

A-535

ОБЪЕДИНЕННЫЙ
ИНСТИТУТ
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

9 - 2923



ЛАБОРАТОРИЯ НЕЙТРОННОЙ ФИЗИКИ

В.Н. Алферов, Г.М. Осетинский, И.А. Чепурченко

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ОИЯИ

1967.

9 - 2923

4922/2 49.

В.Н. Алферов, Г.М. Осетинский, И.А. Чепурченко

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ГЕНЕРАТОР ОИЯИ



1. В в е д е н и е

Электростатический генератор Ван-де-Граафа ОИЯИ построен на базе существовавшего инжектора протонов синхрофазотрона. В конструкцию инжектора внесены ряд изменений и добавлений, которые обеспечивают возможность проведения на нем исследований ядерных взаимодействий в интервале энергий 0,8–5 Мэв. Было признано целесообразным вместо существующей конструкции вакуумной системы использовать конструкцию вакуумной системы от ЭГ-2,5^{1/1}, а в качестве ионопровода – ионопровод от электростатического генератора с перезарядкой типа ЭП-10, магнитный анализатор которого отклоняет пучок на 90° в двух противоположных направлениях. На концах ионопровода установлены раздаточные магнитные анализаторы (магнит СП-10А) с тремя ионопроводами, расположенными под углом 0, +30 и -30°.

В дальнейшем в связи с новыми экспериментальными задачами в существующий проект был внесен ряд изменений и добавлений, которые расширили экспериментальные возможности ускорителя и улучшили его некоторые эксплуатационные характеристики. К ним следует отнести:

- а) реконструкцию вакуумной системы;
- б) разработку методики ускорения He^3 ;
- в) создание системы стабилизации магнитного поля магнита СП-88;
- г) упрощения и добавления в существующей системе электрооборудования;
- д) разработку системы получения азота из жидкой фазы, создание системы осушки газа, обеспечивающей влажность газа в котле не хуже 0,2–0,5%.

2. Размещение установки

Электростатический генератор ЭГ-5-1Н расположен в здании Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ. План расположения генератора представлен на рис. 1. Вакуумная система, магнитный анализатор, фокусирующие линзы размещены в помещении № 1. Участки ионопровода через защитную стену проходят в мишенные № 1 и № 2. На концах ионопровода установлены раздаточные магниты СП-10А, обеспечивающие отклонение пучка влево и направо на 30° от основного направления пучка.

Основание ЭГ-5-1Н (плита), колонна, транспортер зарядов и т.д. расположены на отметке 6^{10} (размер помещения $8 \times 10 \times 11$ м). Котел ЭГ-5-1Н при снятии его поднимается через проем на третий этаж (отметка 17^{40}). В этом же помещении хранится площадка обслуживания ЭГ, которая при проведении профилактических и ремонтных работ опускается на отметку 6^{10} .

3. Вакуумная система

Схема вакуумной системы представлена на рис. 2. Вакуумный объем откачивается двумя вакуумными агрегатами ВА-2-1Р. Эти агрегаты обеспечивают вакуум: на выходе из трубки $\sim 1 \div 2 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст., на левом и правом ионопроводе $\sim 8 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст., на камерах магнитов СП-10А $\sim 3 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст.

По существовавшему проекту питание азотом ловушек вакуумных агрегатов осуществлялось от стандартных дюаров $V = 15$ литров. Подача азота из дюара в ловушки производилась давлением, создаваемым в дюаре нагреванием азота электрическим нагревателем. Такой метод подачи азота в ловушку создает ряд эксплуатационных трудностей. Основные из них:

- 1) необходима частая смена дюаров, так как один дюар обеспечивает работу агрегата в течение $\approx 2,5$ час;
- 2) при смене дюаров создаются трудности, связанные с уплотнением ввода трубопровода в ловушку, поскольку уплотнения замерзают;
- 3) смена дюаров приводит к остановке ускорителя на 15-20 мин, поскольку насосы находятся в поле излучения от ЭГ-5. Как правило, смена дюаров связана с ухудшением вакуума из-за малой емкости азотной ловушки насоса (объем ловушки ~ 350 см³).

Предложенная нами новая система подачи азота в ловушки насосов в значительной степени улучшает эксплуатационные качества ускорителя. Она состоит из:

- а) дюзара емкостью 35 литров, присоединенного к ловушке ртутного насоса;
- б) 2 дюаров емкостью 150 литров.

Из этих дюаров осуществляется наполнение дюаров $V = 35$ литров;

в) системы азотопровода, по которому азот поступает к дюарам от танка азота.

Конструкция дюара и способ присоединения его к ловушке насоса показаны на рис. 3. Дюар изготовлен из листовой нержавеющей стали толщиной 2 мм. Присоединение дюара к патрубку "Д" ловушки насоса осуществляется сваркой патрубка "Д" и трубки "В" в районе вакуумного уплотнения (7). Способ присоединения вакуумного объема дюара к вакуумному объему насоса показан на рис. 3.

При заливке в дюар азот самотеком по трубе "А" (диаметр трубки 6 мм) попадает в объем ловушки насоса. Испарающийся в ловушке азот имеет возможность выйти наружу по трубке "В", конец которой заканчивается у верхней стенки дюара. Такая конструкция обеспечивает непрерывный поток азота к ловушке насоса в течение 12-14 часов.

Система подачи азота от танка к дюарам емкостью 35 литров состоит из: азотопровода; двух дюаров $V = 150$ литров, узла ввода, обеспечивающего ввод азота и перегонку его из дюара 150 литров в дюары 35 литров.

Принципиальная схема подачи азота к ловушкам представлена на рис. 4. Как видно из схемы, азот из танка (СТТ-1300), находящегося вне помещения, по трубке диаметром 15 мм направляется в один из двух (или в оба одновременно) дюаров $V = 150$ литров. Общая длина азотопровода 30 метров. Для уменьшения потерь азота трубка окружена пенопластовым тепловым изолятором с толщиной стенок ≈ 50 мм.

Перекачка азота из дюаров $V = 150$ литров в дюары емкостью 35 л осуществляется давлением паров, создаваемых над азотом при его нагревании. Для перекачки азота в дюары необходимо (см. рис. 4) закрыть вентиль (12), закрыть вентиль свободного парения (13), открыть вентиль (14) и включить печь нагревателя. Мощность печи подбирается экспериментально из расчета обеспечения

наполнения дюзара емкостью 35 л азотом в течение 15-20 минут. Она составляет 40 ватт.

По окончании напуска нагреватель отключается, закрывается вентиль (14) и открывается вентиль (13), обеспечивающий выход паров азота наружу. Из соображений безопасности эксплуатации каждый узел ввода снабжен манометром и предохранительным клапаном. Все указанные вентиля имеют конструкцию, обеспечивающую нормальную работу вращающихся деталей при температуре жидкого азота.

4. Формирование пучка ионов

§ 1. Ускорительная трубка, имеет общую длину 4,15 метра, шаг фарфоровых изоляторов - 25 мм, диаметр изоляторов 325 x 275 мм. Электроды трубки - плоские с диаметром канала 30 мм. Общее число электродов - 160. На трубке установлен высокочастотный ионный источник. Из-за отсутствия данных по вакуумной проходимости трубки нами произведено измерение перепада давления вдоль ее длины. Измерение производилось в верхней части трубки и на выходе из нее на расстоянии 2 метра от ее конца. При измерениях в верхней части прибор для измерения устанавливался на месте колбы ионного источника и удаленный вытягивающий электрод. Давление в верхней части создавалось через коммуникации, ведущие к ионному источнику. Результаты измерений приведены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Давление в верхней части трубки мм рт. ст.	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$5,4 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
Давление на выходе из трубки мм рт. ст.	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$5,0 \cdot 10^{-6}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$

Полученные данные определяют разумные пределы возможного изменения давления на выходе из трубки. Как это видно из таблицы, давление 10^{-5} мм рт.столба

в верхней части трубки может быть получено лишь при условии, что давление на выходе из трубки будет изменяться на величину не более чем $0,6 \cdot 10^{-6}$ мм рт. ст. Это соответствует расходу газа $\sim 3 \text{ см}^2/\text{час}$. При больших натеканиях давление в начале трубки изменится на большую величину и исключается возможность получения хорошо сфокусированного пучка. Пучок неустойчив и окружен ореолом рассеянных частиц.

Испытание ускорительной трубки без пучка, а затем с пучком показало, что для получения устойчивого режима ее работы при энергиях свыше 4 Мэв требуется длительная тренировка. Так, например, возможность сравнительно быстрого подъема напряжения (≈ 2 часов) до 3 Мэв появилась лишь после 300 часов ее работы. В течение всего указанного времени наблюдались одиночные пробои, которые пропали после 600-часовой тренировки. Более высокое напряжение без пробоев (до 4,0 Мэв) при общем токе пучка 30 микроампер было достигнуто после 700-800 часов работы ЭГ. Максимальное напряжение, достигнутое на описываемой трубке, при токе пучка 25-30 мка составляло 4,2 Мэв.

Интересно отметить, что нами не наблюдалось сколь-нибудь заметной разницы в числе пробоев, возникавших при подходе к максимальному напряжению в случае работы трубки с пучком и без пучка. Последнее указывает на малую роль в этом эффекте процессов, происходящих в канале трубки. Выяснение истинной причины этих пробоев требует дальнейших исследований.

Испытания показали, что при получении токов 30-50 мка при напряжениях свыше 2 Мэв возникает значительный разбаланс токов, ограничивающий дальнейший подъем напряжений при этих токах. Этот разбаланс возникает в основном из-за большой расходимости пучка, выходящего из ионного источника, в результате которого на электроды трубки попадает значительная часть заряженной и нейтральной компоненты пучка. Последнее приводит к возрастанию тока вторичных электронов, что и вызывает разбаланс токов ЭГ. В таблице II представлена типичная таблица токового режима ЭГ при различных его энергиях.

Наличие значительного разбаланса токов потребовало создания новой системы формирования пучка на входе в ускорительную трубку, которая должна была свести к минимуму возможность попадания на электроды трубки нейтральной и ионной компоненты пучка. Такого рода система была сконструирована сотрудником Центрального института физических исследований (Будапешт) Л.Варга.

Т а б л и ц а II

Е Мэв	Г зарядки ленты мка	Г делителя мка	Г стрелы мка	Г пучка мка	ΔI (разбаланс токов) мка
2,4	180	52	75	28	25
2,8	180	58	50	20	52
3,2	220	68	60	24	68
3,5	245	72	75	25	73
3,6	245	75	85	20	65

В существующую конструкцию ионного источника введены две диафрагмы (см. рис. 5). Первая из них с отверстием 2 мм установлена на входе одиночной фокусирующей линзы. Вторая с отверстием 4 мм – на выходе из одиночной линзы. Изображение, полученное на выходе из одиночной линзы, с помощью дополнительной иммерсионной линзы формируется в пучок с малой расходимостью.

Напряжение на электрод иммерсионной линзы подается с первого сопротивления делителя трубки. Расчет проводился по методу Елкинда^{/2/}. Схема ионного источника и конструкция дополнительной линзы с указанием размеров представлена на рис. 5.

По сравнению с проектом изменена схема подключения напряжения к электродам источника и одиночной линзы. Как видно на рис. 5, крайние электроды одиночной линзы соединены с плитой кондуктора. На средний электрод подается отрицательный потенциал 0–12 кв. Соответственно на вытягивающий электрод – положительный потенциал 0–1,5 киловольт. Последнее потребовало изоляции трубки, подающей газ в ионный источник. Эта изоляция осуществляется через стеклянную трубку с внутренним диаметром 0,5 мм, длиной 100 мм.

Такое подключение крайних электродов линзы в значительной мере защищает элементы ионного источника (источника питания, изоляционные кольца) от перенапряжений, возникающих при пробоях в ускорительной трубке.

Использование новой системы фокусировки позволило значительно увеличить ток ускоренных ионов при высоких напряжениях, поскольку разбаланс токов значительно уменьшился. В таблице III представлены записи, иллюстрирующие это заключение.

Т а б л и ц а III.

Е Мэв	I зарядки ленты мкА	I делителя мкА	I стрелы мкА	I пучка мкА	ΔI (разбаланс токов) мкА
2,5	II0	55	25	30	0
2,7	I50	60	70	20	0
3,1	I95	65	90	40	0
3,2	I90	65	60	60	5
3,6	2I0	70	65	40	5 —

§ 2. Ускорение He^3 и He^4 на ЭГ-5

Ускорение He^3 на электростатическом генераторе имеет некоторые особенности по сравнению с ускорением изотопов водорода. К ним следует отнести:

1. Необходимость создания системы улавливания и очистки He^3 , направляемого в ионный источник, с тем, чтобы уловленный газ без значительных потерь вновь мог бы быть использован для ускорения.

2. Необходимость создания конструкции плавного напуска газа в разрядную камеру ионного источника, поскольку применяющиеся при ускорении изотопов водорода палладиевые или никелевые натекатели негодны.

Рассмотрим подробней эти особенности.

1. Система подачи газа в ионный источник ЭГ-Б.

Как известно, при подаче в ионный источник электростатического генератора изотопов гелия в качестве запорного и регулирующего элемента для изменения потоков газа используют игольчатые вентили или тепловые натекатели, в которых используется свойство различного расширения металлов при нагреве. При работе с особо ценными газами (He^3 , C^{12} , O^{18} и т.д.) закрывать баллон с газом, находящийся в кондукторе ЭГ, только игольчатым вентилям вряд ли оправдано в период, когда генератор не работает. Тепловые натекатели также имеют ряд недостатков. Основные из них - большие трудности в изготовлении, малая пропускная способность (до $10 \text{ см}^3/\text{час}$) и, главное, большая инерционность, что особенно ощутимо при регулировках токового режима ЭГ. С учетом вышеизложенного сконструирована иная схема подачи газа в ионный источник, состоящая из электромагнитного клапана, вмонтированного в баллон с газом, и игольчатого вентиля. При включении ЭГ электромагнитный клапан открывается, и газ подается к игольчатому вентилю, с помощью которого регулируется величина потока газа.

Приведем описание конструкции баллона с электромагнитным клапаном. Конструкция представлена на рис. 6. Как видно из рисунка, клапан расположен на фланце баллона. К этому же фланцу прикреплены два штуцера - для манометра и вентиля наполнения баллона (последний на чертеже не показан). В нерабочем состоянии ток в катушке соленоида отсутствует, пружина (3) прижимает клапан (2), перекрывая тем самым выходное отверстие. При включении тока образующееся магнитное поле соленоида (число витков 4000) подтягивает якорь 7, который, толкая шток клапана (2), открывает выходное отверстие. Для срабатывания клапана потребляется ток 0,4 а при расходе мощности 40 ватт. В дальнейшем величина этого тока может быть уменьшена до 40 ма .

Как включение тока в катушки клапана, так и уменьшение его осуществляется дистанционно вращением автотрансформатора, питающего схему выпрямителя. Следует указать еще на одну возможность включения электромагнитного клапана - автоматическую, которая в течение 1,5 лет успешно используется на ЭГ-2 ОИЯИ. При включении мотора ленты электростатического генератора начинает вращаться генератор ГСМ-1А, питающий выпрямитель электромагнитного клапана.

Скорость вращения, а, следовательно, и выпрямленное напряжение нарастают постепенно. Параметры схемы подобраны таким образом, что сначала срабатывает электромагнитный клапан, а затем, когда напряжение ГСМ достигает номинала, срабатывает реле РС. Нормально-замкнутые контакты этого реле разомкнутся и включают добавочное сопротивление в цепи питания электромагнитного клапана (см. рис. 7). Величина добавочного сопротивления выбрана так, чтобы величина тока после включения сопротивления достигла 30–40 ма.

Конструкция игольчатого вентиля ясна из рисунка 8. По сравнению с описанной в литературе ^{17/}, введено дополнительное уплотнение, исключающее прорыв газа при работе вентиля в атмосфере повышенного давления (до 20 атм.). Ось вентиля (8) через редуктор с коэффициентом передачи 1 : 3 связана со штангой, управляемой с пульта.

Газ He^3 , направляемый в ионный источник, находится в смеси с He^4 , где компонента He^3 составляет 25–30%. Выбор такого соотношения связан исключительно с задачей получения максимально необходимого для данной серии физических экспериментов тока пучка при минимальном расходе He^3 . При наличии больших количеств He^3 это ограничение, естественно, может быть снято. В таблице IV представлены данные процентного состава пучка для одного из режимов работы ЭГ. Ток пучка измерялся цилиндром Фарадея диаметром 10 мм, установленным на расстоянии 8 метров за магнитным анализатором.

Т а б л и ц а IV

E	He^3	He^4	He^3	He^4	He^4/H
2 МэВ	1,5 мка	0,05 мка	5,5 мка	24 мка	0,4 мка

Подробные исследования зависимости процентного состава пучка от процентного состава смеси $He^3 - He^4$ на ЭГ-5 не производились.

В систему управления ионным источником введен дополнительный элемент - изменение напряженности поперечного магнитного поля. Известно, что управление работой ионного источника осуществляется как изменением натекания газа в колбу источника, так и регулировкой вытягивающего напряжения. Частота

колебаний генератора высокой частоты, напряженность поперечного магнитного поля остаются постоянными. Регулируя натекание газа и вытягивающее напряжение, можно при фиксированном магнитном поле получить максимальную интенсивность разряда в колбе.

Опыт эксплуатации ионных источников ОИЯИ (ЭГ-2, ЭГ-5) показал, что наличие фиксированного магнитного поля создаст определенные затруднения при поддержании в течение длительного периода эксплуатации оптимального режима его работы. Известно, что режим работы ионного источника весьма критичен к давлению газа в разрядной колбе. При всяком изменении давления в колбе происходит как изменение тока вытягиваемых ионов, так и изменение процентного состава атомарной компоненты пучка. В этой ситуации подбор первоначального режима источника удобнее всего осуществить введением дополнительной регулировки – регулировки напряженности поперечного магнитного поля магнита источника. Введение этого элемента обеспечивает плавную регулировку интенсивности разряда в колбе, что ускоряет и облегчает настройку источника ионов на оптимальный режим его работы. Для осуществления такой регулировки постоянный магнит ионного источника был заменен электромагнитом. Электромагнит состоит из железного сердечника прямоугольной формы (12) x 12 мм) и катушки с числом витков – 4000. Максимально потребляемая мощность 15 ватт. Напряжение к обмоткам электромагнита подается от выпрямителя, находящегося в высоковольтном кондукторе генератора, и управляется дистанционно с пульта управления. Это потребовало введения дополнительной сельсинной пары.

2. Система улавливания He^3 на ЭГ-5-1Н.

Система улавливания He^3 устанавливается на конце вакуум-провода, соединяющего выходные патрубки диффузионных насосов вакуумной системы ЭГ-5 (см. рис. 2). На рисунке 9 представлена блок-схема системы. Как можно проследить по схеме, выход насосов высокого вакуума подключен к входу ртутного бустерного насоса ДРН-50, выход которого в свою очередь подключен к ловушке с активированным углем, охлаждаемой жидким азотом. В рабочем режиме откачиваемая насосом ДРН-50 смесь газов попадает в ловушку, которая поглощает изотопы водорода и примеси натечек (O_2, N_2), в то время как смесь He^3 и He^4 остается непоглощенной. При увеличении давления смеси He^3 и He^4 выше допустимого (не более 16-17 мм рт. ст.) эта смесь газов

направляется в баллон-ресивер №1, откуда она может быть перекачана в ловушку "В". При перекачке смеси He^3 и He^4 из баллона №1 в ловушку "В" происходит дополнительная очистка его от возможных примесей (воздуха, CO_2 и водорода), не поглощенных в ловушке "А" или вновь возникших при перекачке последней. Эта очистка осуществляется дополнительным пропуском газа через ловушку с активированным углем, охлаждаемым жидким азотом. Следует отметить, что некоторые авторы^{/8/} применяют дополнительную очистку He^3 на закиси меди (Cu_2O), нагретой до температуры $500^\circ C$, которая поглощает водород, не поглощенный в угле. В первоначальной конструкции системы улавливания эта особенность очистки была учтена. В последующем опыт эксплуатации не подтвердил большой необходимости в такого рода очистке, и она не производилась.

Приведем некоторые элементы конструкции. Ловушка имеет объем 110 см^3 и содержит 15 граммов активированного угля. Для вакуумной системы ЭГ-5-1 при натекании газа в источник $2-3\text{ см}^3/\text{час}$ предельно допустимое противодавление в указанном объеме создается в течение 1,5-2,0 часов его работы. Емкость баллона №1 - 3 литра. Перекачка газа из баллона №1 в ловушку "В" осуществляется с помощью насоса, сконструированного на базе форвакуумного насоса ВН-404. (Откачивающая система насоса ВН-404 помещена в герметизированный корпус. При изготовлении корпуса обращено внимание на сведение "мертвых" объемов и выходной части насоса к минимуму).

Для предохранения системы улавливания от проникновения в нее ртутных паров между насосом ДРН-50 и системой улавливания устанавливается ловушка, охлаждаемая жидким азотом.

Очистка ловушки "А" от поглощенных в ней примесей осуществляется через 40-48 часов работы нагреванием ее с последующей откачкой выделяющихся газов форвакуумным насосом. Система снабжена рядом коммуникаций и вентилях, обеспечивающих: а) откачку на форвакуум отдельных участков; б) наполнение уловленного и очищенного газа в баллон ЭГ-5. Для этой цели баллон подключается к вентилю №7. Открыв вентиль 5, 7, перепускаем газ из ловушки "В" в баллон ЭГ-5. Оставшийся в коммуникациях газ сбрасываем в баллон №3 ($V=3$ литра).

Система имеет 2 мановакуумметра (0-760 мм рт.ст.) и один микроманометр (тип "ОМ") с пределом шкалы 0-20 мм рт.ст. Все вентили системы выполнены с уплотнением "металл - по металлу". Система улавливания снабжена

ртутным компрессором, с помощью которого смесь газов из баллона ресивера может быть перекачана в любой баллон, присоединяемый к вентилям № 10 и № 11. Описываемая система эксплуатировалась к моменту написания статьи 1600 часов. В баллоне ЭГ из соображения сохранности газа хранится не более 500–800 см³ смеси He³ и He⁴. Результаты улавливания и потерь газа за последние 300 часов работы представлены в таблице VI.

Т а б л и ц а VI.

Первоначальное количество смеси в баллоне	Число циклов улавливания	Число часов работы ЭГ-5 на данной смеси	Оставшееся количество смеси в баллоне ЭГ-5	Потери в см ³	Потери в %
520 см ³	5	300	450 см ³	70 см ³	13,5

Как видно из таблицы, при улавливании и очистке общие потери газа за все время работы составляют менее 15%. Следует заметить, что потери при одном цикле улавливания зависят от продолжительности непрерывного режима работы ЭГ. При непрерывной круглосуточной работе в течение нескольких дней (≈60–70 часов) потери газа не превышают 5–10%. Наибольшие потери возникают при запуске ЭГ после длительного перерыва. В этом случае необходима откачка на форвакуум всей вакуумной системы, и часть смеси газов He³ и He⁴, не улавливаемая ранее, откачивается в атмосферу.

5. Коррекция пучка на выходе из ускорительной трубки

Необходимость введения коррекции положения пучка на входе в магнитный анализатор связана с тем, что довольно часто при смене ионного источника, изменении режима его работы, изменении режима формирования пучка на входе в ускорительную трубку наблюдается смещение пучка на выходе из ускорительной трубки. Иногда эти смещения появляются при увеличении напряжения ЭГ из-за плохой юстировки трубки при изготовлении. Эти недостатки работы ЭГ особенно ощутимы при проведении исследований, планируемых в ОИЯИ, поскольку

они связаны в основном с использованием коллиматоров диаметром 2–4 мм, расположенных на расстоянии 10–12 метров от магнитного анализатора. Незначительное смещение пучка на входе (≈ 2 мм) приводит к полному смещению пучка с мишени.

Проблема коррекции пучка не нова, и в различных лабораториях ее решение осуществляется различными путями^{/3,4/}. Большой интерес представляет корректор пучка Лаборатории тандем-генератора (Копенгаген)^{/4/}, где для корректировки использовался асимметризованный магнитный квадрупольный дублет. Эта система обладает той особенностью, что помимо корректировки положения пучка, с ее помощью, используя фокусирующие свойства магнита магнитного анализатора ЭГ, можно получить увеличение интенсивности пучка, проводимого через этот анализатор. В отличие от предыдущих работ нами совместно с Э. Колтаи и Д. Сабо^{/5/} разработан корректор с использованием асимметризованных квадрупольных электростатических линз^{/6/}. Схема расположения корректора представлена на рис. 10, траектория пучка частиц – на рис. 11. Как видно из рисунка, пучок ионов, пройдя ускорительную трубку, фокусируется квадрупольным дублетом (на рис. 11 для наглядности представлены траектории сфокусированного пучка в двух взаимноперпендикулярных плоскостях). Для фокусировки потенциалы электродов подбираются таким образом, чтобы первое U_1 (на рис. плоскость " + - ") – астигматическое изображение ускоренного пучка – попадало на входную щель, установленную перед магнитным анализатором. Второе астигматическое изображение U_2 (на рис.11 плоскость " - + ") попадает на выходную щель так, как это показано на рис.11. Так как секторное магнитное поле магнитного анализатора отображает в радиальной плоскости предметную щель на плоскость выходной щели магнитного анализатора, результирующее действие сложной системы обеспечивает двойную фокусировку. Это и приводит, как указывалось, к увеличению тока, проводимого через магнитный анализатор, так как, с одной стороны, квадрупольный дублет проводит через предметную щель большую часть пучка, добавляя в аксиальной плоскости магнита фокусирующее действие и предотвращая тем самым линейное расширение пучка в аксиальном направлении. Если пучок, выходящий из ускорительной трубки, отклонится от оптической оси, то с помощью асимметризации двух квадруполей можно восстановить необходимое положение и направление

пучка по отношению к входным щелям магнитного анализатора. Подробное описание системы корректора, конструкции и расчет его элементов приведены в работе /5/. В качестве иллюстрации возможностей асимметризации на рис. 12 представлено распределение потенциала поля одной из линз дублета для случая, когда асимметризация составляет 40%.

Приведем кратко описание некоторых элементов конструкции. Квадрупольный дублет состоит из 2-х отдельных квадрупольных линз, находящихся на расстоянии 100 мм друг от друга. Длина электродов каждой линзы $L = 560$ мм. Апертура линзы $2a = 30$ мм. Дублет размещен внутри трубки ионопровода между ускорительной трубкой и магнитным анализатором. Напряжение к электродам подается через проходные тефлоновые изоляторы. Дублет установлен на кронштейне, который с помощью кинематического механизма может смещаться (на $\pm 3 \pm 30$ мм) в любом направлении в плоскости, перпендикулярной пучку. Этот же механизм обеспечивает наклон всего дублета вокруг оси в пределах $\pm 3^\circ$. Такая возможность перемещения корректора необходима для первоначальной юстировки его относительно оптической оси системы, когда смещения пучка превышают корректирующие возможности корректора. Общий вид корректора представлен на рис. 13. Щелевые приборы (рис. 14), фиксирующие положение пучка на входе и выходе магнитного анализатора, устанавливаются на расстоянии фокусного расстояния анализирующего магнита ($R = 750$ мм). Каждый прибор состоит из двух пар взаимно-перпендикулярных щелей, изолированных друг от друга. Конструкция позволяет производить установку ширины щели без нарушения вакуума. Ширина щелей в плоскости " + - " (рис. 11) составляет 3,5 м. В плоскости " - + " - 10 мм. Ток каждой пластины щели измеряется микроамперметрами (8 штук, тип М-24). При хорошо отъюстированной системе величина тока каждой щели должна быть минимальной.

Питание электродов квадрупольного дублета осуществляется от четырех стандартных выпрямителей типа "Орех" (см. рис. 15) (напряжение 0-5 кв, стабильность 0,1%). Подача одной и той же величины напряжения различной полярности осуществляется от двух выпрямителей, управляемых от одного вариака. Асимметрия напряжения (δ) создается потенциометрами, установленными на одной оси. Они подключены так, чтобы при повороте их подавалась асимметрия различного знака. Потенциометр состоит из 22 сопротивлений КЛВ номинала

80 ком. Все элементы управления и измерения корректора размещены на пульте управления ЭГ-5-1Н. В таблице V представлены данные расчета корректора. Как показал опыт эксплуатации (с ноября 1965 г.), корректор обеспечивает смещение пучка в нужном направлении, в связи с чем при значительном изменении режима работы ионного источника или смене его отпала необходимость в юстировке всего ионопровода. Значительным достоинством корректора, как это и ожидалось, явилось увеличение интенсивности пучка, попадающего на мишень, по сравнению со случаем, когда все фокусирующие возможности ЭГ исчерпаны (фокусировка линзами за магнитным анализатором). В среднем увеличение интенсивности пучка составляет 20-40%.

6. Калибровка энергетической шкалы

Калибровка энергетической шкалы производилась по резонансным пикам реакции $F(p, \gamma)$ в 874 кэВ, $Al(p, \gamma)$ - 935 кэВ, 2489 кэВ, 2522 кэВ, а также по порогу вылета нейтронов реакции $Li(p, n)$ 1882 кэВ.

В задачу калибровки входило определение постоянной магнитного анализатора k , согласно формуле

$$k = \frac{F}{H^2},$$

знание которой позволяет построить таблицы зависимости энергии ЭГ от частоты волномера, используемого для измерения магнитного поля методом парамагнитного резонанса. Таблицы рассчитаны через интервал энергий в 20-50 кэВ.

Установка узких входных щелей на входе и выходе магнитного анализатора совместно с коллиматорами ($d = 2-4$ мм) перед мишенью позволяет воспроизводить заданную энергию ЭГ с погрешностью не хуже 0,1%. Одна из таких проверок производилась при измерении положения резонансного пика в 2801 кэВ реакции $S^{34}(p, \gamma) Cl^{35}$. Измерения, проведенные в разное время (интервал два месяца), показали, что ошибка в воспроизведении энергии не превышает 1-1,5кэВ. Данные градуировки представлены на рисунках 16, 17. На рисунке 16 приведен пример расчета стабильности по энергии, из которой видно, что она не превышает 0,1%.

На рис. 18 представлен типичный график для резонансного пика реакции $S^{34}(p, \gamma) Cl^{35}$, полученный на тонкой набивной мишени при токе пучка 8 микроампер.

В заключение приведем таблицу VI значений токов пучка, получаемых на ЭГ-5-1Н при устойчивом режиме его работы. Измерения проводились на цилиндре Фарадея с входным отверстием 6 мм, установленным на расстоянии 12 метров за магнитным анализатором.

Т а б л и ц а VI

Энергия Мэв	He ³ мка	H ⁺ мка
3,5	5	18-20

7. Система питания и управления ЭГ-5-1Н

Система питания и управления ЭГ-5-1Н сконструирована на базе конструктивных и схемных решений, описанных в книге А.К. Вальтера и др. "Электростатические ускорители заряженных частиц", Атомиздат, 1964 г.^{/1/} В процессе работы в электрооборудование системы введен ряд изменений и добавлений:

а) В систему стабилизации тока магнита, выполненного на базе стандартной стойки БТ-4, добавлено тиратронное поляризованное реле, которое расширило площадку стабилизации тока магнита.

б) В систему питания тока раздаточного магнита СП-10А введена схема размагничивания ярма магнита, которая необходима при работе на прямом канале этого магнита.

в) Построена система стабилизации магнитного поля магнита СП-88, основанная на методе ядерномагнитного резонанса. Схема построена на базе стандартного прибора для измерения магнитного поля типа ИМИ-2 и обеспечивает стабильность магнитного поля не хуже 0,01%.

г) В схеме питания магнитного анализатора типа СП-88 вместо двух мотор-генераторов на 7 и 28 кв на величины максимальных токов 40 и 100 а, соответственно, применен один мотор-генератор на 28 кв, 100 а. Этот генератор обеспечивает перекрытие всего диапазона токов, необходимых для отклонения протонов с начальной энергией 650 кэв ($I = 15а$) и пучка He⁴ до энергии 5 мэв.

д) Измерена скорость возрастания величины тока в магните СП-88, которая составляет 20 эрст/мин вместо 100 эрст/мин в ранее рекомендованных системах питания магнитов электростатических генераторов ЭГ-2,5 и ЭГ-5. Последнее сделано в соответствии с исследованиями, показавшими необходимость медленного подъема магнитного поля для получения хорошо повторяющегося значения напряженности магнитного поля вдоль всего пути пучка. Рассмотрим более подробно изменения, указанные в пунктах а), б), в), поскольку они связаны с определенными схемными решениями, которые могут представлять интерес для ряда лабораторий.

а) Тиратронное поляризованное реле.

Как уже указывалось, тиратронное поляризованное реле (ТПР) установлено в схеме стабилизации тока магнита. При изменении тока на любую величину ТПР автоматически настраивает схему на режим стабилизации тока. Схема ТПР представлена на рис. 19. Как видно из рисунка, вход схемы подключается к фазовому детектору стойки БТ-4. В аноды тиратронов включаются обмотки реле P_1P_2 , нормально-замкнутые контакты которых включают двигатель привода регулятора возбуждения мотор-генератора, изменяя тем самым ток возбуждения генератора. При значительном изменении тока магнита от заданной величины или при установке нового значения тока магнита сигнал с фазового детектора открывает один из тиратронов. Реле в его анодной цепи своими нормально закрытыми контактами включает двигатель РВН-20, который меняет возбуждение генератора так, чтобы скомпенсировать отклонение тока.

б) Схема размагничивания магнита СП-10А

Необходимость применения схемы размагничивания раздаточного магнита СП-10А связана с наличием остаточного магнитного поля ($\approx 90-100$ эрстед), которое отклоняет пучок от прямого канала. Величина этого отклонения на расстоянии одного метра от магнита даже при энергии протонов 4 Мэв составляет ≈ 16 мм. Естественно, что при использовании коллиматора перед мишенью такое отклонение исключает возможность проведения экспериментов. Для выбора схемы размагничивания была выяснена зависимость величины остаточного поля от режима работы магнита. Для этой цели измерялась напряженность остаточного магнитного поля в функции числа часов работы магнита при максимальном токе. Увеличение и уменьшение тока велись по одной и той же петле гистерезиса.

Выяснено, что независимо от числа часов работы магнита, через 5 минут после выключения магнитного поля, остаточное поле в пределах погрешности измерений (± 5 гаусс) остается постоянным и равным $\sim 95 \pm 5$ гаусс. В связи с этим имеется возможность использования простого метода размагничивания, который основывается на компенсации остаточного поля током, направленным противоположно предыдущему основному току. Как показали измерения, для полной компенсации остаточного поля магнита СП-10 необходим ток $0,45$ а. Противоток обеспечивается от отдельного выпрямителя, схема подключения которого представлена на рис. 20. Для размагничивания необходимо подать питание на панель управления раздаточным магнитом. При этом, как видно из схемы, произойдет автоматическое подключение выпрямителя к обмоткам магнита, замкнутся контакты "К". На рис. 21 представлен график, показывающий время, необходимое для получения остаточного поля, близкое к нулевому значению. Видно, что уже через 10-15 минут после остановки мотор-генератора и подключения схемы компенсации остаточное поле достаточно мало.

в) Система стабилизации магнитного поля в зазоре анализирующего магнита СП-88,

Система стабилизации магнитного поля анализирующего магнита построена на базе стандартного прибора типа ИМИ-2, используемого для измерения магнитного поля. Основные элементы схемы показаны на рис. 22. Стабилизация магнитного поля производится следующим образом. При изменении величины напряженности магнитного поля на величину $\pm \Delta H$ на выходе фазового детектора ИМИ-2 появляется сигнал определенной полярности. Пройдя катодный повторитель (лампа 6Н1П), этот сигнал воздействует на блок питания дополнительной обмотки электромагнита СП-88 и вызывает изменение тока в последней в направлении, восстанавливающим первоначальное значение поля. На рис. 22 представлена схема стабилизации без подробной схемы ИМИ-2. Система обеспечивает стабильность магнитного поля в течение 16-часовой непрерывной работы не хуже $0,01$ %. Помимо функций стабилизации, схема с использованием ИМИ-2 обеспечивает измерение магнитного поля с указанной выше точностью. Методика включения схемы стабилизации и измерения по заранее составленным таблицам устанавливается необходимая величина тока магнита и частота волномера (тип 526У). После настройки генератора ИМИ-2 и волномера на нулевые

блемия, с помощью потенциометра в цепи стабилизации тока магнита устанавливаются те значения тока, при которых на экране осциллографа появится пик ЯМР. После этого тумблером "П" (см. рис. 22) подключают дополнительную обмотку электромагнита СП-88 к блоку управления, которая обеспечивает необходимую стабильность при отклонении магнитного поля от заданного значения.

8. Компрессорная

Компрессорная состоит из следующих основных узлов: компрессора КР-3/220, осушительной батареи производительностью $30 \text{ м}^3/\text{час}$, 18 баллонов по 410 литров, объединенных в две группы, испарителя азота (зигзагообразная медная труба диаметром 40 мм, длиной 40 метров), баллонов с углекислым газом, форвакуумного насоса ВН-4Г. Схема компрессорной позволяет производить следующие операции:

1. Получение газообразного азота из жидкой фазы. Жидкий азот из азотного танка через испаритель поступает в компрессор и далее через осушительную батарею в баллоны емкостью 4000 литров. Аналогичным образом в эти же баллоны осуществляется перекачивание CO_2 из стандартных баллонов емкостью 40 литров.

2. Откачка котла компрессором до давления 100 мм рт.ст. с последующим нагнетанием в баллоны-ресиверы.

3. Откачка котла, баллонов, коммуникаций на формвакуум.

4. Наполнение газом котла из баллонов на 410 л через осушительную батарею.

5. Осушка хранящегося газа по циклу: группа баллонов "А" - компрессор - осушительная батарея - группа баллонов "В".

6. Осушка газа в котле по циклу: котел - компрессор - осушительная батарея - котел.

7. Регенерация силикагеля в осушительной батарее. Для этой цели на соуды батареи намотана электрическая печь общей мощностью около 4 квт. Батарея с силикагелем нагревается до температуры $150-160^\circ$ и при этой температуре откачивается форвакуумным насосом. Операция осушки занимает 6-7 часов. Влажность газа в котле при хорошо осушенном силикагеле и скорости

подачи газа в котел не более 30 кубических метров в час - не хуже 0,5% .

Дополнительная осушка газа осуществляется в котле с помощью 2 кг P_2O_5 , специально устанавливаемых в него для этой цели.

В заключение авторы приносят благодарность проф. И.М. Фрянку, проф. Ф.Л. Шапиро, И.В. Сизову, С.К. Николаеву за помощь и внимание к работе, а также сотрудникам КБ Лаборатории нейтронной физики Б.И. Воронову, Б.Н. Анянцеву, А.В. Андросову за проведение ряда конструкторских работ, связанных с реконструкцией ЭГ.

Л и т е р а т у р а

1. А.К.Вальтер, Ф.Г.Железников, И.Ф. Малышев, Г.Я. Рошаль, А.Н. Сербинов, А.А. Цыгикало, С.П. Цытко. Электростатические ускорители заряженных частиц, Атомиздат, 1983.
2. M. M. Elkind. Rev. Scient. Instrum. 30, 855 (1959).
3. D. Pinet. L'Onde Electrique, 35 (1955) 1030.
4. T. Huus. . Частное сообщение.
5. А.В. Андросов, Э. Колташ, Г.М. Осетинский, Д. Сабо, И.А. Чепурченко. Препринт ОИЯИ
6. E. Coltay. Gy. Szabo. Nuclear Instruments and Method 35, 88 (1965).
7. Л.Ф. Кондрашов, Н.Н. Халдин. Оборудование для ядерных исследований. Госатомиздат, 1961 г. стр. 49.
8. E. Almqvist. Proceeding 1958 Accelerator Conference High Voltage Engineering Corp. Ehrlington.

Рукопись принята издательским отделом

30 марта 1967г.

Т а б л и ц а 1

Основные данные расчета

Длина отдельных электродов	$L = 550$ мм			
Общая длина	$L_{\alpha} = 2L + d = 1200$ мм			
Плоскость	плоскость (+ -)		плоскость (- +)	
Номер квадрупольный	1	2	1	2
Расстояние изображения квадрупольного дублета (расстояние от выходного края линзы до щелей)	$U_{+-} = 2200$ мм		$U_{-+} = 4877,5$ мм	
Отклонение, которое может быть скорректировано	$\alpha_1 = 8'$	$\alpha_2 = -5'$	$\alpha_1 = -9'$	$\alpha_2 = 11'$
	$\alpha_{1+2} = \pm 13'$		$\alpha_{1+2} = \pm 20'$	
Смещение, которое может быть скорректировано	$\Delta_1 = 0,6$	$\Delta_2 = -1,88$	$\Delta_1 = -0,65$	$\Delta_2 = 2,2$
	$\Delta_{1+2} = \pm 2,48$		$\Delta_{1+2} = 2,85$	
Напряжение электродов при				
$\delta = 0$	$\Phi_{1,1} = 1,47$ кв		$\Phi_{1,2} = 1,55$ кв	
и $\delta = 50\%$	$\Phi_{1,1\text{макс}} = 2,20$ кв		$\Phi_{1,2\text{макс}} = 2,33$ кв	
и энергии пучка 5 Мэв				

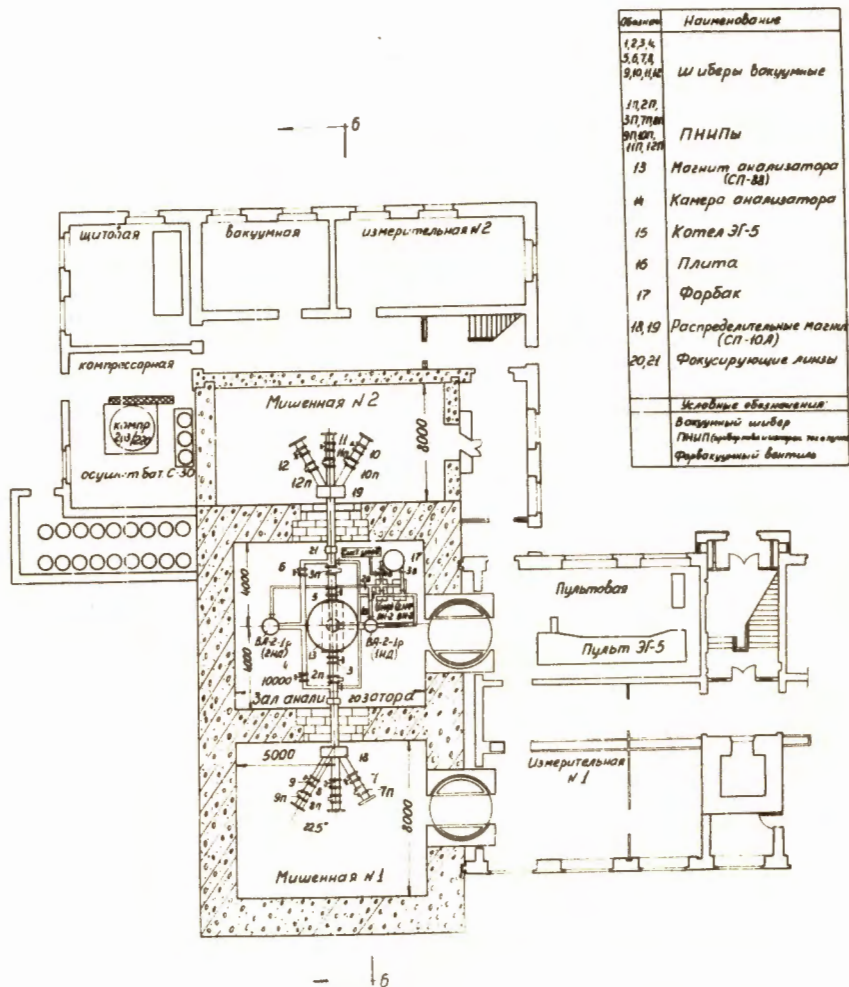


Рис. 1а. План расположения установки ЭГ-5-1Н в здании Лаборатории нейтронной физики.

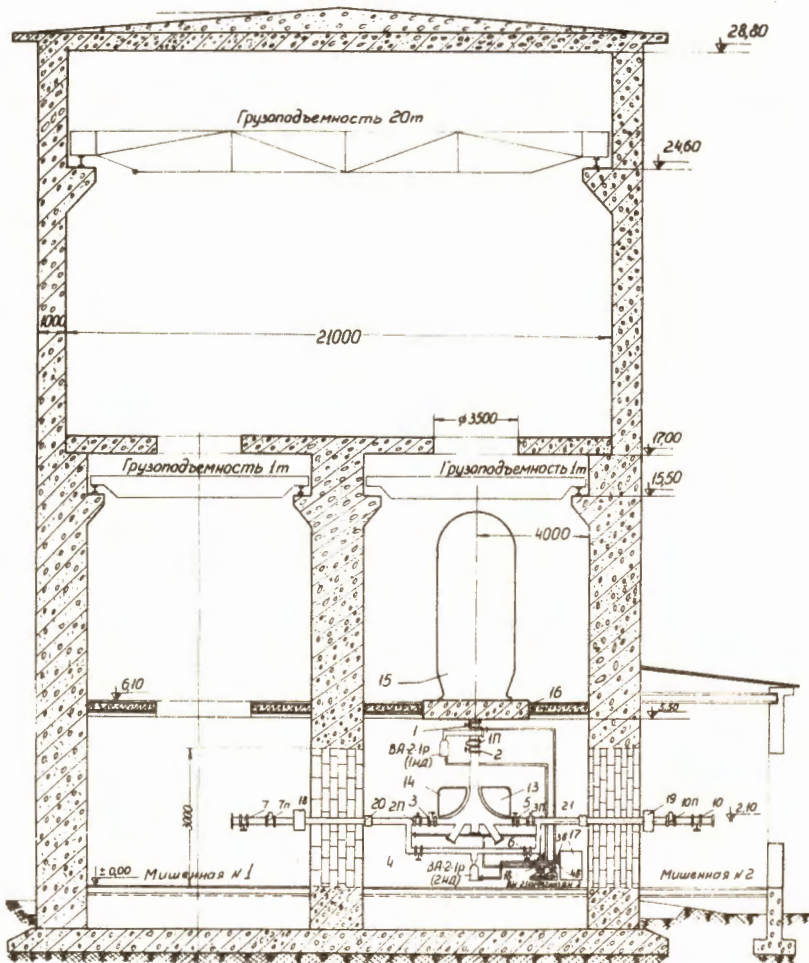
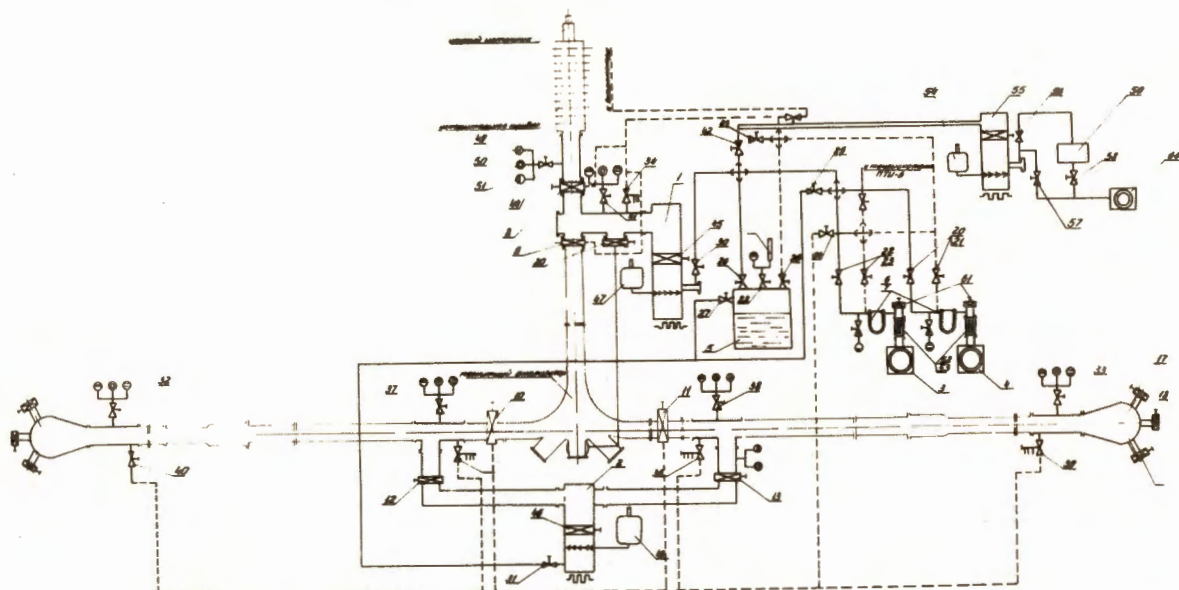


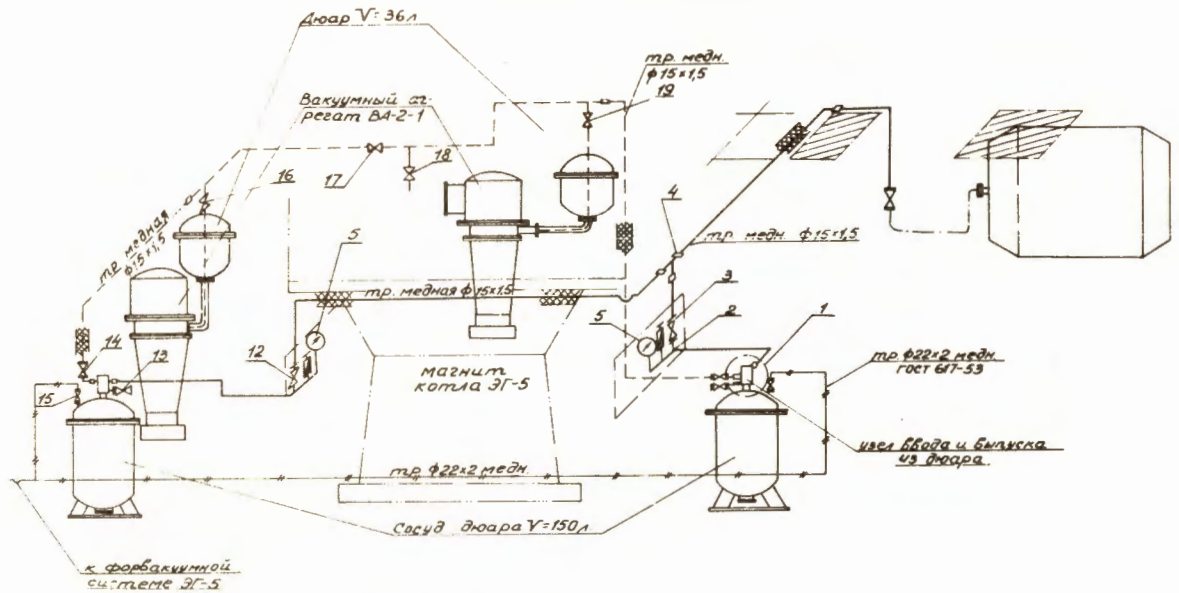
Рис. 16. План расположения установки ЭГ-5-1Н в здании Лаборатории нейтральной физики.

Рис. 2. Схема вакуумной системы.



1-2	Вакуумный агрегат ВА-2-1Р	15	Клапан	"	КШ-100 № 8	47, 48	Сосуд Дюара 35л
3-4	Вакуумный насос ВН-2	16	Клапан	"	КШ-100 № 9	49	Лампа ЛМ-8
5	Форвакуумный бак	17	Клапан	"	КШ-100 № 10	50	Лампа ЛМ-2
6-7	Ловушка азотная наливная	18	Клапан	"	КШ-100 № 11	51	Лампа ЛТ-4М
8	Клапан шиберный КШ-175	19	Клапан	"	КШ-100 № 12	52,53	Сильфон
9	Клапан " КШ-100 № 2	20	Клапан	"	КШ-100 № 13	54	Сосуд Дюара 35л
10	Клапан " КШ-100 № 3	21, 33	Вентиль прямой ВП-50			55	Насос ДРН-50
11	Клапан " КШ-100 № 4	34	Вентиль прямой ВП-50 БК			56, 58	Вентиль
12	Клапан " КШ-100 № 5	35,43	Вентиль прямой ВП-25			59	Система улавливания Ne ³
13	Клапан " КШ-100 № 6	44	Клапан рычажной КР-50			60	Форвакуумный насос ВН-2
14	Клапан " КШ-100 № 7	45,46	Клапан КД-54			61	Электромагнитный клапан

Принципиальная схема азотпровода



28




- Условные обозначения:
-  — Вентиль фланцевый
 -  — Предохранительный капон
 -  — Манометр

Рис. 4. Принципиальная схема подачи азота к ловушкам.

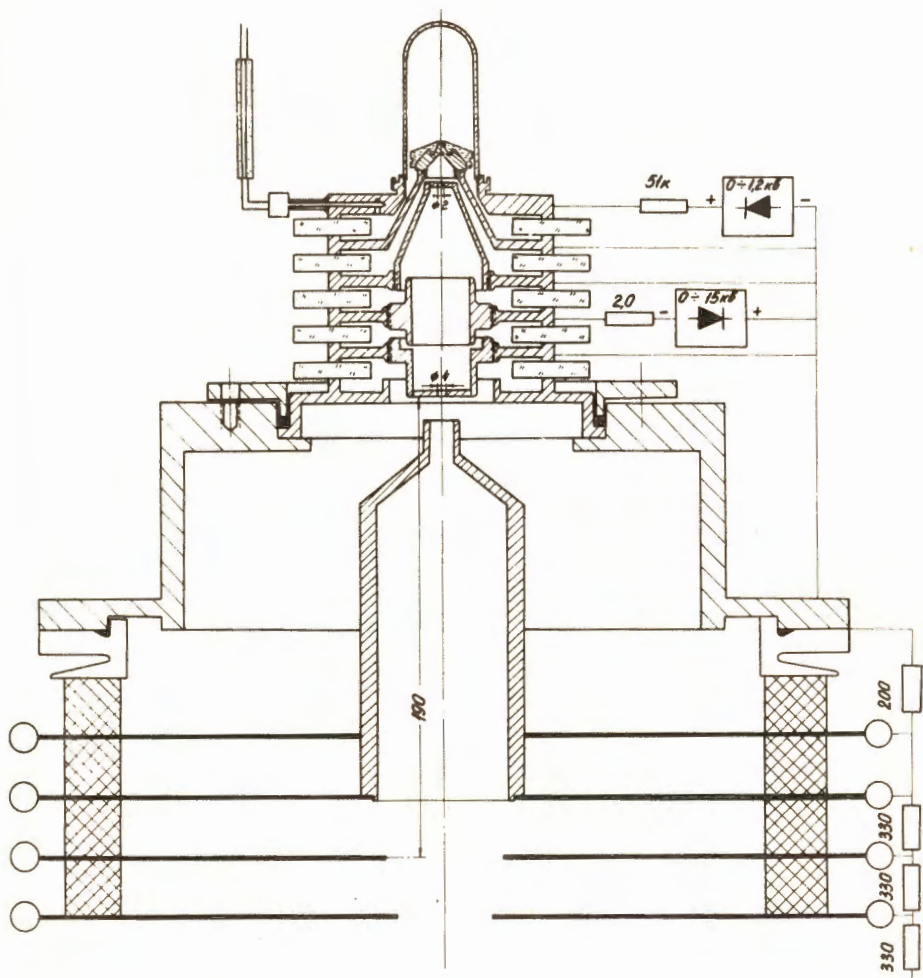
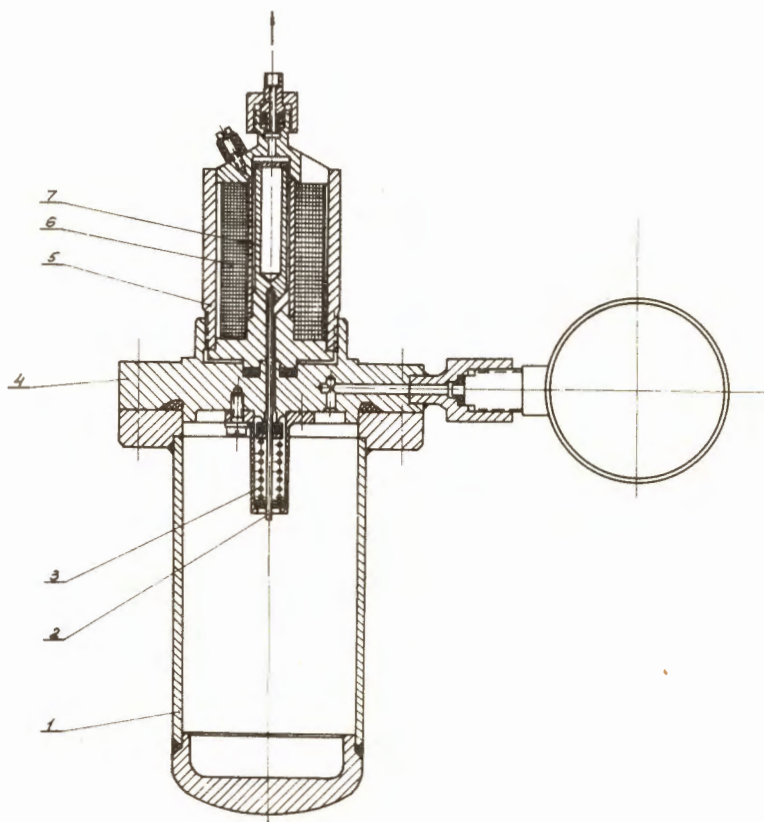


Рис. 5. Ионный источник и система фокусировки пучка на входе в ускорительную трубку.



1 - баллон; 2 - клапан; 3 - пружина; 4 - фланец
 5 - корпус; 6 - катушка; 7 - якорь

Рис. 6. Электромагнитный клапан.

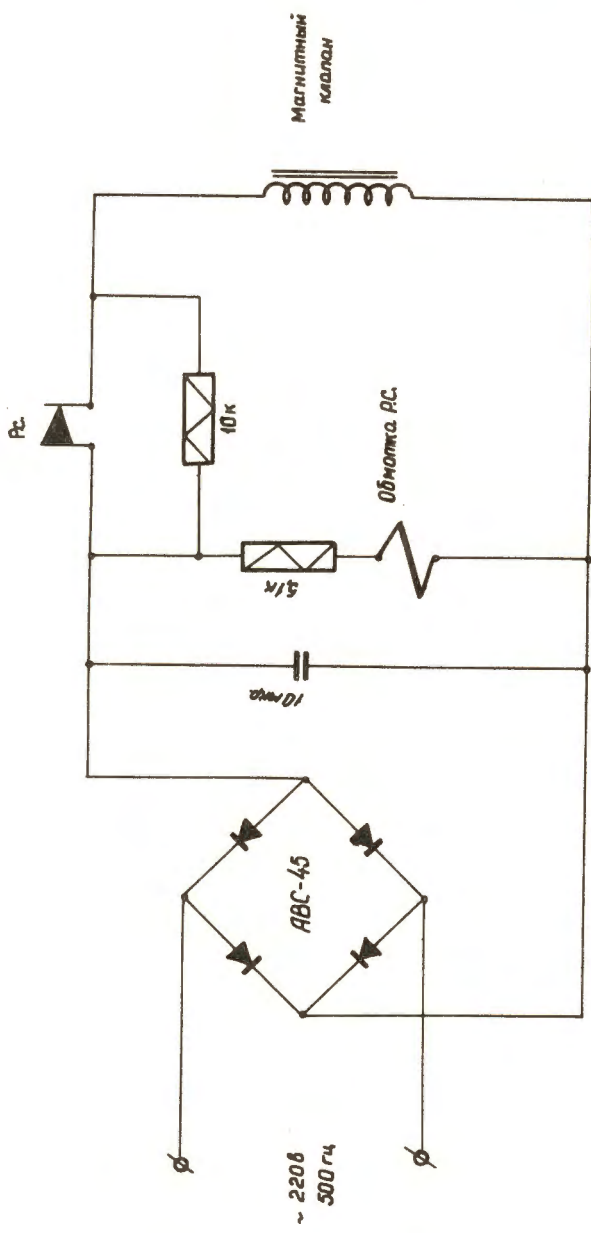
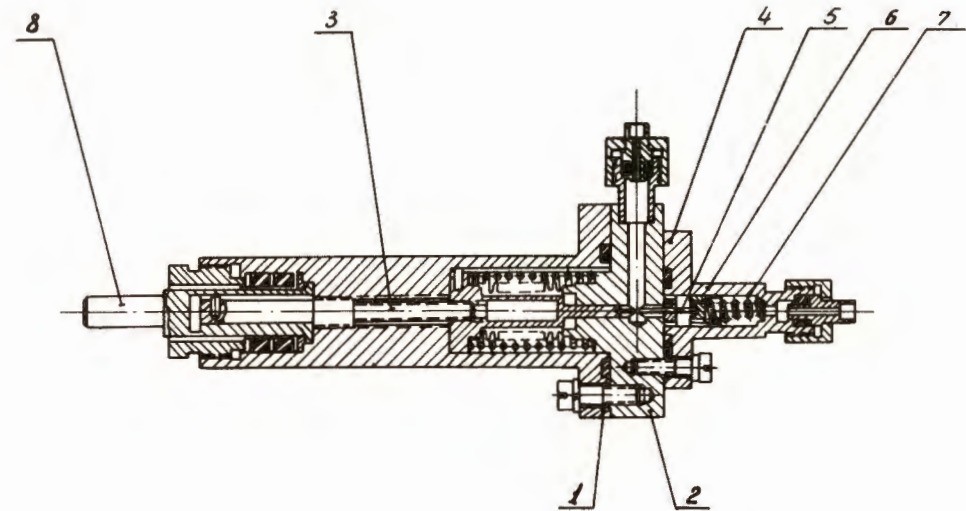


Рис. 7. Схема включения электромагнитного клапана.



1-Корпус; 2-Камера; 3-Винт-шпindelь; 4-Фланец; 5-Цгла;
6-Поршень; 7-Пружина; 8-Ось

Рис. 8. Игольчатый вентиль.

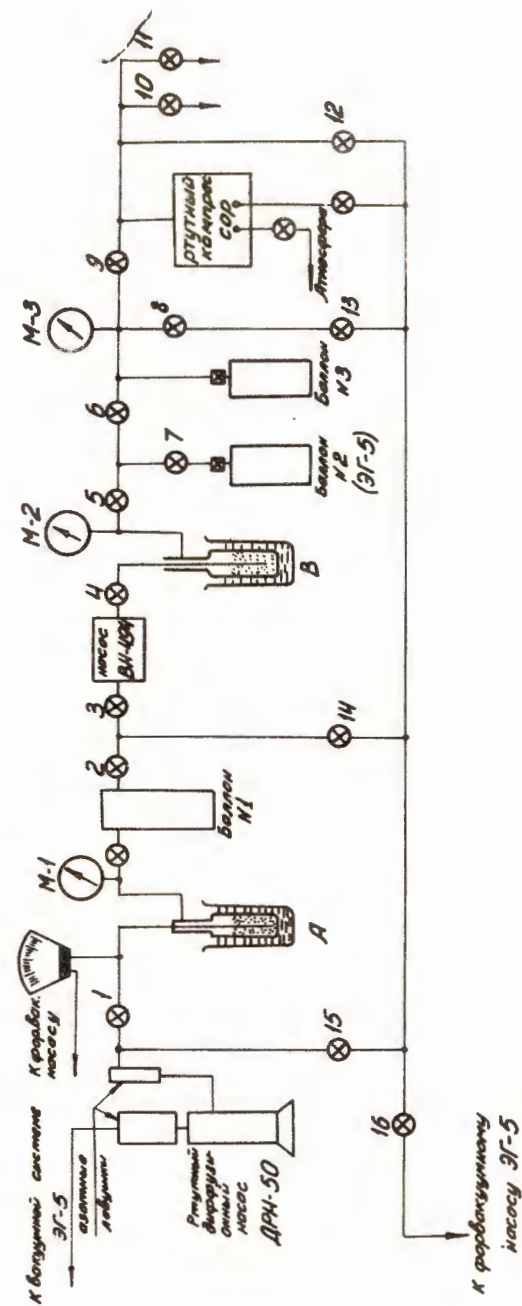


Рис. 9. Схема системы улавливания He³.

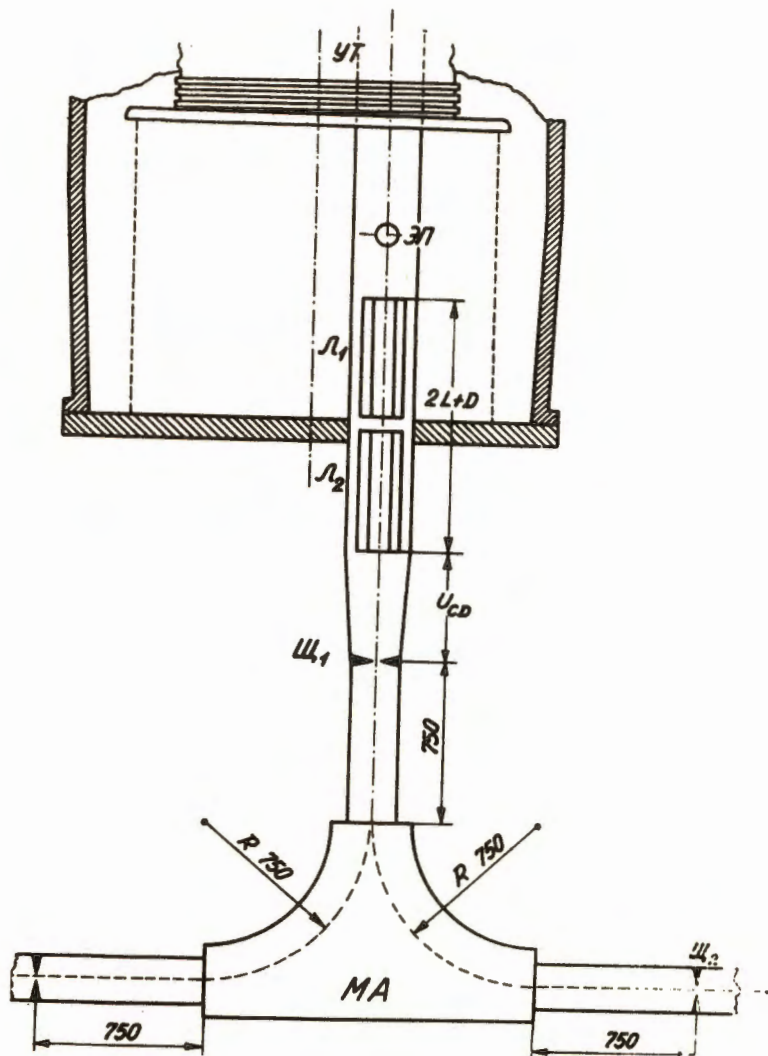


Рис. 10. Схема расположения корректора.

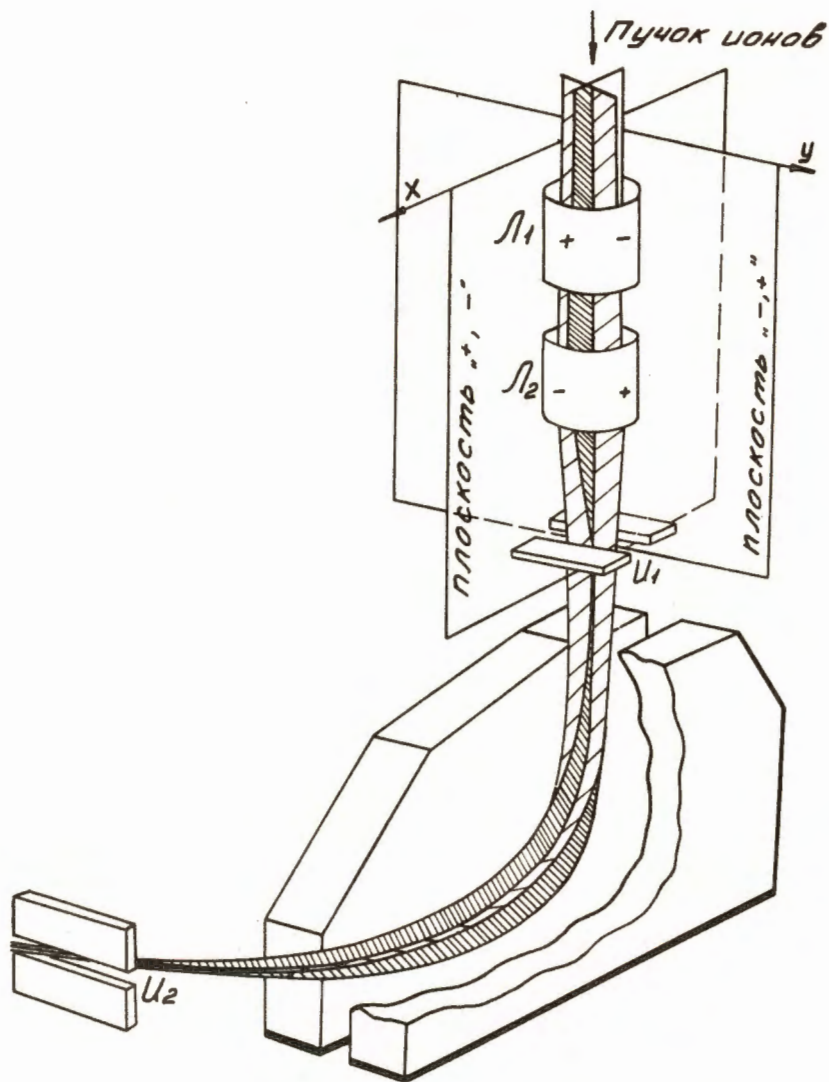


Рис. 11. Траектория пучка частиц в системе корректор-магнитный анализатор.

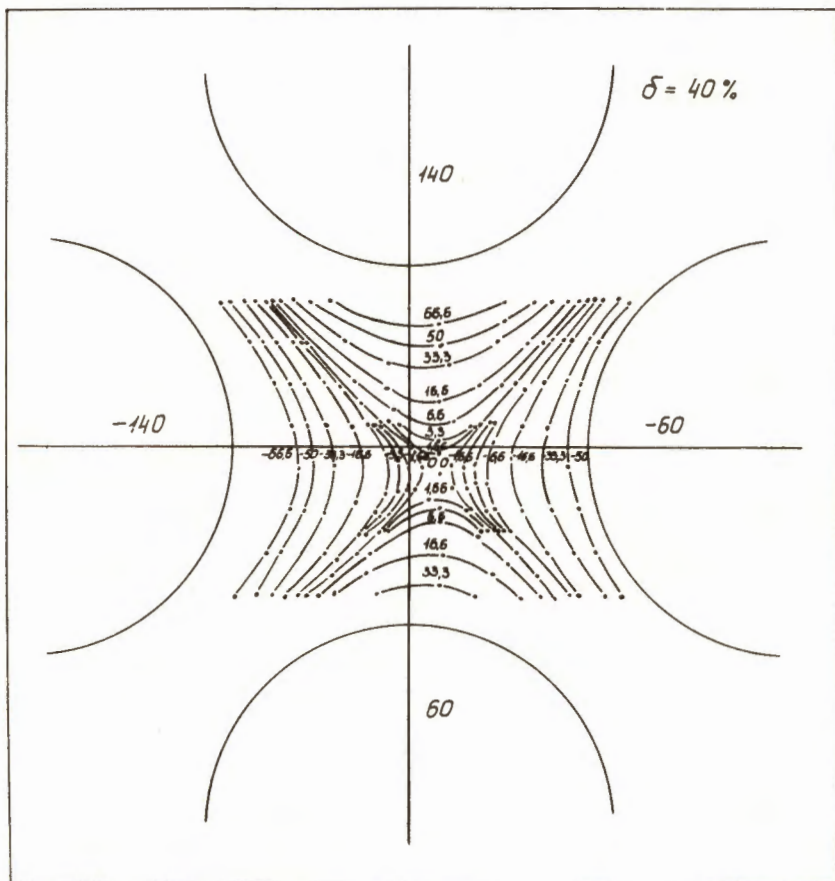


Рис. 12. Распределение потенциала в электростатической линзе.

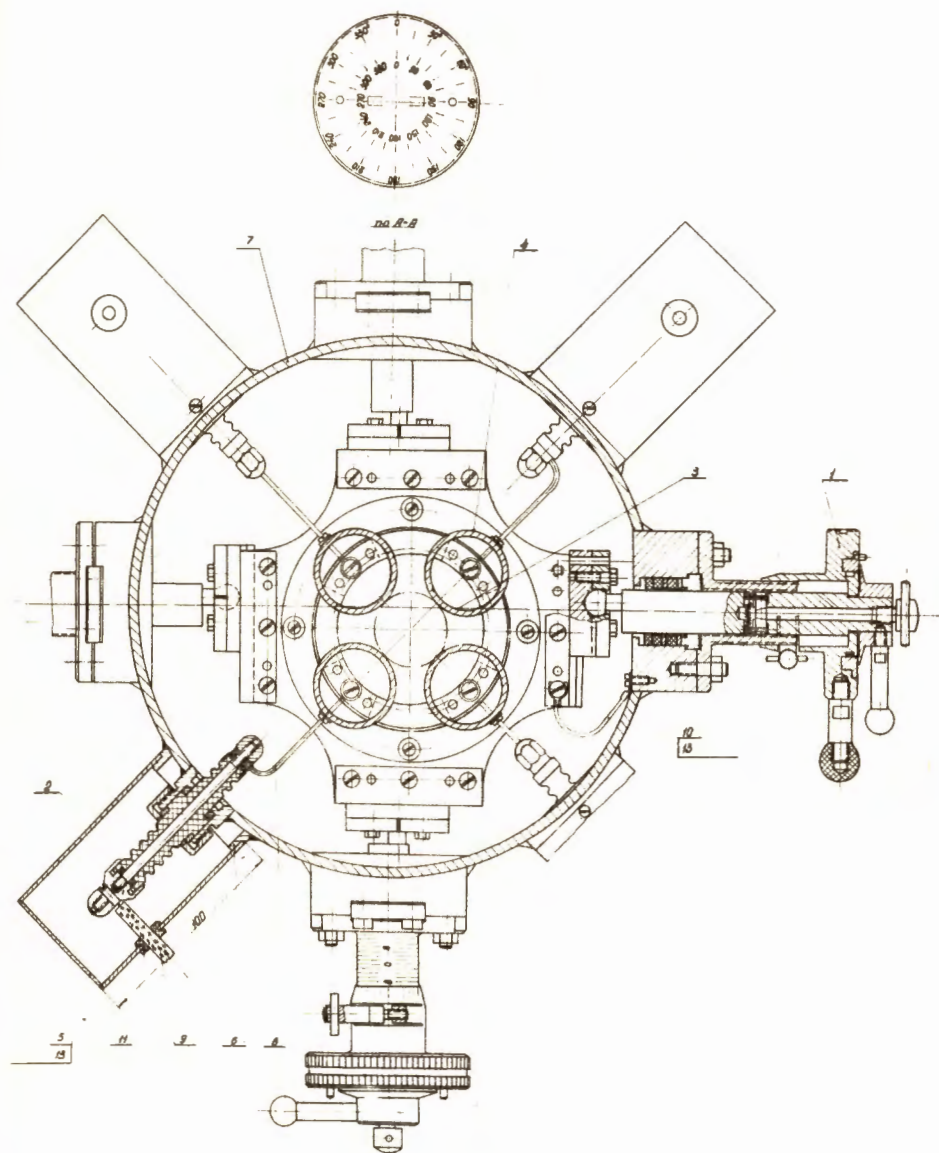


Рис. 13. Корректор пучка (Рис. 13а, Рис. 13б)

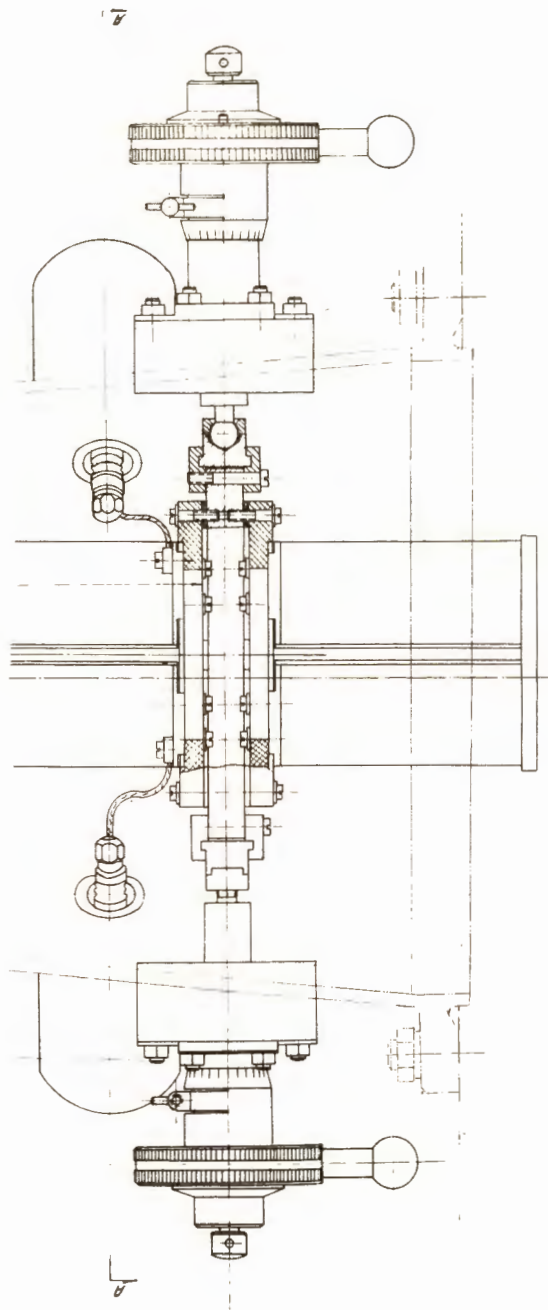


Рис. 136.

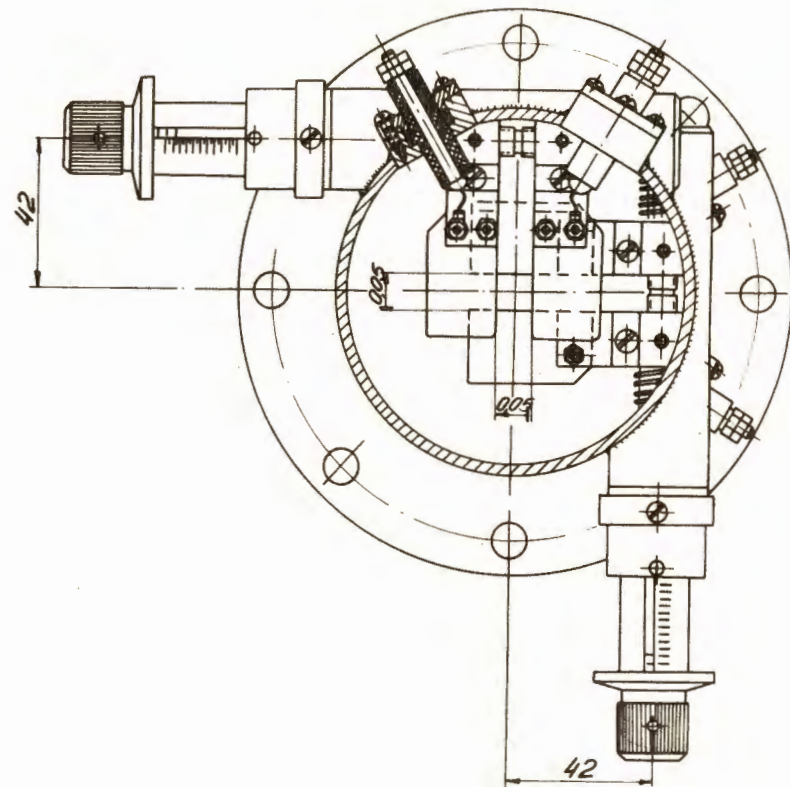


Рис. 14а. Шелевой прибор (вид сбоку).

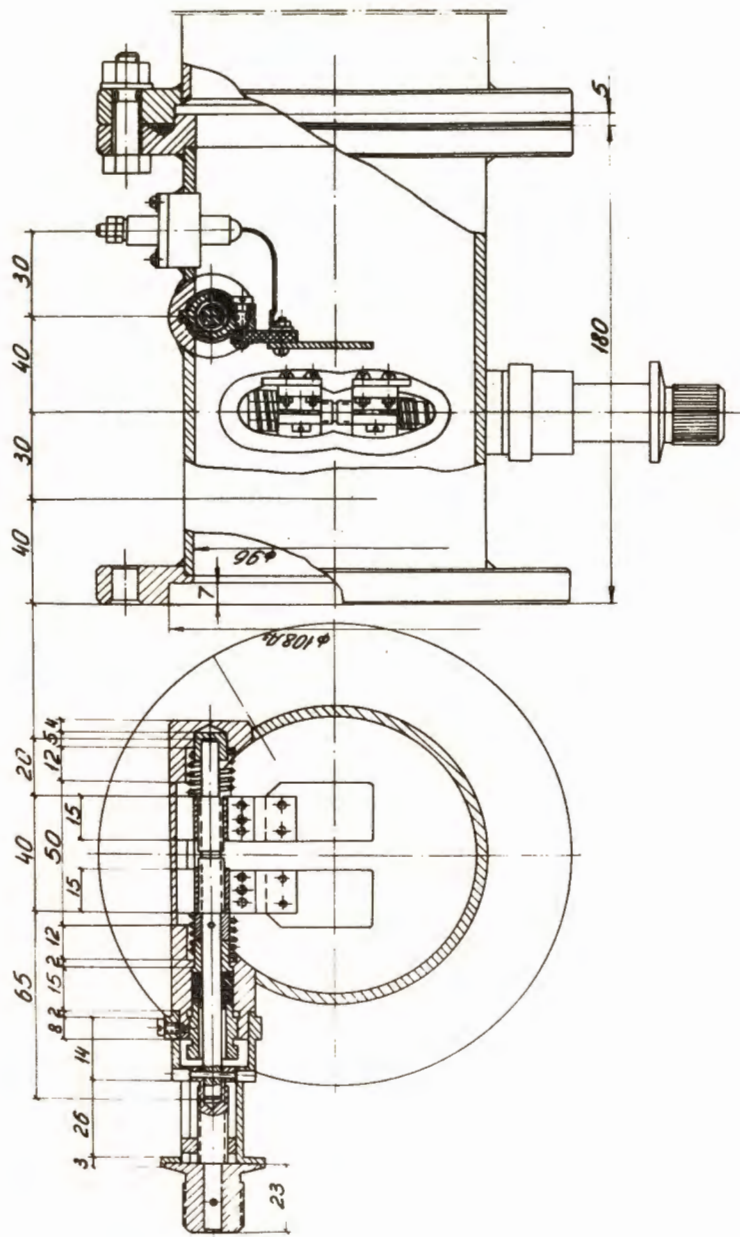


Рис. 146. Щелевой прибор (вид спереди).

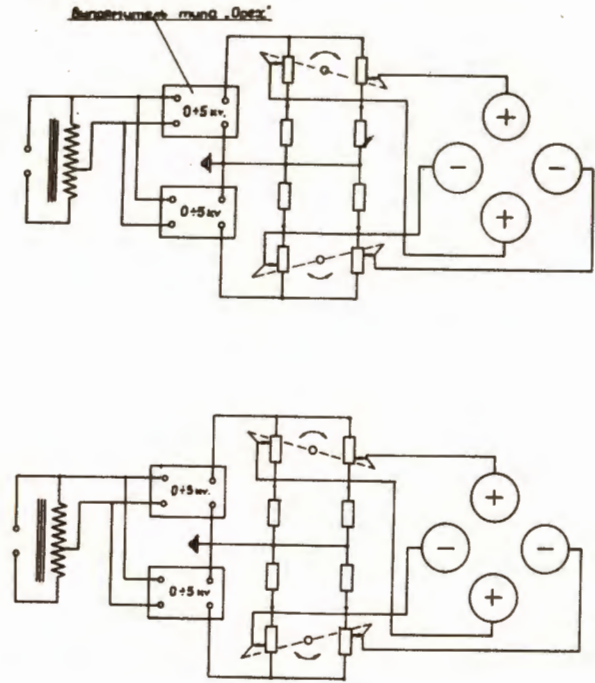


Рис. 15. Принципиальная схема питания электростатических асимметризованных квадрупольей.

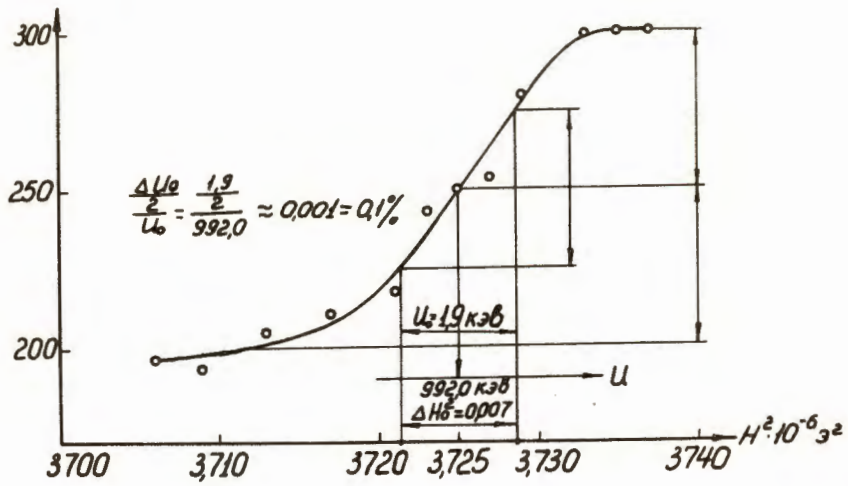


Рис. 16. Кривая возбуждения реакции $Al(p, \gamma)$.
(Толстая мишень).

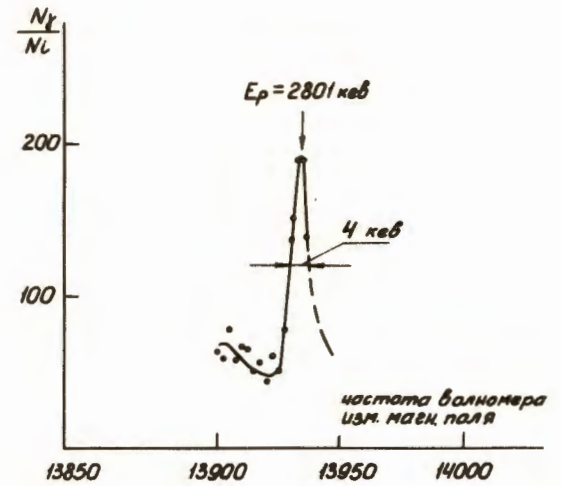


Рис. 18. Кривая возбуждения реакции $S^{34}(p, \gamma)Cl^{35}$

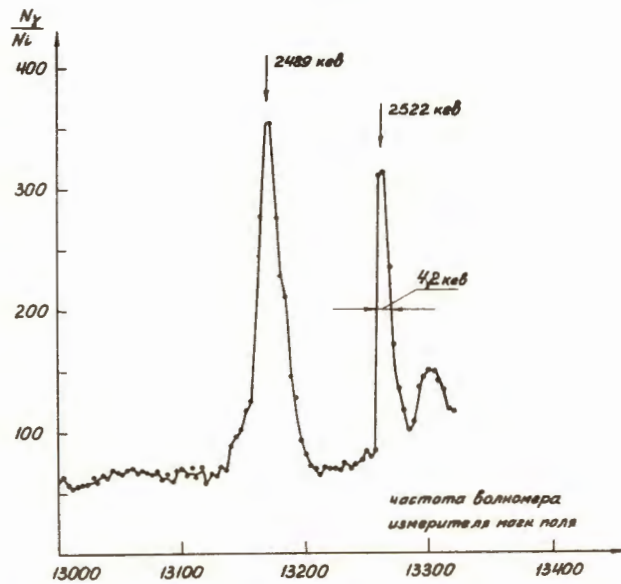


Рис. 17. Кривая возбуждения реакции $Al(p, \gamma)$
(Тонкая мишень).

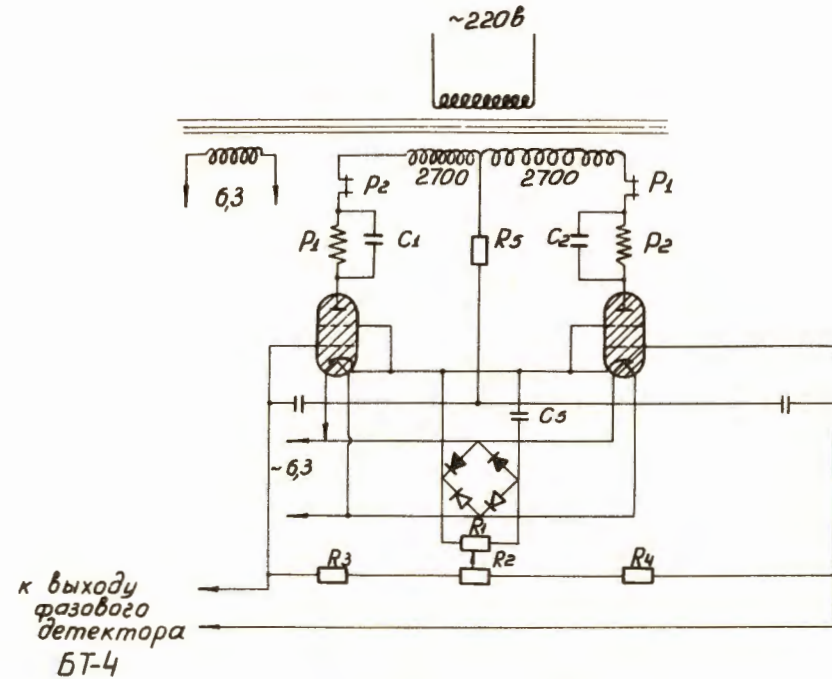


Рис. 19. Схема поляризационного реле.

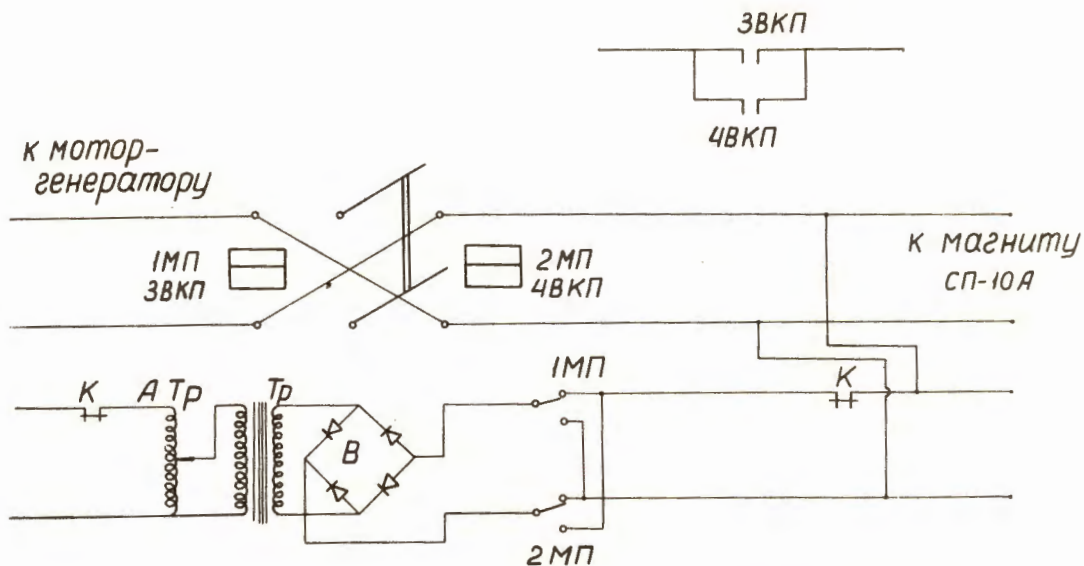


Рис. 20. Схема размагничивания магнита СП-10А.

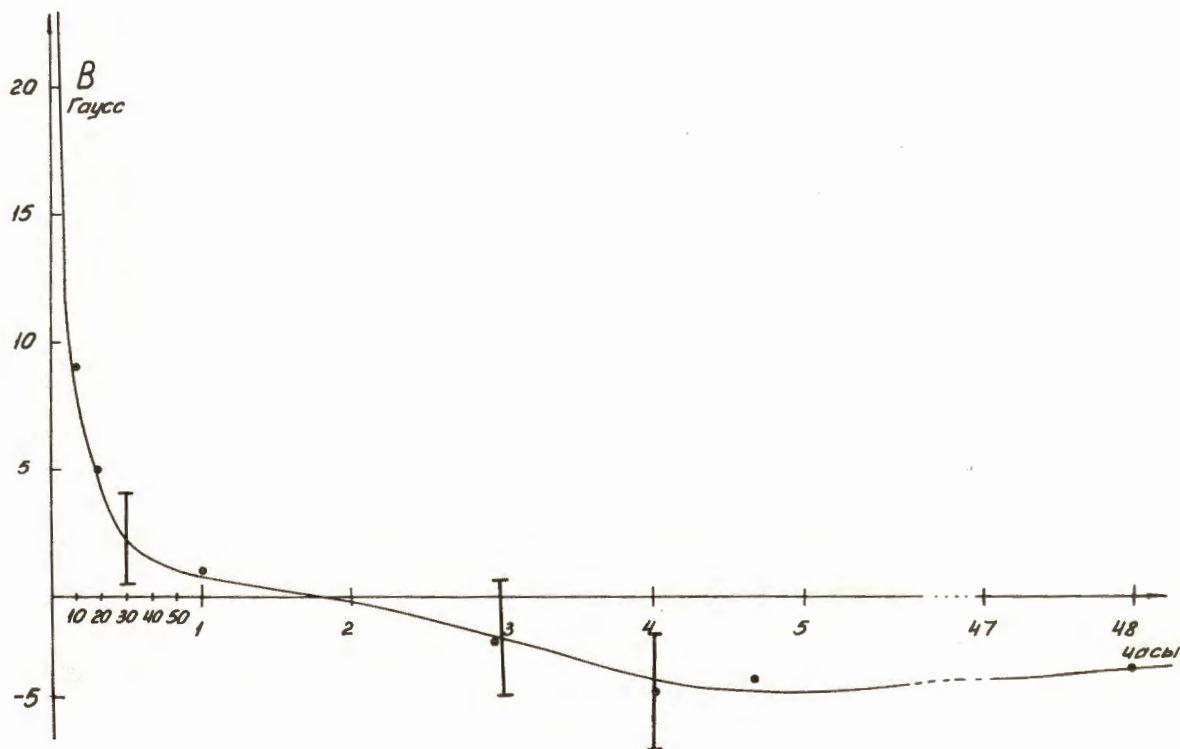


Рис. 21. Кривая размагничивания (спада поля) магнита СП-10А.

