

с 349.6

A-537

3/х11

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

13 - 2988



ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

В.П. Алфименков, Ю.М. Останевич, А.В. Стрелков,
Е. Савицки, Л. Чер, У Бай-ши

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА
МЕССБАУЭРА

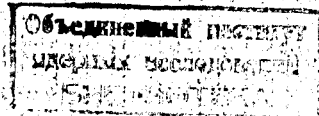
1966

13 - 2988

В.П. Алфименков, Ю.М. Останевич, А.В. Стрелков,
Е. Савицки, Л. Чер, У Бай-ши ^{x/}

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭФФЕКТА
МЕССБАУЭРА

^{x/} В настоящее время работает в Китайской Народной
Республике.



4605/1 м

В в е д е н и е

За семь лет, прошедших с открытия Р. Мёссбауэром явления испускания и поглощения гамма-квантов атомными ядрами без потерь энергии на отдачу^{1/}, различными авторами разработано и описано множество установок для исследования этого явления. В литературе имеется ряд обзорных статей^{2/}, в которых наряду с физическими проблемами изложены и аппаратные вопросы. Краткое описание установки приведено в работе^{3/}. Тем не менее наша установка вызывает постоянный интерес со стороны многих лабораторий, что побуждает нас опубликовать полное ее описание.

1. С к о р о с т н о й с п е к т р о м е т р

Как было показано Р. Мёссбауэром, для наблюдения энергетического спектра резонансного поглощения гамма-квантов весьма удобно использовать эффект Допплера, позволяющий смещать линию испускания источника относительно линии поглощения фильтра на энергию ΔE

$$\Delta E = E \cdot \frac{v}{c}, \quad (1)$$

где E — энергия испускаемого гамма-кванта, v — скорость относительного движения источника и фильтра. Задачей скоростного спектрометра, таким образом, является регистрация интенсивности гамма-излучения, прошедшего сквозь фильтр, в зависимости от скорости относительного движения. Остановимся сперва на блок-схеме описываемого спектрометра (рис. 1).

Относительное движение источника и фильтра создается специальным вибратором (1), причем в зависимости от характера эксперимента двигаться может либо источник (2), либо фильтр (3). Для большинства исследований с железом движется источник. Закон движения, задаваемый вибратором, — гармонический:

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega t + \phi), \quad (2)$$

где $x(t)$ — смещение источника, A — амплитуда колебаний, ω — частота колебаний, ϕ — фаза движения. Очевидно, скорость относительного движения как функция времени может быть записана следующим образом:

$$V(t) = A\omega \cdot \cos(\omega t + \phi) = V_{\text{макс}} \cdot \cos(\omega t + \phi). \quad (3)$$

Гамма-кванты, прошедшие сквозь фильтр, регистрируются детектором (4). Сигналы с детектора после усиления (5) и дискриминации (6) поступают в магнитное оперативное запоминающее устройство (9) (далее — МОЗУ). Используемое нами МОЗУ по существу не отличается от применяемых в многоканальных амплитудных или временных анализаторах^{/4/} и имеет следующие основные характеристики:

Число каналов	256;
емкость канала	$2^{16} - 1$,
длительность цикла считывания — запись	16 мксек,
время переключения адреса	0,25 мксек.

МОЗУ снабжено адресным счетчиком последовательного действия и сумматором на туннельных диодах. Оно соединено с лабораторным измерительным центром^{/5/}, что позволяет выводить результаты измерений на цифропечатающее устройство и передавать их на вычислительную машину для математической обработки. Подробное описание используемого нами МОЗУ можно найти в работах^{/6/}. Блок управления магнитного оперативного запоминающего устройства (12) осуществляет подключение к детектору по очереди всех каналов МОЗУ за один период движения вибратора. Другими словами, МОЗУ нами используется в качестве многосчетчиковой системы с частотой переключения счетных каналов, в 256 раз превышающей частоту колебаний вибратора. Длительность временного интервала, в течение которого производится счет в каждом канале, постоянна. Поэтому в отсутствие эффекта резонансной абсорбции число отсчетов в канал не зависит от номера канала.

За один период движения (каждое) значение скорости встречается дважды, поэтому аппаратный скоростной спектр состоит из двух зеркально-симметричных частей. В качестве иллюстрации на рис. 2 приведен хорошо известный скоростной спектр окиси железа $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$, полученный на описываемой установке.

Блок питания вибратора (II) обеспечивает питание вибратора напряжением приблизительно синусоидальной формы. Обратная связь с вибратора используется для поддержания частоты питающего напряжения, равной собственной частоте вибратора, и для привязки нулевого канала анализатора к определенной фазе движения. Питание вибратора на резонансной частоте избавляет нас от необходимости иметь питающее

напряжение строго определенной формы. Синусоидальный характер движения в этом случае обеспечивается высокой добротностью вибратора ($Q = 30$).

Для проверки синусоидальности закона движения мы сопоставили измеренные нами значения положений пиков окиси железа с данными работы^{/7/}, полученными на прецизионной установке с постоянной скоростью (рис. 3). Поскольку мы не имеем возможности независимо измерить $V_{\text{макс}}$, данные совмещены в одной точке. Результаты для четырех крайних пиков согласуются между собой. Однако положения внутренних пиков, по-видимому, в работе^{/7/} были определены менее точно. Наши измерения дают более точные значения для положений этих пиков относительно остальных четырех, а именно, $(1,87 \pm 0,01)$ мм/сек и $(-0,73 \pm 0,01)$ мм/сек. Другой способ проверки заключается в определении отношения g — факторов основного и возбужденного состояний ядра Fe^{57} . Это отношение не зависит от значения $V_{\text{макс}}$ и поэтому может быть определено нами независимо от других авторов.

Приводим это отношение:

$$g_0 / g_1 \begin{cases} = 1,77 \pm 0,03 - \text{работа } ^{7/} \\ = 1,750 \pm 0,004 - \text{наш результат.} \end{cases}$$

На основании этих двух результатов мы считаем, что отклонение действительного закона изменения скорости во времени от ожидаемого синусоидального не превышает 1%.

В работе^{/3/} нами был описан метод абсолютной калибровки скорости и контроля вида закона движения с помощью микроскопа и стробоскопической лампы. Однако точность, достигаемая этим методом ($3 \div 5\%$ для $V_{\text{макс}} = 3$ см/сек), явно недостаточна для исследований с железом. Поэтому определение $V_{\text{макс}}$ мы сейчас производим путем измерения мессбауэровского спектра "стандартного" фильтра из окиси железа, обогащенной Fe^{57} до 77%.

Перейдем теперь к рассмотрению принципиальной схемы нестандартной части электронного оборудования скоростного спектрометра. Оно состоит из двух, тесно связанных между собой частей: устройства, питающего вибратор и обслуживающего МОЗУ (рис.4), и пересчетного устройства.

В скоростном спектрометре нами использовано четырехдекадное пересчетное устройство типа ПС-10000, в которое были внесены следующие изменения (рис.5): 1) во всех четырех пересчетных декадах разорваны цепи обратной связи, обеспечивающие счет в десятичной системе; 2) входной импульс для первых двух декад подан на второй триггер первой декады; 3) вход на последние две декады отсоединен от выхода первых двух декад и запараллелен с выходом на первые две декады; 4) первые и вторые две декады имеют независимые каскады формирования выходного импульса с соответствующего последнего триггера; 5) шина сброса первых двух декад отсоединена от кнопки "Сброс" и заземлена; 6) шина сброса вторых двух декад,

помимо кнопки "Сброс", соединяется с Л2 (рис.4); 7) все триггеры вторых двух декад снабжены тумблерами по схеме (рис.8), позволяющей при нажатии кнопки "Сброс" устанавливать любой триггер в положение "0" или "1" в зависимости от положения соответствующего тумблера. В итоге, одно пересчетное устройство ПС-10000 работает, как два независимых пересчетных устройства с общим входом и коэффициентами пересчета 128 и 256. Первое из них лишено возможности сброса, второе может быть установлено на любое, заранее заданное число от 0 до 255 при нажатии кнопки "Сброс" и при поступлении импульса сброса с Л2.

Рассмотрим работу устройства, приведенного на рис. 4. Генератор пусковых импульсов (Л6) с частотой, в 256 раз большей собственной частоты вибраторов, собран по схеме мультивибратора с положительным сеточным смещением, которая (см., например, /8/) позволяет, изменяя напряжение на одной из сеток, в известных пределах плавно менять частоту импульсов. Пусковые импульсы с катодного повторителя (1/2 Л7) подаются на вход пересчетных схем. Импульс с выхода первой пересчетной схемы запускает триггер (Л11). Прямоугольная волна напряжения с этого триггера ограничивается по амплитуде диодом Д-813 и после делителя напряжения поступает на катодный повторитель (1/2 Л2), который выполняет роль усилителя мощности. Ступенчатый делитель и потенциометр в катодной цепи Л2 используются для установки требуемой амплитуды колебаний вибратора.

Фильтр в катодной цепи Л2 сглаживает прямоугольное напряжение до формы, близкой к синусоидальной. Параметры фильтра подбираются в зависимости от характеристик вибратора, а их значение для работы всей установки не критично. Прибор М3 используется для контроля амплитуды питающего напряжения. После LC фильтра напряжение поступает на первую катушку вибратора.

Сигнал со второй катушки поступает на усилитель (Л18 + 21) с коэффициентом усиления около 10^4 . Напряжение со второй катушки имеет величину 10 ± 100 мВ эфф. при работе с $V_{\text{макс}} = 0,2 - 2$ см/сек и контролируется с помощью вольтметра МВЛ-2. Напряжение после усилителя имеет форму, близкую к прямоугольной, дифференцируется и запускает одновибратор (Л5), тем самым фиксируя определенную фазу движения вибратора.

Сигнал с Л5 используется для сброса второй пересчетной схемы (через Л2) и для запуска одного плеча фазометра, собранного на Л3. Другое плечо фазометра запускается фронтом прямоугольной волны, питающей вибратор. Нетрудно увидеть, что часть периода колебаний, занимаемая положительной полуволной в аноде Л3, определяется разностью фаз между напряжением, питающим вибратор, и напряжением со второй катушки вибратора (с точностью до постоянной добавки, слабо зависящей от частоты). Из механики вынужденных колебаний известно, что разность фаз между вынуждающей силой и скоростью (в нашем случае питающим напряжением со второй катушки) опре-

деляется следующим выражением:

$$\Phi = \arctg \frac{2\alpha\omega}{\omega^2 - \omega_0^2} + \pi/2, \quad (4)$$

где α - показатель затухания системы; ω_0 - собственная частота колеблющейся системы; ω - частота вынуждающей силы.

Из выражения (3) видно, что сдвиг фаз сильно зависит от частоты питающего напряжения вблизи резонанса, причем эта зависимость имеет монотонный характер. Это обстоятельство нами использовано для поддержания частоты питающего напряжения вблизи резонансной частоты вибратора.

Напряжение с анода Л3 после ключевой лампы 1/2 Л9 сглаживается двойным RC фильтром и после катодного повторителя (1/2 Л7) поступает на управляющую сетку генератора пусковых импульсов. Потенциометр в катодной цепи Л7 используется для настройки всей системы на резонансную частоту вибратора. Параметры генератора пусковых импульсов подбираются так, чтобы глубина обратной связи была по возможности больше.

Нам сейчас не представляется целесообразным развивать количественное описание работы этой системы, однако длительная эксплуатация показала, что система обеспечивает долговременную стабилизацию частоты питающего напряжения, вполне достаточную для исследований с железом.

Заметим лишь, что неправильное присоединение концов одной из катушек вибратора приводит к эффекту, противоположному ожидаемому, т.е. частота питающего напряжения "убегает" от резонансной частоты вибратора.

Прибор М1, включенный в катодной цепи левой половины Л9, служит для визуального контроля фазы движения.

Сигнал с выхода второй пересчетной схемы нами используется для сброса адреса МОЗУ и запуска стробоскопической лампы. Как уже отмечалось выше, вторая пересчетная схема снабжена тумблерами, позволяющими осуществлять ее сброс в любое заданное состояние. Поэтому, набирая нужную комбинацию на этих тумблерах, можно осуществить любую фазу запуска анализатора (стробоскопической лампы) в пределах одного периода движения вибратора. Кнопка "Сброс" на ПС-10000 при нормальной работе нажата. При этом сброс второй ПС производится сигналом сброса с правой половины Л2 с приходом с вибратора сигнала обратной связи. Такая система сброса анализатора обладает двумя достоинствами: во-первых, случайный сброс работы любой из двух пересчетных схем устраняется автоматически; во-вторых, запуск анализатора с точностью до одного канала происходит при выбранной нами фазе движения независимо от изменения частоты и фазы питающего напряжения. Л4, правая половина Л9 и

прибор М2 используются для визуального контроля фазы запуска анализатора.

Импульсы с пускового генератора (Л8) должны поступать на адресное устройство МОЗУ. Для избежания сбоев в работе МОЗУ в моменты переключения и сброса адреса не следует подавать на МОЗУ детекторные импульсы. Для этой цели служит каскад блокировки или "ворота" (левая половина Л14). Одновибратор (Л13), запускаемый импульсом пускового генератора (Л8), вырабатывает импульс продолжительностью около 20 мксек, который блокирует прохождение детекторных импульсов. Задний фронт этого импульса после формирования блокинг-генератором (Л12) поступает в адресное устройство МОЗУ. Аналогичны функции одновибратора (Л11 и Л10) в цепи импульса сброса адреса.

Импульсы с детектора, поступающие с одноканального дискриминатора ААДО-1, должны пройти сквозь "ворота" (левая 1/2 Л14), фазоинвертор (правая 1/2 Л14) и два одновибратора (Л₁₅, Л₁₆). Задача последних - обеспечить интервал времени между детекторными импульсами не менее 20 мксек. При несоблюдении этого условия нарушается устойчивая работа МОЗУ. Лампа Л17 выполняет функции выходного каскада.

Следует отметить, что использование стандартного МОЗУ в качестве "много-счетчикового" устройства невыгодно из-за сравнительно большого мертвого времени. Действительно, для регистрации каждого импульса в МОЗУ происходит полный цикл считывания - запись, занимающий от 18 до 30 мксек в зависимости от конструкции МОЗУ. Более выгодная конструкция МОЗУ могла бы иметь разделение операций считывания - запись и сумматор на триггерах с тем, чтобы в промежутке произвольной длительности между считыванием и записью на сумматоре можно было производить регистрацию детекторных импульсов с мертвым временем 1 мксек, типичным для пересчетных устройств. К сожалению, подобные конструкции МОЗУ нам пока неизвестны.

Последним элементом скоростного спектрометра является вибратор (рис. 7). Кольцевые магниты (2) из обычных громкоговорителей снабжены магнитопроводами, как показано на рисунке. В кольцевых зазорах магнитопроводов на плоских пружинах (3) подвешены две катушки (4), которые соединяются между собой жестким стержнем. На продолжении этого стержня помещается источник гамма-лучей (1). Катушки намотаны проводом марки ПЭ-0,05 и имеют сопротивление около 500 ом. Пружины изготовлены из латуни, причем их ширина и толщина подбираются такими, чтобы собственная частота вибратора была около 30 герц. Существенным вопросом при конструировании подобных электромагнитных двигателей является их чувствительность к шуму и постоянным вибрациям. Описанная нами конструкция практически нечувствительна к акустическим шумам, обычно имеющимся в помещении, но заметно реагирует на вибрации пола и здания. Для ослабления влияния этих помех вибратор, детектор и фильтр размещаются на амортизирующей подставке из бетонных плит, между которыми проложены войлок и куски резиновых вакуумных шлангов. При такой амортизации работа форвакуум-

ного насоса РВН-20, на расстоянии двух метров от установки, не влияет на движение вибратора.

2. Детектор гамма-квантов и спектрометрическая аппаратура

Детектором гамма-квантов в описываемой установке служат пропорциональный счетчик (рис. 8). На латунном корпусе счетчика цилиндрической формы (ϕ 10 см, длина 28 см) симметрично расположены два окна (ϕ 3 см) для пропускания гамма-квантов. Второе окно служит для пропускания гамма-излучения, не поглотившегося в объеме счетчика, что снижает фон от излучения, рассеянного на задней стенке. Наилучшим материалом для окна является бериллий. Однако его применение в случае движущегося источника Co^{57} нежелательно, так как содержащиеся в бериллии примеси железа заметным образом искажают наблюдаемый спектр^{/9/}. Поэтому в качестве материала окна мы использовали слюду (мусковит) толщиной 40 мк. Поглощение гамма-лучей с энергией 14,4 кэв в таком окне не превышает 8 - 10%.

На боковых фланцах размещаются выводы нити, кран для наполнения счетчика и катодный повторитель. Изоляция и герметичность выводов нити достигается применением конструкции "обжаренного тефлона". Выводы такого типа были испытаны на герметичность до 30 атм., а электрические испытания показали, что при напряжениях до 15 киловольт нет заметного роста шумов, связанных с токами утечки. Последнее обстоятельство позволило отказаться от охранных электродов как традиционного элемента конструкции пропорционального счетчика.

При подборе нити выяснилось, что лучшей по качеству является медная нить диаметром 20 мк. Один конец нити закрепляется на пружинке внутри счетчика, другой выводится наружу сквозь отверстие, которое после протяжки нити заливается плицеином, оловом или эпоксидной смолой.

После сборки счетчик откачивался до давления $2 \cdot 10^{-3}$ мм, причем для лучшего обезгаживания счетчик прогревался до $100^{\circ}C$. В качестве наполняющего газа нами был выбран аргон марки "Аргон чистый А". Аргон обладает достаточным коэффициентом поглощения гамма-лучей с энергией 14,4 кэв и в то же время весьма слабо поглощает сопутствующие кванты с энергией 122 и 136 кэв. Рабочее давление в счетчике 3,5 атм., гасящая присадка - метан в количестве 1% по объему. Использование кальциевого очистителя для очистки газа не дало заметного улучшения разрешения.

Масс-спектрометрическое исследование используемого газа показало, что его чистота не хуже 99,99%. Рабочее напряжение счетчика - около 2 киловольт - подается с выпрямителя ВС-22. В качестве основного усилителя используется стандартный ламповый усилитель УШ-10, импульсы после него дискриминируются одноканальным дискри-

минатором ААДО-1. Контроль амплитудного спектра и настройка щели дискриминатора на пик 14,4 кэв осуществляются с помощью многоканального амплитудного анализатора АИ-100.

Для линии 14,4 кэв описываемый счетчик обладает энергетическим разрешением около 12% и эффективностью регистрации порядка 75%. Следует отметить, что энергетическое разрешение счетчика близко к предельному ("теоретическому"), которое можно получить с помощью пропорционального счетчика^{/10/}. На рис. 9 приведены рабочие амплитудные спектры для источника Co^{57} .

По истечении нескольких лет работы счетчика наблюдается некоторое ухудшение разрешения, что, по-видимому, связано с разрешением метана. При введении в счетчик новой порции метана разрешение возвратилось к исходному значению.

В последние годы промышленность выпускает пропорциональный счетчик СРМ-111/ предназначенный для рентгеновских исследований в области энергий $5 \div 80$ кэв. Однако его применение в мёссбауэровской установке нам не представляется целесообразным как из-за малых размеров окна (7x30 мм), так и из-за малоподходящего наполнения (ксенон) и отсутствия возможности регенерации счетчика в лабораторных условиях.

3. Криостат и печь для измерений при низких и высоких температурах образца

Для исследования мёссбауэровских спектров при низких температурах нами разработан металлический вакуумный криостат, отличительными свойствами которого являются большое пропускание для низкоэнергетического гамма-излучения и возможность регулировки температуры образца в широких пределах. На рис. 10 показана конструкция криостата и, более подробно, отросток с образцом. Медные сосуды (1 и 2), емкостью 1,5 и 2,5 литра, предназначенные для хранения жидкого азота и жидкого гелия соответственно, крепятся к фланцу (3) с помощью трубок из нержавеющей стали. К азотному сосуду крепится тепловой экран (4) и мосты гелиевого сосуда. Образец (6) помещается между алюминиевыми фольгами в медную кольцевую оправку (7), которая с помощью латунного кольца (8) и стержня (9) крепится к гелиевому сосуду. Дополнительный экран (5) защищает образец от теплового излучения. Латунный вакуумный кожух криостата (10) снабжен съемным коллаком (11) с уплотнением Вильсона (12), что позволяет довольно быстро производить смену образца.

После предварительной откачки криостата до давления $10^{-1} \div 10^{-2}$ мм рт. ст. вакуум в нем поддерживается угольным геттером (13). Если геттер охлажден до температуры жидкого азота, в криостате поддерживается вакуум порядка 10^{-5} мм рт. ст.

Скорость испарения жидкого гелия в основном зависит от теплопроводности мостов, поддерживающих гелиевый сосуд. Мосты из нержавеющей стали размером

$0,05 \times 14$ мм позволили работать при скорости испарения жидкого гелия около $30 \text{ см}^3/\text{час}$. Однако срок службы таких мостов оказался непродолжительным, поэтому сейчас используются мосты $0,30 \times 14$ мм, которым соответствует скорость испарения около $150 \text{ см}^3/\text{час}$. Для охлаждения криостата от азотной температуры до гелиевой требуется около 1,5 литра жидкого гелия. Окна (14) для пропускания гамма-лучей сделаны из слюды толщиной 25 мк и алюминиевой фольги толщиной 10 мк. В них поглощается около 10% интенсивности 14,4 кэв линии Fe^{57} . Для изменения температуры образца в криостате имеется подогреватель (15). Доступный диапазон в области гелиевых температур сверху ограничен скоростью испарения гелия и зависит от теплопроводности стержня (9). Например, для диапазона температур $4,2 - 15^\circ\text{K}$ мы используем медный стержень сечением $0,2 \text{ см}^2$ и подогреватель из константана сопротивлением 25 ом. Расход жидкого гелия при температуре образца 15°K составляет $200 \text{ см}^3/\text{час}$. Любая температура в этом диапазоне достигается быстрее, чем за 0,5 часа. Более широкий диапазон температур достигается с помощью стержня с меньшей теплопроводностью, однако при этом увеличивается время установления температуры. Криостат позволяет охлаждать образец до $1,5^\circ\text{K}$ откачкой жидкого гелия. Температуру образца мы контролируем с помощью термодпары медь-константан с применением низкоомного потенциометра.

Для более точных измерений температуры в области гелиевых температур нами используется германиевый термометр сопротивления (18).

Для высокотемпературных измерений мы применяем вакуумную печь с вольфрамовым подогревателем и водяным охлаждением вакуумной рубашки (рис. 11). Для уменьшения радиальных градиентов температуры образец окружается бериллиевыми пластинами толщиной 0,2 мм. Разность температур между центром и краем образца не превышает $0,3^\circ\text{C}$ при рабочей температуре 900°C . В печь введены три термодпары хромель-алюмель, две из них измеряют температуру образца, третья используется для измерения температуры подогревателя и стабилизации температуры. Регулировка температуры производится самописцем ЭПП-09. Точность измерения температуры образца и ее временная стабильность составляет около $0,1^\circ\text{C}$. Откачка печи производится насосом ЦВЛ-100 с азотной ловушкой, при этом в печи при любой температуре обеспечивается вакуум не хуже 10^{-4} мм рт. ст.

4. Математическая обработка мёссбауэровских спектров

Как было показано^{/12/}, для большинства практических задач форма одиночной мёссбауэровской линии хорошо аппроксимируется лоренцевской кривой с шириной, зависящей от условий эксперимента. В дальнейшем будем придерживаться этого приближения.

Если спектр содержит несколько линий, то каждая линия скоростного спектра в этом приближении описывается тремя параметрами: a - амплитуда пика, Δ - положение

ние линии, Γ - ширина линии. Скорость, как функция номера канала i , в описанной выше установке может быть приближенно записана следующим образом:

$$V(i) = V_{\text{макс}} \cdot \cos(\alpha i + \phi), \quad (5)$$

где $\alpha = \frac{2\pi}{256}$, ϕ - фаза запуска анализатора. Форма мёссбауэровского спектра, состоящего из n линий, в этом случае может быть записана следующим образом:

$$F(i) = A_0 \left[1 - \sum_{k=1}^n \frac{a_k}{\left(\frac{\Delta_k - V}{\Gamma_{k/2}} \cdot \cos(\alpha i + \phi) \right)^2} \right] = A_0 (1 - \psi(i)). \quad (6)$$

Более точная запись учитывает непостоянство скорости в пределах одного канала:

$$F(i) = A_0 \left[1 - \int_1^{i+1} \psi(t) dt \right]. \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) нами используются в качестве гипотез для обработки экспериментальных спектров методом наименьших квадратов (МНК) на электронной вычислительной машине М-20.

В основу программы вычислений положена стандартная подпрограмма МНК^{13/}. Исходная информация для программы состоит из экспериментального спектра, начальных значений параметров и информации о числе линий в спектре. Результатом вычислений являются значения параметров, соответствующие минимуму χ^2 , ошибки параметров, площади линий и ошибки площадей, вычисленные с учетом корреляций между параметрами, а также сведения об экспериментальных точках, дающих максимальный вклад в χ^2 . Возможно вычисление кривой и коридора ошибок. Программа позволяет обрабатывать спектры, содержащие до 14 линий. При этом либо все параметры могут рассматриваться независимыми, либо на часть из них могут быть наложены ограничения, вытекающие из физических соображений. Такими ограничениями могут быть: фиксация какого-либо параметра с нулевой или отличной от нуля ошибкой, приравнивание однородных параметров (амплитуды, ширины), относящихся к разным линиям, или наложение каких-либо других уравнений связи. "Плохим" экспериментальным точкам, являющимся грубыми ошибками, может быть присвоен нулевой вес, после чего наличие этих точек не влияет на результаты.

Обработка одного спектра, представленного выражением (6), занимает от 0,5 до 10 минут машинного времени в зависимости от количества линий в спектре и качества начальных значений параметров. Представление спектра с помощью формулы (7) увеличивает время счета в 2-3 раза, поэтому она используется для уточнения параметров, получаемых после обработки по формуле (6). Уточнение не занимает больше 3-5

минут. Опыт обработки показал, что такое уточнение имеет смысл лишь для частных случаев весьма больших отношений $\frac{V_{\text{макс}}}{\Gamma}$. Например, в случае спектра $\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$ уточнение приводит к изменению ширины и амплитуд двух центральных линий примерно на 10% без изменения площадей. Остальные параметры спектра изменяются на величины, пренебрежимо малые по сравнению с ошибками, поэтому в подавляющем большинстве случаев обработка ведется без уточнения.

Рассмотрим еще метод ручной обработки спектров. По графикам можно определить номера каналов, в которых находятся характерные точки спектра (максимум поглощения, полуширина). Для вычисления скоростей, соответствующих этим каналам, можно использовать выражение (5), однако в нем содержится неизвестная величина ϕ . Как уже отмечалось выше, наш аппаратный спектр состоит из двух зеркально-симметричных частей и каждая характерная точка в нем встречается дважды, допустим, в каналах i_1 и i_2 . Это позволяет исключить фазу анализатора ϕ и находить искомую скорость по следующей формуле:

$$V = -V_{\text{макс}} \cdot \cos[\alpha(i_1 - i_2)/2]. \quad (8)$$

При этом удобно пользоваться таблицей косинусов вида

$$y(k) = -\cos \frac{\alpha k}{2}.$$

Сравнение ручной обработки с машинной показывает, что последняя обладает следующими преимуществами: точность значений параметров повышается в 3-5 раз, помимо значений параметров, вычисляются наиболее вероятная ошибка и величина χ^2 , показывающая степень совместности выбранной нами гипотезы с экспериментальными результатами. Некоторым недостатком машинной обработки является разрыв во времени между окончанием измерения и получением результатов обработки, достигающий двух-трех дней. Однако постоянное совершенствование нашего измерительного центра позволяет надеяться, что это время удастся сократить.

В заключение авторы считают своим приятным долгом поблагодарить Ф.Л. Шапиро за постоянный интерес к работе, Е.Я. Пихельнер и А.И. Секирина за помощь при изготовлении установки, а также И.Н. Силина и И.И. Шелойцева за ценные обсуждения вопросов, связанных с обработкой результатов.

Л и т е р а т у р а

1. R.L. Mossbauer, Z. Phys., **151**, 124 (1958).
2. H. Frauenfelder, The Mossbauer Effect, W.A. Benjamin, New York, 1962; В.П. Алфименков, Ю.М. Останевич. Труды рабочего совещания по эффекту Мёссбауэра, Дубна, 1962. Преприят ОИЯИ, Р-1231, Дубна, 1962.

3. В.П. Алфименков и др. ЖЭТФ, 46, 482 (1962).
4. А.А. Санин. Электронные приборы ядерной физики, "Наука", Москва, 1984.
5. Г.И. Забиякин и др., ПТЭ, 634 (1964).
6. А.П. Анисимов, Ш.И. Барилко, И.Д. Ванков. Препринты ОИЯИ, Р-1134, Р-1045, Дубна, 1983.
7. O.C. Kistner and A.W. Sunyar. Phys. Rev. Letters, 4, 412, 1960.
8. А.М. Бонч-Бруевич. Применение электронных ламп в экспериментальной физике, ГИТТЛ, Москва, 1955, стр. 405.
9. O.C. Kistner and J.B. Swan. Proc. 2nd Intern. Conf. Mossbaer Effect, Saclay, France, 1961. Wiley, New York, 1962.
10. A. Bisi and Y. Zappa. Nuovo Cimento 2, 988, 1955.
11. Аппаратура для регистрации и исследования ионизирующих излучений, Атомиздат, Москва, 1965.
12. Г.А. Быков, Фам Зун Хиен. ЖЭТФ, 43, 909 (1962).
13. С.Н. Соколов, И.Н. Силин. Препринт ОИЯИ, Д-810, Дубна, 1981.

Рукопись поступила в издательский отдел
19 октября 1966 г.

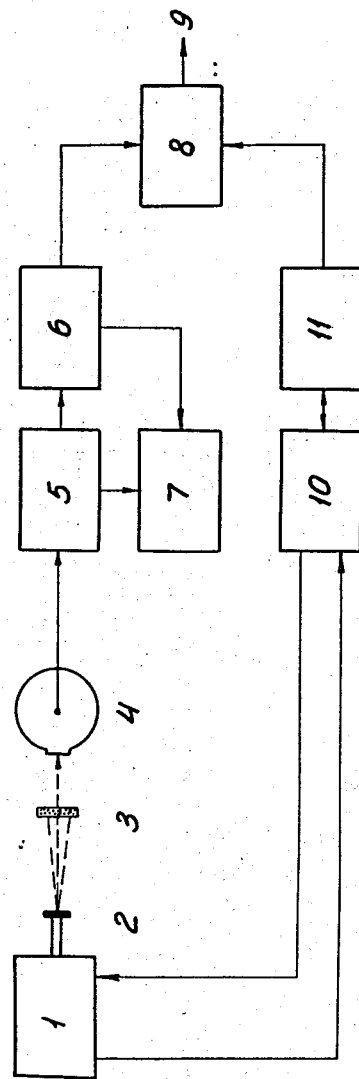


Рис. 1. Блок-схема скоростного спектрометра. 1 - электромагнитный вибратор; 2 - источник гамма-лучей; 3 - фильтр; 4 - детектор; 5 - усилитель; 6 - дискриминатор; 7 - многоканальный анализатор АИ-100; 8 - магнитное операционное запоминающее устройство МОЗУ; 9 - вывод на печать и передачу; 10 - питание вибратора; 11 - управление МОЗУ.

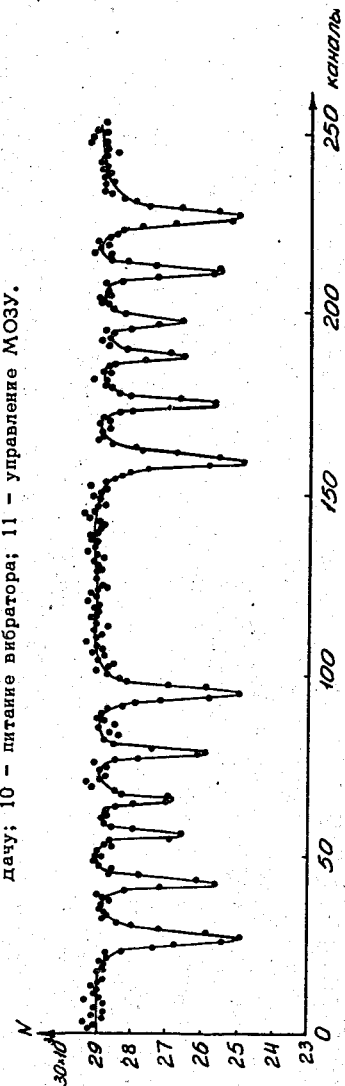


Рис. 2. Скоростной спектр $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Продолжительность замера 20 минут.

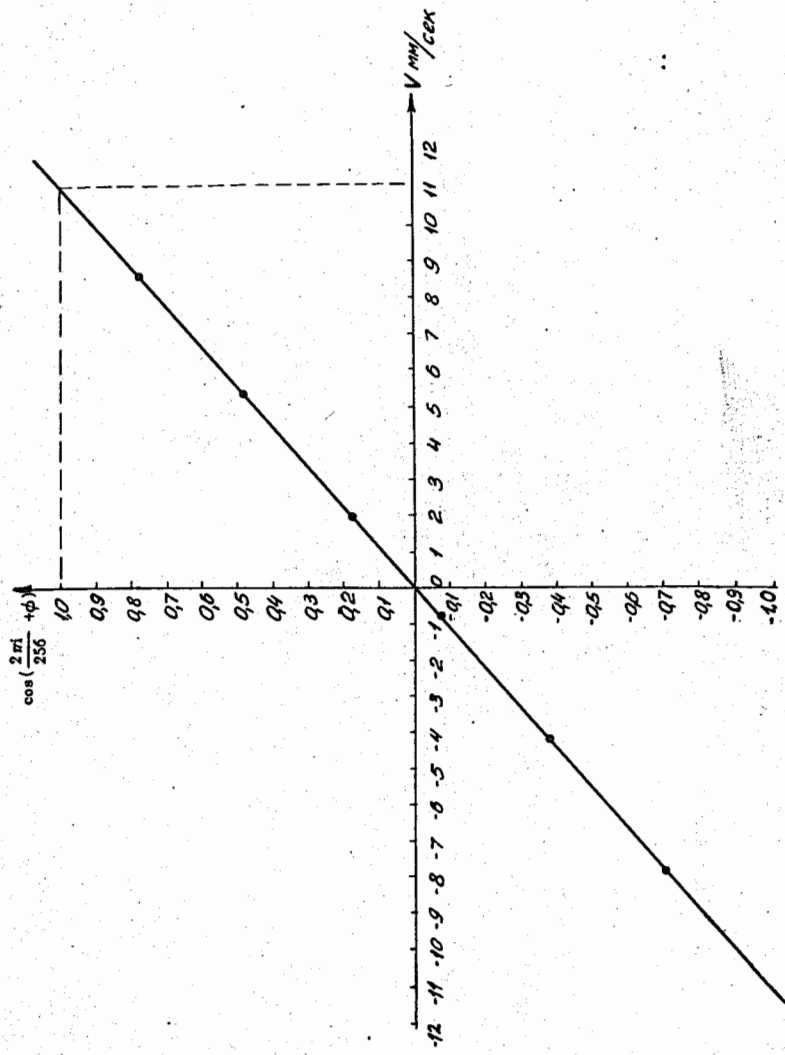


Рис. 3. Проверка синусоидальности закона движения.

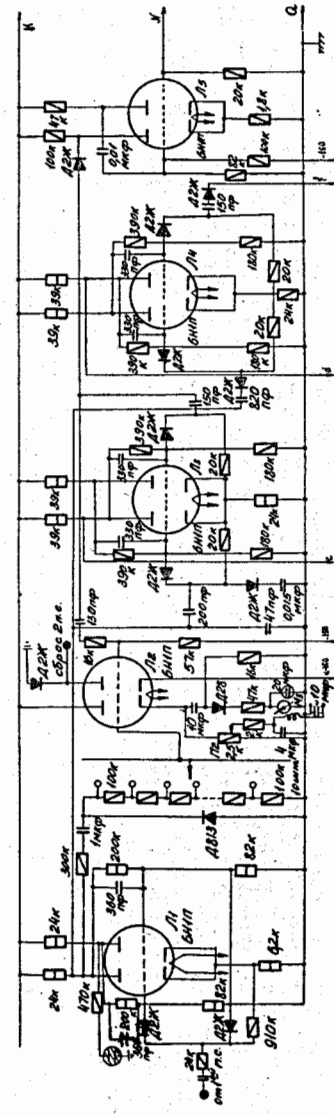


Рис. 4. Принципиальная схема нестандартной части электроники. Лист 1.

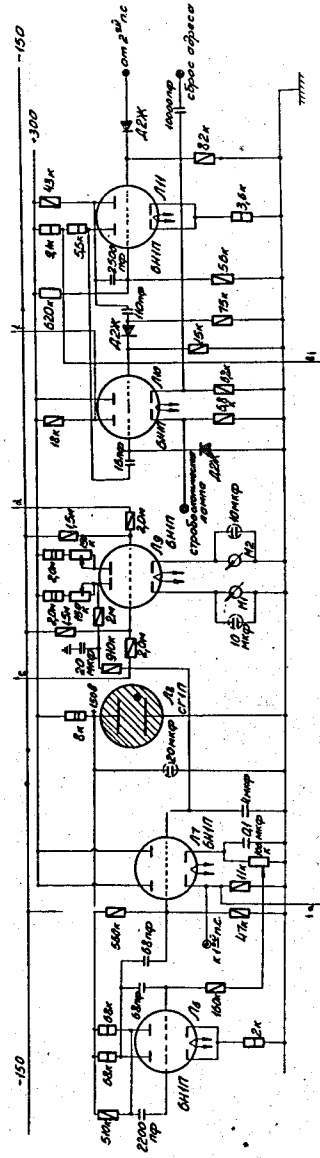


Рис. 4. Принципиальная схема нестандартной части электроники. Лист 2.

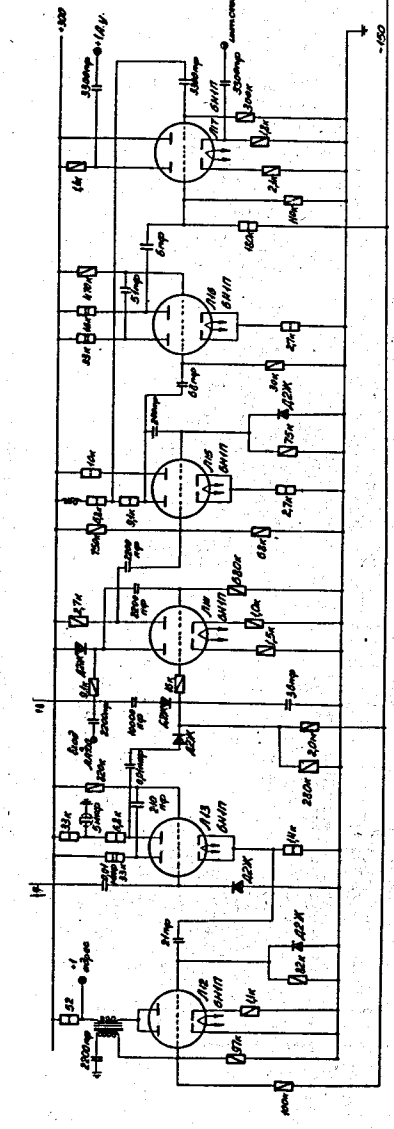


Рис. 4. Принципиальная схема нестандартной части электроники. Лист 3.

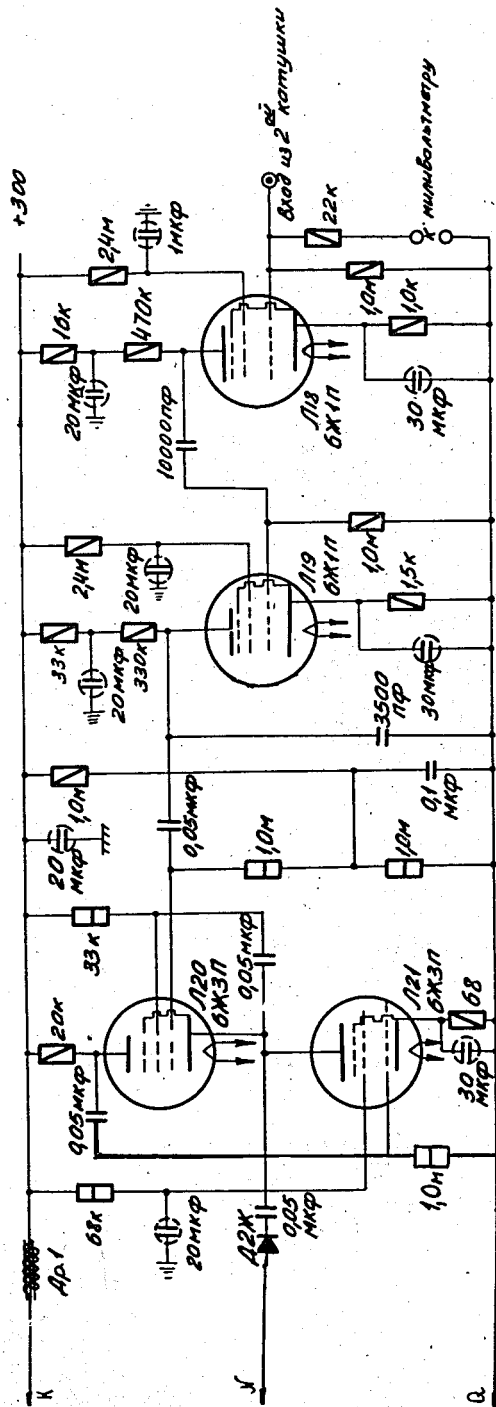


Рис. 4. Принципиальная схема нестандартной части электроники. Лист 4.

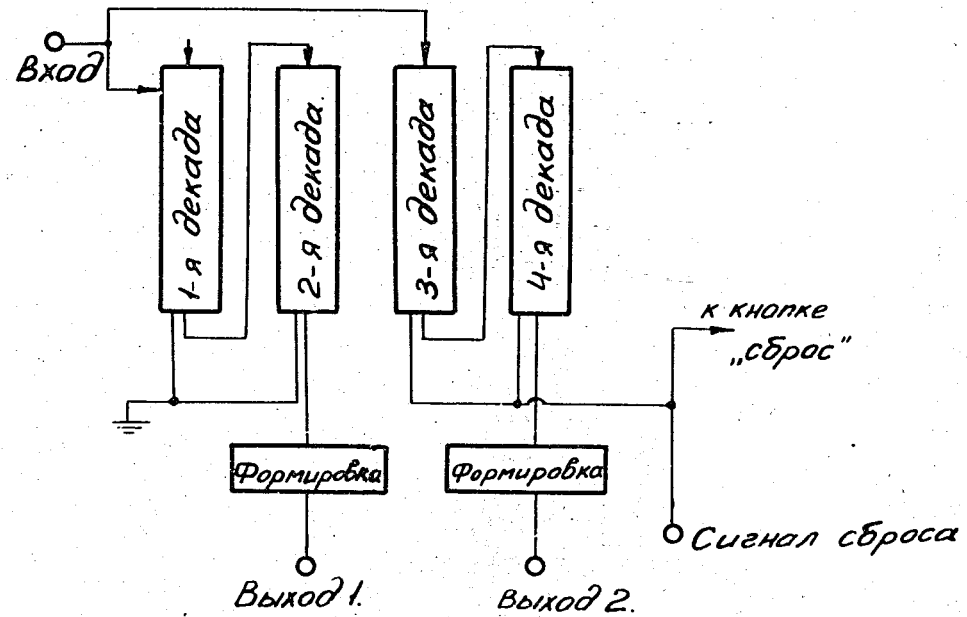


Рис. 5. Блок-схема устройства ПС-10000 после внесения соответствующих изменений.

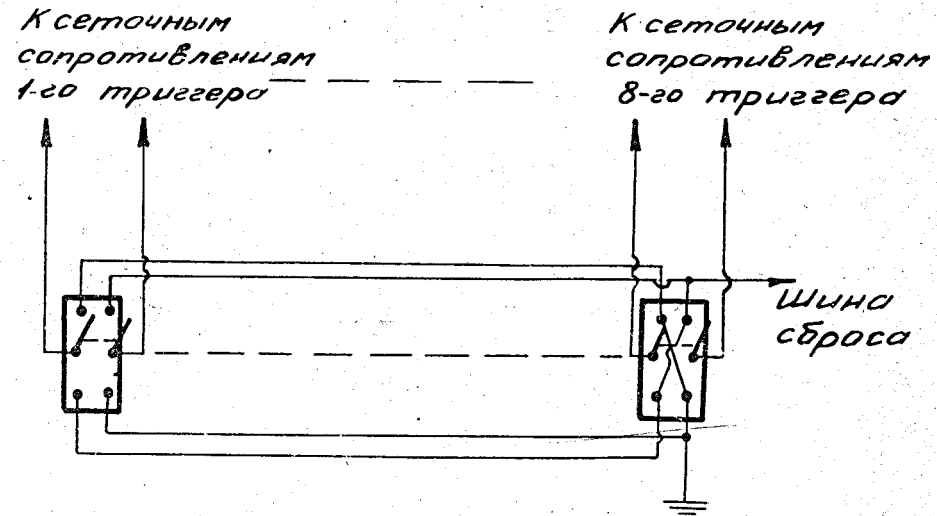


Рис. 6. Схема подключения тумблеров к триггерам второго пересчетного устройства.

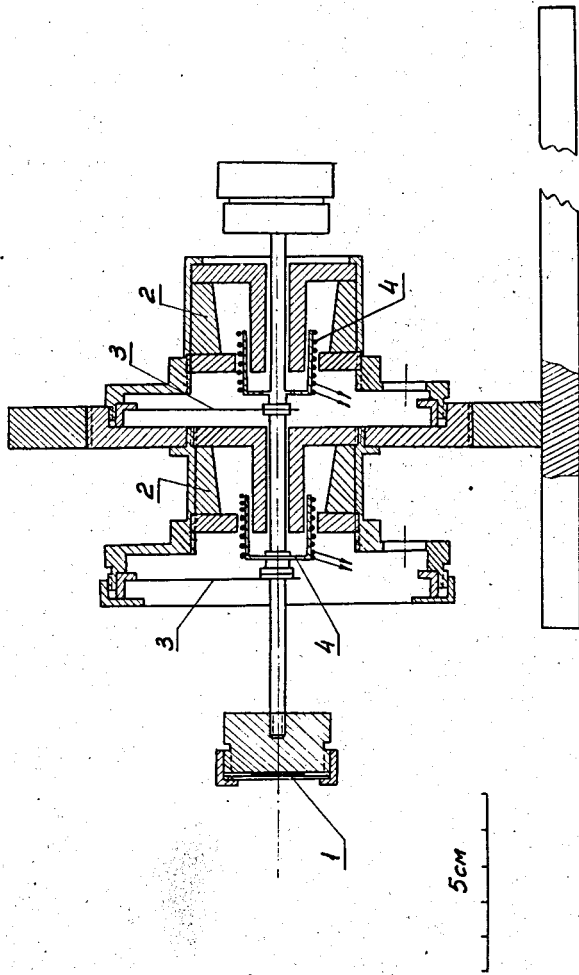


Рис. 7. Электромагнитный вибратор. 1 - источник гамма-лучей; 2 - кольцевые магниты; 3 - плоские пружины; 4 - катушки.

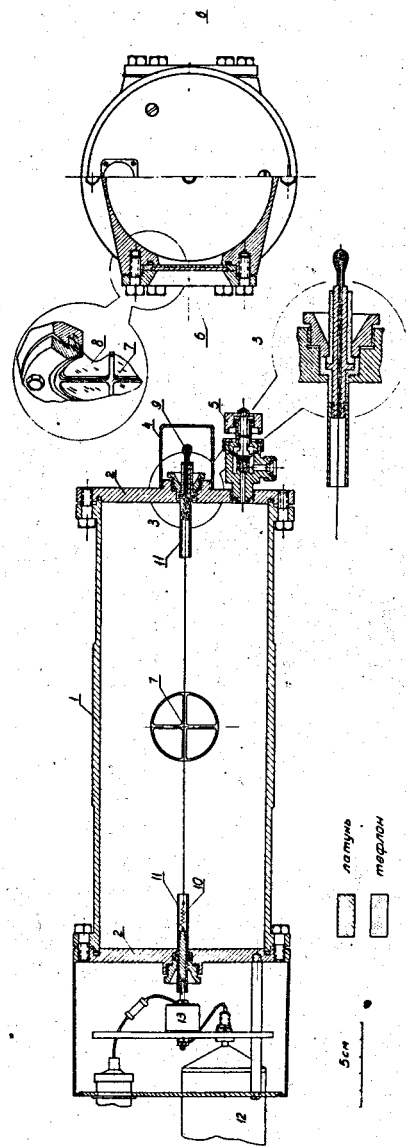


Рис. 8. Пропорциональный счетчик. 1 - корпус счетчика; 2 - боковые фланцы счетчика; 3 - вывод нити; 4 - охранный колпачок; 5 - кран; 6 - окно; 7 - подержки слюды; 8 - слюда; 9 - место заправки вывода нити; 10 - пружинка; 11 - защитные насадки; 12 - катодный повторитель усилителя; 13 - переходный конденсатор.

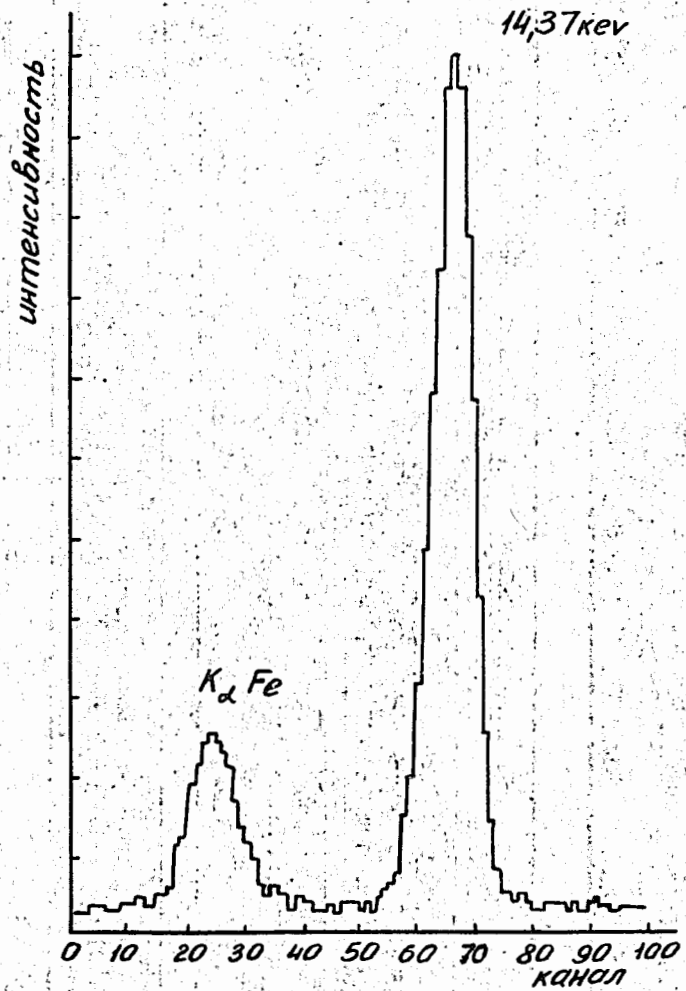


Рис. 9. Амплитудный спектр источника Co^{60} , регистрируемый на пропорциональном счетчике.

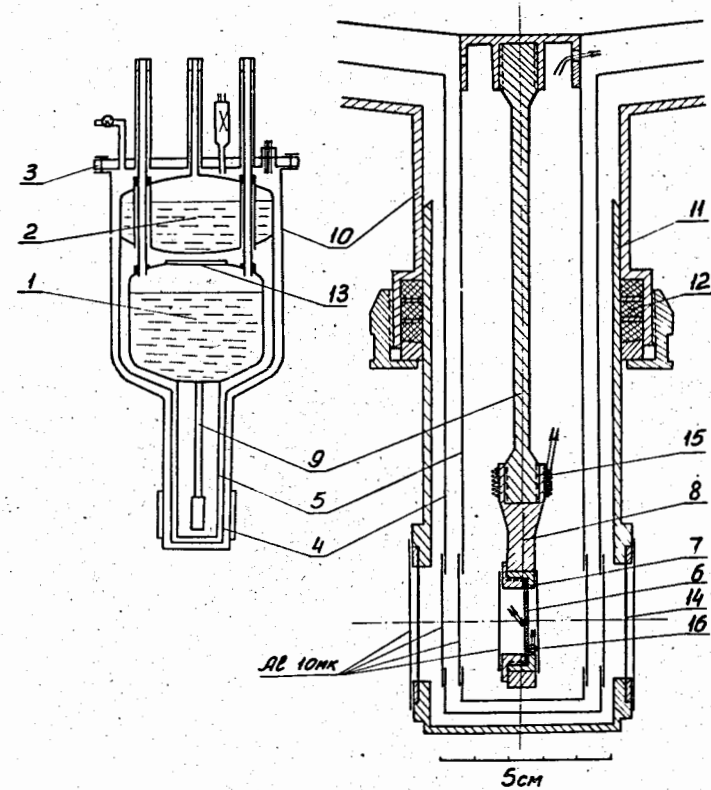


Рис. 10. Схема криостата для низкотемпературных измерений.
 1 - гелиевый сосуд; 2 - азотный сосуд; 3 - плата; 4 - 5 - экраны;
 6 - образец; 7 - оправка; 8 - теплообменник; 9 - стержень; 10 - вакуумный кожух; 11 - колпак; 12 - уплотнение Вильсона; 13 - геттер;
 14 - слюдяные окна; 15 - подогреватель; 16 - германиевый термометр.

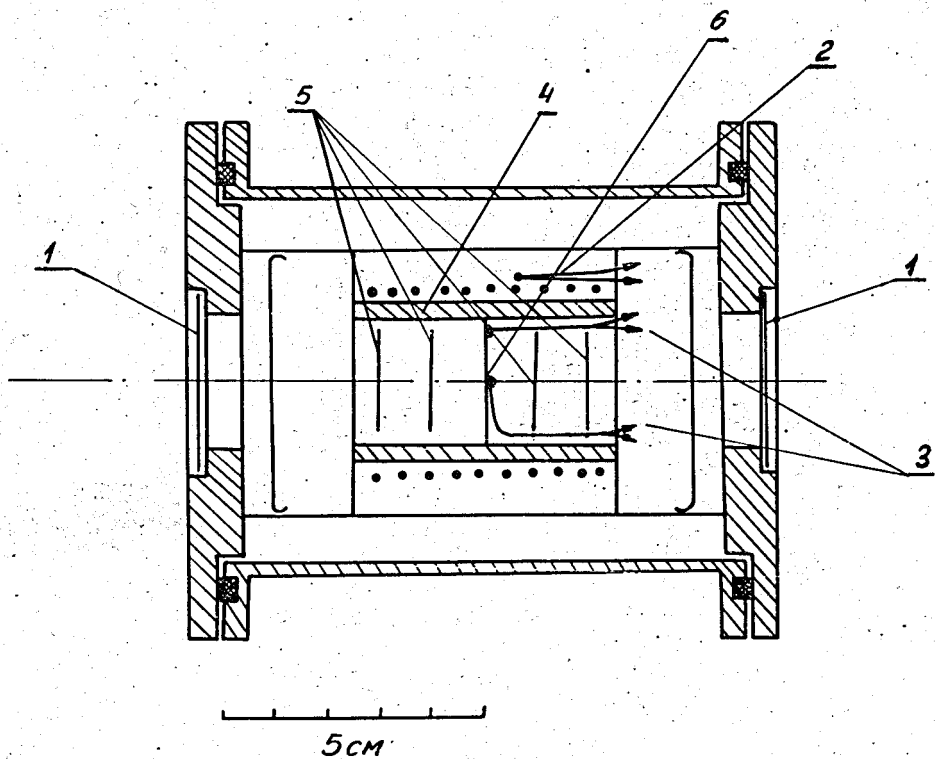


Рис. 11. Схема печи для высокотемпературных измерений.

- 1 - слюдяные окна; 2 - термопара, регулирующая температуру печи;
 3 - термопары для измерения температуры образца; 4 - никелевый цилиндр;
 5 - бериллиевые экраны; 6 - образец.