

2

A.93

15

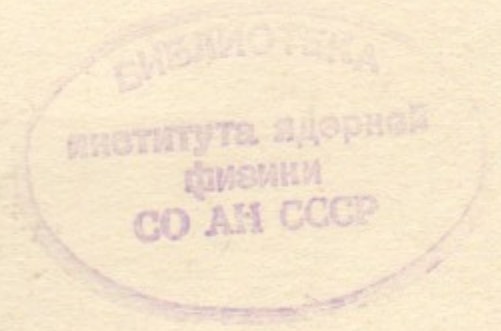


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

В.М. Аульченко, Д.К. Весновский,  
Г.М. Казакевич, И.Ю. Редько, Ю.В. Усов.

**ЗАРЯДОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ  
ДЛЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ И  
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СПЕКТРОМЕТРОВ**

ПРЕПРИНТ 84—25



НОВОСИБИРСК

Достоинства усилителей, чувствительных к заряду (ЗЧУ), при традиционном их использовании с полупроводниковыми детекторами (ППД) общеизвестны. В последние же годы все больше вырисовывается тенденция использования ЗЧУ с более широким набором детекторов. Так, например, ЗЧУ с успехом используются для усиления сигналов с пропорциональных камер с линиями задержки. Широкое применение находят ЗЧУ для усиления сигналов с фотодиодов (вакуумных или полупроводниковых) при использовании последних вместо ФЭУ с кристаллами NaJ(Tl), BGO [1]. При традиционном использовании ЗЧУ для спектроскопии его качество определяется в основном величиной шумового заряда  $Q_{\text{шум}}(0)$  при нулевой входной емкости ( $C_{\text{вх}}=0$ ) и зависимостью  $dQ_{\text{шум}}/dC_{\text{вх}}$ . При новом использовании не менее важное значение имеет такой параметр, как длительность переднего фронта сигнала ЗЧУ и ее зависимость от  $C_{\text{вх}}$ . Это связано с тем, что сигналы с ЗЧУ должны использоваться при формировании быстрого триггера с высоким временным разрешением, способного работать при нагрузках  $10^6 \text{ с}^{-1}$ .

Еще одно отличие заключается в выборе параметров формирующих фильтров. При использовании ЗЧУ в спектрометрических измерениях в случае малых нагрузок параметры фильтров выбираются в соответствии с условием получения максимального отношения сигнал/шум с учетом дисперсии времени сбора заряда. Оптимум для пассивных фильтров с простыми интегрирующими и дифференцирующими цепями в реальных случаях достигается при равных постоянных времени

$$\tau_{\text{д}} = \tau_{\text{и}} = \tau_0 \gg \tau_3,$$

где  $\tau_3$  — время сбора заряда; постоянная  $\tau_0$  определяется из условия:

$$\tau_0 = C_{\text{вх}} \sqrt{v/a}.$$

Здесь  $v$  — параметр, определяющий последовательные шумы;  $a$  — параметр, определяющий параллельные шумы. Физический смысл оптимизации заключается в выравнивании вклада параллельных и последовательных шумов. Значение  $\tau_0$  лежит в пределах от нескольких единиц до нескольких десятков микросекунд в зависимости от типа применяемого детектора.

При использовании ЗЧУ в составе аппаратуры больших детекторов типа [2, 3], работающих в режиме запуска сигналами системного триггера, часто не удается реализовать условия оптимальной фильтрации, поэтому выгодно использовать в измерительных трактах системы выборки и хранения, являющиеся, по существу, активными фильтрами.

В настоящей работе описываются два ЗЧУ: усилитель—1 и усилитель—2.

Усилитель—1 проектировался для получения наилучшего энергетического разрешения при оптимальной фильтрации для детекторов (ППД и вакуумных фотодиодов) с емкостью  $\lesssim 10$  пф, работающих при нагрузках  $\lesssim 10^4$  с<sup>-1</sup>. Это вызвало необходимость применения специальных мер в конструкции входного каскада и использования резисторов смещения величиной  $\sim 1$  ГОм.

Усилитель—2 проектировался с учетом перечисленных выше требований к высокой нагрузочной способности, получения переднего фронта сигнала порядка единиц наносекунд и минимальных значений  $dQ_{\text{шум}}/dC_{\text{вх}}$ .

Высокие нагрузки требуют уменьшения времени выборки и хранения информации до величины  $\lesssim 1$  мкс, при этом начинают доминировать последовательные шумы и применение резисторов смещения  $> 10$  МОм становится нецелесообразным.

#### Конструкция и схемы усилителей

Усилитель—1 состоит из двух секций: зарядочувствительной, определяющей в основном шумовые и временные характеристики предусилителя, и формирующей, которая позволяет получить квазигауссову форму выходного сигнала с дополнительным усилением.

Зарядочувствительная секция (рис. 1) представляет собой усилитель с полевым транзистором на входе (КП307Ж), отобранном по току затвора ( $< 10^{-12}$  А) и крутизне ( $S_0 \sim 3,5$  мА/В) и включенным по схеме с общим истоком. Нагрузкой каскада является генератор тока  $V_2$ . Дальнейшее усиление сигнала по току осуществляется каскадом на  $V_3$  и  $V_4$ , включенным по схеме ОК—ОБ. Нагрузкой этого каскада является генератор тока на  $V_5$ . Через истоковый  $V_6$  и эмиттерный  $V_7$  повторители сигнал подается на цепи обратной связи  $R_1 C_1$  и выходной согласующий каскад  $V_8, V_9$ . Входной полевой транзистор и сопутствующие элементы цепей смещения, обратной связи и входной цепи тестового генератора

размещены в блоке из фторопласта с контактными гнездами. Емкостями обратной связи  $C_1$  и калибровочной  $C_k$  служат медные штырьки, впресованные во фторопластовый блок. Остальные элементы усилителя смонтированы на стеклотекстолитовой плате.

В соответствии с рекомендациями [4] размещение элементов  $V_1, C_1, R_1$  и выбор размеров экранирующего кожуха сделаны согласно условию минимизации паразитных емкостей.

Формирующая секция усилителя состоит из активного фильтра на микросхеме 544УД2 с параллельной обратной связью и одной пассивной интегрирующей RC цепью [5]. Имеется цепь однократного дифференцирования с компенсацией «полюса нулем» и выходной каскад для подключения низкоомной нагрузки.

В усилителе—2 (рис. 2) все элементы размещены на одной стеклотекстолитовой печатной плате размером  $35 \times 55$  мм<sup>2</sup>. Такая конструкция весьма технологична и наиболее приемлема для систем с большим числом каналов. Собственно зарядочувствительная секция собрана на транзисторах  $V_1—V_5$ . На входе используются два полевых транзистора, включенных параллельно и отобранных по току стока и крутизне ( $S_0 \sim 5$  мА/В). Транзистор  $V_3$ , включенный эмиттерным повторителем, и  $V_4$ , включенный по схеме с общей базой, совместно с эмиттерным повторителем  $V_5$  обеспечивают большой коэффициент усиления при разомкнутой петле обратной связи. Выходной каскад  $V_6$  представляет собой эмиттерный повторитель, позволяющий работать на низкоомную нагрузку. Транзистор  $V_7$  является генератором тока, питающим усилительную часть и одновременно ее нагрузкой.

#### Измерение зависимости величины шума и длительности фронта от емкости входной цепи

Величина  $\sigma_{\text{шум}}$  для усилителя—1 определялась по амплитудному распределению сигналов при подаче на вход импульсов от генератора стабильной амплитуды. Спектр сигналов измерялся при  $\tau_0 \sim 4,5$  мкс. На рис. 3 приведены зависимости  $\sigma_{\text{шум}}$  и  $\tau_{\text{фр}}$  от входной емкости при двух значениях емкости обратной связи.

При проведении измерений с усилителем—2 использовались две его модификации—2а и 2б. Модификация 2а, отличающаяся от модификации 2б отсутствием транзистора  $V_3$ , широко используется в аппаратуре детекторов МД-1 и НД. Результаты измерения зависимости  $\tau_{\text{фр}}$  от  $C_{\text{вх}}$  для обеих модификаций даны на рис. 4. Там же представлена зависимость  $\sigma_{\text{шум}}(C_{\text{вх}})$ , измеренная по ши-

рине шумовой дорожки [6] в полосе частот 0—100 МГц. Как видно из рис. 4, добавление транзистора  $V_3$  кардинально улучшает фронт сигнала на выходе зарядочувствительной секции, но одновременно увеличивает  $\sigma_{\text{шум}}$  и  $dQ_{\text{шум}}/dC_{\text{вх}}$  за счет вклада последовательных шумов. Необходимо заметить, что измерение  $\sigma_{\text{шум}}$  на анализаторе амплитуды при  $\tau_0 \sim 1$  мкс (подобно измерениям, проведенным с усилителем—1) дает близкие значения  $\sigma_{\text{шум}}$  для обеих модификаций усилителя—2:  $\sigma_{\text{шум}}(0) \sim 530$  ед. заряда.

В реальной работе усилителя проверялись с вакуумными приемниками, которыми служили фотоумножители ФЭУ-139, включенные фотодиодами, и фотодиоды, специально изготовленные на базе фотоумножителей. Фотодиоды имели фокусирующую систему, подобную применяемым в жалюзных ФЭУ; диаметр рабочей части фотокатода составлял 40 мм. Источниками света служили сцинтилляторы NaJ(Tl) размером  $40 \times 40$  мм,  $110 \times 50 \times 300$  мм и ВГО размером  $40 \times 5$  мм. Первоначально входной сигнал снимался с диодной системы фотоприемника, соединенной с фокусирующим электродом, а напряжение смещения (15—50 В) подавалось на фотокатод. В таком включении паразитная емкость фотоумножителя составляла 23 пФ.

Для усилителя—1 ширина фотопика в спектре  $Cs^{137}$  на половине высоты ( $R_{1/2}$ ) составляла 24,5%, или 162 кэВ для NaJ(Tl) размером  $40 \times 40$  мм. Это соответствует значению  $\sigma_{\text{шум}} = 68$  кэВ. Для усилителя—2 при использовании в качестве фотоприемника ФЭУ-139  $R_{1/2} = 27,2\%$ , это соответствует  $\sigma_{\text{шум}} = 75$  кэВ. При использовании в качестве фотоприемника фотодиода (паразитная емкость  $\sim 20$  пФ) на усилителе—2 было получено значение  $R_{1/2} = 20,7\%$ , (рис. 5), что соответствует  $\sigma_{\text{шум}} = 57$  кэВ.

Рис. 6 иллюстрирует возможности использования описанных усилителей для решения задач физики высоких энергий. На нем приведен спектр потерь энергий космических частиц, выделенных телескопом сцинтилляционных счетчиков размером  $100 \times 100 \times 5$  мм, в сцинтилляторе NaJ(Tl) размером  $100 \times 50 \times 300$  мм. Фотоприемником служит ФЭУ-139, включенный указанным выше способом. Предусилителем служила зарядочувствительная секция усилителя—1. Спектр был снят при  $\tau_d = 0,7$  мкс,  $\tau_n = 3,7$  мкс.

В дальнейшем схема включения фотоприемников была изменена: выходные сигналы снимались с диода (при использовании ФЭУ—с первого, остальные диоды оставались свободными). На фокусирующий электрод через делитель с сопротивлениями  $\sim 1$

Гом подавался потенциал, примерно равный половине напряжения смещения. Эти меры позволили снизить паразитную емкость фотоприемников до величины  $\sim 8$  пФ и при напряжении смещения  $\geq 100$  В обеспечить практически полный сбор фотоэлектронов на диод.

В этих условиях при измерении спектра  $Cs^{137}$  кристаллом NaJ(Tl) размером  $40 \times 40$  мм с усилителем—1 были получены следующие значения амплитудного разрешения: для фотоприемника ФЭУ-139  $R_{1/2} = 12\%$  (рис. 7), для фотодиода  $R_{1/2} = 12,4\%$  (спектр практически совпадает с изображенным на рис. 7). Соответствующие значения  $\sigma_{\text{шум}}$  составляют 25,6 и 26,2 кэВ.

Полученные результаты показывают, что разработанные усилители могут быть успешно использованы в сцинтилляционных детекторах с небольшим светосбором, или с меньшим, чем у NaJ(Tl), световыходом. Это иллюстрируется рис. 8, где представлен спектр, полученный при облучении монокристалла ВГО фотонами  $Co^{60}$ , и рис. 9 со спектром потерь энергий космических частиц в ВГО, расположенном горизонтально (без использования телескопа). В качестве фотоприемника использовался ФЭУ-139, подключенный фотодиодом к усилителю—1.

Примером традиционного использования одного из экземпляров усилителя—1 в спектрометрическом тракте с неохлажденным ППД (HgJ<sub>2</sub> отечественного производства) служит спектр  $Am^{241}$  (рис. 10а) с пиком от калибровочного генератора. При отключенном детекторе ширина пика генератора составляет 1,0 кэВ (рис. 10б). Измерения спектра проводились на анализаторе LP4900 при постоянной формирования  $\tau_0 = 4$  мкс.

### Заключение

Можно утверждать, что разработанные усилители в разных модификациях могут найти применение в сцинтилляционных спектрометрах при замене фотоумножителей вакуумными фотодиодами. Это позволит значительно сократить габариты детекторов, что особенно важно при построении многоканальных детекторных систем, существенно снизить требования к магнитному экранированию счетчиков и исключить потребность в стабилизированных высоковольтных источниках питания.

В случае использования сцинтилляционных монокристаллов NaJ(Tl) небольших размеров ( $40 \times 40$  мм) было получено разрешение фотопика в спектре  $Cs^{137}$ , равное 12,1%, что соответствует энергетическому эквиваленту шумов с  $\sigma_{\text{шум}} = 25,6$  кэВ. Такое значение  $\sigma_{\text{шум}}$  позволяет использовать разработанные ЗЧУ с монокристаллами с небольшим световыходом, в частности с BGO, применение которых в настоящее время является весьма перспективным для решения ряда задач физики высоких энергий. Временные характеристики описанных ЗЧУ ( $\tau_{\text{фр}} \sim 7$  нс) позволяют применять их в условиях больших нагрузок (до  $10^6$  с $^{-1}$ ) для формирования быстрого триггера в многоканальных детекторах, используемых в физике высоких энергий.

Применение ЗЧУ в полупроводниковых спектрометрах рентгеновского излучения, работающих при комнатной температуре, обеспечивает получение разрешающей способности порядка единицы кэВ при энергии излучения до 100 кэВ.

В заключение авторы выражают благодарность С.И. Середнякову и В.П. Смахтину за участие в обсуждении, постановке задачи и помощь в работе.

#### Литература

1. *Blanař G. a. o.* Photodiode readout of BGO and NaJ(Tl).—Pre-proceedings of Int. Conf. on Instrumentation for Colliding Beam Physics. Feb. 17-23, 1982, Slac. California.
2. *Бару С.Е. и др.* «Детектор МД-1». Препринт ИЯФ № 83-39.
3. *Аульченко В.М. и др.* «Нейтральный детектор». Препринт ИЯФ № 82-142.
4. *Балдин С.А. и др.* ПТЭ, № 2, 1975, с. 135.
5. *Андорт К. и др.* Препринт ОИЯИ, Р13-7125, Дубна, 1973.
6. *Нетцер И. (перев.)* ТИИЭР, т. 69, № 5, 1981, с. 58.

#### Подписи к рисункам

- Рис.1. Принципиальная схема зарядочувствительной секции усилителя—1.
- Рис.2. Принципиальная схема усилителя—2.
- Рис.3. Зависимость  $\sigma_{\text{шум}}$  [ед. е] и  $\tau_{\text{фр}}$  [н.с.] от емкости на входе ( $C_{\text{вх}}$ ) усилителя—1:  
 1— $\sigma_{\text{шум}}(C_{\text{вх}})$  при  $C_1 = 0,52$  пф;  
 2— $\sigma_{\text{шум}}(C_{\text{вх}})$  при  $C_1 = 1,06$  пф;  
 3— $\tau_{\text{фр}}(C_{\text{вх}})$  при  $C_1 = 0,52$  пф;  
 4— $\tau_{\text{фр}}(C_{\text{вх}})$  при  $C_1 = 1,06$  пф;
- Рис.4. Зависимость  $\sigma_{\text{шум}}$  и  $\tau_{\text{фр}}$  от емкости на входе усилителя—2:  
 1— $\sigma_{\text{шум}}(C_{\text{вх}})$  при  $C_f = 1$  пф (модификация ЗЧУ—2а);  
 2— $\sigma_{\text{шум}}(C_{\text{вх}})$  при  $C_f = 2$  пф (модификация ЗЧУ—2б);  
 3— $\tau_{\text{фр}}(C_{\text{вх}})$  при  $C_f = 1$  пф (модификация ЗЧУ—2а);  
 4— $\tau_{\text{фр}}(C_{\text{вх}})$  при  $C_f = 2$  пф (модификация ЗЧУ—2б);  
 5— $\tau_{\text{фр}}(C_{\text{вх}})$  при  $C_f = 1$  пф (модификация ЗЧУ—2б);
- Рис.5. Спектр  $s^{137}$ , полученный с усилителем—2. В качестве фотоприемника применен фотодиод. Паразитная емкость на входе усилителя  $\sim 20$  пф.
- Рис.6. Спектр потерь энергии космических частиц в кристалле NaJ(Tl) толщиной 50 мм, измеренный с ЗЧУ—1. На рисунке также представлены геометрические размеры телескопа, выделяющего угловое распределение детектируемых частиц.
- Рис.7. Спектр  $Cs^{137}$ , измеренный с усилителем—1 при паразитной емкости на входе  $\sim 8$  пф. Значение  $R_{1/2}$  составляет 12,1%. Сцинтиллятор— NaJ(Tl)  $40 \times 40$  мм.
- Рис.8. Спектры  $o^{60}$  и шумов, измеренные с усилителем—1 при паразитной емкости на входе  $\sim 8$  пф. Сцинтиллятор—BGO  $40 \times 5$  мм.
- Рис.9. Спектр потерь энергии космических частиц в монокристалле BGO толщиной 5 мм, полученный с ЗЧУ—1.
- Рис.10. а) Спектр  $Am^{241}$ , полученный с неохлажденным ППД ( $HgJ_2$ ) и усилителем—1;  
 б) Спектр сигналов от калибровочного генератора при отключенном ППД.

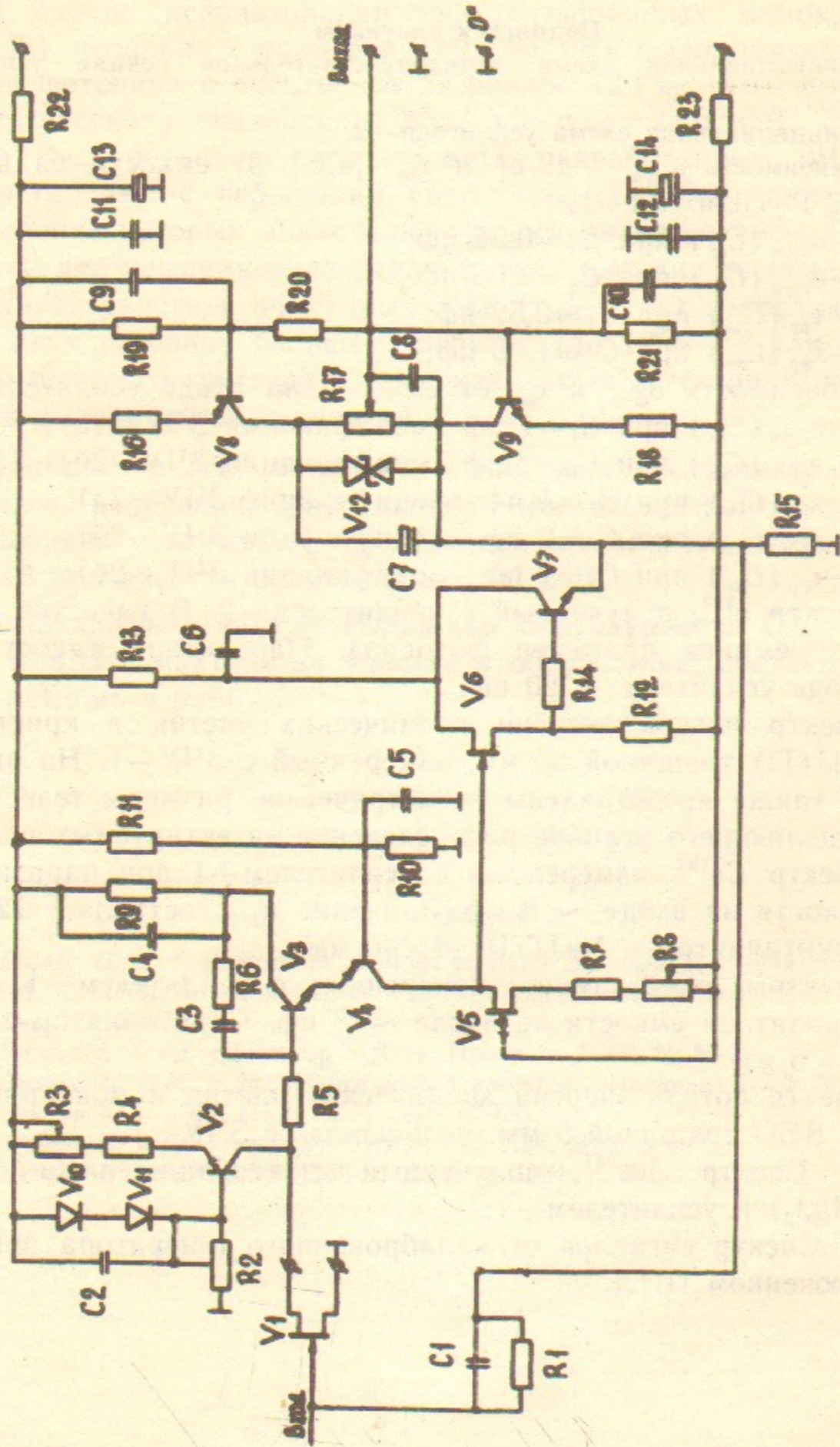


РИС.1

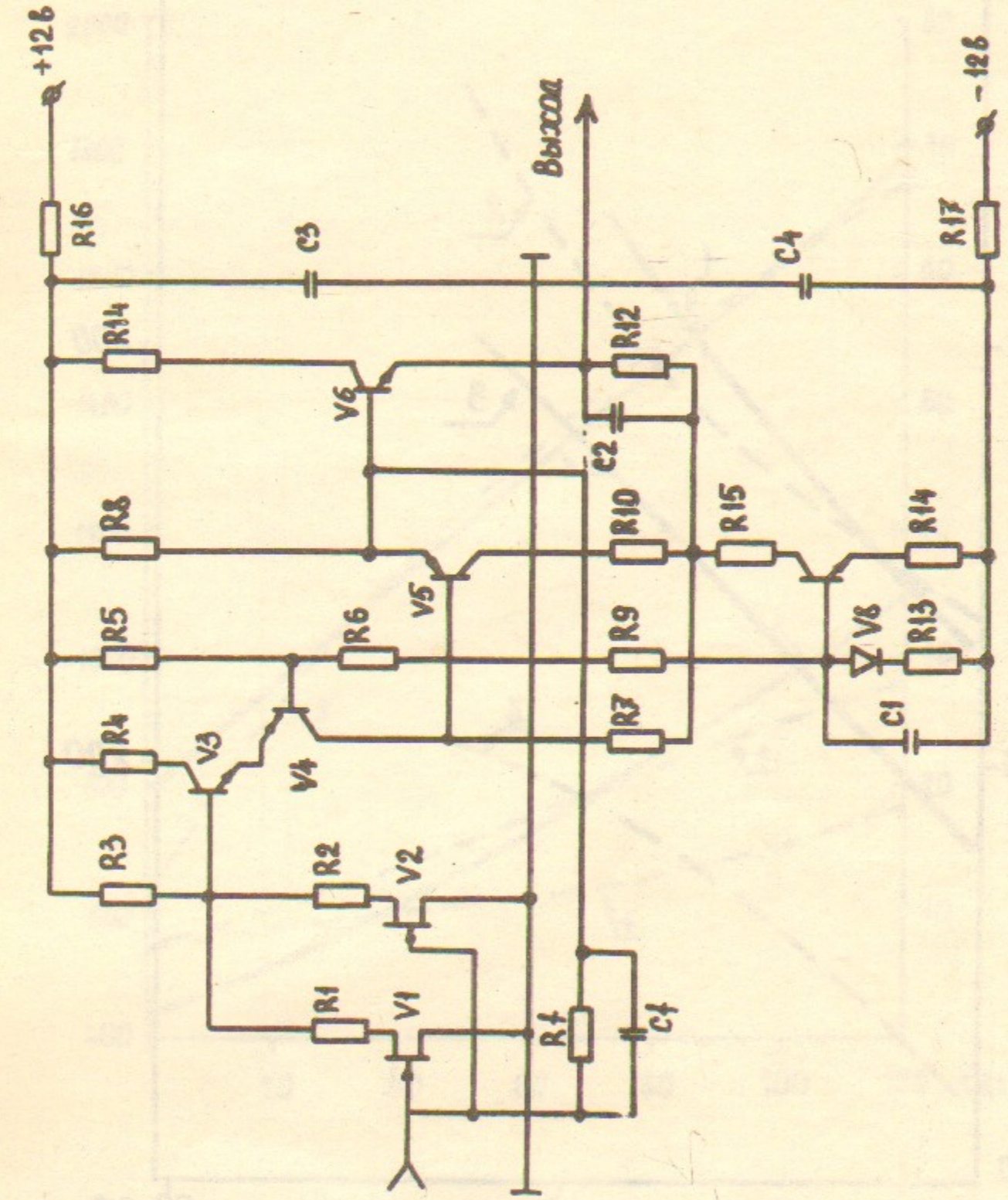


РИС.2

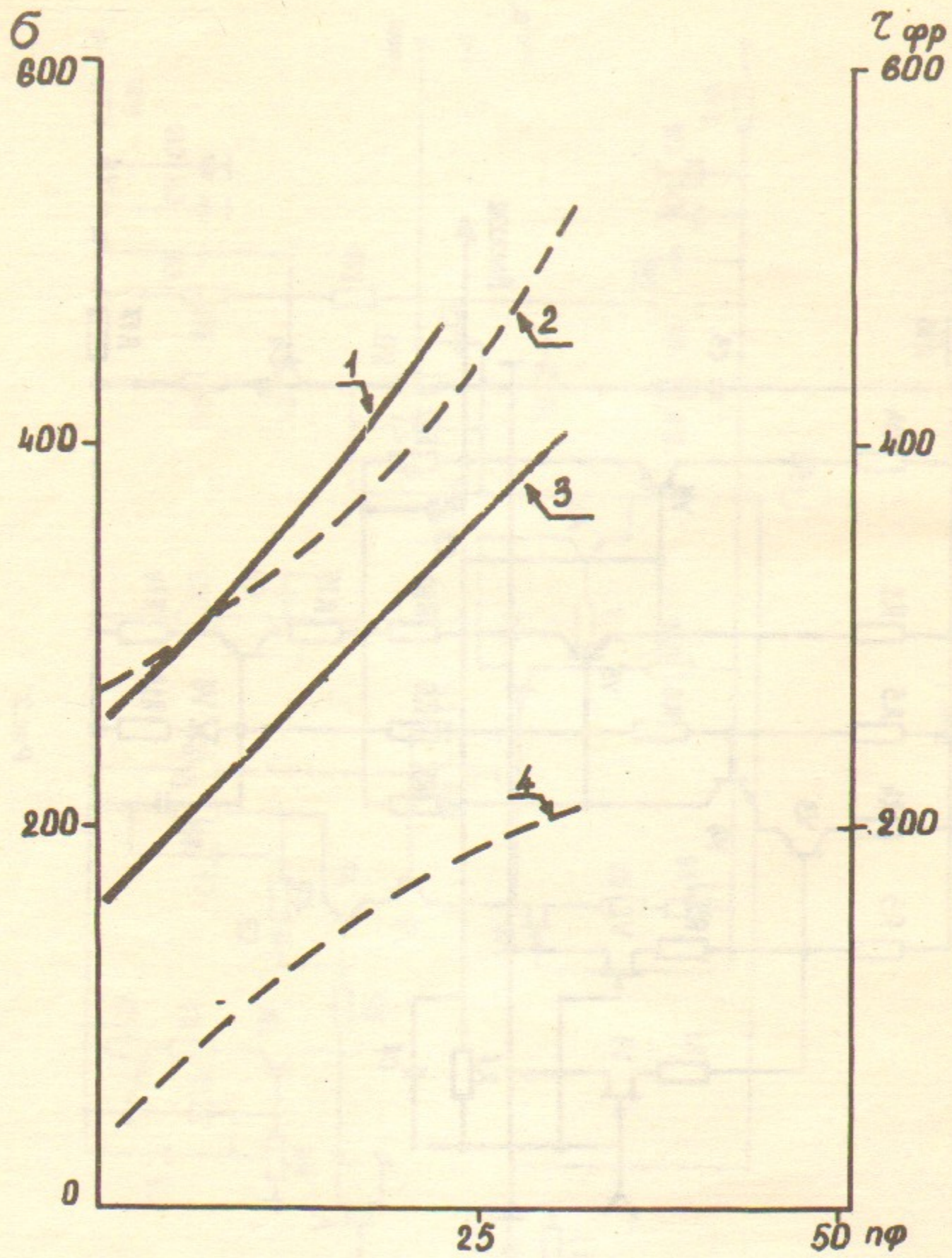


Рис.3

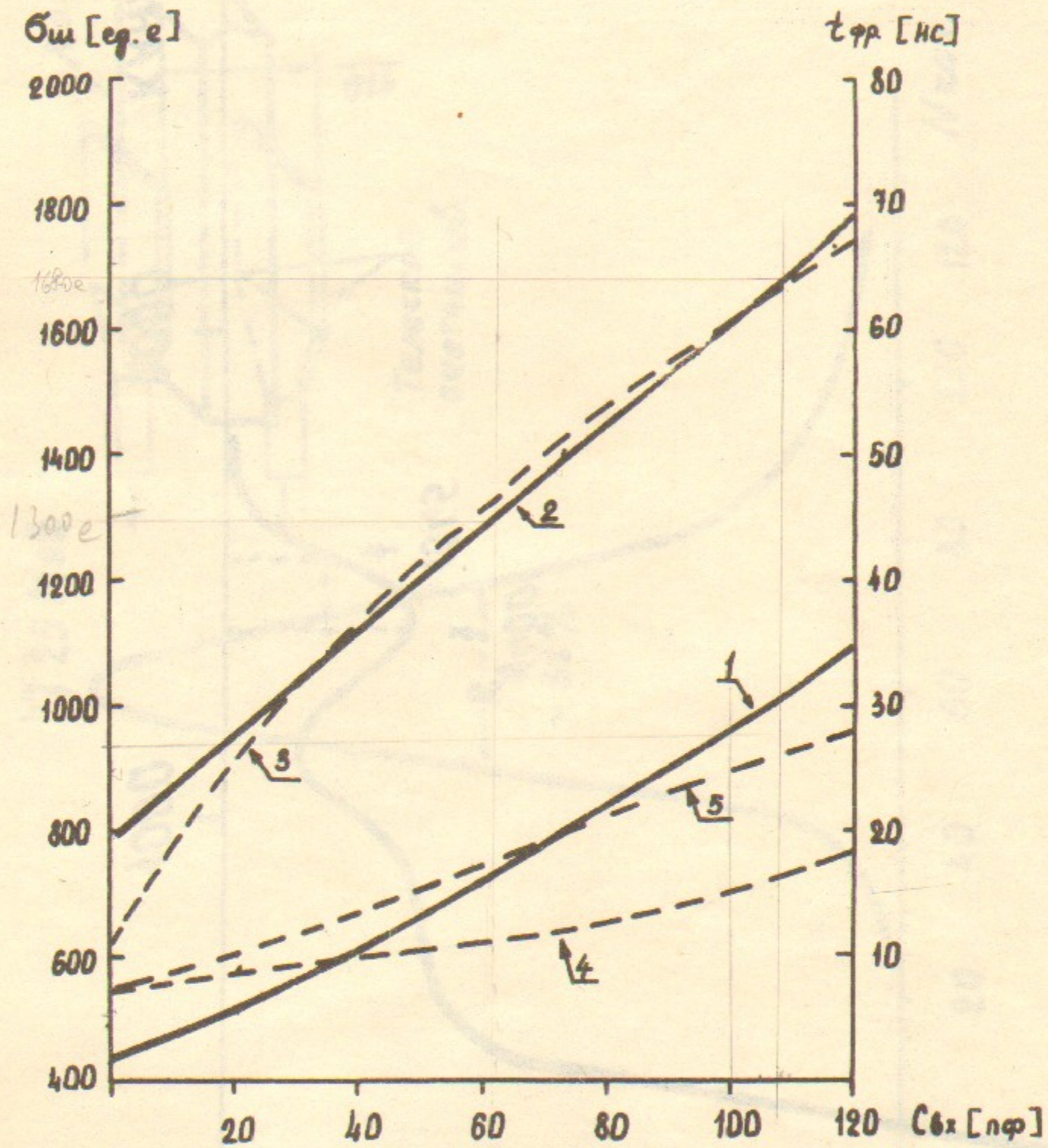


Рис.4

1680e · 15.6  
15.6  
8

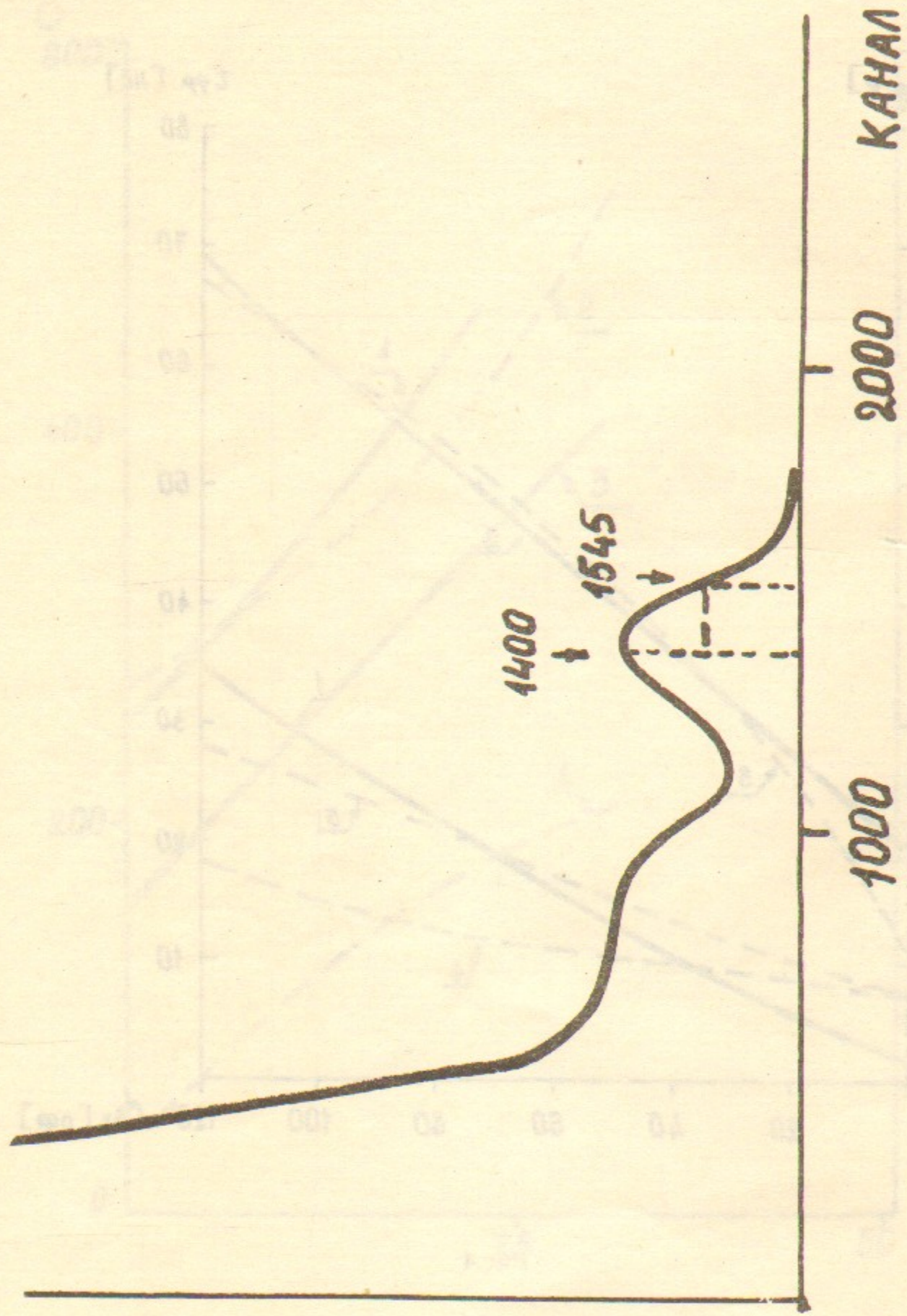


Рис.5

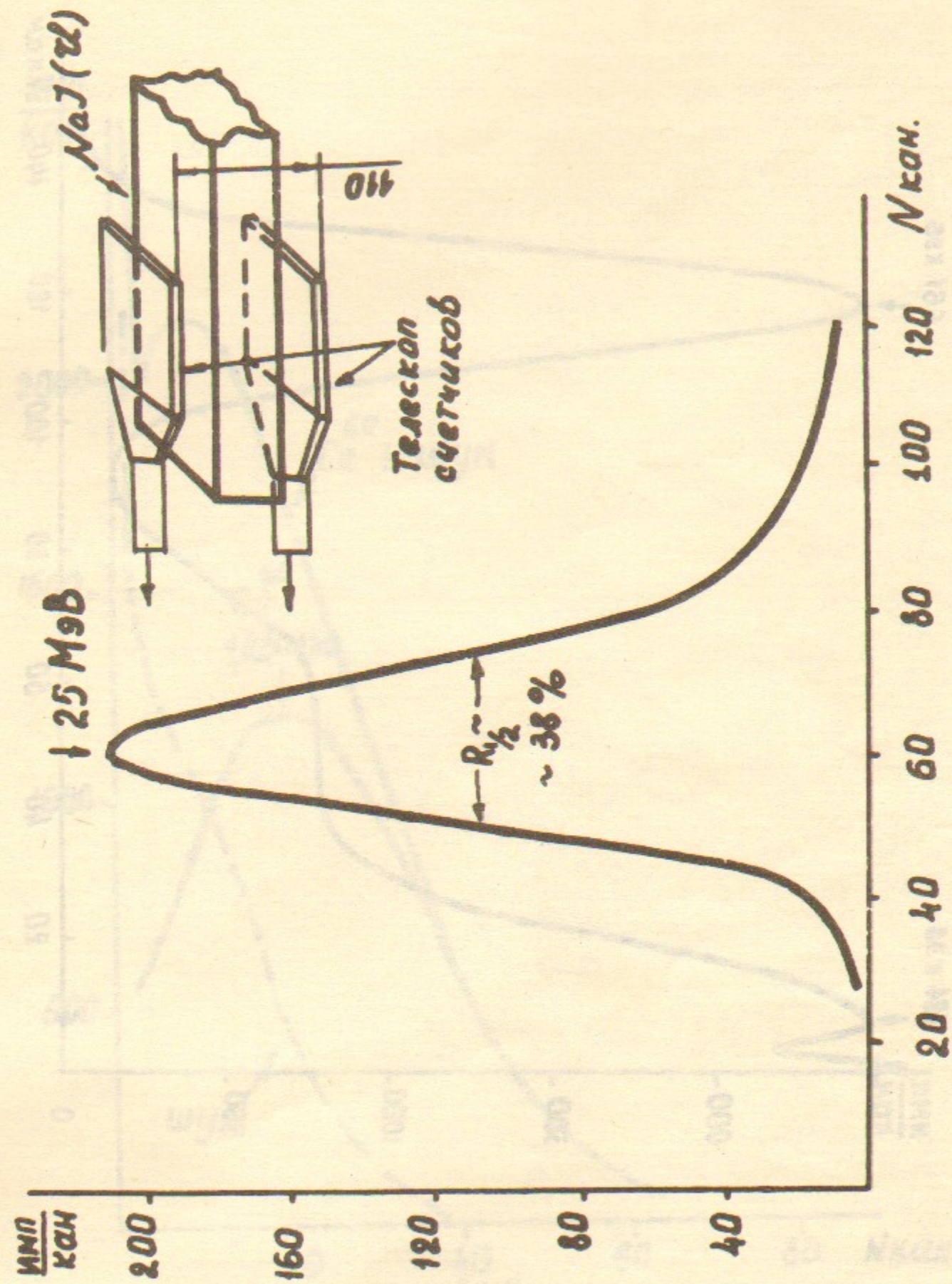


Рис.6



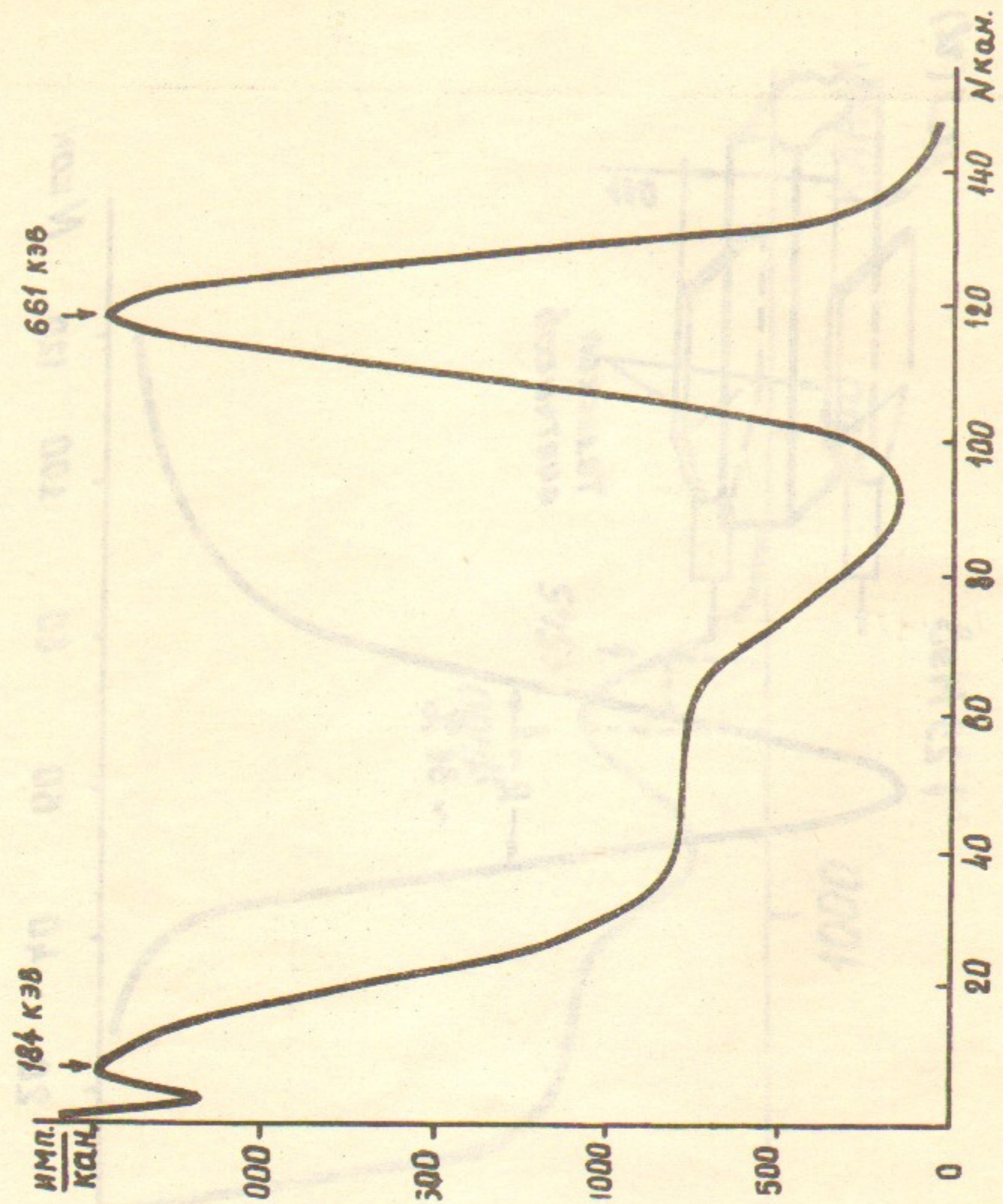


Рис.7

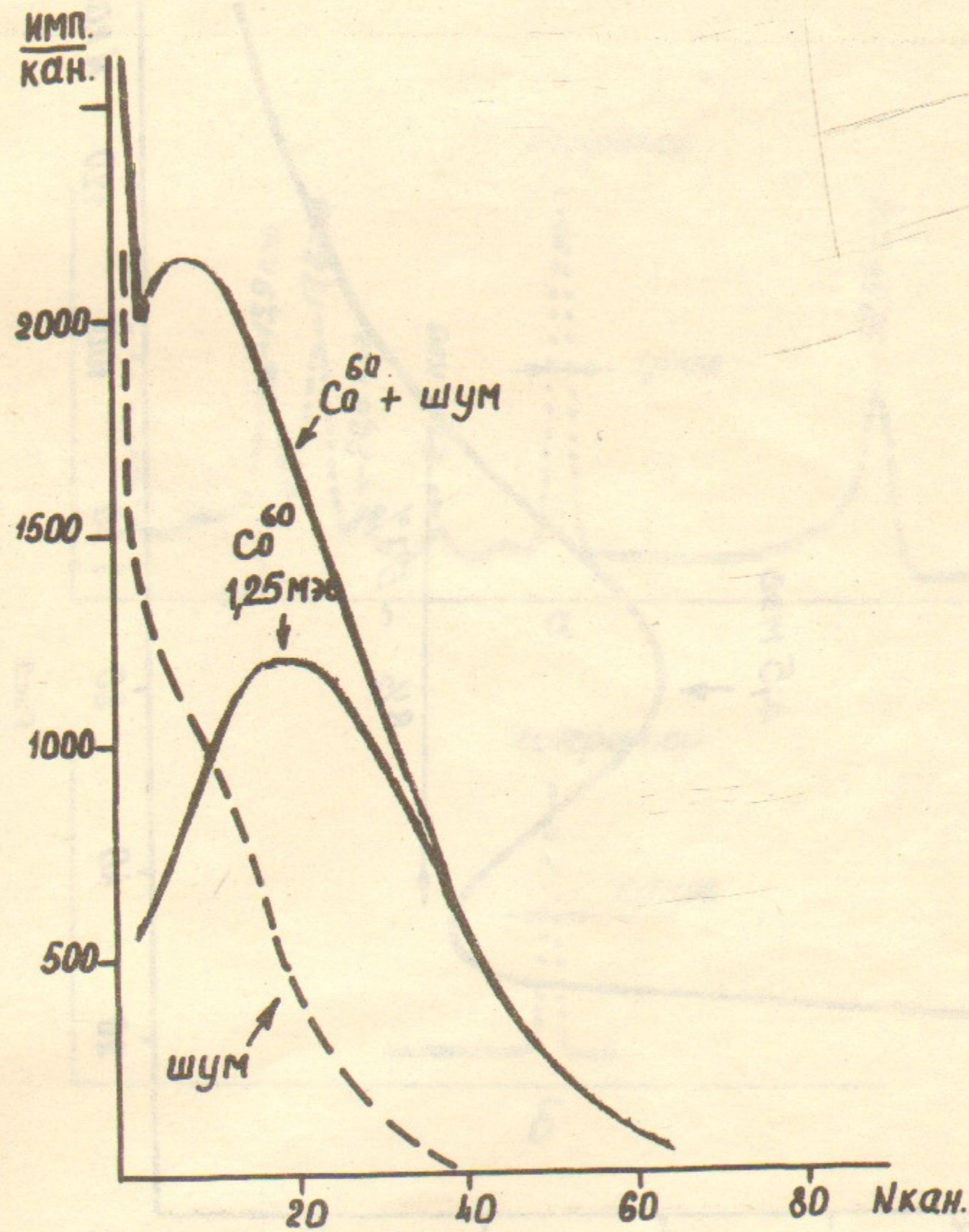


Рис.8

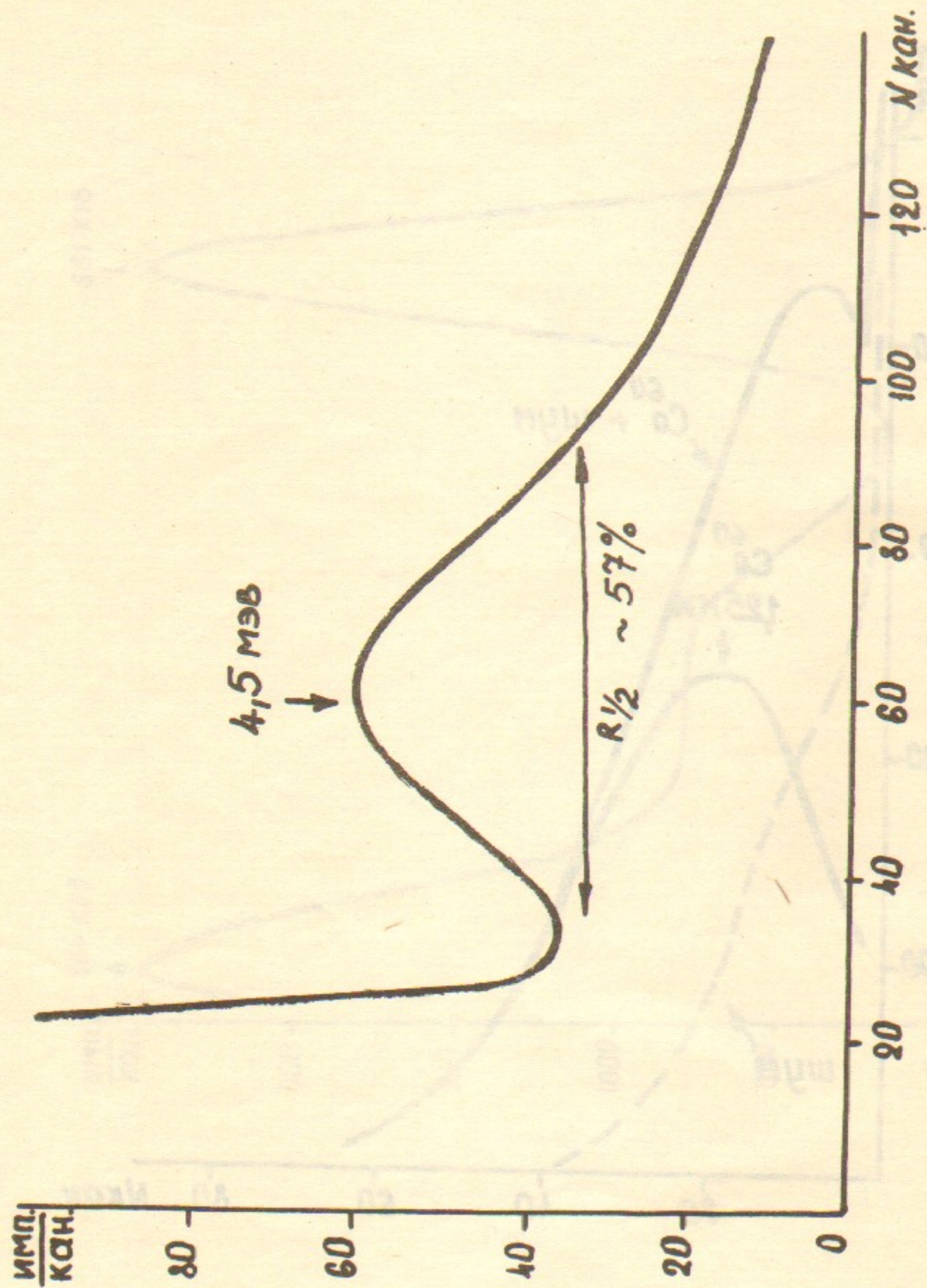


Рис.9

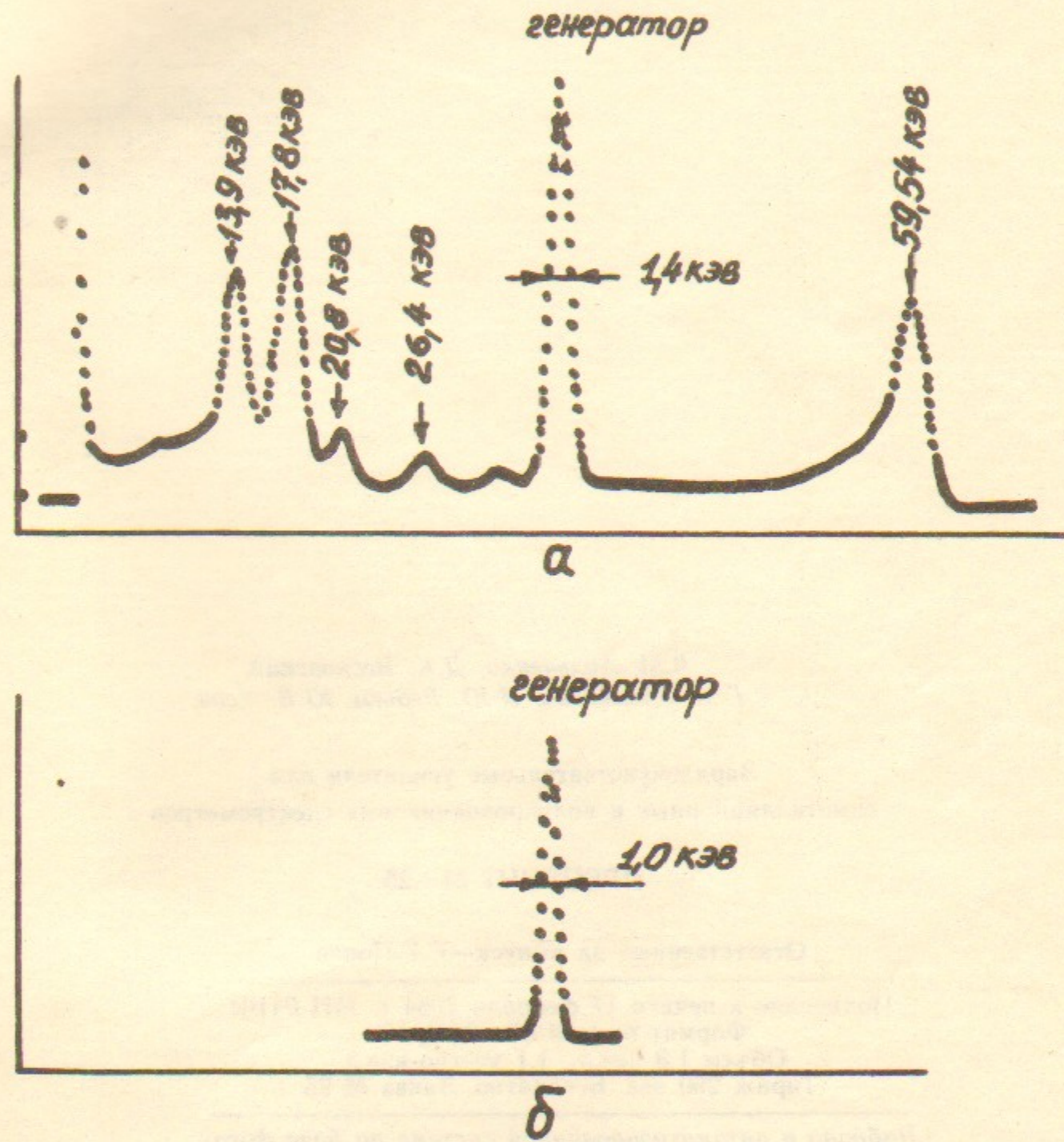



Рис.10



*В.М. Аульченко, Д.К. Весновский,  
Г.М. Казакевич, И.Ю. Редько, Ю.В. Усов.*

Зарядочувствительные усилители для  
сцинтилляционных и полупроводниковых спектрометров

ПРЕПРИНТ 84—25

Ответственный за выпуск—С.Г.Попов

Подписано к печати 17 февраля 1984 г. МН 04102

Формат бумаги 60×90 1/16.

Объем 1,3 печ.л., 1,1 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 25

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-  
наборного автомата ФА-1000 и ЭВМ «Электроника» и  
отпечатано на ротапринтере Института ядерной физики  
СО АН СССР,  
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11*