

Г-124

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



13 - 3503

А.С. Гаврилов, И.А. Голутвин, Ю.В. Заневский,  
А.Д. Кириллов, С.С. Кирилов, Б.А. Кулаков,  
Л.Г. Макаров, Э.И. Мальцев, П.И. Филиппов,  
О.Н. Цисляк, Э.Н. Цыганов

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  $\pi^- p$   
РАССЕЯНИЯ НА  $180^\circ$

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

1967.

13 - 3503

5541/3 нр.

А.С. Гаврилов, И.А. Голутвин, Ю.В. Заневский,  
А.Д. Кириллов, С.С. Кирилов, Б.А. Кулаков,  
Л.Г. Макаров, Э.И. Мальцев, П.И. Филиппов,  
О.Н. Цисляк, Э.Н. Цыганов

УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  $\pi$  Р  
РАССЕЯНИЯ НА  $180^\circ$



В работе<sup>1/</sup>, посвященной измерению  $\pi^-p$  рассеяния "назад" в пучке  $\pi^-$ -мезонов в интервале импульсов 4,0 - 7,0 Гэв/с, изложены физические результаты и дано очень краткое описание аппаратуры и обработки измерений.

В настоящей статье дается подробное описание аппаратуры и ее работы, а также обработки результатов измерений. Мы будем касаться результатов, изложенных ранее, лишь для цельности изложения.

В статье освещены следующие вопросы:

1. Магнитный канал.
2. Сцинтилляционные и черенковский счетчики.
3. Электроника для запуска установки.
4. Система питания и запуска искровых камер.
5. Аналоговые искровые камеры.
6. Магнитострикционные искровые камеры.
7. Программа учета геометрии установки.
8. Обработка результатов измерений.

Напомним схему работы установки (см. рис. 1).

Первичные  $\pi^-$ -мезоны, падающие на водородную мишень  $H_2$ , регистрировались счетчиками S1, S2 и S4, включенными на совпадения. Протоны отдачи, вылетевшие "вперед", регистрировались счетчиками S5, S6 и S7. Счетчик S3 с отверстием для первичного пучка служил для регистрации  $\pi^-$ -мезонов, рассеянных "назад". Сцинтилляционные счетчики A1, A2, и A3, а также пороговый счетчик П1, заведенные на антисовпадения, служили для уменьшения фона от неупругих событий и случайных совпадений. Две магнитострикционные искровые камеры ИК-1, ИК-2 регистрировали трек  $\pi^-$ -мезона "назад". Импульс протонов отдачи измерялся с помощью магнитного спектрометра, в который входили магнит типа СП-40-Б-1 и четыре бесфильмовые аналоговые искровые камеры: ИК-3, ИК-4, ИК-5, ИК-6.

Перейдем теперь к описанию магнитного канала, с помощью которого осуществлялось формирование пучка  $\pi^-$ -мезонов на водородную мишень  $H_2$ .

### 1. Магнитный канал

При проведении эксперимента желательно было получить минимально возможные размеры пучка первичных  $\pi^-$ -мезонов в месте водородной мишени и минимальную угловую расходимость, чтобы уменьшить ошибку из-за поправок на геометрию установки. Для того чтобы свести к минимуму ошибку из-за неупругих взаимодействий, нужно было иметь малый интервал  $\Delta p$  импульсов в пучке. Все эти характеристики должны быть обеспечены при максимально возможной интенсивности пучка, ввиду малости измеряемого сечения. При переходе с одной энергии на другую желательно было не менять существенно геометрии канала.

Головная часть канала (первый объектив, апертурный коллиматор и выводное отверстие в камере ускорителя) была использована от существовавшего  $\pi^-$ -мезонного канала на 3,5 Гэв/с. Это в какой-то степени облегчило задачу быстрого монтажа канала, но вместе с тем ограничило возможности при формировании пучка и, таким образом, полученные при наладке канала характеристики не являлись оптимальными.

### Описание канала

Схема магнитного канала представлена на рис. 2. Апертурный коллиматор, расположенный перед первым объективом, вырезал телесный угол  $4 \cdot 10^{-4}$  стеррад. Первый объектив, собранный из двух линз МЛ-17 (включенных последовательно и образующих одну "толстую" линзу), и линзы МЛ-18, давал слабосходящийся пучок, который после анализа с помощью магнита СП-40-Б-1 и импульсного коллиматора формировался вторым объективом из 2-х линз МЛ-15 и отклонялся на водородную мишень магнитом 1СП-57.

Переход с одной энергии на другую осуществлялся изменением токов в канале и смелой положения мишеней в камере ускорителя (при переходе с импульса 5 Гэв/с на 6 Гэв/с положение мишени не менялось). Мишень была

изготовлена из латуни и имела размеры  $5 \times 5 \times 120$  мм<sup>3</sup>. При всех импульсах вторичные частицы, попадавшие в канал, вылетали из мишени под углом  $0^\circ$ .

$\pi^-$ -мезоны отклонялись в магнитном поле ускорителя на угол  $19,5^\circ$  и проходили через апертурный коллиматор. Интервал импульсов, захватываемых каналом, составлял  $\pm 4\%$ . Далее  $\pi^-$ -мезоны фокусировались первым объективом в горизонтальной плоскости на импульсный коллиматор. Фокус по вертикали находился на расстоянии 8 м перед импульсным коллиматором. Анализ пучка  $\pi^-$ -мезонов по импульсу осуществлялся с помощью магнита СП-40-Б-1, отклонявшего частицы на угол  $6,5^\circ$ , и импульсного коллиматора. В предложенной схеме канала дисперсия пучка на импульсном коллиматоре была равна разности дисперсий, вносимых магнитными полями ускорителя и магнита СП-40-Б-1.  $\pi^-$ -мезоны, прошедшие через импульсный коллиматор, имели импульсный разброс  $\Delta p / p \approx \pm 1,3\%$ .

Второй объектив формировал изображение на расстоянии 5 м от последней линзы (в месте водородной мишени). Размер получаемого при этом изображения в вертикальной плоскости был равен 40 мм, а в горизонтальной плоскости — 30 мм. При этом размеры слабо изменялись при переходе с одной энергии на другую. Фокус по вертикали располагался на расстоянии 5 м от последней линзы, а по горизонтали — на расстоянии 7 м. Сравнительно большие размеры изображения в вертикальной плоскости были обусловлены включением линз первого и второго объектива по схеме ФД-ФД (Ф — фокусировка, Д — дефокусировка), что привело к значительному коэффициенту увеличения в вертикальной плоскости ( $\approx 3,5$ ). В горизонтальной плоскости коэффициент увеличения был  $\approx 1,0$ .

Магнит СП-57, отклонявший пучок на угол  $5,5^\circ$ , компенсировал дисперсию пучка в канале и уменьшал тем самым размеры изображения по горизонтали.

Угловая расходимость пучка в канале была  $\approx 0,35^\circ$  и слабо менялась при разных импульсах.

#### Наладка пучка

При расчете магнитного канала неизбежны ошибки, обусловленные неточным знанием положения "мнимой" мишени, магнитных характеристик магнитов и линз, а также трудностью учета влияния рассеянных полей, рассеяния частиц на воздухе и т.д. Все это вынуждает проводить дополнительную настройку канала на пучке частиц.

Настройка канала проводилась с помощью профилирующих сцинтилляционных счетчиков, управляемых дистанционно. Этими счетчиками снималось вертикальное и горизонтальное распределения пучка. Положение максимума распределения и его ширина определялись с точностью, лучшей 1,0 мм. Каждый из этих счетчиков заводился на тройную схему совпадений с двумя большими сцинтилляционными счетчиками, перекрывавшими весь пучок.

Наладочные работы на канале складывались из последовательного выполнения следующих операций:

- а) проверка установки мишени в камере ускорителя;
- б) проверка правильного положения фокусов;
- в) определение действительных размеров изображения;
- г) измерение расходимости пучка;
- д) определение интервала пропускаемых каналом импульсов.

Проверка правильности установки мишени осуществлялась следующим образом: в анализирующем магните СП-40-Б-1 устанавливался ток, соответствующий рабочему импульсу; магнитные линзы отключались; вместо апертурного коллиматора на ось канала устанавливался шелевой и снимался профиль пучка в двух точках после импульсного коллиматора. Пучок выводился на ось канала изменением энергетической пачки (первичной энергии протонов). При необходимости корректировался ток в магните СП-40-Б-1.

После подбора энергетической пачки проводилась проверка установки линз в канале с помощью последовательного включения всех линз, начиная с первой. При правильной установке линз пучок при этой операции не сдвигается с оси канала. Опыт работы по наладке каналов показывает, что проверка положения мишени и установки элементов канала занимает основную часть времени наладки.

По окончании последних операций проводилась предварительная оценка среднего импульса в канале по току в анализирующем магните или с помощью черенковского счетчика.

После определения среднего импульса устанавливались расчетные токи в линзах второго объектива (линзы типа МЛ-15). Варьируя токи в линзах первого объектива (линзы типа МЛ-16 и МЛ-17), добивались наиболее узкого изображения как по горизонтали, так и по вертикали. Второй объектив, формиро-

вавший пучок на водородную мишень, давал изображение по вертикали в месте водородной мишени, а по горизонтали на 2 м дальше (по пучку) с целью уменьшения угловой расходимости пучка в горизонтальной плоскости. Настройка второго объектива, необходимая для получения изображений на расчетных расстояниях от водородной мишени, проводилась при фиксированных токах в первом объективе, полученных при нахождении минимальных размеров изображений. Следует отметить, что токи в линзах второго объектива, полученные при настройке, практически не отличались от расчетных (отличие  $1 \div 2\%$ ), что свидетельствует о правильной настройке головной части канала.

Распределения пучка по вертикали и по горизонтали для импульса 4 Гэв/с, снятые с помощью профилирующих счетчиков в месте водородной мишени, даны на рис. 3 и 4.

После получения размеров изображений и их положений, близких к расчетным, проводилась проверка угловой расходимости пучка и выделяемых каналом импульсов.

Для определения угловой расходимости пучка с помощью профилирующих счетчиков снимались профили пучка после водородной мишени на расстоянии нескольких метров друг от друга. Разность полуширины распределений пучка, деленная на расстояние между счетчиками, служила мерой угловой расходимости. Кроме того, угловая расходимость пучка измерялась с помощью магнитоэлектрических и аналоговых камер, описание которых дано ниже. На рис. 5 приведена угловая расходимость пучка на импульсе 5 Гэв/с, полученная с помощью аналоговых камер.

Для предварительной оценки интервала пропускаемых каналом импульсов использовались экспериментальные данные по полуширинам распределения по горизонтали после магнита СП-57, полученные для углов поворота  $\pm 5^\circ$  (с переплюсовкой СП-57). При нормальном включении СП-57 распределение по горизонтали было уже из-за компенсации дисперсии по импульсу. Из полученных данных можно было расчетным путем оценить интервал импульсов  $\Delta p$ . Оценка дала значение  $\Delta p/p = \pm 1\%$ .

При переходе с одного импульса на другой изменялось положение мишени в ускорителе. Лишь импульсы 5 и 6 Гэв/с были получены с одной мишени, при этом для перехода от 6 Гэв/с к 5 Гэв/с уменьшалась энергетическая пачка

вавший пучок на водородную мишень, давал изображение по вертикали в месте водородной мишени, а по горизонтали на 2 м дальше (по пучку) с целью уменьшения угловой расходимости пучка в горизонтальной плоскости. Настройка второго объектива, необходимая для получения изображений на расчетных расстояниях от водородной мишени, проводилась при фиксированных токах в первом объективе, полученных при нахождении минимальных размеров изображений. Следует отметить, что токи в линзах второго объектива, полученные при настройке, практически не отличались от расчетных (отличие  $1 \div 2\%$ ), что свидетельствует о правильной настройке головной части канала.

Распределения пучка по вертикали и по горизонтали для импульса 4 Гэв/с, снятые с помощью профилирующих счетчиков в месте водородной мишени, даны на рис. 3 и 4.

После получения размеров изображений и их положений, близких к расчетным, проводилась проверка угловой расходимости пучка и выделяемых каналом импульсов.

Для определения угловой расходимости пучка с помощью профилирующих счетчиков снимались профили пучка после водородной мишени на расстоянии нескольких метров друг от друга. Разность полуширины распределений пучка, деленная на расстояние между счетчиками, служила мерой угловой расходимости. Кроме того, угловая расходимость пучка измерялась с помощью магнестриционных и аналоговых камер, описание которых дано ниже. На рис. 5 приведена угловая расходимость пучка на импульсе 5 Гэв/с, полученная с помощью аналоговых камер.

Для предварительной оценки интервала пропускаемых каналом импульсов использовались экспериментальные данные по полуширинам распределения по горизонтали после магнита СП-57, полученные для углов поворота  $\pm 5^\circ$  (с переполюсовкой СП-57). При нормальном включении СП-57 распределение по горизонтали было уже из-за компенсации дисперсии по импульсу. Из полученных данных можно было расчетным путем оценить интервал импульсов  $\Delta p$ . Оценка дала значение  $\Delta p/p = \pm 1\%$ .

При переходе с одного импульса на другой изменялось положение мишени в ускорителе. Лишь импульсы 5 и 6 Гэв/с были получены с одной мишени, при этом для перехода от 6 Гэв/с к 5 Гэв/с уменьшалась энергетическая пачка



в ускорителе. Настройка канала на импульсе 5 Гэв/с оказалась излишней. На этом импульсе были измерены характеристики пучка после установки в магнитных элементах токов, пересчитанных с импульса 6 Гэв/с. Характеристики оказались вполне удовлетворительными.

По окончании настройки канала и измерения характеристик пучка с помощью газового порогового черенковского счетчика (смотри ниже) были измерены рабочие импульсы первичных  $\pi^-$ -мезонов, оказавшиеся равными 4,1; 5,0; 6,0; 7,1 Гэв/с.

Характеристики канала, измеренные на пучке, практически не зависели от импульса и имели следующие значения:

- а) размер изображения (полная ширина на полувысоте) по вертикали - 40 мм;
- б) размер изображения по горизонтали - 30 мм;
- в) интервал импульсов  $\Delta p/p \approx \pm 1,2-1,3\%$ ;
- г) угловая расходимость  $\approx 0,35^\circ$ .

Интенсивность в канале была равна  $1 \cdot 10^4$   $\pi^-$ -мезонов на  $1 \cdot 10^{10}$  протонов в ускорителе при импульсе 4 Гэв/с и  $2 \cdot 10^3$   $\pi^-$ -мезонов на  $1 \cdot 10^{10}$  для 7 Гэв/с. Если взять для  $d^2\sigma/d\Omega dp$ -сечения рождения  $\pi^-$ -мезонов на бериллиевой мишени из работы [2], пересчитать их на латунную мишень и учесть выбывание протонов и поглощение  $\pi^-$ -мезонов в мишени по формуле:

$$N_{\pi} = \frac{N_0 e^{-\sigma_{\pi} N_M}}{\sigma_p - \sigma_{\pi}} d^2\sigma/d\Omega dp \{1 - e^{-N_M(\sigma_{\pi} - \sigma_p)}\} \Delta\Omega \Delta p, \quad (1)$$

то для 4 Гэв/с и  $\Delta\Omega = 4 \cdot 10^{-4}$  и  $\Delta p = 2 \cdot 1,3\%$  интенсивность в канале должна была быть равной  $\approx 2 \cdot 10^4$   $\pi^-$  на  $1 \cdot 10^{10}$  протонов. Несовпадение полученной интенсивности с расчетной указывает на 50% эффективность взаимодействия пучка протонов с мишенью в ускорителе.

Сброс протонов на мишень происходил в режиме магнитного "стола". Время сброса было равным 300 мсек. Однако из-за пульсаций магнитного поля в ускорителе эффективная растяжка равнялась 70 мсек (определялась по случайным совпадениям сцинтилляционных счетчиков).

## 2. Сцинтилляционные счетчики

В работе использовались большие сцинтилляционные счетчики, от которых необходимо было получить достаточно высокую эффективность регистрации.

Большие размеры счетчиков А1, S3, S5, S6 были обусловлены выбранным телесным углом установки ( $\approx 0.8 \cdot 10^{-2}$  стерадиана в системе центра масс). Ввиду того, что сечение предполагалось измерять со статистической точностью  $\approx 10\%$ , решено было получить эффективность больших совпадательных счетчиков  $\approx 99\%$ . Такую же эффективность желательно было получить от антисовпадательных счетчиков для уменьшения числа ложных запусков.

Размеры пластиковых сцинтилляторов счетчиков приведены в таблице 1. Значительная толщина больших сцинтилляционных счетчиков по пучку была необходимой для получения высокой эффективности. Отверстие в счетчике S3 больше, чем это было необходимо для пропускания пучка первичных  $\pi^-$ -мезонов, чтобы уменьшить число ложных запусков счетчика S3 из-за взаимодействий в свинце между S3 и А1.

В каждом из больших счетчиков, имевших подобные конструкции, использовались два ФЭУ, импульсы с которых после суммирования заводились на схему совпадений. Оптический контакт ФЭУ с пластиковым сцинтиллятором осуществлялся с помощью вазелинового масла. В счетчиках S1, S2, S4, S7, S8 и A3 (S9), также имевших подобные конструкции и по одному ФЭУ, оптический контакт ФЭУ и пластика был выполнен с помощью световодов. На рис. 6 приведены фотографии счетчиков S1 и S3. Счетчики А2 и S4, расположенные вблизи водородной мишени, были сделаны в герметическом исполнении и оборудованы воздушным поддувом (15–20 мм водяного столба), чтобы воспрепятствовать попаданию водорода внутрь корпуса счетчика.

Во всех счетчиках использовались фотоумножители типа ФЭУ-36. Для каждого ФЭУ подбирался делитель по максимальной амплитуде сигнала от источника  $Co^{60}$ . Из общего числа проверенных таким образом ФЭУ были отобраны для работы лучшие экземпляры (отбор  $\approx 1/2$ ). Подбор делителя велся при постоянном токе через него  $^{3/}$ . Ток через делитель в рабочих условиях составлял 3–4 ма. Часть сопротивлений делителя была шунтирована емкостями для стабилизации напряжения на них в условиях большой загрузки. Усредненный для нескольких ФЭУ делитель показан на рис. 7.

Измерение эффективности счетчиков проводилось в пучке  $\pi^-$ -мезонов. Узкий пучок с размерами  $20 \times 20$  мм<sup>2</sup> выделялся мониторными счетчиками. Эффективность больших счетчиков измерялась в точках 1, 2, 3 и 4 сцинтиллятора (см. схематический чертёж большого сцинтилляционного счетчика на рис. 8). Худшая эффективность во всех случаях соответствовала точке 1 и была равна 98–99,5% (суммарная эффективность обоих ФЭУ). Для других точек, а также для счетчиков небольшого размера, эффективность была 99,5–99,7%. При обработке результатов для больших счетчиков использовалась средняя по площади эффективность, принятая равной 99,0%. Измерение эффективности проводилось несколько раз с интервалами во времени 2–3 недели, при этом изменение эффективности больших счетчиков в точке 1 не превышало  $\pm 1\%$ .

Полученная при измерении эффективностей разница во времени импульсов с одного ФЭУ от частиц, прошедших в разных местах большого сцинтилляционного счетчика, не превышала 5–6 нсек. При измерениях длина кабелей от ФЭУ подбиралась из расчета регистрации частиц, прошедших через середину сцинтилляционного счетчика.

Амплитуда импульсов с ФЭУ была такой, что оказалось возможным работать без предварительного усиления с электронной аппаратурой, имеющей чувствительность 0,1–0,2 в. При этом, однако, напряжение на ФЭУ устанавливалось всего на 100–200 в ниже порога возбуждения и соответствовало коэффициенту усиления  $\approx 10^8$ .

Непрерывный контроль работы счетчиков во время измерений не был возможен. Поэтому непосредственно после измерений эффективностей счетчиков были проведены "тесты" – сняты счетные характеристики различных включений электронной аппаратуры. "Тесты" периодически контролировались во время сеансов работы на ускорителе.

### 3. Черенковские счетчики

Для подавления неупруго рассеянных в водородной мишени положительных  $\pi^-$ -мезонов использовался газовый пороговый черенковский счетчик.

Конструкция счетчика, имевшего длину 120 см и внутренний диаметр 19 см описана в работе /4/, где он имеет обозначение 2С1.

Черенковский счетчик должен был регистрировать  $\pi$ -мезоны возможно меньшего импульса и в то же время не регистрировать упруго рассеянные протоны. Рабочим газом в счетчике был этилен при давлении  $7 \text{ кг/см}^2$ . Давление в счетчике оставалось неизменным при всех импульсах. Экспериментально измеренное при этом давлении значение эффективности черенковского счетчика к  $\pi$ -мезонам с импульсом  $4 \text{ ГэВ/с}$  оказалось равным  $99,7\%$ . При этом имелось плато по напряжению на ФЭУ в счетчике  $300 \text{ в}$ . Используя константу  $k$  для данного счетчика ( $k = 2,2 \cdot 10^3 / 5$ ), можно вычислить среднее число фотоэлектронов  $\bar{n}$  по формуле

$$\bar{n} = k \sin^2 \theta,$$

где  $\theta$  - угол черенковского излучения. Для  $\pi$ -мезонов с импульсом  $4 \text{ ГэВ/с}$   $\bar{n} = 18$  фотоэлектронов. Из этих данных легко получить, что при давлении  $7 \text{ кг/см}^2$  счетчик имел высокую эффективность регистрации  $\pi$ -мезонов с импульсом  $\geq 2 \text{ ГэВ/с}$ .  $\pi$ -мезоны меньшего импульса отсеивались анализирующим магнитом спектрометра. Для протонов с импульсом  $7 \text{ ГэВ/с}$  пороговое давление равнялось  $15,8 \text{ кг/см}^2$ . Полное количество вещества в счетчике, включая торцевые стенки и зеркало, равнялось  $2 \text{ г}$ .

Измерение импульса первичных  $\pi$ -мезонов производилось с помощью подобного черенковского счетчика, наполненного азотом, так как пороговое давление для  $\pi$ -мезонов измеряемых импульсов при наполнении счетчика этиленом было ниже атмосферного и работать со счетчиком в этом случае было бы неудобно.

При определении импульса  $\pi$ -мезонов пороговый черенковский счетчик включался на совпадения со сцинтилляционными счетчиками, выделявшими пучок частиц. Снимая эффективность черенковского счетчика в зависимости от давления в нем, мы находили пороговое давление, экстраполируя экспериментальные точки до значения эффективности, равной нулю. Обработка результатов велась по формуле:

$$(p - p_0)k = \ln \frac{A - \beta}{A - \alpha}, \quad (2)$$

где  $p$  - давление в делениях манометра,  $p_0$  - пороговое давление в тех же делениях,  $k$  - коэффициент, пропорциональный светосбору в счетчике,  $A$  - эффек-

тивность черенковского счетчика при большом давлении (на "плато"),  $\beta$  - эффективность черенковского счетчика ниже порога регистрации  $\pi$ -мезонов,  $\alpha$  - эффективность счетчика при давлении  $p$ .

Хотя эта формула, строго говоря, справедлива лишь при чувствительности электронной аппаратуры к одному фотоэлектрону, можно использовать ее при худшей чувствительности, если ограничиваться давлениями, близкими к пороговому.

Найдя пороговое давление с помощью формулы, связывающей пороговое давление со скоростью регистрируемых частиц, мы определяем средний импульс  $\pi$ -мезонов<sup>/5/</sup>:

$$\frac{m^2}{p^2} = 5,87 \cdot 10^{-4} \left(1 - \frac{t^0}{273^0}\right) \left(\frac{a}{760} 1,033 + p_0\right), \quad (3)$$

где  $m^2$  - квадрат массы регистрируемых частиц в Гэв<sup>2</sup>,  $p^2$  - квадрат импульса в (Гэв/с)<sup>2</sup>,  $5,87 \cdot 10^{-4}$  - коэффициент, учитывающий показатель преломления для азота  $\{(\alpha-1)^2\}$ ,  $a$  - барометрическое давление в мм ртутного столба,  $t^0$  - температура в °С,  $p_0$  - пороговое давление в кг/см<sup>2</sup> (превышение над атмосферным).

Основная погрешность при определении импульса  $\pi$ -мезонов была обусловлена неточным знанием коэффициента преломления для азота, а также неточностью измерения давления в счетчике.

Измеренные с помощью порогового счетчика импульсы в канале оказались равными:

$$4,10 \pm 0,04 \text{ Гэв/с}$$

$$5,03 \pm 0,05 \text{ -"-}$$

$$6,00 \pm 0,04 \text{ -"-}$$

$$7,12 \pm 0,06 \text{ -"-}$$

На рис. 9 дана экспериментальная кривая для определения порогового давления на 4 Гэв/с.

#### 4. Электроника

Электронная аппаратура для запуска искровых камер совместно со счетчиками должна была обеспечить высокую эффективность регистрации событий, малое

число случайных совпадений и просчетов, чтобы свести к минимуму дополнительную неопределенность в результате, а также малую задержку запускающего импульса относительно момента прохождения частиц через камеры.

Блок-схема формирования запускающего импульса для искровых камер дана на рис. 10. Импульсы от счетчиков поступали на схемы совпадений через размножители  $P$  и сумматоры-размножители  $C-P$ , которые помимо своих непосредственных функций - размножения и суммирования - осуществляли также предварительное ограничение амплитуд. Основными схемами являлись - мониторинговая  $M(S1 + S2 + S4 - A1)$  и многоканальная  $N(M + S3 + S5 + S6 + S7 - A1 - A2 - A3 - AP)$ , с выхода которой сигнал через схему пропускания поступал на запуск искровых камер. Две вспомогательные схемы  $M + S8$  и  $M + S9$  служили для контроля уровня водорода и положения пучка. Импульсы с выходов схем совпадений заводились на пересчетные декады ПС, а затем - на цифропечатающую машину ЦПМ. Запуск всей установки осуществлялся от импульса с ускорителя схемой ворот. Назначение отдельных счетчиков и более подробное описание принципа работы установки дано в работе<sup>1/</sup>. Все схемы совпадений были собраны из модулей, разработанных в ЛВЭ в 1964 г.

Дадим краткое описание назначения и основных параметров отдельных частей электронной аппаратуры.

Размножители  $P$  и сумматоры-размножители  $C-P$ , схема которых приведена на рис. 11, кроме размножения импульсов обеспечивают предварительное ограничение импульсов по амплитуде. Такое дополнительное ограничение было необходимо при работе с широким амплитудным диапазоном импульсов, как в нашем случае, ввиду недостаточности ограничения в формирователях схем совпадений. Сумматоры-размножители для суммирования импульсов с двух ФЭУ в больших сцинтилляционных счетчиках отличались от размножителей лишь добавочным сопротивлением  $R_{12}$  (пунктиром на рис. 11). Размножители и сумматоры имели следующие параметры: время нарастания импульсов 3-4 нсек; длительность импульсов 10 нсек; мертвое время у порога срабатывания 30-40 нсек; порог срабатывания 0,1-0,2 в; амплитуда на выходе у порога срабатывания 0,8-0,7 в. Наклон выходной характеристики составлял 10% от входного импульса. Можно было получить более высокую чувствительность размножителей 0,05 в, однако, при этом начинала сказываться нестабильность порога срабатывания.

Схемы совпадений из универсальных модулей описаны в работе<sup>/8/</sup>. Некоторые характеристики схем, измеренные на пучке, приводятся в<sup>/7/</sup>. Многоканальная схема (6 формирователей совпадений и 4 антисовпадений) отличалась от схем, описанных в<sup>/8/</sup>, лишь числом модулей формирователей и количеством элементов отбора в модуле совпадений-антисовпадений. Чувствительность формирователей всех схем по входу была равна 0,2–0,3 в. Разрешение  $2\tau$ , определяемое параметрами трансформаторов в модулях формирователей, для всех схем, кроме многоканальной, было равно 10 нсек. Для многоканальной схемы разрешение  $2\tau$  было выбрано равным 25 нсек ввиду временного разброса импульсов, поступающих с больших сцинтилляционных счетчиков. Мертвые времена выходных дискриминаторов схем составляли 100 нсек в соответствии с мертвым временем ПС. При относительно небольшой для сцинтилляционных счетчиков нагрузке в сеансах работы на ускорителе просчеты из-за мертвых времен были незначительны. Импульс на выходах схем имел отрицательную полярность, длительность 10–15 нсек и амплитуду 0,8–1,0 в.

Схема пропускания, представленная на рис. 12, обеспечивала прохождение импульсов с многоканальной схемы совпадений на запуск схемы питания искровых камер только во время сброса пучка на водородную мишень. Схема пропускания отпиралась импульсом длительностью 100–300 мсек. С выхода схемы пропускания снимались импульсы положительной полярности с амплитудой 2 в.

Для регистрации импульсов со схем совпадений был использован разработанный в ЛВЭ десятиканальный пересчетный прибор на полупроводниках с выводом данных на цифropечать<sup>/8/</sup>. В состав прибора входили 10 пересчетных каналов, система управления вводом и выводом данных, цифropечатающая машина типа ЦПМ-1 и контрольный генератор. Основные параметры прибора: амплитуда входных импульсов 0,5–5,0 в; длительность входных импульсов 10–100 нсек; емкость каждого канала  $10^7$ ; мертвое время 100 нсек.

При подготовке счетчиков и электронной аппаратуры на пучке были измерены "плато" по напряжению на фотоумножителях. Для всех ФЭУ плато оказалось не менее 200 в. Рабочее напряжение выбиралось на середине "плато".

На рис. 13 и 14 приведены кривые задержанных совпадений для счетчиков S3 и A1 в многоканальной схеме, характеризующих работу совпадательных и антисовпадательных модулей в этой схеме в рабочих условиях. Для снятия кривых

вых счетчики S3 и A1 сдвигались на пучок, который проходил около центра пластических сцинтилляторов.

Число случайных совпадений в мониторинной схеме при наибольших загрузках на импульсе 4 Гэв/с составило 1%. Случайные совпадения счетчика S3 с монитором, которые могли приводить к ложным запускам, составляли 0,3% и были обусловлены значительной фоновой загрузкой больших сцинтилляционных счетчиков перед водородной мишенью. По указанной причине получить подавление в канале антисовпадательного счетчика A1, превышающее 100, было трудно.

Просчеты в многоканальной схеме, обусловленные большой загрузкой S3 на 4 Гэв/с, доходили до 2%. Остальные совпадательные счетчики в многоканальной схеме были загружены незначительно.

Полная задержка импульса на запуск искровых камер от электронной аппаратуры, включая кабели от сцинтилляционных счетчиков, составляла 150 нсек.

## 5. Аналоговые проволочные искровые камеры

Для измерения импульсов протонов отдачи, вылетающих вперед в лабораторной системе в узком угловом интервале ( $\approx 2^\circ$ ), нами использовался магнитный спектрометр, состоящий из анализирующего магнита типа СП-40-В-1 с рабочей апертурой  $1200 \times 1500 \text{ мм}^2$  и интегралом магнитного поля около  $2,2 \cdot 10^6$  эрстед·см и четырех бесфильмовых проволочных искровых камер, съем информации с которых осуществлялся с помощью матриц из ферритовых колец аналоговым способом. Углы рассеявшихся  $\pi^-$ -мезонов, как уже указывалось, измерялись системой из двух проволочных искровых камер с магнитострикционным способом съема информации. Выбор двух различных типов бесфильмовых искровых камер в эксперименте был продиктован отсутствием ко времени проведения эксперимента сведений о практической работе различных систем проволочных искровых камер, их преимуществах и недостатках. Аналоговый метод съема информации был выбран, в частности, еще и потому, что он позволяет иметь большую гибкость в способах предварительной обработки информации при работе систем бесфильмовых искровых камер без непосредственного использования в эксперименте электронно-вычислительной машины.



Идея использования ферритовых матриц для съема информации с искровых камер аналоговым способом была впервые предложена в работе<sup>/9/</sup>. Первые результаты, полученные нами при разработке аналоговых камер, опубликованы в /10/. Ниже будут изложены итоги исследования и работы использованной нами системы аналоговых искровых камер.

Принцип работы ферритовой матрицы аналоговой искровой камеры легко можно понять из рис. 15а. Ток от искры в камере, протекая через участок матрицы, изменяет на этом участке направление намагниченности ферритовых колец с прямоугольной петлей гистерезиса. При подаче тока считывания по обмотке В в момент возвращения перемагниченных колец в первоначальное состояние в съемной обмотке С наводится ЭДС, пропорциональная числу перемагничиваемых колец. Преобразовывая величину этого сигнала в число, мы получим величину, пропорциональную координате искры. На рис. 15б изображена ферритовая матрица, предназначенная для измерения разности координат в двух искровых камерах, т.е. угла входа частиц в установку. Для работы такой матрицы, как видно из рисунка, искровые камеры должны иметь разнополярное питание. Ограничением такого включения является то обстоятельство, что измерения проводятся только для одного знака разности координат, поэтому для регистрации углов входа частиц в установку в заданном диапазоне система из двух искровых камер должна быть предварительно развернута на определенный угол.

Из соображений простоты монтажа нами был выбран тип матриц, изображенный на рис. 15б. Ввиду малого углового разброса регистрируемых протонов отдачи для измерения амплитуды выходных импульсов мы можем использовать амплитудный преобразователь со сравнительно небольшим числом каналов.

Рабочие матрицы, смонтированные по принципу, показанному на рис. 15б, содержали 175 ферритовых колец марки ВТ2. В результате исследований линейности выходного сигнала при работе на нагрузку с малым сопротивлением (кабель с волновым сопротивлением 50 ом) была выбрана съемная пепочка, изображенная на рис. 16. Индуктивность, включенная последовательно с выходной обмоткой, служит для уменьшения влияния индуктивной составляющей выходной цепи, величина которой меняется в зависимости от числа перемагниченных колец. На рис. 17 приведена зависимость амплитуды с выходной обмотки матрицы от числа перемагничиваемых колец.

Конструкция проволочных искровых камер, использованных в эксперименте для измерения импульсов протонов отдачи, изображена на рис. 18. Здесь 1 - стеклянная рамка, определяющая зазор искровых камер, равный 7 мм, 2 - высоковольтный проволочный электрод, 3 - съемный (земляной) проволочный электрод, 4 - изолирующая прокладка из стекла, 5 - внешние металлические рамки; 6 - стенки из лавсана, изолирующие объем камеры от внешней среды; 7 - газовые разъемы для заполнения и продува камеры рабочим газом; 8 - пластина из изолирующего материала для размещения контактов вывода проволочек съемного (земляного) электрода. Камера склеена эпоксидным клеем. Для намотки электродов использовалась проволока из бериллиевой бронзы диаметром 0,1 мм, шаг намотки равен 1,2 мм, намотка обоих электродов производилась в вертикальном направлении (камера со съемом только одной координаты  $x$ ). Лавсановые стенки камеры имеют толщину 120 микрон. Рабочий размер камеры равен  $420 \times 410 \text{ мм}^2$ .

В рабочей геометрии было принято размещение камер полярно (для измерения угла входа и угла выхода) на расстоянии 100 см друг от друга. Две камеры и ферритовая матрица, размещенная на равном расстоянии между ними, монтировались на общей металлической плите, составляя отдельный прибор для измерения углов частиц. Общий вид этого блока изображен на рис. 19. Ферритовая матрица была смонтирована таким образом, что одно кольцо соответствовало шагу в камере 2,4 мм (две проволочки). На одну из камер подавался высоковольтный импульс отрицательной полярности, на другую - положительной полярности такой же формы, так что при одновременном срабатывании двух камер общий ток протекал через обе искры в двух камерах, проходя через соответствующий участок ферритовой матрицы.

Питание камер осуществлялось от тиратронов типа ТГИ-1-130/10, схема питания описана далее. При использовании для питания камер обычных коротких импульсов оказалось очень трудным подобрать удовлетворительное плато по напряжению для правильной записи в ферритовую матрицу. Это было связано с наличием в цепи записи паразитных индуктивностей и емкостей. В момент возникновения искр в паре камер в цепи записи появляются высокочастотные колебания, которые передаются на соседние участки матрицы за счет паразитных цепей. Амплитуда тока, возникающего в соседних цепях, достаточна для намагничивания колец. Вследствие этого ошибки в измерении разности коор-

динат оказываются большими. Попытка ограничить ток записи с помощью сопротивлений в цепи проволочек, подсоединяющихся к матрице, не дала положительных результатов, так как происходило расщепление искрового канала вблизи земляного электрода камеры, что также ухудшало точность.

Все эти трудности удалось устранить следующим образом. После пробоя искры в камере существует в течение 1 мсек проводящий канал, по которому можно пропускать достаточно "медленный" ток записи. Информация, записанная в матрице в момент пробоя искры, стирается блокирующим импульсом, который подается в обмотку считывания через 0,2–0,5 мсек после возникновения искры. Запись в матрицу осуществляется "медленным" током высоковольтного импульса, форма которого показана на временной диаграмме (рис. 20).

Таким образом удалось получить очень стабильный режим записи в большом интервале амплитуд высоковольтного импульса. Методика записи "медленным" током после возникновения искрового канала была использована впоследствии в ферритовых (цифровых) камерах для уменьшения числа перемагниченных колец, регистрирующих координаты искр в камере. Так, при изменении амплитуды высоковольтного импульса на несколько киловольт среднее число перемагниченных колец на искру оставалось постоянным и близким к единице<sup>11</sup>. Это в значительной степени сокращает количество информации, поступающей с ферритовых камер, а также позволяет менять амплитуду высоковольтного импульса в широких пределах.

В аналоговых искровых камерах при таком способе питания условия записи и считывания в рабочем включении (от искры) практически не отличались от условий при подаче импульсов питания непосредственно на контакты ферритовой матрицы, что существенно облегчало выбор оптимальных режимов. На рис. 21 представлены зависимости выходного сигнала с фиксированного участка матрицы от напряжения питания для различных амплитуд импульса считывания и блокировки. Зависимость амплитуды выходного сигнала от числа колец при амплитуде импульса считывания 3,5 кв представлена на рис. 17. Шаг в одно ферритовое кольцо соответствует изменению координаты искры в одной из камер 2,4 мм.

В первоначальном варианте эксперимента камеры были включены в режиме непосредственного измерения угла отклонения частицы в анализирующем магните. Для этого положительный выходной импульс с пары искровых камер, раз-

мешенных после анализирующего магнита, суммировался с отрицательным выходным импульсом с пары искровых камер, размещенных до анализирующего магнита. Предварительный разворот второй пары камер (после магнита) был выбран несколько большим, чем для первой пары камер, и результирующий положительный импульс с сумматора, пропорциональный по амплитуде углу отклонения частицы в поле анализирующего магнита, подавался на блок амплитудного преобразования типа БАП-5 (256 каналов, рабочая частота 2 МГц). Уравнивание цены отсчета двух матриц достигалось при этом незначительным изменением и подбором параметров съемных цепочек. В процессе эксперимента выяснилось, что более удобным является режим раздельного считывания, позволяющий измерять не только угол отклонения частицы в магните, но и отдельно угол входа и выхода и, таким образом, более надежно идентифицировать события.

Окончательная логика системы записи и считывания была следующей. Через 0,3 мксек после запуска и срабатывания искровых камер на обе ферритовые матрицы подавались импульсы от считывающих тиратронов, подтверждающие первоначальную намагниченность колец и блокирующие, таким образом, состояние матрицы во время процессов установления токов через искры в камерах. После окончания протекания тока по считывающей обмотке матрицы на заднем фронте импульса питания камер ( $t = 3$  мксек) производилась запись (перемагничивание участков матриц, соответствующих координатам искр в камерах). Сразу же после окончания протекания тока через обмотки матрицы намагниченность всех колец независимо от ее ориентации падает до уровня остаточной намагниченности, и после этого записанная информация может храниться в матрице долгое время.

Для преобразования амплитуды сигналов с различных матриц использовался один и тот же блок амплитудного преобразователя. Режим работы амплитудного преобразователя был выбран таким, что он был заблокирован по входу практически все время, за исключением времени приема исследуемых сигналов. Через 1500 мксек после срабатывания камер и записи информации в матрицах на амплитудный преобразователь подавался импульс, разблокировавший его вход, и через 2 мксек после этого запускался считывающий тиратрон первой пары камер. Сигнал с первой матрицы через развязывающий диод подавался на вход амплитудного преобразователя, выход которого через ключ подавался на пересчетную схему ПС № 1. Амплитудный преобразователь, работавший в режиме самоблок-

ровки, после анализа этого импульса оказывался заблокированным. Через 2002 мксек на амплитудный преобразователь снова подавался разблокирующий импульс, затем через 2 мксек запускался считывающий тиратрон второй пары камер, исследуемый сигнал со второй матрицы также через развязывающий диод подавался на вход амплитудного преобразователя, выход которого через ключ в это время подавался на пересчетную схему ПС № 2. Зарегистрированные отсчеты с первой и второй пары камер вместе с информацией с магнитострикционных камер печатались затем на бумажную ленту. После запуска установки ее вход блокировался от повторных запусков на время до 2 сек.

На рис. 22, 23 приведена блок-схема аппаратуры, обеспечивающей описанную выше логику работы системы. На рисунках 24-28 приведены принципиальные схемы отдельных ее элементов.

Перед каждым сеансом работы искровые камеры продувались смесью (75% Ne + 25 Ne). Продув производился 20-30 минут. Камеры имели плато по напряжению в диапазоне 4,5-6,5 кв. При напряжении выше 6 кв в некоторых камерах начинались слабые краевые пробои, которые, однако, не регистрировались еще системой записи информации. Рабочее напряжение на камерах выбиралось в диапазоне 5,0-5,5 кв. Эффективность камер зависела от чистоты используемой газовой смеси и допускалось ее изменение в процессе эксперимента от 0,99 до 0,95. Эффективность камер контролировалась в эксперименте через 10-20 часов работы, для этого через камеры направлялся первичный  $\pi^-$ -мезонный пучок. Перенаполнение камер свежим газом производилось обычно через 40-50 часов работы.

Следует отметить, что устойчивость режима записи зависит от разности задержек срабатывания пары тиратронов, питающих блок искровых камер. Для работы подбирались тиратроны, у которых разница в задержках не превышала 30 наносекунд.

Для уменьшения числа фоновых искр на камеры подавалось постоянное очищающее поле. Очищающее поле до 80 в не снижало эффективность камер. Рабочее очищающее поле было выбрано равным 60 в, при этом время памяти камер составляло  $\approx 1,5$  мксек. В рабочих условиях число срабатываний камер, сопровождающихся фоновыми искрами, не превышало 2-3%. Полярность очищающего поля выбиралась противоположной полярности высоковольтных импульсов питания камер.

Было установлено, что в рабочем положении блоков искровых камер магнитное поле анализирующего магнита не сказывалось сколь-нибудь заметным образом на амплитуды входных сигналов. При этом матрицы были расположены на расстоянии 80–100 см от обмоток магнита.

На рис. 29 показано распределение углов отклонения частиц, полученное на прямом пучке (без отклоняющего магнита). Ширина распределения в этом случае характеризует ошибки в измерении углов частиц, обусловленные только системой искровых камер. Полуширина этого распределения на половине высоты равна 3 мрад, что соответствует ошибке измерения координаты в искровой камере около 1,5 мм. На рис. 30 приведены распределения углов отклонения частиц первичного пучка в анализирующем магните. Уширение распределений по сравнению с распределением, полученным на неотклоняемом пучке, по оценкам может быть объяснено импульсным разбросом пучка и неоднородностью поля анализирующего магнита.

На рис. 31 приведено распределение углов отклонения протонов отдачи в исследуемом нами процессе упругого рассеяния  $\pi^-$ -мезонов на протонах назад, полученное в одной из экспозиций при импульсе первичных  $\pi^-$ -мезонов 4 Гэв/с. Заметное уширение этого распределения по сравнению с распределением, полученным на первичном пучке  $\pi^-$ -мезонов, объясняется довольно значительной неоднородностью магнитного поля анализирующего магнита в рабочей апертуре.

При наборе статистики установка работала непрерывно в течение нескольких сотен часов. Все логические элементы, обеспечивающие управление режимом записи и считывания информации, работали безотказно. Оставляла желать лучшего стабильность работы амплитудного преобразователя (изменения цены отсчета в течение суток доходили до 2–3%). Однако в наших условиях, когда разность отсчетов первого и второго блоков искровых камер для частиц из упругого пика была близка к нулю, это обстоятельство было несущественным.

## 6. Магнитоотрицательные камеры

Магнитоотрицательные камеры, использованные в эксперименте, были предварительно описаны в работах<sup>1,12/</sup>. Принцип работы камер и съем информации с них можно легко понять из рис. 32. Ток разряда камер, текущий по прово-

локам обоих электродов в соответствующих местах стрикционных лент возбуждает импульсы деформации, распространяющиеся к концам лент со скоростью звука. При прохождении импульса деформации внутри съемной катушки в ней возникает электрический импульс за счет обратного магнитострикционного эффекта. Интервал времени между запуском камеры и появлением сигнала на съемной катушке пропорционален соответствующей координате искры.

Магнитострикционные камеры для регистрации  $\pi^-$ -мезонов, рассеянных назад в  $\pi^-p$ -рассеянии, проектировались как однотрековой прибор. По условиям геометрии установки через камеры необходимо было пропустить пучок первичных  $\pi^-$ -мезонов, не вызывая их срабатывания. Для этого внутрь объема каждой камеры вклеивался пенопластовый цилиндр<sup>/12/</sup>. Проверка возможности работы с пенопластовым цилиндром в камерах проводилась на пучке. Камеры запускались от частиц, проходивших в области цилиндра, наблюдения велись визуально и с помощью электроники. Отсутствие координат, соответствующих площади цилиндра, а также пробоев по его образующей свидетельствовало о надежной работе камер. Камеры должны были обладать достаточной точностью определения координат для надежной реконструкции трека, вышедшего из мишени, а также высокой эффективностью для уменьшения дополнительных неопределенностей в физическом результате. В ходе эксперимента выяснялась необходимость контролировать фоновую загрузку камер и вводить соответствующие поправки. В этом разделе будут описаны характеристики камер и электронной аппаратуры для съема информации с камер, существенные в постановке физической задачи, а также ряд технических деталей, опущенных в<sup>1/</sup> и <sup>/12/</sup>.

Съем сигнала с камеры осуществлялся с помощью магнитострикционной ленты шириной 1 мм и толщиной 0,1 мм из материала К-50Ф (50% Со и 50% Fe) и катушки из 200 витков медного провода в эмалированной изоляции диаметром 0,05 мм. Длина катушки была равна 2 мм. Схема съема информации приведена на рис.32. Сигнал с катушек для координат  $x$ , для которых магнитострикционная лента накладывалась на заземленные электроды камер, с помощью 50-омного кабеля РК-19 подавался на усилитель. Сигнал с катушек координат  $y$ , для которых лента накладывалась на высоковольтные электроды камер, передавался на кабель через разделительный трансформатор.

Ленты и соответствующие им электроды были изолированы друг от друга слоем лавсана толщиной 120 мк. Над магнитоотрицательной лентой на расстоянии 0,5 мм размещалась алюминиевая накладка, заземленная для координат  $x$  и незаземленная для координат  $y$ , служащая для экранирования магнитоотрицательной ленты.

Разделительные трансформаторы, использовавшиеся для координат  $y$ , устраняли пробой с высоковольтного электрода через магнитоотрицательную ленту и съемную катушку до амплитуды высоковольтного импульса питания 8 кв. Трансформаторы наматывались на ферритовые кольца с  $\mu = 1000$  и имели в первичной обмотке 22 витка и во вторичной 30, при этом амплитуда на входе трансформатора была равна амплитуде на выходе съемной катушки, нагруженной на кабель.

Отжиг магнитоотрицательной ленты осуществлялся в гелии при  $t^0 = 600^{\circ}\text{C}$ . Режим отжига: выдержка при  $t^0 = 600^{\circ}\text{C}$  30 минут. Амплитуда импульса от ближайшего к катушке края камеры была равна 15–20 мв и от дальнего конца камеры (на расстоянии 50 см) 7 мв при амплитуде высоковольтного импульса 5–6 кв. Для отжига при  $500^{\circ}\text{C}$  амплитуда уменьшалась в 6–7 раз, для отжига при  $700^{\circ}\text{C}$  – в 2 раза. При этом затухание импульса по длине при отжиге  $600^{\circ}\text{C}$  было на 30% больше, чем в случае отжига при температурах  $500^{\circ}$  и  $700^{\circ}\text{C}$ . Качественно исследовался ряд факторов, влиявших на амплитуду сигнала: уменьшение толщины лавсана с 120 до 20 мк увеличивало амплитуду в 2 раза; установка алюминиевой накладки поднимала амплитуду на  $\approx 50\%$ ; сильное натяжение магнитоотрицательной ленты значительно ослабляло сигнал, и в работе лента была слабо натянута.

Для работы "признака" (см. ниже), необходимого для регистрации факта прохождения через камеру 2 и более частиц, важно было получить малые отражения сигнала от концов ленты. Для ослабления отраженного сигнала с каждого конца ленты было установлено по два демпфера. Для разных материалов, из которых изготовлялись демпферы, отраженный сигнал составлял от исходного: для свинца 20–50%, для резины 10%, для фетра 3–4%. В эксперименте использовались демпферы из фетра.

Полная блок-схема электроники для работы с магнитоотрицательными камерами приведена на рис. 33.



Импульс, управляющий запуском электроники искровых камер, одновременно "открывает" ворота для всех координат. С выхода ворот идут сигналы, включающие все ключи, и импульсы генератора с частотой 10 мгц начинают считаться пересчетными схемами всех 4-х координат. Сигналы, поступающие с искровых камер через усилители, "закрывают" соответствующие ворота и выключают ключи. Число отсчетов на пересчетках пропорционально соответствующим координатам.

Для того чтобы избавиться от наводок, особенно во время запуска искровых камер, усилители открывались лишь на 100 мксек стробирующим импульсом спустя 15 мксек после запуска камер. Для того чтобы рабочий размер камер соответствовал по времени стробирующему импульсу, съемные катушки на камерах размещались на расстоянии 7,5 см от ближайшего рабочего края камер, что и соответствовало времени 15 мксек. За это время наводки, возникавшие во время запуска камер, затухали до приемлемой величины  $\approx 100$  мкв.

В случае прихода 2-х и более импульсов на схему ворот в этой схеме вырабатывался импульс "признака", который передавался в пересчетную стойку и вместе с координатами печатался с помощью ЦПМ.

Импульсы, соответствующие любой координате, считались тремя пересчетными декадами, емкость которых была достаточной для измерений во всем рабочем объеме камер. В том случае, когда в какой-либо из камер не было искры во время запуска, либо сигнал с координаты был недостаточен для срабатывания ворот, соответствующие пересчетные декады переполнялись и факт переполнения регистрировался ЦПМ.

Для того чтобы ликвидировать последствия возможной нестабильности триггеров в схеме ворот, в каждом цикле ускорения перед началом сброса пучка на мишень на указанные триггеры подавался импульс, возвращавший их в начальное состояние.

Приведем параметры отдельных частей электронной аппаратуры.

Схема формирования стробирующего импульса приведена на рис. 34. Схема запускалась положительными импульсами с амплитудой 5-6 в, чувствительность по входу была равной 2-3 в. С выхода схемы четыре импульса с амплитудой +5в и длительностью 100 мксек, задержанные относительно запускающего импульса на 15 мксек, кабелем РК-19 передавались на соответствующие усилители.

На усилитель сигналов с искровых камер, изображенный на рис. 35, поступали сигналы отрицательной полярности с амплитудой 5–20 мв. Коэффициент усиления был равен  $10^3$ , максимальная амплитуда на выходе отрицательной полярности – 4–5 в. Третий каскад, работавший с отсечкой, практически не пропускал отраженные импульсы, которые, в худшем случае, имели амплитуду  $\approx 1$  мв на входе усилителя. Импульсы на выход усилителя проходили лишь при наличии стробирующего сигнала.

Схема формирователя ворот, представленная на рис. 36, с помощью триггеров формировала импульс, открывавший соответствующий ключ (рис. 37). Начало импульса совпадало с приходом импульса запуска, конец совпадал с временем прихода сигнального импульса с искровой камеры. Амплитуда выходного импульса составляла 8в. С коллектора триода  $T_2$  импульсы "признака", практически равные по амплитуде входным сигналам, если в камере было 2 или более искр, поступали на пересчетную стойку, а затем на ЦПМ. Возвращение схемы в начальное состояние осуществлялось импульсом сброса (позиция 6а) перед началом наведения пучка на мишень, а также могло осуществляться вручную кнопкой сброса. Чувствительность триггеров в схеме делалась по возможности минимальной, чтобы избежать ложных срабатываний от больших наводок при запуске искровых камер.

Схема генератора на 10 мгц вместе с размножителями импульсов на четыре координаты приведена на рис. 38. Калибровка цены отсчета генератора производилась в рабочих условиях выделением узкого пучка частиц, проходящих через камеры, с помощью тонких сцинтилляционных счетчиков. Была построена зависимость зарегистрированной координаты от расстояния до соответствующего счетчика. Отсчеты хорошо ложились на прямые, имевшие одинаковый наклон для разных лент в пределах ошибок измерений. На рис. 39 приведены данные калибровки координат  $x_1$  и  $x_2$ .

Приведем теперь данные, полученные в рабочих условиях на пучке, характеризующие координатную точность, эффективность и "сброс" в камерах.

С помощью скрещенных профилирующих счетчиков, имевших пластики толщиной 1 мм, для проверки координатной точности были сняты распределения отсчетов по координатам. На рис. 40 и 41 приведены распределения для камеры I. Для камеры II распределения аналогичны. Полуширина на полувысоте 1 мм

хорошо согласуется с полученной в  $^{12}$  с точностью 0,6 мм. Наличие в распределении значительных отклонений объяснялось "сбоями" (см. ниже). Точность измерения угла определялась расстоянием между камерами и при базе 340 мм в рабочих условиях и координатной точности 0,6 мм была равна  $\pm 2,5$  мрад. С помощью магнитострикционных камер были измерены координатное и угловое распределения пучка первичных  $\pi^-$ -мезонов, хорошо совпадающие с распределениями, полученными с помощью профилирующих счетчиков.

Эффективность магнитострикционной камеры можно разбить на полную (совместно с электроникой) и собственно эффективность искровой камеры. Эффективность совместного срабатывания камер в пучке была равна 98%. Полная эффективность двух камер при измерении в пучке определялась как отношение числа срабатываний камер без переполнения по любой из координат к полному числу запусков. Полная эффективность зависела от фоновой загрузки ввиду меньшей эффективности регистрации двух одновременных искр и изменялась от 94 до 97%.

К сожалению, фоновая загрузка магнитострикционных камер в эксперименте была довольно высокой. Поэтому существовала значительная вероятность того, что в случае упругого рассеяния назад магнитострикционные камеры окажутся загруженными фоновым треком и будет зафиксирован неверный отсчет — "сбой" — без переполнения какой-либо координаты. Определение числа "сбоев" оказалось нелегкой задачей. Вначале число "сбоев" определялось при запуске искровых камер от частиц, не прошедших в рабочем объеме камер (прошедших через "пятаки" — пенопластовые цилиндры). За "сбой" в этом случае принималась вероятность срабатывания хотя бы одной координаты. При этом, чтобы исключить неравномерность сброса частиц на мишень, запуск осуществлялся не от первой мониторной частицы, а от такой, чтобы происходило одно срабатывание камеры за 2–3 цикла (запуск от мониторной ПС). Полученное таким путем число "сбоев" изменялось от 20 до 60% в разных сеансах работы и находилось, по-видимому, в разумном согласии с фоновой загрузкой и временем памяти камер, равным при рабочем очищающем поле 60 в 1,5 мксек. Однако непосредственное определение "сбоев" при запуске от частиц, прошедших через выделенное узкими счетчиками определенное место в камере, и определение вероятности ложных отсчетов дало для действительного числа "сбоев" в 3 раза меньшую величину. По-видимому, указанную выше разницу можно объяснить двумя причи-

нами: возможностью правильного отсчета при наличии двух треков в камере и возможностью "поедания" фоновой искры рабочей искрой.

## 7. Стойка генераторов высоковольтных импульсов для питания бесфильмовых искровых проволочных камер

Блок-схема системы питания бесфильмовых проволочных искровых камер представлена на рис. 42. На рис. 43 приведена фотография стойки питания. Система обеспечивала формирование высоковольтных импульсов, необходимых для работы бесфильмовых камер, а также импульсов считывания для работы аналоговых камер магнитного спектрометра.

На магнитострикционные камеры ИК-1 и ИК-2 подавались высоковольтные импульсы отрицательной полярности. На каждую пару аналоговых искровых камер подавались высоковольтные импульсы положительной и отрицательной полярности одинаковой формы.

Чтобы не усложнять схему генераторов высоковольтных импульсов фазоинверсными импульсными трансформаторами и иметь высоковольтные импульсы положительной и отрицательной полярности, нами в качестве элементов, коммутирующих высокое напряжение, были выбраны водородные тиратроны ТГИ-1-130/10. Водородный тиратрон удобен в эксплуатации, но имеет большую задержку срабатывания, определяемую в основном временем зажигания промежутка сетка-катод. Для некоторого уменьшения нестабильности зажигания и времени поджига тиратрона нами использовалась несколько увеличенная амплитуда и улучшенная крутизна фронта поджигающего импульса.

На каждой паре аналоговых камер временной разброс между положительным и отрицательным высоковольтными импульсами не должен быть больше 20-25 нсек. Для этой цели подбирались тиратроны попарно так, чтобы временной разброс между импульсами в каждой паре не превышал указанной величины. Было замечено, что при длительной эксплуатации высоковольтных импульсных генераторов временной разброс между положительным и отрицательным импульсами увеличивался и мог достигать 100 нсек. Перед каждым сеансом работы проверялись временные разбросы между импульсами с каждой пары тиратронов. При превышении временного разброса 25 нсек тиратроны заменялись.

При форсировании накала подогревания катода и генератора водорода временной разброс между импульсами увеличивается с течением времени значительно быстрее. В связи с этим для обеспечения стабильной работы аналоговых камер и, следовательно, магнитного спектрометра, накалы подогревателей катодов и генераторов водорода тиратронов ТГИ-1-130/10 не форсировались.

Для питания блока запуска тиратронов и блоков считывания использовались промышленные стабилизированные выпрямители ВУС-1 и ВВС-1.

Питание анодов ламп ГИ-30 и тиратронов ТГИ-1-50/5, блока запуска тиратронов и блоков считывания осуществлялось от высоковольтных выпрямителей ПФ, а анодов тиратронов ТГИ-1-130/10 - от высоковольтного выпрямителя УПУ-1М (универсальная пробивная установка).

Время разогрева тиратронов ТГИ-1-50/5 - 3 мин, ТГИ-1-130/10 - 4 мин. Высоковольтные выпрямители ВВС-1, ПФ, УПУ-1М включались через реле времени РВТ-1200/220, установленное на выдержку в течение 5 мин. Импульс запуска с многокальной схемы совпадений через схему пропускания подавался на блок запуска тиратронов. Принципиальная схема блока запуска тиратронов представлена на рис. 44. Первые два каскада схемы представляют собою запертые блокинг-генераторы на лампах 6В2П. Оба блокинг-генератора имеют анодно-катодную обратную связь. С анодной нагрузки второго блокинг-генератора через емкость  $C_8$  снимается импульс отрицательной полярности для синхронизации. С диодной нагрузки второго блокинг-генератора через разделительный конденсатор  $C_{14}$  импульс подавался на запертую разрядную лампу ГИ-30. Зарядная емкость  $C_{20}$  разряжалась, и импульс отрицательной полярности с амплитудой 3-4 кВ подавался на блок тиратронов.

При запуске первого блокинг-генератора импульсом с амплитудой 4-5 в и длительностью нарастания 5-6 нсек время запаздывания выходного импульса не превосходит 8-10 нсек с фронтом нарастания 4 нсек. У второго блокинг-генератора эти величины равны 2-3 нсек. Время запаздывания каскада на лампе ГИ-30 равно 10-12 нсек.

Время запаздывания выходного импульса всего блока запуска 20-25 нсек. Передняя панель управления стойкой с блоком запуска тиратронов и блоком считывания показана на рис. 45, вид этих блоков сзади - рис. 46.

Для съема информации с ферритовых матриц аналоговых камер применялись два блока считывания.

Принципиальная схема блока считывания представлена на рис. 47. Первые три каскада блока аналогичны каскадам в блоке запуска тиратронов с незначительным изменением номиналов некоторых сопротивлений и емкостей. Требования к временным характеристикам этих блоков не такие жесткие, как для блока запуска тиратронов, поэтому лампы, и особенно ГИ-30, работают в облегченном режиме. Последний каскад блока считывания собран на водородном тиратроне ТГИ-1-50/5.

Импульс с анодной нагрузки ГИ-30 отрицательной полярности переворачивается на положительный с помощью импульсного трансформатора на 2-х склеенных ферритовых кольцах с наружным диаметром 88 мм, обмотка - 14 витков кабеля РК-19. С двух параллельных выходов импульсы отрицательной полярности подаются на ферритовые матрицы каждой пары аналоговых камер. Осциллограмма считываемого импульса приведена на рис. 48. Фотография второго блока считывания представлена на рис. 49. Импульс с блока запуска поступает на импульсный трансформатор блока тиратронов. Импульсный трансформатор хорошо виден на фотографии (рис. 50). Импульсный трансформатор намотан на ферритовом кольце с наружным диаметром 179,0 мм и внутренним диаметром 111 мм кабелем РК-1 и имеет шесть обмоток по 7 витков в каждой. Первичная обмотка - медная оплетка кабеля. Вторичная - внутренний проводник кабеля - присоединяется к промежуткам сетка-катод тиратронов ТГИ-1-130/10.

Принципиальная схема блока тиратронов представлена на рис. 51. С первого и шестого тиратронов высоковольтные импульсы отрицательной полярности поступают на искровые камеры ИК-1, ИК-2 с магнитострикционным съемом информации.

Со второго тиратрона высоковольтный импульс положительной полярности и с третьего тиратрона высоковольтный импульс отрицательной полярности поступают на первую пару аналоговых камер.

С четвертого и пятого тиратронов высоковольтные импульсы положительной и отрицательной полярности поступают на вторую пару аналоговых камер. Фотография передней панели блока тиратронов представлена на рис. 52. Параметры высоковольтных импульсов на электродах искровых камер следующие: амплитуда - 5,5-6,0 кв, передний фронт 80-100 нсек, длительность - 1,0 мксек. Задержка блока запуска и блока тиратронов - 200 нсек. Передний фронт на согласованную нагрузку с тиратронов 20-30 нсек.

Осциллограммы высоковольтных импульсов:

а) без пробоя искры в камере;

б) с пробоем искры в камере представлены на рис. 53.

При налаживании аппаратуры и проведении эксперимента стойка генераторов высоковольтных импульсов с блоками считывания работала стабильно и надежно.

## 8. Основные выводы из опыта эксплуатации бесфильмовых камер

Основные преимущества бесфильмовых проволочных искровых камер в физическом эксперименте – малое время обработки событий, относительная простота и надежность аппаратуры наиболее полно используются в работах, где измеряется большое число событий и анализ событий производится электронной вычислительной машиной. В нашей работе основной методической задачей было выявление тех трудностей, которые могут встретиться при работе бесфильмовых искровых камер в пучке в условиях, близких к тем, в которых используются фильмовые камеры.

Опыт работы с бесфильмовыми камерами в нашем эксперименте показал, что они с успехом могут заменить фильмовые камеры, практически не ухудшают точности регистрации и, ввиду отсутствия фотоаппаратов и сопутствующей им аппаратуры, более просты и надежны в работе.

Те трудности, которые встретились нам при работе с бесфильмовыми проволочными искровыми камерами, были обусловлены в основном большой фоновой загрузкой магнестрикционных камер. Трудности создавало также отсутствие в литературе опыта работы с аналоговыми и магнестрикционными камерами в пучке. Наш эксперимент был первым, проводимым такой методикой.

Если исключить из рассмотрения влияния больших фоновых загрузок, то эффективность камер совместно с электроникой была достаточно высокой (90% для отдельной камеры). Эти данные получены в условиях малой загрузки и свежей рабочей смеси в камерах. Однако за 4–5 суток работы общая эффективность всех камер могла падать на несколько процентов, что объяснялось изменением параметров рабочей смеси и тем, что мы работали вблизи начала "плато" по напряжению для искровых камер. Подобный режим работы, когда камеры работали при постоянном наполнении, очень неудобен ввиду необходимости частого

измерения эффективности камер. Для того чтобы обеспечить постоянство эффективности и других параметров искровых камер, желательно использовать во время работы постоянный продув камер рабочей смесью.

Так как амплитуда сигналов, снимаемых с искровых камер, была довольно малой (особенно это относится с магнестрикционным камерам) необходимо было делать соответствующую электронную аппаратуру достаточно помехоустойчивой. Кроме стробирования сигналов для магнестрикционных камер оказалось необходимым следить за тщательным выполнением монтажа, особенно соединений между блоками электронной аппаратуры искровых камер. Ввиду специфики работы нашей установки (срабатывание считывающих тиратронов после срабатывания искровых камер) имелась необходимость возвращения всех триггеров в начальные состояния перед началом сброса пучка).

Безусловно важной при работе камер в одотрековом режиме является возможность определять число запусков, в которых через камеры прошло две и более частицы. К сожалению, в нашем случае система с "признаком" оказалась неудовлетворительной ввиду невысокой эффективности при регистрации многих частиц в камерах. По-видимому, наиболее удовлетворительным решением является установка двух катушек на магнестрикционной ленте<sup>/13/</sup>, суммарный отсчет с которых для одной искры должен быть равен постоянной величине для данной ленты.

Следует отметить, что для искровых камер, предназначенных для регистрации многих треков, нужно работать с лентами, имеющими малое затухание, а также иметь хорошее демпфирование отраженных от концов ленты сигналов, чтобы получить удовлетворительное отношение полезных сигналов к ложным.

Опыт работы установки показал, что для облегчения анализа исследуемых событий и уменьшения фонового материала при регистрации трека частицы необходимо использовать по меньшей мере 3, а лучше 4 искровых камеры (для увеличения эффективности блока, регистрирующего прямой трек).

Система питания искровых камер работала вполне надежно и обеспечивала высокую их эффективность. За исключением проверки задержек тиратронов для аналоговых камер и замены их в случае необходимости система питания не требовала других регулировок и наладок.

Для аналоговых камер, кроме использованного нами включения, можно пред-



ложить различные варианты более сложных ферритовых матриц. Так, на рис. 54 показана схема включения матрицы для измерения разностей координат обоих знаков. Применение режима записи "медленным" током после пробоя искры позволяет значительно увеличить точность регистрации координат. Авторы считают возможным получить точность 0,5 мм при шаге колец в матрице, равном 1 мм. Аналоговые камеры могут использоваться в схеме запуска больших систем фильмовых искровых камер, если нужен предварительный анализ информации.

## 9. Программа учета геометрии установки

Конечные размеры элементов установки, конечные пространственные размеры пучка первичных частиц, а также неизбежное присутствие определенного количества вещества на пути частиц - все это не давало возможности непосредственно определить телесный угол установки.

Для оптимизации геометрии установки, для расчета телесного угла, а также для расчета поправок на распады, взаимодействие и пр., была создана программа, написанная на языке АЛГОЛ. С помощью этой программы методом Монте-Карло моделировался в реальных условиях эксперимента процесс упругого рассеяния  $\pi^- p \rightarrow p \pi^-$  и прослеживалась судьба всех частиц, участвующих в реакции.

Программа предусматривала решение следующих задач:

А. Определение зависимости эффективности установки от параметров первичного пучка. Здесь, в основном, исследовался вопрос о влиянии углового и импульсного разброса частиц в пучке  $\pi^-$ -мезонов, пространственных размеров пучка на телесный угол установки, а также вопрос о допустимых пределах неустойчивости параметров пучка в различных экспозициях.

Б. Нахождение элементов, определяющих телесный угол установки, а также влияние на полную эффективность каждого отдельного элемента.

В. Расчет величины поправок, возникающих за счет ядерного взаимодействия первичных и вторичных частиц, а также учет распадов  $\pi^-$ -мезонов налету.

Г. Расчет эффективного телесного угла при заданном расположении аппаратуры и параметров пучка. Входными данными в программу являлись следующие величины и функции:

1. Пространственные и импульсные характеристики первичного пучка.
2. Сечения ядерных взаимодействий  $\pi^-$ -мезонов и протонов в различных веществах.

3. Геометрические размеры всех элементов установки.

При составлении программы делались некоторые предположения упрощающего характера, а именно:

1. Не учитывалось многократное рассеяние заряженных частиц в веществе.
2. Поля магнитных спектрометров считались строго однородными.

На выходе программы имелось 19 счетчиков, показывающих величину эффективности каждого элемента установки, а также счетчика, регистрирующего интегральную по всей установке эффективность как функцию угла рассеяния.

Упругое рассеяние моделировалось для углов рассеяния  $\pi^-$ -мезона назад от  $180^\circ$  до  $150^\circ$  в лабораторной системе отсчета. В результате работы программы были получены следующие основные данные:

А. Зависимость эффективности установки от параметров первичного пучка.

Угловой разброс первичного пучка определялся экспериментально. Было установлено, что угловое распределение можно описать нормальным законом с  $\sigma = 0,008$  рад. Процесс моделировался как с этим угловым разбросом, так и при  $\sigma = 0$ ; на рис. 55 показаны кривые эффективности установки для обоих случаев (кривые I и II). Как видно из рисунка, эффективность изменяется мало; при отсутствии углового разброса (кривая II) увеличение эффективности характеризуется коэффициентом  $k = s_1/s_2 = 1,12$ , где  $s_1$  - площадь под кривой эффективности при  $\sigma_2 = 0$ , а  $s_2$  - при  $\sigma = 0,008$  радиан. Другим фактором, который мог изменять эффективность установки в целом, являлось пространственное хождение оси пучка. Это хождение было обусловлено нестабильностью аппаратуры, определявшей момент сброса протонов на внутреннюю мишень ускорителя и нестабильностью элементов магнитного канала. Каждое отдельное облучение характеризовалось положением максимума оси пучка и законом распределения, который оказался близким к нормальному с дисперсиями по осям  $x$  и  $y$   $\sigma_x = 13$  и  $\sigma_y = 20$  мм. Перемещение оси пучка происходило в пределах от  $-5$  до  $+5$  мм от геометрической оси установки. Упругое рассеяние моделировалось с положением пучка в этих пределах с соответствующими весами, пропорциональными длительности облучения при каждом сдвиге пучка, а также при

одном и двух симметричных положениях пучка (кривая III), близких к геометрической оси. Для двух последних расчетов кривые практически совпадают. Отличие кривой эффективности, посчитанной для всех положений пучка, от кривой при одном положении, взятом на расстоянии 5 мм от геометрической оси, составляет около 3% по площади под кривой. Таким образом, можно было сделать заключение, что сдвиги максимумов плотности пучка в пространстве в существующих в опыте пределах достаточно слабо изменяли эффективность установки, то есть задача стабилизации пучка в более узких пределах не была необходимой. Анализ данных по влиянию разного рода нестабильностей в канале (изменение импульса, положения пучка и пр.) на телесный угол установки показывает, что ошибка, вносимая этими нестабильностями в телесный угол установки, не превышает 2-3%.

Б. Элементы, определяющие эффективность установки.

Для малых углов рассеяния нижнюю границу телесного угла установки определяла камера ИК-2, а, точнее, отверстие в ней, необходимое для того, чтобы пропустить пучок первичных  $\pi^-$ -мезонов. Со стороны больших углов рассеяния телесный угол установки ограничивал счетчик S7.

Вывод в программе данных геометрической эффективности всех элементов установки позволял определять допустимые погрешности при установке того или другого элемента и их оптимальные геометрические размеры.

В. Поправки на ядерное взаимодействие

Потери рабочих событий из-за ядерного взаимодействия вторичных частиц и распадов  $\pi^-$ -мезонов налету практически не зависят от величины угла рассеяния пиона и составляют в среднем 23-25% (кривая IV на рис. 55 показывает эффективность установки, зависящую от этих процессов). Таким образом, поправка на ядерное взаимодействие и распады налету оставалась постоянной и была равна 1,25.

Г. Определение эффективного телесного угла установки

Телесный угол установки определялся интегрированием кривой эффективности (с учетом ядерного взаимодействия и других поправок), преобразованной из лабораторной системы в систему центра масс. Ошибка в определении телесного угла в связи с неточным проведением кривой из-за статистических ошибок, определяемых ограниченным временем на вычислительной машине, не превышала 3-4%. Полная ошибка в определении телесного угла установки не превышала  $\pm 5\%$ .

Телесный угол установки в системе центра масс для разных импульсов имел следующие значения:

4,1 Гэв/с	$(8,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ стеррад.
5,0 Гэв/с	$(8,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ стеррад.
6,0 Гэв/с	$(8,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ стеррад.
7,1 Гэв/с	$(7,5 \pm 0,4) \cdot 10^{-3}$ стеррад.

Аппаратура на пучке размещалась таким образом, чтобы получить оптимальный телесный между 5,0 и 6,0 Гэв/с. Близкие телесные углы для импульсов 4,1 и 7,1 Гэв/с объяснялись перемещением элементов установки на этих импульсах по сравнению с положением их на импульсах 5,0 и 6,0 Гэв/с.

## 10. Обработка результатов измерений

В этом разделе дано описание обработки экспериментальных данных, а также контрольных тестов, проводившихся при измерении сечений.

Дифференциальное сечение исследуемой реакции вычислялось по формуле:

$$\frac{d\sigma}{d\omega} = \frac{N}{n \cdot M \cdot \epsilon \cdot \eta \cdot \Delta\omega}, \quad (4)$$

где  $N$  – число упругих событий;  $M$  – число отсчетов монитора;  $n$  – число ядер водорода в мишени на  $\text{см}^2$ ;  $\epsilon$  – коэффициент, учитывающий эффективность счетчиков и искровых камер;  $\eta$  – коэффициент, учитывающий "сбои" в стрипционных и аналоговых камерах;  $\Delta\omega$  – эффективный телесный угол установки, рассчитанный на ЭВМ.

Рассмотрим вначале коэффициенты в формуле (4).

Коэффициент  $\epsilon$  равен произведению эффективностей счетчиков S3, S5, S6, S7 и эффективностей искровых камер. Определение эффективностей отдельных счетчиков и искровых камер (совместно с электроникой) дано выше в соответствующих разделах. Величина  $\epsilon$  изменялась от 0,72 до 0,84 в разных сеансах работы.

Эффективности сцинтилляционных счетчиков измерялись с высокой точностью, эффективность камер измерялась с ошибкой  $\approx 3\%$  несколько раз во время работы.

Коэффициент  $\eta$  учитывает "сбои" в камерах и представляет собой вероятность правильного отсчета при срабатывании камер, зависящую от загрузки. В разных сеансах величина  $\eta$  изменялась от 0,76 до 0,92. Средняя ошибка измерения 0,03.

Просчеты из-за загрузки счетчиков, включенных в многоканальную схему, составляли 1% при 4 Гэв/с и были обусловлены в основном загрузкой S3, A1 и A3.

Доля случайных совпадений в мониторе, которую нужно было учитывать, составляла 0,5% при наибольшей интенсивности.

Поправка к плотности жидкого водорода ( $0,070 \text{ г/см}^3$ ) из-за испарения водорода в мишени меньше 0,5%.

Эффективный телесный угол, вычисленный на ЭВМ, мало менялся при переходе от одного импульса к другому и составлял  $8 \cdot 10^{-3}$  стеррад в системе ц.м. с ошибкой  $\pm 5\%$ .

В мониторинг отсчет вносилась поправка на примесь в пучке  $\pi^-$ -мезонов других частиц. Основной вклад давала примесь  $\mu^-$  и  $e^-$ , которая изменялась от 7% при 4 Гэв/с до 5% при 7 Гэв/с. Для 4 Гэв/с данные по  $\mu^-$ -мезонам взяты из работы/14/, где проводилось экспериментальное определение доли  $\mu^-$ -мезонов в этом пучке, а для числа электронов - из работы/15/, также проводившейся на этом пучке. Примесь  $\mu^-$ -мезонов (определенная исходя из геометрии установки для 4 Гэв/с) составляла 4%, что совпадает с результатом в/14/. Для других импульсов число  $\mu^-$  и  $e^-$  определялось расчетным путем.

Число упругих событий  $N$  находилось следующим образом. Из всех запусков установки отбирались те, в которых сработали аналоговые камеры, а трек в камерах ИК-1, ИК-2 указывал на событие "из мишени". Отсчет в аналоговых камерах должен был попадать в интервал  $P \pm 2\Delta P$ , где  $P = P_0 + 0,4 \text{ Гэв/с}$ . Здесь  $P_0$  - импульс первичных  $\pi^-$ -мезонов,  $2\Delta P$  - удвоенная полуширина распределения событий по импульсу. В число отобранных таким образом событий вводились поправки:

- 1) на неупругие события;
- 2) на случайные совпадения отсчетов аналоговых камер в "упругий интервал" с событием в камерах ИК-1, ИК-2 "из мишени".

Вклад неупругих событий определялся простой линейной экстраполяцией событий "вне интервала упругого пика" до порога неупругих событий (см. рис.31,

пунктирная кривая, события для 4 Гэв/с). Этот вклад составляет = 3% для всех импульсов.

Для определения вероятности имитации упругих событий случайными наложениями использовалась следующая формула:

$$\alpha = \beta \gamma, \quad (5)$$

где  $\alpha$  - вероятность случайного упругого отсчета;  $\beta$  - вероятность срабатывания аналоговых камер в интервале упругого пика при срабатывании стрикционных камер "не в мишень",  $\gamma$  - вероятность отсчета стрикционных камер "из мишени" независимо от отсчетов аналоговых камер.

Если через  $x$  обозначить истинное число упругих срабатываний, а через  $M$  - полное число запусков, то

$$\alpha = \frac{N_1 - x}{M - x}, \quad (6)$$

где  $N_1$  - число запусков, в которых аналоговые камеры дали отсчет в упругий интервал, а стрикционные - отсчет "из мишени"

$$\beta = \frac{N_2 - x}{M - x}, \quad (7)$$

где  $N_2$  - число запусков, в которых аналоговые камеры дали отсчет в "упругий интервал" независимо от отсчета в стрикционных камерах.

Коэффициент  $\gamma$  был определен в экспериментах с пустой мишенью на 4 и 6 Гэв/с и оказался равным  $\gamma = 0,042 \pm 0,042$ .

Для  $x$  можно получить из формул (5), (6) и (7)

$$x = \frac{N_1 - N_2 \gamma}{1 - \gamma}. \quad (8)$$

Так как  $N_2$  в  $1,5 \div 2$  раза превышало  $N_1$ , то систематическая ошибка в числе упругих событий из-за неточного знания коэффициента  $\gamma$  была равна  $\pm 7\%$ .

Имея в виду, что для "упругого интервала," брался интервал, соответствующий двум стандартным ошибкам, с учетом неупругих взаимодействий получим формулу для числа упругих событий:

$$N = \frac{x - N_{\text{неупр.}}}{0,95}$$

(9)

Для контроля полученных результатов было проведено два измерения с пустой мишенью на 4 и 6 Гэв/с. На 4 Гэв/с через установку было пропущено  $1,6 \cdot 10^8$   $\pi^-$ -мезонов (при работе с водородом через установку прошло  $7,6 \cdot 10^8$   $\pi^-$ -мезонов и наблюдалось 92 упругих события). При этом не было найдено ни одного упругого рассеяния. На 6 Гэв/с через установку также прошло  $1,6 \cdot 10^8$   $\pi^-$ -мезонов (соответствующие цифры с водородом  $2,4 \cdot 10^8$   $\pi^-$  и 15 упругих рассеяний). При этом был найден один случай, имитирующий упругое рассеяние. Эти данные не использовались для вычитания, а являлись лишь проверкой правильности работы установки.

Анализ данных по ложным запускам установки показал, что основной фон был обусловлен взаимодействием крыльев пучка первичных  $\pi^-$ -мезонов в стенках порогового черенковского счетчика и полюсах отклоняющего магнита, приводившими к рождению  $\pi^+$ -мезонов. Совпадение таких  $\pi^+$ -мезонов с импульсом, близким к импульсу первичного пучка, со случайным отсчетом счетчика S3 давало ложный запуск.

В заключение авторы выражают благодарность В. Буланову, А. Валевичу, А. Елишеву, А. Куликову, Б. Старченко, В. Сутулину, И. Цапурияну, А. Широкову за помощь в при проведении эксперимента, М. Лихачеву, В. Ставинскому, Н. Фалееву за обсуждение экспериментальных и методических результатов. Авторы благодарны покойному академику В.И. Векслеру и И.В. Чувило за внимание и интерес к работе.

#### Л и т е р а т у р а

1. Б.А. Кулаков, Э.И. Мальцев, П.И. Филиппов, О.Н. Цисляк, Э.Н. Цыганов. Препринт ОИЯИ P13-3132, Дубна 1967.
2. D. Dekkers, J.A. Geibel, R. Mermod, C. Weber, T.R. Willits, K. Winter, B. Jordan, M. Vivargent, N.M. King, E.J.N. Wilson. Phys. Rev., 137 B, 962 (1965).

3. В.Г. Горбенко, В.И. Лапшин, В.И. Рыкалин, З. Цисек, В.П. Хромов. Препринт ОИЯИ 13-3095, Дубна 1967.
4. М.Ф. Лихачев, И.А. Савин, В.С. Ставинский. Препринт ОИЯИ Р-2528, Дубна 1965.
5. М.В. Лихачев. Газовые черенковские счетчики. Диссертация, Дубна, 1967.
6. И.А. Голутвин, Ю.В. Заневский. ПТЭ № 5, стр. 114 (1964).
7. И.А. Голутвин, Ю.В. Заневский, Б.А. Кулаков, В.С. Пантуев, М.Н. Хачатурян, М.С. Хвастунов, Э.Н. Цыганов. Препринт ОИЯИ 1636, Дубна 1964.
8. А.Г. Грачев, С.С. Кирилов. Препринт ОИЯИ 1922, Дубна 1964.
9. C.Ray, S.Parker, B.Sherwood and D.Schwartz "Decision - making spark chamber" EFINS 64-37.
10. И.А. Голутвин, Ю.В. Заневский, Б.А. Кулаков, Э.Н. Цыганов. ПТЭ, № 5, стр. 66 (1966).
11. М.Х. Анкинд, Л.С. Барабаш, А.Г. Грачев, В.В. Ермолаев, В.Д. Инкин, Ю.А. Каржавин, И.Н. Кухтина, Ю.Р. Лукстиньш, Л.Г. Макаров, Э.О. Оконов, Г.Г. Тахтамышев, В.И. Устинов, С.А. Хорозов. Препринт ОИЯИ 1-3050, Дубна 1966.
12. А.С. Гаврилов, И.А. Голутвин, Ю.В. Заневский, С.С. Кирилов, Б.А. Кулаков, Л.Г. Макаров, Э.Н. Цыганов. ПТЭ № 6, стр. 69 (1966).
13. I. V. Chuvilo, P. I. Filipov, A. S. Gavrilov, N. N. Govorn, I. A. Golutvin, E. D. Gorodnichenov, I. I. Ivanchenko, S. S. Kirilov, Ju. T. Kiryashin, V. D. Kondrashov, G. M. Kadykov, V. I. Moroz, T. C. Nigmatov, O. K. Nefedyev, V. P. Pugachevich, V. N. Sadovnikov, E. N. Tsyganov, Ju. V. Zanevsky. "Filmless spark chamber system for operation with on-line computer". Препринт ОИЯИ E13-3141, Дубна 1967.
14. Ким Хи Ин, А.А. Кузнецов, В.В. Миллер. Препринт ОИЯИ 2092, Дубна 1965.
15. В.С. Пантуев, М.Н. Хачатурян. ПТЭ, № 3, стр. 51 (1965).

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 сентября 1967 г.



Т а б л и ц а 1

С ч е т ч и к	Размеры пластика в мм <sup>3</sup> x+y+z*)	Поперечные размеры отверстия в пласти- ке в мм <sup>2</sup>
S1	150 x 150 x 15	
S2	150 x 150 x 15	
A1	750 x 750 x 40	70 x 70
S3	520 x 520 x 40	100 <sup>xx)</sup>
S4	60 <sup>xx)</sup> x 5 <sup>xxx)</sup>	
S7	185 x 185 x 10	
A3(S9)	200 x 200 x 10	
S8	3 x 150 x 35	
S5	580 x 580 x 35	
S6	610 x 610 x 40	
SA2	420 x 420 x 15 <sup>xxxx)</sup>	70 x 70

x) - Z - размер по направлению пучка

xx) φ - в мм

xxx) - в некоторых сеансах размер по пучку был 3 мм

xxxx) - в счетчике A2 было 2 пластика указанных размеров, с 10 мм между ними.

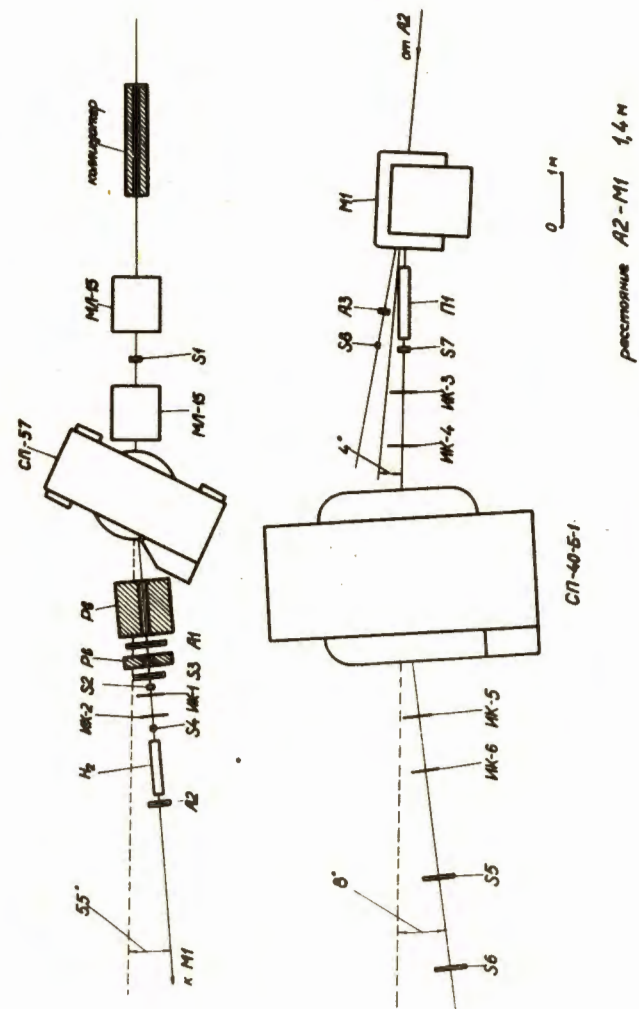


Рис. 1. Общая схема расположения аппаратуры.

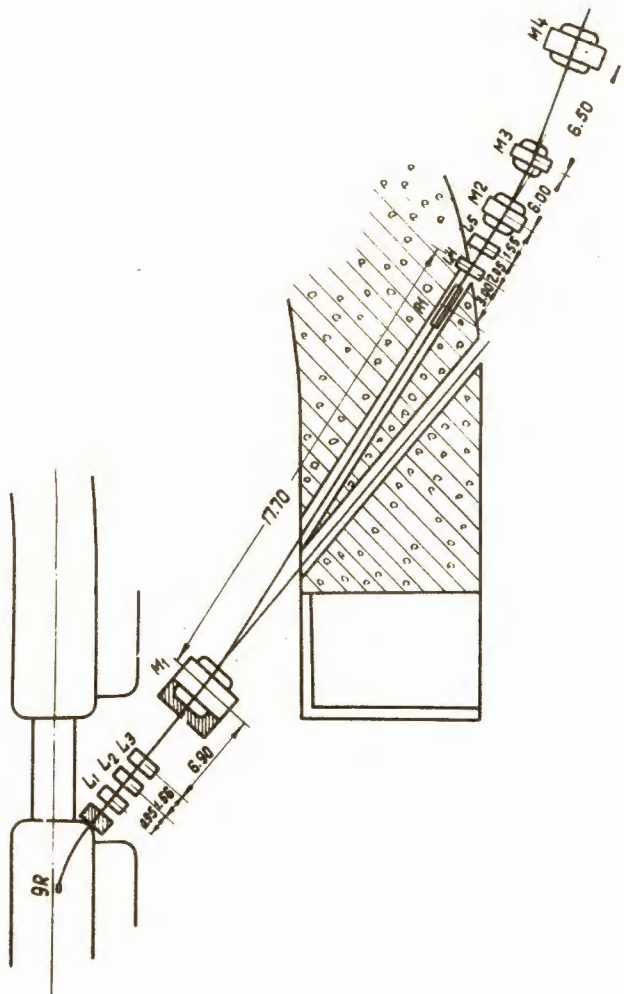


Рис. 2. Магнитный канал.

$L_1, L_2$  - магнитные линзы МЛ-17,  $L_3$  - магнитная линза МЛ-16,  
 $M_1$  - поворотный магнит СП-40-Б-1,  $A_1$  - импульсный коллиматор,  
 $L_4, L_5$  - магнитные линзы МЛ-15,  $M_2$  - поворотный магнит СП-57,  
 $M_3$  - отклоняющий магнит,  $M_4$  - анализирующий магнит СП-40-Б-1.

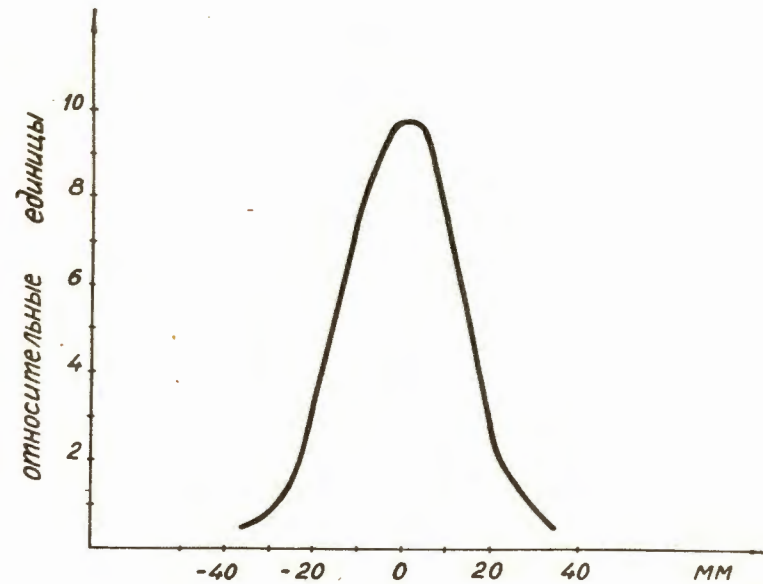


Рис. 3. Распределение пучка по горизонтали.

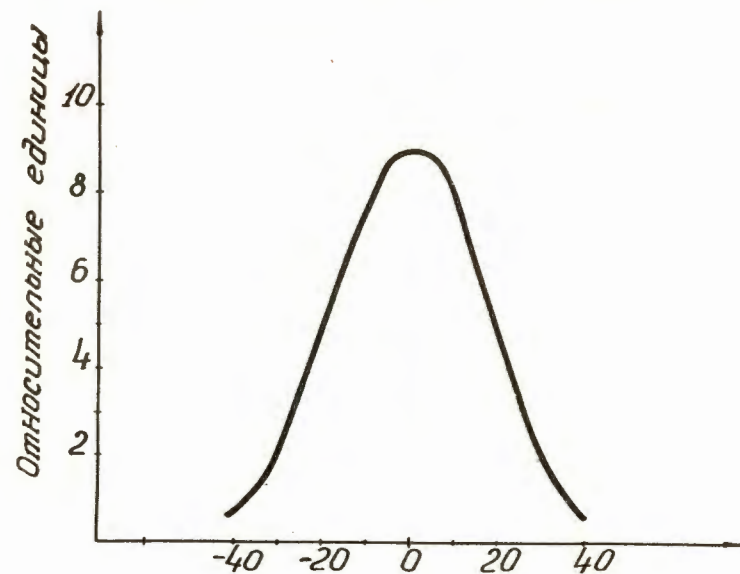


Рис. 4. Распределение пучка по вертикали.

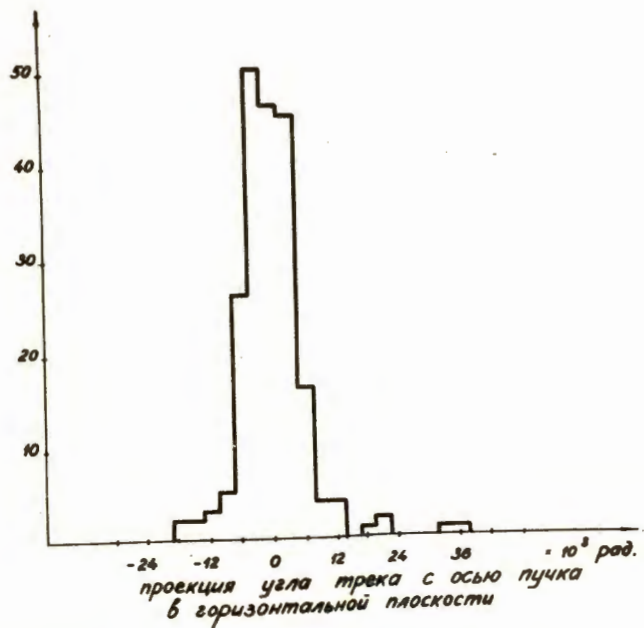
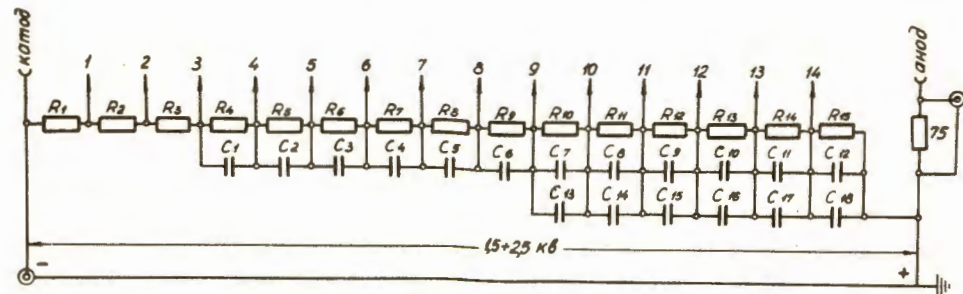


Рис. 5. Угловая расходимость пучка.



$R_1$	27 ком	$R_{11}$	27 ком	$C_1$	2 т ппр	$C_{14}$	5,0 мкф
$R_2$	33 ---	$R_{12}$	27 ---	$C_2$	2 т ---	$C_{15}$	20,0 ---
$R_3$	56 ---	$R_{13}$	33 ---	$C_3$	2 т ---	$C_{16}$	50 ппр
$R_4$	33 ---	$R_{14}$	51 ---	$C_4$	6,8 т ---	$C_{17}$	100 ---
$R_5$	33 ---	$R_{15}$	120 ---	$C_5$	6,8 т ---	$C_{18}$	300 ---
$R_6$	27 ---			$C_6$	0,05 мкф	$C_{19}$	1 т ---
$R_7$	27 ---			$C_7$	0,05 ---	$C_{20}$	3 т ---
$R_8$	27 ---			$C_8$	0,25 ---		
$R_9$	27 ---			$C_9$	0,5 ---		
$R_{10}$	27 ---			$C_{10}$	2,0 ---		

Рис. 7. Делитель, усредненный по нескольким ФЭУ-36.

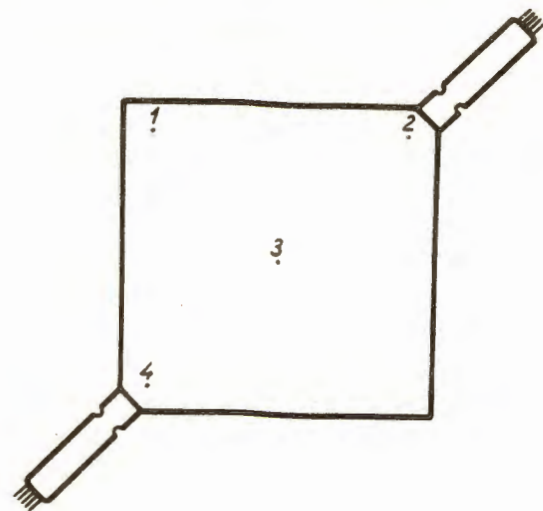


Рис. 8. Позиции, в которых снимались эффективности больших счетчиков.

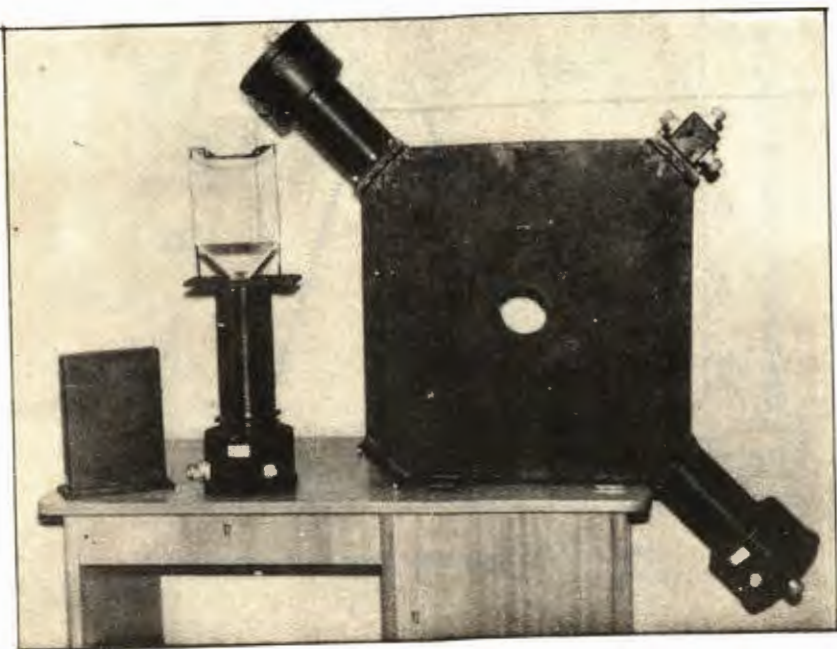


Рис. 6. Сцинтилляционные счетчики 81 и 88 .

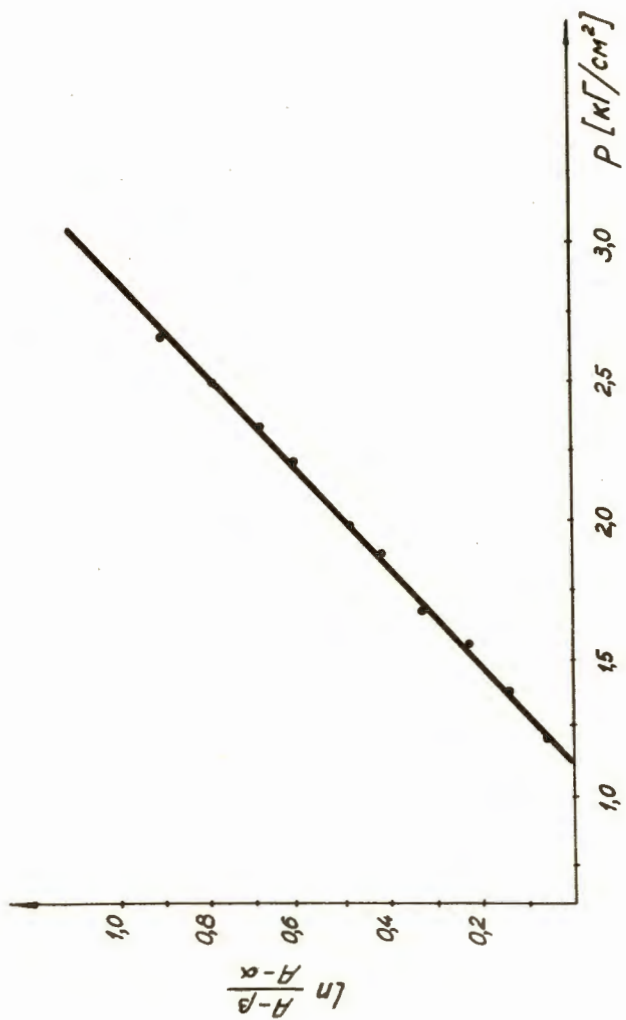


Рис. 8. Зависимость эффективности черенковского счетчика от давления по формуле (2).

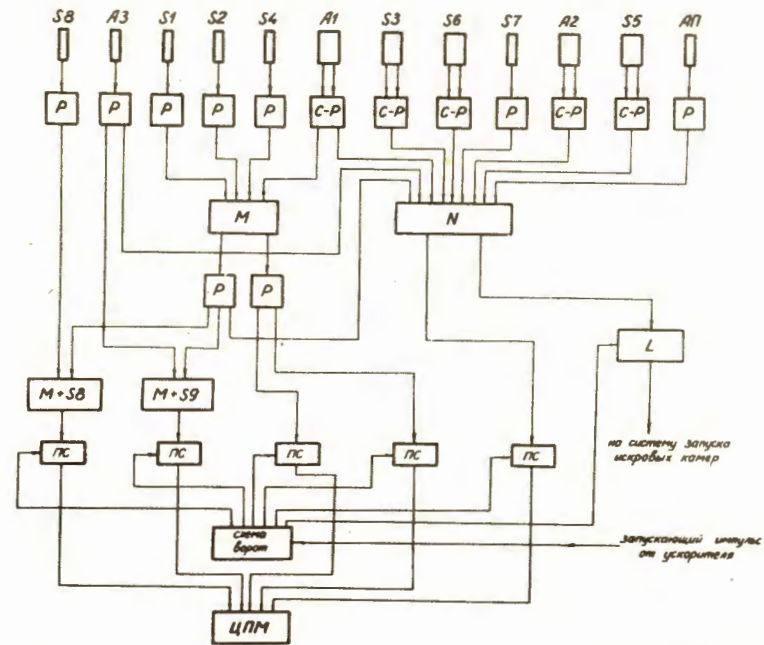


Рис. 10. Блок-схема формирования запускающего импульса для искровых камер.

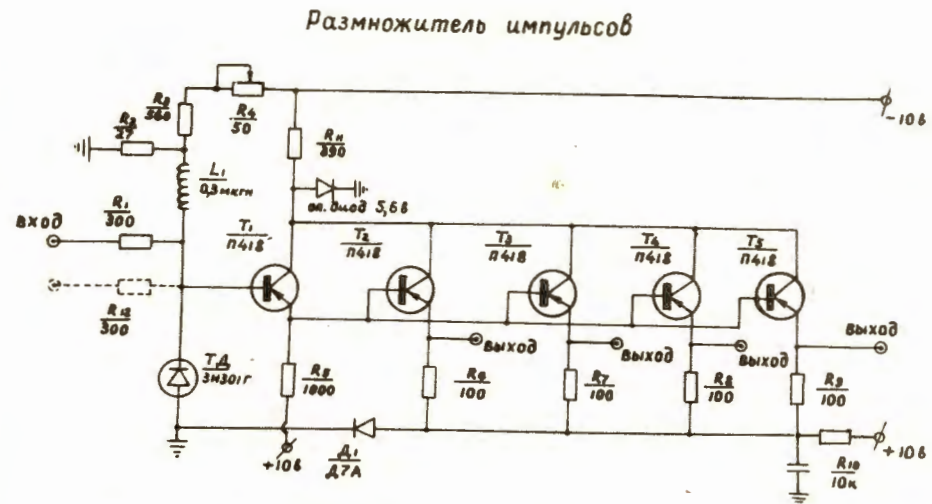


Рис. 11. Размножители и сумматоры-размножители импульсов.

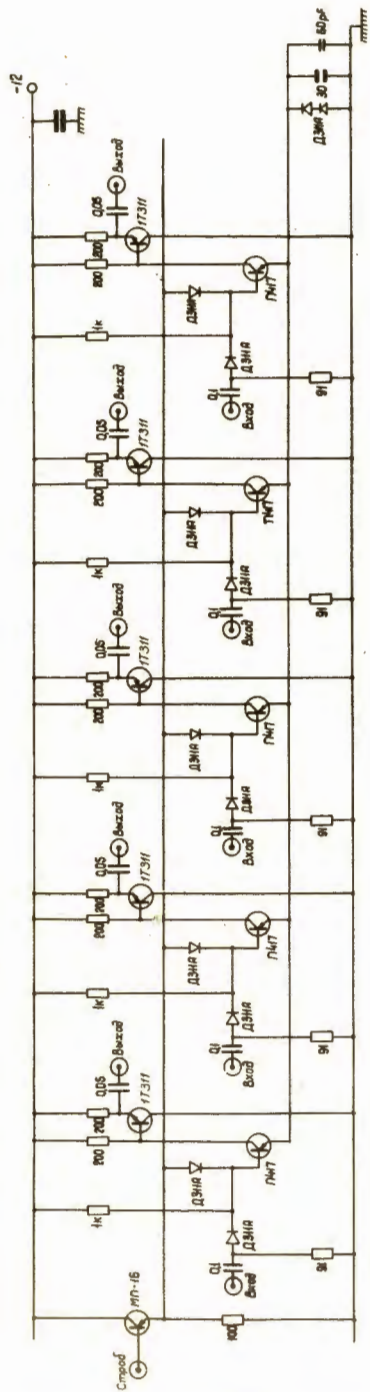


Рис. 12. Схема пропускания.

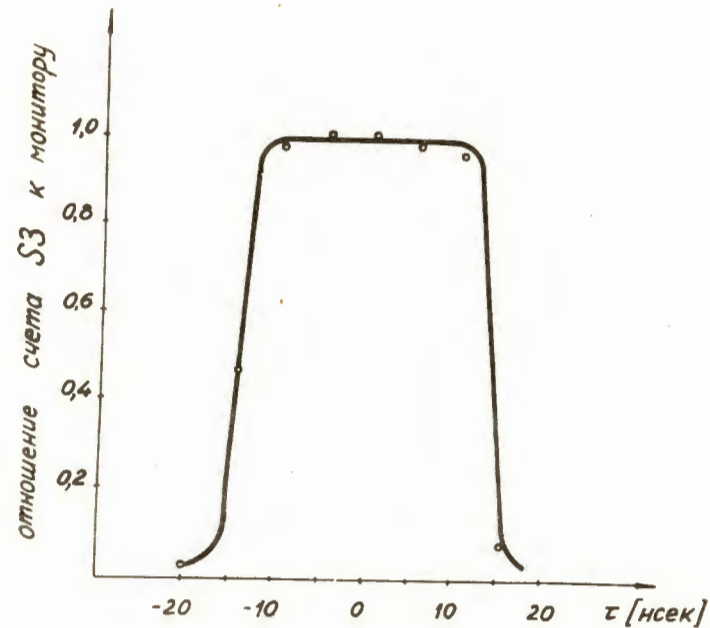


Рис. 13. Задержанные совпадения для счетчика S3 .

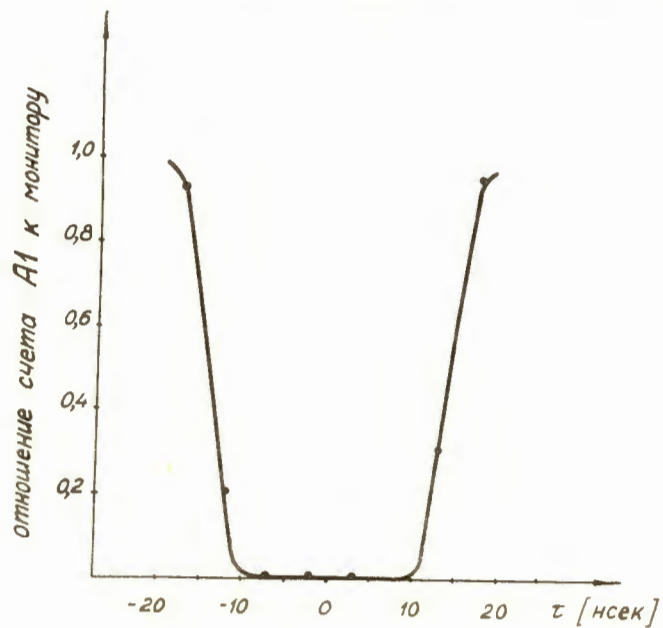


Рис. 14. Кривая антисовпадений для счетчика A1 .

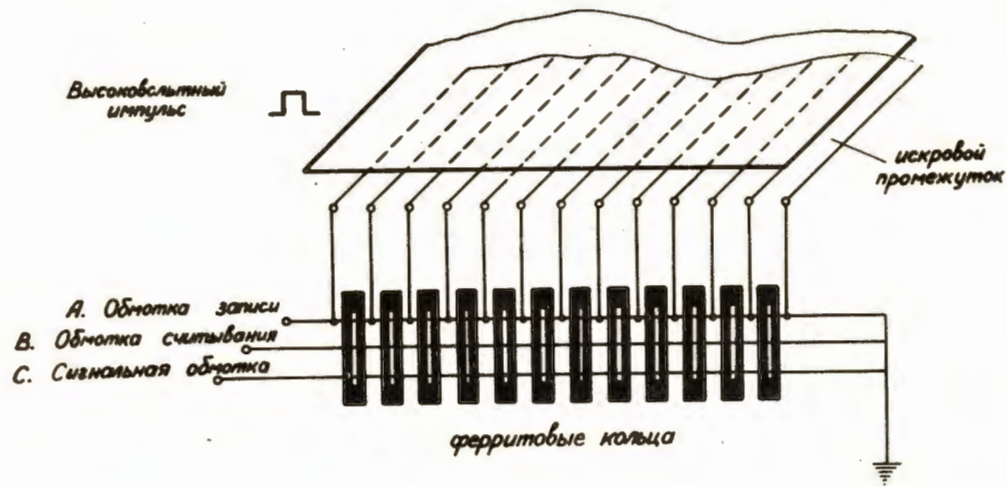


Схема матрицы, предназначенной для измерения углов частиц.

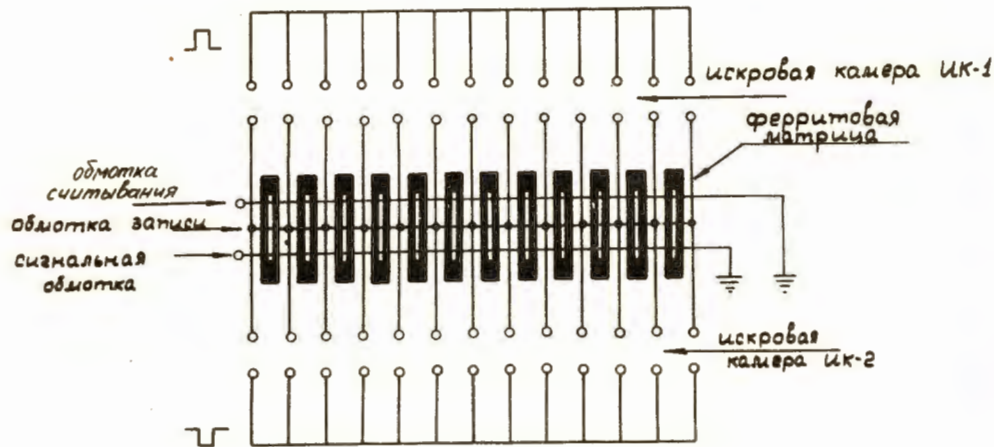


Рис. 15. Различные типы ферритовых матриц аналоговых камер.  
 а) Матрица для съема координаты искры. б) Матрица для съема разности координат искр в двух искровых камерах (способ измерения углов). Стрелками указаны направления токов.

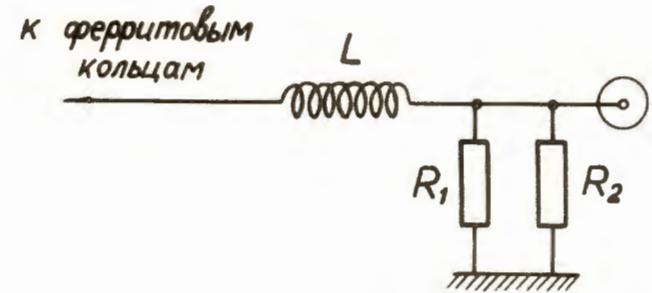


Рис. 16. Съёмная цепочка ферритовой матрицы, выбранная для обеспечения линейности выходного сигнала при работе на кабель с волновым сопротивлением 50 ом.  $L = 100$  мкГн,  $R_1 = 180$  ом,  $R_2 = 750$  ом для ИК-5, ИК-6,  $R_2 = 820$  ом для ИК-3, ИК-4.

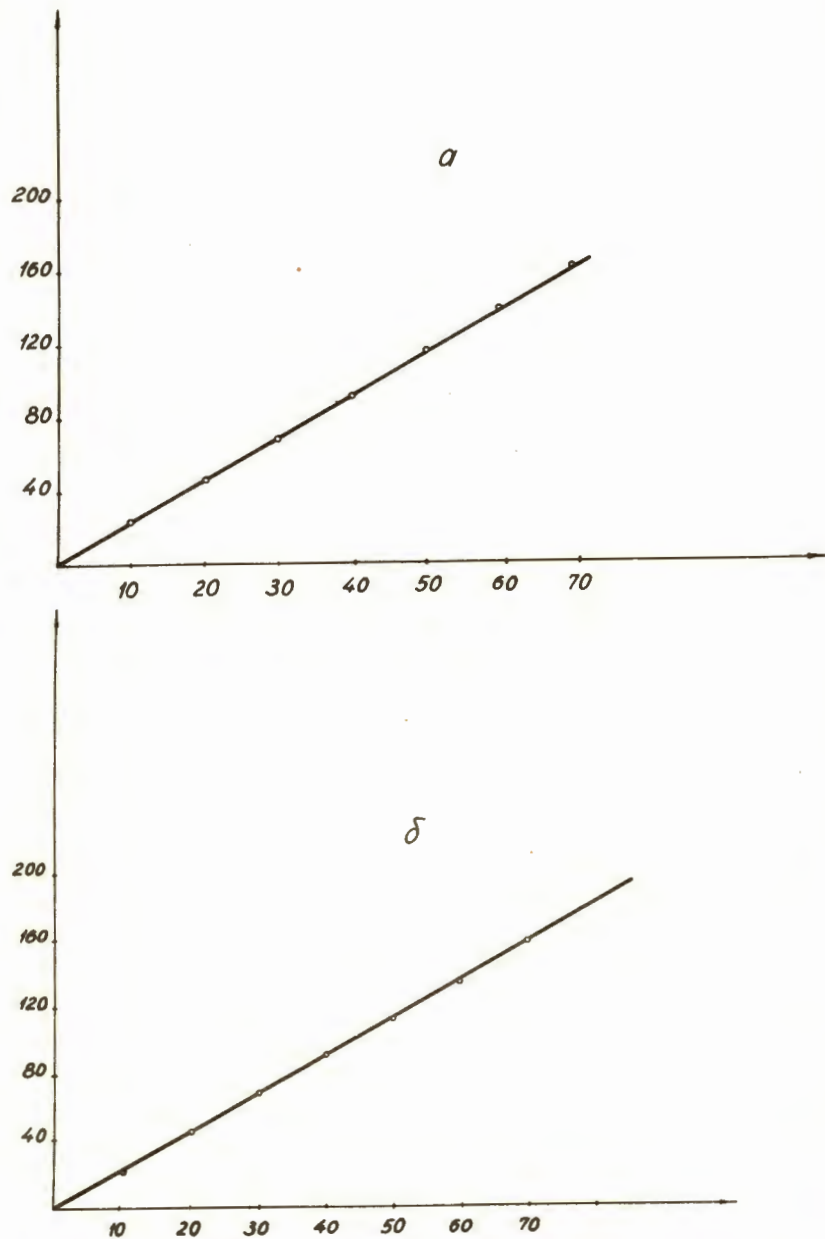


Рис. 17. Зависимость амплитуды выходного сигнала с ферритовой матрицы от числа перемагничиваемых колец. По оси абсцисс отложено число перемагничиваемых колец, по оси ординат - амплитуда выходного сигнала в относительных единицах. а) ИК-3, ИК-4; б) ИК-5, ИК-6.

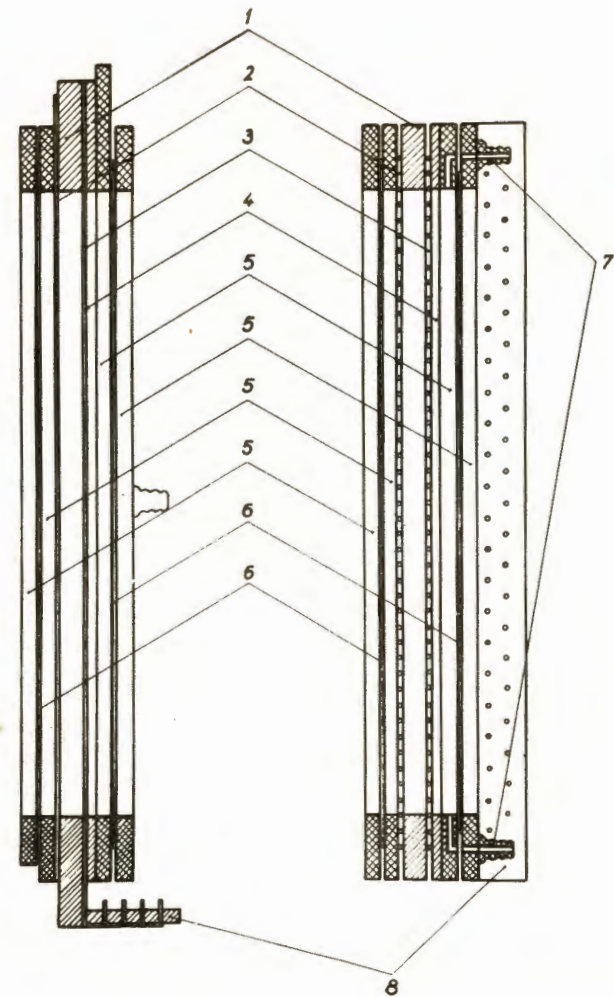


Рис. 18. Конструкция проволочной искровой камеры магнитного спектрометра. 1 - стеклянная рамка, 2 - высоковольтный проволочный электрод, 3 - съемный (земляной) проволочный электрод, 4 - изолирующая прокладка из стекла, 5 - внешние металлические рамки, 6 - стенки из лавсана, 7 - газовые разъемы для заполнения и продува камеры рабочим газом, 8 - пластинка из изолирующего материала для размещения контактов вывода проволок съемного электрода.

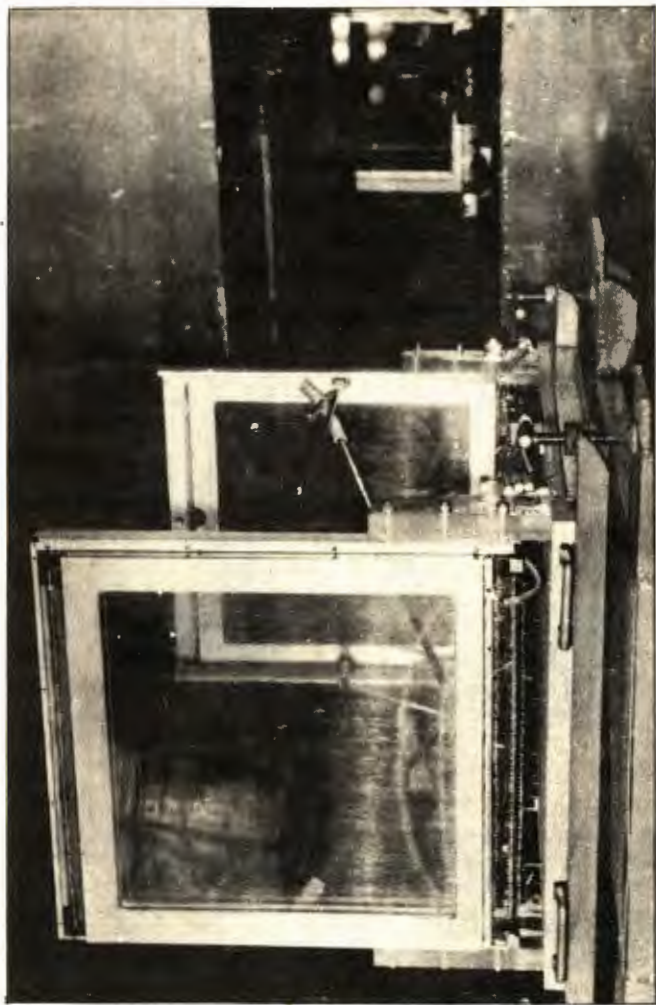


Рис. 19. Общий вид блока из двух камер для измерения углов частот.

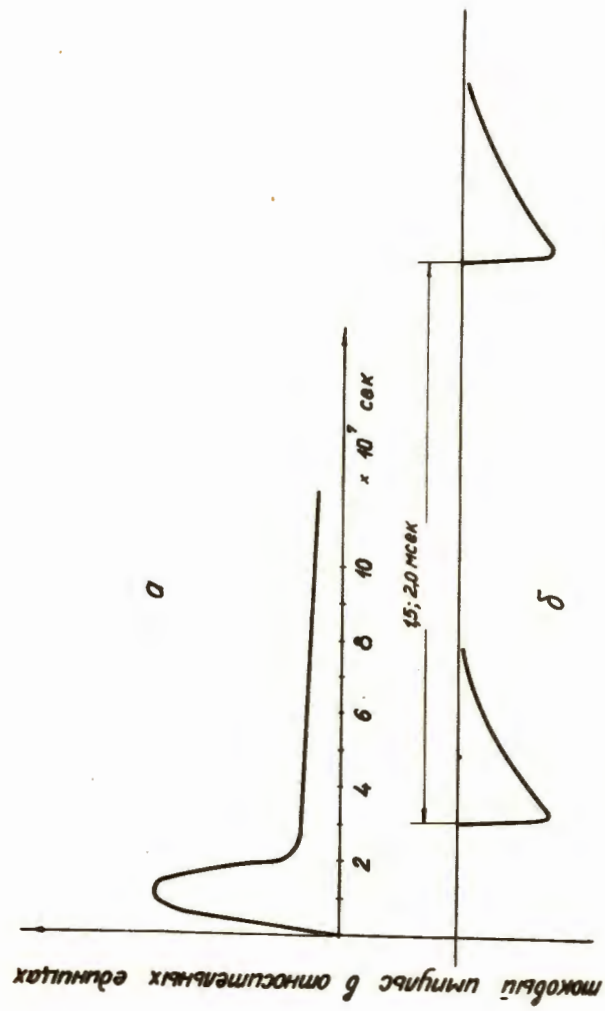


Рис. 20. Временная диаграмма токов через обмотку записи и обмотку снятия ферритовой матрицы в режиме записи информации. а) Ток через искру в камере и через рабочий участок матрицы. б) Ток в обмотке считывания (импульс блокировки).



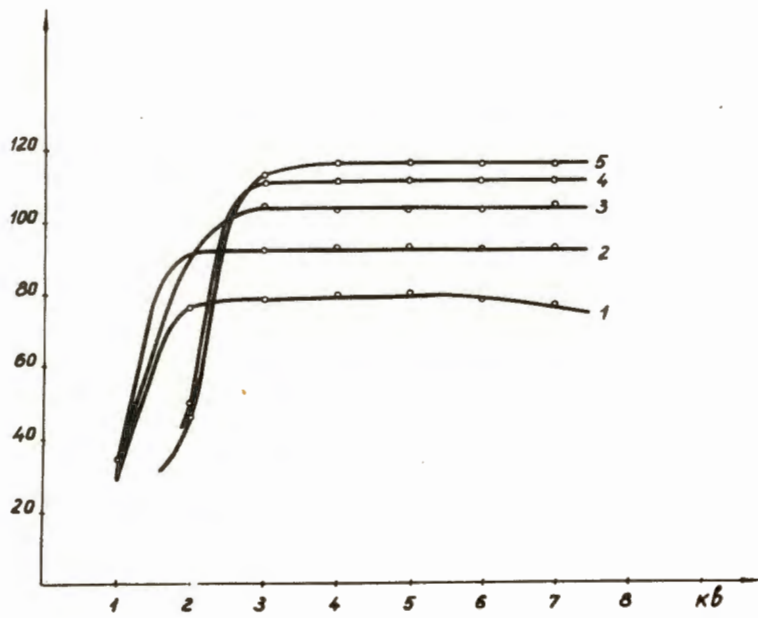


Рис. 21. Зависимость выходного сигнала с фиксированного участка матрицы от напряжения питания для различных амплитуд импульса считывания и блокировки. По оси абсцисс отложено напряжение питания камер в киловольтах, по оси ординат - амплитуда выходного сигнала в относительных единицах.  
 1 -  $U = 2$  кВ; 2 -  $U = 2,5$  кВ; 3 -  $U = 3,0$  кВ;  
 4 -  $U = 3,5$  кВ; 5 -  $U = 4,0$  кВ.

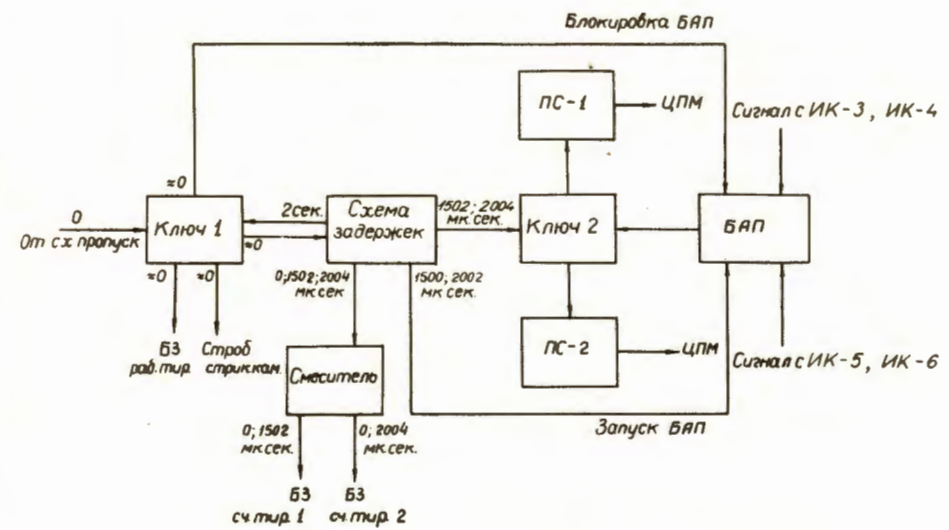


Рис. 22. Блок-схема аппаратуры (принципиальная схема).

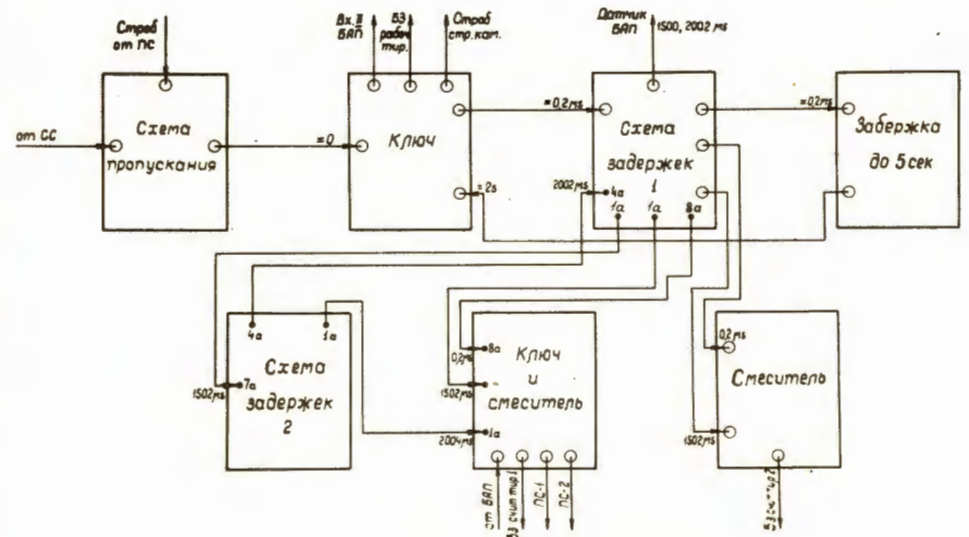


Рис. 23. Блок-схема аппаратуры (рабочая схема).

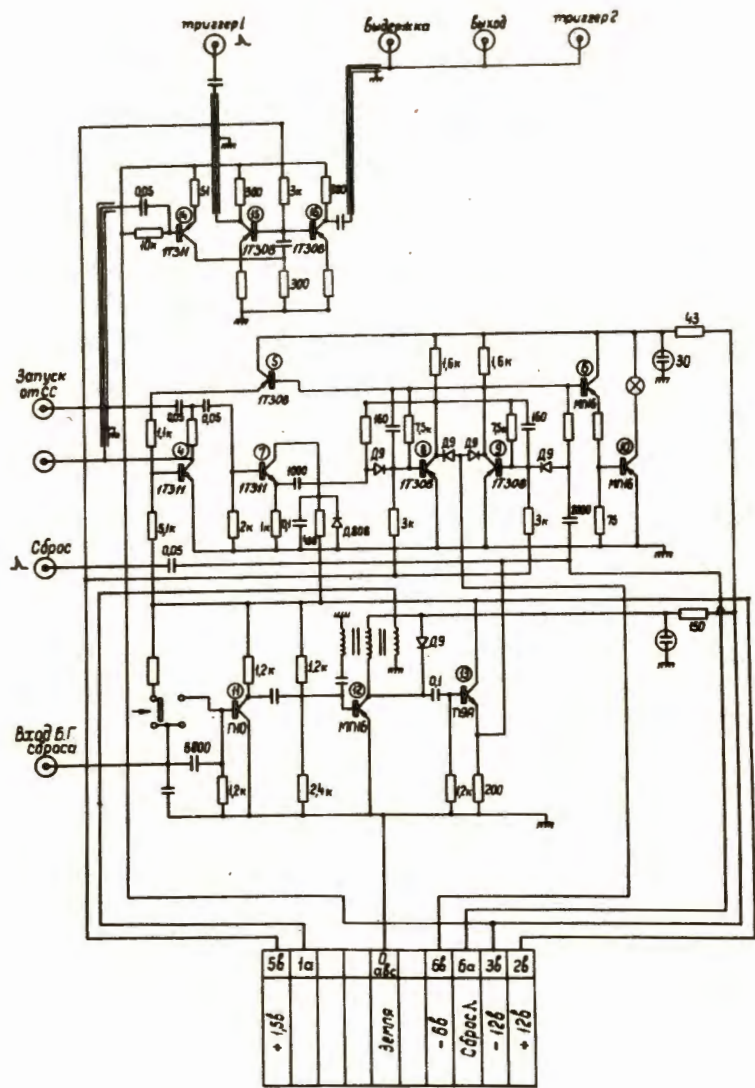


Рис. 24. Схема управляющих ключей.

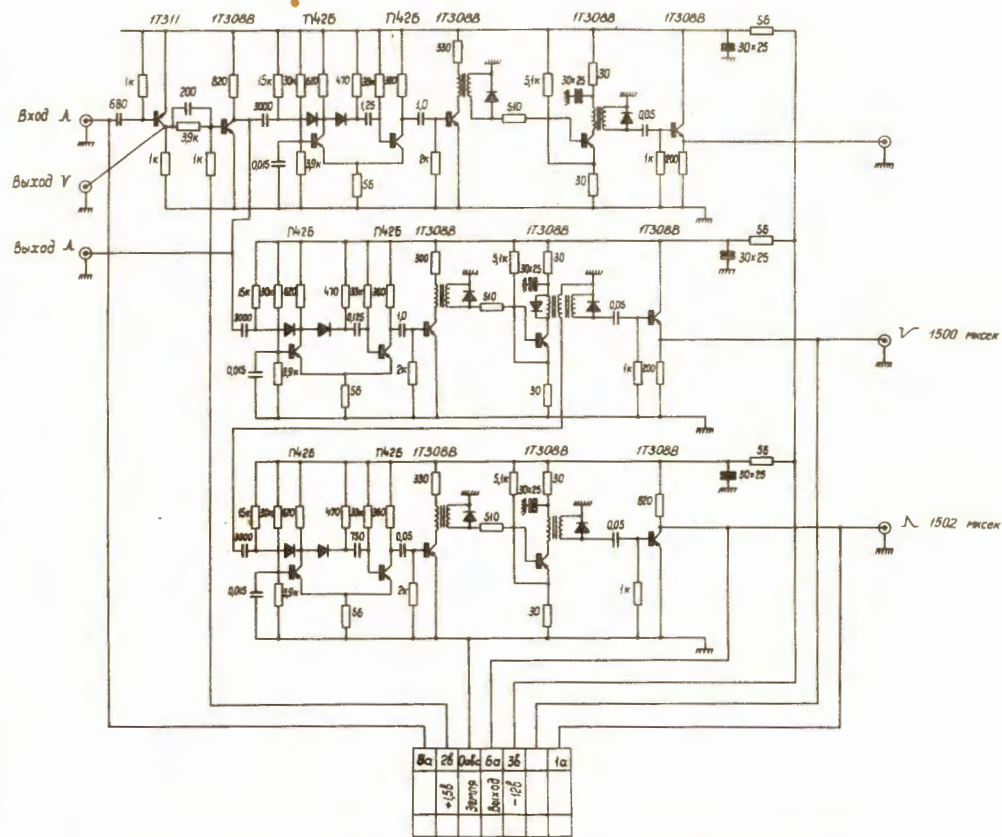


Рис. 25. Схема задержек 1. Схема задержек 2 принципиально не отличается от данной схемы, но имеет другую величину задержек - 500 и 502 мксек.

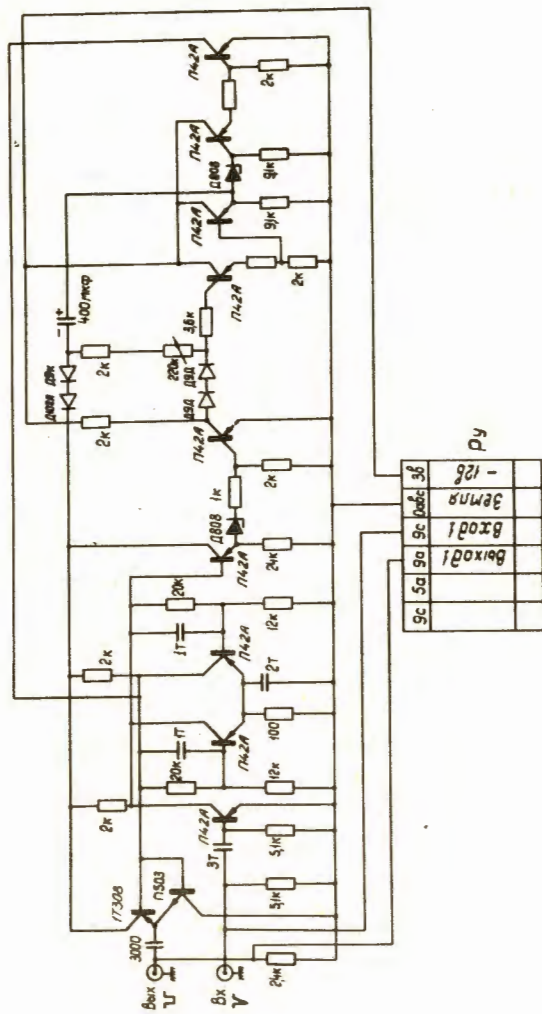


Рис. 26. Схема блока задержки до 5 сек.

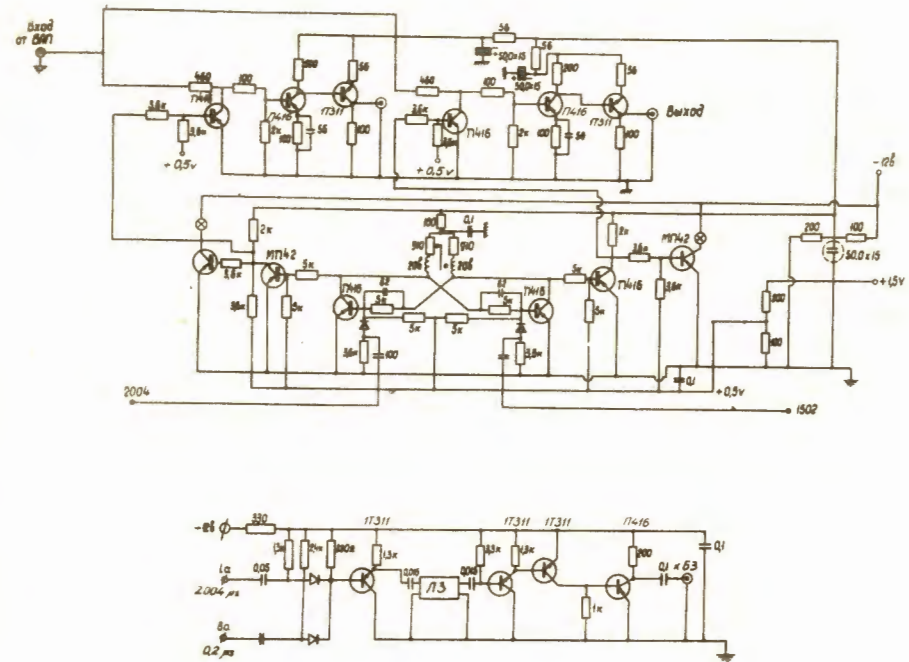


Рис. 27. Схема ключей, коммутирующих пересчетные схемы ПС-1 и ПС-2, и схема смесителя для камер ИК-5, ИК-8.

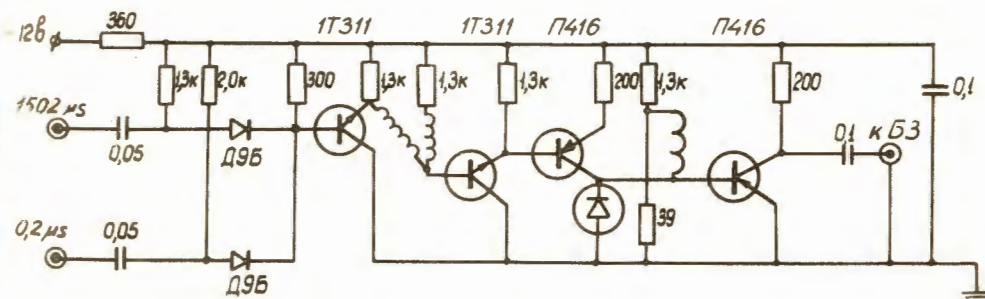


Рис. 28. Схема смесителя импульсов управления считывающими тиратронами для камер ИК-3, ИК-4.

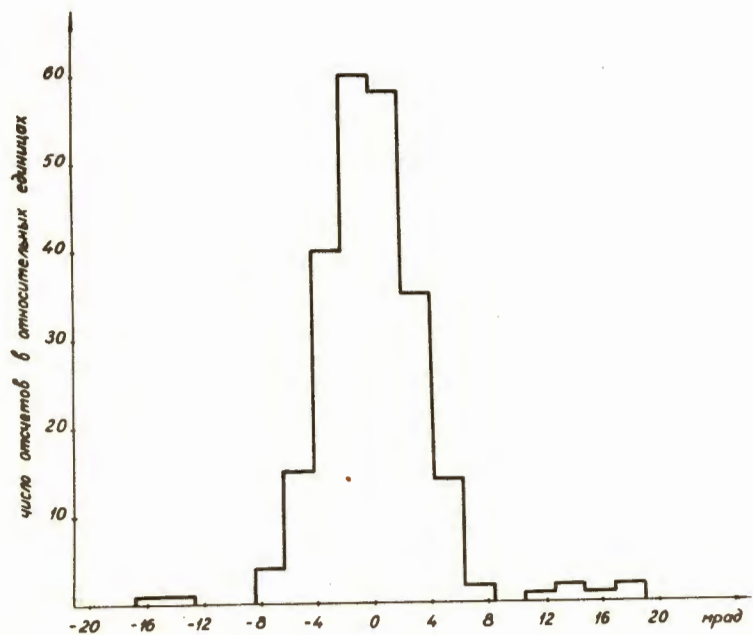


Рис. 29. Распределение углов отклонения частиц на прямом пучке. По оси абсцисс отложен угол отклонения в миллиардах, по оси ординат - число событий в относительных единицах.

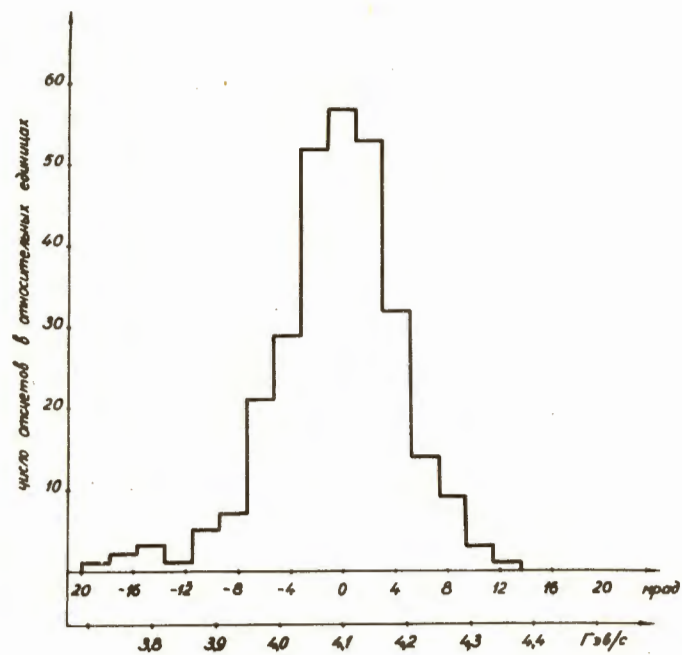


Рис. 30. Распределение углов отклонения частиц первичного  $\pi^-$ -мезонного пучка в анализирующем магните.

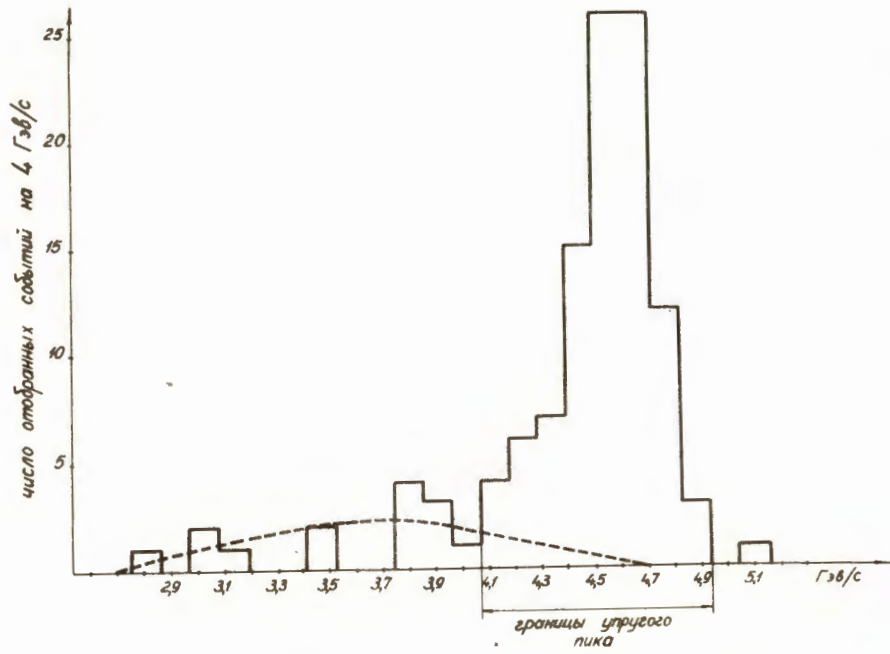


Рис. 31. Распределение углов отклонения протонов отдачи из процесса упругого рассеяния  $\pi^-$ -мезонов на протонах на углы  $180^\circ$  в экспозиции при импульсе первичных  $\pi^-$ -мезонов 4,1 Гэв/с.

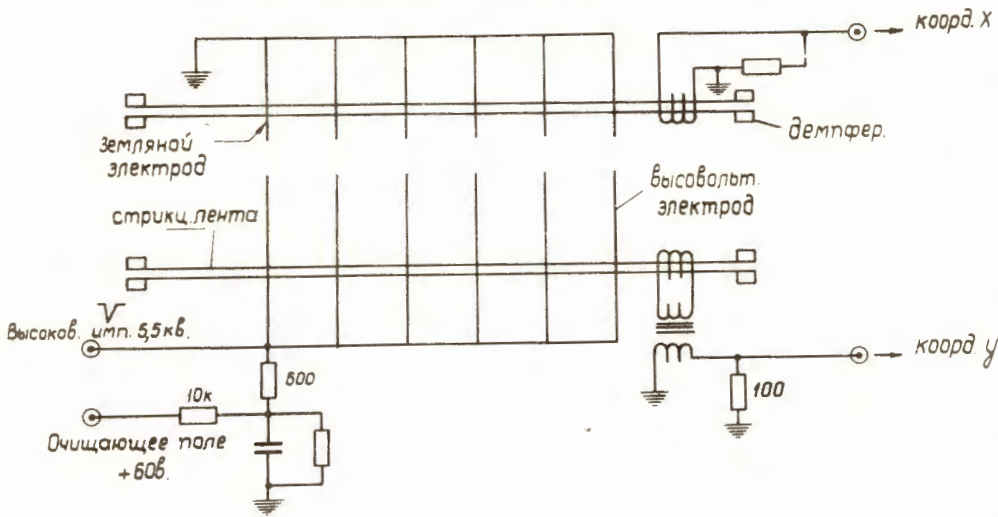


Рис. 32. Съем информации с магнитострикционных камер.

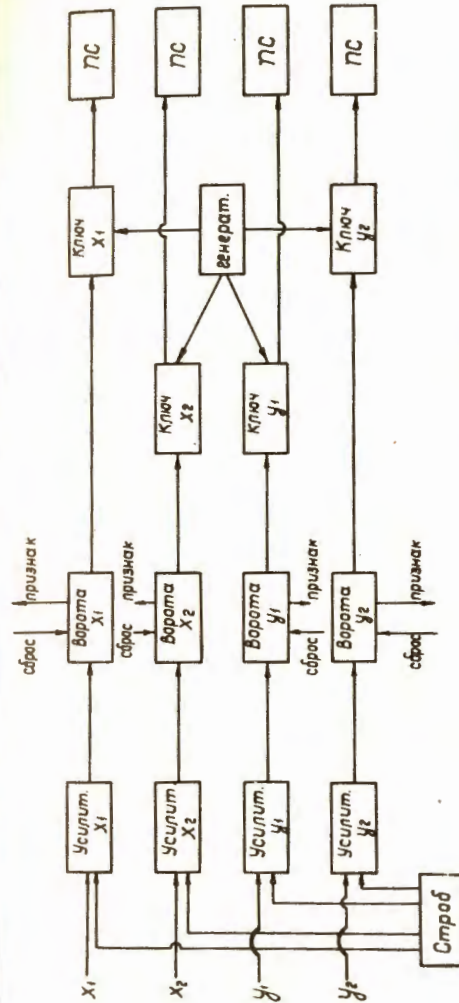


Рис. 33. Схема электроники для работы с магнитострикционными камерами.

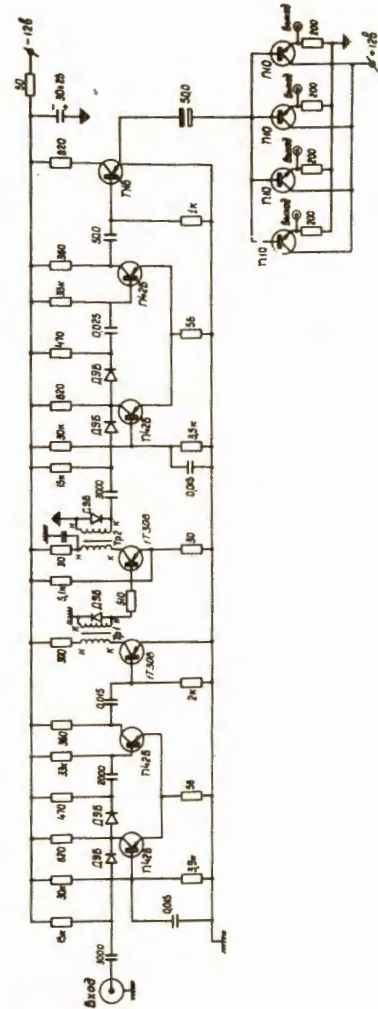


Рис. 34. Схема формирования стробирующего импульса.



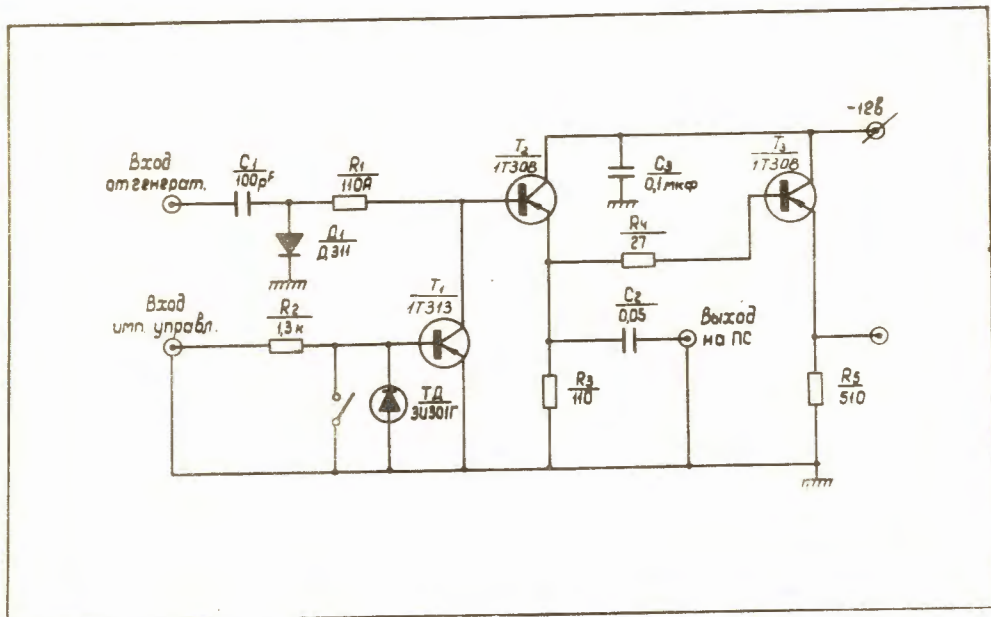


Рис. 37. Схема ключа.

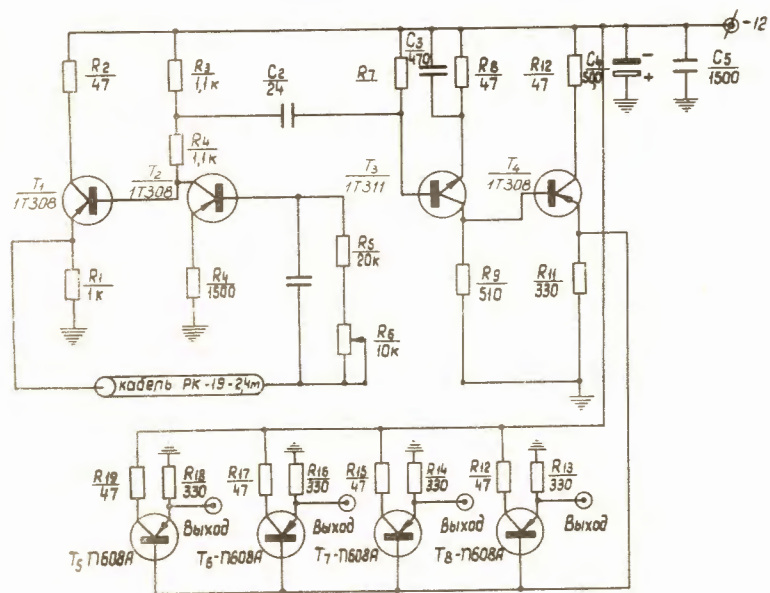


Рис. 38. Генератор на 10 мГц.

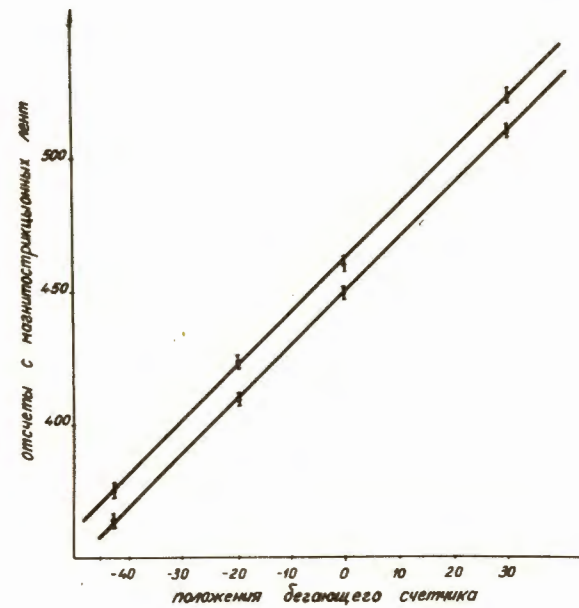


Рис. 39. Калибровка координат  $x_1$  и  $x_2$ .

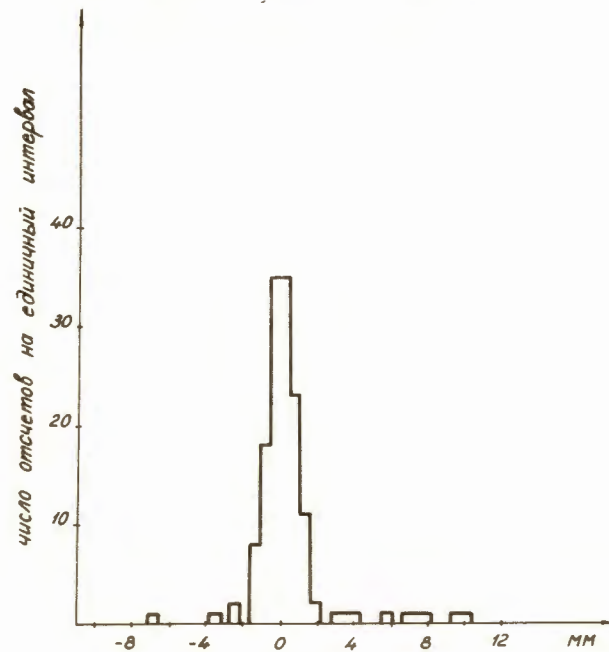


Рис. 40. Координата  $x_1$ .

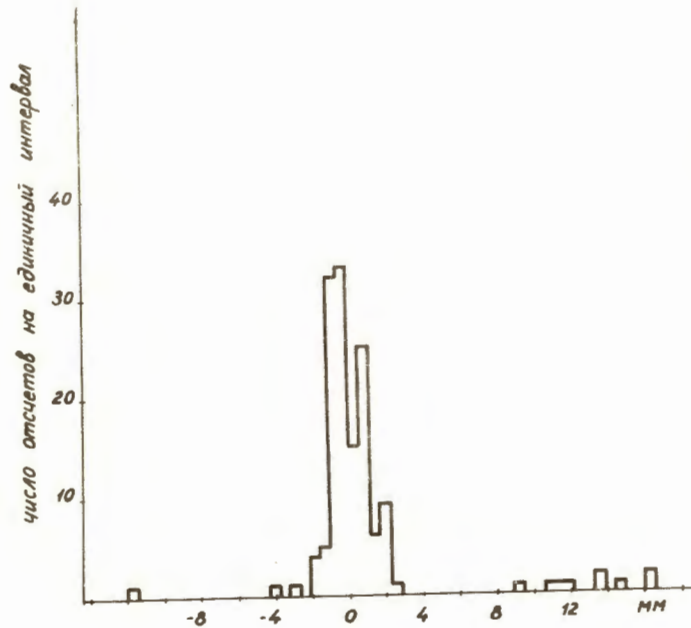


Рис. 41. Координата  $y_1$ .

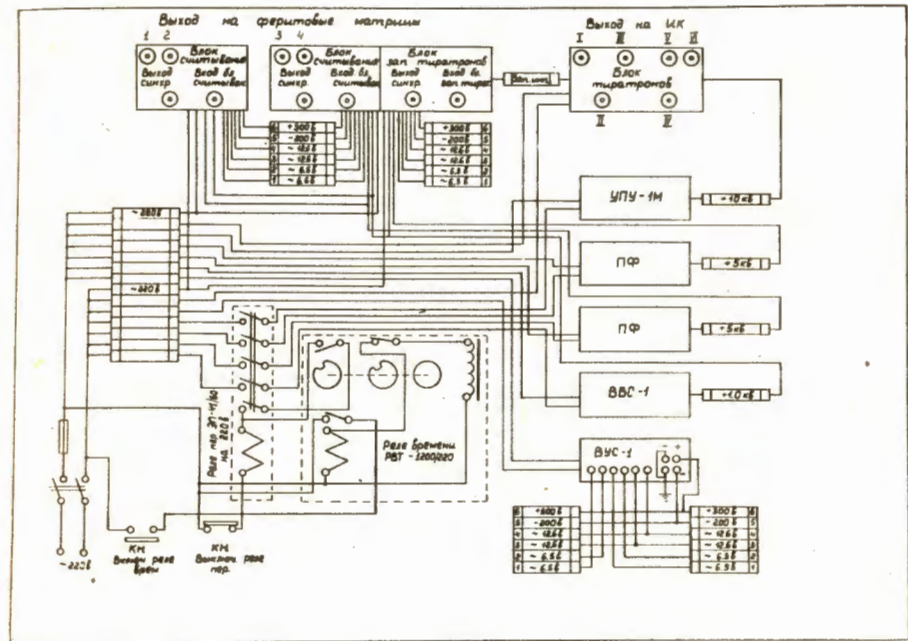


Рис. 42. Блок-схема стойки генераторов высоковольтных импульсов с блоками считывания.



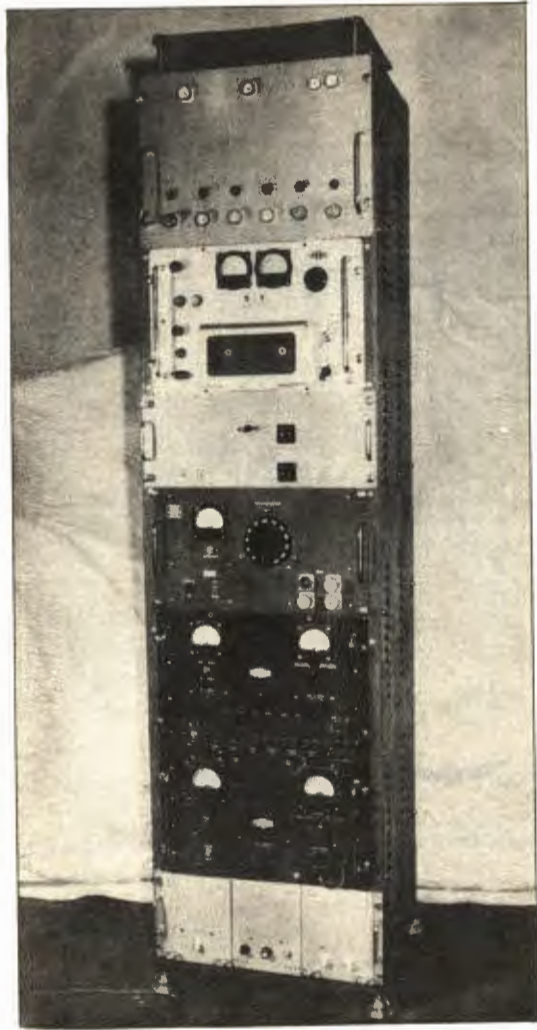


Рис. 43. Общий вид стойки генераторов высоковольтных импульсов с блоками считывания.

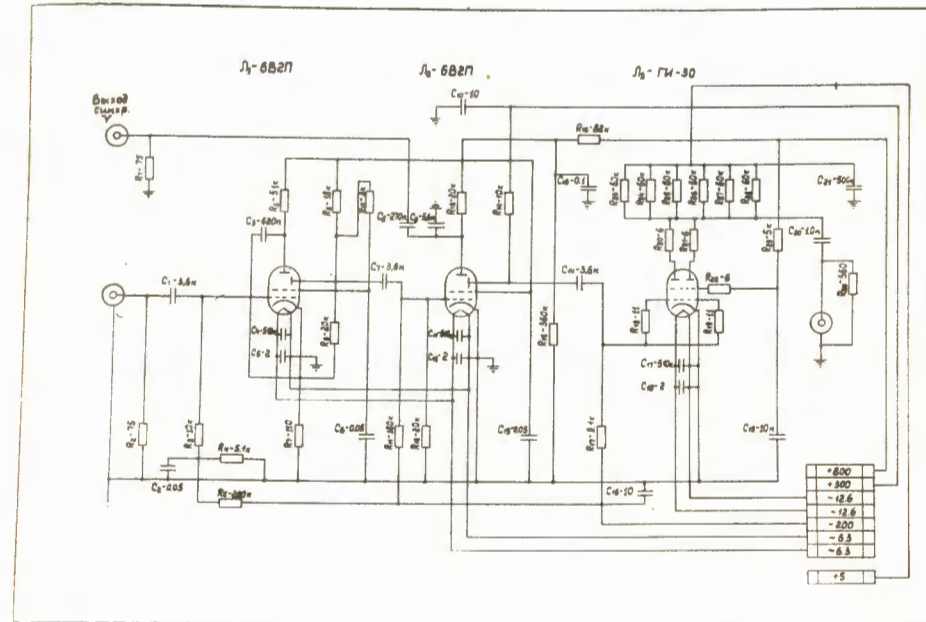


Рис. 44. Принципиальная схема блока запуска тиратронов.

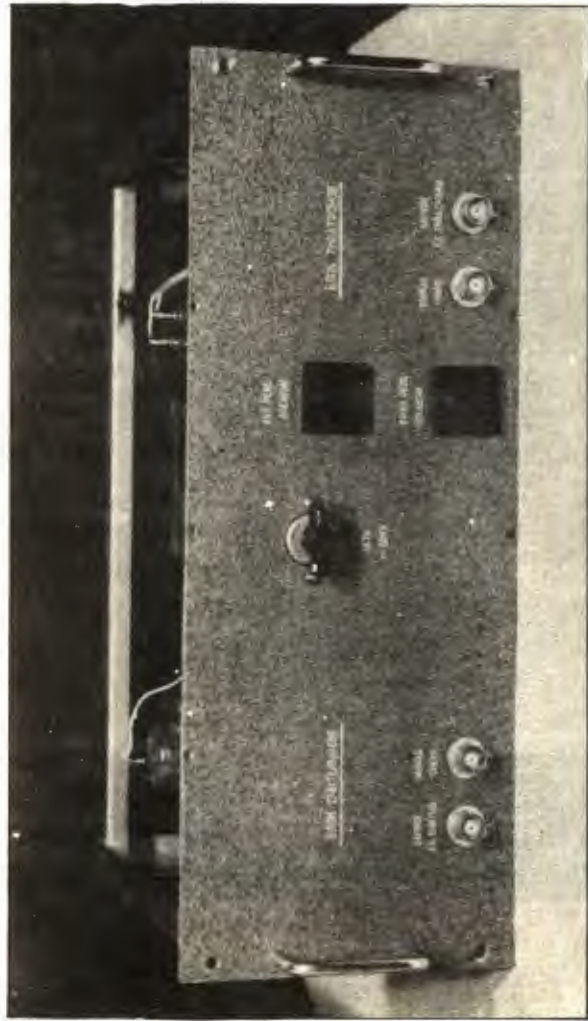


Рис. 45. Передняя панель управления стойкой с блоком запуска тирагронов и блоком считывания.

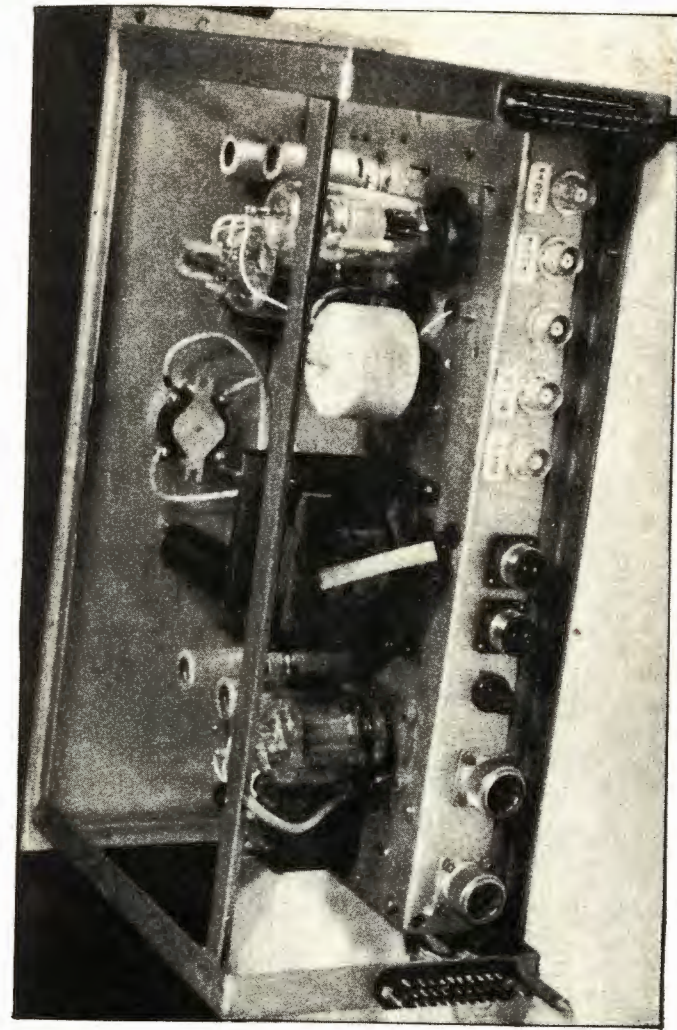


Рис. 46. Блок запуска тирагронов и блок считывания. Вид сзади.



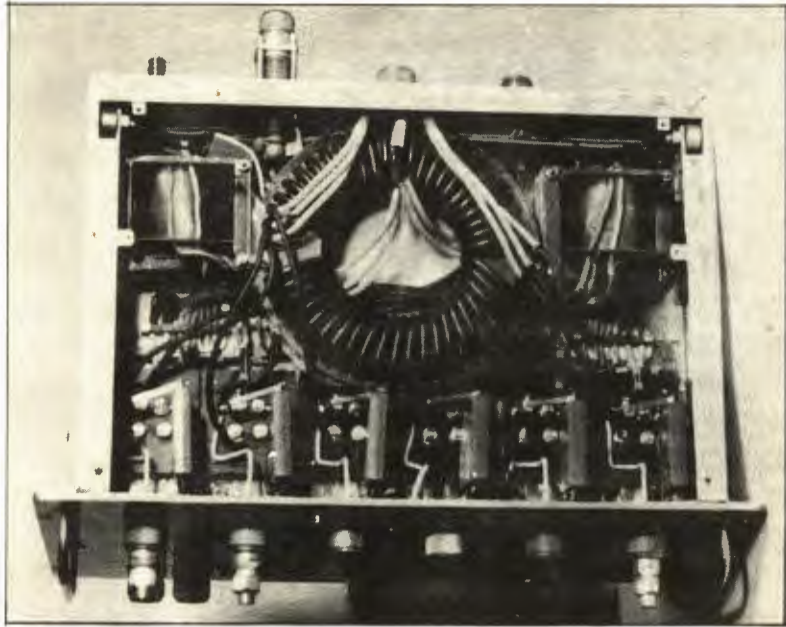


Рис. 50. Блок тиратронов. Вид снизу.

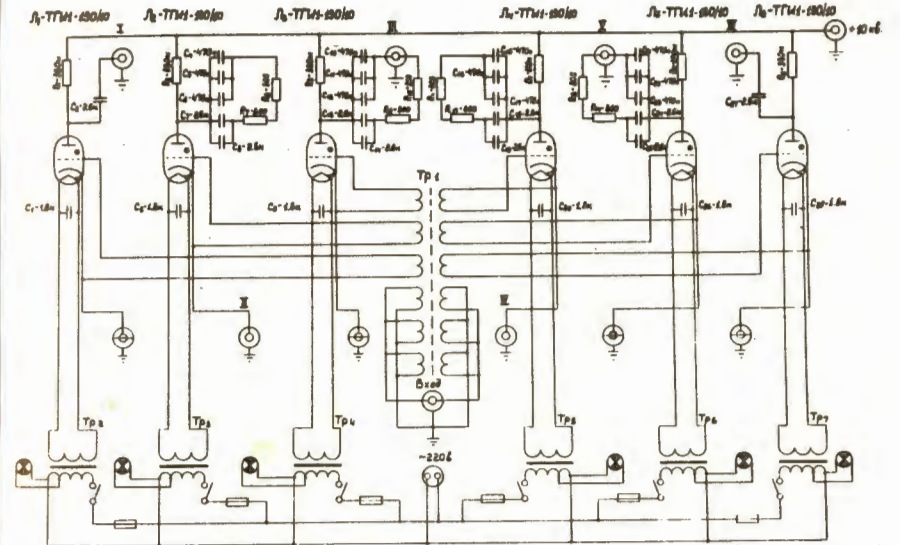


Рис. 51. Принципиальная схема блока тиратронов.

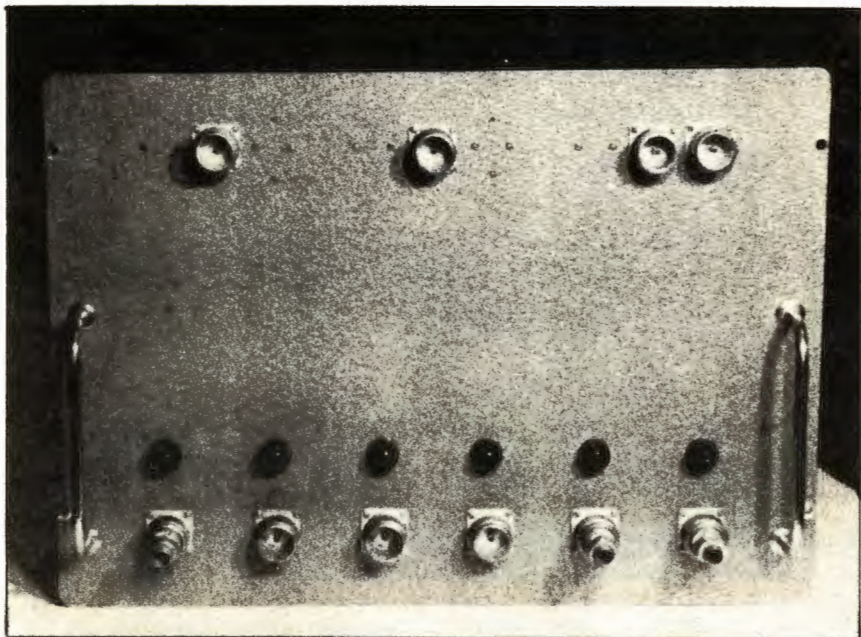


Рис. 52. Передняя панель блока тиратронов.

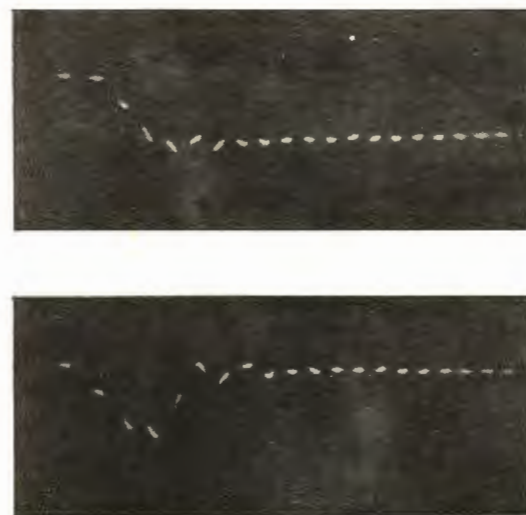


Рис. 53. Осциллограммы высоковольтных импульсов: а) без пробоя искры в камере; б) с пробоем искры в камере, развертка 1 мксек на весь экран, метки времени 50 нсек.

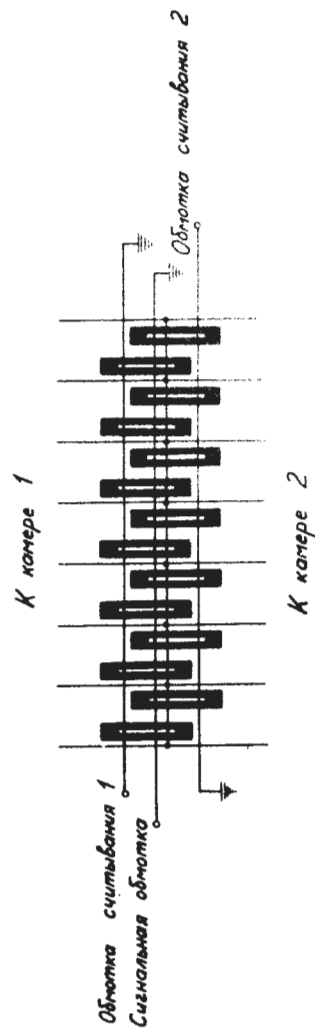


Рис. 54. Схема ферритовой матрицы для измерения разности координат обоих знаков.

эффективность установки

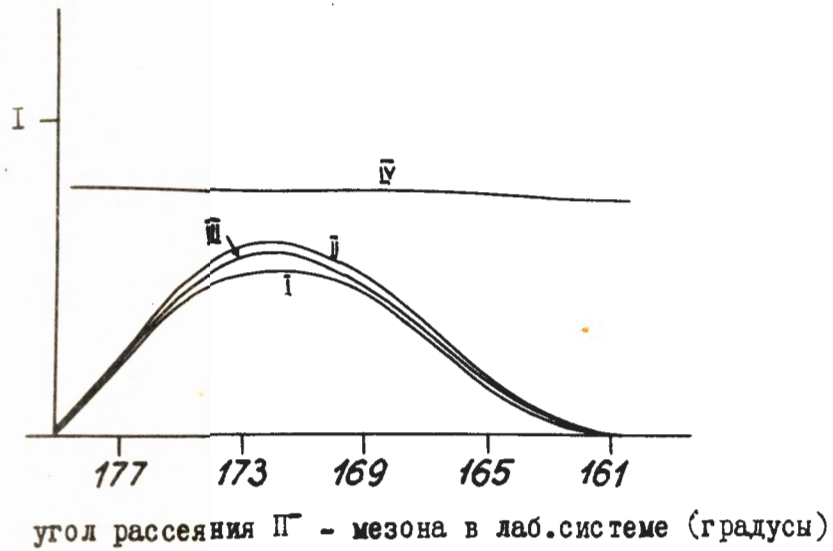


Рис. 55. Кривые эффективности установки для различных начальных характеристик пучка.