

Библиофоне

C 45

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

А.Н.Скринский

**разработка и запуск установок со встречными
электрон-электронными и позитрон-электронными
пучками**



Новосибирск 1964

2
X

АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

Совет физической секции Объединённого учёного совета
по физико-математическим и техническим наукам

г.Новосибирск, 72, Президиум СО АН СССР тел. 9-76-74

"2" *марта* 1965г. № 28 - I - 809ФТ 1465

Совет физической секции объединённого учёного совета
по физико-математическим и техническим наукам Сибирского отделения
Академии наук СССР направляет Вам для ознакомления авторский до-
клад А.Н.Скринского "Разработка и запуск установок со встречными
электро-электронными и позитрон-электронными пучками" по работам,
представленным на соискание учёной степени кандидата физико-матема-
тических наук. Заверенный учреждением отзыв в 2-х экземплярах про-
сим направить в адрес секции Объединённого совета.

О дне и времени защиты будет объявлено за 10 дней до защи-
ты в газете "Советская Сибирь".

Учёный секретарь
Совета физической секции
Объединённого учёного совета
Член-корреспондент АН СССР

(С.Т. БЕЛЯЕВ)

Работы выполнены в Институте
ядерной физики СО АН СССР

В В Е Д Е Н И Е

Возможность создания встречных пучков стала широко обсуждаться с 1956 года после предложения Керста /1/ на Международной конференции по ускорителям в Женеве. Основной трудностью при этом являлось создание достаточно интенсивных пучков заряженных частиц.

В Институте ядерной физики СО АН СССР работы по встречным пучкам были начаты в конце 1956 года после предложения Г.И.Будкера осуществить накопление интенсивных пучков лёгких частиц (электронов и позитронов) путём многократного добавления порций частиц в один и тот же фазовый объём, используя эффект радиационного трения. Примерно в то же время аналогичные исследования начались в Стэнфордском университете (США) /2/ и несколько позднее в Харькове /3/ и Фраскати (Италия) /4/. В настоящее время во многих лабораториях мира проектируются и сооружаются установки для экспериментов со встречными пучками / 5, 6, 7, 8 /.

Наша первая установка ВЭП-1 предназначена для экспериментов по рассеянию электронов на электронах с максимальной энергией 2×130 Мэв. Первый этап работы (до середины 1962 года) был проведён в Москве под руководством Г.И.Будкера, А.А.Наумова и Б.Г.Ерозолимского /20/.

Вторая установка ВЭП-2 предназначена для экспериментов по взаимодействию электронов и позитронов с максимальной энергией 2×700 Мэв.

Схемы этих установок в общих чертах аналогичны. Основными узлами каждого комплекса являются ускоритель-инжектор, система однооборотного выпуска-впуска, канализирующая система и накопительная дорожка с регулируемой энергией. В качестве ускорителей-инжекторов используются специально разработанные сильноточные синхротроны, дающие пучок электронов с параметрами, позволяющими с малыми потерями перевести электроны в накопительные дорожки.

Основной режим работы наших установок таков: в течение некоторого времени осуществляется накопление необходимого количества электронов (и позитронов), при энергии, определяемой возможностями ускорителя, затем поступление новых порций частиц прекращается, магнитное поле накопителя поднимается до величины, определяемой нужной в данном эксперименте энергией, и эксперимент ведётся в стационарных условиях.

Основной характеристикой экспериментальных возможностей установки со встречными пучками, является её светимость L , определяемая следующим образом:

$$n = L \sigma$$

где n — скорость счёта,

σ — сечение соответствующего процесса.

Для простейшего случая одного сгустка в каждом из пучков и встречи "лоб в лоб", при использовании одного места встречи, L имеет вид:

$$L = \frac{N_1 N_2}{S} f$$

где N_1, N_2 — числа частиц в каждом из пучков;

S — площадь поперечного сечения пучков;

f — частота обращения.

Весьма существенными для эксперимента являются также фоновые условия. Они определяются процессами, ограничивающими время жизни пучка в накопителе, в первую очередь взаимодействием частиц с остаточным газом.

Основные параметры пучка — геометрические размеры сгустков и время жизни — в отсутствие встречи определяются радиационным трением, квантовыми флюктуациями в синхротронном излучении, взаимодействием с остаточным газом, размером эффективной апертуры, а при достаточно большом токе — и взаимодействием частиц внутри каждого пучка, взаимодействием со стенками камеры и резонатором, когерентным излучением и другими когерентными эффектами.

Расчёт с достаточной точностью "одноэлектронных" (т.е. не зависящих от числа частиц в пучке) параметров элементарен. В приложении I приведены конечные формулы для основных "одноэлектронных" эффектов, определяющих время жизни и размеры пучка, а также формулы, учитывающие влияние рассеяния частиц внутри пучка на время жизни.

Основными когерентными эффектами в нашем случае (в от-
сутствии встречи) являются взаимодействие сгустка заряженных
частиц с резонатором и взаимодействие пучка с не идеально про-
водящими стенками вакуумной камеры.

Взаимодействие с резонатором в накопителях может оказать-
ся существенным с токов порядка миллиампера. Это взаимодейст-
вие при неблагоприятных характеристиках ВЧ-тракта приводит к
возникновению когерентных фазовых колебаний сгустков ("колеба-
тельная неустойчивость"). В работах /10,11/ проанализирован
случай представимости ВЧ-тракта одиночным резонансным контуром
показано, что в этом случае неустойчивость устраняется пере-
стройкой собственной частоты резонатора ниже частоты генера-
тора. В наших условиях идеализация обычно приводит к неверным
результатам, так как существенными оказываются участки частот-
ной характеристики тракта, удаленные от резонансной частоты
резонатора на несколько его полос пропускания (на частоту фа-
зовых колебаний сгустка). Поэтому и рецепт устранения неустой-
чивости меняется. При большом токе могут вообще исчезнуть фа-
зирующие свойства ВЧ-системы, если не увеличивать расстройку
не нагруженного пучком резонатора по мере увеличения тока (или
не производить других эквивалентных действий).

Влияние взаимодействия пучка с не идеально проводящими
стенками /13,14/ сказывается в накопителях тоже с токов поряд-
ка 1 ма. Это взаимодействие приводит к возникновению когерент-
ных бетатронных колебаний. Рассмотрение этого вида неустойчи-
вости проведено только для непрерывного ("несбунчируемого")
пучка /12/. Если пучок сформирован в сгусток, в особенности при

наличии быстрого фазового движения, характер неустойчивости
может существенно меняться. Неустойчивость можно устранить
введением нелинейностей в бетатронные колебания или соответст-
вующей обратной связью.

При больших токах в накопителях могут оказаться сущест-
венными эффекты типа когерентного излучения. Эти эффекты для
случая движения сгустка в незамкнутом пространстве (движение
в свободном пространстве или вблизи проводящих плоскостей) рас-
смотрены достаточно полно /16,17/. Однако в интересующем слу-
чае замкнутой камеры проведенные расчёты существенно менее
удовлетворительны /18,19/.

УСТАНОВКА С ВСТРЕЧНЫМИ ЭЛЕКТРОН-ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

В Э П - I

I. Общая схема установки с встречными электронными пуч-
ками на энергию 2×130 Мэв приведена на рис.1.

В качестве ускорителя - инжектора применяется безжелез-
ный синхротрон Б-2С, специально разработанный для этой цели и
используемый в комплексе на энергии 40-50 Мэв. Возможность
синхротронного ускорения в установке с предварительным спираль-
ным накоплением, бетатронным подускорением и последующим вво-
дом ускоренного пучка в резонатор была показана в работе / 23 /.
В этой же работе описано получение ускоренного циркулирующего
тока в 1 А при энергии 5 Мэв. На основе этого ускорителя и был
разработан синхротрон Б-2С.

На рис.3 приведена конструктивная схема ускорителя. Ин-
жекция электронов осуществляется из пушки, расположенной на внут-

ренной обечайке. Инжектированные электроны ускоряются вихревым электрическим полем и движутся по спирали в квазистационарном магнитном поле созданном разрядом конденсаторной батареи на витки электромагнита. После заполнения электронами всей камеры на те же витки включается бетатронная конденсаторная батарея и начинается бетатронное ускорение накопленных электронов. При этом электроны асимптотически стягиваются к равновесной бетатронной орбите, положение которой выбирается на среднем радиусе камеры. Соотношение периодов ускоряющего и ведущего полей выбрано таким, что по достижении энергии 2 Мэв радиус равновесной орбиты начинает расти, электроны вводятся внутрь ускоряющего резонатора, на резонатор подаётся высокочастотное напряжение и электроны захватываются в синхротронный режим (радиус равновесной орбиты 412мм, первая гармоника), после чего включается синхротронная конденсаторная батарея, разряд которой создаёт основное поле.

2. Однооборотный вывод электронов из ускорителя осуществляется подачей импульса напряжения с амплитудой 50 кВ и фронтом около 1,5 нсек на дефлектор, представляющий собой счётверённую короткозамкнутую линию общим сопротивлением 12 ом и временем установления 4 нсек. Для создания импульса напряжения используется генератор описанный в /26/. Работа генератора, расчёт и конструкция дефлектора, методика настройки запуска и основные результаты подробно описаны в диссертации Л.Н.Бондаренко /26/. Описание синхротрона дано в работах / 24,25,28/ и наиболее полно - в диссертации С.Г.Попова /27/. В приложении 2 приведена сводка параметров ускорителя и характеристики выпущенно-

го пучка, на рис.4 - фотография выпущенного пучка.

Выпущенные из ускорителя электроны поступают в электронно-оптический канал /29/ (см.рис.1) и практически без искажения фазового объёма поочерёдно фокусируются на входы дорожек накопителя. На рис.5 приведена фотография пучка на выходе из компенсирующей системы.

3. Накопительная установка представляет собой две круглые магнитные дорожки радиусом 43 см, соединенные друг с другом с одной стороны так, что круговые равновесные орбиты касаются. Против этой точки в полюсах магнита сделаны горизонтальные щели для выпуска электронов, рассеянных в месте встречи пучков. Установка расположена таким образом, что медианная плоскость накопительных колец вертикальна и одно кольцо находится над другим. В общей части дорожек (40° по азимуту) показатель спада магнитного поля равен нулю. По обе стороны области однородного поля имеются участки длиной 20° с показателем спада 1 ; в остальной части он равен 0,62. На рис. 7-10 приведены некоторые характеристики магнитного поля накопителя. Максимальная напряженность магнитного поля - 10 тыс. эрстед. Стабильность тока магнита лучше 0,1%. Значение поля при инжекции контролируется по датчику ядерного резонанса.

4. Конструкция магнитов грибообразная. Тело полюсов магнита представляет собой единое целое со стенками вакуумной камеры, выполненной из нержавеющей стали. Внутри неё впрессованы полюсные наконечники. Со всех четырёх торцевых сторон камера имеет большие прямоугольные отверстия, закрытые двойными фланцами. Внутреннее уплотнение на свинце, наружное на резине. Меж-

фланцевое пространство откачивается отдельными паромасляными насосами и азотными ловушками до давления около $2 \cdot 10^{-6}$ торр. Основной насос сорбционного типа с титановым распылителем и азотным охлаждением обеспечивает скорость откачки около 10 тыс. л/сек (предельный вакуум насоса $1 \cdot 10^{-8}$ торр). Удалённые от насоса участки внутренней камеры откачиваются двумя дополнительными насосами, работающими на том же принципе. Два паромасляных насоса с ловушками с холодным барьером обеспечивают откачку аргона. Внутренняя камера прогревается в среднем до 150°C . В настоящее время установка эксплуатируется при среднем вакууме $(5 + 7) \cdot 10^{-8}$ торр. Магнитная и вакуумная системы накопителя на разных этапах их разработки описывались в работах / 30,44,45/.

5. Инфлекторы каждой дорожки /31/ представляют собой нагруженные на волновые сопротивления линии, импульс напряжения в которых распространяется навстречу движению электронов. Поле (электрическое и магнитное) в инфлекторах неоднородное, примерно линейно возрастающее по радиусу. Угловой размер инфлекторов 90° , расстояние от краёв впускных каналов до середины инфлекторов - 110° :

Вначале в качестве впускного импульса использовался импульс, ответвляемый от выпускного, с формированием заднего фронта с помощью закорачивающего разрядника. Однако в таком варианте не удалось устранить послеимпульсы. Это приводило к большим потерям накопленного пучка. В настоящее время импульс на инфлектор подаётся от специального генератора, подобного используемому на ВЭП-2, а ответвляемый от выпускного импульс исполь-

зуется в качестве запускающего. После этого изменения потери накопленного тока стали малы.

6. В качестве ускоряющих элементов для накопительных колец используются коаксиальные четвертьволновые резонаторы, работающие на второй гармонике частоты обращения /32/. Вводы питания имеют электрическую длину, равную половине длины волны высокочастотного напряжения. Используемое напряжение на резонаторах 2-5 кв. ; стабильность частоты генератора не хуже 10^{-4} . Относительная фаза резонаторов при включенной автоматической подстройке поддерживается с точностью $1^{\circ}-2^{\circ}$.

7. Точное соответствие между энергией впускаемого пучка и магнитным полем дорожек устанавливается при выключенном инфлекторе измерением радиального положения пучка, совершившего половину периода радиального бетатронного колебания ; для измерения используется секционированный пробник со свинцовыми долями с расстоянием между центрами долек около 1 см. С помощью такого же пробника, расположенного примерно на четверти периода радиального бетатронного колебания, определяется угол между направлением влёта электронов и равновесной орбитой на азимуте влёта ; подстройка этого угла ведётся изменением (в малых пределах) магнитного поля в компенсирующей системе. Наблюдение за следующими оборотами (при подаче импульса высокого напряжения на инфлектор) и настройка захвата пучка в магнитное поле ведётся по синхротронному излучению с помощью ФЭУ. Без подачи высокочастотного напряжения на резонатор пучок электронов с энергией 40 Мэв живёт в дорожке несколько миллисекунд. При включенном резонаторе оказавшиеся в пределах сепаратриссы электроны захватываются в синхротронный режим и их фазовые и поперечные колебания затухают до "естественных" размеров.

Наблюдение за захваченными частицами ведётся по свету и с помощью резонансных электростатических пикап-электродов /33,34/.

8. В накопителе ВЭИ-1 введено дистанционное управление основными параметрами пучков /-35 /.

Управление радиальным положением орбит осуществляется:

а) посредством изменения частоты ускоряющего напряжения; взаимное положение орбит может изменяться этим способом на ± 4 мм без перестройки усилителя ВЧ-мощности;

б) путём создания азимутальных искажений магнитного поля с помощью дополнительных витков. Один из витков воздействует на оба пучка, меняя их относительное положение на ± 4 мм; второй сдвигает пучок только в верхней дорожке. Комбинируя токи в обоих витках можно выставить точку соприкосновения орбит по центру щели для рассеянных электронов.

Для управления аксиальным положением орбит используются специальные медные пластины, укрепленные на полюсах магнитов, через которые пропускается ток нужной величины. С помощью этих пластин можно сдвигать относительное положение орбит по Z на ± 2 мм, а также наклонять пучки друг относительно друга. При другом включении тока на те же пластины можно изменять отношение частоты бетатронных колебаний к частоте обращения на $\pm 0,1$.

Относительное азимутальное положение сгустков на дорожках регулируется фазосдвигающими линиями в фидерах резонаторов.

При работе на второй гармонике на каждой дорожке существует по 2 сгустка. Выравнивание числа частиц в каждой паре сгустков производится, при необходимости, кратковременным

(на десятках микросекунд) снятием высокочастотного напряжения с соответствующего резонатора.

9. Под управлением размерами понимается искусственное увеличение размеров сгустков по сравнению с их естественными размерами.

Радиальный размер меняется подачей на соответствующий инфлектор импульсов длительностью порядка времени оборота и амплитудой около 5 кв. с регулируемой частотой повторения. Размер при этом может быть увеличен до 5 мм; результирующие колебания некогерентны.

Раскачка вертикальных колебаний производится подачей высокочастотного напряжения на те же пластины, которые используются для управления пучком по Z . Частота воздействия берётся равной разности частот обращения и вертикальных бетатронных колебаний (этим способом с высокой точностью измеряется частота бетатронных колебаний). Получаемые при этом колебания когерентны. Амплитуда их легко может быть сделана любой. При необходимости колебания могут быть сделаны некогерентными введением амплитудной модуляции высокочастотного напряжения.

Увеличение фазовых размеров сгустков достигается модуляцией амплитуды напряжения на резонаторе с частотой синхротронных радиально-фазовых колебаний. Амплитуда параметрически возбуждаемых при этом колебаний может быть легко сделана произвольной.

10. Максимальный ток, получавшийся на каждой из дорожек, составляет около 100 ма /22/. Наилучшее время жизни на малом токе

при энергии 40 Мэв составляло 5 мин и при энергии 100 Мэв — 12 мин. На большом токе время жизни, без принятия специальных мер, уменьшается. Сопоставляя кривые зависимости скорости гибели электронов от величины тока с кривыми загрузки счётчиков, регистрирующих рассеяние электронов на малые углы в аксиальном направлении /36/, можно показать, что основной вклад в это уменьшение (даже без убирания из пучка ионов) даёт, повидимому, "Ада-эффект" /37/.

Проверено соответствие между средним по орбите вакуумом и поперечными размерами пучка. Средний вакуум определялся по времени жизни электронов на малом токе. Оказалось, что при энергии 40 Мэв и напряжении на резонаторе 4 кв времени жизни 120сек соответствует диаметр пучка около 1,0мм. Это согласуется с расчётом в естественном предположении, что средний заряд ядер остаточного газа около 8.

Если не принимать специальных мер, фазовый размер сгустка при токах, больших десятых долей миллиампера, (а соответственно и радиальный размер), испытывает скачки, связанные с явлением когерентной колебательной неустойчивости сгустка, взаимодействующего с резонатором. Скачки устраняются при сильной перестройке собственной частоты резонатора вниз (примерно на половину полосы). При отсутствии скачков фазовый размер, измеренный с помощью ЭОПа, оказывается примерно равным расчётному.

На установке проведено изучение фоновых условий для наблюдения рассеяния электронов на электронах на малые углы/36/. Показано, что фон для этого процесса определяется, в основном, прямым попаданием в счётчики электронов, рассеянных в атомах

остаточного газа в месте встречи. Проведено также предварительное обследование фона для наблюдения двойного тормозного излучения и рассеяния электронов на большие углы.

УСТАНОВКА С ВСТРЕЧНЫМИ ПОЗИТРОН-ЭЛЕКТРОННЫМИ ПУЧКАМИ

В Э П П - 2

I. Общая схема установки с встречными позитрон-электронными пучками на энергию 2 x 700 Мэв приведена на рис. II.

В качестве ускорителя-инжектора применяется созданный в ИЯФ синхротрон Б-3М на энергию до 300 Мэв (см. приложение 2 и / 25, 28/).

Выпуск электронов осуществляется с помощью специально разработанного генератора импульсов /41/. Основные параметры генератора приведены в приложении 2. Высокая точность синхронизации позволяет осуществлять параллельную работу нескольких генераторов; в системе выпуска-впуска ВЭПП-2 использовано 6 генераторов (в т.ч. один для запуска остальных).

Дефлектор представляет собой две короткозамкнутые плоские линии с разрезом для ввода электронов и временем установления около 5 нсек. Линии возбуждаются парафазным напряжением от двух генераторов. Электроны вводятся в дефлектор уменьшением частоты ускоряющего напряжения. Коэффициент выпуска не менее 80% при весьма малом фазовом объёме выпущенного пучка (см. приложение 2).

2. Выходящий из синхротрона электронный пучок с помощью системы квадрупольных линз и поворотных магнитов (см. рис. II) направляется либо непосредственно в камеру накопителя,

либо на электрон-позитронный конвертор (в последнем случае магнит I выключается). Конвертор /40/ представляет собой вольфрамовую пластинку толщиной около I радиационной длины. Для того, чтобы родившиеся позитроны имели минимальный фазовый объём, конвертор располагается в фокальной плоскости короткофокусных (фокусное расстояние около 15см) магнитных линз особой конструкции /39/. Эта система по расчёту позволяет получить коэффициент конверсии (отношение числа позитронов, захваченных в накопитель, к числу электронов, ускоренных в синхротроне) порядка 10^{-4} . Ввод пучка в накопительную дорожку осуществляется в вертикальной плоскости. Пучок вводится при помощи импульсных безжелезных магнитов. К настоящему времени использовался только прямой канал без блока конверсии. "Снимок" пучка на выходе из синхротрона и на входе в накопитель приведён на рис. 12, 13 .

3. Накопительная дорожка представляет собой слабофокусирующий рейстрек с четырьмя одинаковыми прямолинейными промежутками. Два промежутка используются для инжекции электронов и позитронов, в третьем расположен высокочастотный резонатор, противоположный резонаторному промежутку предназначен для проведения экспериментов. Квадранты выполнены в виде электромагнитов закрытого типа без выступающих полюсов (рис. 16). Наклон поверхности полюсов к горизонтали составляет $3^{\circ}35'$ и продолжается в область, занятую обмотками, что обеспечивает значение $n = 0,60$ с точностью не хуже $\pm 2\%$ во всём межполюсном зазоре. На рис.17-20 приведены основные результаты магнитных измерений. Магнитное поле в накопителе может поддерживаться с точностью лучше 0,1%. Подробно конструкция магнита описана в /43/ ; там же описана мето-

дика магнитных измерений.

4. Захват впускаемых позитронов и электронов в магнитное поле осуществляется подачей высокого напряжения соответственно на позитронный и электронный инфлекторы / 41,42 /. Позитронный инффлектор представляет собой две пластины, расположенные сверху и снизу от равновесной орбиты, занимающие по азимуту целый квадрант. Каждая из пластин (рис.15) представляет собой линию с волновым сопротивлением около 12 ом, нагруженную на активное сопротивление, равное волновому. Импульс высокого напряжения распространяется навстречу движению позитронов. При энергии впускаемых позитронов 100 Мэв оптимальным напряжением является 10 кв.

Электронный инффлектор выполнен в виде одной пластины, в остальном он аналогичен позитронному.

5. В накопителе применена вакуумная система с двойной камерой. Полюса магнита и латунные обечайки образуют внешнюю камеру (с резиновыми уплотнениями). Откачка внешней камеры до давления 10^{-6} торр ведётся в каждом промежутке паромасляными насосами. Внутренняя камера (в пределах квадранта) имеет форму тора прямоугольного сечения и изготовлена из меди. Эта камера прогревается до 300°C . Требование поддержания высокого вакуума (лучше 10^{-8} торр) в условиях мощного синхротронного излучения, вызывающего сильное газоотделение со стенок камеры, приводит к требованию обеспечения максимальной скорости откачки. Поэтому внутренняя камера откачивается во всех четырёх промежутках насосами типа "азотит" со скоростью откачки около 3000 л/сек каждый, при предельном вакууме $1 \cdot 10^{-9}$ торр. Это обеспечивает, по расчёту, при полном токе в дорожке 2А на энергии 700 Мэв эффективный вакуум около $1 \cdot 10^{-8}$ торр.

Подробно вакуумная система накопителя описана в /44,45/.

6. Высокочастотная система накопителя работает на первой гармонике частоты обращения частиц, равной 25 Мгц. Резонатор (см. рис. 15) полуволновый, нагруженный конденсатором из двух дисков; добротность около 4000. В настоящее время для раскачки резонатора используется генератор мощностью 25 квт., развивающий на резонаторе напряжение до 40 кв, достаточное для первых экспериментов. Монтируется генератор в десять раз большей мощности.

7. Система управления пучками имеет некоторые особенности по сравнению с применяемой на ВЭП-1. Для корректировки медианной поверхности по два внутренних витка обмотки электромагнита в каждом квадранте исключены из общей коммутации; в них от специальных регулируемых выпрямителей с малым уровнем пульсаций подаётся ток до 200 А, обеспечивающий перемещение магнитной медианной плоскости в каждом квадранте на ± 5 мм (при энергии инъекции). Радиальное положение орбиты корректируется шунтировкой соответствующих квадрантов. Для управления относительным положением по вертикали орбит электронов и позитронов, в квадрантах, свободных от инфлекторных пластин, сверху и снизу от орбиты расположены "разводящие пластины", на которые может подаваться постоянное напряжение до 50 кв.

В остальном система управления параметрами пучков аналогична применяемой на ВЭП-1.

Система наблюдения за пучками также аналогична применяемой на ВЭП-1.

8. К настоящему времени /38/ отлажен прямой ("позитронный") канал на электронах. Получен захват электронов в накопитель на энергии 110-150 Мэв. Проверена система коррекции магнитного поля непосредственно по "живущему" пучку. Ввиду того, что система прогрева внутренней вакуумной камеры ещё не включалась, время жизни при энергии 100 Мэв составляет сейчас около $1,5 \cdot 10^8$ сек. Энергия электронов в накопителе поднималась до 250 Мэв.

На рис. 23 приведена фотография пучка в накопителе.

МЕТОДИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Применяемые на наших установках методы измерения характеристик электронных и позитронных пучков можно разделить на два основных типа: методы, связанные с разрушением пучка, и методы, применение которых не приводит к потере частиц.

I. Методы наблюдения с разрушением пучка:

а) измерение заряда, попавшего на пробник (обычно свинцовый) применяется в ускорителях-инжекторах как при многооборотном сбросе пучка на пробник /27/ так и при однооборотном, а при большой энергии (выше десятка Мэв) только при однооборотном сбросе. Аналогичные пробники широко применяются в канализирующих системах и в накопителях комплексов для проводки пучка и настройки первых оборотов, а также для регистрации уходов пучка в каналах от выбранного положения. При достаточно большом токе (число частиц в импульсе больше 10^{10}) с помощью таких пробников легко проводятся измерения временных характеристик пучка. Широко

применяются многоламенальные пробники с одновременной регистрацией в каждом импульсе заряда, попавшего на каждую дольку.

б) при работе с малым числом частиц в импульсе (10^3-10^6) применяются полупроводниковые поверхностно-барьерные счётчики /46/. С помощью этих счётчиков можно производить как измерение числа частиц в импульсе, так и измерение временных характеристик сгустков (аппаратурное время нарастания определяется качеством применяемого усилителя и легко может быть сделано не больше 4 нсек). При большом числе частиц эти счётчики непосредственно применять нельзя. В диапазоне 10^6-10^8 частиц в импульсе, где трудно работать с обычными пробниками, удобно применять системы сцинтиллятор—световод—поверхностно-барьерный счётчик.

в) при точной настройке фокусирующих элементов каналов и измерений формы поперечного сечения пучка широко применяется фотографическая методика. Причём, достаточно плотности прошедших через фотоплёнку частиц порядка 10^{10} частиц/см², чтобы получить при применении приёмов обычной фотографии чёткое изображение пучка. Как правило, применяется плёнка ФТ-30.

Для тех же целей, при необходимости вести оперативные наблюдения, применяется система сцинтиллятор—телевизионная установка. Этот способ даёт хорошие результаты при числе частиц больше $5 \cdot 10^9$ в импульсе.

г) большое время жизни частиц в накопителях позволяет использовать подвижные диафрагмы (т.н. апертурные пробники) для точного определения положения равновесной орбиты на азимуте пробника. В наших условиях легко получить точность лучше 1мм при

скорости перемещения диафрагмы 5-10 мм/сек.

2. Методы наблюдения, не связанные с разрушением пучка.

а) для определения величины накопленного тока измеряется интенсивность синхротронного излучения в области 3000-7000Å. Обычно используются фотоумножители типа ФЭУ-15А. Калибровка измерителя тока производится путём измерения сигнала, соответствующего одному электрону (рис.24). Необходимая величина перекрытия по току ($10^{10}-10^{11}$ раз) достигается комбинированным применением оптического ослабителя, делением выходного сигнала ФЭУ и изменением чувствительности ФЭУ. Калибровка "по одному электрону" производится на энергии 100 Мэв на ВЭП-1 и 200 Мэв на ВЭП-2.

Для наблюдения последовательных оборотов в накопителе ВЭП-1 (время оборота 9нсек) оказалось возможным применить ФЭУ-36 и осциллограф с широкополосным усилителем. В накопителе ВЭП-2 при времени оборота 40нсек эта задача тривиальна.

С помощью синхротронного излучения удобно определять положение пучков в месте встречи, что производится по телевизору с помощью соответствующей оптической системы, правильно выставленной геометрически. Поперечные размеры грубо можно определять по экрану телевизора; точное определение производится фотографированием. С помощью фотографирования определяются поперечные размеры пучка и в ускорителях - инжекторах при большой энергии. Относительное фазовое положение и фазовые размеры сгустков определяются с помощью электронно-оптического преобразователя ПИМ-3. Преобразователь используется в режиме непрерывной круговой развёртки (на ВЭП-1 с частотой 110мгц, на ВЭП-2

с частотой 25 мгц). Напряжение развертки берётся от тракта питания соответствующего резонатора. Временное разрешение системы, полученное на ВЭП-1, достигает $5 \cdot 10^{-11}$ сек, что соответствует 1,5 см длины сгустка.

Для наблюдения за временными процессами в накопителях широко применяется обычная и скоростная киносъёмка.

б) на установках комплексов широко применяются электростатические пикап-электроды. Интегральные пикап-электроды с выделением определённых гармоник применяются в накопителях, где установившиеся фазовые размеры сгустков малы, для оценки абсолютного числа частиц на дорожке. Сложение и вычитание чётной и нечётной гармоники позволяет определить количество электронов и позитронов (накопитель ВЭП-2) или число частиц в разных сгустках (накопитель ВЭП-1); применяемая аппаратура позволяет сделать это при различии в определяемых числах не более, чем в 10 раз. Минимальный измеримый ток в накопителях - примерно 10 мка. В ускорителях - инжекторах, фазовые размеры сгустков в которых велики и меняются в процессе ускорения, с помощью аналогичных датчиков и приёмников проводятся измерения относительного числа частиц ускоренных в каждом цикле (в заданном режиме работы машины). Минимальный измеряемый ток в ускорителях - около 1 ма.

Для обнаружения когерентных фазовых колебаний и измерения их амплитуд используется сигнал с интегральных пикап-электродов, который после усиления подаётся на вход частотного детектора.

Дифференциальные пикап-электроды с выделением из сигнала

бетатронной или разностной частоты предполагается применять для обнаружения когерентных бетатронных колебаний.

в) весьма хорошие результаты при измерениях в каналах даёт применение импульсного одновиткового трансформатора тока с ферритовым сердечником. При числе частиц в сгустке большем, чем 10^9 , удаётся получить временное разрешение не хуже $2 \cdot 10^{-9}$ сек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К настоящему времени закончена физическая и техническая разработка всех основных систем установок со встречными электрон-электронными и позитрон-электронными пучками. Произведён монтаж, наладка и запуск обоих комплексов. Разработана методика измерений всех основных параметров пучков. Ведётся работа по получению больших электронных и позитронных токов и изучению (теоретическому и экспериментальному) эффектов электромагнитного взаимодействия встречных пучков. Идёт подготовка к проведению ядерно-физических экспериментов.

В заключение автор выражает глубокую благодарность за совместную работу по созданию комплексов со встречными пучками Г.И.Будкеру, А.А.Наумову, В.Л.Ауслендеру, Г.А.Блинову, Б.Г.Ерозолискому, А.В.Киселёву, А.А.Лившицу, В.С.Панасюку, С.Г.Попову, В.А.Сидорову, Г.И.Сильвестрову, Г.М.Тумайкину и всем сотрудникам, принимавшим участие в работе.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Обозначения:

- E - энергия электронов (позитронов) ; $\gamma = \frac{E}{mc^2}$;
 Π - периметр орбиты ;
 R - радиус кривизны орбиты в квадранте с магнитным полем ;
 $\lambda = \frac{\Pi}{2\pi R}$;
 H - величина магнитного поля ;
 n - показатель спада магнитного поля ;
 ν_r, ν_z - частоты бататронных колебаний (радиальных и вертикальных) ;
 U_0 - амплитуда высокочастотного напряжения на резонаторе (кв) ;
 q - кратность высокочастотного напряжения ;
 φ_s - равновесная фаза ;
 p - давление остаточного газа (торр)
 N - число частиц в сгустке ;
 α_r, α_z - поперечные среднеквадратичные размеры (ширина и высота) сгустка электронов (позитронов) ;
 α_l - среднеквадратичная длина сгустка ;
 τ - время жизни пучка.

1. Размеры сгустка

а). Возбуждение квантовыми флуктуациями излучения:

$$\text{ширина: } \sqrt{a_z^2} \Big|_{\text{кв}} = 1,75 \cdot 10^{-5} \sqrt{\frac{R}{n(1-n)}} \gamma$$

$$\text{высота: } \sqrt{a_z^2} \Big|_{\text{кв}} = 6 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{R}{n}}$$

$$\text{длина: } \sqrt{a_z^2} \Big|_{\text{кв}} = 7 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{\lambda R q \gamma^3}{(3-4n) V_0 \sin \varphi_s}}$$

б). Поперечные размеры вследствие многократного рассеяния на атомах остаточного газа (воздуха):

$$\sqrt{a_z^2} \Big|_{\text{мн}} = \sqrt{a_z^2} \Big|_{\text{кв}} = 4,6 \cdot 10^3 (\lambda R)^2 \sqrt{\frac{P}{\lambda V_z^2 \gamma^5 \ln(10'' \frac{\lambda R^2 P}{\gamma^3})}}$$

2. Время жизни пучка из-за одноэлектронных процессов.

а). Однократное рассеяние на атомах остаточного газа (воздуха):

$$\tau_{\text{ат}} = 2,5 \cdot 10^{-5} \left[\frac{\varphi_0 + \frac{1}{2} \sin 2\varphi_0}{A_z^2 V_z^2} + \frac{(\frac{1}{2} - \varphi_0) + \frac{1}{2} \sin 2\varphi_0}{A_z^2 V_z^2} \right]^{-1} \frac{\gamma^2}{(\lambda R)^2 P}$$

где $\tan \varphi_0 = \frac{A_z V_z}{A_z V_z}$; $2A_z \cdot 2A_z$ - апертура накопительного кольца.

б). Однократное рассеяние на электронах остаточного газа:

$$\tau_{\text{эл}} = 4,7 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{\lambda(1-n) V_0 \gamma (\sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s)}{q}} \cdot \frac{1}{P}$$

в). Тормозное излучение на атомах остаточного газа:

$$\tau_{\text{торм}} = \frac{2,4 \cdot 10^{-4}}{\ln \left(\frac{\Delta E}{E} \right)_{\text{max}}^{-1} - 0,3} \cdot \frac{1}{P}$$

где

$$\left(\frac{\Delta E}{E} \right)_{\text{max}} = \sqrt{\frac{2 \lambda (1-n) e V_0 (\sin \varphi_s - \varphi_s \cos \varphi_s)}{\pi q E}}$$

г). Квантовые флуктуации излучения:

$$\tau_{\text{кв}} = 7,2 \cdot 10^4 \frac{q R^2 (1-n)}{(3-4n)^2 \gamma^4 H_s} \exp \left[4,8 \cdot 10^{-3} \frac{(3-4n) \lambda}{q} \gamma H_s \right]$$

где

$$H_s = 2 \sqrt{s^2 - 1} - \sqrt{4 + 2 \arcsin \frac{1}{s}}; \quad s = \frac{e V_0}{\Delta W_{0,5}}$$

$\Delta W_{0,5}$ - радиационная потеря энергии электроном за оборот.

Суммарное время жизни пучка из-за всех одноэлектронных процессов:

$$\tau_{\Sigma} = \left(\sum \frac{1}{\tau_i} \right)^{-1}$$

3. Время жизни из-за взаимного рассеяния электронов пучка (эффект ААА)

$$\frac{dN}{dt} = -\varepsilon N^2 = -\frac{N}{\tau_{\text{ААА}}}$$

где временем жизни условно названа величина:

$$\tau_{\text{ААА}} = \frac{1}{\varepsilon N} = 2,3 \cdot 10^{14} \frac{(\Delta E/E)_{\text{max}}^2 \gamma^3 V_z a_z^2 \alpha_z}{\lambda R N} \left[\ln \frac{V_z a_z \gamma}{2 \lambda R (\Delta E/E)_{\text{max}}} - 0,64 \right]^{-1}$$

П Р И Л О Ж Е Н И Е 2

Основные параметры установок комплексов

1. Синхротрон Б-2С

Максимальная конечная энергия	до	80 Мэв
Радиус равновесной орбиты		41,2 см
Энергия инжекции		20 кв
Время ускорения		900 мксек
Частота повторения циклов ускорения	1 раз в	15сек
Параметры выпущенного пучка в используемом режиме:		
энергия		50 Мэв
число частиц в импульсе		10^{10}
радиальный размер	\pm	4 мм
вертикальный размер	\pm	3 мм
$\Delta\alpha_z$	\pm	$5 \cdot 10^{-3}$
$\Delta\alpha_z$	\pm	$5 \cdot 10^{-3}$
$\frac{\Delta E}{E}$	\pm	$2 \cdot 10^{-3}$
длительность сгустка		$2 \cdot 10^{-9}$ сек

2. Накопитель ВЭП-1

Энергия накопления		40-50 Мэв
Максимальная энергия		130 Мэв
Равновесный радиус		43 см
Частота ускоряющего напряжения		222 Мгц
Амплитуда ускоряющего напряжения	до	5 кв

Рабочая апертура		$4 \times 4 \text{ см}^2$
Частоты бетатронных колебаний (безразмерные) :		
ν_z		0,63
ν_z		0,78
Вакуум		$(5-7) \cdot 10^{-8}$ торр

3. Синхротрон Б-3М

Максимальная конечная энергия	до	300 Мэв
Средний радиус равновесной орбиты		110 см
Частота ускоряющего напряжения		113 Мгц
Параметры выпущенного пучка в используемом режиме:		
энергия		100 - 150 Мэв
число частиц в импульсе		10^{10}
частота повторения циклов		1 гц
радиальный размер	\pm	3 мм
вертикальный размер	\pm	2 мм
α_z	\pm	10^{-3}
α_z	\pm	10^{-3}
$\frac{\Delta E}{E}$	\pm	10^{-3}

4. Система выпуска-впуска (Характеристики генератора)

Напряжение в импульсе (на согласованную нагрузку)	до	50 кв
Волновое сопротивление зарядной линии		50 ом

Частота повторения	до 15 гц
Длительность импульса	до 40 нсек
Крутизна переднего фронта	2 нсек
Точность синхронизации	\pm 1 нсек

5. Накопитель ВЭП-2

Энергия накопления	100-150 Мэв
Максимальная энергия	650-700 Мэв
Средний радиус равновесной орбиты	190 см
Частота ускоряющего напряжения	25 Мгц
Амплитуда ускоряющего напряжения до	40 кв
Рабочая апертура	II x 8 см ²
Частоты бетатронных колебаний (безразмерные):	
ν_z	0,72
ν_x	0,87
Вакуум (в настоящее время)	$3 \cdot 10^{-8}$ торр

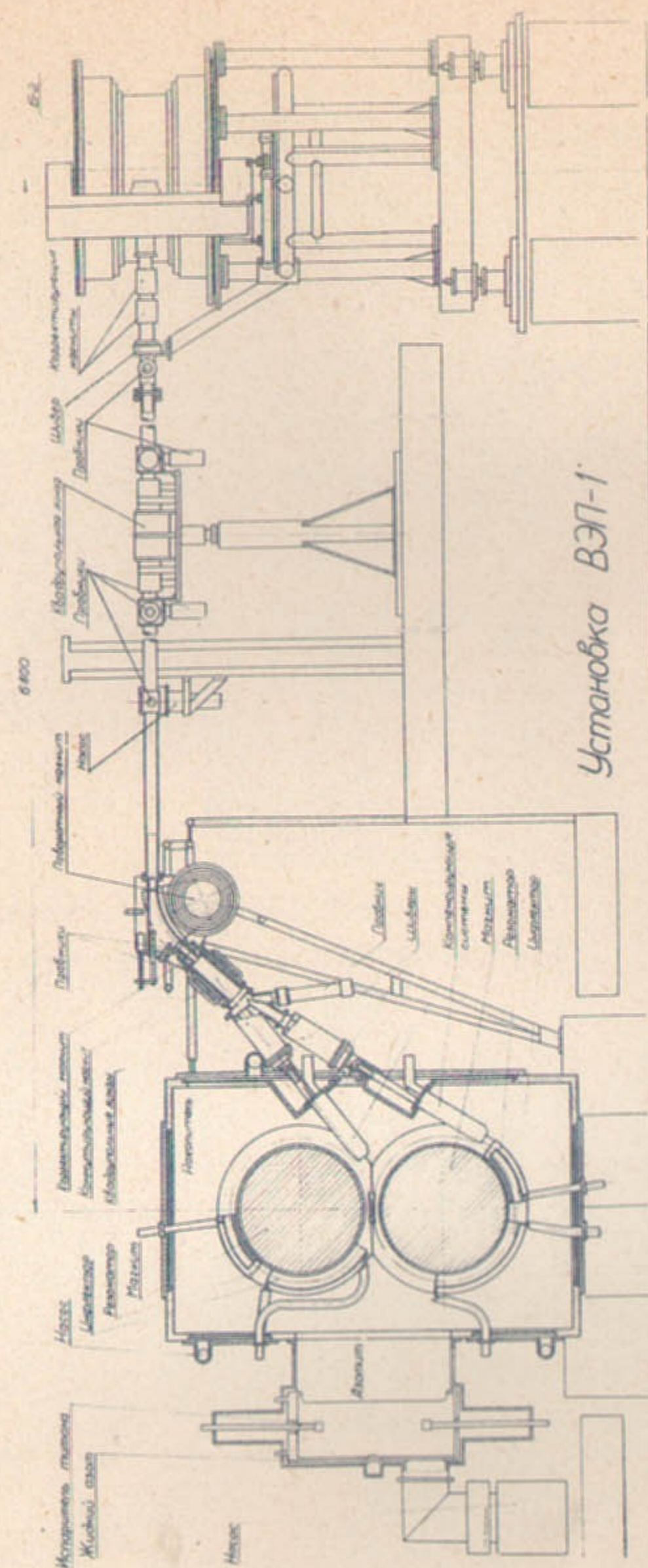


Рис. 1.

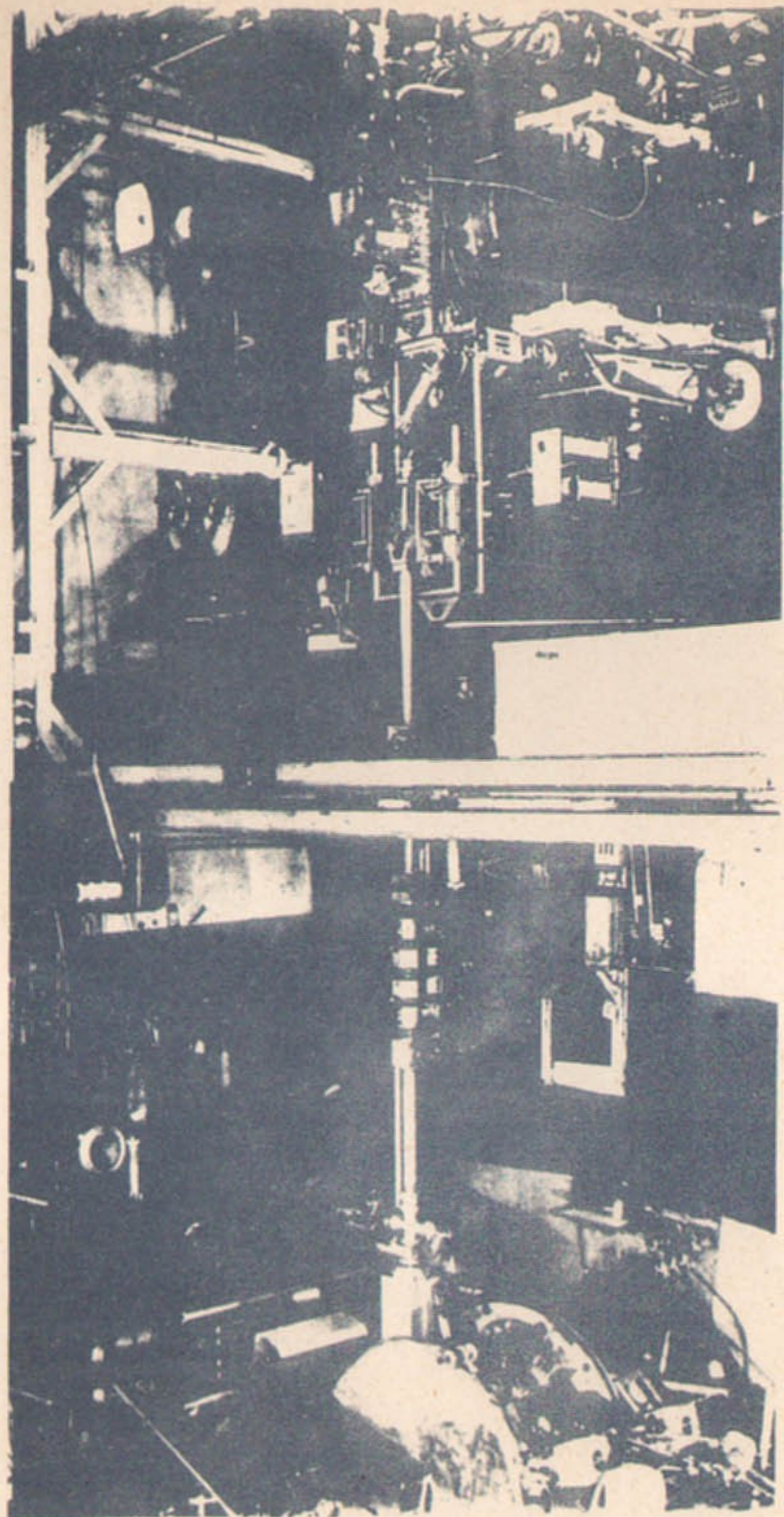


Рис 2.

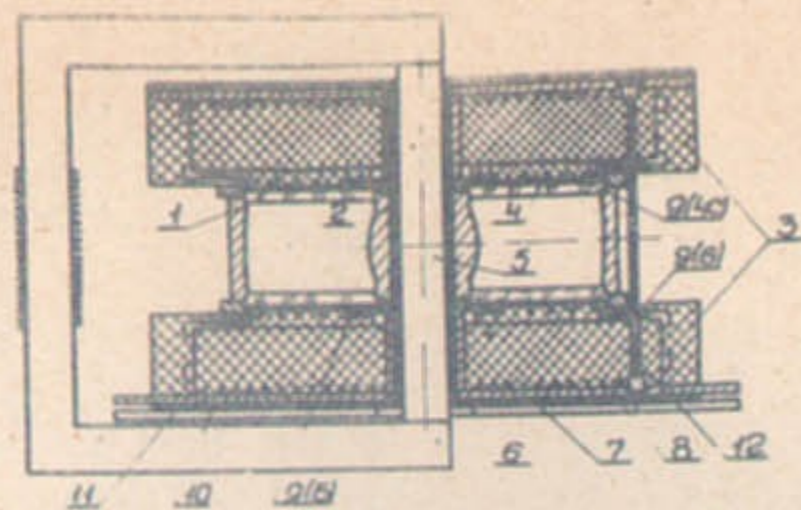


Рис 3



4

Рис 4



Рис 5.

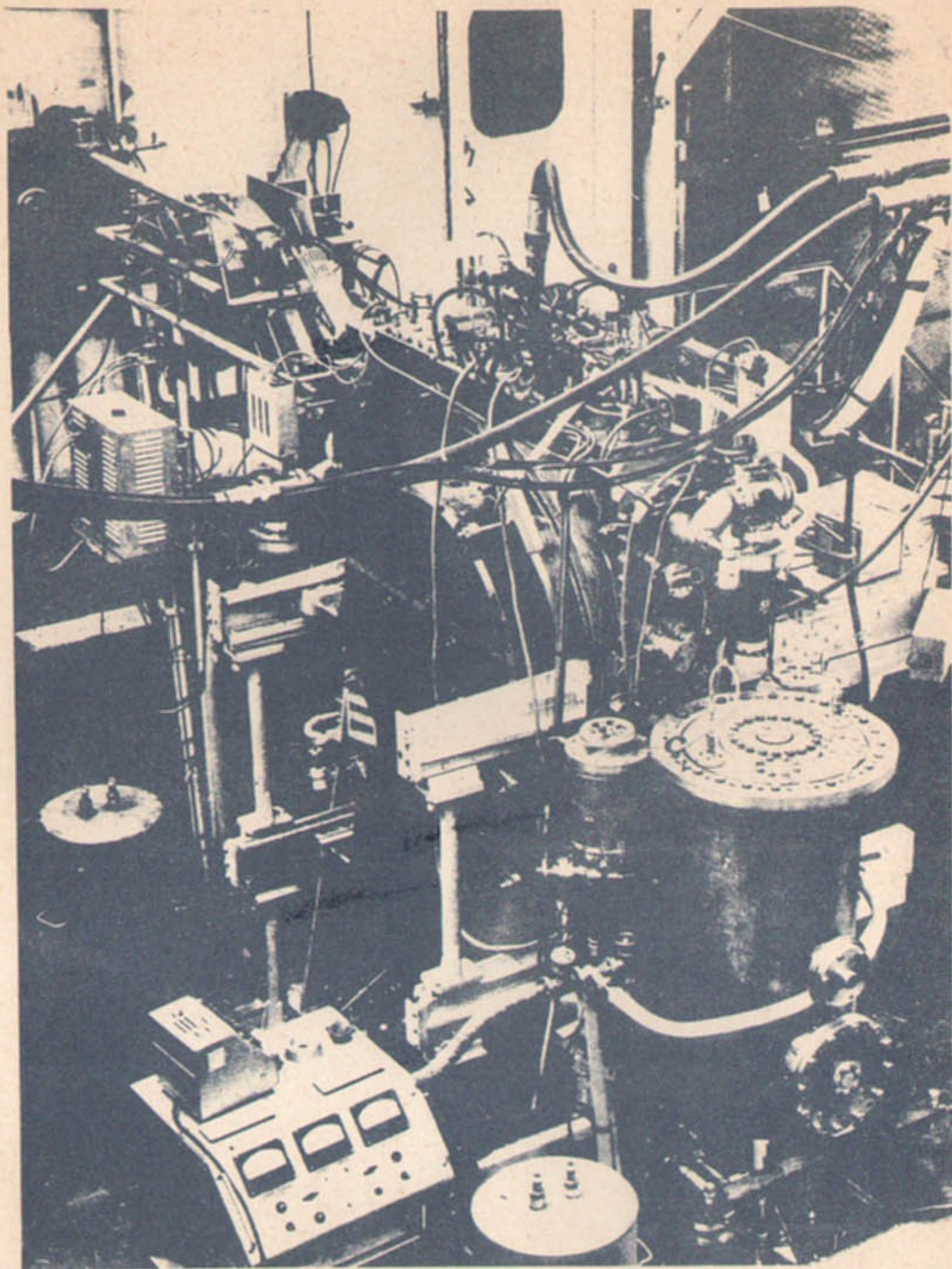


Рис 6.

Азимутальная неоднородность поля

$$h(\varphi) = \frac{H(\varphi) - H_0}{H_0} \% ; \text{ отсчёт азимута от места встречи}$$

Верхняя дорожка

$$r = r_0 = 429 \text{ мм}$$

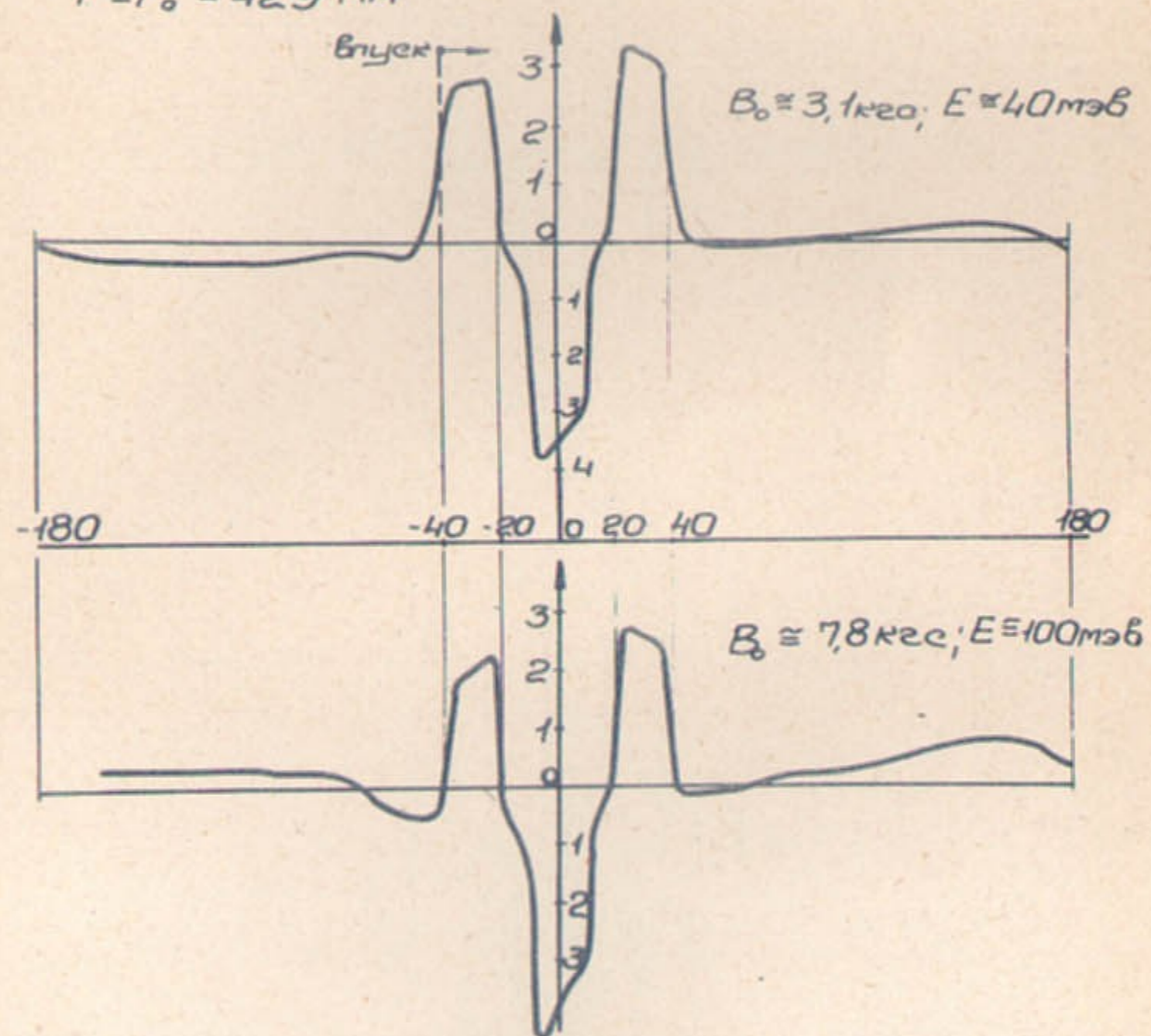


Рис 7

Нижняя дорожка
 $r = r_0 = 429 \text{ мм}$

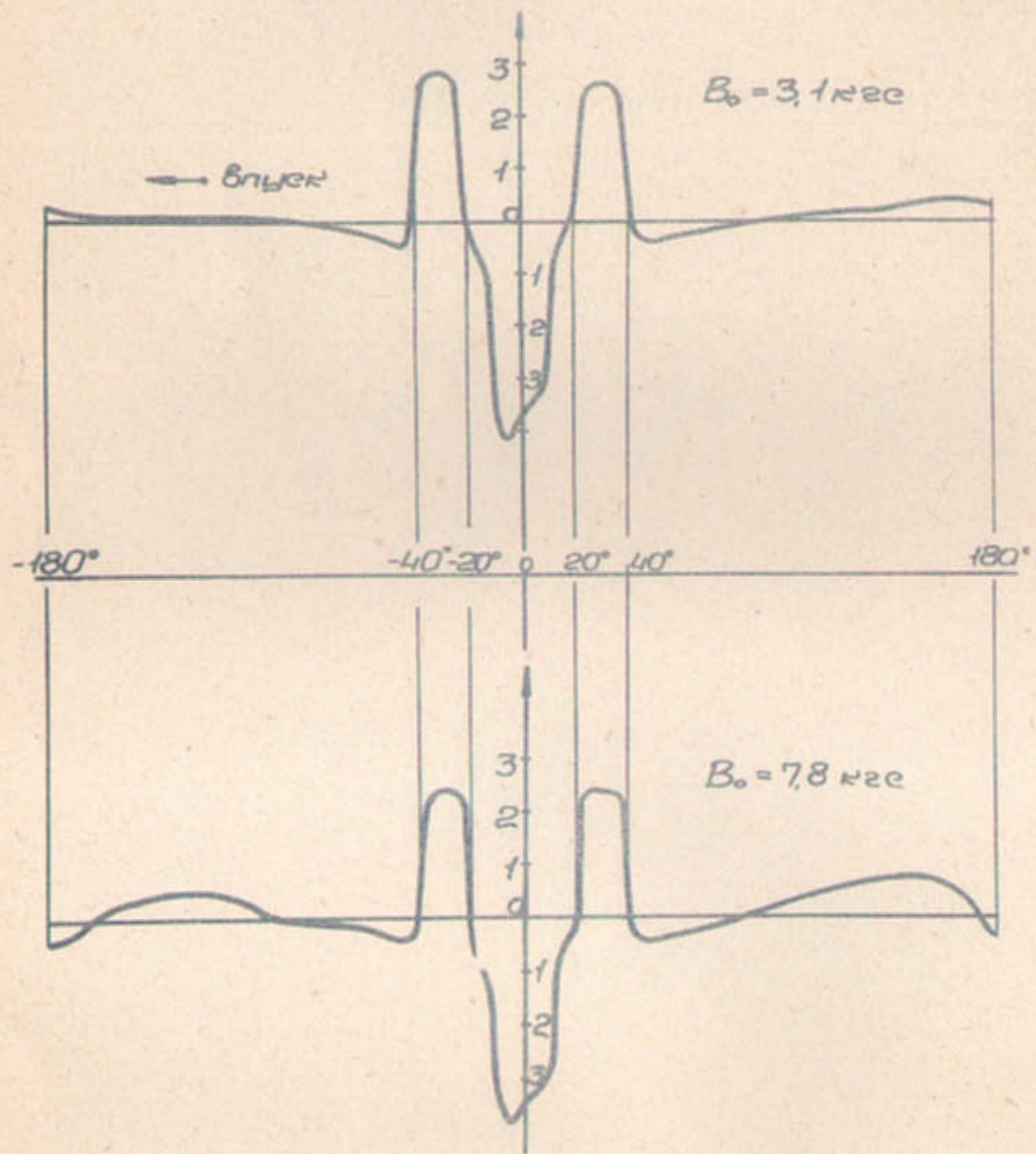


Рис. 8.

Азимутальное распределение π

Верхняя дорожка
 $r = r_0 = 429 \text{ мм}$

Идеализированные
 результаты измерений

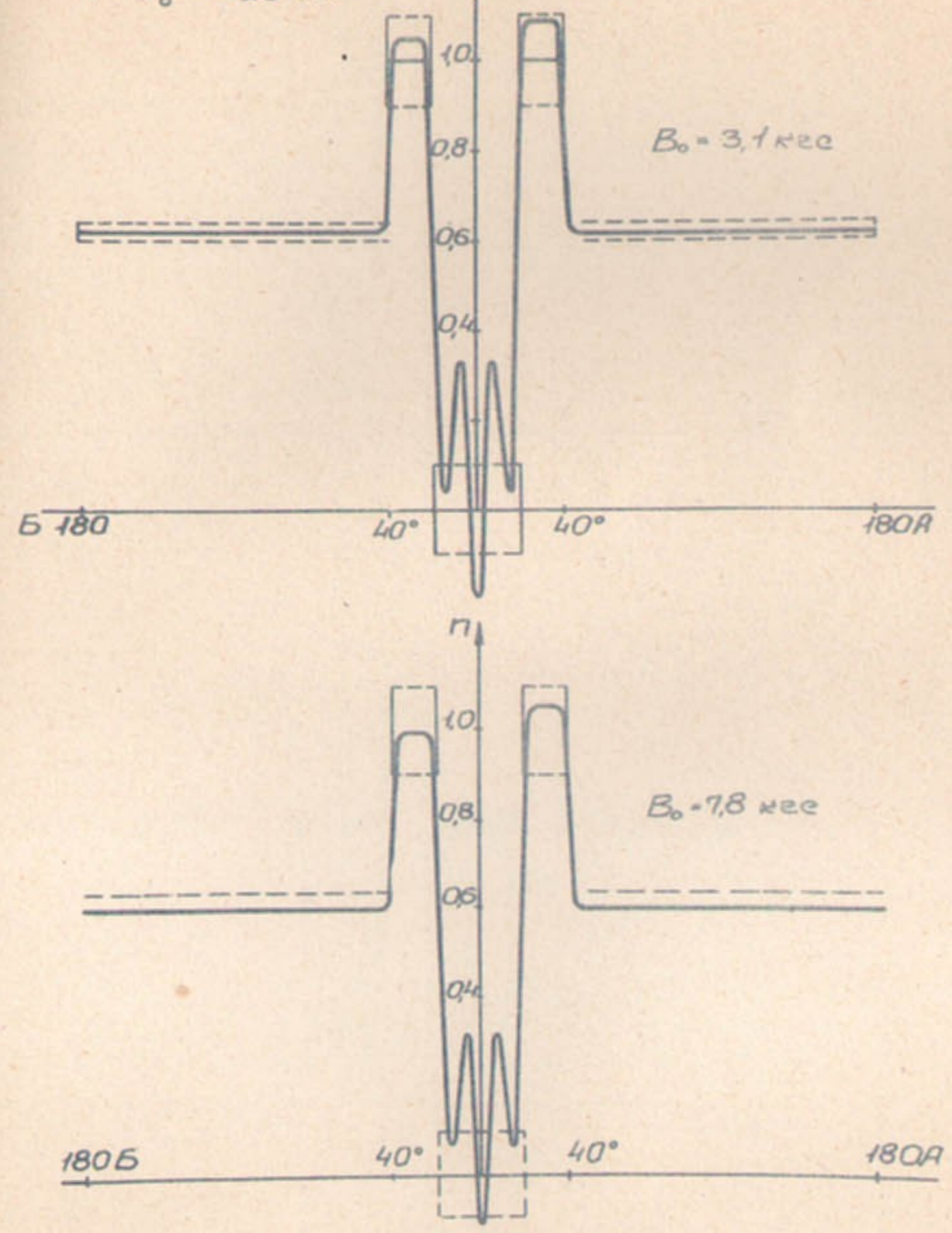


Рис. 9.

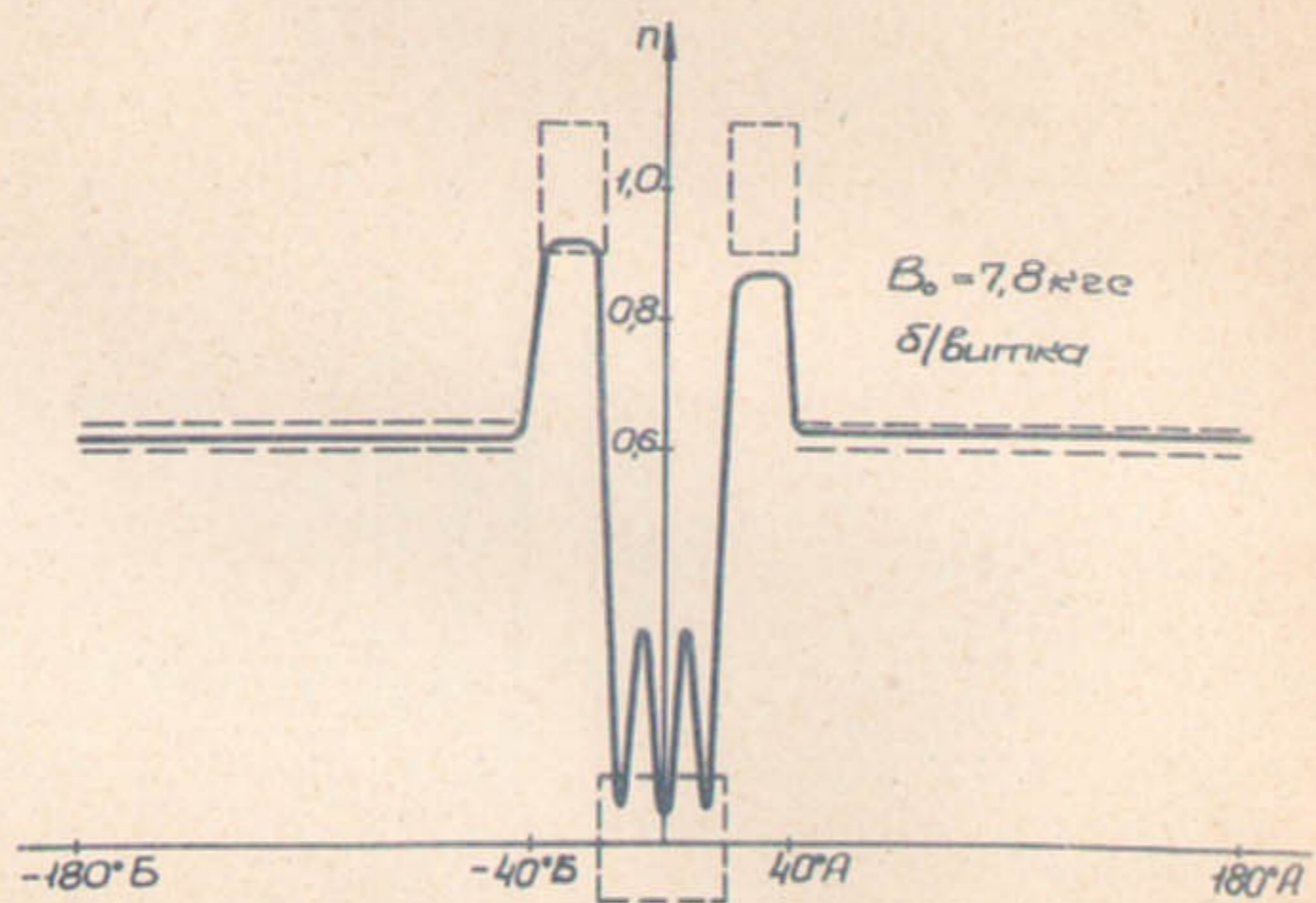
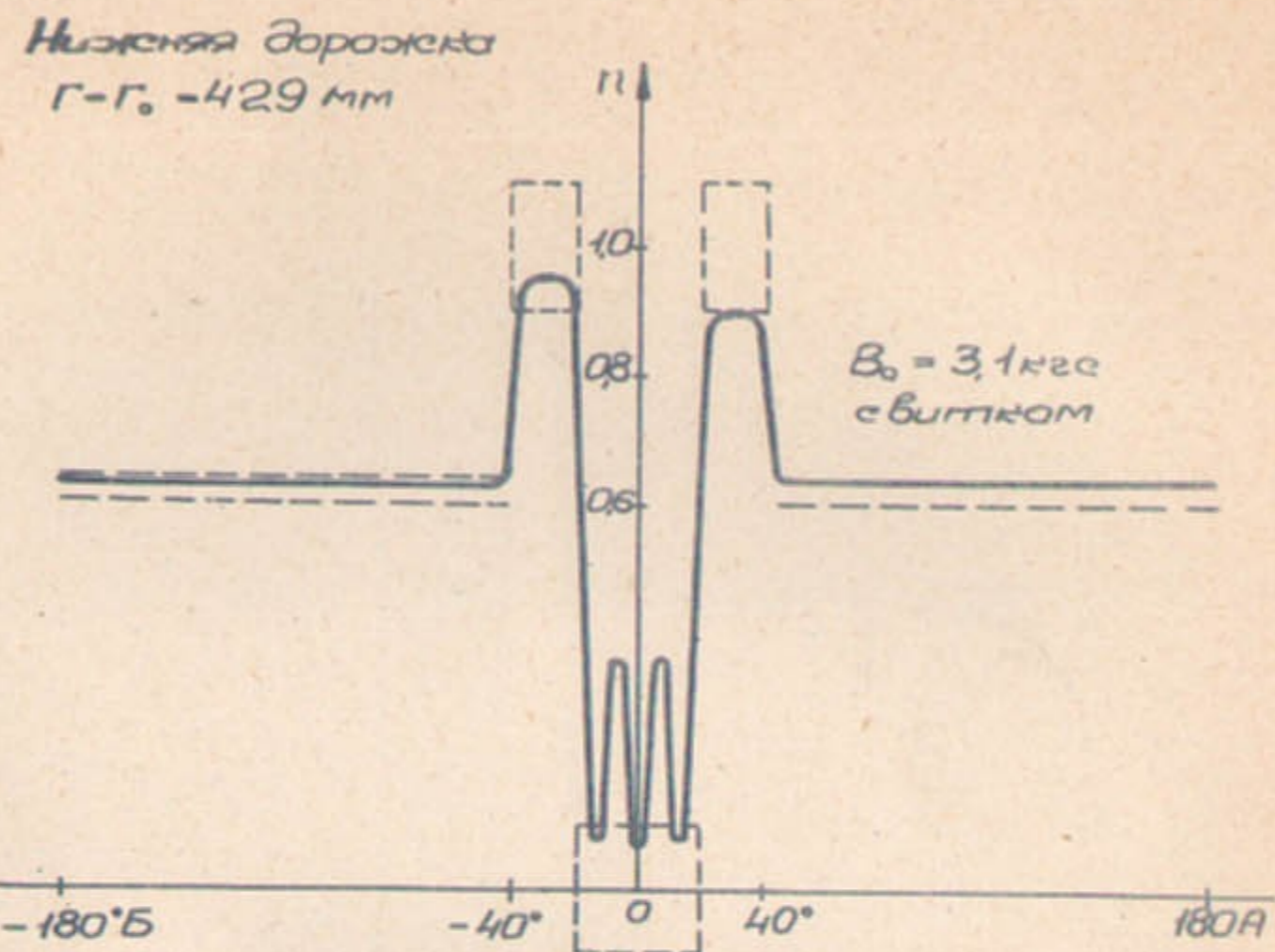


Рис. 10.

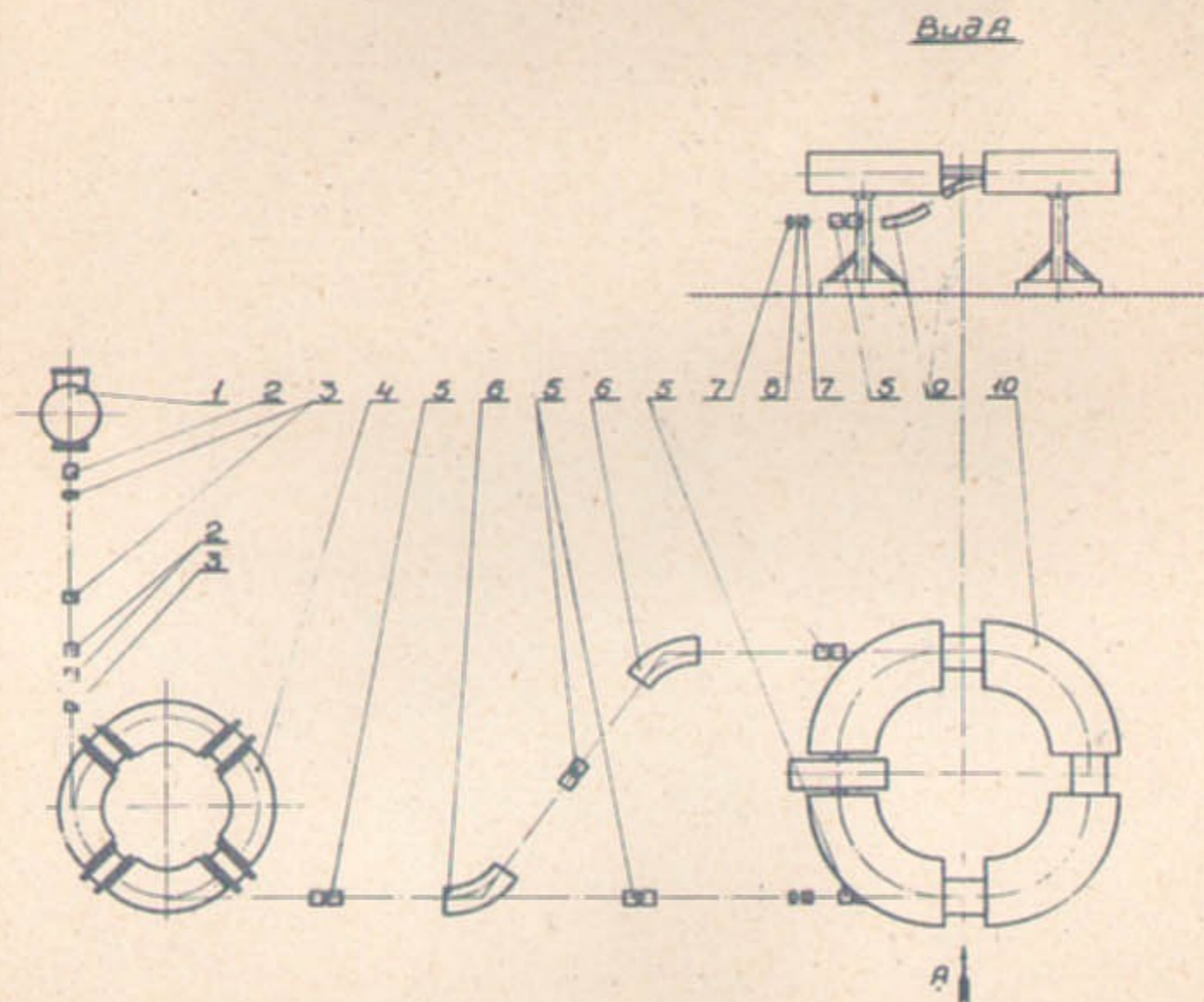


Рис. 11

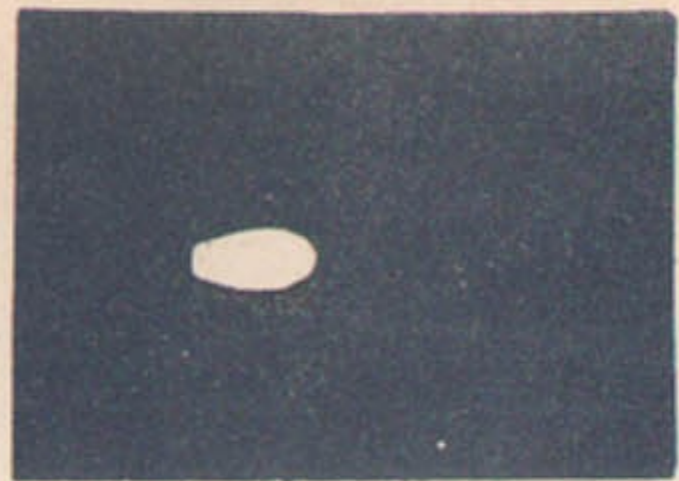


Рис 12.



Рис 13.

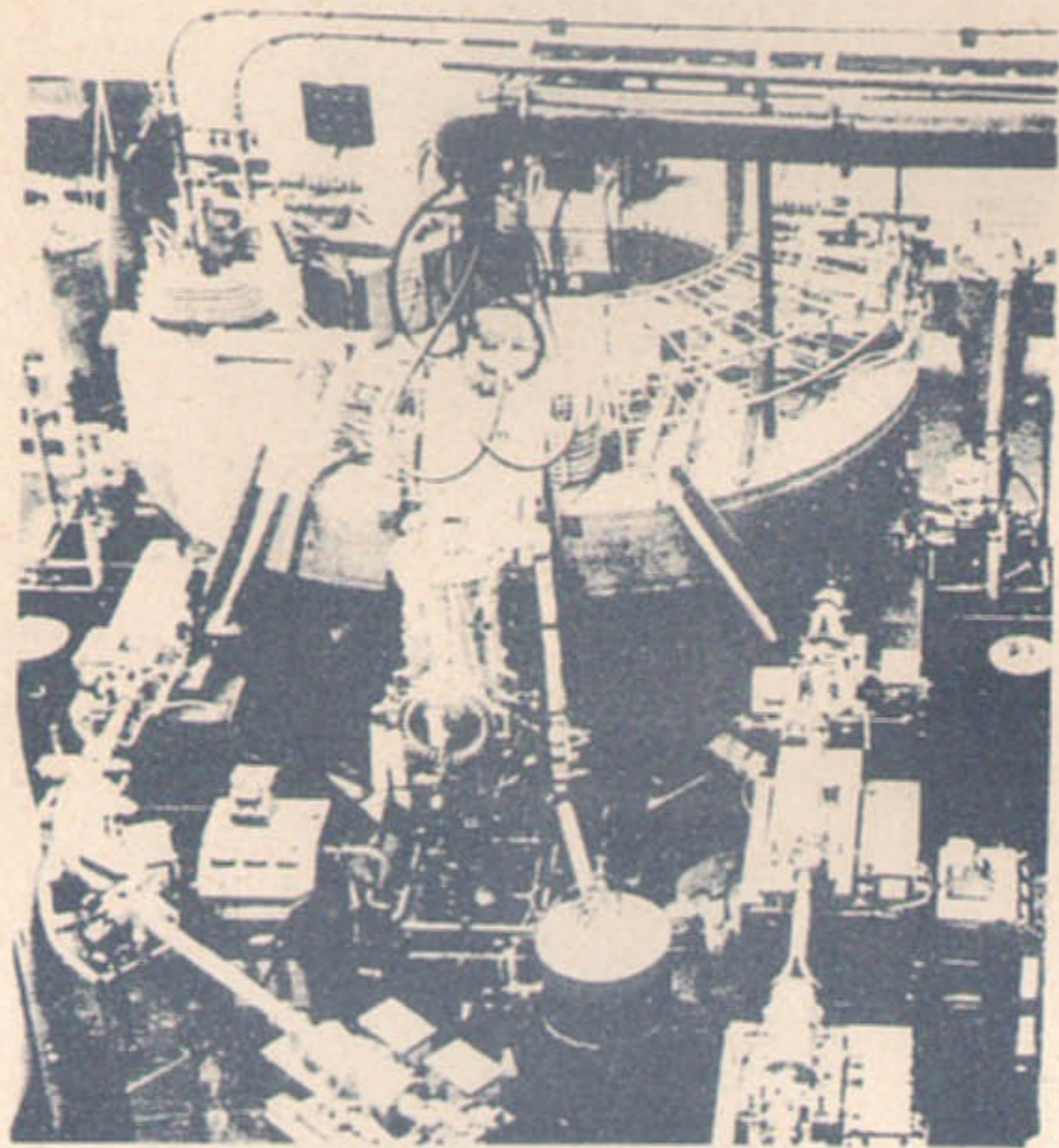


Рис. 14

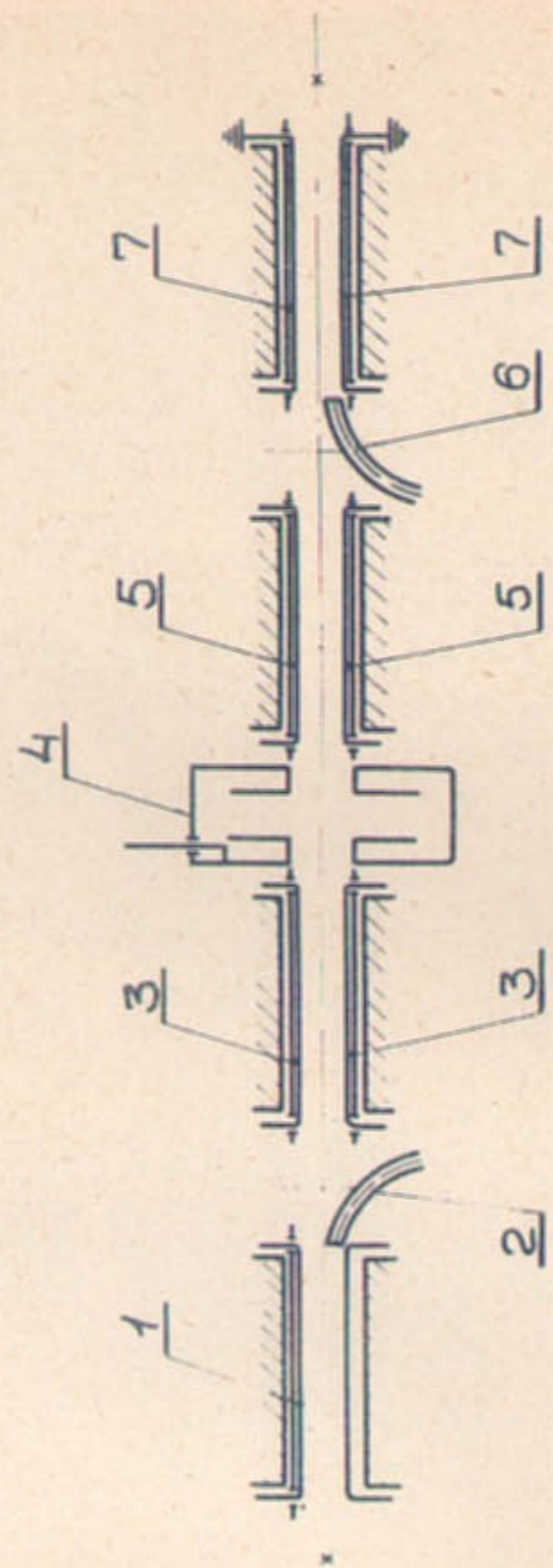


Рис 15.

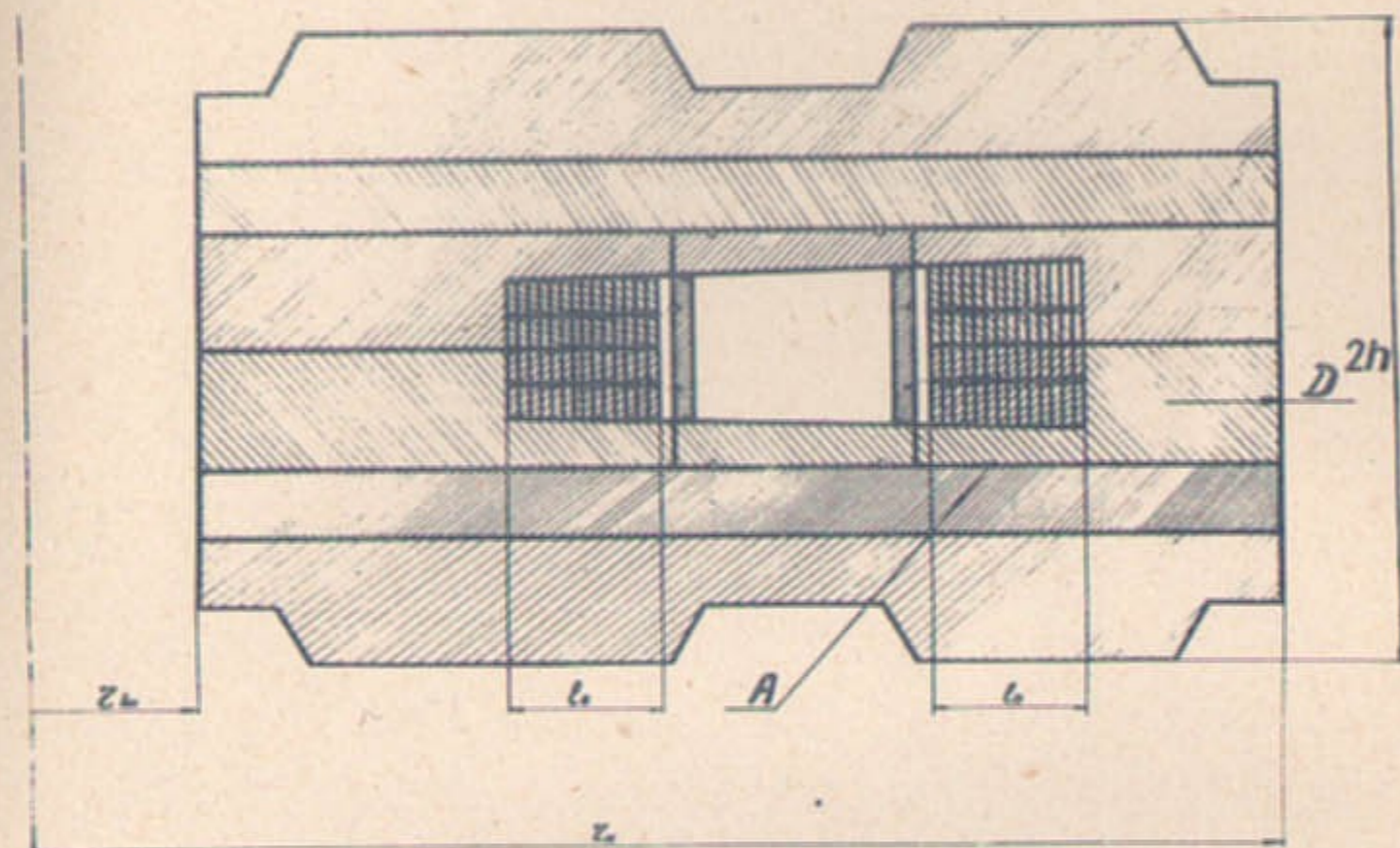


Рис 16

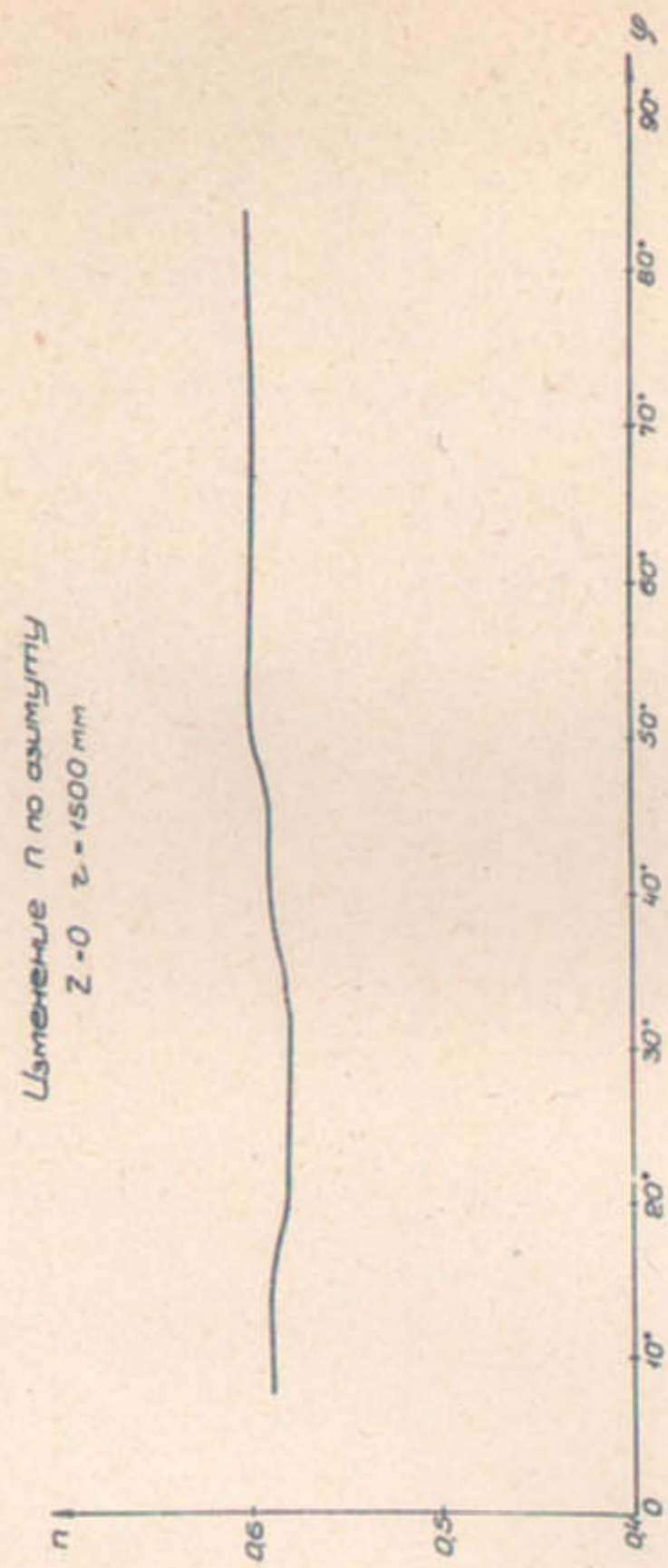


Рис 17.

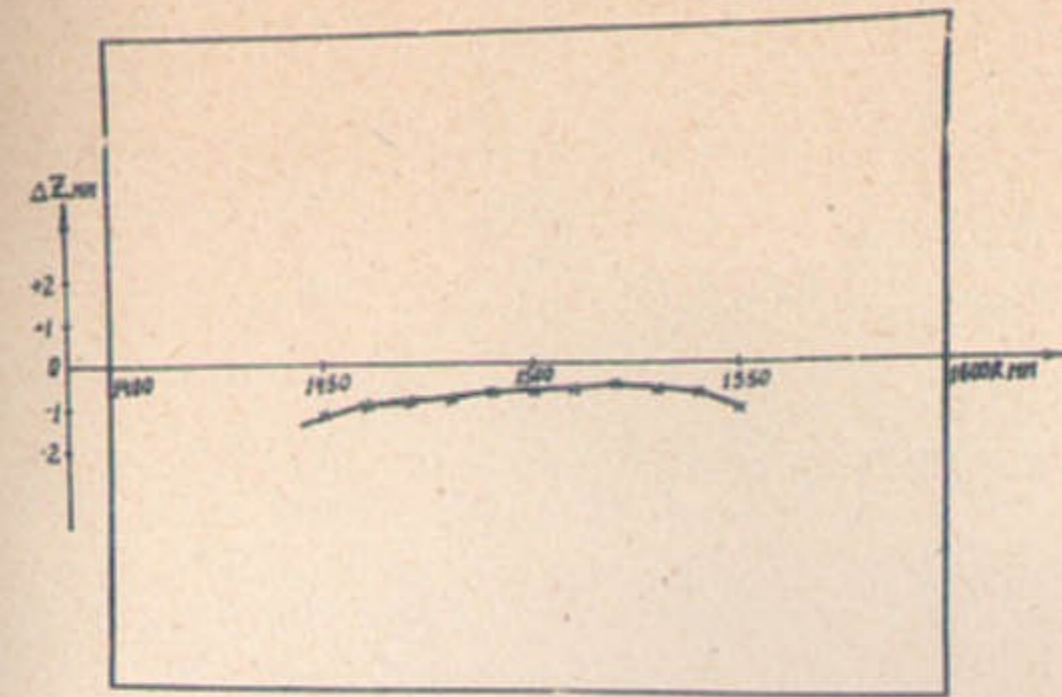


Рис 18.

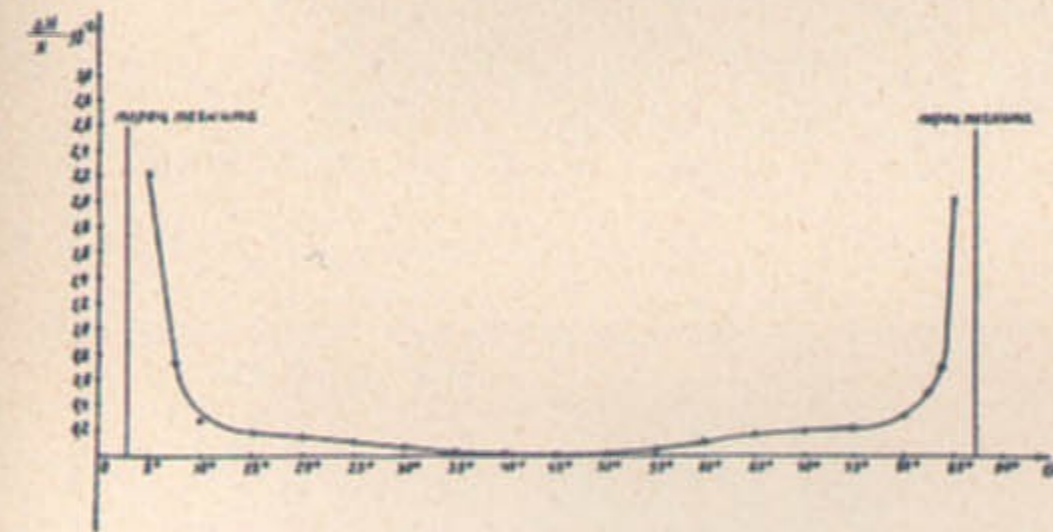


Рис 19.

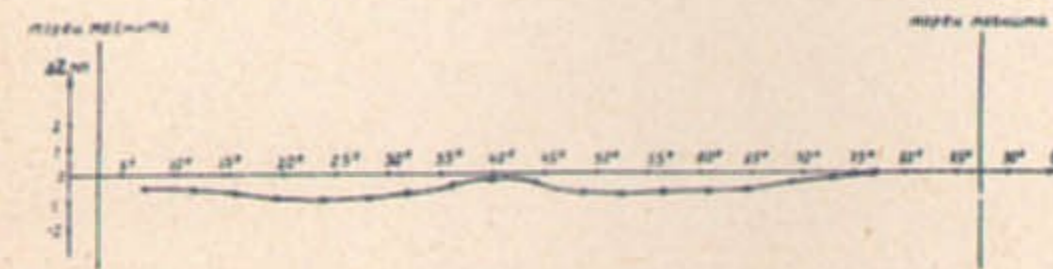


Рис 20.



Рис 21



Рис 22

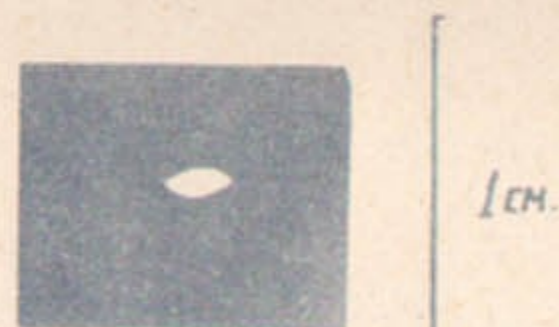


Рис 23



Рис 24

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. I. Общая схема установки ВЭП-I .

Рис. 2. Общий вид установки ВЭП-I.

Рис. 3. Конструктивная схема синхротрона Б-2С:

- 1) внешняя стенка вакуумной камеры ;
- 2) внутренняя " " ;
- 3) дополнительные витки, создающие магнитное поле сдвига ;
- 4) вакуумная крышка ;
- 5) сердечник ;
- 6) ярмо ;
- 7) экраны ;
- 8) силовой экран ;
- 9) обратные витки ;
- 10) витковые крышки.

Рис. 4. Фотография пучка, выпущенного из Б-2С.

Рис. 5. Фотография пучка на входе в накопитель ВЭП-I.

Рис. 6. Общий вид накопителя ВЭП-I.

Рис. 7-10. Некоторые характеристики магнитного поля накопителя ВЭП-I.

Рис. II. Общая схема установки ВЭП-2:

- 1) ИЛУ-инжектор синхротрона Б-3М;
- 2) элементы канала ИЛУ-Б-3М;
- 3) синхротрон Б-3М;
- 4) квадрупольные линзы канала Б-3М-накопитель;
- 5) поворотные магниты " " ;
- 6) короткофокусные линзы блока конверсии ;
- 7) конвертор ;
- 8) впускные поворотные магниты ;
- 9) накопитель .

- Рис. 12. Фотография пучка на выходе из Б-3М.
- Рис. 13. Фотография пучка на входе в накопитель ВЭП-2.
- Рис. 14. Общий вид накопителя ВЭП-2.
- Рис. 15. Продольная развёртка накопителя ВЭП-2(схема):
 1)электронный инфлектор ;
 2)верхний электронный впускной магнит;
 3)разводящие пластины;
 4)резонатор ;
 5)разводящие пластины ;
 6)верхний позитронный впускной магнит;
 7)позитронный инфлектор ;
- Рис. 16. Поперечный разрез магнита накопителя ВЭП-2.
- Рис. 17-20. Некоторые характеристики магнитного поля накопителя ВЭП-2.
 17. Азимутальный ход показателя спада.
 18. Радиальный ход медианной поверхности.
 19. Азимутальный ход поля.
 20. Азимутальный ход медианной поверхности.
- Рис. 21. Фотография пучка в Б-2С (энергия 50 Мэв).
- Рис. 22. Фотография пучка в накопителе ВЭП-1(энергия 40 Мэв).
- Рис. 23. Фотография пучка в накопителе ВЭП-2(энергия 200Мэв)
- Рис. 24. Абсолютная калибровка измерительного фотоумножителя "по одному электрону" (ВЭП-1, энергия 100 Мэв, ФЭУ-15А, самописец ПСР-13).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kerst D., Kole F. et al. *Phys. Rev.*, 102, 59
2. O'Neil J. *CERN Symp.*, 19562
3. А.К.Вальтер, И.А.Гришаев и др. Установка для встречных электронных пучков с энергией 2 x 100. ФТИ АН УССР.
4. C. Bernardini, G. F. Corazza, G. Ghigo and B. Touschek "The Frascati Storage Ring" *Nuovo Cimento*, vol. XVIII, 1960.
5. F. Amman, R. Andreani et al. *Status Report on the 1,5 Gev Electron-Positron Storage ring - ADONE*
 Международная конференция по ускорителям, Дубна, 1963г.
6. H. Bruck. *The Orsay Project of a Storage ring for electrons and positrons on 450 Mev maximum energy.*
 Международная конференция по ускорителям, Дубна, 1963г.
7. Ю.М.Адо, К.А.Беловинцев, А.Я.Беляк, Е.Г.Бессонов, О.Б.Демьяновский, В.А.Скорин, П.А.Черенков, В.С.Ширченко "Накопление частиц в синхротроне. Международная конференция по ускорителям, Дубна, 1963г.

8. *F. A. Terzer et al*
The CERN Electron Storage Ring model
Международная конференция по ускорителям, Дубна, 1963г.
9. Г.И.Будкер, А.А.Наумов и др. работы по встречным электронным, позитрон-электронным, и протонным пучкам ИЯФ СО АН СССР. Доклад на Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963г.
10. С.С.Шахиджанов. Об устойчивости фазового режима в ускорителях с накоплением большого тока. Отчёт ИЯФ СО АН СССР, 1961г.
11. С.А.Хейфец, А.И.Барышев. Влияние пучка на резонатор. Радиотехника и электроника, 1962, т.7, вып.3.
12. *L. J. Lasslet V K. Neil and A. M. Sessler*
Transverse resistive instabilities of intense coasting beams in particle accelerators UCRL-11090
13. *M. Q. Barton et al.*
Rev of Scient Instr 35.5 (1964)
14. *The stacked beam instability in the MURA 50 Mev accelerator.*
Technical note of MURA staff,
17 June 1963.

15. *J. O'Neil "Proceedings of the 1963 Summer Study on storage rings, accelerators and experimentation on super high energies" BNL 7534 (1963)*
16. *Shiff L. J. Rev. Scient. Instr., 17, 6 (1946)*
17. Л.В.Иогенсен, М.А.Рабинович ЖЭТФ 37 I 118-124 (1959).
18. С.С.Шахиджанов "Когерентное излучение электронов в кольцевой металлической камере. Отчёт ИЯФ СО АН СССР, 1961г.
19. *J. O'Neil A. M. Sessler*
Rev. Scient. Instr., 32, 3, 18 (1961)
20. Г.И.Будкер, Б.Г.Ерозолимский, А.А.Наумов. Комплекс установок со встречными пучками и постановка опытов по упругому рассеянию электронов. Доклад на Всесоюзном совещании по физике и технике метода встречных пучков, Харьков, 1962г.
21. Г.И.Будкер, А.А.Наумов и др. Работы по встречным электронным, электрон-позитронным и протонным пучкам. Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям со встречными пучками и физике частиц сверхвысоких энергий. Новосибирск, 1963г.
22. Г.И.Будкер, А.А.Наумов и др. Состояние работ по установке со встречными электронными пучками ВЭП-1. Доклад на Всесоюзном совещании по новым методам ускорения заряженных частиц. Г.Новосибирск, 1964г.
23. А.Н.Скринский. Синхротронный режим в установках типа Б-2, Отчёт ИЯФ, 1958г.

24. Г.И.Будкер, А.Х.Кадымов, А.А.Наумов, В.С.Панасюк, С.Г.Попов, А.Н.Скринский. "Безжелезный импульсный синхротрон на энергии 70-100 Мэв. Материалы совещания по физике и технике метода встречных пучков, Харьков, 1962г.
25. Г.И.Будкер, А.А.Наумов и др. Работы по сильноточным электронным ускорителям Института ядерной физики СО АН СССР. Доклады Всесоюзного совещания по ускорителям со встречными пучками и физике частиц сверхвысоких энергий. Новосибирск, 1963г.
26. Л.Н.Бондаренко "Импульсный однооборотный выпуск пучка электронов с энергией 50 Мэв из синхротрона Б2-С. ИЯФ СО АН СССР. Диссертация на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, Новосибирск, 1963г.
27. С.Г.Попов. Сильноточный синхротрон Б-2С и его применение в качестве инжектора установлен с встречными электрон-электронными пучками. Новосибирск, 1964г.
28. Г.И.Будкер, А.А.Наумов и др. Работы по сильноточным электронным ускорителям Института ядерной физики СО АН СССР. Доклад на Международной конференции по ускорителям, Дубна, 1963г.
29. Е.С.Миронов, Г.И.Сильвестров. Канализирующий тракт установки ВЭП-1. Доклад на Всесоюзном совещании по физике и технике метода встречных пучков, Харьков, 1962г.
30. Л.С.Коробейников. Особенности магнитной системы и измерения магнитного поля на установке ВЭП-1. Отчёт ИЯФ. Новосибирск 1963г.
31. С.И.Мишнев. Расчёт впуска в однократную накопительную дорожку ВЭП-1. Отчёт ИЯФ СО АН СССР, 1963г.
32. В.А.Борисов, Г.И.Острейко, В.С.Панасюк, Л.И.Юдин. Высокочастотное питание установок со встречными пучками. Доклад на Всесоюзном совещании по физике и технике метода встречных пучков, Харьков, 1962г.
33. Э.И.Зинин, С.Г.Попов, А.Н.Скринский. Световые измерения на комплексе ВЭП-1. Доклад на Всесоюзном совещании по новым методам ускорения заряженных частиц, Новосибирск, 1964г.. Отчёт ИЯФ СО АН СССР.
34. А.Н.Скринский, Т.П.Стародубцева. Применение электростатических пикап-электродов на комплексах ВЭП-1 и ВЭПП-2. Доклад на Всесоюзном совещании по новым методам ускорения заряженных частиц, г.Новосибирск, 1964г. Отчёт ИЯФ СО АН СССР.
35. Л.С.Коробейников, Г.Н.Кулипанов, Б.А.Лазаренко, Ю.Г.Матвеев, С.Г.Попов, А.Н.Скринский, Г.М.Тумайкин. Управление параметрами электронных пучков в накопителе ВЭП-1. Доклад на Всесоюзном совещании по новым методам ускорения заряженных частиц г.Новосибирск 1964г. Отчёт ИЯФ СО АН СССР.

36. А.Н.Онучин, С.Г.Попов, В.А.Сидоров, А.Н.Скринский. Результаты измерения фоновых загрузок счётчиков под малым углом на установке ВЭП-1. Доклад на Всесоюзном совещании по новым методам ускорения заряженных частиц. Новосибирск, 1964г. Отчёт ИЯФ СО АН СССР.
37. *C. Bernardini et al.*
Phys. Rev. Lett., 10, 407 (1963)
38. Г.И.Будкер, А.А.Наумов и др. Состояние работ на установках со встречными позитрон-электронными пучками ВЭП-2. Доклад на Всесоюзном совещании по новым методам ускорения заряженных частиц. Новосибирск, 1964г.
39. Г.И.Будкер, Т.А.Всеволожская, Е.С.Миронов, Г.И.Сильвестров. Электронно-оптический канал комплекса ВЭП-2. Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям со встречными пучками и физике частиц сверхвысоких энергий, Новосибирск, 1963г.
40. В.С.Сынах. ЖЭТФ, 40, 194 (1961).
41. А.В.Киселёв. Генератор импульсов для выпуска и впуска электронов и позитронов установки ВЭП-2. Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям со встречными пучками в физике частиц сверхвысоких энергий, г.Новосибирск, 1963г.
42. Т.А.Всеволожская, С.Н.Родионов, Г.И.Сильвестров. Акцептанс накопительной дорожки ВЭП-2. Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям со встречными пучками и физике частиц сверхвысоких энергий, Новосибирск, 1963г.

43. В.Л.Ауслендер, Н.А.Кузнецов, Б.В.Левичев, А.А.Лифшиц, А.А.Наумов, Ю.И.Петухов, А.Н.Скринский. Магнитная система накопителя ВЭП-2. Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям со встречными пучками и физике частиц сверхвысоких энергий, Новосибирск, 1963г.
44. Г.А.Блинов. Вакуумные системы установок со встречными пучками. Доклад на Всесоюзном совещании по ускорителям со встречными пучками и физике частиц сверхвысоких энергий, Новосибирск, 1963г.
45. Г.А.Блинов. Пузырьковые камеры. Вакуумные системы установок со встречными пучками. Авторский доклад по работам, представленным на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Г.Новосибирск, 1963г.
46. Ю.Н.Пестов. Возможности применения полупроводниковых поверхностно-барьерных счётчиков для регистрации сгустков релятивистских частиц. Отчёт ИЯФ, 1963г.

О Г Л А В Л Е Н И Е

Стр.

Введение	
Установка с встречными электрон-электронными пучками ВЭП-1.....	
Установка с встречными позитрон-электронными пучками ВЭП-2.....	
Методические вопросы.....	
Заключение.....	
Приложение 1.....	
Приложение 2	
Рисунки	
Литература	