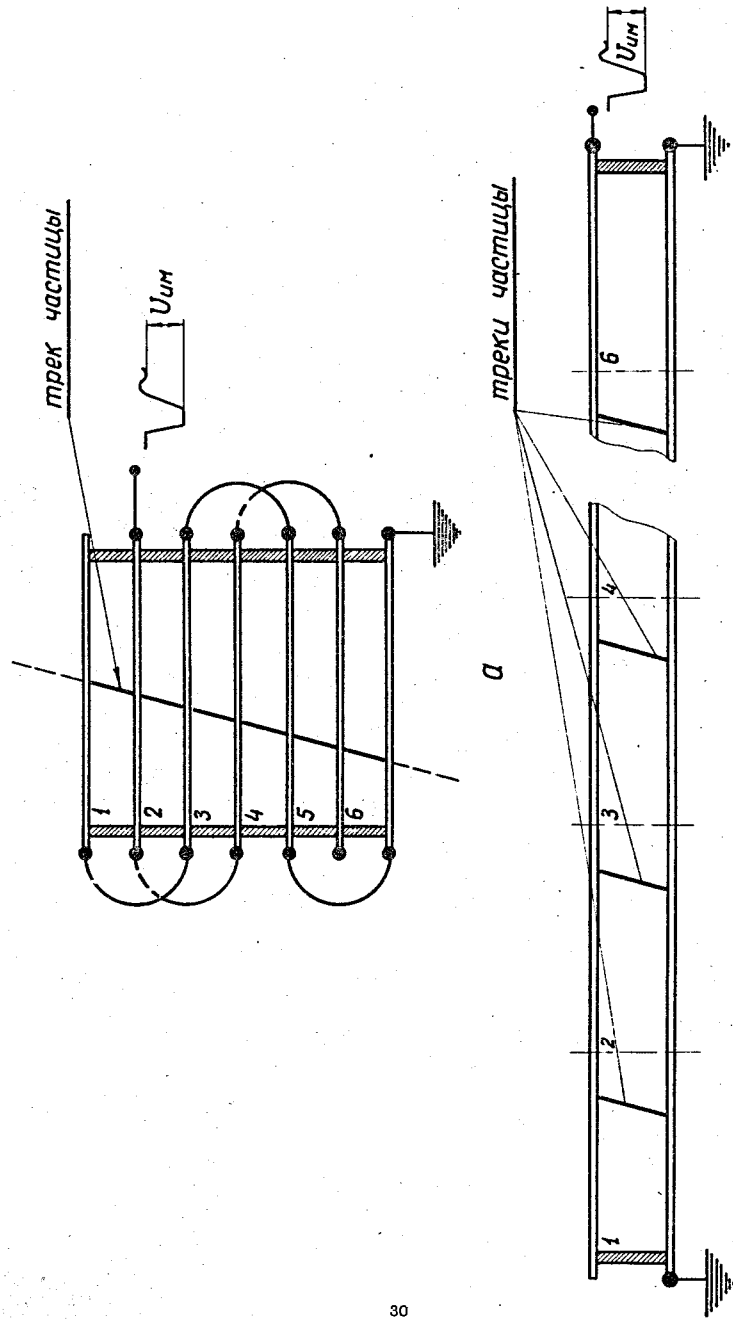


Рис. 15. "Свернутая" камера - макет модуля: а) свернутая камера, б) эквивалент свернутой камеры - модуль спектрометра.

анодного напряжения и потенциала кольцевого поджигающего электрода основной разряд возникает всякий раз только между анодом и катодом и никогда между анодом и поджигающим электродом, что также положительно сказывается на сохранности поджигающего электрода. Конструкция разрядника с кольцевой системой поджига показана на рис. 14. Здесь уместно отметить простоту конструкции этого разрядника и легкость его изготовления.

§ 7. Моделирование работы модуля

До полной разработки модуля искрового спектрометра были проведены предварительные испытания макета модуля. Конструктивно он был выполнен в виде обычной многослойной искровой камеры, электроды которой соединялись последовательно таким образом, что камера в целом представляла многократно свернутый единый межэлектродный промежуток модуля (см. рис. 15). Прохождение одной частицы через такую n -кратно "свернутую" камеру эквивалентно одновременному прохождению n -частиц через один межэлектродный зазор модуля спектрометра. Целью испытания явилось выяснение ливневой эффективности модуля и яркости свечения искр в зависимости от величины межэлектродного промежутка и параметров импульса рабочего напряжения. Испытывались четыре камеры с межэлектродными зазорами 10, 20, 25 и 30 мм соответственно. В каждом случае электрическая емкость свернутой камеры подбиралась близкой к емкости модуля. Эти исследования показали, что высокую эффективность (выше 90%) и удовлетворительную светимость искр можно получить при одновременной регистрации нескольких частиц в модуле с зазором 20-30 мм. Эти данные послужили основой для разработки рабочего варианта модуля с межэлектродным зазором, равным 30 мм.

III. ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

§ 1. Схема фотографирования

При обработке полученных фотографий крайне желательно иметь изображения всех искровых камер на одном кадре. Однако в нашем случае фотографирование

рабочего объема всех искровых камер спектрометра на один кадр осложняется тем обстоятельством, что система искровых камер расположена внутри электромагнита и вытянута по длине на пять метров.

Обычно для фотографирования одним фоторегистратором полной рабочей глубины всех промежутков искровых камер с плоскопараллельными, не прозрачными электродами используются линзы^{/3/} (цилиндрические и сферические), зеркала^{/4,5/} или призмы^{/6/}.

Другим возможным вариантом фотографирования одним фоторегистратором группы искровых камер является расположение их веером^{/7/}, так что фоторегистратор просматривает все промежутки. Проведенный нами анализ возможных вариантов оптических схем искрового спектрометра побудил нас остановиться на комбинированном варианте веерообразного расположения искровых камер с плоскими зеркалами.

В нашем случае все искровые камеры, помещенные в магнитное поле, были разделены на пять групп. Это было сделано для того, чтобы угол наклона крайних искровых камер в каждой из групп по отношению к оси фоторегистратора не превышал 3° . В каждой группе искровые камеры расположены веером. Для совмещения на один кадр изображения всех камер искрового спектрометра использованы пять плоских зеркал (рис. 16). Точность изготовления этих зеркал должна быть высокой для того, чтобы по возможности свести к минимуму поправки, при реконструкции случаев взаимодействия, на искажения, появляющиеся за счет введения зеркал. Для сведения укажем, что зеркала должны иметь радиус кривизны поверхности более 10 км и чистоту обработки поверхности в пределах 10–20 интерференционных колец.

8 2. Пространственное разрешение и стереофотография

Пространственное разрешение искровой камеры зависит от базы фотографирования. Обычно база фотографирования не превышает ширину искровой камеры, иначе появляется область, которая не просматривается одновременно двумя стереоаппаратами. Исходя из того, что нам необходимы повышенные требования к точности, в основном, в центральной части искровых камер (в области, представляющей цилиндр диаметром 600 мм и длиной 5000 мм), база фотографирования была выбрана больше ширины искровых камер – 2800 мм. Точность

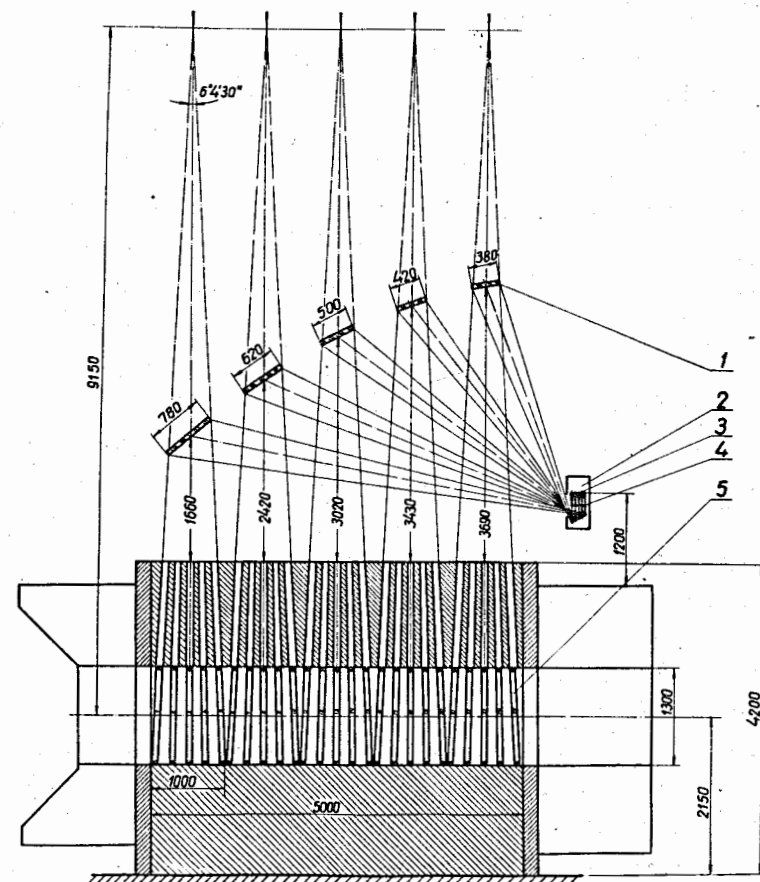


Рис. 16. 1 – зеркало, 2 – фотоаппарат, 3 – пленка, 4 – объективы, 5 – искровые камеры,

измерения глубинной координаты ($\Delta Z = \Delta x \cdot h/b$) зависит от отношения расстояния от фоторегистратора до фотографируемого объекта (h) к базе между стереоаппаратами (b). В нашем случае $h/b = 3,2$. Для сравнения укажем, что в спектрометре ЦЕРНА^{18/} аналогичное отношение равно 4,75.

Возможны два варианта размещения стереоснимков:

- 1) на одной пленке;
- 2) на двух отдельных пленках.

В случае первого варианта используется один лентопротяжный механизм, во втором – два. Первый вариант, в свою очередь, может быть осуществлен в двух модификациях – а) две стереопроекции располагаются на одной пленке последовательно, б) два стереоснимка располагаются параллельно друг другу на одной пленке.

При варианте 1б ширина должна быть не менее 70 мм, и поэтому рассматривать этот вариант не будем, так как на установках ОИЯИ для обработки пленки можно использовать пленку шириной до 50 мм. Анализ вариантов 1а и 2 показал, что хотя вариант 1а является более удобным, так как вся информация о данном событии содержится на одной пленке, он очень трудоемок в практическом выполнении. Был выбран вариант 2. На рис. 16 и 16а показана оптическая схема магнитного искрового спектрометра, соответствующая выбранному варианту фотографирования.

Для получения каждой стереопроекции используется пять объективов. Перед этими объективами поставлены дополнительные зеркала. Введение зеркал позволило сохранить на пленке нормальное расположение изображения треков в соседних группах искровых камер, а также использовать плоский пленочный канал в фоторегистраторе.

Ввиду того, что в настоящее время все имеющиеся программы ЭВМ для восстановления пространственной картины случаев взаимодействия по стереофотографиям с пузырьковых и искровых камер составлены для случая, когда оптические оси объективов стереопар параллельны друг другу и перпендикулярны как к фотографической пленке, так и к горизонтальной плоскости фотографируемого объекта, мы также остановимся на этом варианте.

Протонный синхротрон на 70 Гэв будет выдавать пучки частиц длительностью до 0,8 сек. За это время фоторегистратор и остальные узлы установки должны быть способными обеспечить получение нескольких снимков.

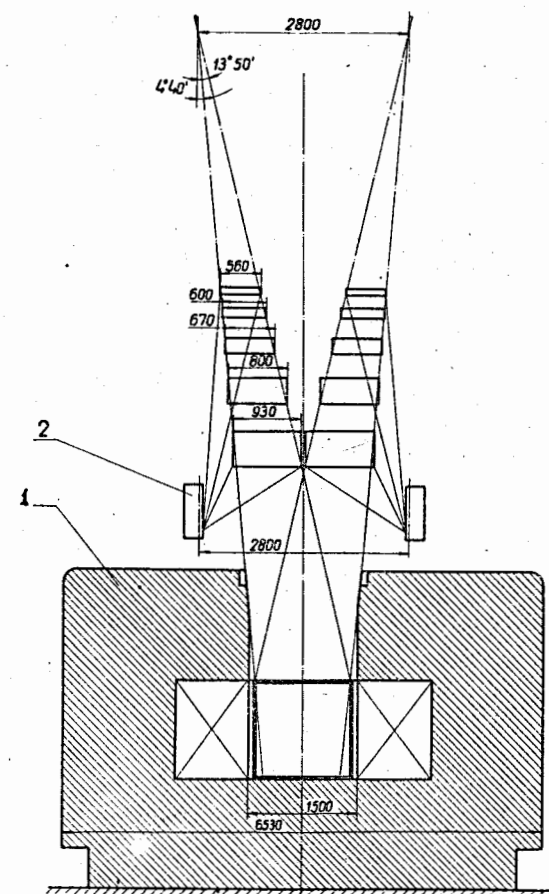


Рис. 16а. 1 – магнит, 2 – фотоаппарат.

§ 3. Выбор ширины пленки и масштаба фотографирования

В таблице 1 приведено диафрагмирование объектива (А) при разных масштабах фотографирования (m) для получения необходимой в нашем случае глубины резкости (± 650 мм). В этой же таблице представлен поперечный размер изображения спектрометра на пленке (a).

Т а б л и ц а № 1

m	1 : 50	1 : 45	1 : 40	1 : 35	1 : 30	1 : 25
А	1 : 13	1 : 15	1 : 17	1 : 19	1 : 22	1 : 26
a (мм)	28	31	35	40	46,7	58

Для фотографирования искровых камер можно использовать только пленки шириной 35 или 50 мм. Это связано с тем, что на создаваемом в ОИЯИ НРД можно будет обрабатывать пленки шириной до 50 мм. При выборе ширины пленки приходится учитывать, что 35-миллиметровая пленка является стандартной и выпускается в больших количествах. Пленка шириной 50 мм будет выпускаться по специальному заказу ОИЯИ и возможны ситуации, когда в нашем распоряжении ее не будет в требуемых количествах в необходимые сроки. Кроме того, длина кадра одной стереопроекции искрового спектрометра в случае 35-миллиметровой пленки около 120 мм, а 50-миллиметровой около 180 мм. В устройстве НРД длина кадра, который может быть обработан за одну установку пленки, составляет ≈ 140 мм. В случае использования пленки шириной 50 мм быстродействующий лентопротяжный механизм фоторегистратора должен осуществлять протяжку пленки, кадр на которой в 1,5 раза длиннее, чем на 35-миллиметровой. С другой стороны, использование 50-миллиметровой пленки позволяет иметь в 1,5 раза больший масштаб фотографирования, что приводит к повышению точности измерений.

В случае использования пленки шириной 50 мм яркость изображения искр будет ослаблена из-за необходимости работать с меньшими диафрагмами.

Мы остановились на неперфорированной пленке шириной 35 мм. Масштаб фотографирования в плоскости наведения составляет 1:45.

В стереофотоаппаратах будут использованы фотообъективы типа Орто-Ниар с фокусным расстоянием около 200 мм.

IV . РЕПЕРНЫЕ МЕТКИ

Для восстановления картины взаимодействия по полученным стереопроекциям был выбран вариант, при котором в объеме расположения искровых камер помещаются реперные метки. Большим достоинством этого варианта является то, что для реконструкции случаев взаимодействия не требуется знать положение фоторегистратора в момент съемки.

Таким образом, восстановление картины взаимодействия будет производиться по реперным меткам, расположенным в двух плоскостях (см. рис. 17).

Фотографирование всего объема искровых камер спектрометра осуществляется пятью парами объективов, поэтому необходимо осуществлять прослеживающие треки, проходящих через группы искровых камер, просматриваемых разными парами объективов. Для облегчения этой задачи два реперных креста, расположенные в нижней плоскости, являются общими у двух соседних областей.

Для нанесения реперных меток на фотографии в нашем случае необходимо импульсно освещать 32 креста.

Освещение каждого креста отдельным источником света сделало бы систему подсветки очень ненадежной. Необходимость контроля за относительной интенсивностью свечения большого количества импульсных ламп сильно усложнила бы систему подсветки. Кроме того, сложно быстро производить замену вышедших из строя импульсных ламп, расположенных в труднодоступных местах спектрометра.

Удобно для освещения крестов использовать гибкие световоды, которые от двух импульсных осветителей подведут свет ко всем реперным меткам. Использование таких световодов позволяет вынести из сильного магнитного поля импульсные лампы, что увеличит срок их службы.

В качестве источника кратковременных световых вспышек будут использованы ксенонные импульсные лампы типа ИФП, применяемые для освещения рабочих объемов обычных трековых камер. Разработанная схема генератора позволит производить несколько вспышек импульсной лампы за один цикл ускорения.

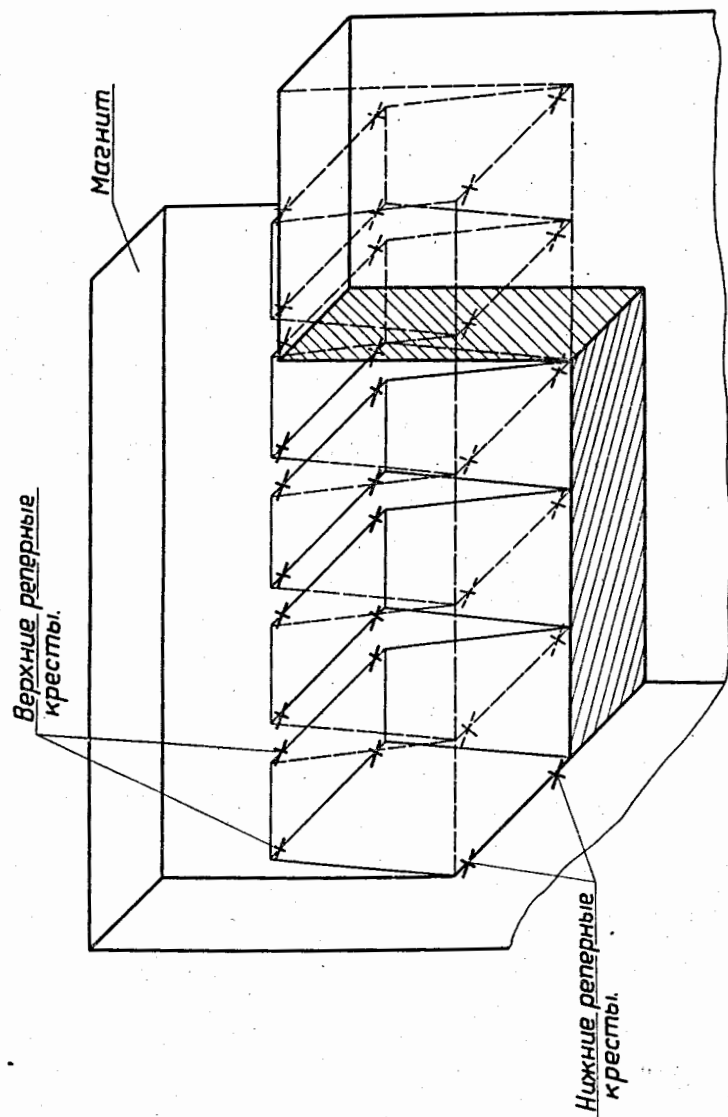


Рис. 17.

V . ОБЩИЙ ВИД ФОТОГРАФИИ С МИС

Расположение на кадре изображения искровых камер и служебной информации показано на рис. 18. Служебная информация – номер кадра, номер рулона, номер стереопроекции и дата эксперимента – в двоичном коде размещается после стоп-марок Бренера. Размеры меток кода, меток начала снимка и марок Бренера, а также их расположение на пленке соответствуют стандарту, принятому в ЦЕРНе^{/8/}.

Для удобства работы с пленкой перед стоп-марками будет наноситься цифровой номер кадра. Этот номер расположен за пределами обрабатываемого кадра, в случае обработки пленки на НРД, и не предназначен для считывания устройством с бегущим лучом.

На рис. 18 показано двадцать пять прямоугольников. В действительности, каждый из них представляет собой изображения двух стандартных модулей искровых камер. Зазор между электродами в искровом модуле 30 мм. В процессе измерений в каждом зазоре стандартного искрового модуля должно быть осуществлено три измерения положения искры в межэлектродном промежутке – в его центре и на расстоянии 5–7 мм от него.

Точность измерения трека в горизонтальной плоскости спектрометра должна быть не хуже 0,5 мм, в эту величину включена как ошибка, вносимая оптической системой, так и измерительным устройством. Мы надеемся, что точность будет достигнута в 1,5–2 раза лучшая, чем указана.

VI . ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ФОТОГРАФИЙ

Сооружаемый в ОИЯИ магнитный искровой спектрометр будет способен выдавать ежегодно несколько миллионов фотографий. Очевидно, что такой большой объем информации не может быть обработан с помощью автоматов и полуавтоматов, позволяющих обрабатывать около 20–30 тысяч событий в год на каждом из этих приборов.

Наиболее перспективными для обработки фотографий с искрового спектрометра являются устройства растрового разложения снимков типа НРД и Люсиоль.

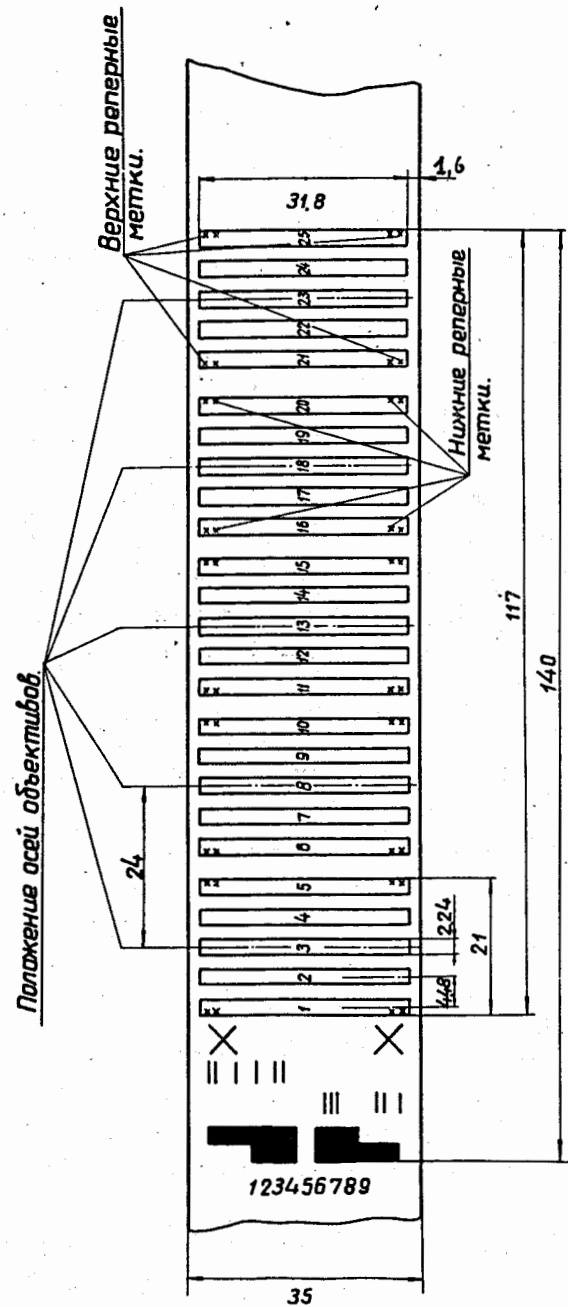


Рис. 18.

Установка типа НРД обеспечивает большую точность измерения координат треков (цена отсчета координат 1,6 мк на пленке) и позволяют обрабатывать до 1 миллиона событий в год. Работающие в ряде зарубежных лабораторий установки типа Люсиоль позволяют повысить скорость обмера координат трека по сравнению с НРД почти в десять раз, но точность измерения координат получается на порядок хуже, чем НРД. Следует отметить, что при обработке фотографий с искровых камер на НРД отпадает необходимость в предварительном просмотре снимков операторами и использования "цифровой маски", так как на снимках с искровых камер в отличие от снимков с пузырьковых камер нет посторонних пучковых треков.

Таким образом, использование устройств типа НРД и Люсиоль позволяет полностью автоматизировать анализ снимков с искрового спектрометра.

Кажется очевидным, что первое время после запуска искрового спектрометра целесообразно начать обработку получаемых снимков на НРД, так как по-видимому, в это время в ОИЯИ только установка НРД будет находиться полностью в рабочем состоянии и будет обеспечена системой необходимых программ. В дальнейшем обработка будет производиться на установке со сканирующим устройством на электронно-лучевой трубке.

При обработке фотографий с магнитного спектрометра эти измерительные устройства должны обеспечивать в горизонтальной плоскости, в направлении, перпендикулярном первичному пучку, точность индивидуального измерения не хуже 0,2 (на пленке не хуже 5 мк), что касается точности измерений в направлении, параллельном первичному пучку, то она может быть в 2-3 раза хуже. Это связано с тем обстоятельством, что по координатам трека определяется кривизна трека (иными словами, стрела прогиба трека), следовательно, наибольшая точность измерений должна быть в направлении, перпендикулярном первичному пучку.

ВИИ . ТОЧНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ИМПУЛЬСОВ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Относительная точность измерения импульсов является одной из главных характеристик магнитного искрового спектрометра. Эта величина без учета

многократного рассеяния в фольге искровых камер может быть определена из выражения /6/.

$$\frac{\Delta P}{P} = 93 \frac{\sigma_y}{\sqrt{N} \ell^2} \cdot \frac{P}{H}$$

где P – импульс частицы (Мэв/с);

σ_y – ошибка в определении координат траектории частицы в плоскости, перпендикулярной к магнитному полю (см);

H – напряженность магнитного поля (к эрстед);

ℓ – длина трека в магнитном поле (см);

N – число измеренных точек на треке.

Погрешность в значении $\Delta P/P$ за счет многократного рассеяния в пластинах искровых камер может быть определена из выражения (3) приложения II.

Кривая на рис. 18 показывает погрешность, вносимую в измерение импульса частиц за счет многократного рассеяния. Из приведенного рисунка видно, что при выбранной толщине электродов модулей искровых камер (0,1 мм) многократное кулоновское рассеяние не оказывает существенного влияния на точность измерения импульса частиц, начиная с 1 Гэв/с и выше. Детали расчетов приведены в приложении II.

На рис. 20 для разных величин импульсов приведена относительная точность измерения импульсов частиц в зависимости от длины трека частиц в искровом спектрометре. Эти кривые получены в предположении, что $H = 17$ кэрстед и $\sigma_y = 0,5$ мм.

VIII . РЕГИСТРАЦИЯ γ -КВАНТОВ ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

При энергиях 60 Гэв в πp -взаимодействии средняя множественность образования нейтральных пионов равна двум. Необходимо, чтобы в спектрометре наряду с точными измерениями импульсов заряженных частиц было возможно с большой эффективностью регистрировать гамма-кванты от π^0 -мезонов, иначе не удастся осуществить реконструкцию событий. Для регистрации гамма-квантов

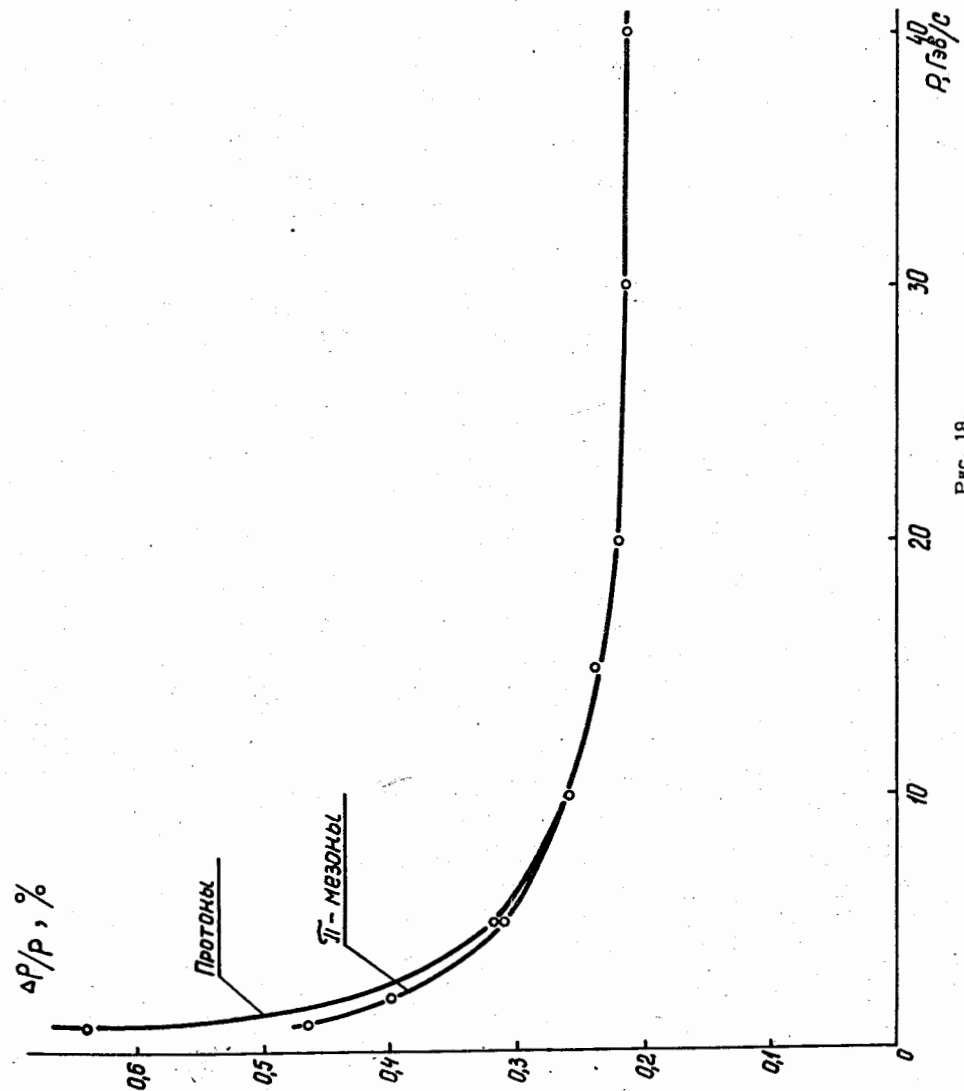


Рис. 18.

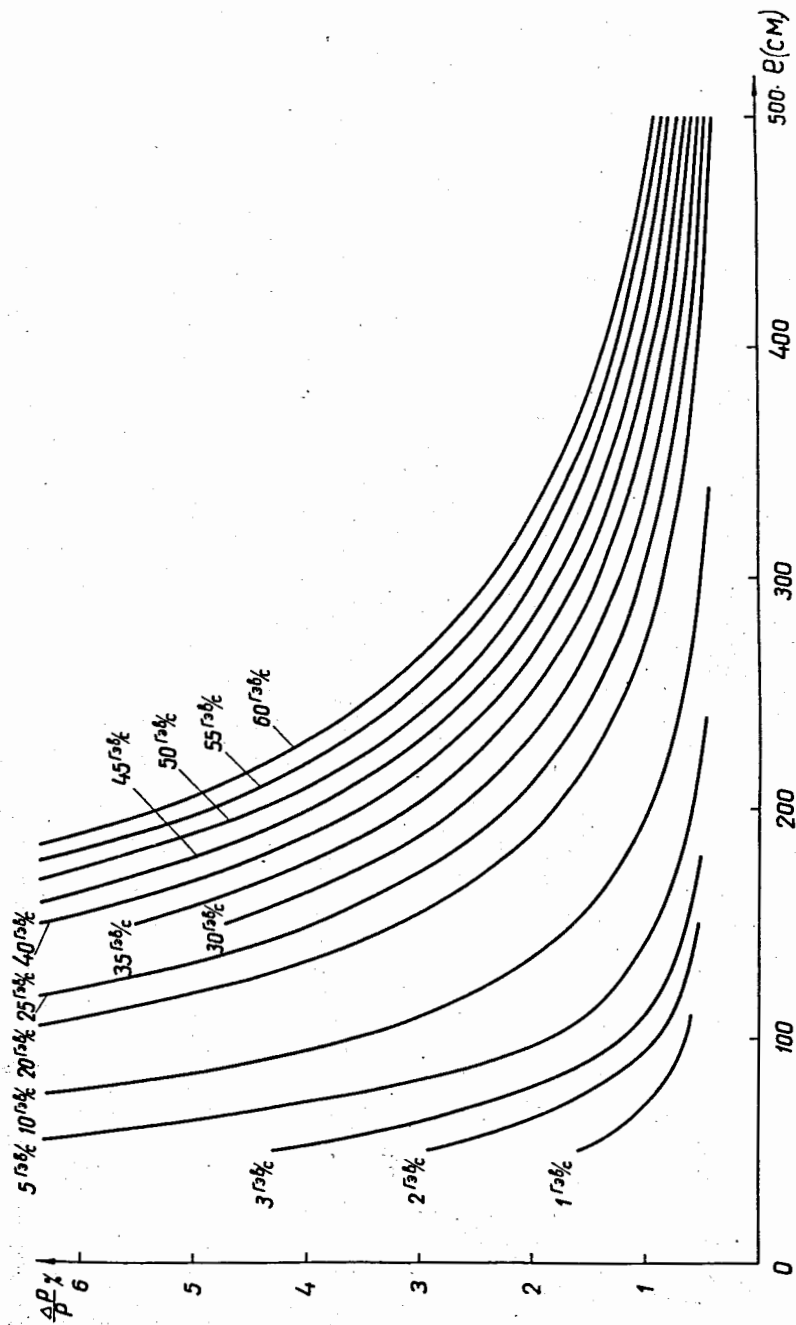


Рис. 20.

между искровыми камерами будут установлены латунные конверторы с отверстием в средней части. Гамма-кванты от π^0 -мезонов будут вызывать в этих конверторах ливни электронов с эффективностью, близкой к 100.

Для регистрации гамма-квантов, вылетающих под малым углом к первичному пучку, в конце спектрометра перед искровыми камерами будут установлены сплошные конверторы.

На рис. 21 приведены кривые эффективности регистрации γ -квантов, вылетевших из мишени под углом θ относительно оси спектрометра, в зависимости от толщины отдельного конвертора. Из этого рисунка видно, что выбор толщины конвертора, равной одной радиационной длине (для меди толщина $\approx 1,5$ см), обеспечивает удовлетворительную эффективность регистрации γ -квантов в спектрометре.

Расчет кривых рис. 21 производится в соответствии с формулами приложения III.

IX . ПУЧОК

Искровой спектрометр предполагается установить на пучке № 4В ИФВЭ с импульсом частиц до 40 Гэв/с. Проектируемые параметры пучка: разброс по импульсу $\frac{\Delta P}{P} = 3\%$, размеры на мишени спектрометра $5 \times 5 \text{ см}^2$, примерное число π^- -мезонов, K^- -мезонов и антипротонов соответственно $2 \cdot 10^5$, $2 \cdot 10^4$ и $2 \cdot 10^3$ частиц при 10^{11} протонов в ускорителе в цикле.

Для более точного определения импульса частиц, падающих на мишень, предполагается использовать систему проволочных искровых камер ИК₁-ИК₈ вместе с отклоняющим магнитом СП12А1 (рис. 22). Всего будет использовано четыре группы искровых камер, две из которых будут расположены перед магнитом и две - за магнитом.

Для увеличения эффективности регистрации каждая группа состоит из двух искровых камер. Параметры камер: размеры $10 \times 10 \text{ см}^2$, расстояние между электродами 6 мм, между нитями - 1 мм.

В каждой камере имеется два проволочных электрода, информация о месте прохождения частицы через камеру снимается с обоих электродов. Расстояние между искровыми камерами ИК_{1,2}— ИК_{3,4} и ИК_{5,6}— ИК_{7,8} будет около

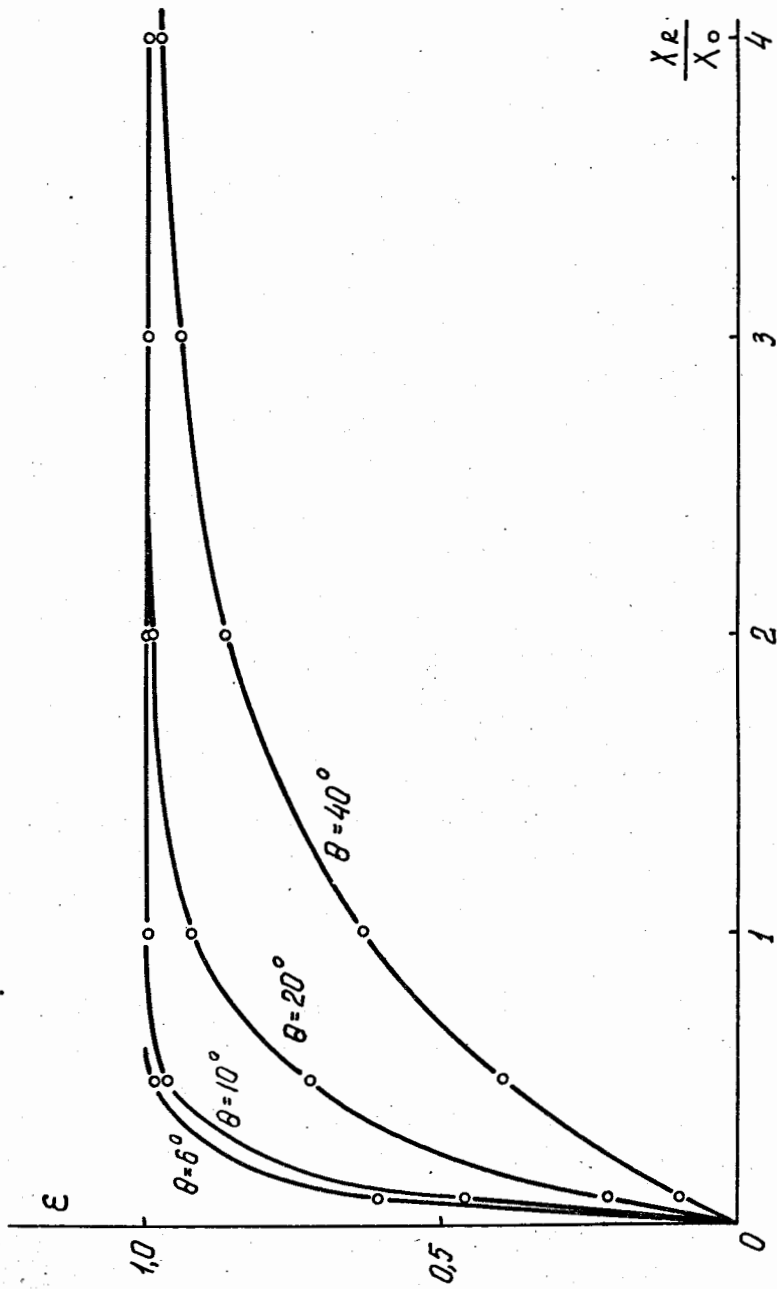


Рис. 21. Зависимость эффективности регистрации u -квантов от толщины конвертора.
 θ - угол движения u -кванта относительно оси спектрометра.

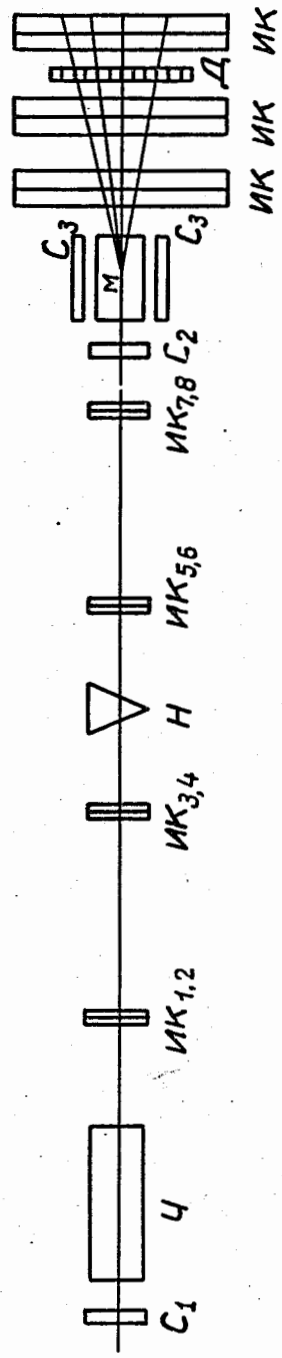


Рис. 22.

10м, при этом будет возможно определение импульса частицы с точностью не хуже 0,3% (с учетом многократного рассеяния частиц в электродах камер) и направления первичной частицы с точностью $\Delta\alpha = 0,0002$ рад.

Вывод информации с проволочных камер может быть осуществлен разными путями:

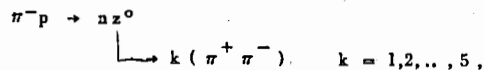
а) информация с камер будет вводиться в ЭВМ БЭСМ-4. Результаты обработки (импульс и направление частицы, координаты входа в мишень, номер события) могут храниться на магнитной ленте с последующей обработкой при просмотре фотопленок с изображением спектрометра;

б) информация с камер выводится на ламповые регистры, которые фотографируются вместе с искровыми камерами спектрометра.

X. СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСКРОВОМ СПЕКТРОМЕТРОМ

Пучок первичных частиц, проходящих через жидководородную мишень, выделяется сцинтилляционными S_1, S_2 и пороговым черенковским Ч счетчиками (рис. 22).

Для регистрации случаев взаимодействия в водородной мишени, в частности, например, реакции



в которой из мишени вперед вылетает несколько заряженных частиц, используется детектор Д. Возможны несколько вариантов расположения этого детектора:

а) счетчик на пучке первичных частиц за искровыми камерами с тонкими электродами, включенный на антисовпадения со счетчиками S_1, S_2 ;

б) система из 20-30 сцинтилляционных счетчиков, расположенных на расстоянии 4 м от мишени за камерами с тонкими электродами и включенных на совпадения. Следует отметить, что в случаях а) и б) будут регистрироваться лишние события, связанные с взаимодействием частиц в газе и электродах искровых камер спектрометра (толщина вещества на пути частиц только в камерах с тонкими электродами около 3 г/см^2);

в) счетчик вне пучка за мишенью, включенный на совпадения. В случае, когда детектор Д устанавливается за мишенью, расположенной в магнитном поле, к этому детектору предъявляются следующие требования: возможность работы в сильном магнитном поле и небольшая толщина (в единицах радиационной длины $\approx 0,01$) на пути вторичных частиц. В качестве одного из вариантов детектора решено использовать многоканальную систему быстродействующих газоразрядных счетчиков с ограниченной пропорциональностью. Параметры счетчиков: диаметр катода 10 мм, длина 100 и 300 мм, катод из нержавеющей стали толщиной 0,15 мм, наполнение - метилаль.

Счетчики будут располагаться на расстоянии 1-1,5 м от мишени. Импульсы по кабелям будут передаваться на усилители с коэффициентом усиления $\approx 10^3$ и временем нарастания 50 нсек. Электронная схема должна выделять события, когда из мишени вылетело вперед две или больше заряженных частиц.

Для отбрасывания событий, в которых заряженные частицы и γ -кванты вылетают из мишени под большим углом к пучку частиц, будет использоваться счетчик антисовпадений S_3 , расположенный вокруг водородной мишени.

Для регистрации событий, когда из мишени не выходят заряженные частицы, будет использован счетчик, окружающий водородную мишень со всех сторон и включенный на антисовпадения.

XI . МАГНИТ И ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Рабочий объем магнита, в котором будут расположены искровые камеры, имеет размеры: высоту - 1300 мм, ширину - 1500 мм и длину - 5000 мм. В верхней балке магнита имеются щели, через которые производится фотографирование искровых камер спектрометра. При 50% заполнении верхней балки сталью напряженность магнитного поля в центре рабочего объема магнита равна 17 кэрстед, при напряжении на обмотке 600 в, токе возбуждения 8300 А^х). Общий вес магнита около 830 т, из них алюминиевая обмотка весит 45 т. На рис. 23 представлен общий вид магнита СП-136.

^х) В дальнейшем использование более мощного источника питания позволит повысить напряженность магнитного поля в рабочем объеме магнита до 20 кэрстед.

Измерения магнитного поля будут осуществляться с помощью датчика Холла. ЭДС датчика будет регистрироваться цифровым вольтметром.

Разрабатывается механическое устройство, с помощью которого датчик Холла будет перемещаться в рабочей области магнита. В этом устройстве используется зубчатый механизм с остановкой. Применение этого механизма позволяет повысить точность измерения координат места расположения датчика магнитного поля. Датчик Холла будет перемещаться по каждой из трех осей (x, y, z) ступенями по 10 мм с точностью 0,1 мм. Перемещение датчика Холла будет осуществляться с помощью электродвигателей. Датчики положения с помощью блока цифровых ламп покажут на пульте управления координаты датчика Холла. Эти координаты в двоичном коде, а также показания цифрового вольтметра будут зарегистрированы перфоратором. Точность измерения магнитного поля может быть доведена до 0,1%.

XII . МОНТАЖНО-ВЫДВИЖНОЕ УСТРОЙСТВО

Предусматривается конструкция, с помощью которой все модули искровых камер спектрометра будут крепиться на монтажной тележке. В случае необходимости монтажная тележка со смонтированными на ней искровыми камерами спектрометра вместе с разрядниками и подходящими к ним газовыми и электрическими коммуникациями будет выдвигаться из магнита. Это обеспечит удобный доступ ко всем искровым камерам, как в период монтажа и наладки, так и во время ремонта установки. В случае необходимости весь блок искровых камер может быть не только вынут из магнита, но и убран с пучка частиц.

На рис. 23 представлено расположение магнита СП-136, фермы для крепления зеркал и фоторегистраторов, а также показаны искровые камеры спектрометра, выдвинутые из магнита.

Для того чтобы при необходимости открыть доступ к верхней балке магнита СП-136, предусмотрена конструкция, с помощью которой ферма для крепления зеркал может быть сдвинута в сторону, а затем точно возвращена на прежнее место.

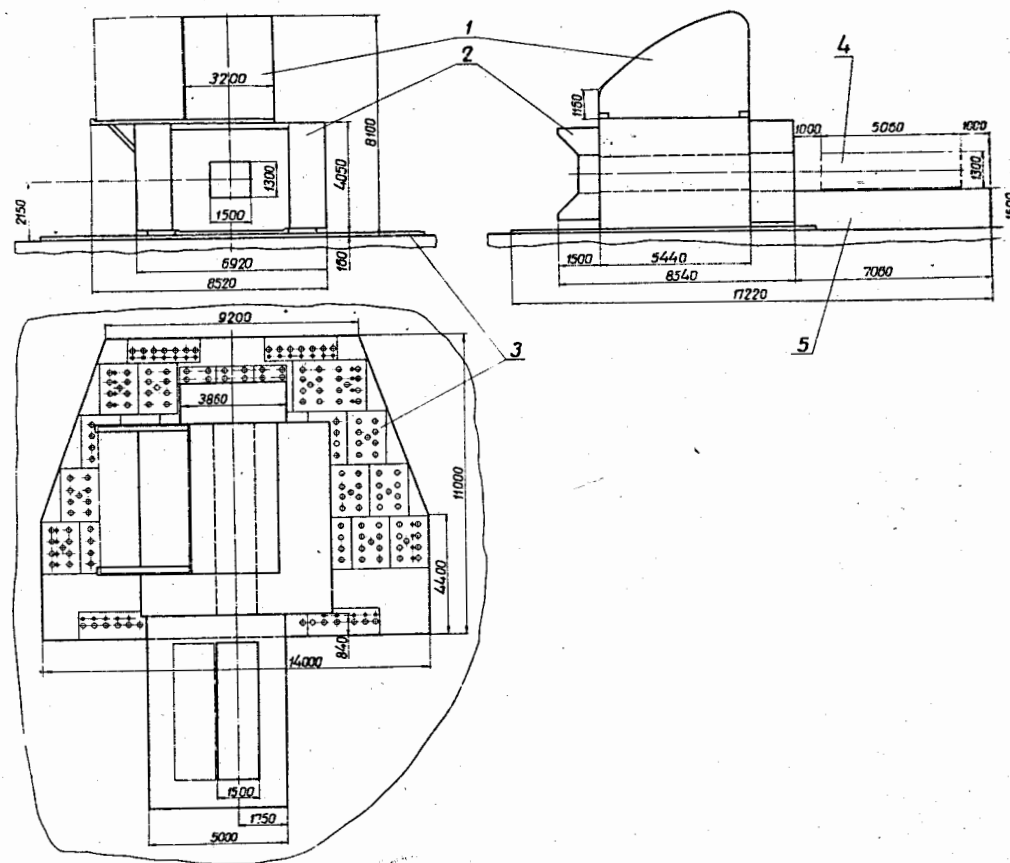


Рис. 23. Общий вид магнита СП-136. 1 - ферма для крепления зеркал, 2 - электромагнит СП-136, 3 - плита фундаментная, 4 - тележка с искровыми камерами, 5 - ферма опорная.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Настоящее описание составлено с целью ознакомления с основными параметрами проектируемого магнитного искрового спектрометра с тем, чтобы дать возможность широкому кругу физиков ОИЯИ и стран-участниц принять участие в выработке конкретных предложений по экспериментам на базе спектрометра.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность группе польских физиков: М. Данышу, Р. Сосновскому, М. Шептычке, В. Вуйцику, Л. Михейде за постоянную поддержку в работе и ценные советы; В.П. Джелепову и Л.И. Ланидусу за интерес к работе и постоянную помощь; Я. Малы за обсуждение вариантов оптической системы МИС ОИЯИ; Ю.А. Каржавину, В.Н. Шпгаеву, В.Н. Шкунденкову за плодотворные обсуждения вопросов, связанных с обработкой фотографий; А.Н. Синаеву и А.А. Сафрошкиной за участие в разработке системы проволочных камер. Авторы благодарят также И.Ф. Малышева, Б.В. Рождественского и В.П. Муратова за содействие в разработке спектрометра.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Расчет импульсных генераторов

Время формирования импульса генератором может быть найдено из уравнения:

$$u = u_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (1)$$

где u — напряжение на емкости C_2 , u_0 — величина постоянного напряжения, подводимого к генератору, τ — постоянное время зарядки, равное $\tau = (R_1 + R_3)C_1 + (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)C_2$. Принимая $C_1 = C_2 = C$ и $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$, находим: $\tau = 6RC$. Для полной зарядки цепей генератора необходимо выполнить условие $\tau \approx \frac{1}{5} \frac{1}{f}$, где f — частота срабатывания спектрометра, равная 50 Гц. Учитывая, что $C = 20$ нФ, находим: $R \approx 30$ ком.

Изменение во времени импульса напряжения, поступающего на модули, можно описать следующим уравнением:

$$u_H = u_0 \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) \right] \alpha \beta, \quad (2)$$

где n — число каскадов генератора, равное 2, β — коэффициент использования генератора,

$$\beta = C / (C + 2C_M),$$

где C_M — емкость двух модулей, равная 1 нФ и $C = 20$ нФ. Принимая во внимание эти данные, имеем $\beta \approx 0,91$.

Величина τ_1 в формуле (2) есть постоянная времени нарастания импульса на электродах модулей. Эта величина находится по формуле:

$$\tau = \frac{C \cdot C_M}{C + 2C_M} \cdot \frac{3R_1 \cdot R_5}{3R_1 + R_5},$$

где R_1 — внутреннее сопротивление разрядников генератора в момент пробоя. Для воздушных разрядников принимается ^{1/1}

$$R_1 = k \frac{L}{Q}, \quad (4)$$

где k — коэффициент, равный $0,8 \cdot 10^{-3}$ ом к/см, L — величина зазора между электродами в см и Q — количество электричества в кулонах, проходящего через искровой разрядник. В случае шаровых электродов с радиусом закругления ≈ 1 см для $u_0 = 20$ кВ $L = 0,7$ см ^{1/1}. Величина $Q = 2 C U_0 = 2 \cdot 20 \cdot 10^{-9} \cdot 20 \cdot 10^3 = 8 \cdot 10^{-4}$ кул. Следовательно, из формулы (4) находим $R_1 \approx 1$ ом. Взяв $R_5 \gg R_1$ и учитывая, что $C \gg C_M$ получаем для величины τ_1 следующее приближенное значение:

$$\tau_1 \approx 3 \cdot R_1 \cdot C_M \approx 3 \cdot 10^{-9}.$$

Время полного нарастания импульсов на камерах характеризуется временем $\tau_{\phi} \approx 3 \tau_1 \approx 9 \cdot 10^{-9}$ сек. В действительности же это время будет несколько больше из-за влияния индуктивности подводющих проводов, и оно может быть оценено по следующей формуле ^{2/2}:

$$\tau_{\phi \max} = \sqrt{LC_{\text{эКВ}}} \left\{ \pi + \arctg \left[\frac{\tau}{2} \sqrt{\frac{C_{\text{эКВ}}}{L}} \right] \right\}, \quad (5)$$

где $r = 3R_1 + R$ проводов, L — индуктивность проводов и $C_{\text{экв}} = C \cdot C_M / (C + 2C_M)$.
Формула (5) справедлива для момента времени, когда в камере не наступил электрический пробой.

Здесь уместно привести еще два уравнения, описывающих режим работы системы генератор—камера [2].

а) Если известна индуктивность L системы генератор—камера, то рост напряжения на камере до ее пробоя может быть найден по более точной формуле, нежели формула (2):

$$u_H = n \beta u_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{rt}{2L}\right) \cos \frac{t}{\sqrt{LC}} \right]. \quad (6)$$

б) Максимальный ток, текущий через разрядники генератора Γ , определяется следующим выражением:

$$I_{\text{max}} = n \beta u_0 \sqrt{\frac{C_{\text{экв}}}{L}} \exp\left[-\frac{\pi}{1} r \sqrt{\frac{C_{\text{экв}}}{L}}\right]. \quad (7)$$

Величина r_2 , входящая в формулу (2), есть постоянная времени спада напряжения на камере:

$$r_2 = \left(\frac{C}{2} + C_M\right)(3R_1 + R_5). \quad (8)$$

Это соотношение дано для случая отсутствия пробоев. Принимая за полное время спада $r_C = 3 \cdot r_2 = 10^{-6}$ сек, находим: $R_5 = 30$ ом.

Рассмотрим еще три токовые характеристики генератора: максимальный ток зарядки, средний ток зарядки в период регистрации частиц от ускорителя и ток, усредненный за полный цикл работы ускорителя ($T = 0,3$ сек + 6 сек = 6,3 сек). Знание этих величин необходимо для выбора источника питания генераторов.

Очевидно, что максимальный ток зарядки одного генератора равен:

$$i_{\text{max}} = \frac{u_0}{R + \frac{R}{2}} = \frac{20 \cdot 10^3}{(25 + 12) \cdot 10^3} = 0,5 \text{ а}. \quad (9)$$

Средний ток зарядки генератора в период регистрации частиц может быть найден по формуле:

$$I = \frac{\Sigma Q}{0,3 \text{ сек}}; \quad (10)$$

где $\Sigma Q = (C_1 + C_2) u_0 f \cdot 0,3$. Для рассматриваемого генератора $C_1 = C_2 = 20$ нф, $u_0 = 20 \cdot 10^3$ в и $f = 50$ гц, поэтому $\bar{i} = 40 \cdot 10^{-3}$ а.

Усредненный же ток зарядки генератора за полный цикл работы ускорителя равен:

$$\bar{i} = \frac{\bar{i} \cdot 0,3}{6,3} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ а}.$$

П Р И Л О Ж Е Н И Е II

Оценка влияния многократного кулоновского рассеяния на точность измерения импульсов

Кулоновское многократное рассеяние будем рассматривать, учитывая действие магнитного поля, выводящего частицы за пределы регистрирующей области спектрометра. Радиусы кривизны ρ (М) частиц с импульсом p (Мэв/с) в магнитном поле H (гаусс) определяются формулой [9]:

$$\rho = 33,33 \frac{p}{H}. \quad (1)$$

Рассмотрим картину прохождения частиц разной энергии, летящих вдоль оси спектрометра в плоскости, перпендикулярной магнитному полю. На рис. 24 изображена траектория частицы с радиусом кривизны ρ , выходящей под действием магнитного поля за пределы регистрирующей области спектрометра на расстоянии L от "входного окна" спектрометра. Используя зависимость ρ от p , можно получить значения L при различных импульсах частиц (таблица 1).

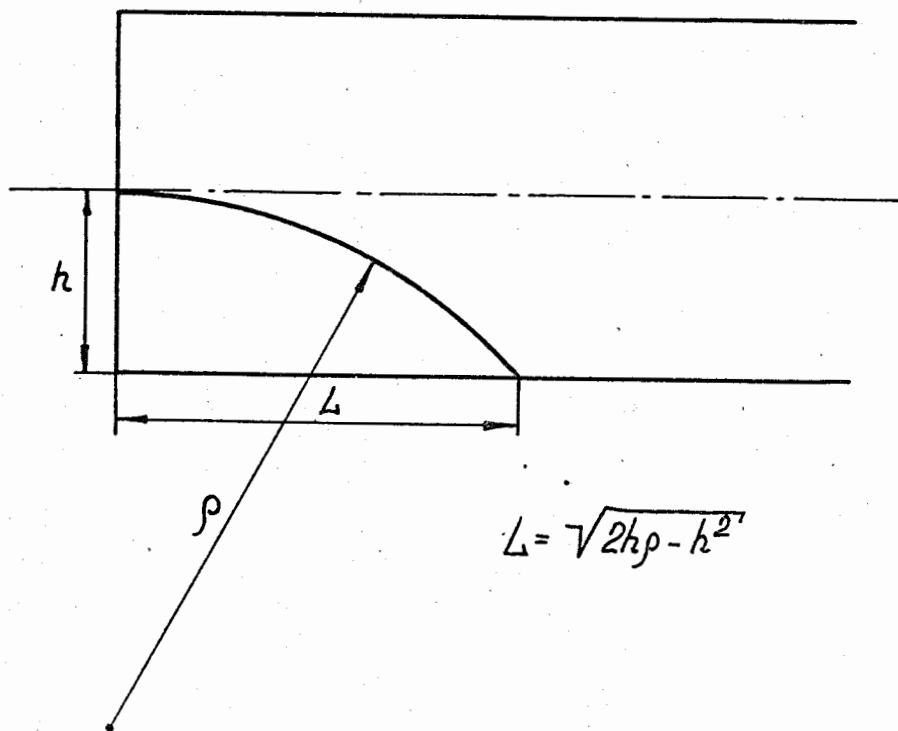


Рис. 24. Иллюстрация связи радиуса кривизны траектории частицы и длины ее пути в регистрирующей области спектрометра.

Т а б л и ц а 1

P, Гэв/с	1	2	5	10	15	20
L, м	1,1	1,5	2,4	3,4	4,2	4,8

Из этой таблицы видно, что частицы с импульсом ≤ 20 Гэв/с покидают регистрирующую область спектрометра под действием магнитного поля.

Полученные данные позволяют вычислять среднеквадратичный угол кулоновского рассеяния в фольгах искровых модулей спектрометра для частиц с различными импульсами (см. рис. 25). Вычисления производились по формуле ^{/10/}:

$$\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} = \frac{15 \cdot 10^{-8}}{P \beta c} \cdot \sqrt{\frac{x}{x_0}}, \quad (2)$$

P - импульс частицы в Гэв/с, x - суммарный путь частицы в фольгах, x_0 - радиационная длина для алюминия. Толщина каждого электрода принималась равной 0,1 мм.

Более точный учет ошибки, вносимой кулоновским рассеянием в измерение импульса, осуществлялся по формуле:

$$\frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \frac{21}{0,3 \beta H \sqrt{x_0}} \cdot \frac{\sqrt{x}}{\ell}, \quad (3)$$

которая получена видоизменением выражения для $\Delta P/P$ ^{/11/}, справедливого для однородной среды. В формуле (3) H выражено в килогауссах, x_0 , x и ℓ - в сантиметрах (ℓ - длина трека). На рис. 19 приведена зависимость $\Delta P/P$ от импульса.

П Р И Л О Ж Е Н И Е III

Выбор толщины конверторов

Число γ -квантов высокой энергии, прошедших через слой вещества толщиной x , характеризуется формулой ^{/12/}

$\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} \cdot 10^4, \text{ радian.}$

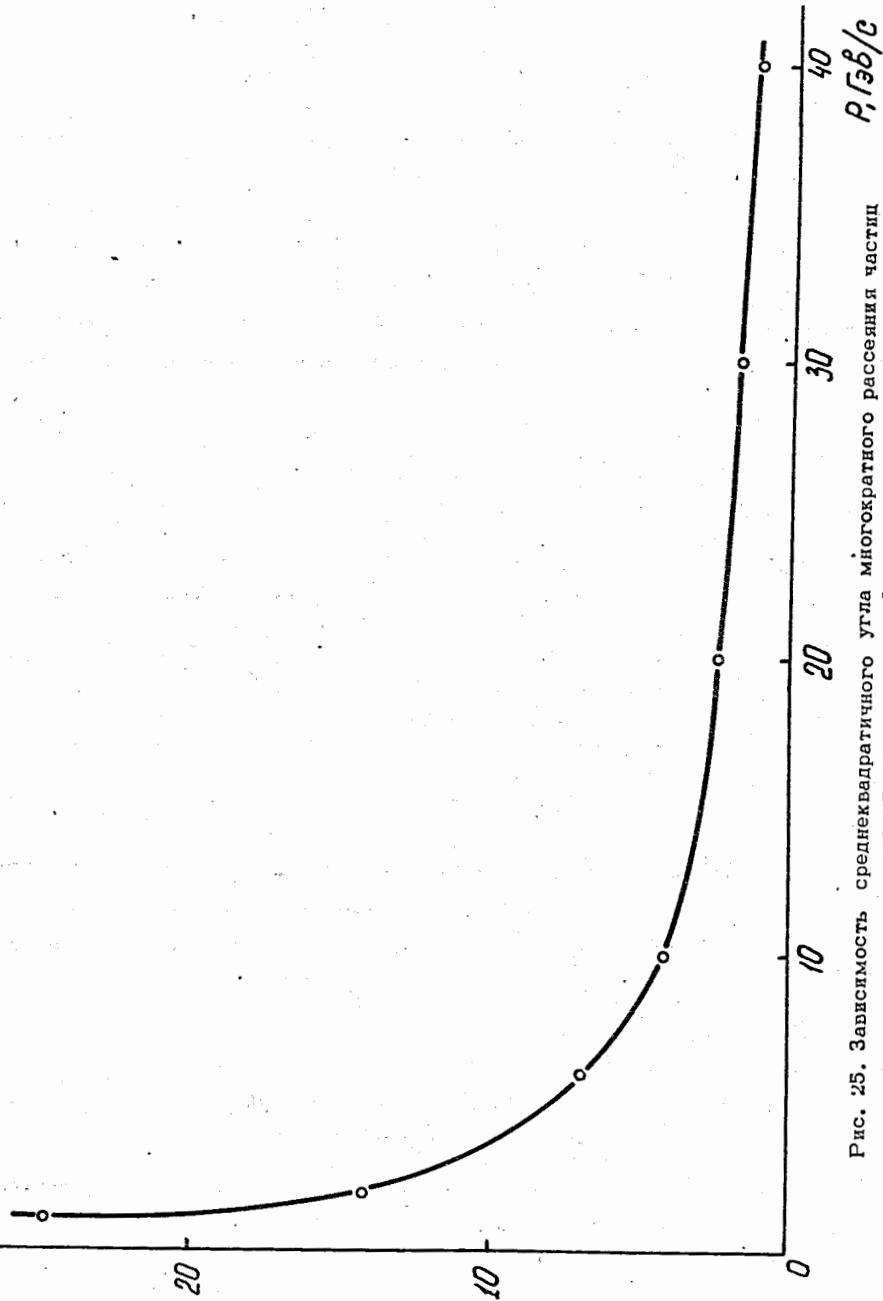


Рис. 25. Зависимость среднеквадратичного угла многократного рассеяния частиц на электродах модулей от импульса.

$$N_{\gamma} = N_{\gamma 0} e^{-\frac{\gamma}{\theta} \frac{x}{x_0}} \quad (1)$$

где $N_{\gamma 0}$ - первоначальное число γ -квантов, x_0 - радиационная длина, характеризующая вещество. Величину x свяжем с толщиной отдельного конвертора x_R , принимая, что все конверторы имеют одинаковую толщину: $x = n x_R / \cos \theta$, где n - число конверторов. $\cos \theta$ учитывает наклон траектории γ -кванта по отношению к оси спектрометра.

Исходя из формулы (7), эффективность регистрации γ -квантов, образовавшихся при распаде π^0 -мезонов, можно выразить следующим образом:

$$\epsilon = \frac{N_{\gamma 0} - N_{\gamma}}{N_{\gamma 0}} \cdot \epsilon_e \cdot \eta = (1 - e^{-\frac{\gamma}{\theta} \frac{n x_R}{\cos \theta x_0}}) \cdot \epsilon_e \cdot \eta(x_R, E_{\gamma}) \quad (2)$$

ϵ_e - эффективность регистрации электронов и позитронов в искровых промежутках спектрометра; $\eta(x_R, E_{\gamma})$ - коэффициент, зависящий от толщины конвертора и энергии γ -квантов, который учитывает уменьшение эффективности регистрации γ -квантов из-за рассеяния и поглощения электронов и позитронов в конверторе. Оценки коэффициента η на основании результатов работ [13, 14] показывают, что $\eta \approx 1$ для энергий γ -квантов, больших 200 Мэв, и толщины конвертора, лежащих в интервале $0 \leq x_R \leq 4 x_0$. Расчет кривых на рис. 21 производился по формуле (2) в предположении, что $\epsilon_e = 1$.

Л и т е р а т у р а

1. Ф. Фрюнгель. Импульсная техника. "Энергия", М.-Л, 1965.
2. Конверси. Приборы для научных исследований (русс. перевод), 7, 72, 1962.
3. S. Bernstein, D.W. McLeod, T.T. Phelan, W.L. Rickhoff, A. Roberts, W.A. Siljander, G.E. Yurka. Purdue Conference on Instrumentation for High Energy Physics, IEEE N,S-12, p.120, 1965.
4. H. Faissner, CERN 63-37, p.43, 1963.
5. А.М. Благородов, В.В. Владимирский, В.К. Григорьев, А.П. Гришин, И.А. Ерофеев, Г.М. Кукавадзе, В.В. Миллер, Л.И. Мурза, Н.В. Новикова, А.А. Панов, Ю.С. Плигин, И.А. Радкевич, В.В. Соколовский, Ю.Ф. Томашук, Г.Д. Тихомиров, Л.К. Турчанович, Б.М. Яковлев. Препринт ИТЭФ 521, 1967.

6. P.Astbury, G.Finocchiaro, A.Michelini, D.Websdale, C.H.West, W.Beusch, B.Gobbi, M.Pepin, E.Polgar, M.A.Pouchon, Nucl.Instr. and Methods 46, 61, 1967.
7. Ю.Д. Баяков, Г.А. Лексин, Д.А. Сучков, В.В. Теленков. ПТЭ, 2, 45 (1963).
8. G.Duraphy, H.List, I.Sharp, CERN 66-36, 1966.
9. Д. Ритсон. Экспериментальные методы в физике высоких энергий. Наука, 1984.
10. High Energy and Nuclear Physics Data Handbook.
The National Institute for Nuclear Research in Nuclear Science 1963.
11. H.Brandner, Annual Review Science, 10, 109 (1960).
12. С.З. Беленький. Лавинные процессы в космических лучах. Гостехиздат, 1948.
13. А.А. Тяпкин. Кандидатская диссертация, ОИЯИ, 1958 г.
14. R.R.Wilson, Phys.Rev., 85, 261 (1952).

Рукопись поступила в издательский отдел
13 ноября 1987 г.