

препринт

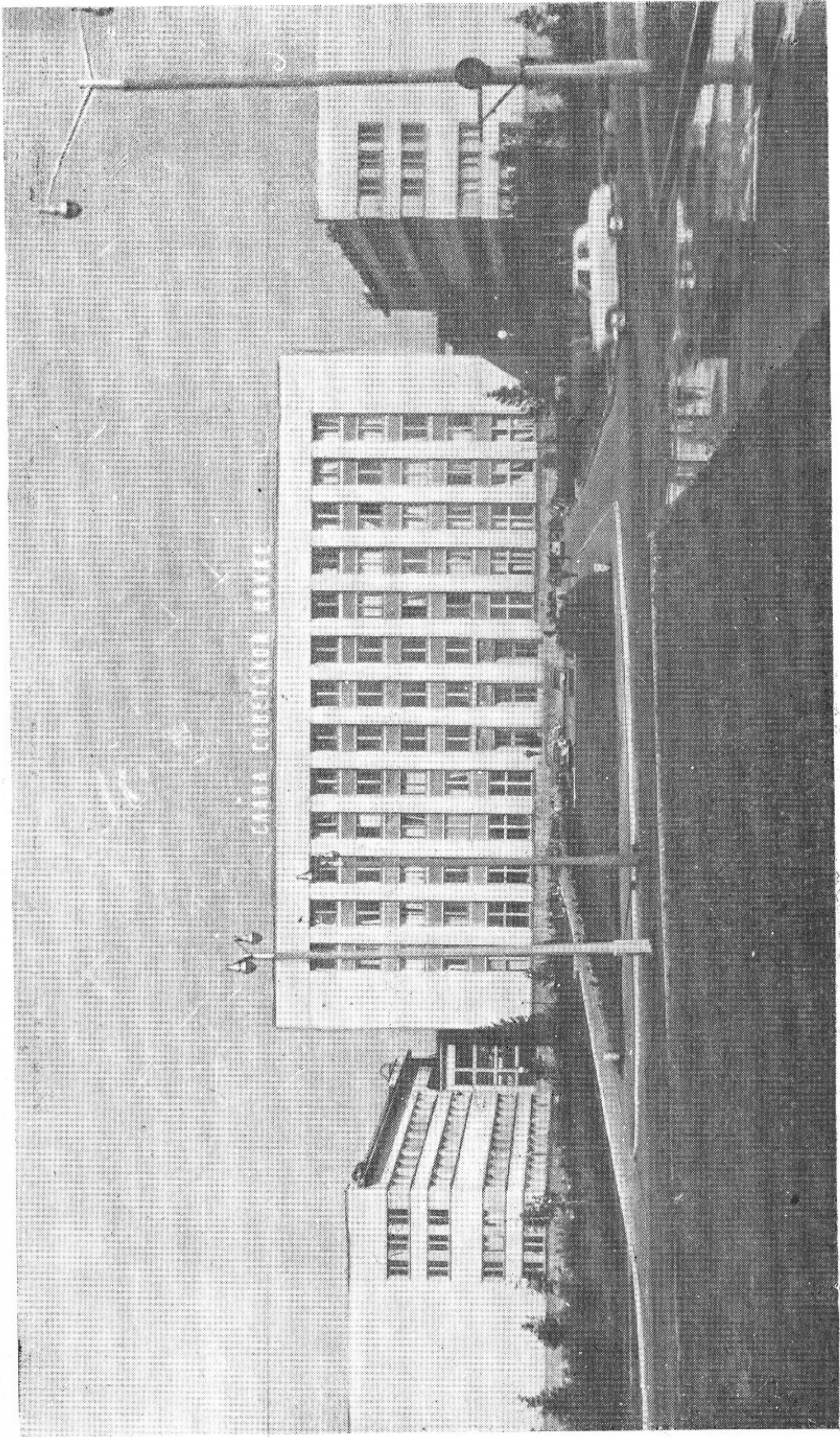
И Н С Т И Т У Т
Я Д Е Р Н О Й Ф И З И К И С О А Н С С С Р



И С С Л Е Д О В А Н И Я
В О Б Л А С Т И Ф И З И К И П Л А З М Ы
И У П Р А В Л Я Е М Ы Х Т Е Р М О Я Д Е Р Н Ы Х
Р Е А К Ц И Й

Н О В О С И Б И Р С К

1968



CASA CORRECCION HERRERA

В В Е Д Е Н И Е

Институт ядерной физики СО АН СССР ведет работы по физике плазмы в рамках общей программы термоядерных исследований в СССР.

Главное направление работ Института связано с проблемами удержания плазмы в магнитных ловушках и нагрева плазмы бесстолкновительными ударными волнами. Для решения этих задач необходимо всестороннее исследование физических явлений в плазме, в особенности изучение коллективных процессов. Теоретическое и экспериментальное исследование коллективных процессов занимает поэтому основное место в плазменной тематике Института.

Предметом теоретических исследований являются удержание и диффузия плазмы в магнитных ловушках, неустойчивости и турбулентность плазмы, бесстолкновительные ударные волны. Кроме того, в Институте ведутся теоретические работы более общего характера, так или иначе связанные с физикой плазмы и проблемой термоядерного синтеза.

Экспериментальные работы, ведущиеся в Институте, направлены на изучение поведения плазмы в разных типах магнитных ловушек, на исследование физики бесстолкновительных ударных волн, на изучение устойчивости и турбулентности плазмы. Ведутся также работы по диагностике плазмы, по усовершенствованию техники, в частности, техники импульсных электрических разрядов и работы по созданию мегагауссных магнитных полей.

Ниже приведено краткое содержание основных теоретических и экспериментальных работ Института по физике плазмы, выполненных в 1967-1968 гг. Общее руководство плазменными исследованиями осуществляется академиком Г.И.Будкером и член-корреспондентом АН СССР Р.З. Сагдеевым.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Теоретические исследования, ведущиеся в Институте, стимулируются, главным образом, проблемой управляемого термоядерного синтеза.

В связи с этим большая часть теоретических работ посвящена изучению явлений, возникающих при удержании плазмы в магнитных ловушках и другим вопросам физики плазмы. Однако, в Институте ведутся работы и общезначимого характера, постановка которых связана с проблемами физики плазмы. Сюда относятся работы по теории волн в нелинейных диспергирующих средах, по теории слабой турбулентности, а также работы по стохастическим явлениям в динамических системах. В этих, а также и в других исследованиях, важную роль играют численные эксперименты.

1. Плазма с большой длиной свободного пробега в тороидальных системах

А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев

Эта группа работ, наиболее непосредственно связанная с проблемой управляемого термоядерного синтеза, посвящена исследованию равновесия, диффузии и устойчивости плазмы в различных типах тороидальных магнитных ловушек. Особое внимание в этих работах уделяется влиянию на поведение плазмы "запертых" частиц - электронов и ионов. Показано, что в аксиально симметричных системах газ "запертых" электронов в равновесии всегда обладает некоторой упорядоченной скоростью относительно ионов и "пролетных" электронов. Учёт трения между ними приводит к диффузии, превышающей в $(R/z)^{3/2}$ раз $(\frac{z}{R}$ - тороидальное отношение) диффузию Пфирша-Шлютера. В системах не обладающих аксиальной симметрией, таких как тороидальный стелларатор, возникает, кроме этого, дополнительное перемешивание плазмы из-за тороидального дрейфа частиц, запертых в области слабого винтового поля. Наличие равновесного радиального электрического поля значительно сокращает время свободного тороидального дрейфа и уменьшает коэффициенты переноса плазмы.

Найдены условия стабилизации дрейфовых колебаний "запертых" ионов за счёт затухания Ландау на "пролетных" ионах. Рассмотрена устойчивость плазмы относительно дрейфовых колебаний, локализованных в пределах одного шага силовых линий (так называемые "баллонные" моды).

Показано, что переменная в пространстве составляющая локального $shear$ оказывает дестабилизирующее действие на устойчивость плазмы.

2. Магнитные поверхности в стеллараторе

А.А.Галеев, Г.Е.Векштейн, Г.М.Заславский, А.В. Комин
Л.С.Красицкая, К.К.Лобашев, В.П.Минаев, Р.З.Сагдеев
В.Г.Устюжанинов, Н.Н.Филоненко

Производились теоретические исследования и численные расчеты магнитных поверхностей в тороидальных стеллараторах. Теоретически изучалось /6/ разрушение магнитных поверхностей, возникающее за счёт малых неточностей магнитного поля. В результате получены ограничения на максимальную величину вращательного преобразования. Проведено также исследование влияния плазмы конечного давления на форму магнитных поверхностей в стеллараторе с винтовой симметрией.

Магнитные поверхности вблизи сепаратрисы исследовались также численно /7-9/. Найдено максимальное значение вращательного преобразования при различных величинах тороидальности и различных углах намотки /7/. Найдены оптимальный с точки зрения ширины угол намотки. Проведено сравнение двух и трех-заходных полей. Исследованы также (в дрейфовом приближении) траектории частиц вблизи сепаратрисы и найден конус потерь /8/. Проведено исследование влияния электрического поля на траектории в предположении об эквипотенциальности магнитных поверхностей /9/.

3. Устойчивость и трансформация волн в неоднородной плазме

Н.С.Ерохин, В.Е.Захаров, С.С.Моисеев, А.М.Фридман

Эта группа работ, посвящена исследованию влияния неоднородности плазмы на её устойчивость и характер распространения в ней волн. Сюда относятся работы по аномальной трансформации волн /10/, по нелинейной перекачке энергии электромагнитной волны во вторую гармонику в области плазменного резонанса /11/, а также работы по изучению разных типов неустойчивостей неоднородной плазмы.

Среди полученных результатов нужно отметить выяснение важной роли неустойчивостей, связанных с возмущением температуры, непотенциальных неустойчивостей, а также неустойчивостей относительно возбуждения волн с фазовой скоростью, меньшей тепловой скорости ионов / 16/.

Развита теория устойчивости бесстолкновительной плазмы конечного давления. Показано, что общее кинетическое уравнение для дрейфовых волн в плотной плазме расщепляется на два уравнения для волн альфвеновского типа и волн магнитозвукового типа. Показана стабилизация универсальной и дрейфово-температурной неустойчивости при $\beta \sim 1$ /23, 24/.

4. Численный расчёт эволюции нелинейных волн

Ю.А.Березин, В.И.Карпман, Р.Х.Куртмуллаев, Р.З.Сагдеев

В целях сравнения с экспериментом по бесстолкновительным ударным волнам проведено численное решение системы уравнений, описывающих распространение сильных цилиндрических волн в разреженной плазме. На основе численного решения уравнения Кортевега-де-Вриза изучена эволюция возмущений (в виде δ - функции и производной от δ - функции) в диспергирующих средах, где существенна конкуренция между дисперсионными и нелинейными эффектами.

Проведен численный эксперимент с нелинейной одномерной моделью шланговой неустойчивости. Эволюция возмущения магнитного поля во времени изображена на рис.1. Регулярные нелинейные колебания с частотой порядка инкремента неустойчивости допускают аналитическое представление в виде колебаний с переменной амплитудой и фазой.

5. Эволюция нелинейных волн в диспергирующей среде

В.И.Карпман, В.П.Соколов

В этой группе работ исследованы общие закономерности образования солитонов в диспергирующей среде, описываемой уравнением Кортевега-де-Вриза. Особое внимание уделено асимптотическим решениям. В частности найдены асимптотические выражения, описывающие солитонные хвосты, и определено количество солитонов, на которые распадается начальное возмущение.

Уравнение Кортевега-де Вриза применяется к изучению обтекания тел в плазме и подобных ей диспергирующих средах. Выяснены условия появления солитонов в потоке за телом.

Рассмотрены также процессы нелинейного самовоздействия волн, в частности, выяснена картина распада неустойчивой относительно самомодуляции волны на отдельные волновые пакеты.

6. Устойчивость волн в нелинейных средах и теория самофокусировки волн

В.Е.Захаров

Явления нелинейного взаимодействия волн в различных диспергирующих средах (плазма, нелинейные диэлектрики, поверхность жидкости) имеют много общего. В работах /38, 42/ развита общая методика, позволяющая рассматривать все эти среды с единой точки зрения. С помощью этой методики изучена неустойчивость нелинейных волн в плазме, на поверхности жидкости, в нелинейных диэлектриках, а также неустойчивости спиновых волн в ферромагнетиках. Частным случаем неустойчивости плоской волны является самофокусировка волны.

Разработан математический аппарат для исследования нестационарных явлений, возникающих при самофокусировке и показано, что возникающие при самофокусировке структуры волнового поля также неустойчивы. Построена качественная картина разрушения монохроматической волны за счет таких неустойчивостей.

7. Распространение волн и устойчивость в средах

Г.Е.Векштейн, Г.М.Заславский, В.Е.Захаров, С.С.Моисеев
Н.Н.Филоненко, А.М.Фридман

Эта группа работ посвящена изучению распространения волн в турбулентных средах, причём основные результаты получены методом, не предполагающим использования теории возмущений по случайной переменной.

Исследована также распадная неустойчивость волн со случайной фазой при произвольном соотношении между временем хаотизации волн и временем развития неустойчивости. Аналогично в коротковолновом приближении рассмотрено распространение и трансформация волн в среде со случайными неоднородностями. В работе /45/ дана постановка задачи об ус-

тойчивости в среде с флюктуирующими параметрами и исследованы желобковые возмущения.

Исследована также квазилинейная релаксация ленгмюровской волны при наличии магнитного поля /49/.

8. Теория слабой турбулентности

В.Е.Захаров, Н.Н.Филоненко

Произведено исследование турбулентности в нелинейных диспергирующих средах, в частности турбулентности электронной плазмы и турбулентности волн на поверхности жидкости. Получены кинетические уравнения для волн, описывающие эти типы турбулентности. На основании этих уравнений проанализирована качественно картина слабой турбулентности. Показано, что слабая турбулентность имеет локально-изотропный характер подобно турбулентности несжимаемой жидкости. Кинетические уравнения для волн имеют точные решения степенного типа (в K - пространстве), которые можно интерпретировать как аналоги колмогоровского спектра. Исследована качественно временная эволюция спектров слабой турбулентности.

9. Условия возникновения статистической необратимости

в нелинейной теории плазмы

Г.М.Заславский, Р.З.Сагдеев, Н.Н.Филоненко

Предметом работ /54-56/ является изучение условий возникновения турбулентных режимов в плазме. Исследование проводилось на простой модели взаимодействующих волн, находящихся под внешним воздействием.

Развит метод, позволяющий найти условия, при которых преобразование фаз со временем носит случайный характер и получены критерии перехода системы в турбулентное состояние. Метод основан на исследовании эргодических свойств оператора временного преобразования фаз с последующим использованием уравнения Лиувилля. Получены также характерные времена расцепления корреляции фаз движения и даны условия применимости квазилинейного уравнения и кинетического уравнения для волн без каких-либо априорных предположений о наличии случайных параметров в системе.

10. Исследования по устойчивости нелинейных колебаний

Ф.М.Израйлев, Е.М.Крушкаль, Б.В.Чириков

Эта группа работ включает в основном численные эксперименты, а также теоретические расчёты и оценки по устойчивости нелинейных колебаний и возникновению стохастических явлений в динамических системах с приложением к термоядерным, ускорительным и другим проблемам.

Проведены численные эксперименты на весьма простой, но не тривиальной модели динамической системы и детально исследован критерий стохастичности по перекрытию резонансов / 58 /.

Показано, что этот критерий определяет положение реальной физической границы, по одну сторону которой лежит область стохастичности (сильной неустойчивости) с небольшими островками устойчивости, а по другую - область колмогоровской устойчивости. Движение в последней прослежено в одном случае в течение 10^{10} шагов. Результаты работы / 58 / показывают, что стохастические законы могут действовать и в простейшей системе (нелинейный осциллятор с одной степенью свободы при периодическом возмущении).

Для несколько более сложной модели типа двух связанных нелинейных осцилляторов показано существование в области колмогоровской устойчивости очень слабой неустойчивости с характерным временем развития около $3 \cdot 10^8$ шагов / 61 /. Существовавшая теория позволяет, однако, надеяться, что мера неустойчивых начальных условий убывает экспоненциально с уменьшением параметра возмущения.

Получены первые результаты (Е.М.Крушкаль, Б.В.Чириков), указывающие на неустойчивость нелинейных волн солитонного типа по отношению к малому возмущению, с достаточно большой длиной волны. Область неустойчивости совпадает, грубо говоря, с областью распада волны на солитоны.

11. Приложение методов физики плазмы к астрофизике

В.Ц.Гурович, А.М.Фридман

Исследовались задачи об устойчивости плоского вращающегося диска (модель Галактики) и неустойчивости в системе малых масс, вращающихся

вокруг центрального тела (модель планетной системы). Для решения первой из этих задач был использован энергетический принцип, аналогичный тому, который используется в магнитной гидродинамике, при решении задачи об устойчивости планетной системы оказалось удобным применить интегрирование по траекториям частиц в самосогласованном поле. Получены критерии возникновения неустойчивости для разных типов возмущений. Рассматривалась также устойчивость гравитирующих тел вращения.

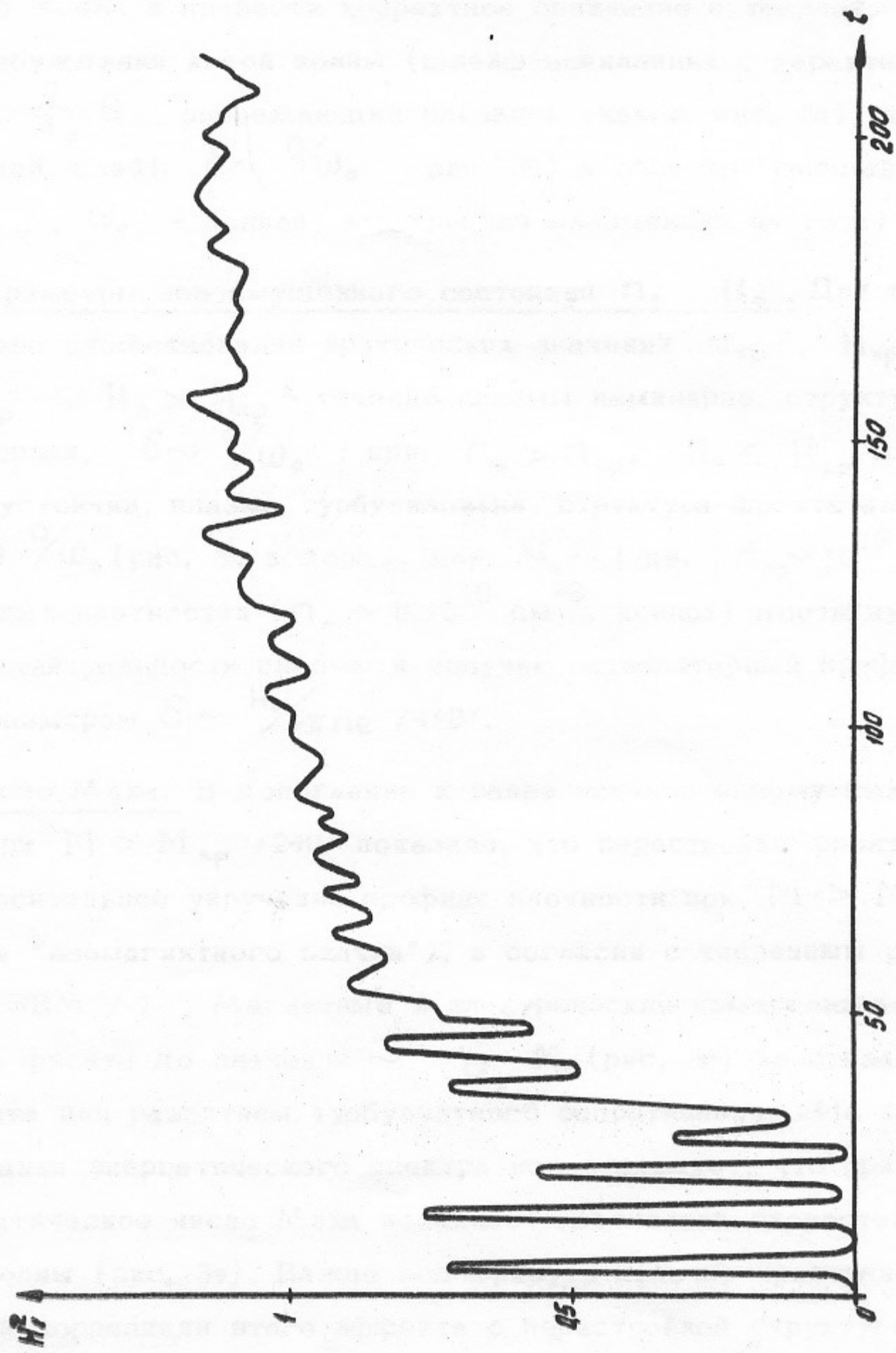


Рис. I -4,1. Результат машинного эксперимента по модели одномерной
шланговой неустойчивости.

II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

Интерес к физике бесстолкновительных ударных волн объясняется, прежде всего, перспективностью метода нагрева плазмы с их помощью, а также астрофизическими приложениями.

Кроме того, исследование бесстолкновительных ударных волн позволяет получить информацию о коллективных явлениях в плазме, таких как нелинейное взаимодействие волн, неустойчивость волн и турбулизация плазмы.

Исследования коллективных процессов, связанных с бесстолкновительными ударными волнами, проводятся на установках УН-4, "Волна", "Космос". Вводится в действие также установка УН-6. Кроме того ведутся работы по нагреву плазмы мощными ударными волнами (программа "Вода").

1. Исследование бесстолкновительных ударных волн на установке УН-4

Н.И.Алиновский, В.Г.Еселевич, Р.Х.Куртмуллаев, Н.А.Кошилев,
В.Л.Масалов, К.И.Меклер, В.И.Пильский, Р.З.Сагдеев,
В.Н.Семенов

На установке УН-4 (рис. 1) изучаются ударные волны, распространяющиеся под прямым и косым углом к начальному магнитному полю. Цилиндрическая волна возбуждается в предварительно ионизованной плазме с замороженным начальным полем H_0 посредством магнитного поршня (внешнего поля H_{\sim}), приложенного к границе плазменного столба. Основные параметры: начальная плотность плазмы $n_0 \sim 5 \cdot 10^{10} + 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, квазистационарное магнитное поле $H_0 \sim 0 + 2 \cdot 10^3 \text{ э}$, внешнее магнитное поле $H_{\sim}^0 \sim 2,5 + 10 \text{ кэ}$, скорость нарастания $dH_{\sim}/dt \sim 10^7 + 4 \cdot 10^7 \text{ кэ/сек}$, характерное время формирования волны $\frac{H_0}{dH_{\sim}/dt} \sim (20 + 100) \cdot 10^9 \text{ сек}$.

Основные методы диагностики: магнитный зонд в виде открытой одиночной петли, контактной или ёмкостной электрический зонд, скоростной микроволновый интерферометр ($\lambda = 2 \text{ мм}$) локального зондирования (рис. 2). Размеры датчиков ($1 + 3 \text{ мм}$) и частотная полоса аппаратуры ($150 + 1000 \text{ Мгц}$) обеспечивали пространственное и временное разрешение внутри ударного скачка. Кроме того использовались приемники микроволнового, рентгеновского и нейтронного излучения плазмы, дифференциаль =

ный анализатор энергии ионов.

Выполненные опыты представляют собой развитие ранее полученных результатов /1-2/. Исследовалось влияние основных параметров на структуру фронта.

Угол наклона фронта к магнитному полю θ . Непосредственная регистрация θ позволила изучить характер дисперсионных эффектов при $0 < \theta < 45^\circ$ и провести корректное сравнение с теорией. Найдены области возбуждения косой волны (шлейф осцилляций с характерным размером $\delta \sim \frac{c}{\Omega_0} \theta$, опережающий основной скачок, рис. 3а), прямой волны (отстающий шлейф $\delta \sim c/\omega_0$, рис. 3б) и область "смешанной" структуры (Ω_0 , ω_0 - ионная, электронная плазменная частота) /3/.

Параметры невозмущенного состояния n_0 , N_0 . Для прямых волн установлено существование критических значений $n_{кр}$, $N_{кр}$: при $n_0 < n_{кр}$, $N_0 > N_{кр}$ - течение плазмы ламинарно, структура фронта осцилляторная, $\delta \sim c/\omega_0$; при $n_0 > n_{кр}$, $N_0 < N_{кр}$ ток во фронте волны неустойчив, плазма турбулизована, структура фронта аperiodическая, $\delta \sim 10 c/\omega_0$ (рис. 3в водород, для $N_0 \sim 1$ кэ, $n_{кр} \sim 10^{12}$ см⁻³). При очень малых плотностях ($n_0 \sim 5 \cdot 10^{10}$ см⁻³, ксенон) достигнуто нарушение квазинейтральности плазмы и получен осцилляторный профиль с характерным размером $\delta \sim \frac{N_0}{4\pi n e}$ /4+8/.

Число Маха. В дополнение к ранее установленному факту уширения фронта при $M > M_{кр}$ /2+6/ показано, что перестройке фронта предшествует относительное укрупнение профиля плотности при $M > M_{кр}$ (структура типа "изомагнитного скачка"), в согласии с численным решением задачи на ЭВМ /7/. Магнитные и электрические измерения показали, что уширение фронта до значения $\sim \frac{c}{\Omega_0} M$ (рис. 3г) не связано с перекосом фронта или развитием турбулентного сопротивления. Из результатов исследования энергетического спектра ионов следует, что при переходе через критическое число Маха возникает хаотизация скоростей ионов во фронте волны (рис. 3е). Важно подчеркнуть наличие пространственной и временной корреляции этого эффекта с перестройкой структуры фронта (образование "подножия"). Совокупность этих результатов позволяет наиболее вероятным механизмом считать опрокидывание фронта и последующее развитие вязкости /4,9/. Аналогичный эффект наблюдался в волне с осцилляторной структурой фронта.

Масса ионов Π_i в опытах менялась более, чем на два порядка (H + He). Результаты сводятся к следующему: 1) во всех газах существует режим с предельной крутизной скачка; значение δ_{\min} не зависит от Π_i и остается $\sim c/\omega_0$, в согласии с дисперсионным механизмом; 2) разрушение осцилляторной структуры происходит при значениях $n_{кр.}$, $N_{кр.}$, зависящих от Π_i ; 3) ширина диссипативного фронта в Ar-He достигает значения $25 + 50 \cdot c/\omega_0$ / 8 /.

Относительное направление полей H_0 , H_{\sim} влияет на условия возбуждения и динамику процесса. При антипараллельной ориентации длительное ($\geq R/c$) существование сильного тока ($j \sim \frac{c}{4\pi} \cdot \frac{H_0 + H_{\sim}}{\delta_{\text{слоя}}}$) приводит к быстрому развитию интенсивных колебаний, уширению токового слоя и ограничению области формирования ударной волны.

Микропроцессы, регистрировавшиеся во фронте: шумы в области ионной, электронной и гибридной частот, колебания типа "свистов", комбинационное рассеяние на флуктуациях в ионнозвучковом спектре частот, γ -излучение - подтверждают основные представления о природе коллективных взаимодействий в ударной волне / 8 /.

Давление P_e и температура T_e электронов за фронтом, оцененные зондовым методом, составляют: $P_e \sim 10^4 + 10^5$ эрг/см³, $T_e \sim 50 + 5 \cdot 10^5$ эв ($n_0 \sim 10^{11} + 10^{14}$ см⁻³, $N_0 \sim 200 + 1500$ э, $N_{\sim} \sim 2000$ э). Зависимость $(\frac{P_e}{N_0^2/4\pi}) = f(N/N_0)$ согласуется с адиабатой Гюгонио.

Энергетические измерения ионной компоненты установили хаотизацию скоростей ионов в результате "опрокидывания" фронта волны ($M > M_{кр}$) или кумуляции её на оси ($M < M_{кр}$). В водородной плазме в режиме "опрокидывания" ($n_0 \sim 2 \cdot 10^{14}$ см⁻³, $N_0 \sim 300$ эрст, $N_{\sim} \sim 2500$ э) средняя энергия ионов во фронте составляет ~ 200 эв, а после кумуляции ~ 500 эв. Сравнение энергетического спектра в осевом и продольном направлениях показывает, что процесс термализации растягивается на несколько циклов ударного сжатия плазмы. С уменьшением плотности плазмы наблюдается возрастание средней энергии ионов, в согласии с изменением параметров волны.

2. Исследование структуры квазистационарных ударных волн в плазме (установка "Космос")

Г.Г.Долгов-Савельев, Э.П.Кругляков, А.И.Курбатов,
В.К.Малиновский, Ю.Е.Нестерихин, Р.З.Сагдеев

Исследовалась структура квазистационарных ударных волн, возбуждаемых при обтекании тел сверхзвуковым плазменным потоком при концентрациях $n_e \sim 10^{14} + 10^{16} \text{ см}^{-3}$.

Плазма создавалась с помощью коаксиального инжектора, режим работы которого был выбран таким образом, чтобы обеспечить однородность параметров потока по сечению камеры и достаточную для соблюдения условий квазистационарности обтекания длительность рабочей части плазменного сгустка.

На рис.1 приведены экспериментальные и расчетные значения ширины фронта ударной волны, распространяющейся под углом к направлению потока. На рис. 1а ведущее продольное магнитное поле $H_0 = 0 \text{ э}$; рис.1б $H_0 = 150 \text{ э}$. Расчеты выполнены для конкретных условий эксперимента на электронной счетной машине.

Исследовано образование ударной волны при обтекании магнитного поля дипольной конфигурации. Положение области торможения плазменного потока соответствует равенству кинетического и магнитного давлений

$$\frac{\rho V^2}{2} = \frac{H_0^2}{8\pi}$$

Ширина области торможения $(10 + 20) c/\omega_0$. Если $\lambda/d \gg 1$ (λ - длина свободного пробега, d - характерный размер диполя), то ширина фронта формирующейся головной ударной волны $\Delta < \lambda$. Длина свободного пробега определена по параметрам плазмы за скачком уплотнения.

Картина обтекания диполя при наличии продольного поля сильно усложняется. Перед областью торможения наблюдаются нерегулярные колебания с характерными частотами \sim ионной ларморовской. Протяженность области нерегулярных колебаний в пространстве является функцией параметра замагниченности $(\omega_H \tau_e)$. Для анализа спектра, определения скорости распространения волн и фазовых соотношений использован корреляционный анализ.

Изучение структуры ударных волн осуществлялось в основном с помощью оптических методов, обладающих высокой чувствительностью

при практически полном отсутствии воздействия на изучаемый процесс.

К ним относятся:

1) Метод оптической интерферометрии.

Исследуемая плазма помещалась в одно из плеч интерферометра Майкельсона. Поле интерференции достигало 250 мм. В качестве источников света использовались: а) рубиновый лазер с конфокальным резонатором для получения интерферограмм процесса в режиме хронографической развертки и б) рубиновый лазер с импульсной добротностью для кадровых съемок с экспозицией $15 \cdot 10^{-9}$ сек. Метод позволял определять минимальную электронную концентрацию на уровне $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при размере $\ell \sim 40 \text{ см}$.

2) Определение локальных значений электронной температуры и плотности по рассеянию лазерного излучения плазмой.

Лазерная система состояла из генератора на рубине ($\varnothing 8 \text{ мм}$, $\ell = 120 \text{ мм}$), управляемого четвертьволновой ячейкой Керра на нитробензоле и усилительного каскада, активным элементом которого являлся рубин с сапфировыми наконечниками, обработанными под углом Брюстера ($\varnothing 12 \text{ мм}$, $\ell = 240 \text{ мм}$). Мощность и длительность лазерного импульса составляли соответственно $W = 300 + 500 \text{ Мвт}$, $\delta = (15 + 100) 10^{-9} \text{ сек}$. Для регистрации рассеянного излучения использовались как обычные системы на основе ФЭУ (одноканальные и многоканальные), так и электронно-оптические преобразователи.

Температура, измеренная методом лазерного рассеяния, достаточно хорошо согласуется с результатами температурных измерений по отношению интенсивностей спектральных линий примесных ионов ($\text{C IY } \lambda_1 = 1549 \text{ \AA}$, $\lambda_2 = 419 \text{ \AA}$).

Распределение магнитных полей измерялось с помощью систем магнитных зондов, защищенных от электростатических наводок.

Методы рентгеновских измерений в плазме

Г.Г.Долгов-Савельев, В.Е.Панченко

Для диагностики высокотемпературной плазмы в мягкой рентгеновской области спектра сконструированы, изготовлены и испытаны брэгговские спектрометры с разложением в спектр по методу Соллера, в которых используются кристаллы кальцита, слюды и кислого фталата калия (КАР).

Выполнен и применяется в лабораторной практике источник монохроматического мягкого рентгеновского излучения для определения пропускания рентгеновских фильтров, квантовых выходов фотокатодов и отражательных способностей брэгговских кристаллов (в режиме двухкристального спектрометра). Измерена отражательная способность кристалла КАР в области 5 и 13Å .

Произведены измерения сечений возбуждения электронами К - серий хлора и аргона и L - серии ксенона при энергиях электронов 3 + 16 кэВ (рис. 2).

3. Исследование нелинейных ионно-звуковых волн на установке "Волна"

С.Г.Алиханов, В.Г.Белан, Г.Н.Кичигин, Р.З.Сагдеев

Установка "Волна", схема которой изображена на рис. 1, создана для исследования нелинейных ионно-акустических волн в разреженной плазме с горячими электронами. Плазма образовывалась в металлическом объеме диаметром 90 см, длиной 120 см ионизацией газа (аргон, ксенон, гелий) потоком электронов с накаливаемого катода. Волна возмущения в "спокойной" плазме создавалась специальным источником плазмы. На рис. 2 приведены осциллограммы при некоторых положениях регистрирующего зонда, показывающие эволюцию фронта волны в ксеноновой плазме ($T_e = 5$ эВ, $n_e = 10^6 \text{ см}^{-3}$) по мере её распространения. Скорость фронта равна $3 \cdot 10^5$ см/сек, что соответствует числу Маха $M = 1,5$. Видно, как по мере распространения волны, происходит уменьшение ширины фронта вплоть до некоторого уровня порядка 2 см, что примерно соответствует дебаевскому радиусу, а за фронтом возникают колебания с длиной волны порядка дебаевской длины. При увеличении амплитуды возмущения и, соответственно, величины M возникает состояние взаимопроникающих ионных потоков, которые раскачивают колебания. Наблюдаемое время развития колебаний соответствует оценочной величине инкремента.

4. Опыты с сильными ударными волнами по программе "Вода"

В.А.Капитонов, В.А.Корнилов, В.М.Лагунов,
Ю.Е.Нестерихин, А.Н.Папырин, А.Г.Пономаренко
В.М.Федоров

Программа "Вода" включает исследования по нагреву плазмы бесстолкновительными ударными волнами с крутым временным фронтом и большим числом Маха.

Ниже приводятся предварительные результаты, полученные при возбуждении сильных б.у. волн с последующим удержанием нагретой плазмы. Генератор тока, длинная линия с водяной изоляцией на 250 кв и волновым сопротивлением 1 ом, нагрузкой которого являлся одиночный виток диаметром 6 см, длиной 10 см, создавал магнитное поле ~ 20 кэа за 50-100 нсек, спадавшего затем за 5 мксек (рис.1).

Предварительная плазма создавалась в стеклянной трубке диаметром 6 см разрядом типа Z - пинч в квазистационарном магнитном поле $H_0 = 1,6$ кэ (водород, $\rho = 10^{-2} \div 10^{-3}$ мм).

Плотность и температура предварительной плазмы определяются зондированием пучками нейтральных атомов (H, H₂, He) /4/. Исследование структуры ударных волн и зависимости эффективности нагрева от числа Маха производятся с помощью магнитных зондов, скоростной фотографии (ЭОП), диамагнитных датчиков, рентгеновского и нейтронного спектрометров /5/.

На рис.2 представлены осциллограммы двух магнитных зондов, показывающие картину формирования ударной волны при прямой и обратной полярности квазистационарного магнитного поля. При плотности $n \sim 5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ скорость ударной волны оказалась равной $\sim 5 \cdot 10^7$ см/сек.

В настоящее время запускается генератор тока, позволяющий создавать магнитное поле 30 кэа за время порядка 100 нсек. Эта система, по видимому, позволит сочетать нагрев плотной плазмы сильными б.у. волнами с последующим адиабатическим сжатием.

5. Установка УН-6 для исследования продольных ударных волн

Р.Х.Куртмуллаев, В.Н.Лукьянов, Р.З.Сагдеев, М.А.Щеглов

Установка УН-6 предназначена для изучения бесстолкновительных ударных волн, распространяющихся в замагниченной плазме вдоль начального магнитного поля H_0 .

На рис. 1 представлена схема установки и диагностической аппаратуры. В стеклянной камере (1) ($d = 30$ см, $L = 300$ см) с помощью безэлектродного разряда в начальном квазистационарном магнитном поле ($H_0 = 3$ кэ) создается предварительная плазма ($n \sim 10^{12} \div 10^{14}$, $T_e \sim 1 \div 10$ эв). "Магнитный поршень" ($H_{\sim} = 2 \div 8$ кэ) создается ударной системой, вы-

полненной в виде конического аксиально-симметричного разрядного промежутка с большим углом раствора (рис. 2), на который разряжается малоиндуктивный конденсатор ($C = 0,6 \text{ мФ}$; $V = 70 \text{ кв}$, $\tau_{\phi} \sim 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ сек}$). С помощью корректирующей катушки (рис. 1) линиям квазистационарного магнитного поля придается профиль, близкий к образующей конуса ударной системы.

С помощью магнитных зондов, СВЧ-интерферометров и аппаратуры по измерению рассеянного излучения лазера на установке УН-6 исследуются динамика, структура волн и плотность захваченных частиц.

По тормозному излучению в области мягкого рентгена и энергии нейтральных атомов оцениваются энергия электронов и ионов.

Установка УН-4

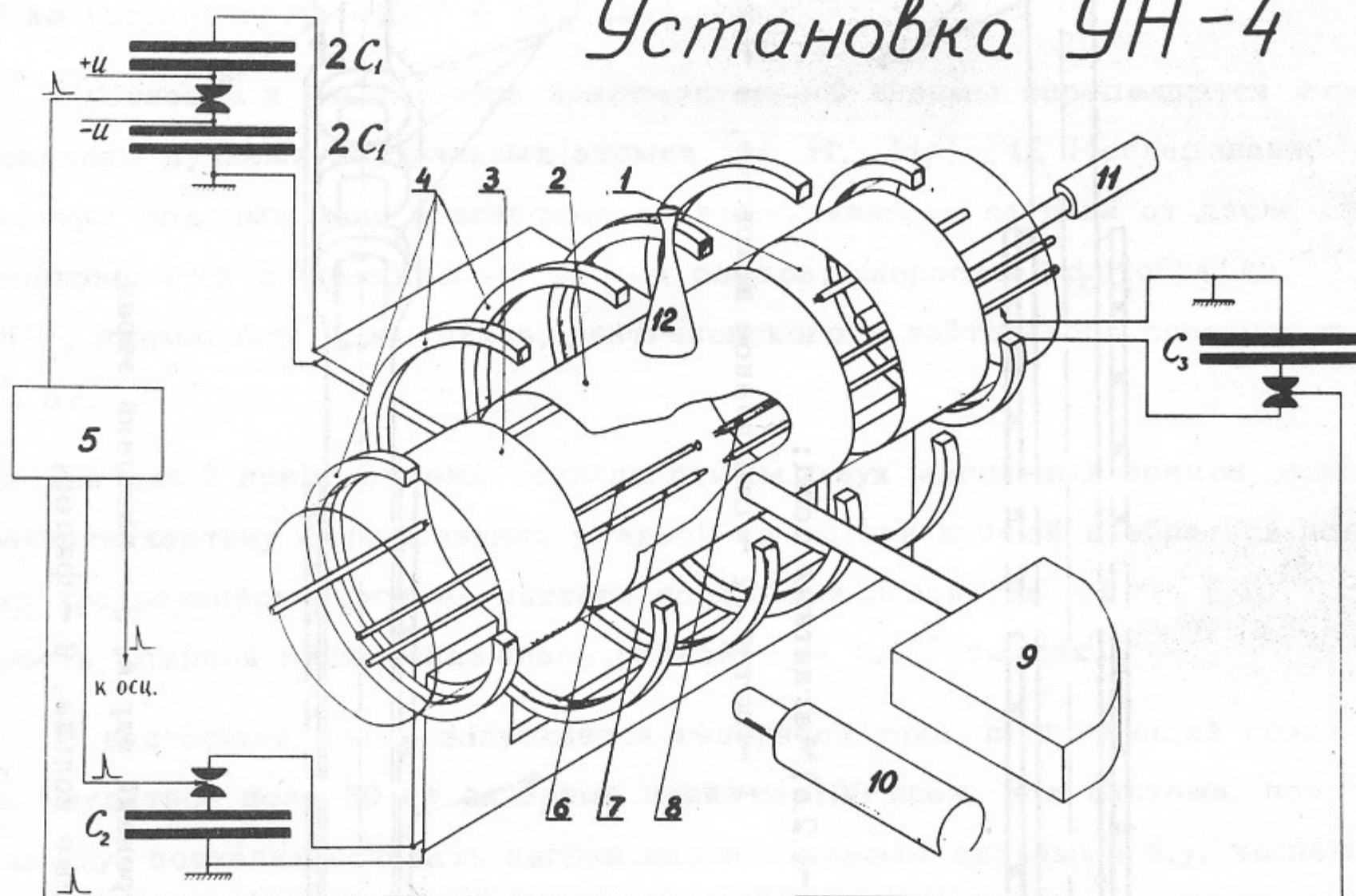


Рис. II-1,1. Схема установки УН-4.

- 1 - вакуумный объем (стеклянная трубка $\phi 16$ см),
- 2 - ударный виток; $C_1 = 0,6 \mu\text{F}$, $U_1 = \pm (15 + 50)$ кв,
- 3 - виток предварительной ионизации плазмы; $C_2 = 1,2 \mu\text{F}$,
 $U_2 = 40$ кв, 4 - пробкотрон, $C_3 = 10^{-2} \text{F}$, $U_3 = 3$ кв,
- 5 - система синхронизации, 6 - магнитный зонд,
- 7 - диэлектрические антенны СВЧ, 8 - электрический зонд,
- 9 - анализатор энергии ионов, 10 - детектор нейтронов,
- 11 - детектор γ - излучения.

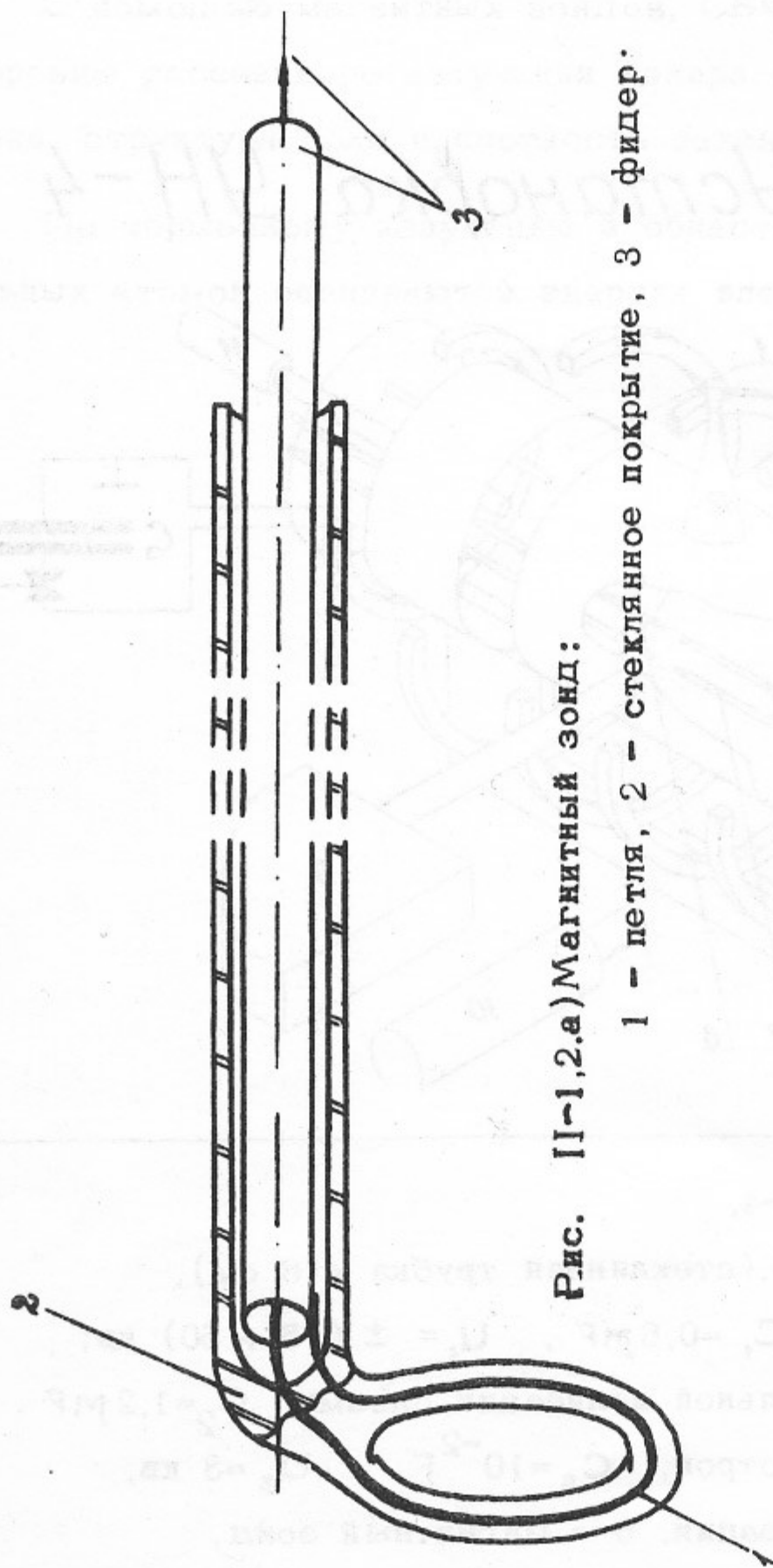
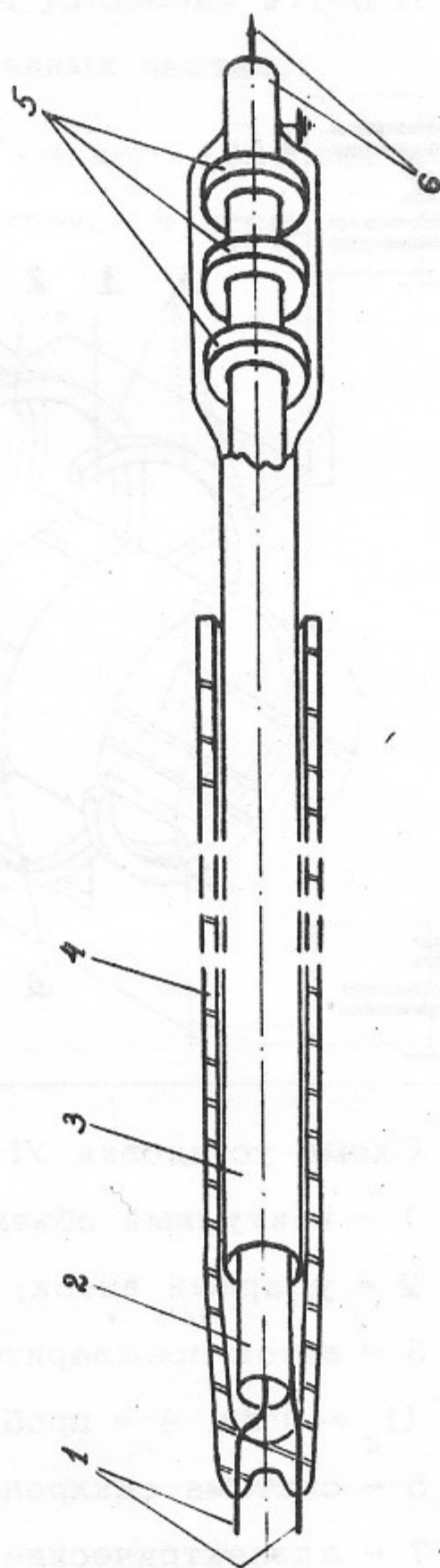


Рис. II-1,2,а) Магнитный зонд:

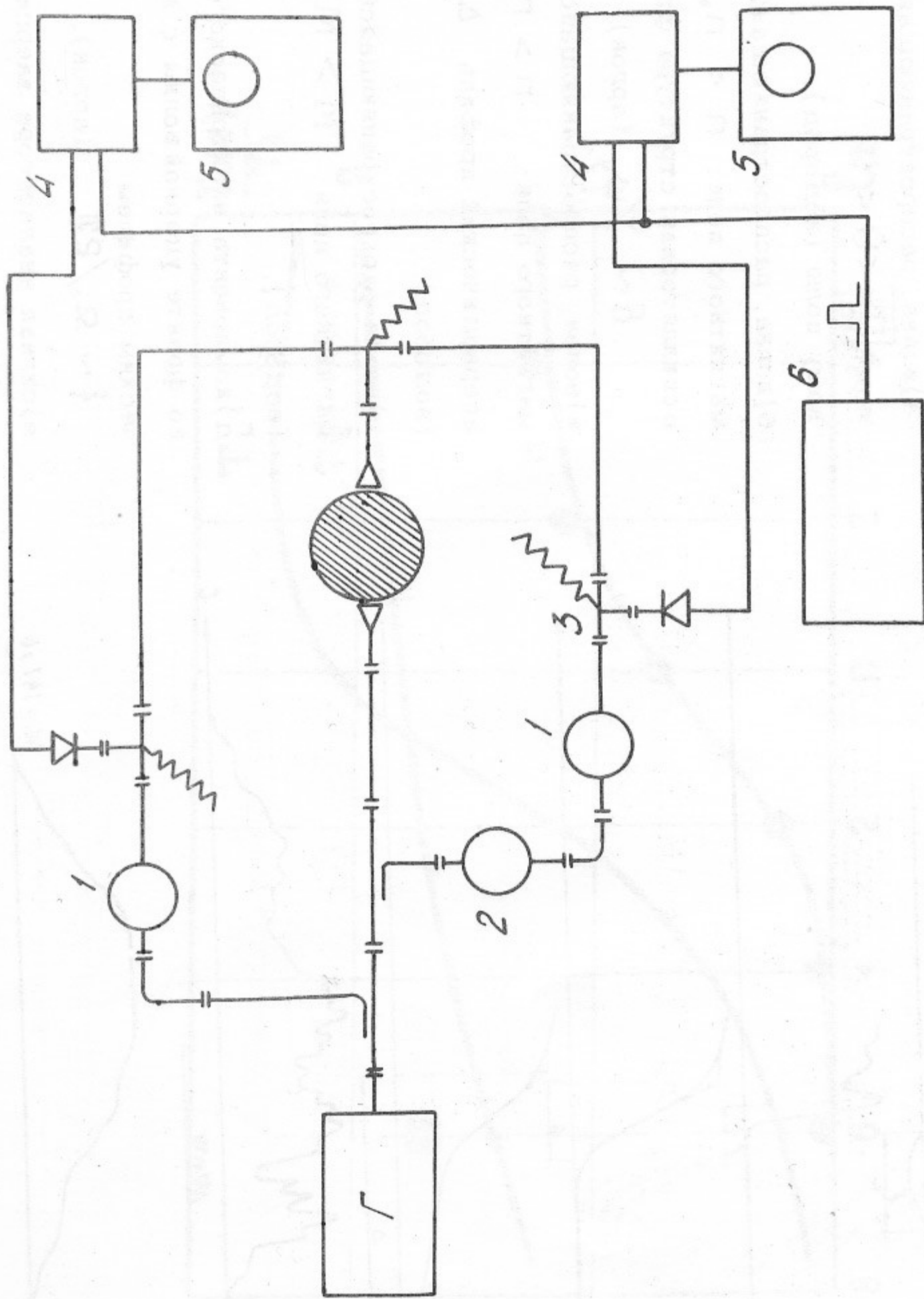
1 - петля, 2 - стеклянное покрытие, 3 - фидер.



б) Электрический зонд:

1 - электроды, 2 - внутренний экран, 3 - внешний экран,

4 - стекло, 5 - ферритовые кольца, 6 - фидер;



в) Микроволновый интерферометр ($\lambda = 2 \text{ мм}$):
 1 - аттенюатор, 2 - фазовращатель, 3 - смеситель,
 4 - широкополосный усилитель ($\Delta f = 200 \text{ МГц}$),
 5 - осциллограф, 6 - генератор синхриимпульса.

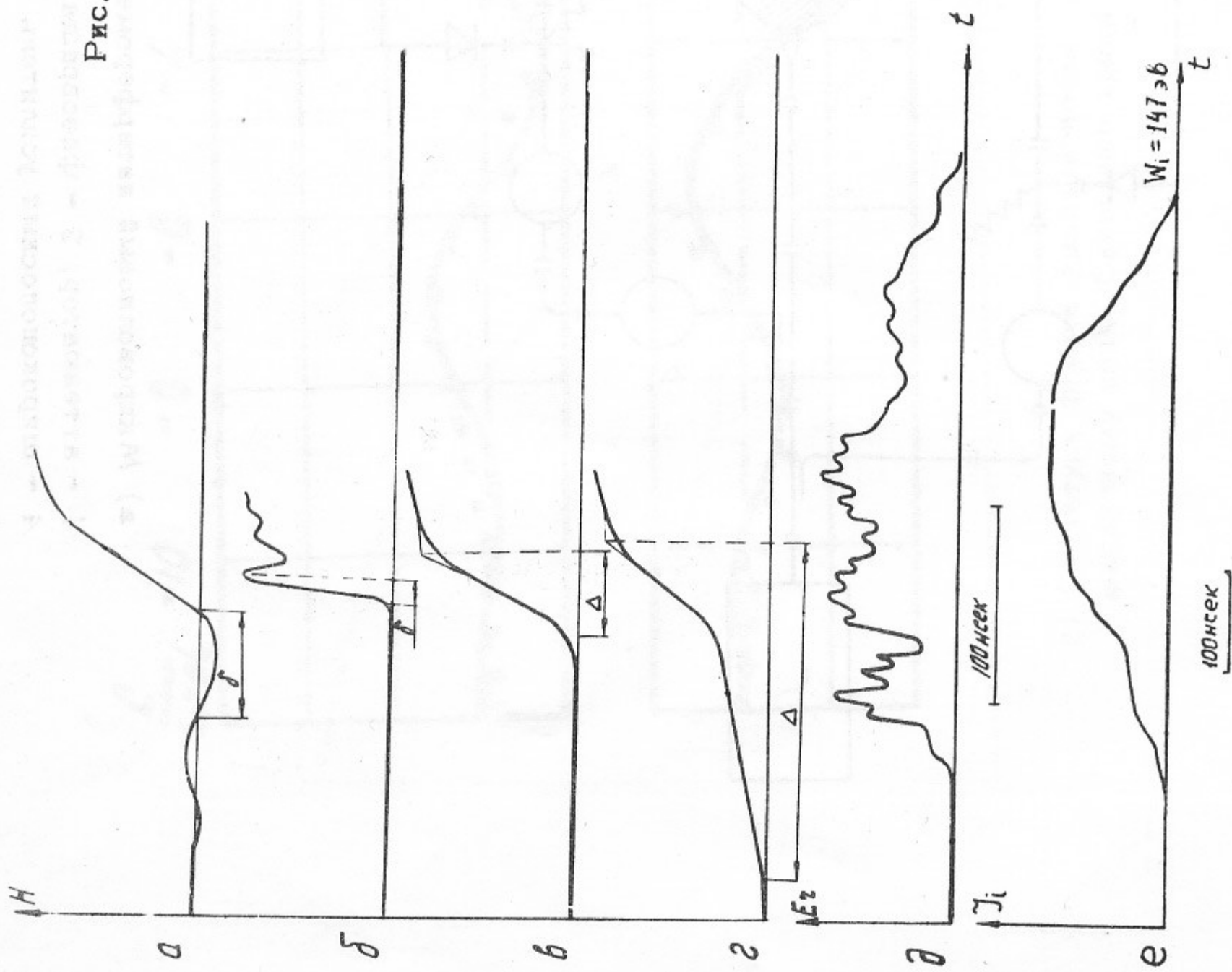


Рис.

1.3. Структура фронта ударной волны в разреженной плазме:

а) волна, распространяющаяся под углом $\theta < \theta_c$ к магнитному полю (водород).

б) волна, распространяющаяся поперёк магнитного поля: $\Gamma < \Gamma_{кр} < 10^{12} \text{ Ом}^{-3}$, осцилляторная структура фронта, $\delta \sim c/\omega_0$ (аргон).

в) волна, распространяющаяся поперёк магнитного поля: $\Gamma > \Gamma_{кр} > 10^{12} \text{ Ом}^{-3}$, апериодический профиль $\Delta \sim 10 c/\omega_0$ (водород).

г) волна распространяющаяся поперёк магнитного поля $M > M_{кр} \Delta \rightarrow c/\Omega_e M$ (водород).

д) компонента электрического поля E_z во фронте ударной волны с апериодическим профилем

$$\delta \sim \Omega_e / 2\pi \quad (\text{аргон}).$$

е) сигнал анализатора энергии ионов при $M > M_{кр}$ в условиях (рис. 3г).

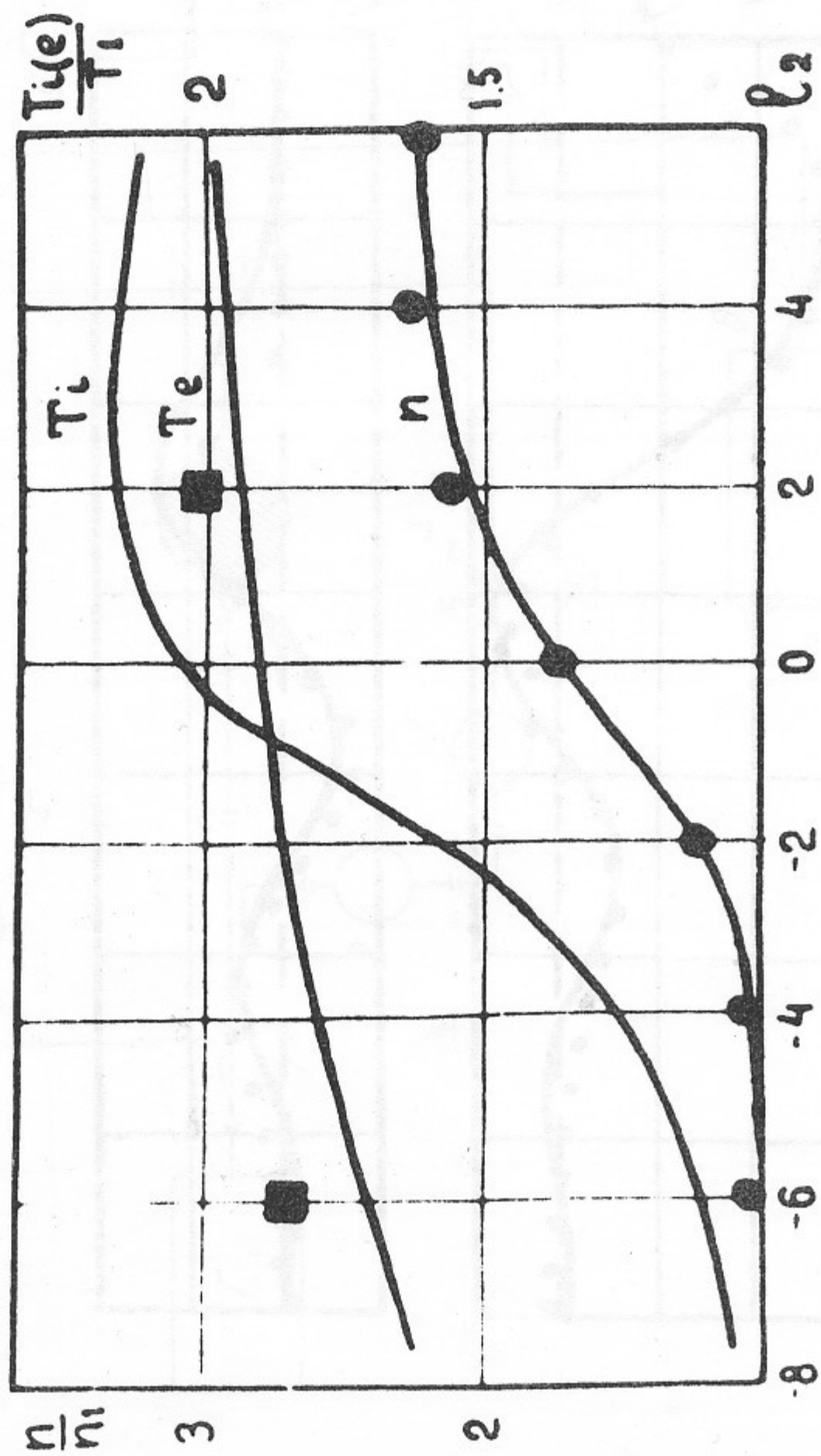
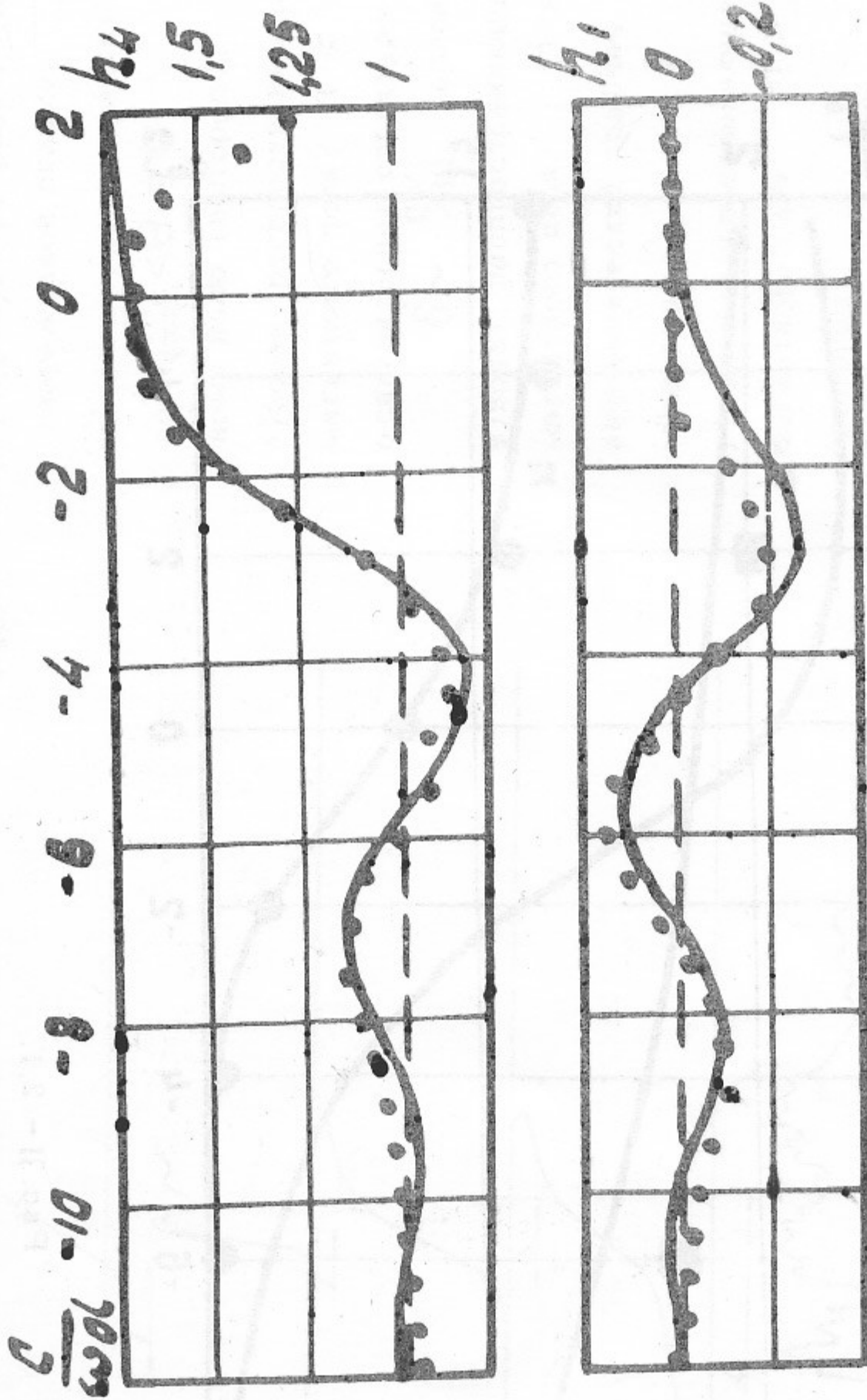


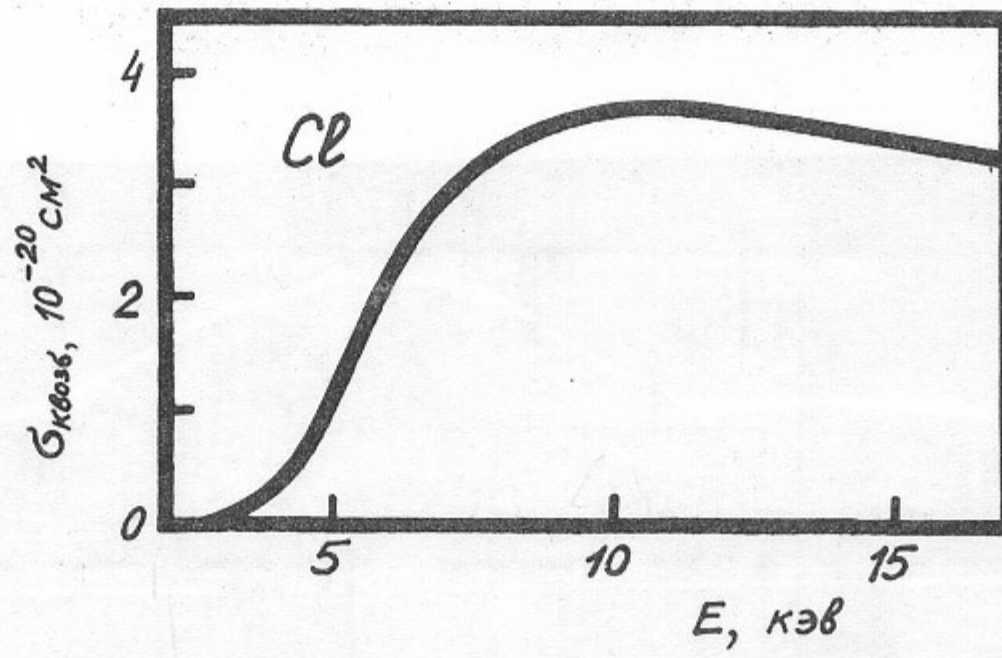
Рис. II - 2, I.

а) Структура фронта ударной волны при $H_0 = 0$.

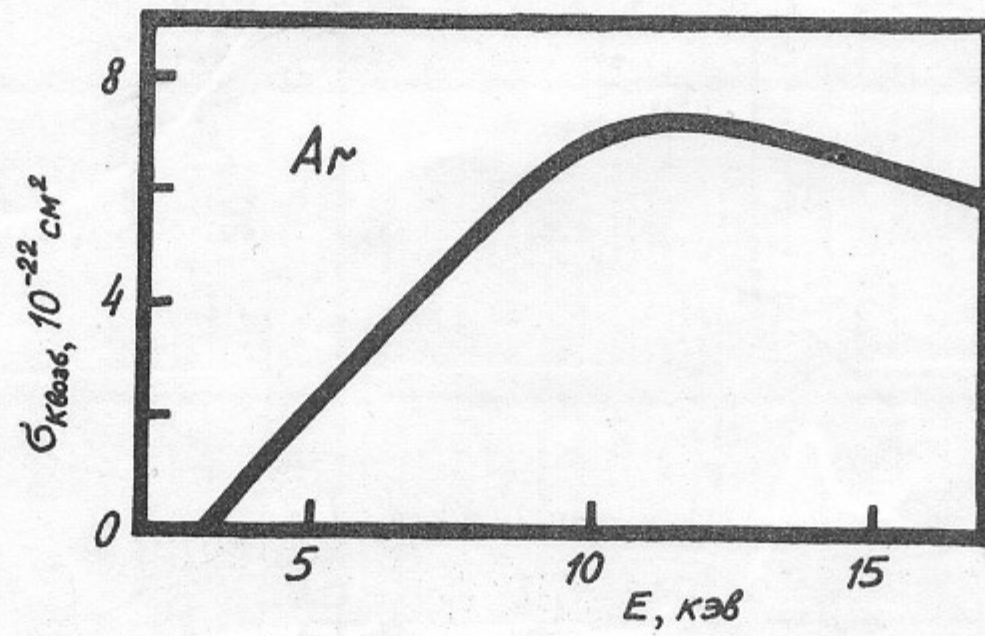


б) Структура фронта ударной волны, распространяющейся под углом к магнитному полю. Сплошные кривые - расчёт, точки - эксперимент.

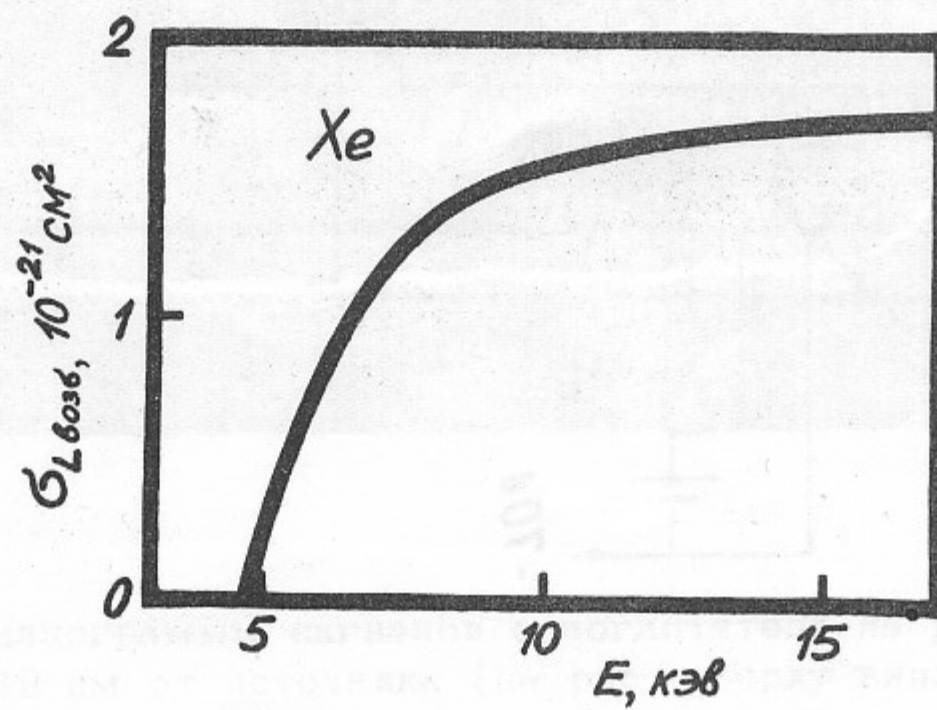
Рис. II-2,2. Сечения возбуждения рентгеновских серий электронным ударом.



а) К - серия Cs



б) К - серия аргона



в) L - серия ксенона

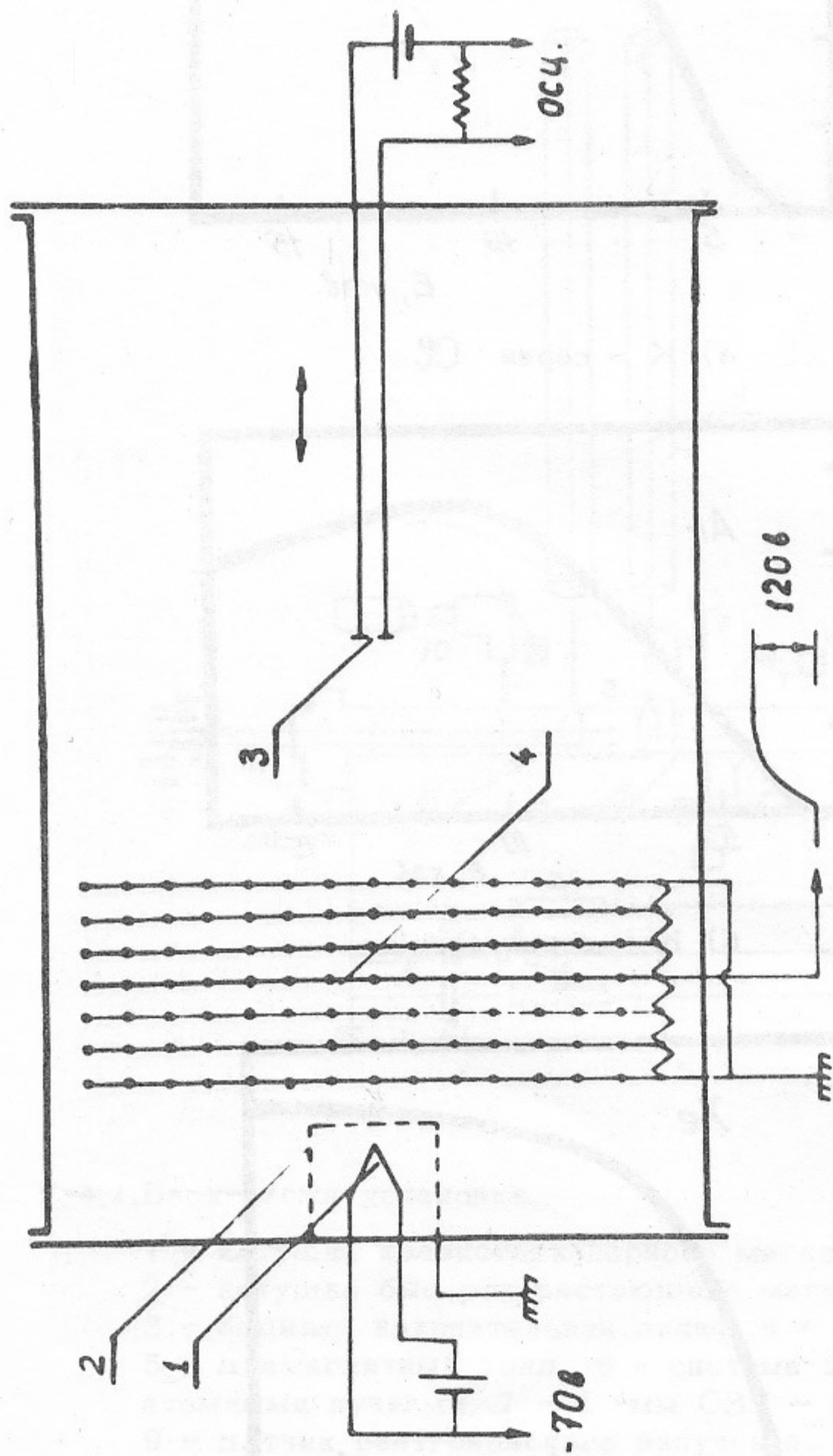


Рис. П-3,1. Схема установки.

1 - нагретый катод, 2 - сетки, 3 - поглотитель плазмы,
4 - источник плазмы.

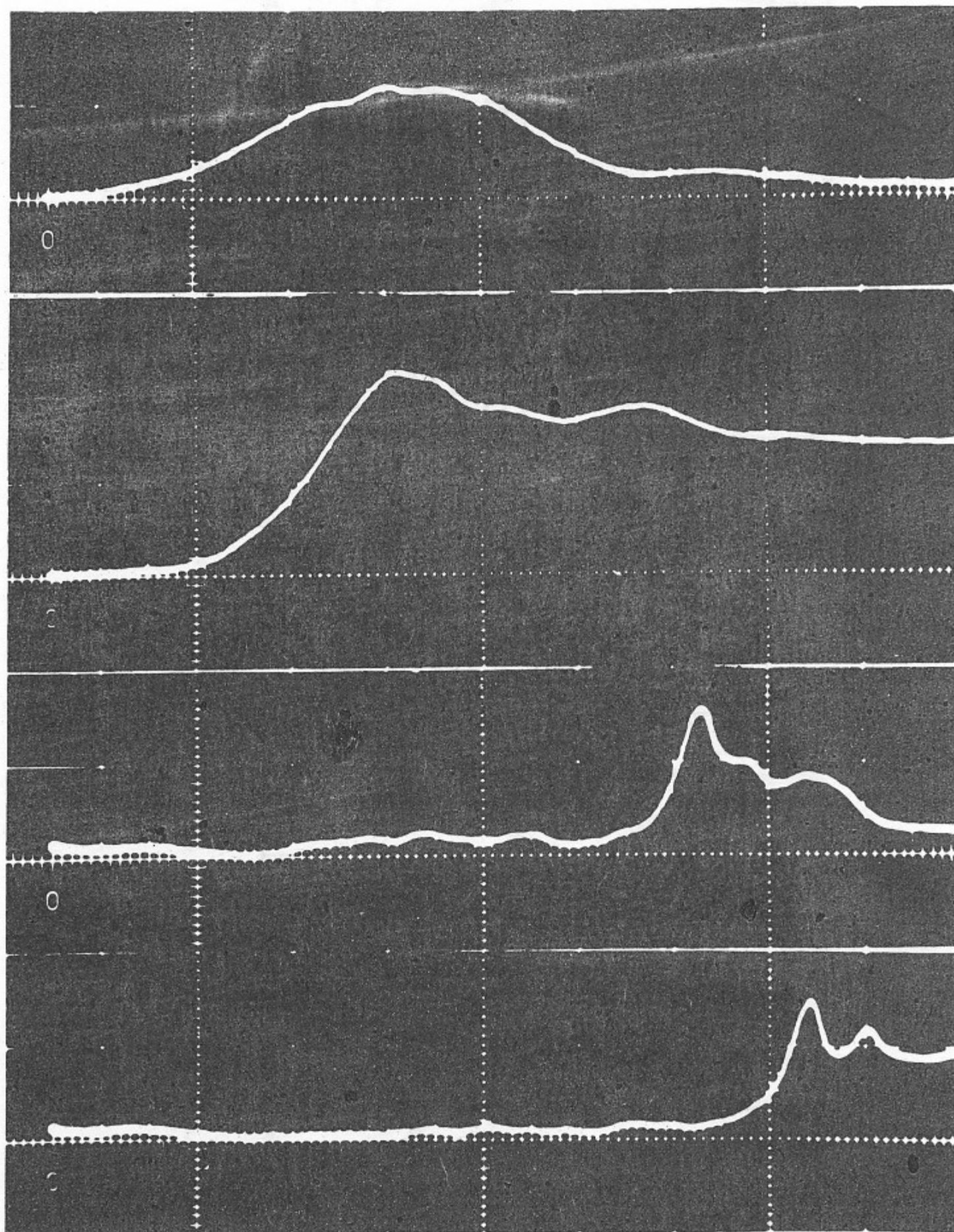


Рис. II-3,2. Осциллограммы сигналов с поглотителя на расстояниях 1, 3, 12, 19 см от источника (на рис. сверху вниз). Масштаб времени и концентрация соответственно 20 мксек и $2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ на большое деление.

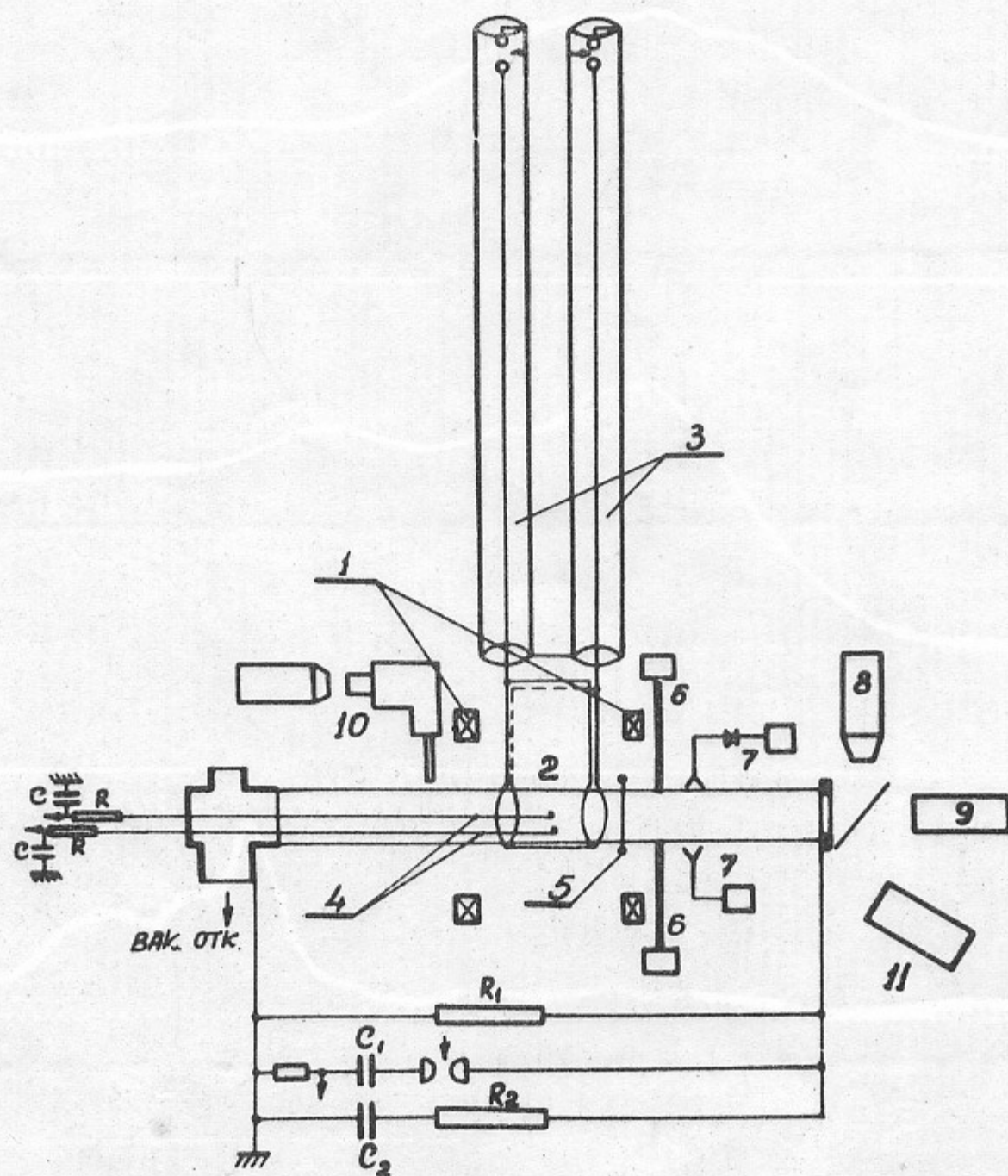


Рис. II-4,1. Блок-схема установки.

1 - катушка квазистационарного магнитного поля,
 2 - катушка быстронарастающего магнитного поля,
 3 - водяная накопительная линия, 4 - магнитные зонды,
 5 - диамагнитный зонд, 6 - система зондирования
 атомными пучками, 7 - 4 -мм СВЧ - зондирование, 8 - ЭОП,
 9 - датчик рентгеновского излучения, 10 - система регист-
 рации во времени спектра и ширины спектральных линий,
 11 - датчик нейтронного излучения.

$R_1 = 300$ мгом; $R_2 = 10$ ком; $C_1 = 0,1$ мF , 30 кв;
 $C_2 = 0,1$ мF , 30 кв.

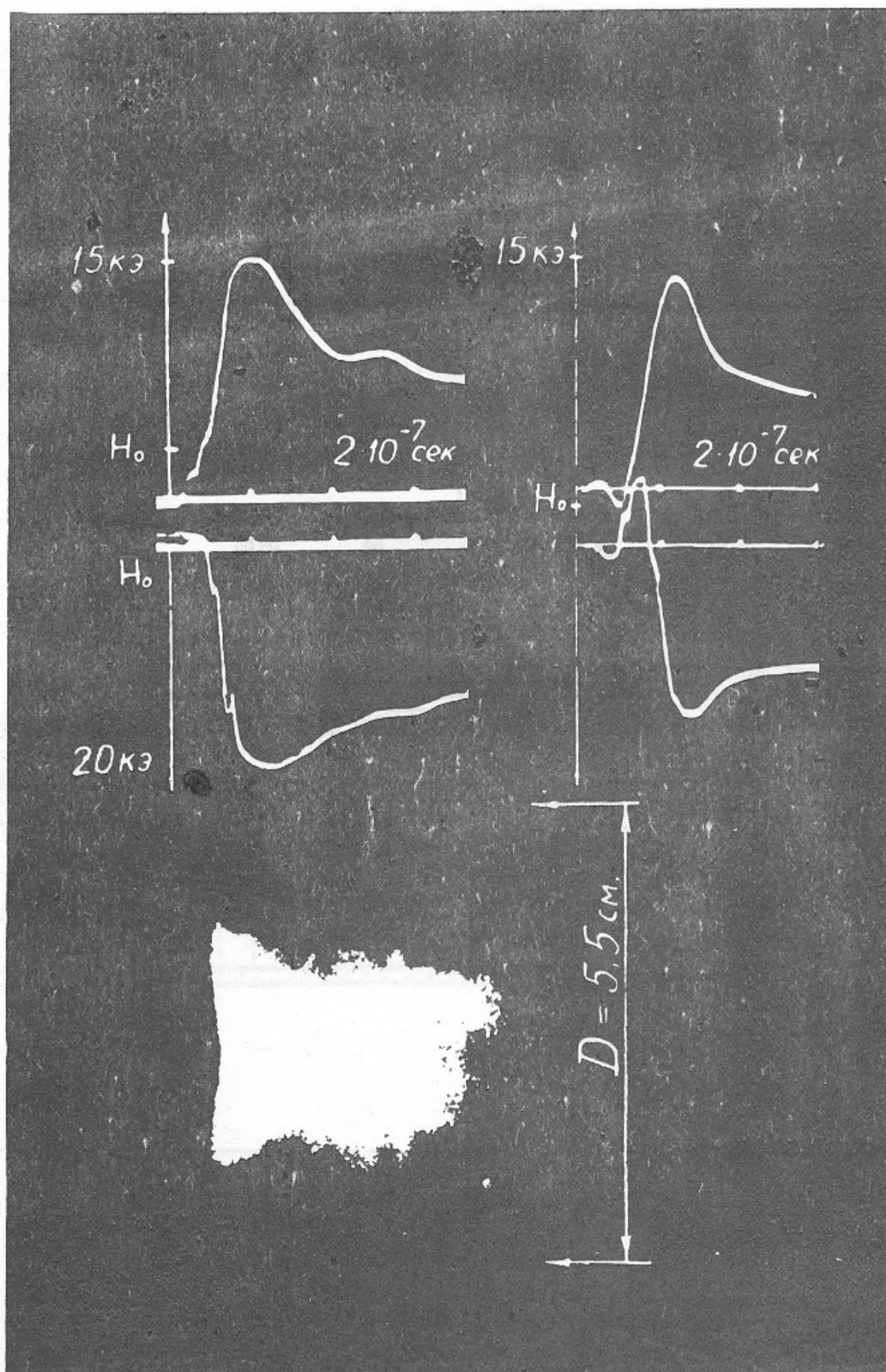


Рис. 11-4,2; а) Осциллограммы двух магнитных зондов, расположенных на расстояниях 0,5 и 2,5 см от оси $H_0 = 1$ кэ.

б) Фоторазвертка вертикальной щели в ударном витке, полученном с помощью ЭОП.

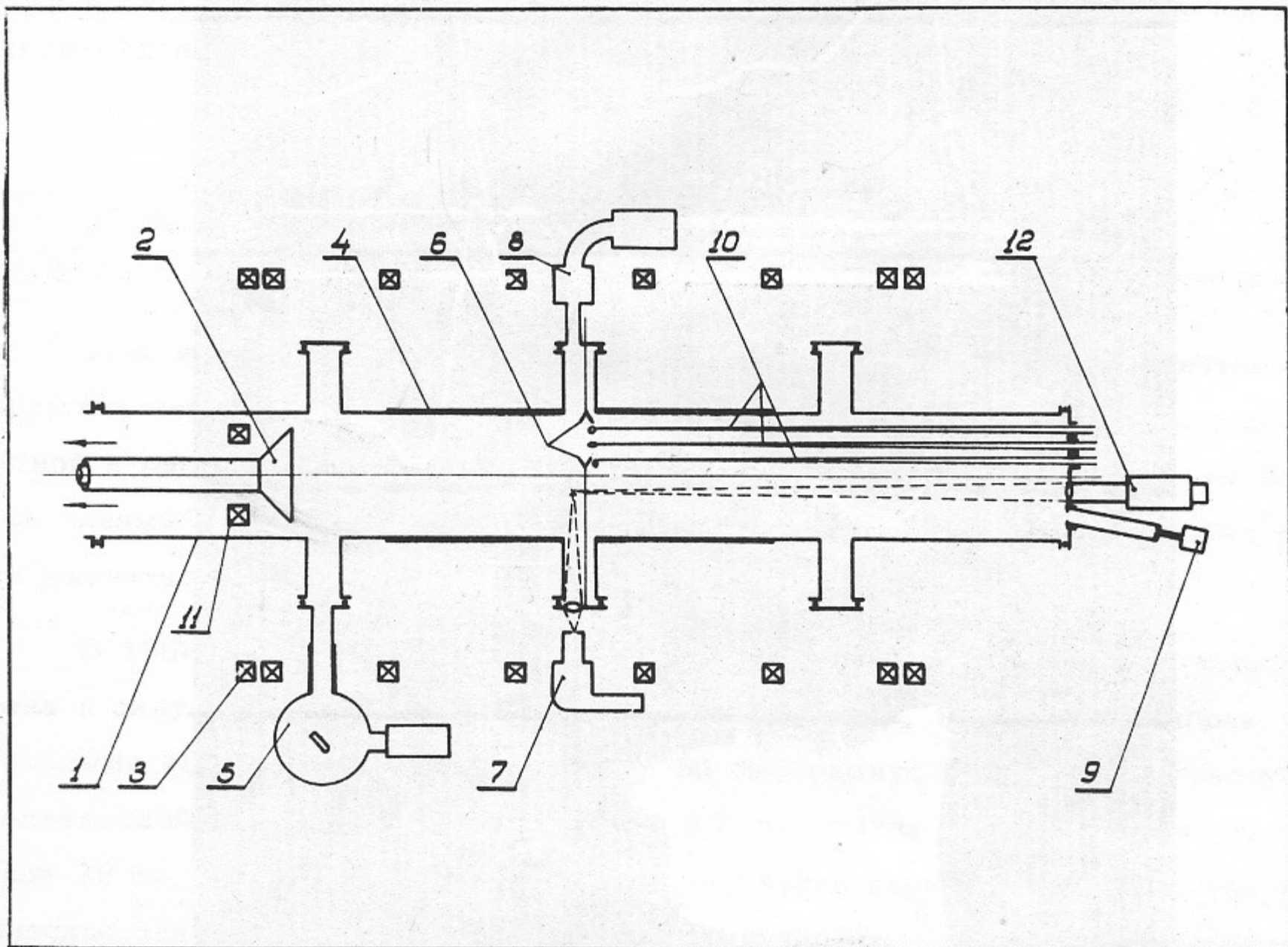


Рис. II-5,1. Схема установки УН-6.

- 1 - вакуумная камера, 2 - ударная система,
 3 - катушки квазистационарного магнитного поля,
 4 - виток предионизации, 5 - спектрометр,
 6 - антенны СВЧ - интерферометров, 7 - приемник
 рассеянного излучения, 8 - аппаратура регистрации
 нейтральных атомов, 9 - натекатель, 10 - магнитные
 зонды, 11 - корректирующая катушка, 12 - лазер.

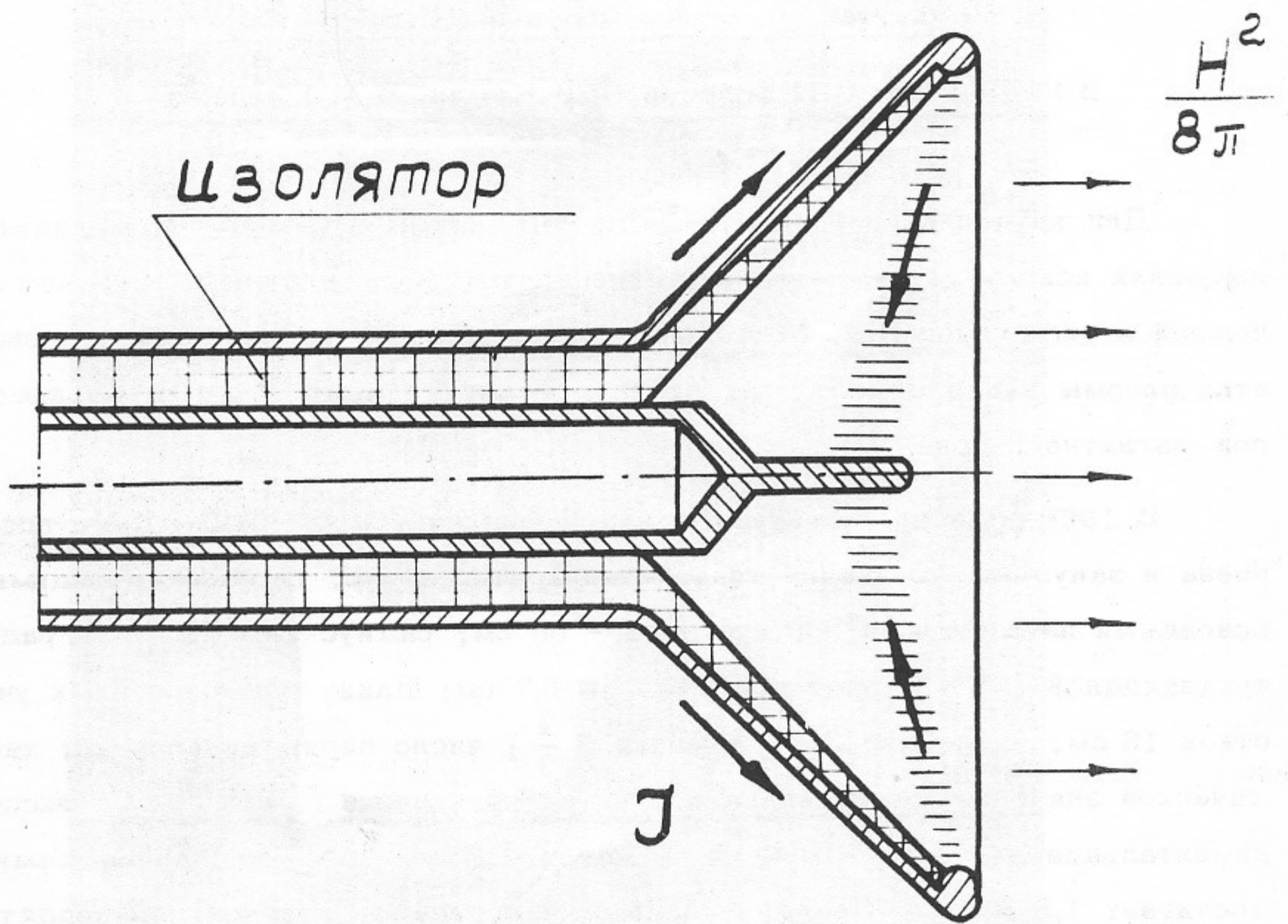


Рис. II-5,2. Ударная система.

Ш. ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ ЛОВУШЕК

В Институте ядерной физики проводятся исследования устойчивости, турбулентности и диффузии плазмы в различных типах магнитных ловушек. Наиболее перспективными в настоящее время представляются тороидальные магнитные ловушки типа стелларатора или спирального мультиполя, изучению которых уделяется основное внимание. Ведутся также работы по изучению магнитных ловушек типа пробкотрона.

1. Замкнутая магнитная ловушка (стелларатор)

В.И.Бочаров, В.И.Волосов, А.В.Комин, В.М.Панасюк
Ю.Н.Юдин

Для изучения свойств термоядерной плазмы в замкнутых магнитных ловушках используется метод моделирования при помощи относительно холодной и редкой плазмы. Модельный эксперимент позволяет изучать свойства плазмы в зависимости как от параметров плазмы, так и от параметров магнитного поля.

В 1967 году в Институте ядерной физики СО АН СССР была построена и запущена установка типа "стелларатор" (рис. 1) со следующими основными параметрами: радиус тора - 50 см; радиус камеры 5 см; радиус трехзаходной ($\ell = 3$) винтовой обмотки 6,7 см; длина прямолинейных участков 16 см; число периодов обмотки $8 \frac{2}{3}$; число периодов поля 26; теоретическое значение максимального угла прокручивания $\dot{\iota} = 4\pi$; экспериментальное значение $\dot{\iota} \approx \pi$; магнитное поле в стационарном режиме достигает $1,5 \div 2$ кэ. Создание плазмы и нагрев электронов производятся методом стохастического нагрева [6], в котором высокочастотное напряжение ($f = 5$ мгц; $U = 40$ в) приложено к разрезу металлической камеры.

Эксперименты, проведенные при длине свободного пробега электронов, равной или меньшей периметра установки, позволили аппроксимировать время распада плазмы следующей формулой:

$$\tau = K \varepsilon^2 H^2 F(p)$$

где ε - величина пропорциональная отношению токов в винтовой и тороидальной обмотках стелларатора, H - продольное магнитное поле, p - давление нейтрального газа.

В плазме наблюдаются колебания с частотами, близкими к дрейфовой частоте. Наиболее вероятно, что они связаны с "универсальной" (дрейфовой) неустойчивостью. В экспериментах плотность плазмы меняется от 10^9 до 10^{10} см⁻³; плотность нейтрального газа от 10^{15} см⁻³ до 10^{11} см⁻³; средняя энергия электронов ~ 7 эв, энергия ионов порядка 0,1 эв, время распада плазмы от 10^{-4} сек до 10^{-2} сек.

2. Ловушка с магнитными пробками и радиальным электрическим полем

С.Г.Константинов, О.К.Мышкин, А.Ф.Сорокин, Ф.А.Цельник

В ловушке с магнитными пробками при наличии радиального электрического поля анизотропная неустойчивость, связанная с наличием "конуса потерь" отсутствует, если тепловая скорость ионов меньше cE/H . Это связано с тем, что область удержания частиц в таких ловушках (в отличие от пробкотронов без радиального электрического поля) ограничена в пространстве скоростей не конусом, а гиперболоидом вращения, т.е. система является "абсолютной" ловушкой для частиц с энергией меньше некоторой.

По этой же причине существенно уменьшается уход частиц на торцевые поверхности за счёт кулоновских соударений.

В настоящее время ведутся эксперименты на установке со следующими параметрами: магнитное поле в центре камеры \sim до 10 кэ, продольное пробочное отношение - от 1,5 до 2,8, минимум В (поперечная глубина магнитной "ямы") $\sim 20\%$. Диаметр камеры - 20 см, расстояние между пробками - 70 см.

В проводимых в настоящее время предварительных экспериментах плазма с плотностью 10^9 см⁻³ и $T_e \sim 1$ кэв создается за счёт разряда Пеннинга.

Предполагается установка инжекторов ионов и электронов на торцевых поверхностях.

3. Магнитная ловушка с релятивистскими электронами

В.Е.Пальчиков

Эксперименты по стабилизации плазмы в магнитной ловушке при помощи релятивистских электронов проводились с 1961 по 1967 г. Предпола-

галось, что наличие некоторого количества релятивистских электронов в термоядерной плазме может стабилизировать эту плазму. Однако уже первые эксперименты показали, что для релятивистских электронов в магнитной ловушке имеются специфические неустойчивости, препятствующие накоплению достаточной плотности частиц. Результаты этих экспериментов были изложены на конференции в Калэме в 1965 году /1/.

Дальнейшее изучение показало, что при накоплении быстрых электронов развивается несколько типов неустойчивостей: продольная пучковая неустойчивость, продольная неустойчивость, связанная с эффектом "отрицательной массы", развиваются также неустойчивости типа циклотронных и т.д. /7/.

Развитие этих экспериментов требует создания очень мощного инжектора релятивистских электронов для непрерывной инжекции в течение 10^{-3} - 1 сек, т.е. решения весьма сложной технической задачи. В связи с этим в настоящее время эксперименты с горячими электронами прекращены.

4. Тороидальная магнитная ловушка "Спираль"

С.Г.Алиханов, Н.Д.Ромашко, С.Л.Андреев, А.И.Иванченко

Ведутся работы по созданию универсальной тороидальной установки, на которой возможно будет исследовать удержание плазмы низкой плотности либо с левитирующими проводниками, либо в конфигурациях с $V' < 0$ без внутренних проводников (типа предложенной Розенблютом и др.). На фотографии (рис.1) показан вариант системы - спиральный мультиполь, представляющий собой свободно падающую спираль ($\phi = 100$ см, $e = 10$ см, шаг = 5 см) в тороидальном магнитном поле. ($H_{\text{макс}} = 10$ кэ). Индуцированный в спирали ток образует мультипольную конфигурацию, обладающую средним минимумом B и широм. Специально подобранные нелинейные элементы в разрядном контуре, питающем внешнюю спираль, могут обеспечить импульс тока с плоской вершиной в течение 5 мсек. Охлаждение внутреннего проводника до температуры жидкого азота увеличивает полезное время ловушки. Для создания плазмы используется инжектор типа конического θ - пинча, а также ВЧ - пробой начального газа в самой системе. Проводятся численные расчёты полей такой конфигурации.

5. Исследование удержания одиночных частиц в пробкотроне

А.Н.Дубинина, Л.С.Красицкая, Ю.Н.Юдин, В.Г.Пономаренко
Л.Я.Трайнин, В.И.Юрченко, А.Н.Яснецкий

В первой группе работ (А.Н.Дубинина, Л.С.Красицкая, Ю.Н.Юдин) на установке типа пробкотрона исследовалось влияние градиента магнитного поля на время удержания отдельных заряженных частиц (электронов). Большие времена жизни (до 400 сек) позволяли наблюдать накопление малых изменений адиабатического инварианта.

Установлено, что существует критическое значение параметра адиабатичности $(\rho/R) \sim (4,0 \pm 0,5) \cdot 10^{-2}$ (ρ - ларморовский радиус, R - размер ловушки), при превышении которого возникает нарушение адиабатичности и уход частиц из ловушки. Критическое значение параметра адиабатичности слабо зависит от геометрии магнитного поля.

Во второй группе работ (В.Г.Пономаренко, Л.Я.Трайнин, В.И.Юрченко, А.Н.Яснецкий), производилось измерение среднего времени жизни электронов в ловушке в различных условиях, в том числе при импульсном включении дополнительного магнитного поля (ИВДП), а также изучалось распределение электронов по магнитным моментам в различные моменты времени.

Основным результатом, так же, как и в первой группе работ было наблюдение слабой неадиабатичности: время τ падает примерно на порядок при некотором критическом значении магнитного поля, которое зависит от энергии электронов, конфигурации поля и давления. Критическое значение параметра адиабатичности изменяется в пределах $0,02 \pm 0,12$ в зависимости от конфигурации поля, вакуума и начальных условий. Время неадиабатического выхода электронов из ловушки, измеренное в опытах с ИВДП, зависит от вакуума.

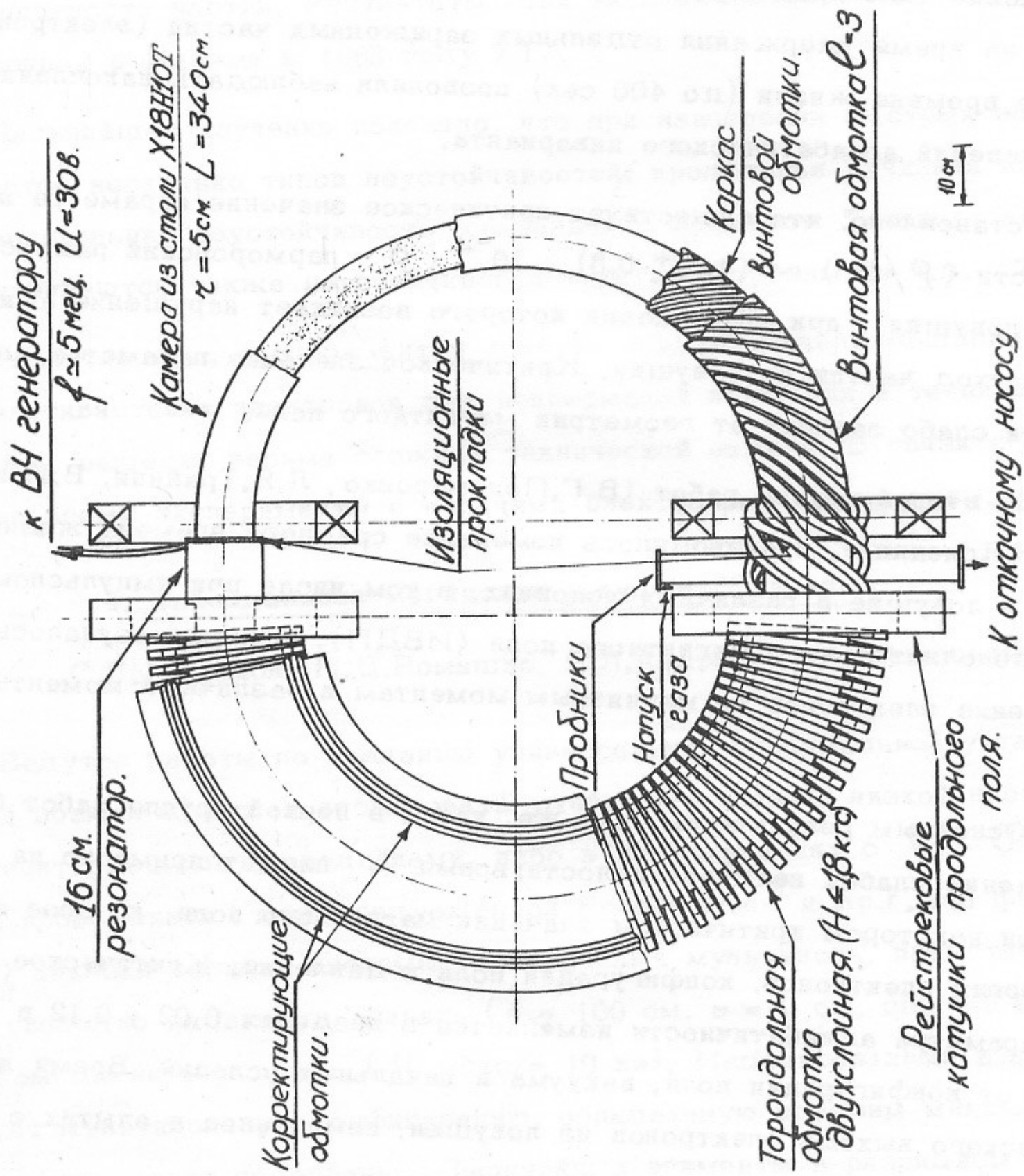


Рис. III-1.1. Схема стелларатора.

1У. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ ЩЕЛОЧНОЙ ПЛАЗМЫ

Щелочная плазма представляет собой удобный объект для изучения различных физических явлений в плазме. В Институте производились работы по исследованию устойчивости, турбулентности, диффузии щелочной плазмы и по ускорению частиц в ней.

1. Исследование неустойчивости, возбуждаемой током

Р.А.Салимов, Н.С.Бучельникова

Эксперименты проводились на установке типа Q - машины с калиевой плазмой. Плазма образуется на горячем ионизаторе в режиме электронного слоя и движется к холодному торцу со скоростью $V_0 \sim V_{Te}$. Длина плазменного столба $L \sim 40$ см, диаметр $2R \sim 4$ см, $H \sim 0,5 \div 3$ кэ, $n \sim 10^9 \div 10^{10}$ см⁻³ (плазма практически бесстолкновительная).

Ранее было обнаружено, что при пропускании тока по всему сечению плазменного столба возбуждаются продольные колебания, отождествленные с ионно-звуковыми. В настоящей работе более детально исследована токовая неустойчивость. Показано, что первичной неустойчивостью является ионно-циклотронная, а колебания типа ионно-звуковых возбуждаются за счёт нелинейных эффектов; исследована турбулентность плазмы и диффузия поперёк магнитного поля.

Возбуждение ионно-циклотронной неустойчивости наблюдается при пропускании тока вдоль оси плазменного столба по сечению ~ 1 см ("трубка тока"), когда ток становится больше критического, чему соответствует критическая скорость дрейфа электронов $U_c \sim 40 V_{Te}$. Неустойчивость проявляется в возбуждении радиальных волн, имеющих продольную составляющую с частотами, равными ионно-циклотронной и её гармоникам. Колебания практически регулярны, амплитуда их не превосходит величины $\tilde{\psi} \sim 0,1 T$.

При пропускании тока по двум или нескольким трубкам в каждой из них возбуждаются ионно-циклотронные колебания. Колебания в разных трубках оказываются нескоррелированными, что приводит к появлению нерегулярных азимутальных разностей потенциала. Следствием этого являются радиальные "выбросы" плазмы. Увеличение числа токовых трубок приводит к увеличению амплитуды нерегулярных колебаний потенциала и потока плазмы поперёк

рёк магнитного поля. При этом колебания в каждой из трубок становятся более хаотическими, так что в спектре не наблюдается выделенных пиков.

Пропускание тока по всему сечению плазменного столба эквивалентно возбуждению большого числа трубок. В этом случае состояние плазмы близко к сильно-турбулентному: амплитуда колебаний потенциала достигает величины $\tilde{\varphi} \approx 0,5T$, спектр в области циклотронных частот является шумовым, корреляция колебаний теряется на расстоянии ~ 1 см (рис. 1). Коэффициент диффузии практически совпадает с Бомовским. Наблюдается ускорение ионов до энергии $\sim 30T_0$ ($T_0 \sim 0,2$ эв).

Быстрое возрастание диффузии при возбуждении неустойчивости приводит к падению плотности плазмы и тока. Когда ток становится меньше критического, неустойчивость и диффузия прекращаются. Начальная плотность плазмы восстанавливается за счёт потока с ионизатора. Когда фронт этого потока достигает холодного торца, ток вновь становится больше критического, неустойчивость возбуждается и весь процесс повторяется.

Таким образом, из-за наличия критического тока в системе возбуждаются низкочастотные релаксационные колебания; частота которых $f \propto V_0/L$. Поскольку скорость $V_0 \sim V_{Ti} \sim \sqrt{T_e/M}$, колебания имеют характер ионно-звуковых.

2. Исследование неустойчивостей, возбуждаемых электронным пучком

А.М.Кудрявцев, В.Т.Астрелин, Н.С.Бучельникова, А.А.Дроздов
Ю.И.Эйдельман

Эксперименты проводились при $L \sim 40 \div 80$ см, $2R \sim 4$ см, $N \sim 1$ кэ, $n \sim 10^9 \div 10^{10}$ см⁻³. Пучок электронов диаметром $d \sim 1$ см инжектируется вдоль оси плазменного столба. Ток пучка 5-20 ма ($n_1 \ll n$), энергия электронов $\sim 10 \div 600$ в ($V_n \gg V_{Te}$).

Если плотность плазмы превышает некоторую критическую величину, при взаимодействии пучка с плазмой возбуждается высокочастотная неустойчивость. Неустойчивость проявляется в возбуждении плазменных волн с частотами $\omega \sim k_z d \omega_0$. ($f \sim 100 \div 1000$ МГц). Фазовая скорость продольной составляющей этих волн практически совпадает со скоростью электронов пучка, откуда следует, что неустойчивость возбуждается черенковским механизмом. Амплитуда колебаний растет с ростом энергии электронов пучка.

Возбуждение высокочастотных колебаний приводит к нагреву электронов плазмы, причём температура электронов растёт с ростом амплитуды колебаний до величины $T_e \sim 10 \div 100 T_0$.

При достаточно большой T_e в плазме развивается низкочастотная неустойчивость, проявляющаяся в возбуждении азимутальных волн с частотами $\sim 30 \div 100$ кгц ($f_{HI} \sim 40$ кгц). Частота колебаний растёт с ростом T_e и падает с ростом H , т.е. возбуждаемые волны имеют характер дрейфовых. Возбуждение этой неустойчивости приводит к появлению диффузии поперёк магнитного поля.

С ростом энергии пучка амплитуда колебаний и диффузия возрастают, колебания становятся более хаотическими. При достаточно большой энергии пучка спектр колебаний становится шумовым, корреляция колебаний теряется на расстоянии ~ 1 см (корреляционная функция подобна приведенной на рис. 1). Коэффициент диффузии близок к Бомовскому. Наблюдается ускорение ионов.

В этом случае так же, как и при токовой неустойчивости, наблюдается возбуждение релаксационных колебаний с частотами $f \sim V_0/L$. Причиной возникновения этих колебаний, по-видимому, является наличие критической плотности плазмы, необходимой для возбуждения высокочастотной неустойчивости.

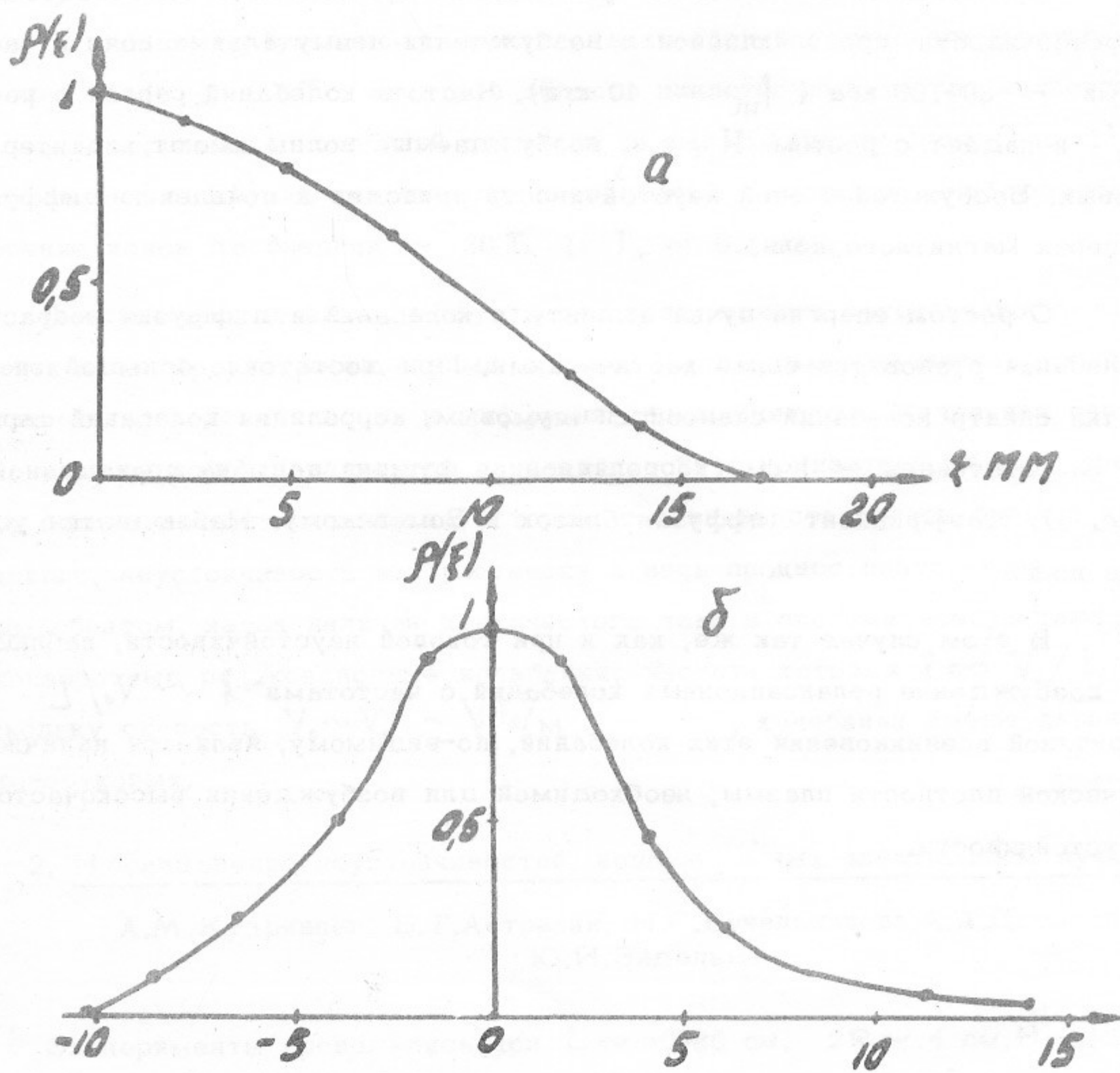


Рис. IV-1,1. Пространственная корреляционная функция колебаний плотности плазмы.

а) азимутальная, б) радиальная.

У. ПОЛУЧЕНИЕ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ

В Институте ядерной физики ведутся работы по получению плотной плазмы, а также работы по созданию мегагауссовых магнитных полей, необходимых для экспериментов с плотной плазмой. Исследования по сверхсильным импульсным магнитным полям представляют и самостоятельный интерес. Ниже описаны основные работы, ведущиеся в этом направлении.

1. Получение мегагауссовых полей методом магнитодинамической коммуляции

С.Г.Алиханов, В.Г.Белан, А.И.Иванченко, Г.Н.Кичигин

Производились опыты по получению мегагауссовых магнитных полей методом, основанным на сжатии контура с током внешними силами. Опыты проводились на двух различных установках, в которых цилиндрический контур ускорялся θ - током /установка СП-1/ и Z -током /установка СП-2/, сжимаемое поле в обоих случаях направлено по оси Z . Энергия, необходимая для ускорения контура, запасалась в конденсаторной батарее энергоёмкостью 700 кдж. В установке СП-1 /рис.1/ полем одновиткового соленоида ускорялся полый алюминиевый цилиндр /лайнер $\phi = 108$ мм, $l = 150$ мм, $\delta = 2$ мм/, который сжимая начальное продольное поле $H_0 = 10$ кгс/. Максимальная величина поля, полученная в экспериментах, $H = 1,5$ Мгс. Положение лайнера в процессе схлопывания, снятое СФР в режиме лупы времени изображена на рис. 2. В установке СП-2 конденсаторная батарея разряжалась на коаксиальную нагрузку, центральным проводником служил полый медный цилиндр / $\phi = 60$ мм, $l = 150$ мм, $\delta = 2$ мм/, который под действием поля сжимался к оси. Сжатие лайнера Z - током позволяет более полно использовать энергию конденсаторной батареи для усиления магнитного поля. Максимальная величина поля, полученная в этих экспериментах, $H = 3,1$ Мгс, что соответствует к.п.д. $\eta \approx 35\%$, и хорошо согласуется с расчётом, выполненным на ЭВМ (рис.5). В настоящее время в лаборатории подготавливаются эксперименты по сжатию магнитного поля в тороидальной конфигурации.

2. Омический нагрев и устойчивость плотной плазмы

С.Г.Алиханов, Э.Л.Бояринцев, И.К. Конкашбаев
В.А.Корнилов, Т.С.Мельникова

Исследовался омический нагрев плотной водородной плазмы в квази-стационарном разряде, промежуточном между линейным Z - пинчем и обычной дугой. Параметры разряда: максимальная амплитуда тока $70 \div 240$ ка, длительность $t \sim 100$ мксек. Давление P столба плазмы, окружённого оболочкой холодного газа, удерживается преимущественно магнитным полем собственного тока

$$2 > \beta = \frac{8\pi P(z=0)}{H_\varphi^2(z=R_{ст.})} > 1$$

Температура плазмы, измеренная по проводимости, ~ 10 эв, плотность $\sim 10^{17} \div 10^{18}$ см $^{-3}$, $\omega_n \tau_e < 1$, радиус токового канала $R_{ст.}$ совпадает с радиусом светящегося столба и составляет 0,6 от радиуса камеры ($R_k = 2,5$ см), рис.1.

В эксперименте изучалась устойчивость плазмы такого разряда. При большой плотности $n \sim 10^{18}$ см $^{-3}$ крупномасштабных возмущений не наблюдается в течение всего времени протекания тока, что подтверждается измерениями компонент ΔH_φ и ΔH_z магнитного поля, рис. 2. При меньшей плотности наблюдается переход от неустойчивого состояния к устойчивому. Мелкомасштабные колебания с $\lambda \ll R_{ст.}$ и $\omega > \frac{1}{t}$ существуют всегда и, по-видимому, приводят к аномальной диффузии и, соответственно, аномальной проводимости и теплопроводности. Максимальная температура ~ 10 эв ограничена в основном излучением для больших плотностей и аномальным теплоотводом для более низких. Так как согласно существующей теории разряд должен быть неустойчив относительно всех неустойчивостей плазмы таких параметров, то для объяснения наблюдаемой микроскопической устойчивости был предложен механизм подавления длинноволновых возмущений: стабилизация излучением и/или теплопроводностью.

3. Применение взрывчатых веществ в плазменных экспериментах

Е.И.Биченков, А.Е.Войтенко, Ю.Е.Нестерихин, О.П.Соболев

Введена в действие взрывная камера, позволяющая производить опыты с плазмой на основе взрывной техники в лабораторных условиях (рис.1).

В опытах используется взрыво-магнитный генератор с током 14 Ма, выходной энергией 1 Мджв, максимальной мгновенной мощностью $\sim 5 \cdot 10^{10}$ вт, и зарядом взрывчатого вещества 1 кг / 1 /. Взрывная камера позволяет одновременно включить 3 таких генератора. Разработана взрывная система, позволяющая получать магнитное поле до 5 Мэ. /Работы совместно с Институтом гидродинамики/.

Проводятся исследования чисто газодинамического (без использования электрических и магнитных полей) метода получения плотной плазмы /2,3/. Получены скорости ударных волн в воздухе при нормальных условиях до $40 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$ и скорости истечения плазменных струй в вакуум до $90 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$

В настоящее время таким путём имеется возможность получить плазму с ионной плотностью до $5 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ при температуре ~ 10 эв и общем числе частиц $\sim 5 \cdot 10^{21}$. Плотная плазма используется в экспериментах по ускорению твердых тел.

Проводятся исследования распространения сильных ударных волн в средах с уменьшающейся плотностью. Для автомобильной задачи о распространении магнитогидродинамической ударной волны найдены условия ускорения /4/. Начаты экспериментальные работы.

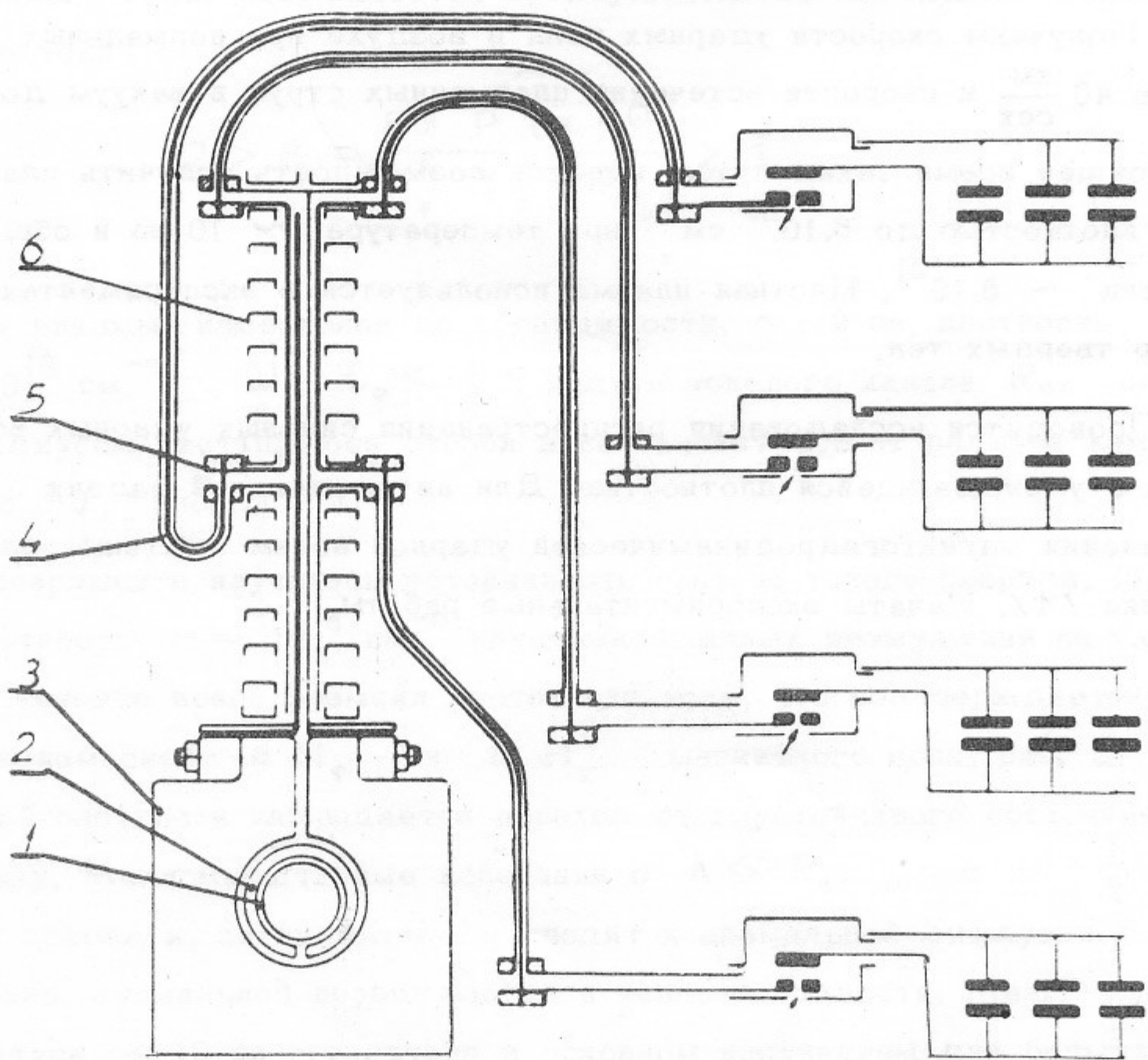


Рис. V-1,1. Схема установки СП.

1 - лайнер, 2 - медный экран, 3 - соленоид,
 4 - кабели, 5 - разъем, 6 - стягивающие швеллеры.

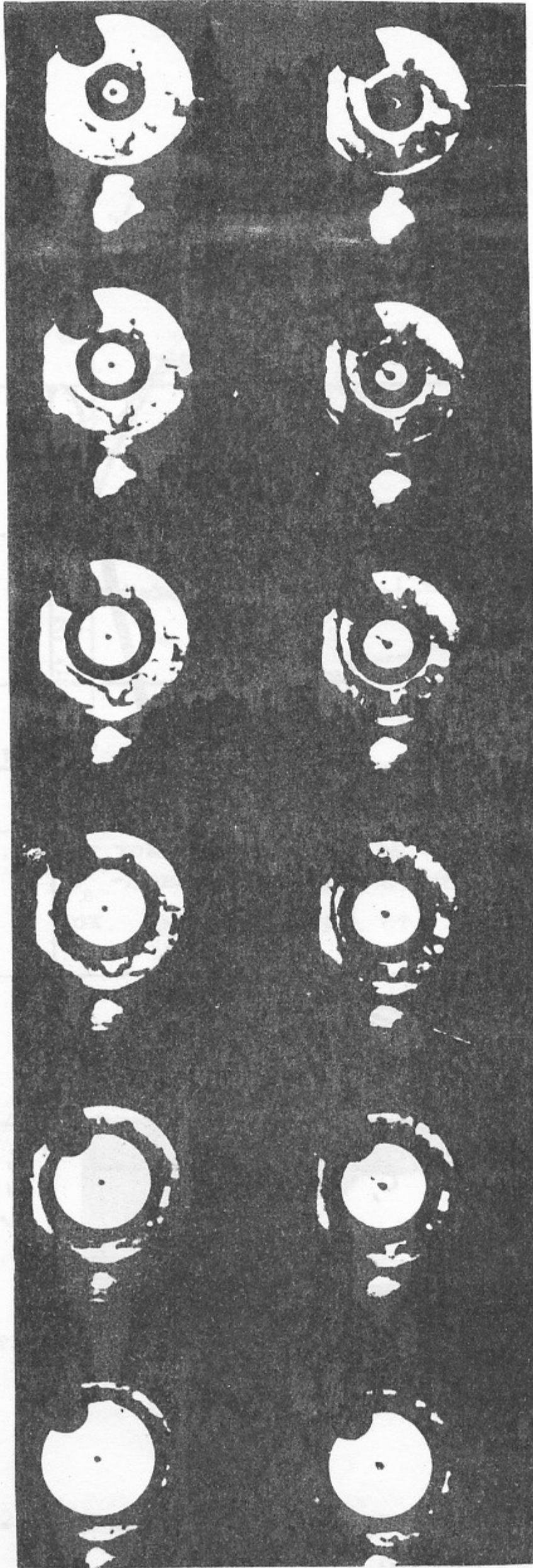


Рис. V-1,2. Фотография движущегося лайнера, снятая СФР в режиме лупы времени.

Интервал между соседними кадрами 4 мксек. Пятно в центре - тень от магнитного зонда.

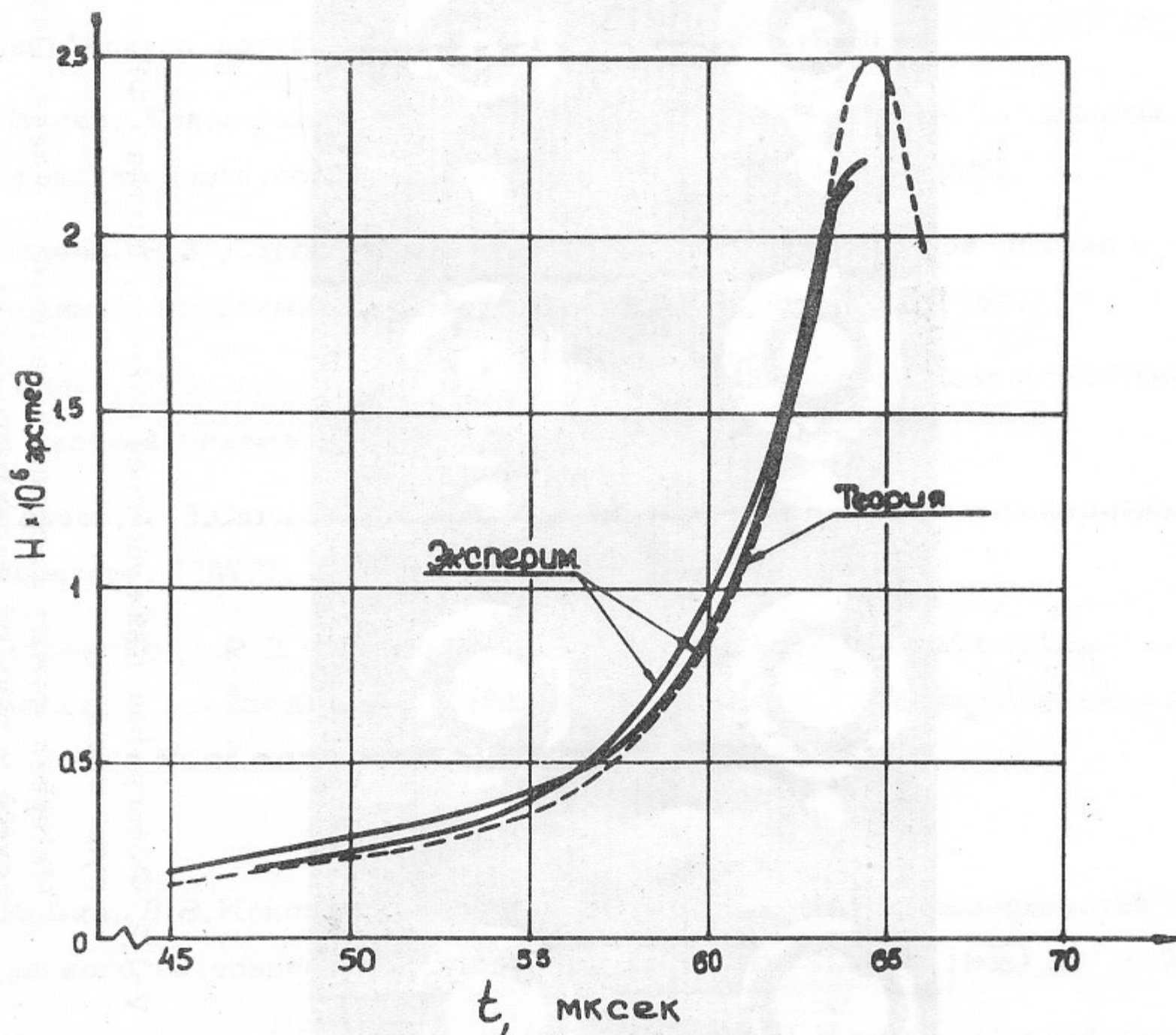


Рис. V-1,3. Экспериментальная и теоретическая (пунктир) зависимости магнитного поля от времени

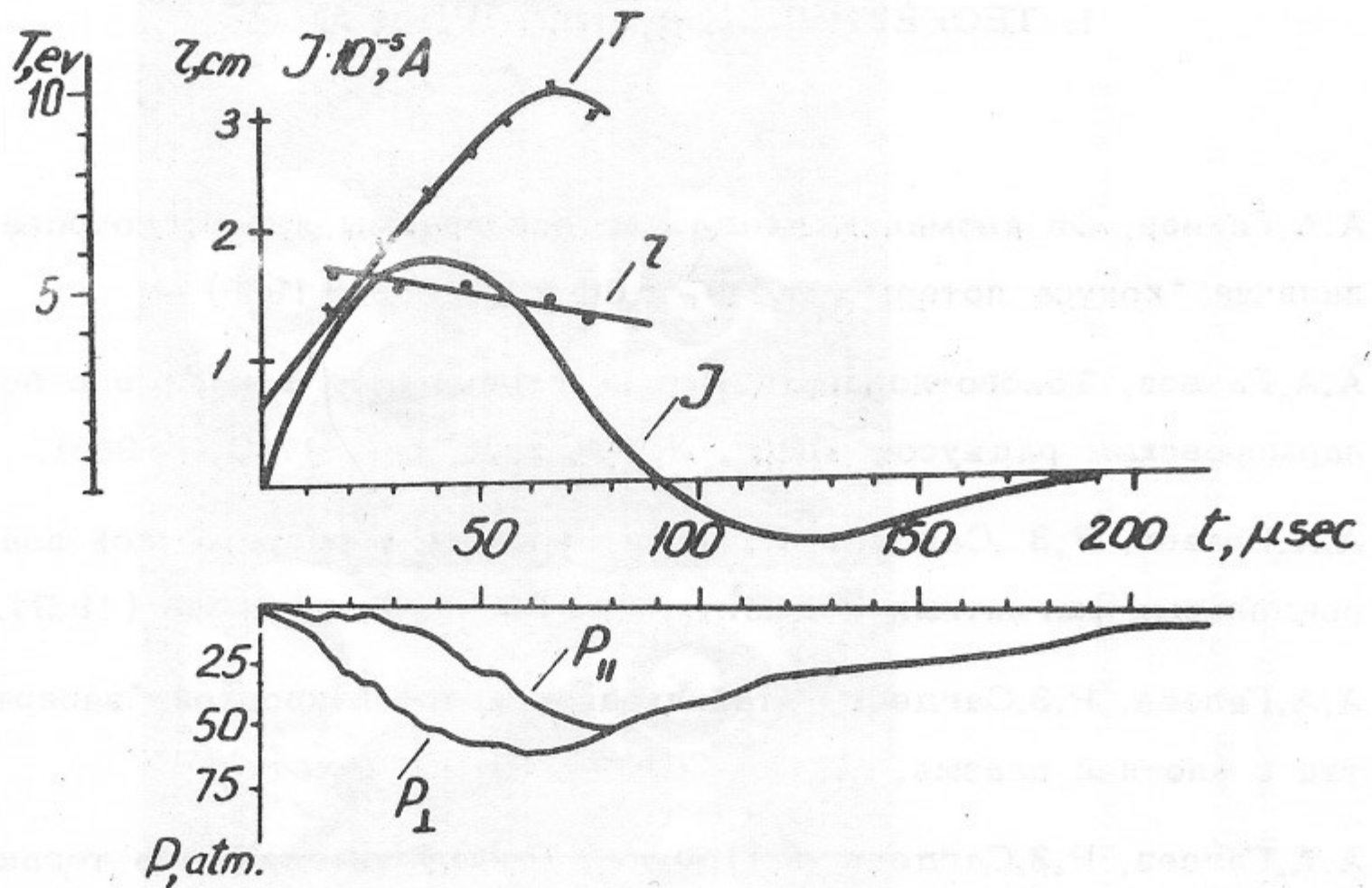


Рис. V-2,1. I - ток, T - температура, z - радиус плазменного столба, $p_{||}$ - давление на оси столба, p_{\perp} - давление вблизи стенок, $p_0 = 20$ мм. рт. ст., $I = 160$ ка.

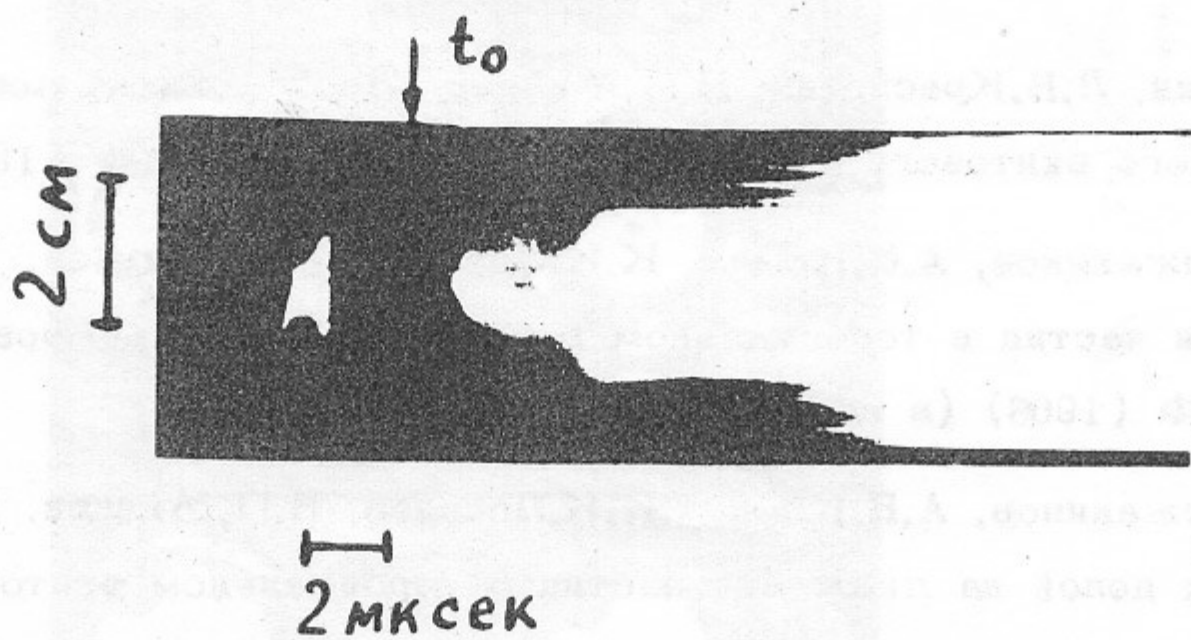


Рис. V-2,1. Непрерывная развертка разряда.
 $I = 160$ ка, $p_0 = 20$ мм рт.ст., t_0 - начало тока.

СПИСОК РАБОТ, ВЫПОЛНЕННЫХ В ИНСТИТУТЕ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
(1966 - 1968 гг.)

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

I - 1

1. А.А.Галеев. Об аномалиях ухода плотной плазмы из пробкотрона из-за наличия "конуса потерь". ЖТФ, т.36, стр.1959, (1966).
2. А.А.Галеев. Токово-конвективные неустойчивости в плазме с большим ларморовским радиусом ионов. ЖТФ, т.36, стр. 1740, (1966).
3. А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев. Явления переноса в разреженной плазме в тороидальных магнитных ловушках. ЖЭТФ, т.53, стр. 348 (1967).
4. А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев. Стабилизация неустойчивостей "запертых" частиц в плотной плазме. ДАН СССР (1968) (в печати).
5. А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев, Г.П.Фюрс. Диффузия плазмы в тороидальном стеллараторе. ПМТФ. (1968), (в печати).
6. N. N. Filonenko, R. Z. Sagdeev, G. M. Zaslavsky. Destruction of magnetic surfaces by magnetic field irregularities: part II. Nuclear Fusion, v. 7, p. 253, (1967)

I - 2

7. А.В.Комин, Л.В.Красицкая, В.П.Минаев. Исследование поверхностей тороидального винтового поля вблизи сепаратрисы. ЖТФ (1968) (в печати).
8. В.Г.Устюжанинов, А.В.Комин, К.К.Лобанов, В.П.Минаев. Исследование движения частиц в тороидальном винтовом поле в дрейфовом приближении. ЖТФ (1968) (в печати).
9. В.Г.Устюжанинов, А.В.Комин, К.К.Лобанов, В.П.Минаев. Влияние электрических полей на движение частиц в тороидальном винтовом поле. ЖТФ, (1968) (в печати).

I - 3

10. С.С.Моисеев. Об одной возможности аномальной трансформации волн в плазме. ПМТФ, № 3, (1966).

11. Н.С.Ерохин, В.Е.Захаров, С.С.Моисеев. Генерация 2-ой гармоники при падении электромагнитной волны на неоднородную плазму. Доклад на Международном симпозиуме по ударным волнам в плазме, г.Новосибирск, 1-5 августа 1967 г.; ЖЭТФ, (1968) (в печати).
12. Е.Я.Коган, С.С.Моисеев, В.Н.Ораевский. Применение вариационного метода при исследовании диссипативных неустойчивостей в плазме. ПМТФ, (1968) (в печати).
13. Е.Я.Коган, С.С.Моисеев, В.Н.Ораевский. Некоторые магнитогидродинамические модели описания плазмы в магнитном поле в применении к исследованию устойчивости. ПМТФ, (1968) (в печати).
14. Е.Я.Коган, С.С.Моисеев, В.Н.Ораевский. Об устойчивости плазмы в комбинированных магнитных полях. ПМТФ, № 3, стр. 12, (1967).
15. Н.С.Ерохин, С.С.Моисеев. Некоторые особенности задач магнитогидродинамической теории устойчивости, приводимых к дифференциальному уравнению с произвольным β , ПМТФ, № 2, стр. 25, (1966).
16. С.С.Моисеев. Влияние движения ионов вдоль магнитного поля на устойчивость плазмы. Письма ЖЭТФ 1 августа 1966 г.
17. С.С.Моисеев. Влияние температурных возмущений на устойчивость плазмы. ПМТФ, № 6 (1967).
18. С.С.Моисеев, А.М.Фридман. Об устойчивости частично ионизованной плазмы в области ионно-звуковых частот. Доклады УШ Международной конференции по ионизованным газам, Вена, 1967 г.
19. А.М.Фридман. Об аномальной диффузии частиц столкновительной плазмы в магнитном поле. ЖТФ, т.38, № 7, (1968).
20. А.М.Фридман. Медленные непотенциальные волны в неоднородной плазме. ПМТФ, (1968) (в печати).
21. А.М.Фридман. К теории непотенциальных колебаний неоднородной плазмы, ЖТФ (1968) (в печати).
22. Ю.Б.Найдорф, В.Ц.Гурович, А.М.Фридман. Раскачка волн альфвеновского типа в неоднородной плазме конечного давления. ЖТФ, (1968) (в печати).

23. А.Б.Михайловский, А.М.Фридман. Дрейфовые волны в плазме конечно-го давления. ЖЭТФ, т.51, стр.1430, (1966)

24. А.Б.Михайловский, А.М.Фридман. Резонансное взаимодействие с частицами волн альфвеновского типа. ЖТФ, т.37, стр.1782, (1967).

I - 4

25. Ю.А.Березин, Р.Х.Куртмуллаев. Исследование цилиндрических волн в разреженной плазме. ПМТФ № 1, стр.116, (1967).

26. Ю.А.Березин, Р.Х.Куртмуллаев. Цилиндрические волны в разреженной плазме при наличии сильной бесстолкновительной диссипации. Физика горения и взрыва. № 3, стр. 3, (1966).

27. Ю.А.Березин, В.И.Карпман. О нелинейной эволюции возмущений в плазме и других диспергирующих средах. ЖЭТФ, т.51, стр.1557, (1966).

28. Ю.А.Березин. О формировании солитонов, ЖТФ, т.38, № 1, стр. 24, (1968).

29. В.И.Карпман. Об "особых" решениях уравнений для плазменных колебаний. ЖЭТФ, т.51, № 3, 1966.

I - 5

30. В.И.Карпман. О структуре течения при двумерном обтекании тонкого тела в диспергирующей среде. ЖЭТФ, т.52, № 6, (1967).

31. V.I. Karpmann. Steady flow around a thin body in a rarified plasma. Proc. VIII. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Vienna, (1967)

32. В.И.Карпман. О самомодуляции нелинейных плоских волн в диспергирующих средах. Письма ЖЭТФ, т.6, № 8, 1967.

33. В.И.Карпман, Е.М.Крушкаль. О модулированных волнах в нелинейных диспергирующих средах. Доклад на конференции по квантовой электронике, Познань, (1968).

34. V.I. Karpmann. An asymptotic solution of the Korteweg-de Vries equation. Physics Letters, v.25A, №10, (1967)

35. В.И.Карпман, В.П.Соколов. О солитонах и собственных значениях уравнения Шредингера. ЖЭТФ, т.54, № 5, (1968).

36. В.И.Карпман. Нелинейные волны в диспергирующих средах. Курс лекций, прочитанных в НГУ. Изд-во НГУ (в печати).
37. В.И.Карпман. Some asymptotic relations for solutions of the Korteweg-de Vries equation.
Physics Letters (in the press)

I - 6

38. В.Е.Захаров. Об устойчивости волн в нелинейных средах. ЖЭТФ, т.51, вып.4, (1966).
39. В.Е.Захаров. О неустойчивости самофокусировки света. ЖЭТФ, т.53, вып.5, (1967).
40. В.Е.Захаров. Об устойчивости волн на поверхности жидкости. ПМТФ, вып.2, (1968).
41. В.Е.Захаров. Диссипативная неустойчивость световых волн в нелинейном диэлектрике. Письма ЖЭТФ, т.7, вып.8, стр.290, (1968).
42. В.Е.Захаров, В.С.Львов, С.С.Старобинец. Неустойчивость волн в нелинейных диссипативных средах - приложение к системе спиновых волн. ЖЭТФ, (1968) (в печати).

I - 7

43. Г.М.Заславский, В.Е.Захаров. Распадная неустойчивость волн со случайно меняющейся фазой. ЖТФ, т.37, стр.10, (1967).
44. Г.М.Заславский, Н.Н.Филоненко. Трансформация волн в среде со случайными неоднородностями. ПМТФ, т.1, стр.21, (1967).
45. Г.М.Заславский, С.С.Моисеев. Об устойчивости плазмы при наличии флуктуирующих параметров. ЖТФ, т.36, стр.2217, (1966).
46. Г.Е.Векштейн, Г.М.Заславский. К теории релаксации под действием внешнего случайного поля. ДАН СССР, т.172, стр.69, (1967).
47. Г.М.Заславский. О кинетическом уравнении для осциллятора в случайном внешнем поле. ПМТФ, т.6, стр.76, (1966).

48. Г.М.Заславский. О кинетическом уравнении для осциллятора в случайном внешнем поле. ПМТФ, т.6, стр.76, (1966).

49. Р.К.Мазитов, А.М.Фридман. Проблемы многих тел и физика плазмы. Сборник докладов, Москва, (1967).

I - 8

50. В.Е.Захаров, Н.Н.Филоненко. О спектре случайных колебаний поверхности жидкости. ДАН СССР, т.170, вып.6, (1966).

51. В.Е.Захаров, Н.Н.Филоненко. Слабая турбулентность капиллярных волн. ПМТФ, № 5, (1967).

52. В.Е.Захаров. О спектре слабой турбулентности в плазме без магнитного поля. ЖЭТФ, т.51, вып.2, (1966).

53. В.Е.Захаров. О спектре поверхностной турбулентности. Письма ЖЭТФ (1968) (в печати).

I - 9

54. Г.М.Заславский. Стохастическая неустойчивость нелинейных колебаний. ПМТФ, т.2, стр.16, (1967).

55. Г.М.Заславский, Р.З.Сагдеев. О пределах статистического описания нелинейного волнового поля. ЖЭТФ т.52, с.1083, (1967).

56. Г.М.Заславский, Н.Н.Филоненко. Стохастическая неустойчивость захваченных частиц и условия применимости квазилинейного приближения. ЖЭТФ, т.54, стр.1590, (1968).

I - 10

57. Б.В.Чириков. Резонансные процессы в магнитных ловушках. Атомная энергия, т.6, стр.630, (1959).

58. Ф.М.Израйлев, Б.В.Чириков. Статистические свойства нелинейной струны. ДАН СССР, т.166, стр.57, (1966).

59. Б.В.Чириков. Когда динамическая система становится статистической? Сообщение на Международном съезде математиков, Москва, 1966.

60. Б.В.Чириков. Стохастическое разрушение магнитных поверхностей стелларатора. ДАН СССР, т.174, стр. 1313, (1967).

61. B.W. Chizikov , E. Keil , A. Sessler.
Stochasticity in many-dimensional systems CERN Report
(to be published)
62. А.М.Фридман. Ротационная неустойчивость газового диска. *Астроном. журнал.* т.43, стр.327. (1966).
63. А.М.Фридман. Об устойчивости плоских вращающихся галактик в магнитном поле. *Астроном.ж.* 1968 (в печати).
64. Г.С.Бисноватый-Коган, Б.В.Комберг, А.М.Фридман. К теории образования и устойчивости выбросов из ядер радиогалактик и квазаров. *Астроном.ж.* (1968) (в печати).
65. Г.С.Бисноватый-Коган, А.М.Фридман. О механизме рентгеновского излучения при аккреции плазмы на нейтронную звезду. *Астроном. ж.* (1968) (в печати).
66. В.Ц.Гурович, А.М.Фридман. Кинетическая теория устойчивости масс. *ЖЭТФ* (1968) (в печати).

П. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РАБОТЫ ПО ФИЗИКЕ БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН

П - 1

1. А.М.Искольдский, Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, А.Г.Пономаренко. Эксперименты по бесстолкновительной ударной волне в плазме. *ЖЭТФ*, т.47, стр.774 (1964).
2. Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, В.И.Пильский, Р.З.Сагдеев. Механизм нагрева плазмы бесстолкновительными ударными волнами. Доклад SN-21/218 на II Международной конференции по физике плазмы, Калем, (1965). *Conf. Proc. v. II, p.367*
3. В.Г.Еселевич, Р.Х.Куртмуллаев, В.И.Пильский. Влияние дисперсионных эффектов на структуру ударной волны в замагниченной плазме. *Письма ЖЭТФ*, т.5, в.9, стр.311 (1967).
4. Р.З.Сагдеев. Коллективные процессы и ударные волны в разреженной плазме. *Вопросы теории плазмы*, Атомиздат, с.20, (1964)

5. Ю.А.Березин, Р.Х.Куртмуллаев. Ударные волны в плазме. ПМТФ. 1, (1966).
6. Ю.А.Березин, Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин. Бесстолкновительные ударные волны в плазме. Физика горения и взрыва, т.1, стр.3, (1966).
7. Ю.А.Березин, Р.Х.Куртмуллаев. Исследование цилиндрических волн в разреженной плазме. ПМТФ, т.1, стр.116, (1967).
8. В.Г.Еселевич, Р.Х.Куртмуллаев, В.Л.Масолов, К.И.Меклер, В.И.Пильский. Исследование ударных волн в плазме. Доклад на Международном симпозиуме по физике ударных волн в плазме, Новосибирск, (1967).
9. В.Г.Еселевич, Р.Х.Куртмуллаев, К.И.Меклер, В.И.Пильский. Исследование опрокидывания сильной ударной волны в плазме. Доклад на II Европейской конференции по термоядерному синтезу и физике плазмы, Стокгольм, Швеция, (1967).
10. Р.Х.Куртмуллаев, В.Л.Масолов, К.И.Меклер, В.И.Пильский. Изомагнитный скачок во фронте сильной бесстолкновительной ударной волны. Письма ЖЭТФ т.7, в.2, стр. 65, (1968).

II - 2

1. Э.П.Кругляков, В.К.Малиновский, Ю.Е.Нестерихин. Параметры плазменных сгустков коаксиального инжектора. Магнитная гидродинамика, т.1, стр. 80, (1965).
2. Э.П.Кругляков, В.К.Малиновский, Ю.Е.Нестерихин. О возможности определения температуры и плотности нестационарной плазмы методами оптической интерферометрии. Магнитная гидродинамика, т.2, стр.34, (1965).
3. Г.Г.Долгов-Савельев, В.К.Малиновский, Ю.Е.Нестерихин. Осцилляторная структура квазистационарной магнитогидродинамической ударной волны в плазме. ЛМ и ТФ, т.4, стр.111, (1967).
4. Г.Г.Долгов-Савельев, А.И.Курбатов, В.К.Малиновский. Квазистационарные ударные волны в плазме без магнитного поля. ПМТФ, (1968).
(в печати).

5. Г.Г.Долгов-Савельев, А.М.Искольдский, Э.П.Кругляков, В.К.Малиновский. Электронно-оптический метод регистрации томсоновского рассеяния света рубинового лазера плазмой. ЖТФ, (1968) (в печати).
6. Г.Г.Долгов-Савельев, А.И.Курбатов, В.К.Малиновский. Численный расчёт структуры фронта ударных волн в плазме, распространяющихся под углом к магнитному полю. ПМТФ, (1968) (в печати).
7. Г.С.Беликова, А.Б.Гильварг, Г.Г.Долгов-Савельев, В.Е.Панченко. Об отражательной способности кислой калиевой соли фталевой кислоты. Оптика и спектроскопия, 24, (1968).
8. Г.Г.Долгов-Савельев, В.Е.Панченко. Сечение возбуждения К-серии аргона электронным ударом. Оптика и спектроскопия, (1968) (в печати).
9. Г.Г.Долгов-Савельев, В.Е.Панченко. Об определении функции распределения электронов по энергиям по характеристическому рентгеновскому излучению плазмы. Оптика и спектроскопия, (1968) (в печати).
10. Г.Г.Долгов-Савельев, В.Е.Панченко. Техника исследования мягкого рентгеновского излучения плазмы. Оптика и спектроскопия, (1968) (в печати).
11. Г.Г.Долгов-Савельев, В.Е.Панченко. Источник монохроматического мягкого рентгеновского излучения. ПТЭ, (1968) (в печати).
12. Г.Г.Долгов-Савельев, В.Е.Панченко. Измерение сечений возбуждения рентгеновских серий аргона, хлора и ксенона электронным ударом. Оптика и спектроскопия, (1968) (в печати).

II - 3

1. А.М.Искольдский, Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, А.Г.Пономаренко. Возбуждение сильных бесстолкновительных ударных волн в дейтериевой плазме. ПМТФ № 6, стр.119, (1965).
2. Р.Х.Куртмуллаев, Ю.Е.Нестерихин, В.И.Пильский, Р.З.Сагдеев. Механизм нагрева плазмы бесстолкновительными ударными волнами. Доклад СМ-21/218, Калэм, в. II, р.367, (1965).
3. Ю.Е.Нестерихин, А.Г.Пономаренко, Б.А.Яблочников. О генерации бесстолкновительных ударных волн, распространяющихся вдоль магнитного поля. Письма ЖЭТФ, т.4, в.10, стр.403, (1966).

4. Н.И.Алиновский, Ю.Е.Нестерихин, Б.К.Пахтусов. Диагностика водородной плазмы трехкомпонентным пучком быстрых нейтральных частиц (H_1^0 , H_2^0 , He^0). Доклад на УШ Международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Вена, (1967), стр. 515.
5. А.М.Искольдский, Ю.Е.Нестерихин, А.Н.Пазырин, А.Г.Пономаренко. Миллимикросекундная фоторегистрация процессов, протекающих в быстром Θ -пинче Диагностика плазмы. Вып.2, стр.137, (1968).

Ш. ИЗУЧЕНИЕ МАГНИТНЫХ ЛОВУШЕК

Ш - 1,2,3

1. Г.И.Будкер, В.И.Волосов, С.С.Моисеев, В.Е.Пальчиков, Ф.А.Цельник. Плазма с релятивистскими электронами в ловушке с магнитными пробками. *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*. v. II, p.245, IAEA, Vienna, (1966)
2. В.И.Волосов, В.Е.Пальчиков, Ф.А.Цельник. Катод с импульсным нагревом эмиттирующей поверхности. ПТЭ, № 3, стр. 169, (1966).
3. В.И.Волосов, В.Е.Пальчиков, Ф.А.Цельник. Об одном методе инжекции заряженных частиц в магнитные ловушки. ЖТФ, т.36, стр.1649, (1966).
4. В.И.Волосов, А.А.Забродов, В.Е.Пальчиков, Ф.А.Цельник. Использование полифенилового эфира в паромасляном насосе Н-1-С. ПТЭ, № 6, стр.155, (1966).
5. В.И.Волосов, С.Н.Богданов. Диагностика ионной компоненты дейтериевой плазмы с помощью дифференциального нейтронного спектра. ЖТФ, № 4, (1968).
6. В.И.Волосов, А.В.Комин. Об одном методе нагрева электронов в замкнутой магнитной ловушке. ЖТФ, № 5, (1968).
7. В.И.Волосов, В.Е.Пальчиков, Ф.А.Цельник. О пролетных колебаниях электронов в магнитной ловушке. ЖТФ, (1968) (в печати).
8. В.И.Волосов, В.Е.Пальчиков, Ф.А.Цельник. О некоторых особенностях поведения вращающейся плазмы в ловушке с магнитными пробками ДАН СССР, (1968) (в печати).

1. С.Н.Родионов. Экспериментальная проверка поведения заряженных частиц в магнитных ловушках. Атомная энергия т.6, стр.623, (1959).
2. А.Н.Дубинина, Л.Я.Трайнин, Б.В.Чириков. Ловушка с магнитными пробками, рассчитанная на длительное удержание электронов. ЖЭТФ, т.49, стр.373, (1965).
3. А.Н.Дубинина, Л.С.Красицкая. Определение параметра адиабатичности R_L/R при движении электрона в аксиально-симметричной магнитной ловушке. Письма ЖЭТФ, т.5, стр.230, (1967).
4. А.Н.Дубинина, Ю.Н.Юдин. Движение заряженных частиц в аксиально-несимметричной ловушке пробочной конфигурации. ЖЭТФ, т.52, № 10, 1967.
5. В.Г.Пономаренко, Л.Я.Трайнин, В.И.Юрченко, А.Н.Яснецкий. Экспериментальное исследование процессов движения отдельных заряженных частиц в ловушке с магнитными пробками. ЖЭТФ, (1968), (в печати).

1 У. ИЗУЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ЩЕЛОЧНОЙ ПЛАЗМЕ

IV - 1,2

1. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И. Эйдельман. Исследование токовой неустойчивости в неоднородной плазме. Ядерный синтез, т.6, № 4, стр.255, (1966).
2. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов. Возбуждение ионно-звуковых волн в калиевой и цезиевой плазме. ТВТ т.4, № 1, стр. 27, (1966).
3. Н.С.Бучельникова. Диффузия поперек магнитного поля при "универсальной" неустойчивости. Ядерный синтез, т.6, № 2, стр.122, (1966).
4. N.S. Buchelnikova, R.A. Salimov, Yu. I. Eidelman.
The investigation of inhomogeneous plasma instabilities. Proc. Conf. Phys. Quiescent Plasmas, v. I, p. 129, Frascati, (1967)

5. N.S. Buchelnikova , R.A. Salimov , Yu.I. Eidelman.
The current instability in potassium plasma.
Proc. Conf. Phys. Quiescent Plasmas,
v. I . p. 137, Frascati , (1967)
6. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. Исследование турбулентной плазмы при ионно-звуковой неустойчивости. ЖЭТФ, т.52, №2, стр.387, (1967).
7. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. Исследование турбулентного состояния плазмы при дрейфовой неустойчивости. ЖЭТФ т.52, № 4, стр.838(1967).
8. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. Возбуждение ионно-звуковой неустойчивости в неоднородной плазме. ЖТФ, т.37, № 8, стр.1477, (1967).
9. A.M. Kudzyavtsev , N.S. Buchelnikova.
Investigation of interaction of electron-ion beam with potassium plasma. Proc. VIII. Conf. on Phenomena in Ionized Gases , Vienna , (1967)
10. N.S. Buchelnikova , R.A. Salimov , Yu.I. Eidelman.
Investigation of ion-cyclotron instability in potassium plasma. Proc. VIII. Conf on Phenomena in Ionized Gases , Vienna , (1967)
11. Н.С.Бучельникова. Исследование неустойчивостей в термически-ионизированной плазме. Обзорный доклад на УШ Международной конференции по явлениям в ионизированных газах. Вена, 1967.

12. А.М.Кудрявцев, Н.С.Бучельникова. Взаимодействие электронного и ионного пучка с калиевой плазмой. ПМТФ, № 6, стр.50, (1967).
13. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов. Неустойчивость сильно-неоднородной плазмы. ЖТФ, т.38. № 4, (1968).
14. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов. Диффузия при неустойчивости сильно-неоднородной плазмы. ЖТФ, т.38, № 6, (1968).
15. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. Дрейфовая неустойчивость в разреженной и плотной плазме. ПМТФ, № 3, (1968).
16. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. Исследование ионно-циклотронной неустойчивости в калиевой плазме. ПМТФ, № 4, (1968).
17. А.М.Кудрявцев, В.Т.Астрелин, Н.С.Бучельникова, А.А.Дроздов, Ю.И.Эйдельман. Низкочастотные неустойчивости, возбуждаемые при взаимодействии электронного пучка с калиевой плазмой. ЖЭТФ, (1968) (в печати).
18. А.М.Кудрявцев, В.Т.Астрелин, Н.С.Бучельникова, А.А.Дроздов, Ю.И.Эйдельман. Высокочастотная пучковая неустойчивость в калиевой плазме. ЖЭТФ, (1968) (в печати).
19. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов. Турбулентная диффузия ионов при токовой неустойчивости. ЖЭТФ, (1968) (в печати).
20. А.В.Гуревич, Р.А.Салимов, Н.С.Бучельникова. Исследование устойчивого состояния разреженной плазмы в Q - машине. ТВТ, (1968) (в печати).
21. А.В.Гуревич, Р.А.Салимов, Н.С.Бучельникова. Нелинейные релаксационные колебания плазмы в Q -машине. ТВТ, (1968) (в печати).

У. ПОЛУЧЕНИЕ СИЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ

V - 1,2

1. S.G. Alikhanov, E.L. Boyazintsev, B.S. Estzin, V.A. Koznirov, T.S. Melnikova. Investigation of decay of a dense hydrogen plasma. Proc. VIII. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Vienna, (1967)
2. S.G. Alikhanov, E.L. Boyazintsev, I.K. Konkashbaev, V.A. Koznirov. High current discharge in nitrogen. Proc. VIII. Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Vienna, (1967)

3. С.Г.Алиханов, И.К.Конкашбаев, Б.С.Эстрин. Эксперименты с высоко- точной импульсной дугой. ТВТ, т.5, стр. 410, (1967).
4. С.Г.Алиханов, И.Л.Бояринцев, И.К.Конкашбаев, В.А.Корнилов. Омиче- ский нагрев плотной водородной плазмы. ПМТФ д.4, стр. 121, (1967).
5. С.Г.Алиханов, Э.Л.Бояринцев, В.А.Корнилов, Т.С.Мельникова. Исследо- вание быстрого импульсного разряда в водороде. ТВТ, д.5, стр.970, (1967).
6. С.Г.Алиханов. Радиационная неустойчивость ограниченной плазмы. ДАН СССР, т.174, в.6, стр.1300, (1967).
7. С.Г.Алиханов, Е.П.Маточкин, А.С.Мирзоян, А.А.Подминогин. Получение интенсивных ионных потоков малой длительности. ПТЭ 6, стр. 20, (1967).
8. С.Г.Алиханов, Г.Н.Кичигин, И.К.Конкашбаев. Импульсная термоядерная система с плотной плазмой. Атомная энергия т. 25, в.1, (1968).
9. С.Г.Алиханов, Г.И.Будкер, Г.Н.Кичигин, А.В.Комин. Схлопывание ме- таллической оболочки под действием магнитного поля., т.4, стр.38, (1966).
10. С.Г.Алиханов, В.Г.Белан, Г.И.Будкер, А.И.Иванченко, Г.Н.Кичигин. Получение мегагаусных полей методом магнитодинамической кумуляции. Атомная энергия. т.23, стр.536, (1967).
11. В.Г.Белан, А.Е.Войтенко, А.И.Иванченко. Получение больших импульс- ных давлений. ПМТФ, т.1, стр.95 (1968).
12. С.Г.Алиханов, В.Г.Белан, А.И.Иванченко, В.Н.Карасюк, Г.Н.Кичигин. Получение импульсных мегагаусных полей сжатием металлического ци- линдра в конфигурации Z - пинч. *J. of Physics E.*, v. I. № 5, (1968).
13. С.Г.Алиханов, В.Г.Белан, Р.З.Сагдеев. О нелинейных ионно-акустических волнах в плазме. Письма ЖЭТФ, т.7, в.11, (1968).

V - 3

1. Е.И.Биченков и др. Эксперименты со взрыво-магнитным генератором в лабораторных условиях. ДАН СССР, (1968) (в печати).

2. А.Е.Войтенко. Сильные ударные волны в воздухе. ЖТФ, т. 36. № 1, стр.178, (1966).
3. А.Е.Войтенко. Ускорение газа при его сжатии в условиях остроугольной геометрии. ПМТФ, № 4, стр.112, (1966).
4. А.Е.Войтенко, О.П.Соболев. Некоторые случаи ускорения магнитогидродинамической ударной волны. ПМТФ, № 2, стр. 51, (1968).

THEORETICAL AND EXPERIMENTAL WORKS ON PLASMA PHYSICS
CARRIED OUT IN THE INSTITUTE OF NUCLEAR PHYSICS
DURING 1967-1968

1. THEORETICAL INVESTIGATIONS

- I. Plasma with Large Mean Free Path in Toroidal Systems
(A.A.Galeev, R.Z.Sagdeev)
2. Magnetic Surfaces in Stellarator
(A.A.Galeev, G.E.Vekstein, G.M.Zaslavsky, A.V.Komin,
L.S.Krasitskaja, K.K.Lobashev, V.P.Minaev, R.Z.Sagdeev,
V.G.Ustjuzhaninov, N.N.Filonenko)
3. Instabilities and Transformations of Waves in Non-Uniform Plasma
(N.S.Erokhin, V.E.Zakharov, S.S.Moiseev, A.M.Fridman)
4. Numerical Calculation of Non-Linear Waves Evolution
(Ju.A.Berezin, V.I.Karpman, R.Kh.Kurtmullaev, R.Z.Sagdeev)
5. Non-Linear Waves Evolution in Dispersive Media
(V.I.Karpman, V.P.Sokolov)
6. Waves Stability in Non-Linear Media and Theory of Waves
Self-Focusing
(V.E.Zakharov)
7. Propagation and Stability of Waves in Media
(G.E.Vekstein, G.M.Zaslavsky, V.E.Zakharov, S.S.Moiseev,
N.N.Filonenko, A.M.Fridman)
8. Theory of Weak Turbulence
(V.E.Zakharov, N.N.Filonenko)
9. Conditions of Stochastic Irreversibility in Non-Linear
Plasma Theory
(G.M.Zaslavsky, R.Z.Sagdeev, N.N.Filonenko)

10. Investigation on Non-Linear Oscillations Stability
(Ph.M.Izrailev, E.M.Krushkal, B.V.Chirikov)

11. Astrophysical Application of Plasma Physics Methods
(V.Z.Gurovich, A.M.Fridman)

II. EXPERIMENTAL WORKS ON COLLISIONLESS SHOCKS

1. Investigation of Collisionless Shocks on UN-4 Device
(N.I.Alinovsky, V.G.Eselevich, R.Kh.Kurtmullaev, N.A.Koshilev,
V.L.Masalov, K.I.Mekler, V.I.Pilsky, R.Z.Sagdeev, V.N.Semenov)

2. Investigation of Quasi-Stationary Shocks Structure on
"Cosmos" Device
(G.G.Dolgov-Saveljev, E.P.Krugljakov, A.I.Kurbatov,
V.K.Malinovsky, Ju.E.Nesterikhin, R.Z.Sagdeev)

Methods of Plasma Soft X-Rays Diagnostics
(G.G.Dolgov-Saveljev, V.E.Panchenko)

3. Investigations of Non-Linear Ion-Acoustic Waves on "Volna" Device
(S.G.Alikhanov, V.G.Belan, G.N.Kichigin, R.Z.Sagdeev)

4. Experiments with Strong Shocks
(V.A.Kapitonov, V.A.Kornilov, V.M.Lagunov, Ju.E.Nesterikhin,
A.N.Papyrin, A.G.Ponomarenko, V.M.Fedorov)

5. UN-6 Device for Investigation of Longitudinal Shocks
(R.Kh.Kurtmullaev, V.N.Lukjanov, R.Z.Sagdeev, M.A.Stcheglov)

III. INVESTIGATIONS OF MAGNETIC TRAPS

1. Closed Magnetic Trap- Stellarator
(V.I.Bocharov, V.I.Volosov, A.V.Komin, V.M.Panasjuk, Ju.N.Judin)

2. Magnetic Mirror Machine with Radial Electric Field
(S.G.Konstantinov, O.K.Myskin, A.F.Sorokin, F.A.Zelnik)

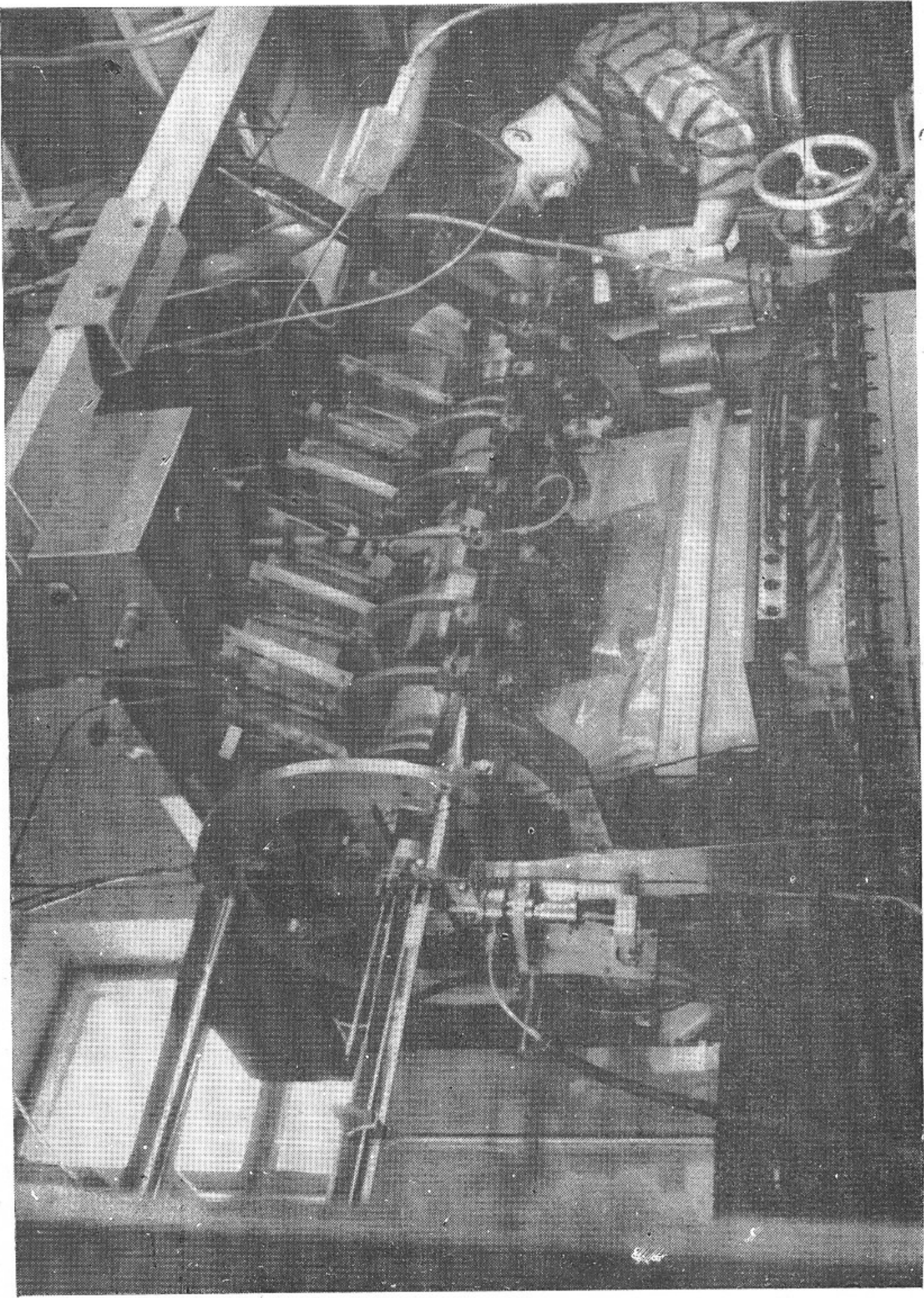
3. Magnetic Mirror Machine with Relativistic Electrons
(V.E.Palchikov)
4. Toroidal Magnetic Trap - "Spiral"
(S.G.Alikhanov, N.D.Romashko, S.L.Andreev, A.I.Ivanchenko)
5. Investigation of Single-Particle Containment in Mirror Systems
(A.N.Dubinina, L.S.Krasitskaja, Ju.N.Judin, V.G.Ponomarenko,
L.Ja.Trainin, V.I.Jurchenko, A.N.Jasnetsky)

IV. INVESTIGATION OF STABILITY AND TURBULENCE OF ALKALI PLASMA

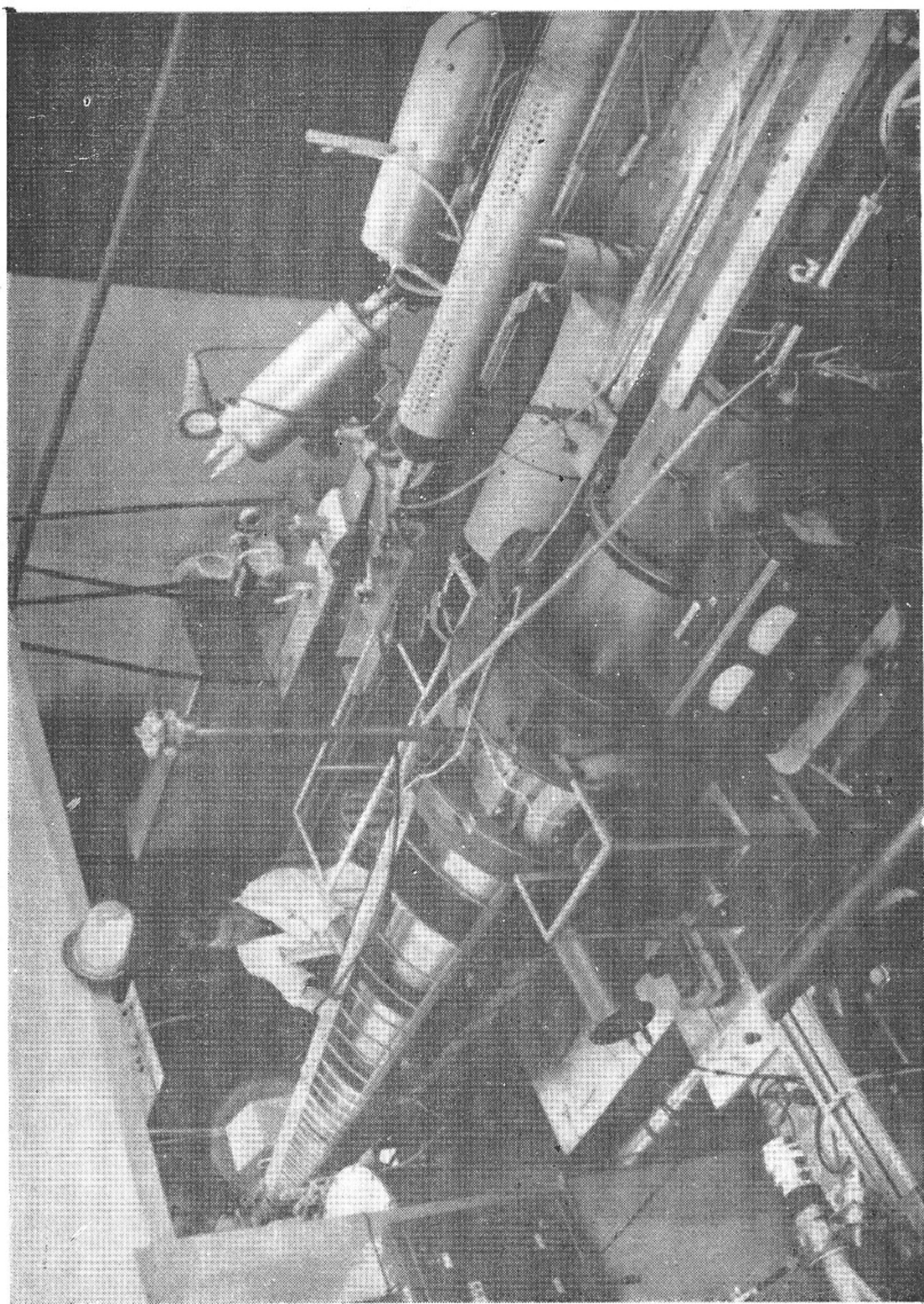
1. Investigation of Current-Induced Instability
(R.A.Salimov, N.S.Buchelnikova)
2. Investigation of Instabilities Induced by Electron Beam
(A.M.Kudrjavzev, V.T.Astrelin, N.S.Buchelnikova,
A.A.Drozdov, Ju.I.Eidelman)

V. PRODUCTION OF HIGH MAGNETIC FIELDS AND INVESTIGATION OF DENSE PLASMA

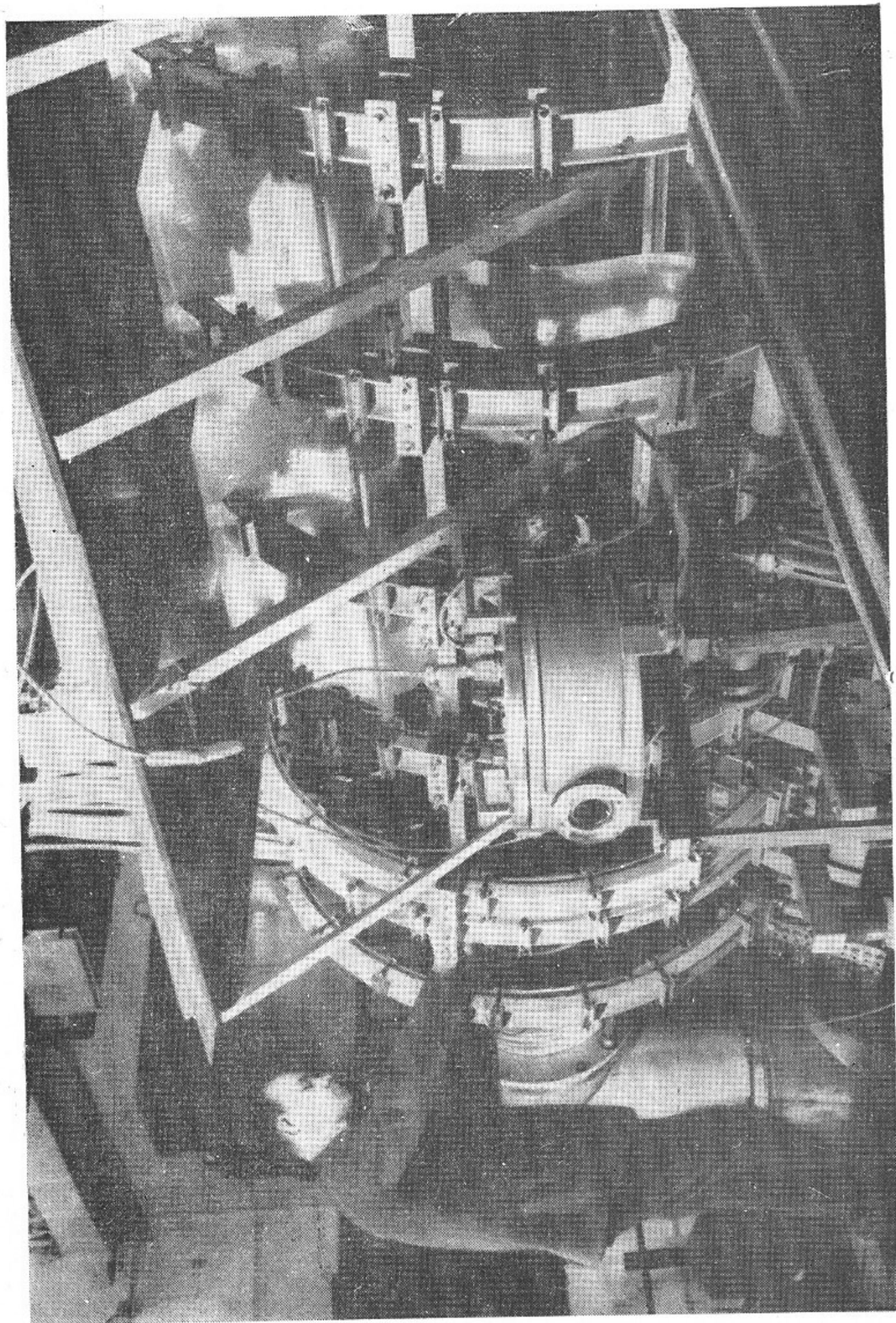
1. Production of Megagauss Magnetic Fields by Magnetodynamical
Cumulation
(S.G.Alikhanov, V.G.Belan, A.I.Ivanchenko, G.N.Kichigin)
2. Ohmic Heating and Stability of Dense Plasma
(S.G.Alikhanov, E.L.Bojarintsev, I.K.Konkashbaev,
V.A.Kornilov, T.S.Melnikova)
3. Explosives Use in Plasma Experiments
(E.I.Bichenkov, A.E.Voitenko, Ju.E.Nesterikhin, O.P.Sobolev)



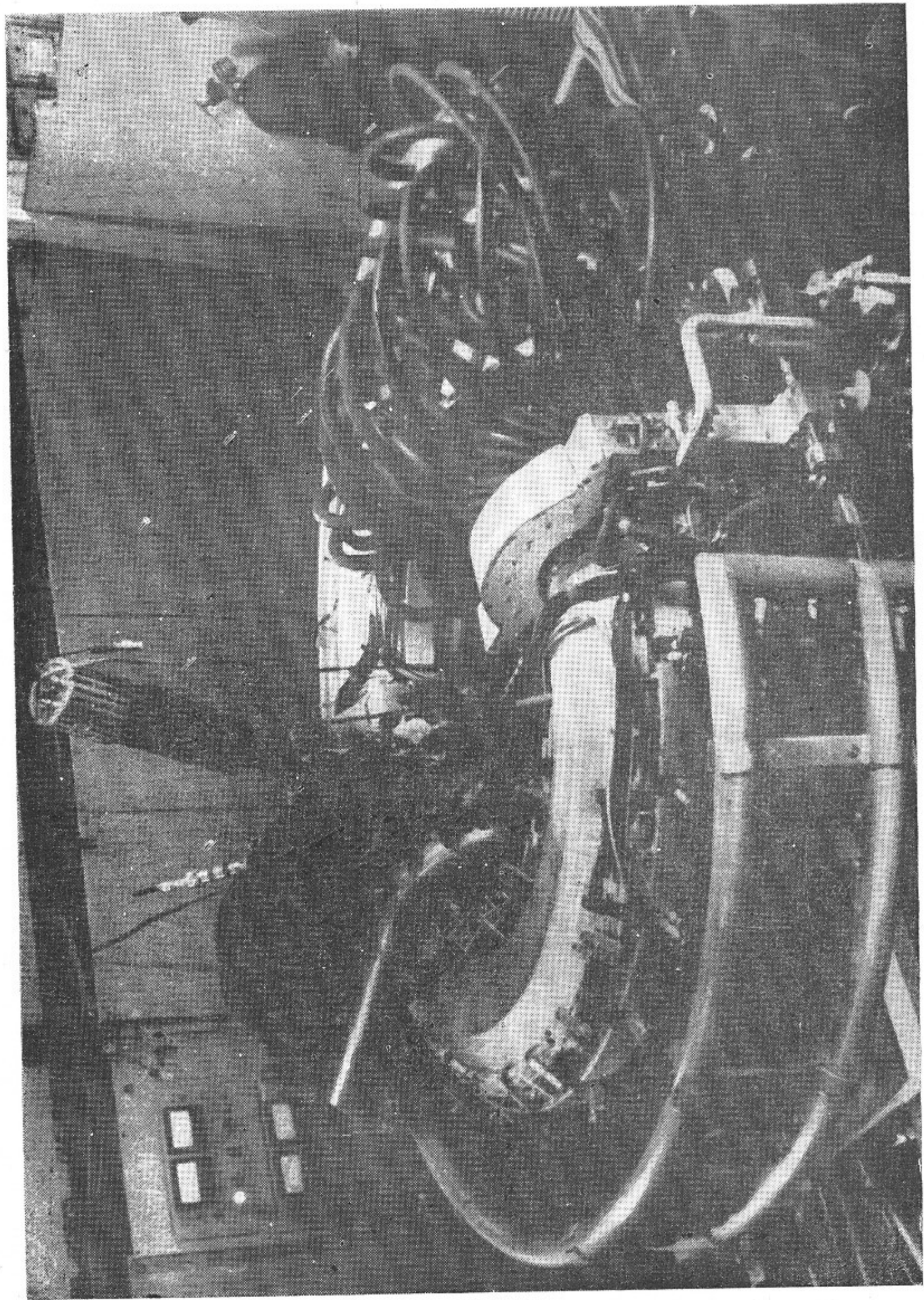
Установка УН-4.



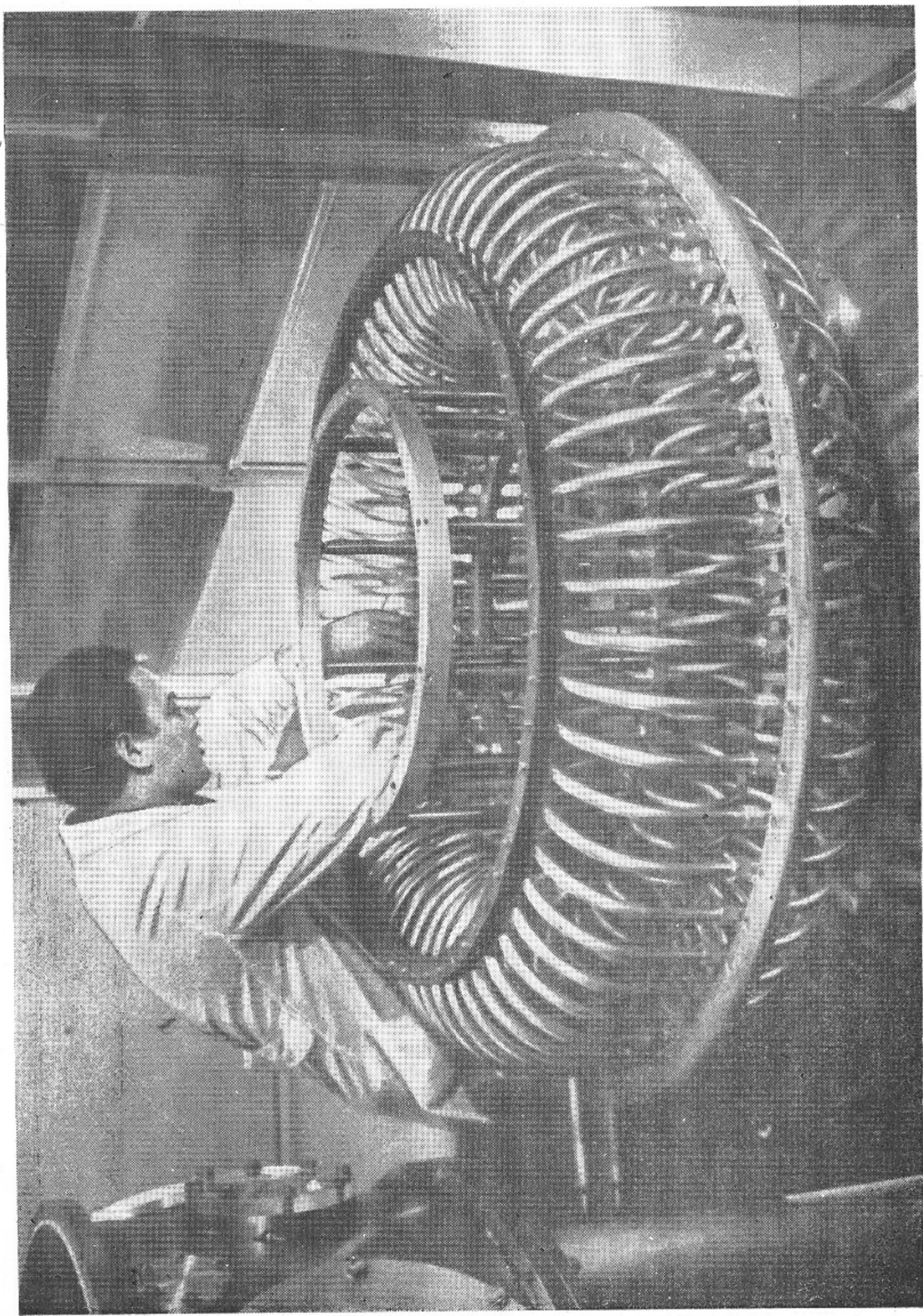
Установка «Космос».



Установка УН-6.



Стелларатор.



Установка «Спираль».

Ответственный за выпуск Р.И.СОЛОУХИН
Подписано к печати 4.У1-1968 г.
Усл. 4 печ. л., тираж 400 экз.
Заказ № 218, бесплатно. вг

Отпечатано на ротапинтере в ИЯФ СО АН СССР