

18

Л-59

722



ЛАБОРАТОРИЯ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

А.Ф. Линев

P-722

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА  
ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА  
УСКОРЕННЫХ ИОНОВ ЦИКЛОТРОНА

Дубна 1981 год

А.Ф. Ливев

P-722

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА  
ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ  
ФАЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА  
УСКОРЕННЫХ ИОНОВ ЦИКЛОТРОНА

108376 чг.  
9/18801

Направлено в ПТЭ

СОЮЗНЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ  
БИБЛИОТЕКА

### А н н о т а ц и я

Описана схема, сконструированная для измерения формы сгустка тока ионов циклотрона многозарядных ионов методом временного наносекундного анализа. Анализатор имеет следующие характеристики: временное разрешение при регистрации  $\gamma$  - лучей от препарата  $Cs^{137}$  - 0,43 нсек, характеристика линейна в диапазоне от 12 нсек до 400 нсек, смещение линии при изменении загрузки от  $10 \frac{\text{имп}}{\text{сек}}$  до  $2000 \frac{\text{имп}}{\text{сек}}$  не превышает 0,5 нсек. Анализатор может быть использован для целей спектрометрии быстрых нейтронов по времени пролета.

Современные достижения в области измерения очень коротких интервалов времени позволяют проводить анализ в наносекундной области сравнительно несложными методами. В ядерной физике эти измерения чаще всего применяются для целей спектрометрии по времени пролета, а также для определения времени жизни короткоживущих элементов. Некоторые важные характеристики циклотронного ускорителя, не поддающиеся расчету и прямым измерениям, могут быть с успехом изучены методом наносекундного анализа.

Прежде чем приступить к описанию схемы измерения очень кратко рассмотрим временную структуру пучка ускоренных ионов на выходе пиклотрона.

Процесс ускорения в циклотроне можно условно разбить на два режима (1).

В начальном режиме ускорения ионы, отобранные из источника, движутся по круговой орбите, радиус которой определяется величиной магнитного поля  $H$  и амплитудой высокочастотного ускоряющего напряжения (ВЧ), приложенного к дуантам  $U_0$  (рис. 1,а). Ионы из источника вытягиваются только во время отрицательного значения напряжения ВЧ (б). Начальная орбита имеет маленький радиус, а поэтому большую часть своего пути ионы находятся под воздействием ускоряющего напряжения  $U_0$ . Движение в таких условиях в течение первых же оборотов неизбежно приведет к группировке фаз ускоряемых ионов относительно некоторой начальной фазы  $\varphi_H$  (в).

Таким образом, в начальном режиме ускорения формируется "сгусток" ионов, начальный фазовый сдвиг которого  $\varphi_H$  имеет величину порядка  $+30^\circ$  (а,в). Фазовая ширина его составляет примерно  $0,1T$  ( $T$  - период ВЧ).

С увеличением энергии ионов радиус орбиты увеличивается. Большую часть своего пути ионы будут находиться в полости дуантов и лишь незначительную часть - в ускоряющем зазоре между дуантами. Наступает линзовый режим ускорения. В этом режиме продолжается группировка фаз, хотя и не в такой сильной степени, как в начальном режиме ускорения.

Условия сохранения вертикальной устойчивости орбиты движения ионов в линзовом режиме требуют небольшого радиального спада магнитного поля (2). На начальном участке движения величина поля  $H$  имеет значение больше резонансного  $H_0$ . При этом фазовое положение сгустка смещается в область отрицательных

углов, не превышая, однако, величины  $-\frac{\pi}{2}$ . Смещение фазового положения сгустка прекращается в тот момент, когда поле станет соответствовать резонансному  $H=H_0$  (д). После этого величина поля становится меньше резонансного, а фазовое положение сгустка смещается в область положительных углов.

Процессы группировки фаз в начальном режиме ускорения и смещения фазового положения сгустка с увеличением радиуса орбиты в линзовом режиме ускорения в настоящее время мало изучены.

В настоящей работе описана схема, позволяющая провести измерения фазовых характеристик циклотрона методом временного наносекундного анализа.

При облучении мишени пучком ускоренных ионов возникает  $\gamma$ -излучение. На рис. 2 приведены энергетические спектры  $\gamma$ -квантов в зависимости от того, на каком радиусе находится мишень. С увеличением радиуса увеличивается энергия ионов. Максимум кривой интенсивности  $\gamma$ -излучения смещается при этом в сторону больших энергий.

$\gamma$ -кванты, излучаемые мишенью, регистрируются быстрым сцинтилляционным счетчиком. Временное положение электрического импульса на выходе этого счетчика в точности соответствует временному положению сгустка ускоренных ионов. (Скорость распространения  $\gamma$ -квантов равна скорости света).

С другой стороны, из синусоидального ускоряющего напряжения (ВЧ) формируются опорные импульсы, жестко связанные с фазой этого напряжения.

Опорный импульс и импульс сцинтилляционного счетчика разделены между собой временным интервалом, пропорциональным фазовому положению сгустка. Этот интервал измеряется временным наносекундным анализатором.

В силу того, что из всех  $\gamma$ -квантов, возникающих при попадании одного сгустка на мишень, регистрируется не более одного, анализатор регистрирует усредненную форму сгустка. Временное расположение импульсов сцинтилляционного счетчика относительно "центра тяжести" сгустка должно носить вероятностный характер. Для рассмотрения мгновенной структуры сгустка этот метод измерения непригоден.

Во время работы циклотрона наряду с  $\gamma$ -излучением, возникающим при бомбардировке мишени, существует рентгеновское излучение, так как к дуантам

приложен сравнительно большой потенциал ВЧ. На рис. 3 изображен энергетический спектр рентгеновского излучения для различных ускоряющих напряжений. Это излучение также регистрируется сцинтилляционным счетчиком. Максимум временного распределения импульсов, возникших от рентгеновского излучения, в точности соответствует максимуму ускоряющего напряжения ( $\varphi = 0$ , рис. 1а). На временной шкале анализатора будут зарегистрированы одновременно оба распределения. Абсолютный отсчет величины фазового сдвига сгустка производится относительно *max* временного распределения рентгеновского излучения ( $\varphi = 0$ ).

Временной анализатор построен по принципу время-амплитудного преобразователя (2). Измеряемый интервал с помощью интегратора линейно преобразуется в амплитуду импульса. Постоянная времени интегратора неизменна и превышает период ВЧ в несколько раз. Полученный импульс анализируется многоканальным амплитудным анализатором.

Блок-схема временного анализатора изображена на рис. 4. Рис. 5 иллюстрирует его работу. На рис. 6 и рис. 7 изображены принципиальные схемы.

Циклотрон многозарядных ионов работает в импульсном режиме. Высокочастотное ускоряющее напряжение включается (20-50) раз в секунду на время (1-3) мсек (а). Опорные импульсы (д,е) формируются из синусоидального ускоряющего напряжения (ВЧ). Интегрирование измеряемого интервала начинается в момент прихода импульса от сцинтилляционного счетчика и прекращается ближайшим опорным импульсом. В то время, когда нет опорных импульсов (ВЧ отключено), от сцинтилляционного счетчика может прийти случайный импульс. Произойдет ложное интегрирование. Для того, чтобы избежать ложного интегрирования вводится блокировка входа, которая позволяет анализатору работать только во время включения ВЧ.

Камера циклотрона обладает высокой добротностью, поэтому при включении и выключении ВЧ, напряжение на дуантах устанавливается не мгновенно. В неустановившейся области ( $t_1$  и  $t_2$ ) опорные импульсы будут формироваться из ВЧ с фазовым сдвигом, а измеряемый временной интервал будет иметь искажения. Система блокировки входа устроена так, что схема может работать только в установившемся режиме (г).

Для формирования опорных импульсов напряжение ВЧ с помощью витка связи отбирается непосредственно от камеры циклотрона, что обеспечивает мини-

мальный дрейф фазового положения опорных импульсов. Линия задержки, состоящая из пяти секций по 25 нсек в каждой, выполняет роль фазовращателя, с помощью этой задержки сгусток может быть расположен в удобном для наблюдения месте шкалы анализатора. После линии задержки, напряжение ВЧ детектируется и подается к дискриминатору  $L_1, L_2$  (б). Передним фронтом дискриминатора (в) запускается генератор задержанного сигнала, который вырабатывает импульс с регулируемой длительностью. Этот сигнал управляет работой системы блокировки входа анализатора. Величина задержки и длительности импульса подбирается так, чтобы входной дискриминатор ( $L19$ ) открывался только на время установившегося ВЧ напряжения. При отсутствии этого импульса входной дискриминатор заблокирован и не может быть запущен импульсом от сцинтилляционного счетчика.

После усилителя ВЧ ( $L_3$ ) с помощью блокинг-генератора ( $L_4$ ) из синусоидального напряжения формируются импульсы продолжительностью порядка 40 нсек. Фазовое положение этих импульсов соответствует углу  $-\frac{\pi}{2}$  (рис. 1,а). Порог срабатывания блокинг-генератора ( $U_n$ ) установлен на уровне одного вольта. При запускающем сигнале ( $U_m$ ) в 50 в неопределенность фазы срабатывания блокинг-генератора ( $\varphi_0$ ) не превышает  $1^\circ$  ( $U_n = U_m \sin \varphi_0$ ).

Второй блокинг-генератор ( $L5$ ) выполняет функцию делителя частоты. Импульсы этого генератора служат опорными при проведении измерений. Деление частоты вводится для того, чтобы на временной шкале анализатора можно было одновременно наблюдать сразу два  $\delta$ -пика. Расстояние между  $\delta$ -пиками в точности равно периоду ВЧ ( $T$ ). Зная число каналов между  $\delta$ -пиками, а также величину  $T$ , легко подсчитать абсолютное значение ширины одного канала временного анализатора ( $t_y - t_z = T$ ).

Третий блокинг-генератор ( $L6$ ) отбирает требуемый опорный импульс. Обычно он заблокирован лампой  $L7$  и открывается только после прихода импульса от сцинтилляционного счетчика.

Импульс сцинтилляционного счетчика через входной дискриминатор запускает (если он не был заблокирован) триггер  $T_1$  на лампе со вторичной эмиссией ( $L18$ ). Продолжительность импульса, формируемого триггером  $- 2 \cdot 10^{-6}$  сек (З,И), крутизна фронта не превышает 10 нсек. Этот импульс открывает смесительную лампу ( $L14$ ) по первой сетке и через лампу ( $L7$ ) снимает блокировку с блокинг-генератора

отбора опорного импульса (Л8). Как только смесительная лампа открылась, отрицательный перепад напряжения в ее аноде интегрируется лампой Л13. Процесс интегрирования продолжается до тех пор, пока не появится ближайший опорный импульс. Блокинг-генератор отбора сработает (к,л) и запустит триггер Т2, собранный на лампе с вторичной эмиссией (Л17). Смесительная лампа импульсом триггера Т2 будет закрыта по третьей сетке. Интегрирование прекращается. На выходе интегратора появятся импульсы, амплитуда которых пропорциональна исследуемому интервалу времени ( $t_x, t_y$ ). На время интегрирования вход анализатора заблокирован одновибратором (Л16) на время, несколько больше длительности импульса Т2, равного 3 мксек.

Разрешающая способность конвертора определяется крутизной фронта импульсов, генерируемых триггерами Т<sub>1</sub> и Т<sub>2</sub>. В схеме применяются лампы со вторичной эмиссией типа 6В1П. Для малых интервалов времени (короче фронта импульса) нарушается линейность преобразования времени в амплитуду. Начальный участок шкалы временного анализатора оказывается непригодным для измерения. Чтобы полнее использовать временную шкалу анализатора, смесительная лампа открывается импульсом от триггера Т<sub>1</sub>, задержанным на время 15 нсек, несколько большее продолжительности фронта импульса. Увеличение крутизны фронта достигается путем ограничения импульса на лампе Л15.

После интегрирования (Л13) импульс усиливается (Л10, Л11, Л12) и поступает на линейную схему пропускания - "ворота" (Л9). Ворота управляются дифференциальным дискриминатором. Выходной импульс дискриминатора обычно запаздывает относительно начала входного импульса на величину в несколько мксек. Для того, чтобы согласовать временное положение импульсов от дискриминатора и интегратора, последний расширяется (затягивается) диодным расширителем импульса (Л10). Импульс на выходе ворот имеет продолжительность, равную продолжительности импульса на выходе дискриминатора. Через катодный повторитель (Л8) этот импульс подается к серийному многоканальному амплитудному анализатору типа АИ-100.

Из кривых рис. 2 и рис. 3 видно, что  $\gamma$  - излучение и рентгеновское излучение имеют различную энергию. Кроме этих излучений сцинтилляционный счетчик будет регистрировать также нейтроны, возникающие при бомбардировке мишени пучком тяжелых ионов. В силу того, что скорость нейтронов меньше скорости света, а сцинтилляционный счетчик удален от мишени на расстояние 7 метров, появле-



ние нейтронных импульсов на выходе сцинтилляционного счетчика будет запаздывать относительно фазы ВЧ на время, пропорциональное пролетному

$$t_{\text{пр}} = 72,3 \frac{L}{\sqrt{E}} \text{ нсек,}$$

где  $L$  - пролетное расстояние (М),  $E$  - энергия нейтронов (Мэв). Нейтроны, полученные при бомбардировке мишени тяжелыми ионами, имеют широкий энергетический спектр. Может оказаться, что пролетное время для малоэнергичных нейтронов будет иметь величину, превышающую период ВЧ ( $T$ ). Картина временного распределения нейтронов получится весьма сложной. Скорее всего нейтроны распределяются равномерно по всей временной шкале. В случае изучения формы сгустка ионов и его фазового смещения, регистрация нейтронов нежелательна, так как увеличивается фон измерений.

Дифференциальный дискриминатор осуществляет энергетическую избирательность. Устанавливая порог и ширину окна нужным образом, можно изучать временное распределение рентгеновского излучения,  $\gamma$  - квантов или нейтронов. Необходимо только помнить, что органические сцинтилляторы существенно нелинейны. Выходная световая характеристика их близка к логарифмической (3).

При изучении спектра нейтронов ширина окна дискриминатора должна быть такова, чтобы на данном пролетном расстоянии размытие линии нейтронов не превышало периода ВЧ.

Важной характеристикой анализатора является его линейность. Имеется два способа определения этой характеристики. Первый способ заключается в том, что один и тот же импульс через линию задержки переменной величины подается одновременно на оба входа. Все блокировки при этом должны быть отключены. Амплитуда на выходе должна быть пропорциональна величине задержки.

На рис. 8а представлена характеристика линейности, снятая таким образом. Начиная с 15 нсек характеристика временного анализатора имеет удовлетворительную линейность. Начальный участок (до 15 нсек) имеет существенное отклонение от линейности. Это можно объяснить тем, что при интегрировании малых интервалов сказывается влияние фронтов импульсов, сформированных триггерами. Верхний предел интегрирования может быть увеличен путем увеличения постоянной времени интегратора. Вместе с этим произойдет также уменьшение сигнала. Как уже указывалось выше, сигнал от триггера  $T_2$  подается на третью сетку лучевой лампы типа

6А3П. Между этой сеткой и анодом существует паразитная емкость величиной порядка 2пф. Через эту емкость имеется прямое прохождение фронта импульса от Т2 ( $R_a = 1 \text{ ком}$   $C = 2 \cdot 10^{-9}$ ), причем, чем круче фронт импульса Т2, тем больше прохождение через паразитную емкость. Такое противоречивое требование ограничивает возможность применения конвертора с лампой типа 6А3П. Для того, чтобы анализировать интервалы времени короче 10 нсек, необходимо применять схему нейтрализации паразитной емкости и увеличивать крутизну фронта импульса. Эта задача является достаточно сложной и не всегда может привести к хорошим результатам.

О линейности характеристики анализатора можно судить по равномерности заполнения каналов импульсами от радиоактивного препарата. В этом случае временная корреляция между опорными импульсами и импульсами от счетчика отсутствует. Появление импульса в любой точке фазы ВЧ равновероятно, если величина периода ВЧ больше среднего периода статистически распределенных импульсов, полученных от препарата. Характеристика равномерности каналов (дифференциальная линейность анализатора) изображена на рис. 8 б.

Другая важная характеристика анализатора – временное разрешение. Была снята характеристика временного разрешения при регистрации счетчиком  $\gamma$ -квантов от радиоактивного препарата  $Cs^{137}$  (662 Кэв). Эта характеристика определяет собственное разрешающее время схемы. Оба входа соединены между собой линией задержки величиной 74 нсек. Интервал 74 нсек преобразуется в амплитуду импульса и записывается анализатором. Затем величина задержки увеличивается на 2,5 нсек (0,5 м кабеля). По величине смещения записи в анализаторе определяется ширина канала. Временное разрешение системы определяется как ширина записи на полувысоте (рис. 9). Для увеличения масштаба записи применялся амплитудный экспандер. Как видно из рисунка, ширина канала имеет величину 0,193 нсек, временное разрешение схемы составляет 0,43 нсек.

Реальное временное разрешение определяется временными характеристиками детектора излучения.

В качестве детектора применен стандартный кристалл стиблена с фотоумножителем типа ФЭУ-33. Делитель фотоумножителя подобран специальным образом. На нагрузке фотоумножителя в 1,5 ком получается импульс (3-5) в с фронтом лучше, чем 10 нсек. Для согласования с волновым сопротивлением кабеля  $Z = 100 \text{ ом}$

применена сильно открытая ( $\mathcal{U}_a \approx 40 \text{ ma}$ ) лампа типа 6Э5ПН. В аноде лампы включено сопротивление, равное волновому сопротивлению кабеля, по которому положительный импульс поступает к входному дискриминатору (Л10).

Крутизна фронта импульса, сформированного таким образом, имеет величину в несколько нсек. При изменении амплитуды входных импульсов момент срабатывания входного дискриминатора изменяется. Временное разрешение при этом ухудшается. Влияние крутизны фронта импульса детектора может быть исключено, если входной дискриминатор будет запускаться "центром тяжести" импульса, полученного от фотоумножителя. "Вылавливание" центра тяжести методом "пересечения нуля" (4), например, позволяет получить временное разрешение в 1,5 нсек даже с таким медленным кристаллом как  $\text{NaI}$ .

На рис. 10 приводится кривая временного распределения импульсов от нейтронов и  $\gamma$ -квантов. Форма распределения записи  $\gamma$ -квантов в точности соответствует усредненной форме сгустка токов выходного тока циклотрона. Временное распределение записи нейтронов почти равномерное, так как ворота управлялись интегральным импульсом дискриминатора. Делитель частоты опорных импульсов (Л5) отключен.

Прибор, сконструированный для измерения формы сгустка, сравнительно просто устроен. Он может быть также с успехом применен для целей спектрометрии быстрых нейтронов по времени пролета.

В заключение автор считает своим долгом поблагодарить Л.Кумпф за помощь, оказанную при наладке схемы, а также Ю.Оганесяна за интерес, проявленный к работе.

#### Л и т е р а т у р а

1. М.Ливингстон, М.Розе, М.Нампас. "Циклотрон", ГИТТЛ, 1948.
2. Neilson G.C., James D.B. Rev. Sci. Instr., v. 26, N11 (1955).
3. Б.В.Рыбаков, В.А.Сидоров. "Спектрометрия быстрых нейтронов" Приложение № 6 к журналу "Атомная энергия" за 1958 г.
4. International Symposium on Nuclear Electronics, vI, 1959, Wien, P 189-193.

Рукопись поступила в издательский отдел  
15 апреля 1961 года.

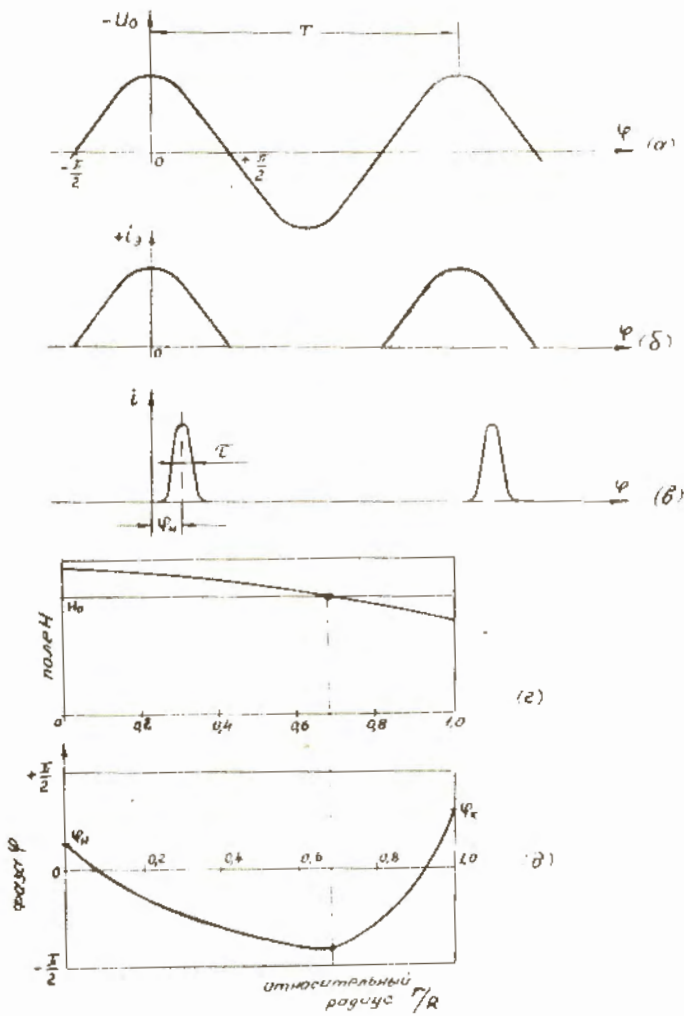


Рис. 1.

Формирование сгустка ионов в процессе ускорения.

- а) высокочастотное ускоряющее напряжение (ВЧ); б) ток эмиссии источника ионов; в) форма сгустка в конце начального режима ускорения; г) график изменения поля; д) график смещения фазового положения сгустка с изменением радиуса.

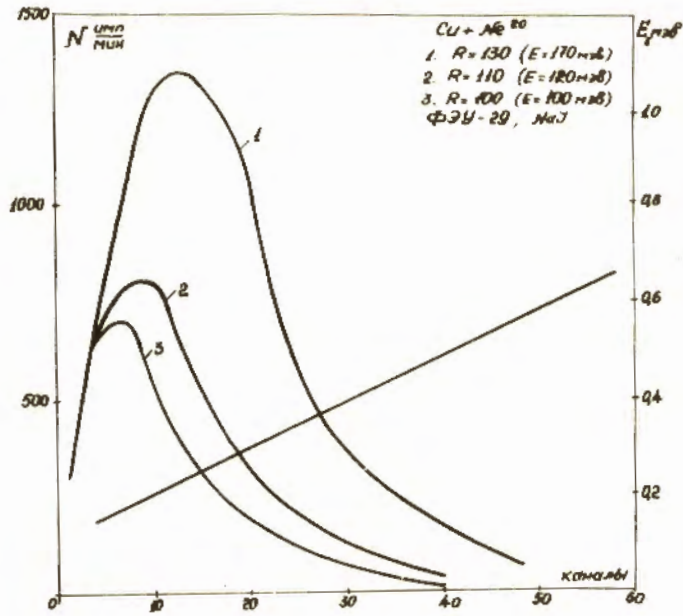


Рис. 2.

Спектры  $\gamma$  - излучения при бомбардировке медной мишени ускоренными ионами  $Ne^{20}$  различной энергии.

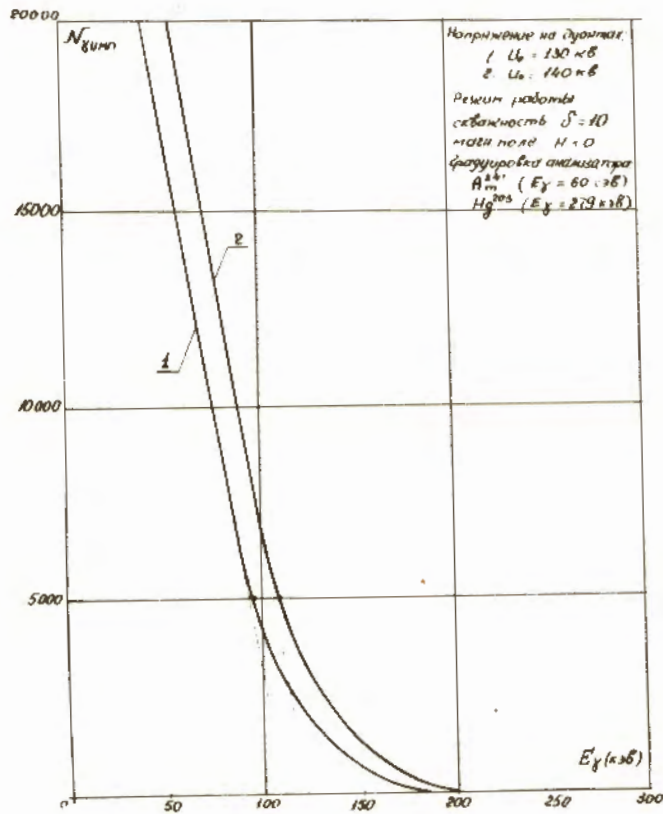


Рис. 3.

Спектр рентгеновского излучения циклотрона. Источник отключен.

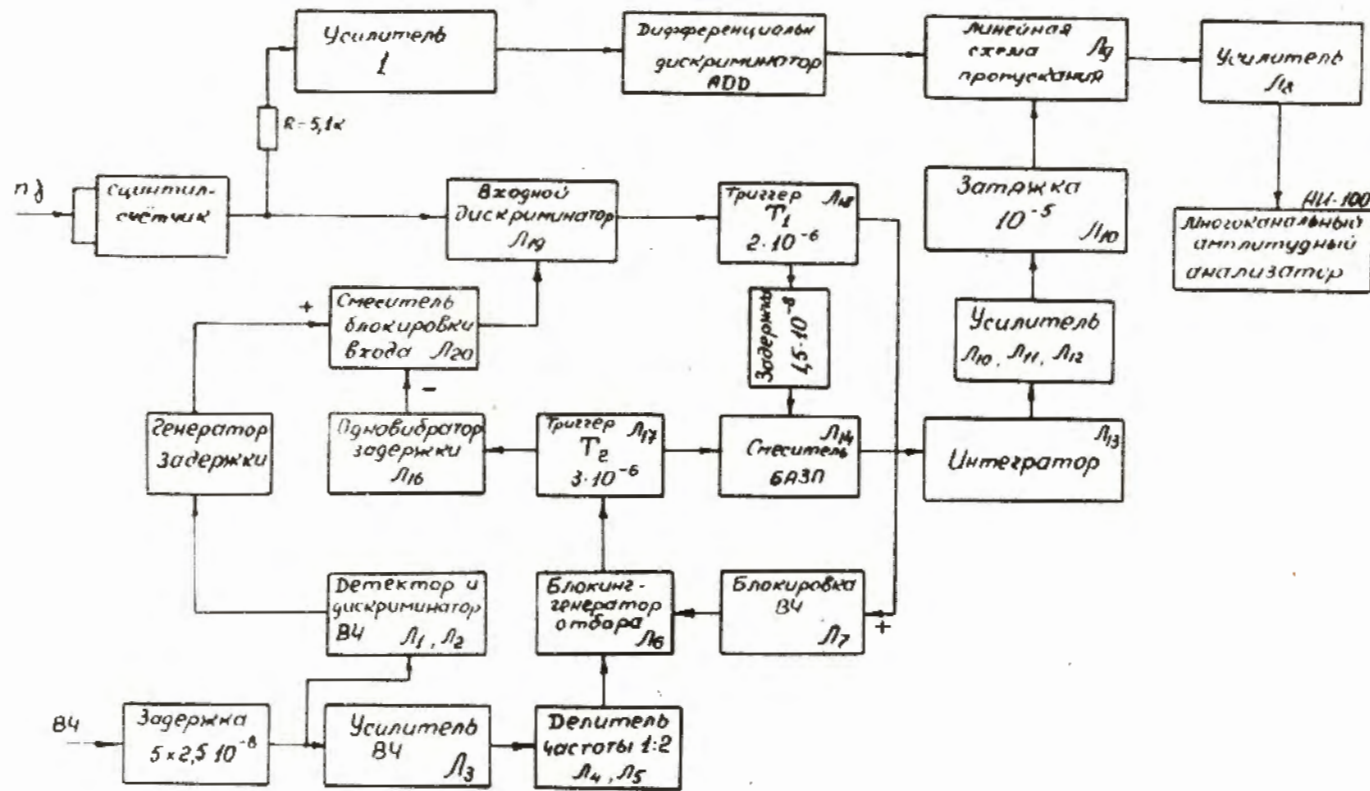


Рис. 4.

Блок-схема временного анализатора.

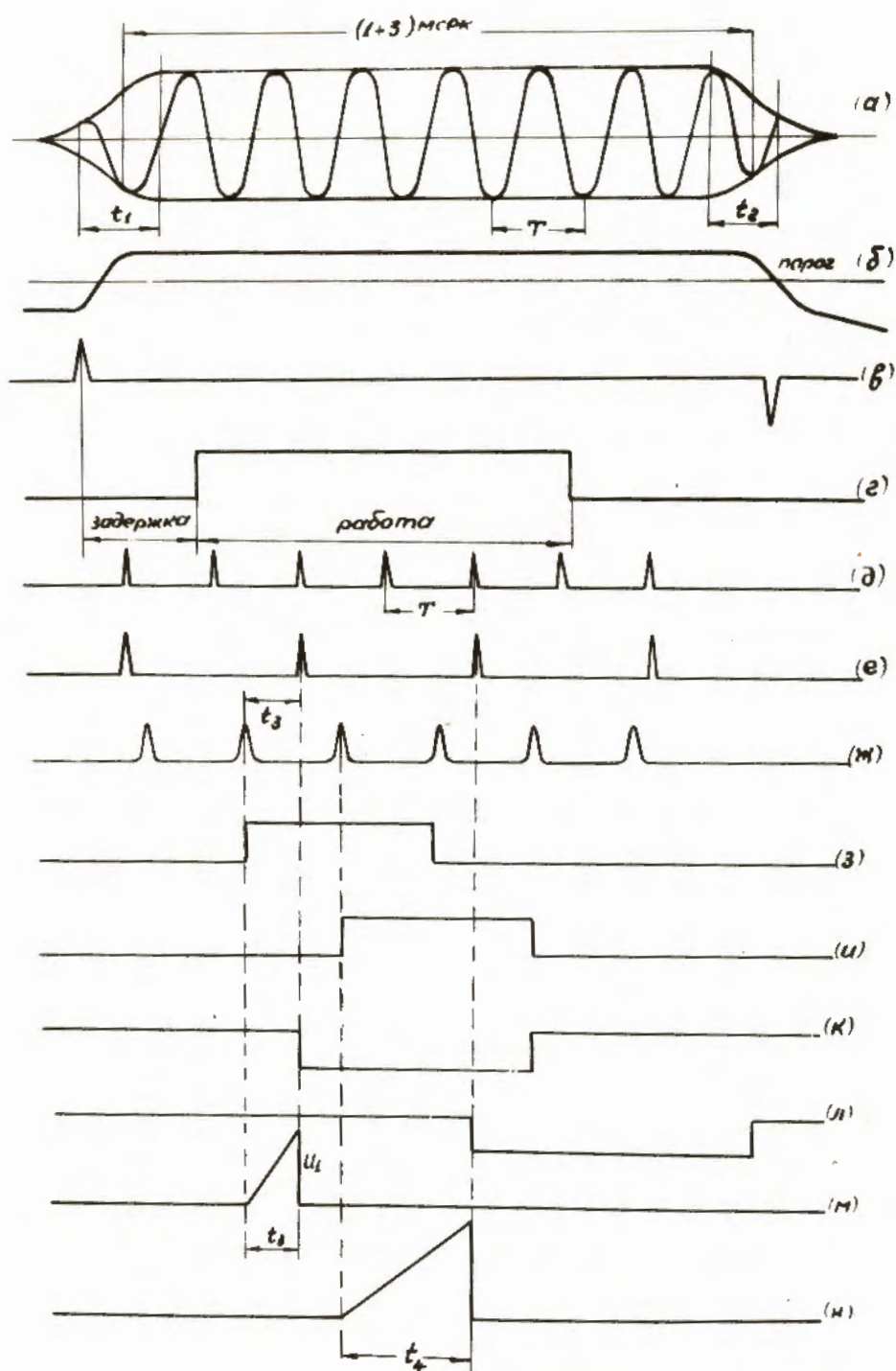


Рис. 5.

Импульсная карта временного анализатора.

- а) напряжение на дуантах циклотрона (ВЧ); б) импульс после детектора, в) дифференцированный импульс на выходе дискриминатора; г) задержанный управляющий импульс; д) опорные импульсы; е) импульсы на выходе делителя частоты; ж) сгустки ионов; з, и) импульсы триггера  $T_1$ ; к, л) импульсы триггера  $T_2$ ; м, н) импульсы на выходе интегратора.

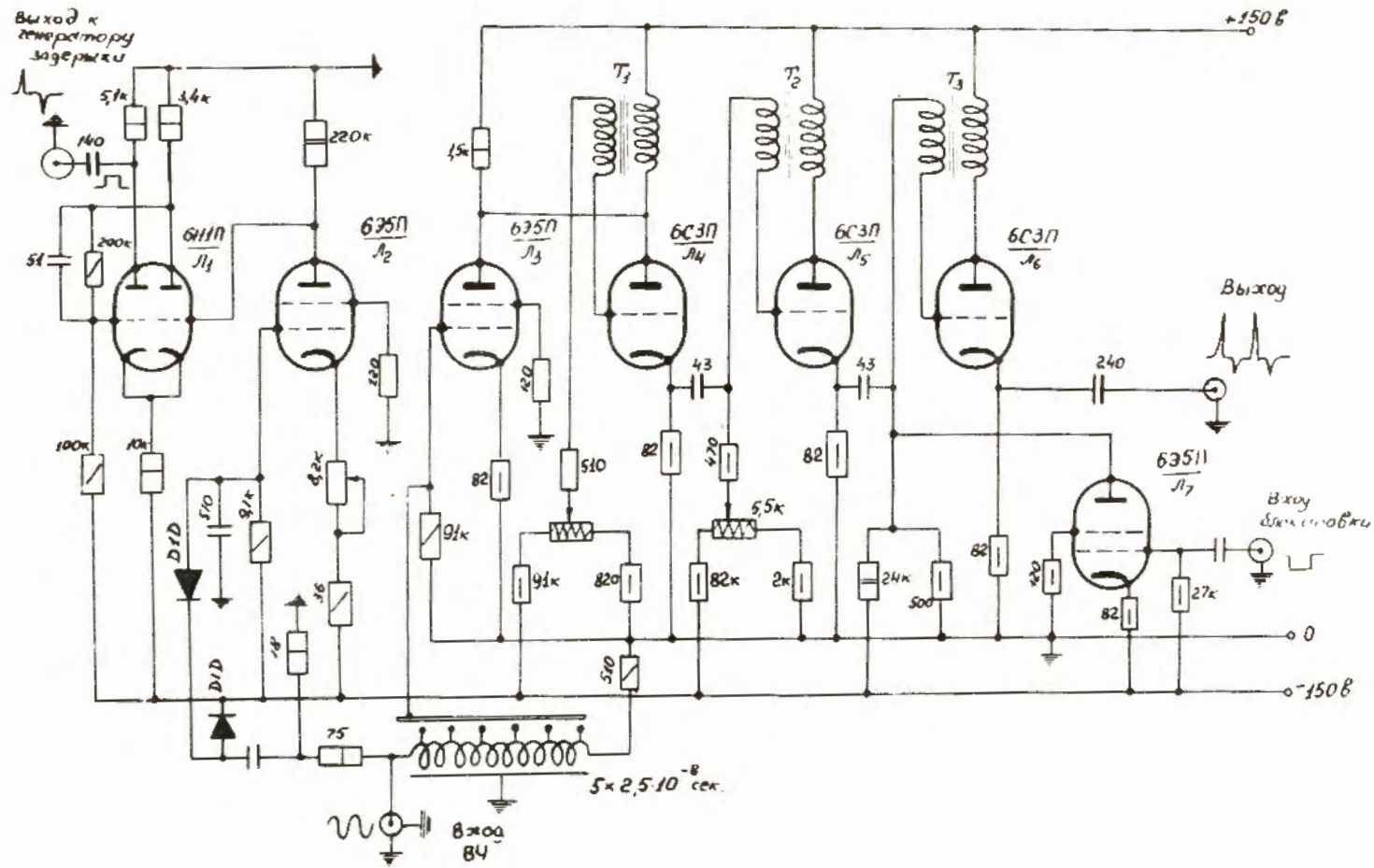


Рис. 6.  
 Принципиальная схема блока формирования.



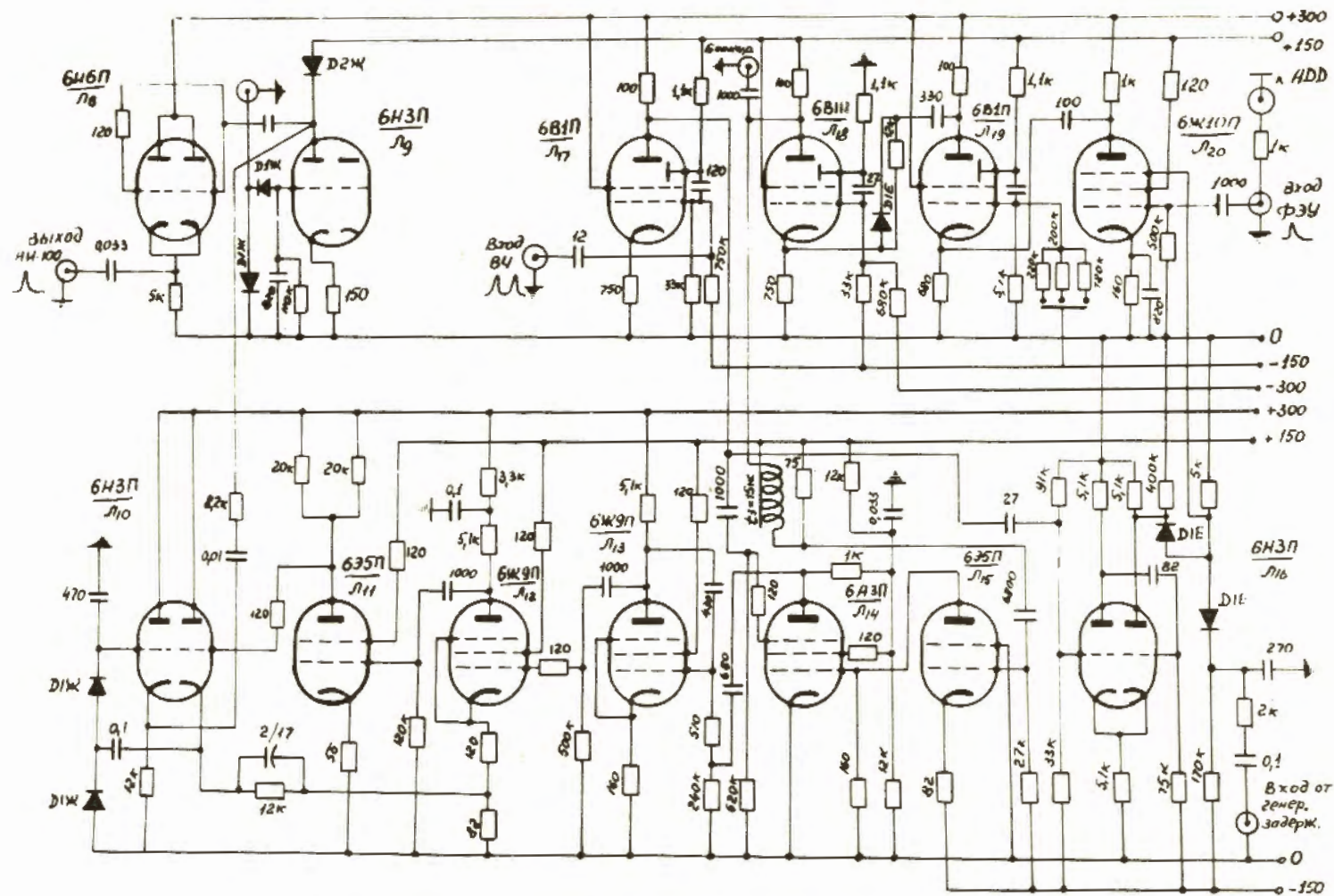
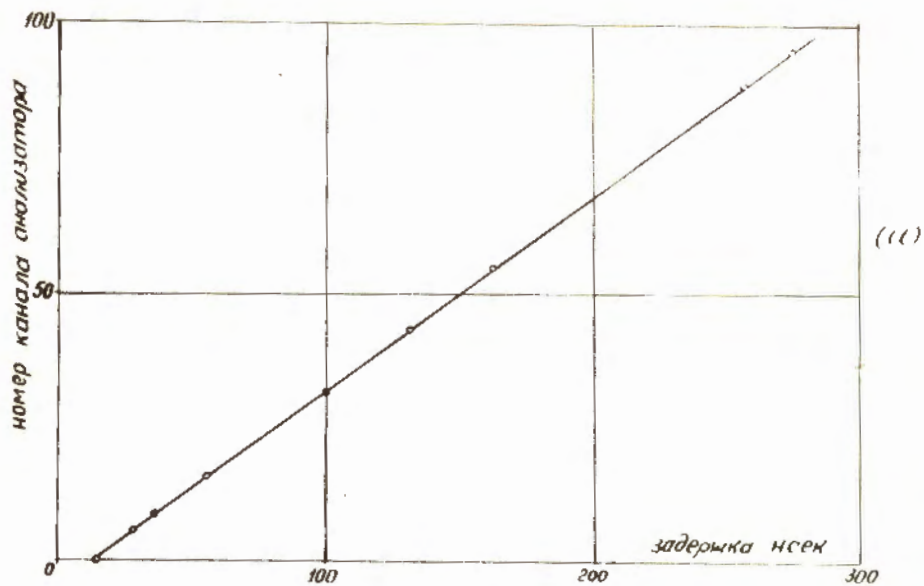
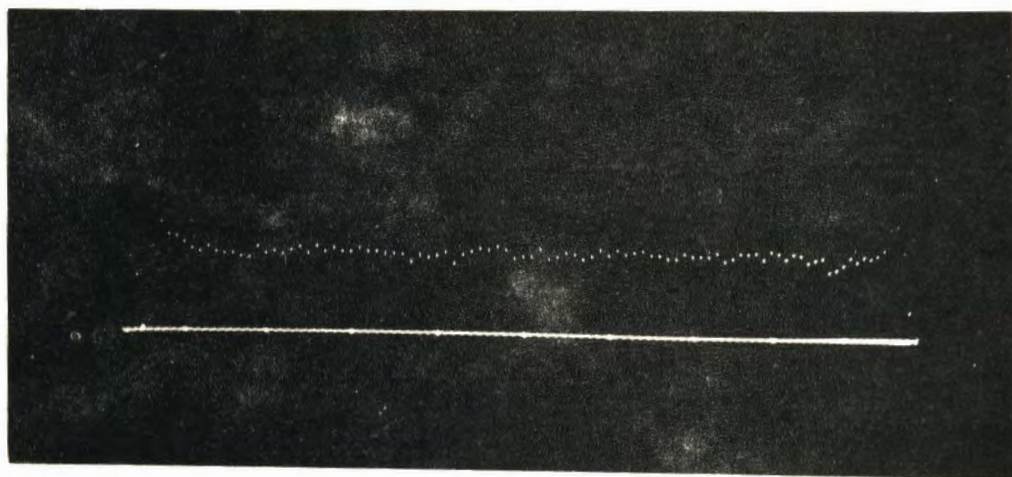


Рис. 7.  
Принципиальная схема блока преобразования.



а)



б)

Рис. 8.  
Линейность преобразования.

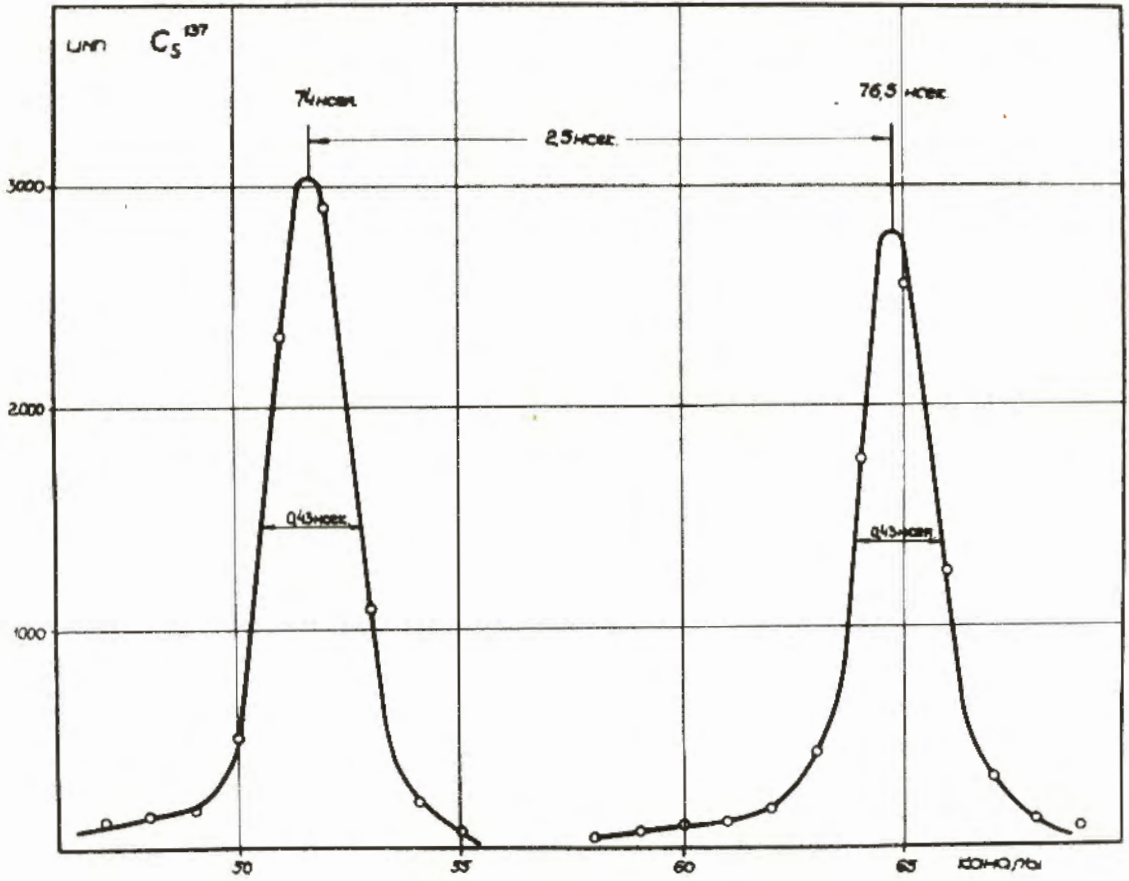


Рис. 9.  
Временное разрешение анализатора; ширина канала  $\Delta t = 0,193$  нсек.

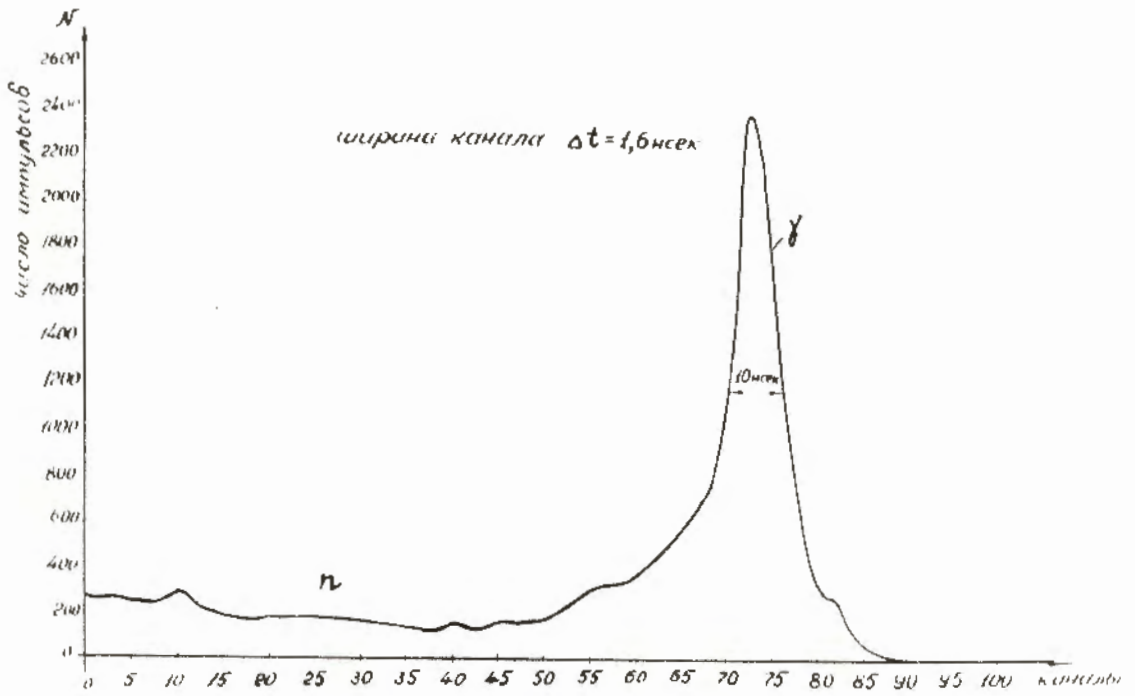


Рис. 10.  
Временное распределение  $\gamma$ -квантов и нейтронов.